



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

**Προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο επιδράσεων
διεσπαρμένης παραγωγής σε δίκτυα διανομής με χρήση
ψηφιακών μοντέλων και πραγματικού εξοπλισμού**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Παναγιώτης Χ. Κοτσαμπόπουλος

Αθήνα, Απρίλιος 2017



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

**Προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο επιδράσεων
διεσπαρμένης παραγωγής σε δίκτυα διανομής με χρήση
ψηφιακών μοντέλων και πραγματικού εξοπλισμού**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Παναγιώτης Χ. Κοτσαμπόπουλος

Συμβουλευτική Επιτροπή : Νικόλαος Δ. Χατζηαργυρίου

Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς

Σταύρος Α. Παπαθανασίου

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 25^η Απριλίου 2017.

.....
Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κωνσταντίνος Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σταύρος Παπαθανασίου
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

.....
Νικόλαος Βοβός
Καθηγητής Παν. Πατρών

.....
Πάυλος Γεωργιάκης
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Προυσαλίδης
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2017

.....

Παναγιώτης Χ. Κοτσαμπόπουλος

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

Copyright © Παναγιώτης Χ. Κοτσαμπόπουλος, 2017.

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.

“We shall not cease from exploration, and the end of all our exploring will be to arrive where we started and know the place for the first time.”

T. S. Eliot

*Στην αγαπημένη μου κόρη... που ο ερχομός της φώτισε τη ζωή μας
Στην αγαπημένη μου σύζυγο... για την αμέριστη συμπαράσταση και ζεστασιά της
Στους γονείς μου... με ευγνωμοσύνη για την αγάπη τους
Στα αδέρφια μου... για τη συντροφικότητα μας*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της διδακτορικής διατριβής είναι η εφαρμογή της προσομοίωσης σε πραγματικό χρόνο σε μελέτες επίδρασης της Διεσπαρμένης Παραγωγής (ΔΠ) στα δίκτυα διανομής και ειδικότερα της μεθόδου Power Hardware in the Loop (PHIL), κατά την οποία πραγματικός εξοπλισμός ισχύος (π.χ. αντιστροφέας φωτοβολταϊκών) συνδέεται σε προσομοιωμένο σύστημα. Παρουσιάζεται η μέθοδος PHIL και εξηγείται ο πιθανός μελλοντικός της ρόλος στις εργαστηριακές δοκιμές και στη μελέτη φαινομένων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Παρουσιάζεται το πρόβλημα της ευστάθειας της PHIL μεθόδου, οι βασικές μέθοδοι εκτίμησης και επίτευξης της ευστάθειας, καθώς και μέθοδοι εκτίμησης της ακρίβειας. Προτείνεται νέα μέθοδος επίτευξης ευστάθειας διατηρώντας καλή ακρίβεια, που επιτρέπει τη σύνδεση δοκιμίου μικρότερης ισχύος για την εκτίμηση της συμπεριφοράς του δοκιμίου πλήρους ισχύος. Αναλύονται θέματα ευστάθειας και γίνεται ποσοτικοποίηση της βελτίωσης της ακρίβειας από τη χρήση της μεθόδου. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται σύγχρονοι έλεγχοι παροχής επικουρικών υπηρεσιών από μονάδες ΔΠ, που αφορούν τη συνεισφορά στη ρύθμιση τάσης ($\cos\phi(P)$ και $Q(V)$ έλεγχος) και στη ρύθμιση συχνότητας ($P(f)$ έλεγχος, εικονική αδράνεια) και εξηγείται το ζήτημα της ευστάθειας του $Q(V)$ ελέγχου. Γίνεται ανασκόπηση διεθνών προτύπων/οδηγιών, συγκριτική ανάλυση και αναγνώριση ελλείψεων που αφορά τη ρύθμιση τάσης σε μόνιμη κατάσταση, τη συμπεριφορά σε μεταβατική κατάσταση και τη ρύθμιση συχνότητας. Προτείνονται προηγμένες διαδικασίες δοκιμών συμβατικού τύπου και PHIL δοκιμές για επικουρικές υπηρεσίες. Εν συνέχεια, παρουσιάζεται η ανάπτυξη της PHIL εργαστηριακής διάταξης στο εργαστήριο ΣΗΕ του ΕΜΠ, οι αλγόριθμοι προστασίας του πειράματος, ορίζεται διαδικασία, τοπολογία και δίκτυο αναφοράς για PHIL δοκιμές και περιγράφονται προκαταρκτικά PHIL πειράματα. Πραγματοποιούνται ψηφιακές προσομοιώσεις προβληματικής συνεργασίας τοπικού ελέγχου τάσης ΔΠ και Συστήματος Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ). Εφαρμόζεται η προτεινόμενη μέθοδος επίτευξης ευστάθειας και ακρίβειας και πραγματοποιούνται PHIL δοκιμές συνεργασίας ΔΠ και ΣΑΤΥΦ, χρησιμοποιώντας αντιστροφέα μικρότερης κλίμακας και βγάζοντας συμπεράσματα για τον αντιστροφέα πλήρους ισχύος. Οι PHIL δοκιμές δείχνουν αλληλεπιδράσεις που δεν ήταν ορατές στις αμιγώς ψηφιακές προσομοιώσεις, φανερώνοντας τη χρησιμότητα της PHIL μεθόδου. Γίνεται επικύρωση μοντέλου ελεγκτή τάσης αντιστροφέα συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των PHIL δοκιμών και των αμιγώς ψηφιακών προσομοιώσεων. Πραγματοποιούνται PHIL δοκιμές ρύθμισης συχνότητας, όπου εξετάζεται η επίδραση του στατισμού και της εικονικής αδράνειας. Έπειτα, η PHIL μέθοδος εφαρμόζεται σε εργαστηριακές ασκήσεις για την εκπαίδευση φοιτητών σε σημαντικά θέματα της λειτουργίας των σύγχρονων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Αναπτύσσεται προηγμένη διπλή διάταξη PHIL, δημιουργώντας δύο πάγκους εργασίας, που επιτρέπει τη χρήση πραγματικού εξοπλισμού από τους φοιτητές σε μικρές ομάδες, σε συνδυασμό με βιωματική μάθηση. Οι εργαστηριακές ασκήσεις αξιολογήθηκαν σαφώς θετικά από τους φοιτητές. Τέλος, εξετάζονται προβλήματα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών αντιστροφών ΔΠ σε ηλεκτρονικούς μετρητές που μπορούν να οδηγήσουν σε εσφαλμένη καταγραφή της ενέργειας. Γίνεται λεπτομερής ανασκόπηση των προτύπων/οδηγιών, υπογραμμίζεται το κενό στο εύρος συχνοτήτων 2 kHz - 150 kHz και περιγράφονται οι πρόσφατες εξελίξεις στην τυποποίηση και οι υπολειπόμενες

εργασίες. Παρουσιάζονται διατάξεις δοκιμών ατρωσίας και εκπομπών και πραγματοποιούνται δοκιμές ατρωσίας ηλεκτρονικών μετρητών και εκπομπών αντιστροφών.

Λέξεις Κλειδιά: Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, διεσπαρμένη παραγωγή, εκπαίδευση, επικοινωνιακές υπηρεσίες, ευστάθεια, ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC), προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο, ρύθμιση συχνότητας, ρύθμιση τάσης, Power Hardware in the Loop (PHIL), RTDS

ABSTRACT

The subject of this doctoral thesis is the use of real-time simulation and specifically Power Hardware in the Loop (PHIL) simulation, to study the impact of distributed generation on the distribution network. PHIL simulation allows the connection of hardware power equipment (e.g. photovoltaic inverter) to a simulated network. The potential future role of PHIL simulation for laboratory testing and studying of phenomena in power systems is explained. The stability and accuracy issues of PHIL simulation, the main methods for evaluating and achieving stability and methods for accuracy estimation are presented. A new method to achieve stability is proposed, which maintains sufficient accuracy, while it allows the connection of a scaled-down device to analyse the behaviour of the full-scale device. Stability considerations are provided and the accuracy improvement by using the proposed method is quantified. Next, modern functions for the provision of ancillary services by distributed generation are presented concerning voltage control ($\cos\phi(P)$, $Q(V)$ control) and frequency control ($P(f)$ control, virtual inertia). The stability issue of $Q(V)$ control is explained. A review of recent international standards/guidelines is performed, concerning steady-state voltage support, dynamic network support and frequency control, which includes a comparative analysis and identification of gaps. Advanced testing procedures using conventional approaches are proposed, along with PHIL test procedures. Subsequently, the development of the PHIL environment at the Electric Energy Systems laboratory of NTUA is described, which includes the protection schemes applied and preliminary PHIL experiments are presented. A benchmark system for PHIL testing is proposed, which includes reference test procedure, setup and network. Problematic interactions between local voltage controller of distributed generation and On-Load Tap Changer (OLTC) are examined with pure digital simulations. The proposed method to achieve stability and accuracy is applied and PHIL tests are executed using a scaled-down photovoltaic inverter to analyse the behaviour of the full-scale inverter. The PHIL tests show interactions that were not visible at the pure digital simulations, which demonstrate the value of the PHIL approach. The model of the voltage controller of the inverter is validated by comparing the results of the PHIL tests and the pure digital simulations. PHIL tests on frequency control are performed to study the impact of droop control and virtual inertia. Next, PHIL simulation is employed for laboratory education of students on important topics of the operation of the modern power system. A double PHIL setup is developed, creating two work benches, which provides hands-on experience to the students in small groups and allows experiential learning. The assessment of the laboratory exercises by the students was clearly positive. Finally, the electromagnetic interference from inverters of distributed generation on electronic meters is analysed, which can result in energy measurement errors. A detailed review of standards/guidelines is performed, which highlights the gap in the 2 kHz - 150 kHz range and reports recent developments and remaining issues. Laboratory setups for testing immunity and emissions are described and immunity tests on electronic meters and emissions tests on inverters are performed.

Keywords: Ancillary services, distributed generation, education, electromagnetic compatibility (EMC), frequency control, Power Hardware in the Loop (PHIL), real-time simulation, renewable energy sources, RTDS, stability, voltage control

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η διδακτορική μου διατριβή έφτασε στο τέλος της μετά από αρκετά χρόνια εργασίας και επιθυμώ να ευχαριστήσω όσους βοήθησαν στην πραγματοποίηση της με διάφορους τρόπους.

Καταρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα της εργασίας καθηγητή κ. Νίκο Χατζηαργυρίου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στο να αναλάβω ένα σχετικά καινούργιο θέμα, την άριστη καθοδήγηση σε όλα τα στάδια της εργασίας και την ελευθερία σκέψης και δράσης που μου παρείχε ώστε να εντάξω τα προσωπικά μου ενδιαφέροντα. Η στάση του ως επιστήμονας και ως συντονιστής αποτελεί πρότυπο και η αφοσίωση του πηγή έμπνευσης.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής καθηγητή κ. Κ. Βουρνά και αναπλ. καθηγητή κ. Στ. Παπαθανασίου για τις χρήσιμες υποδείξεις τους και το ενδιαφέρον τους. Είχα την τύχη να παρακολουθήσω τα μεταπτυχιακά μαθήματα του κ. Βουρνά στα οποία έκανα και τις πρώτες μου δυναμικές προσομοιώσεις. Ο κ. Παπαθανασίου με συμβούλεψε ορθά σε διάφορες φάσεις της διατριβής και επίσης παρείχε πολύτιμες συμβουλές για την ανάπτυξη του εργαστηρίου μας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της επταμελούς επιτροπής καθηγητή κ. Γ. Κορρέ, καθηγητή κ. Ν. Βοβό, επικ. καθηγητή κ. Π. Γεωργιλάκη και αναπλ. καθηγητή κ. Ι. Προυσαλίδη για τις χρήσιμες υποδείξεις τους. Ο κ. Κορρές είχε εργαστεί με το RTDS πριν από εμένα και είχα τη χαρά να συνεργαστώ μαζί του σε ερευνητικά προγράμματα. Επίσης, διέθεσε τον ψηφιακό ηλεκτρονόμο για τις εργαστηριακές ασκήσεις που περιγράφονται στην εργασία. Ο κ. Βοβός παρείχε πολύτιμες παρατηρήσεις στην ενδιάμεση κρίση που βοήθησαν στην ουσιαστική βελτίωση της εργασίας. Ευχαριστώ τον κ. Γεωργιλάκη για τις παρατηρήσεις του, αλλά και για την ενθάρρυνση, το θετικό πνεύμα του και την αγάπη του για το αντικείμενο. Ο κ. Προυσαλίδης ήταν από τους λίγους που γνώριζαν την PHIL μέθοδο όταν ξεκίνησα τη διατριβή και το ενδιαφέρον που έδειξε για το θέμα και γενικά την πειραματική δουλειά ήταν ενθαρρυντικό.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον υποψήφιο διδάκτορα Βασίλη Κλεφτάκη του οποίου η εξαιρετική διπλωματική εργασία βοήθησε στην ανάπτυξη της PHIL διάταξης. Στη συνέχεια ο Βασίλης έγινε ο καλύτερος χειριστής του RTDS και η στενή μας συνεργασία οδήγησε σε καλά ερευνητικά αποτελέσματα. Πολλές ευχαριστίες οφείλω στον υποψήφιο διδάκτορα Αθανάσιο Βασιλάκη (ο οποίος δεν σταματά να με ξαφνιάζει με το εύρος των γνώσεων του) για τις πολλές εποικοδομητικές συζητήσεις μας και την επίλυση αποριών μου σε αρκετά ζητήματα.

Είχα την τύχη να εργαστώ ως επισκέπτης ερευνητής για πέντε μήνες στο ερευνητικό κέντρο Austrian Institute of Technology (AIT) στη Βιέννη, όπου εκπόνησα σημαντικό μέρος της ερευνητικής μου εργασίας. Θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τους εξαιρετικούς ερευνητές και ανθρώπους Felix Lehfuss, Georg Lauss, Benoit Bletterie και Dr. Thomas Strasser για την άριστη συνεργασία που είχαμε. Με τους Felix Lehfuss και Georg Lauss βίωσα ανεπανάληπτες περιπέτειες στο εργαστήριο και οι Benoit Bletterie και Thomas Strasser με

καθοδήγησαν αποτελεσματικά. Οι Αυστριακοί συνάδελφοι με δίδαξαν επίσης τη σημασία της αισθητικής απόλαυσης μέσω της τέχνης μετά από ένα πετυχημένο πείραμα.

Επίσης, οφείλω να ευχαριστήσω τους ερευνητές Jörg Kirchhof και Yichuan Zhang του ερευνητικού κέντρου Fraunhofer IWES στη Γερμανία για τη πραγματοποίηση δοκιμών ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας στα πλαίσια ερευνητικής μου επίσκεψης και για τη συνεργασία μας γενικότερα.

Θέλω να ευχαριστήσω επίσης τον καθηγητή του τμήματος επιστημών προσχολικής αγωγής και εκπαίδευσης του ΑΠΘ κ. Αλέξανδρο Γεωργόπουλο για τις πολύτιμες συμβουλές του σε θέματα βιωματικής εκπαίδευσης. Επίσης, τον υποψήφιο διδάκτορα του εργαστηρίου μας Αλέξανδρο Ρήγα για τη συνεργασία μας σε θέματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, για τη βελτίωση του αλγορίθμου του ενισχυτή ισχύος και για τη διπλωματική του εργασία σε σχετικό θέμα. Επίσης, τον ερευνητή του εργαστηρίου Μάριο Μανιατόπουλο για τη σημαντική υποστήριξη του στις εργαστηριακές ασκήσεις. Τον ερευνητή/σύμβουλο Βασίλη Καραπάνο για τις πολύτιμες συμβουλές του κατά την ανάπτυξη της PHIL διάταξης και για τη μετέπειτα συνεργασία μας σε θέματα εικονικής αδράνειας. Τον ερευνητή του εργαστηρίου Αχιλλέα Μάρκου και τον υποψήφιο διδάκτορα Ιάσονα Κουβελιώτη-Λυσικάτο για τη βοήθεια τους στις εργαστηριακές ασκήσεις, καθώς και για τις εξηγήσεις του πρώτου σε θέματα ΣΑΕ και για τις συμβουλές του δεύτερου σε θέματα smart grids. Τον υποψήφιο διδάκτορα Γιώργη Μεσσήνη για τη συνεργασία μας στα πρώτα στάδια της εργασίας, καθώς και τους Δρ. Άρη Δημέα, Δρ. Αλεξία Καπετανάκη, υποψήφιο διδάκτορα Δημήτρη Λαγό και Φοίβο Παλαιογιάννη για τη συνεργασία μας σε διάφορα θέματα. Επίσης, τον υποψήφιο διδάκτορα Βασίλη Παπασπηλιωτόπουλο για τη βοήθεια στις εργαστηριακές ασκήσεις, καθώς και τον Δρ. Χρήστο Αποστολόπουλο, από τον οποίο παρέλαβα τα «κλειδιά» του RTDS μαζί με σημαντικές συμβουλές το 2010. Επίσης, τους Γιώργο Κατσαρό και Νίκο Κορρέ για την άμεση τεχνική τους υποστήριξη όποτε χρειαζόταν. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον υποψήφιο διδάκτορα και φίλο Κώστα Λατούφη, συνεπιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, για τη μύηση μου στη πρακτική μηχανική, την αγάπη του για τις κατασκευές και το πείραμα και την παρότρυνση του να ξεκινήσω το διδακτορικό.

Σε αυτό το σημείο θέλω να υπογραμμίσω πως το κλίμα συνεργασίας στην ερευνητική μας ομάδα όλα αυτά τα χρόνια είναι πραγματικά αξιοθαύμαστο και είναι κάτι για το οποίο αισθάνομαι ιδιαίτερα τυχερός. Ευχαριστώ όλα τα μέλη της ομάδας για τη συμβολή τους σε αυτό.

Επίσης, αυτά τα χρόνια συνεπέβλεψα υπό την εποπτεία του κ. Χατζηαργυρίου αρκετές διπλωματικές εργασίες. Θέλω να ευχαριστήσω όλους τους αποφοίτους, από τη συνεργασία με τους οποίους έμαθα πολλά, και ιδιαίτερα τον Δημήτρη Μπαράκο.

Το μεγαλύτερο ευχαριστώ δεν αρκεί για τη σύζυγο μου που επωμίστηκε δυσανάλογο βάρος και στην οποία μεταβιβάζω τα συγχαρητήρια σε κάθε ευκαιρία. Η γέννηση και το μεγάλωμα της κόρης μας μας χάρισε πάρα πολλές στιγμές ευτυχίας και συγκίνησης και μου έδωσε επίσης τη χαρά να διακόπτω τη συγγραφή και να εξασκώμαι στη βρεφική φροντίδα. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω από καρδιάς τους γονείς μου για την υποστήριξη τους, όπως και τα αδέρφια μου. Επιπλέον ευχαριστίες στον πατέρα μου που με βοήθησε να εκφράσω με σαφήνεια τις σκέψεις μου.

Κλείνω με την ευχή η εργασία αυτή να συμβάλλει έστω και λίγο στον περιορισμό των οικολογικών προβλημάτων και στη βελτίωση των εκπαιδευτικών πρακτικών στο πανεπιστήμιο και γενικότερα.

Πάνος Κοτσαμπόπουλος

Αθήνα, Απρίλιος 2017

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	vi
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	xii
ΛΙΣΤΑ ΣΥΝΤΜΗΣΕΩΝ.....	xiii
ΛΙΣΤΑ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	xiv
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1) Εισαγωγή	1
1.2) Η εξέλιξη των ψηφιακών προσομοιώσεων και των εργαστηριακών δοκιμών	1
1.3) Η προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο και η μέθοδος Hardware in the Loop	3
1.4) Η μέθοδος Controller Hardware in the Loop	5
1.5) Αντικείμενο και επισκόπηση της διατριβής	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Η ΜΕΘΟΔΟΣ POWER HARDWARE IN THE LOOP: ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΚΑΙ ΑΚΡΙΒΕΙΑ	11
2.1) Εισαγωγή	11
2.2) Η μέθοδος Power Hardware in the Loop	12
2.2.1) Ενισχυτές ισχύος.....	13
2.2.2) Παράδειγμα ηλεκτρικής και μηχανικής PHIL προσομοίωσης.....	14
2.3) Ευστάθεια της PHIL μεθόδου	15
2.3.1) Μέθοδοι εκτίμησης της ευστάθειας.....	19
2.4) Ακρίβεια της PHIL μεθόδου	22
2.5) Μέθοδοι επίτευξης ευστάθειας και ακρίβειας: τοπολογίες και αλγόριθμοι.....	24
2.6) Προτεινόμενη μέθοδος επίτευξης ευστάθειας και ακρίβειας με αλλαγή κλίμακας ...	26
2.6.1) Επίδραση της αλλαγής κλίμακας στην ευστάθεια	29
2.6.2) Ελάχιστη μετατοπιζόμενη σύνθετη αντίσταση.....	32
2.6.3) Πρακτική προσέγγιση	32
2.6.4) Ποσοτικοποίηση της ακρίβειας	33
2.7) Εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου σε δίκτυο διανομής με ΔΠ	36
2.8) Σύνοψη και συμπεράσματα	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΕΠΙΚΟΥΡΙΚΕΣ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ: ΜΕΘΟΔΟΙ, ΠΡΟΤΥΠΑ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΔΟΚΙΜΩΝ	43
3.1) Εισαγωγή	43
3.2) Συμβολή της ΔΠ στη ρύθμιση τάσης	44
3.2.1) Μέθοδοι αντιμετώπισης της ανύψωσης τάσης	49
3.2.2) Ευστάθεια του Q(V) ελεγκτή τάσης μονάδων ΔΠ	51
3.3) Συμβολή της ΔΠ και αποθήκευσης στη ρύθμιση συχνότητας	54
3.3.1) Καμπύλη στατισμού P(f)	55

3.3.2) Εικονική αδράνεια	55
3.4) Ανασκόπηση διεθνών προτύπων/οδηγιών, συγκριτική ανάλυση και αναγνώριση ελλείψεων	58
3.4.1) Ρύθμιση τάσης σε μόνιμη κατάσταση	60
3.4.1.1) Απαιτήσεις αέργου ισχύος και διαγράμματα ενεργού-αέργου ισχύος.....	60
3.4.1.2) Q(V) έλεγχος.....	64
3.4.2) Στήριξη του δικτύου σε μεταβατική κατάσταση	67
3.4.3) Ρύθμιση συχνότητας	67
3.5) Προτάσεις προηγμένων δοκιμών για την παροχή επικουρικών υπηρεσιών από ΔΠ. 68	
3.5.1) Υφιστάμενες διαδικασίες δοκιμών	69
3.5.2) Προτεινόμενες προηγμένες δοκιμές συμβατικού τύπου.....	69
3.5.2.1) P-Q διάγραμμα.....	70
3.5.2.2) Q(V) έλεγχος σε μόνιμη κατάσταση και συμμετρική λειτουργία.....	71
3.5.2.3) Q(V) έλεγχος σε ασύμμετρη λειτουργία.....	71
3.5.2.4) Q(V) έλεγχος σε μεταβατική κατάσταση.....	72
3.5.2.5) Περιορισμός ενεργού ισχύος για ρύθμιση τάσης.....	74
3.5.2.6) Ρύθμιση συχνότητας (υποσυχνότητα, μεταβατική κατάσταση, αδράνεια)..	74
3.5.3) Προτεινόμενες PHIL δοκιμές	76
3.5.3.1) Συνεργασία μεταξύ ΣΑΤΥΦ και ΔΠ με δυνατότητα ρύθμισης της τάσης..	76
3.5.3.2) P(f) έλεγχος και παροχή εικονικής αδράνειας	78
3.6) Σύνοψη και συμπεράσματα	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ POWER HARDWARE IN THE LOOP.....	81
4.1) Εισαγωγή.....	81
4.2) Χαρακτηριστικά του εξοπλισμού	82
4.2.1) Ψηφιακός Προσομοιωτής Πραγματικού Χρόνου.....	82
4.2.2) Φυσικό σύστημα.....	84
4.2.3) Διεπαφή ισχύος.....	86
4.3) Επέκταση του αλγορίθμου του ηλεκτρονικού μετατροπέα και συνάρτηση μεταφοράς.....	91
4.4) Εφαρμογή αλγορίθμων προστασίας του πειράματος	93
4.4.1) Προστασίες στον Ψηφιακό Προσομοιωτή Πραγματικού Χρόνου	93
4.4.2) Προστασίες στο λογισμικό της διεπαφής ισχύος.....	95
4.5) Καθορισμός διαδικασίας/τοπολογίας αναφοράς PHIL δοκιμών	96
4.5.1) Συστάσεις για τις προδιαγραφές του εξοπλισμού.....	96
4.5.2) Διαδικασία αναφοράς PHIL δοκιμών.....	97
4.5.3) Τοπολογία αναφοράς	100
4.5.4) Δίκτυο αναφοράς	100

4.6) Προκαταρκτικά PHIL πειράματα	102
4.6.1) PHIL υλοποίηση διαιρέτη τάσης	102
4.6.2) Σύνδεση φωτοβολταϊκού αντιστροφέα στον AC/DC/AC μετατροπέα	103
4.6.3) PHIL πείραμα με φωτοβολταϊκό αντιστροφέα και γραμμή μεγάλου μήκους ...	104
4.6.4) PHIL πείραμα με φωτοβολταϊκό αντιστροφέα σε αγροτικό δίκτυο χαμηλής τάσης	106
4.7) Σύνοψη και συμπεράσματα	109
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΚΑΙ PHIL ΔΟΚΙΜΕΣ ΓΙΑ ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ	111
5.1) Εισαγωγή	111
5.2) Προσομοιώσεις προβληματικής συνεργασίας τοπικού ελέγχου τάσης ΔΠ και ΣΑΤΥΦ	112
5.2.1) Χρονικός συντονισμός μεταξύ ΣΑΤΥΦ και Q(V) ελεγκτή	115
5.2.2) Η τάση της ΔΠ αυξάνεται εξαιτίας του ΣΑΤΥΦ και του Q(V) ελεγκτή.....	118
5.2.3) Επαναλαμβανόμενες αλλαγές λήψης του ΣΑΤΥΦ.....	119
5.2.3.1) Λειτουργία με Q(V) έλεγχο	119
5.2.3.2) Λειτουργία με $\cos\phi(P)$ έλεγχο	122
5.2.4) Ο Q(V) ελεγκτής αντιτίθεται στις αλλαγές λήψης	123
5.2.5) Ο Q(V) ελεγκτής αντιτίθεται στις αλλαγές λήψης: το ΣΑΤΥΦ λειτουργεί με αντιστάθμιση πτώσης τάσης	125
5.3) PHIL δοκιμές προβληματικής συνεργασίας τοπικού ελέγχου τάσης ΔΠ και ΣΑΤΥΦ	126
5.3.1) Προετοιμασία των PHIL δοκιμών	127
5.3.2) PHIL δοκιμές	130
5.3.2.1) Λειτουργία με $\cos\phi(P)$ έλεγχο	130
5.3.2.2) Λειτουργία με Q(V) έλεγχο	132
5.4) Επικύρωση μοντέλου ελεγκτή τάσης ΔΠ με χρήση της PHIL μεθόδου	136
5.5) PHIL δοκιμές ρύθμισης συχνότητας με ΔΠ και αποθήκευση: στατισμός και εικονική αδράνεια.....	139
5.6) Σύνοψη και συμπεράσματα	143
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ PHIL ΜΕΘΟΔΟΥ ΓΙΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟΥΣ ΣΚΟΠΟΥΣ	145
6.1) Εισαγωγή	145
6.2) Εργαστηριακή εκπαίδευση	145
6.3) Βιωματική εκπαίδευση	147
6.4) Εκπαιδευτικοί στόχοι, επιλεγμένα θέματα και μεθοδολογία	148
6.5) Διπλή διάταξη PHIL για χρήση εξοπλισμού από τους φοιτητές.....	150
6.6) Εργαστηριακές ασκήσεις.....	152

6.6.1) Παράλληλη λειτουργία σύγχρονων γεννητριών – παράλληλη λειτουργία με ΔΠ	152
6.6.2) Ρύθμιση της τάσης σε δίκτυα διανομής – συνεισφορά της ΔΠ.....	153
6.6.3) Μελέτες βραχυκυκλωμάτων – συνεισφορά αντιστροφών ΔΠ	156
6.6.4) Λειτουργία και έλεγχος μικροδικτύου	158
6.7) Αξιολόγηση των εργαστηριακών ασκήσεων από τους φοιτητές	160
6.8) Σύνοψη και συμπεράσματα	166
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΤΩΝ.....	167
7.1) Εισαγωγή	167
7.2) Παρεμβολές στους ηλεκτρονικούς μετρητές από αντιστροφείς ΔΠ.....	167
7.3) Ανασκόπηση των προτύπων/οδηγιών	168
7.3.1) Κενά στα πρότυπα εκπομπών και ατρωσίας στο εύρος 2 kHz - 150 kHz πριν την αναγνώριση του προβλήματος	169
7.3.2) Πρόσφατες εξελίξεις στην τυποποίηση	171
7.3.2.1) Ατρωσία στο εύρος 2 kHz-150 kHz.....	171
7.3.2.2) Εκπομπές κάτω από τα 150 kHz	172
7.3.3.3) Υπολειπόμενες εργασίες	174
7.4) Διατάξεις και διαδικασίες δοκιμών εκπομπών και ατρωσίας στο εύρος συχνοτήτων 2 kHz-150 kHz.....	175
7.4.1) Διατάξεις ατρωσίας.....	175
7.4.1.1) Διάταξη άμεσης (αγώγιμης) έγχυσης αρμονικών	177
7.4.1.2) Διάταξη έμμεσης έγχυσης αρμονικών	178
7.4.1.3) Το πρότυπο IEC 61000-4-19.....	179
7.4.2) Διατάξεις εκπομπών	180
7.5) Πραγματοποίηση δοκιμών	181
7.5.1) Δοκιμές ατρωσίας ηλεκτρονικών μετρητών	181
7.5.1.1) Μέθοδος έμμεσης έγχυσης στο εύρος 9 kHz-150 kHz.....	181
7.5.1.2) Μέθοδος άμεσης έγχυσης στο εύρος 9 kHz-150 kHz.....	183
7.5.1.3) Δοκιμές στο εύρος 2 kHz-9 kHz	183
7.5.2) Δοκιμές εκπομπών φωτοβολταϊκών αντιστροφών	184
7.5.3) Δοκιμές παράλληλης λειτουργίας αντιστροφέα και μετρητή	186
7.6) Σύνοψη και συμπεράσματα	187
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΣΥΝΟΨΗ, ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΣΥΜΒΟΛΗ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΣΥΝΕΧΙΣΗ.....	189
8.1) Σύνοψη και συμπεράσματα	189
8.2) Συμβολή.....	191
8.3) Προτάσεις για μελλοντική συνέχιση	193

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	195
ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ.....	211

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Σχήμα 1.1. Η εξέλιξη των ψηφιακών προσομοιώσεων και των εργαστηριακών δοκιμών: δοκιμή σε επίπεδο συστήματος	3
Σχήμα 1.2. Η μέθοδος PHIL συνδυάζει το πλεονεκτήματα των ψηφιακών προσομοιώσεων και των εργαστηριακών δοκιμών	3
Σχήμα 1.3. Ο Ψηφιακός Προσομοιωτής Πραγματικού Χρόνου RTDS® [8]	4
Σχήμα 1.4. Ο Ψηφιακός Προσομοιωτής Πραγματικού Χρόνου OPAL-RT (eMEGAsim) [9]	4
Σχήμα 1.5. Απλοποιημένες τοπολογίες της CHIL και της PHIL μεθόδου [2]	5
Σχήμα 1.6. CHIL δοκιμή μονάδων ελέγχου και προστασίας HVDC συστημάτων που εφαρμόζεται στη βιομηχανία [15]	6
Σχήμα 1.7. CHIL δοκιμή μονάδας ελέγχου που εκτελεί συντονισμένο έλεγχο τάσης σε δίκτυο διανομής: η CHIL μέθοδος συνδυάζεται με την PHIL μέθοδο για πιο ρεαλιστική λειτουργία	7

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Σχήμα 2.1. Εργαστηριακή διάταξη πραγματοποίησης PHIL πειραμάτων	11
Σχήμα 2.2. Τοπολογία PHIL διάταξης συμπεριλαμβανομένης της ανταλλαγής σημάτων και ισχύος	13
Σχήμα 2.3. Σύστημα γεννήτριας-κινητήρα-φορτίου ως διεπαφή ισχύος [23]	14
Σχήμα 2.4. PHIL διάταξη για μελέτες νησιδοποίησης και επανασυγχρονισμού [24]	15
Σχήμα 2.5. Υλοποίηση διαιρέτης τάσης σε PHIL πείραμα	16
Σχήμα 2.6. Διάγραμμα βαθμίδων PHIL πειράματος	17
Σχήμα 2.7. Διάγραμμα Nyquist στην περίπτωση όπου $R_{SW} > R_{HW}$: αστάθεια	18
Σχήμα 2.8. Δυναμική εικονική PHIL προσομοίωση που περιλαμβάνει το προσομοιωμένο σύστημα, τη διεπαφή ισχύος και το φυσικό σύστημα	18
Σχήμα 2.9. Όταν $R_{SW} > R_{HW}$ η τάση τείνει προς το άπειρο: αστάθεια	18
Σχήμα 2.10. Διάγραμμα βαθμίδων PHIL προσομοίωσης με προσέγγιση Padé δεύτερης τάξης [42][B.5]	20
Σχήμα 2.11. Προσομοίωση διαγράμματος βαθμίδων [42][B.5]	21
Σχήμα 2.12. Διάγραμμα βαθμίδων PHIL πειράματος θεωρώντας ως έξοδο την τάση του φυσικού συστήματος	23
Σχήμα 2.13. Μέθοδος αντίστασης απόσβεσης [2]	25
Σχήμα 2.14. Διάγραμμα Nyquist στην περίπτωση που $R_{SW} > R_{HW}$, έχοντας εισάγει φίλτρο στο ρεύμα ανατροφοδότησης	26
Σχήμα 2.15. Δυναμική εικονική PHIL προσομοίωση που γίνεται ευσταθής χάρη στο φίλτρο ανατροφοδότησης	26
Σχήμα 2.16. Προτεινόμενη PHIL μέθοδος: μετατόπιση σύνθετης αντίστασης και αλλαγή κλίμακας	29
Σχήμα 2.17. Διάγραμμα βαθμίδων PHIL προσομοίωσης με αλλαγή κλίμακας της τάσης	30
Σχήμα 2.18. Διάγραμμα ροής της μεθόδου μετατόπισης σύνθετης αντίστασης για την επίτευξη ευστάθειας	34
Σχήμα 2.19. Διάγραμμα βαθμίδων PHIL προσομοίωσης με διαφορετικά επίπεδα τάσης (α), διάγραμμα βαθμίδων εφαρμόζοντας τη μέθοδο μετατόπισης σύνθετης αντίστασης (β)	34
Σχήμα 2.20. Βελτίωση της ακρίβειας της PHIL προσομοίωσης με τη μέθοδο μετατόπισης σύνθετης αντίστασης	36
Σχήμα 2.21. PHIL υλοποίηση με πραγματικό Φ/Β αντιστροφέα και DC πηγή σε ρόλο δοκιμίου	36
Σχήμα 2.22. PHIL υλοποίηση: αλλαγή κλίμακας και μέθοδος μετατόπισης σύνθετων αντιστάσεων με Φ/Β αντιστροφέα	38
Σχήμα 2.23. Τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή και στην έξοδο του αντιστροφέα για το αρχικό σύστημα και το σύστημα μετά τη μετατόπιση των συνθέτων αντιστάσεων	39

Σχήμα 2.24. Διάγραμμα Nyquist εφαρμόζοντας τη μέθοδο μετατόπισης σύνθετης αντίστασης χωρίς φίλτρο ανατροφοδότησης (αριστερά) και με φίλτρο ανατροφοδότησης υψηλής συχνότητας αποκοπής (δεξιά)	40
---	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Σχήμα 3.1. Οι τάσεις σε δίκτυο διανομής που περιλαμβάνει μόνο φορτία και με διείσδυση ΔΠ (φωτοβολταϊκό πάρκο και μικρό υδροηλεκτρικό) [55]	45
Σχήμα 3.2. Μονάδα ΔΠ και φορτίο συνδέονται στο ανάντη δίκτυο μέσω γραμμής διανομής (άνω), και το αντίστοιχο διανυσματικό διάγραμμα (κάτω) [58]	46
Σχήμα 3.3. Η επίδραση του λόγου R/X της γραμμής στην ποσοστιαία μεταβολή τάσης $R/X \approx 0.01$ (i),(ii) , $R/X \approx 5$ (iii),(iv)	47
Σχήμα 3.4. Δίκτυο δύο ζυγών για τον υπολογισμό της ροής ενεργού και αέργου ισχύος	47
Σχήμα 3.5. $\cos\phi(P)$ χαρακτηριστική με βάση τα πρόσφατα πρότυπα [67]	50
Σχήμα 3.6. Τυπική $Q(V)$ χαρακτηριστική: σημειώνονται τα σύμβολα VQ_{min} , $VQDB_{neg}$, V_n , $VQDB_{pos}$, VQ_{max}	50
Σχήμα 3.7. Ενδεικτική $P(V)$ χαρακτηριστική [68]	51
Σχήμα 3.8. Απλοποιημένο διάγραμμα βαθμίδων ανοιχτού βρόχου του $Q(V)$ ελεγκτή αντιστροφέα	52
Σχήμα 3.9. Απλοποιημένο διάγραμμα βαθμίδων κλειστού βρόχου του $Q(V)$ ελεγκτή και του δικτύου	52
Σχήμα 3.10. Γεωμετρικός τόπος ριζών, όπου μεταβάλλεται η χρονική καθυστέρηση της ανάδρασης (T_d)	54
Σχήμα 3.11. Καμπύλη στατισμού ΔΠ για υπερσυχνότητα [79] (α) και για υποσυχνότητα-υπερσυχνότητα [78] (β)	55
Σχήμα 3.12. Διάγραμμα βαθμίδων του ελεγκτή παροχής εικονικής αδράνειας και της χαρακτηριστικής συχνότητας-ενεργού ισχύος	58
Σχήμα 3.13. P-Q διαγράμματα: «τριγωνικό», «ορθογώνιο», «ημικυκλικό» και νυχτερινής λειτουργίας	63
Σχήμα 3.14. Φασικές τάσεις όταν η είσοδος στον $Q(V)$ ελεγκτή είναι η μέση τιμή των τριών τάσεων (V_a , V_b , V_c)	65
Σχήμα 3.15. Φασικές τάσεις όταν η είσοδος στον $Q(V)$ ελεγκτή είναι η τάση της φάση B	65
Σχήμα 3.16. Τριφασική άεργος ισχύς της ΔΠ στις δύο περιπτώσεις (η άεργος ισχύς είναι θετική όταν παρέχεται)	66
Σχήμα 3.17. Τυπική εργαστηριακή διάταξη για δοκιμές αντιστροφέων [126]	70
Σχήμα 3.18. Τυπικό προφίλ συχνότητας [127]	75
Σχήμα 3.19. Τοπολογία της PHIL δοκιμής αλληλεπίδρασης ΣΑΤΥΦ και ΔΠ με δυνατότητα ρύθμισης τάσης	77
Σχήμα 3.20. Τοπολογία της PHIL δοκιμής ρύθμισης συχνότητας από ΔΠ ή/και αποθήκευση	78

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Σχήμα 4.1. Το μονοφασικό μικροδίκτυο, ο διακοπτόμενος ενισχυτής ισχύος, ο γραμμικός ενισχυτής ισχύος και ο ΨΠΠΧ (RTDS®) του εργαστηρίου ΣΗΕ (αριστερά προς τα δεξιά)	85
Σχήμα 4.2. Συμβατική διάταξη δοκιμής φωτοβολταϊκού αντιστροφέα στο εργαστήριο ΣΗΕ	85
Σχήμα 4.3. Παρουσίαση της διεπαφής ισχύος με μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος [132]	87
Σχήμα 4.4. Κύκλωμα ισχύος του μετατροπέα της διεπαφής ισχύος [132]	88
Σχήμα 4.5. Απλοποιημένο διάγραμμα του μετατροπέα της διεπαφής ισχύος με τρεις ημιγέφυρες	88
Σχήμα 4.6. Το εσωτερικό του μετατροπέα της διεπαφής ισχύος	89
Σχήμα 4.7. Αναλογική κάρτα εισόδων και εξόδων της διεπαφής ισχύος	89
Σχήμα 4.8. Αλγόριθμος ελέγχου AC/DC μετατροπέα για σύνδεση στο δίκτυο (α) και DC/AC μετατροπέα για λειτουργία ως πηγή τάσης (β) [134][264]	90
Σχήμα 4.9. Αλγόριθμος που αναπτύχθηκε για τη λειτουργία του μετατροπέα ως ενισχυτής τάσης	91
Σχήμα 4.10. Αλγόριθμος για την παροχή του σήματος ανάδρασης στον ΨΠΠΧ	92

Σχήμα 4.11. Χρονική καθυστέρηση του ενισχυτή στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας: σήμα αναφοράς (αριστερά), παραγόμενη τάση $230V_{rms}$ (δεξιά)	93
Σχήμα 4.12. Το προσομοιωμένο σύστημα και η πηγή ρεύματος που αναπαριστά το φυσικό σύστημα (α). Η τάση εξόδου (V_{NI}) που αποστέλλεται στον ψηφιακό/αναλογικό μετατροπέα του ΨΠΠΧ (b)	94
Σχήμα 4.13. Μέρος του συστήματος προστασίας στο λογισμικό του ΨΠΠΧ [140]	95
Σχήμα 4.14. Μέρος του συστήματος προστασίας που αναπτύχθηκε στο λογισμικό της διεπαφής ισχύος	96
Σχήμα 4.15. Προτεινόμενη φορά αναφοράς της προσομοιωμένης πηγής ρεύματος και του αισθητήρα ρεύματος του φυσικού συστήματος	100
Σχήμα 4.16. Σύγκριση της τάσης που προκύπτει από το PHIL πείραμα και της τάσης του ιδανικού διαιρέτη τάσης	102
Σχήμα 4.17. Μεταβατικό φαινόμενο στο ρεύμα ανατροφοδότησης κατά τη μετάβαση από λειτουργία ανοιχτού βρόχου σε κλειστού βρόχου στο λογισμικό του ΨΠΠΧ	103
Σχήμα 4.18. Ταλαντώσεις που παρουσιάστηκαν στο ρεύμα του Φ/B αντιστροφέα κατά τη σύνδεση του με τον AC/DC/AC μετατροπέα	104
Σχήμα 4.19. Προσομοιωμένο σύστημα: δίκτυο με γραμμή μεγάλου μήκους και φορτίο. Φυσικό σύστημα: Φ/B αντιστροφέας και Φ/B πλαίσια	104
Σχήμα 4.20. Μετρήσεις κατά τη διάρκεια του PHIL πειράματος: ηλιακή ακτινοβολία (a), ενεργός ισχύς του Φ/B αντιστροφέα (b), τάση του Φ/B αντιστροφέα (c)	105
Σχήμα 4.21. Προσομοιωμένο αγροτικό δίκτυο XT με Φ/B στον ΨΠΠΧ και ο πραγματικός εξοπλισμός	106
Σχήμα 4.22. Τάση του ενισχυτή ισχύος (a), ρεύμα του Φ/B αντιστροφέα (b), τάση αναφοράς του ΨΠΠΧ (c)	107
Σχήμα 4.23. Οι τάσεις στους ζυγούς σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας κατά τη διάρκεια PHIL πειράματος	108
Σχήμα 4.24. Μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας από το πυρανόμετρο στο λογισμικό του ΨΠΠΧ	108
Σχήμα 4.25. Οι τάσεις των ζυγών κατά τις μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας	109

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Σχήμα 5.1. Το υπό μελέτη δίκτυο	112
Σχήμα 5.2. Υλοποίηση της $\cos\phi(P)$ χαρακτηριστικής	113
Σχήμα 5.3. Υλοποίηση της $Q(V)$ χαρακτηριστικής	114
Σχήμα 5.4. Περιορισμός της αέργου ισχύος εξαιτίας του ελάχιστου εφικτού $\cos\phi$ όταν η ΔΠ λειτουργεί σε ισχύ χαμηλότερη της ονομαστικής	115
Σχήμα 5.5. Βηματική αύξηση της τάσης του δικτύου YT, όπου $\cos\phi=1$ και το ΣΑΤΥΦ βρίσκεται εν λειτουργία	116
Σχήμα 5.6. Βηματική αύξηση της τάσης του δικτύου YT, όπου ο $Q(V)$ ελεγκτής και το ΣΑΤΥΦ βρίσκονται εν λειτουργία	116
Σχήμα 5.7. Ενεργός και άεργος ισχύς της ΔΠ κατά την αύξηση της τάσης του δικτύου YT	117
Σχήμα 5.8. Βηματική αύξηση της τάσης του δικτύου YT με πιο αργό $Q(V)$ ελεγκτή και ταχύτερο ΣΑΤΥΦ	117
Σχήμα 5.9. Ενεργός και άεργος ισχύς της ΔΠ κατά την αύξηση της τάσης του δικτύου YT	118
Σχήμα 5.10. Το ΣΑΤΥΦ αυξάνει περαιτέρω την τάση της ΔΠ	118
Σχήμα 5.11. Η άεργος ισχύς της ΔΠ αυξάνεται εξαιτίας του ΣΑΤΥΦ	119
Σχήμα 5.12. Ενεργός και άεργος ισχύς της ΔΠ, όπου η ΔΠ λειτουργεί με $Q(V)$ έλεγχο και το ΣΑΤΥΦ βρίσκεται εκτός λειτουργίας	120
Σχήμα 5.13. Τάσεις δικτύου και αλλαγές λήψης του ΣΑΤΥΦ, όπου η ΔΠ λειτουργεί με $Q(V)$ έλεγχο και το ΣΑΤΥΦ βρίσκεται εκτός λειτουργίας	120
Σχήμα 5.14. Ενεργός και άεργος ισχύς της ΔΠ, όπου η ΔΠ λειτουργεί με $Q(V)$ έλεγχο και το ΣΑΤΥΦ βρίσκεται εν λειτουργία	121
Σχήμα 5.15. Τάσεις δικτύου και αλλαγές λήψης του ΣΑΤΥΦ, όπου η ΔΠ λειτουργεί με $Q(V)$ έλεγχο και το ΣΑΤΥΦ βρίσκεται εν λειτουργία	121
Σχήμα 5.16. Ενεργός και άεργος ισχύς της ΔΠ, όπου η ΔΠ λειτουργεί με $\cos\phi(P)$ έλεγχο και το ΣΑΤΥΦ βρίσκεται εν λειτουργία	122

Σχήμα 5.17. Τάσεις δικτύου και αλλαγές λήψης του ΣΑΤΥΦ, όπου η ΔΠ λειτουργεί με $\cos\phi(P)$ έλεγχο και το ΣΑΤΥΦ βρίσκεται εν λειτουργία	123
Σχήμα 5.18. Τάσεις δικτύου και αλλαγές λήψης του ΣΑΤΥΦ, όπου $\cos\phi=1$ και το ΣΑΤΥΦ βρίσκεται εν λειτουργία. Η τάση του δικτύου ΥΤ μειώνεται τη στιγμή $t=60$ s	124
Σχήμα 5.19. Ο Q(V) ελεγκτής αντιτίθεται στις αλλαγές λήψης του ΣΑΤΥΦ	124
Σχήμα 5.20. Ενεργός και άεργος ισχύς της ΔΠ	125
Σχήμα 5.21. Ο Q(V) ελεγκτής αντιτίθεται στις αλλαγές λήψης του ΣΑΤΥΦ (το ΣΑΤΥΦ ρυθμίζει την τάση της ΔΠ)	126
Σχήμα 5.22. Ενεργός και άεργος ισχύς της ΔΠ	126
Σχήμα 5.23. Τάση του κοινού ζυγού δίχως τη χρήση και με χρήση του διακριτού κινούμενου μέσου όρου	128
Σχήμα 5.24. Το φίλτρο διακριτού κινούμενου μέσου όρου για την αντιμετώπιση της επίδρασης του θορύβου του αισθητήρα	128
Σχήμα 5.25. Αλγόριθμος ομαλής εκκίνησης με χρήση βαθυπερατού φίλτρου πρώτης τάξης	129
Σχήμα 5.26. Ρεύμα του φυσικού συστήματος (α). Ρεύμα με εφαρμογή αλγορίθμου ομαλής εκκίνησης, όπου συγκρίνεται η υλοποίηση με βαθυπερατό φίλτρο και με γραμμική μεταβολή (b)	129
Σχήμα 5.27. PHIL δοκιμή με $\cos\phi(P)$ έλεγχο: καταγραφή από παλμογράφο χωρίς εξομάλυνση των μετρήσεων (παριστάνεται και η τάση του κοινού ζυγού στο φυσικό σύστημα V_{cn_h})	130
Σχήμα 5.28. PHIL δοκιμή και αμιγώς ψηφιακή προσομοίωση της περίπτωσης επαναλαμβανόμενων αλλαγών λήψης: $\cos\phi(P)$ έλεγχος	131
Σχήμα 5.29. Ενεργός και άεργος ισχύς του αντιστροφέα στη PHIL δοκιμή και στην αμιγώς ψηφιακή προσομοίωση: $\cos\phi(P)$ έλεγχος	132
Σχήμα 5.30. PHIL δοκιμή και αμιγώς ψηφιακή προσομοίωση της περίπτωσης επαναλαμβανόμενων αλλαγών λήψης: αστάθεια του Q(V) ελέγχου	133
Σχήμα 5.31. Ενεργός και άεργος ισχύς του αντιστροφέα στη PHIL δοκιμή και στην αμιγώς ψηφιακή προσομοίωση: επαναλαμβανόμενες αλλαγές λήψης και αστάθεια του Q(V) ελέγχου	133
Σχήμα 5.32. Συντελεστής ισχύος του πραγματικού αντιστροφέα κατά τη PHIL δοκιμή	134
Σχήμα 5.33. PHIL δοκιμή και αμιγώς ψηφιακή προσομοίωση με απενεργοποιημένο τον Q(V) ελεγκτή: μείωση της τάσης του δικτύου ΥΤ	135
Σχήμα 5.34. Ενεργός και άεργος ισχύς του πραγματικού αντιστροφέα κατά τη PHIL δοκιμή με απενεργοποιημένο τον Q(V) ελεγκτή	135
Σχήμα 5.35. PHIL δοκιμή και αμιγώς ψηφιακή προσομοίωση με Q(V) έλεγχο: αστάθεια του Q(V) ελέγχου	136
Σχήμα 5.36. Συντελεστής ισχύος του πραγματικού αντιστροφέα κατά τη PHIL δοκιμή με Q(V) έλεγχο	136
Σχήμα 5.37. Η αστάθεια του Q(V) ελέγχου οδηγεί σε συνεχείς επαναλαμβανόμενες αλλαγές λήψης του ΣΑΤΥΦ για σταθερή ενεργό ισχύ της ΔΠ	137
Σχήμα 5.38. Ενεργός και άεργος ισχύς του αντιστροφέα	138
Σχήμα 5.39. Επικύρωση του μοντέλου ελεγκτή τάσης του εμπορικού Φ/B αντιστροφέα με την PHIL μέθοδο: τάσεις και αλλαγές λήψης	139
Σχήμα 5.40. Επικύρωση του μοντέλου ελεγκτή τάσης του εμπορικού Φ/B αντιστροφέα με την PHIL μέθοδο: ενεργός και άεργος ισχύς του αντιστροφέα	139
Σχήμα 5.41. Τοπολογία PHIL δοκιμής σε απομονωμένο σύστημα με σύγχρονη γεννήτρια, μονάδα αποθήκευσης (εικονική αδράνεια) και πραγματικό Φ/B αντιστροφέα (P(f) χαρακτηριστική)	140
Σχήμα 5.42. Ενεργός ισχύς του πραγματικού Φ/B αντιστροφέα δίχως P(f) έλεγχο, με P(f) έλεγχο και σε συνδυασμό με παροχή εικονική αδράνειας από μονάδα αποθήκευσης (PHIL δοκιμές)	141
Σχήμα 5.43. Συχνότητα δίχως έλεγχο, με P(f) έλεγχο του Φ/B αντιστροφέα και σε συνδυασμένη λειτουργία με παροχή εικονικής αδράνειας από μονάδα αποθήκευσης (PHIL δοκιμές)	142
Σχήμα 5.44. Μεγέθυνση του Σχήματος 5.43: παριστάνεται και η περίπτωση που η μονάδα αποθήκευσης παρέχει εικονική αδράνεια δίχως P(f) έλεγχο του Φ/B αντιστροφέα (PHIL)	142
Σχήμα 5.45. Ενεργός ισχύς της μονάδας αποθήκευσης που παρέχει εικονική αδράνεια δίχως και με P(f) έλεγχο του Φ/B αντιστροφέα (PHIL δοκιμές)	143

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Σχήμα 6.1. Ο κύκλος βιωματικής μάθησης τεσσάρων σταδίων του Kolb [176]	148
Σχήμα 6.2. Εργαστηριακή υποδομή για την εκπαίδευση φοιτητών μέσω εμπειρίας χρήσης: διπλή διάταξη PHIL	151
Σχήμα 6.3. Εκτέλεση των εργαστηριακών ασκήσεων: διακοπτόμενος ενισχυτής, ομοίωμα γραμμής, γραμμικός ενισχυτής, φορτίο, ΨΠΠΧ, ψηφιακός ηλεκτρονόμος (αριστερά προς τα δεξιά)	151
Σχήμα 6.4. Δύο πάγκοι εργασίας: αντιστροφέας, παλμογράφος ή αναλυτής ισχύος και υπολογιστής (σύνδεση με τον ΨΠΠΧ, έλεγχος του προσομοιωτή Φ/Β και του αντιστροφέα)	152
Σχήμα 6.5. Τοπολογία PHIL πειράματος ρύθμισης τάσης από ΣΑΤΥΦ και ΔΠ	154
Σχήμα 6.6. Η ενεργός ισχύς των Φ/Β αυξάνει την τάση στο ζυγό του αντιστροφέα (V4), η οποία περιορίζεται από το ΣΑΤΥΦ, μειώνοντας όμως επιπλέον την τάση του φορτίου (V3), (PHIL πείραμα)	155
Σχήμα 6.7. Τοπολογία για δοκιμές βραχυκυκλωμάτων σε αντιστροφέα ΔΠ και λειτουργίας ψηφιακού ηλεκτρονόμου	156
Σχήμα 6.8. Ρεύμα στη διάρκεια βραχυκυκλώματος στον ζυγό 2 και άνοιγμα του διακόπτη (a). Τάσεις στους ζυγούς 2,3,4 στη διάρκεια βραχυκυκλώματος στον ζυγό 4 (b)	157
Σχήμα 6.9. Συμπεριφορά Φ/Β αντιστροφέα σε βραχυκύκλωμα: τάση ακροδεκτών (a), ρεύμα σε χαμηλή ισχύ (b) και ρεύμα σε ονομαστική ισχύ (c) (PHIL πειράματα)	158
Σχήμα 6.10. Τοπολογία πειραμάτων λειτουργίας μικροδικτύου	159
Σχήμα 6.11. Οι φοιτητές ελέγχουν την ενεργό ισχύ του αντιστροφέα συσσωρευτών για να υλοποιήσουν εντολή παραγωγής 2 kW από το μικροδίκτυο	159
Σχήμα 6.12. Ερώτηση 1: Οι θεματικές της εργαστηριακής άσκησης είναι ενδιαφέρουσες	162
Σχήμα 6.13. Ερώτηση 2: Η παρουσίαση των θεμάτων κατά τη διάρκεια της άσκησης είναι ικανοποιητική	162
Σχήμα 6.14. Ερώτηση 3: Ενθαρρύνεται η ενεργός συμμετοχή και η χρήση του εξοπλισμού από τους φοιτητές	162
Σχήμα 6.15. Ερώτηση 4: Η εργαστηριακή άσκηση με βοήθησε στην κατανόηση της λειτουργίας των «παραδοσιακών» ΣΗΕ	163
Σχήμα 6.16. Ερώτηση 5: Η εργαστηριακή άσκηση με βοήθησε στην κατανόηση της λειτουργίας των σύγχρονων ΣΗΕ με διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής	163
Σχήμα 6.17. Ερώτηση 6: Η εργαστηριακή άσκηση (συνολικά) είναι ενδιαφέρουσα	163
Σχήμα 6.18. Ερώτηση 7: Η προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο είναι χρήσιμο εκπαιδευτικό εργαλείο	164
Σχήμα 6.19. Ερώτηση 8: Η χρήση πραγματικού εξοπλισμού από τους φοιτητές αυξάνει το ενδιαφέρον σε σχέση με μία απλή επίδειξη	164
Σχήμα 6.20. Ερώτηση 9: Η εισαγωγή σύγχρονων θεμάτων (διεσπαρμένη παραγωγή) αυξάνει το ενδιαφέρον μου στις εργαστηριακές ασκήσεις και γενικότερα στα μαθήματα των ΣΗΕ	164
Σχήμα 6.21. Ερώτηση 10: Η ένταξη επιπλέον εργαστηριακών ασκήσεων στα μαθήματα των ΣΗΕ είναι χρήσιμη	165

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Σχήμα 7.1. Όρια εκπομπών, όρια ατρωσίας και επίπεδο συμβατότητας σε παράδειγμα μίας συσκευής που εκπέμπει και μίας που «αμύνεται» συναρτήσει μίας ανεξάρτητης μεταβλητής (π.χ. συχνότητας) [220]	169
Σχήμα 7.2. Ο αντιστροφέας με το φίλτρο εξόδου και η σύνθετη αντίσταση του δικτύου [206]	172
Σχήμα 7.3. Δύο αντιστροφείς συνδεδεμένοι παράλληλα σε μετασχηματιστή MT/XT	173
Σχήμα 7.4. Διάταξη δοκιμών για περιττές αρμονικές με βάση το πρότυπο EN 50470-3 [229]	176
Σχήμα 7.5. Η κυματομορφή του ρεύματος που διαθέτει περιττές αρμονικές κατά το πρότυπο EN 50470-3 [229]	176
Σχήμα 7.6. Πειραματική διάταξη για την πραγματοποίηση δοκιμών σε συχνότητες μέχρι τα 50 kHz [258]	177
Σχήμα 7.7. Εργαστηριακή διάταξη άμεσης έγχυσης αρμονικών [236][259]	178
Σχήμα 7.8. Απλουστευμένο σχέδιο της διάταξης άμεσης έγχυσης αρμονικών [236]	178

Σχήμα 7.9. Εργαστηριακή διάταξη έμμεσης έγχυσης αρμονικών [206][236][260]	179
Σχήμα 7.10. Τροποποιημένη διάταξη δοκιμών του CISPR 11 για δοκιμές εκπομπών Φ/Β αντιστροφών [206]	180
Σχήμα 7.11. Δοκιμές ατρωσίας του μετρητή B στο εύρος 2 kHz-9 kHz (α) και 9 kHz-150kHz (b)	182
Σχήμα 7.12. Σχετικό σφάλμα στη μετρούμενη ενέργεια του μετρητή B για κάθε συχνότητα στο εύρος 2 kHz-9 kHz (α) και 9 kHz-150 kHz (b)	182
Σχήμα 7.13. Αναλυτής ισχύος (Yokogawa) που επιτρέπει τη μέτρηση υψίσυχνων αρμονικών ρεύματος αντιστροφών	184
Σχήμα 7.14. Αρμονικές ρεύματος του αντιστροφέα Φ/Β στο εύρος συχνοτήτων 1 kHz - 20 kHz	185
Σχήμα 7.15. Αρμονικές ρεύματος του αντιστροφέα συσσωρευτών στο εύρος συχνοτήτων 1 kHz - 20 kHz	185
Σχήμα 7.16. Αρμονικές ρεύματος κατά την παράλληλη λειτουργία των αντιστροφών Φ/Β και συσσωρευτών στο εύρος συχνοτήτων 1 kHz-20 kHz	186
Σχήμα 7.17. Διάταξη δοκιμών της παράλληλης λειτουργίας αντιστροφέα και μετρητή [260]	186

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Πίνακας 2.1. Χαρακτηριστικά του PHIL συστήματος	35
Πίνακας 2.2. Χαρακτηριστικά της PHIL εφαρμογής	40

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Πίνακας 3.1. Σύνοψη των πρόσφατων απαιτήσεων για ρύθμιση τάσης σε μόνιμη κατάσταση	62
Πίνακας 3.2. Προτεινόμενη διαδικασία δοκιμής του Q(V) ελεγκτή σε μεταβατική κατάσταση	73
Πίνακας 3.3. Διαδικασία της PHIL δοκιμής αλληλεπίδρασης μεταξύ ΣΑΤΥΦ και ΔΠ με δυνατότητα ρύθμισης τάσης	77
Πίνακας 3.4. Διαδικασία της PHIL δοκιμής ρύθμισης συχνότητας	79

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Πίνακας 4.1. Εργαστήρια ανά τον κόσμο που έχουν αναπτύξει PHIL διάταξη	82
Πίνακας 4.2. Αλγόριθμοι προστασίας που αναπτύχθηκαν στο λογισμικό της διεπαφής ισχύος	95
Πίνακας 4.3. Η προτεινόμενη διαδικασία αναφοράς PHIL δοκιμών	99

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Πίνακας 5.1. Χαρακτηριστικά του δικτύου και της μονάδας ΔΠ	113
--	-----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Πίνακας 6.1. Συγκεντρωτική παρουσίαση των απαντήσεων των φοιτητών	161
Πίνακας 6.2. Συγκεντρωτική παρουσίαση των απαντήσεων των αποφοίτων	166

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Πίνακας 7.1. Τιθέμενα όρια στις αρμονικές ρεύματος με βάση το πρότυπο IEC 61727 [6.36] [6.37]	170
Πίνακας 7.2. Μέγιστη επιτρεπτή απόκλιση για απευθείας συνδεδεμένους ηλεκτρονικούς μετρητές σύμφωνα με την οδηγία της VDE-FNN και την τεχνική αναφορά CLC/TR 50579	171
Πίνακας 7.3. Σφάλματα μέτρησης κατά τις δοκιμές	187

ΛΙΣΤΑ ΣΥΝΤΜΗΣΕΩΝ

ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΔΠ	Διεσπαρμένη Παραγωγή
H/Y	Ηλεκτρονικός Υπολογιστής
MT	Μέση Τάση
ΣΑΤΥΦ	Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο
ΣΗΕ	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΥΤ	Υψηλή Τάση
Φ/Β	Φωτοβολταϊκό
ΧΤ	Χαμηλή Τάση
ΨΠΠΧ	Ψηφιακός Προσομοιωτής Πραγματικού Χρόνου
A/D, D/A	Analog to Digital converter, Digital to Analog converter
AMP	Amplifier
AIC	Active in-feed Converter
AVR	Automatic Voltage Regulator
CHIL	Controller Hardware in the Loop
cosφ(P)	Active power – power factor characteristic
EMC	Electromagnetic Compatibility
EUT	Equipment Under Test
HIL	Hardware in the Loop
HUT	Hardware Under Test
LISN	Line Impedance Stabilization Network
LPF	Low Pass Filter
LVRT	Low Voltage Ride Through
MPPT	Maximum Power Point Tracking
OLTC	On-Load Tap Changer
PC	Personal Computer
PCC	Point of Common Coupling
P(f)	Frequency – active power characteristic
PHIL	Power Hardware in the Loop
PLC	Power Line Communication
PLL	Phase-Locked Loop
PV	Photovoltaic
PWM	Pulse width modulation
RF	Radio Frequency
RMS	Root Mean Square
Q(V)	Voltage – reactive power characteristic
RTDS	Real Time Digital Simulator [®]
RTS	Real Time Simulator
SG	Synchronous Generator
THD	Total Harmonic Distortion
VSG	Virtual Synchronous Generator

ΛΙΣΤΑ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

V_{SW}	Τάση του προσομοιωμένου συστήματος
V_{HW}	Τάση του φυσικού συστήματος
Z_{SW}	Σύνθετη αντίσταση του προσομοιωμένου συστήματος
Z_{HW}	Σύνθετη αντίσταση του φυσικού συστήματος
T_d	Συνολική χρονική καθυστέρηση
G_{amp}	Συνάρτηση μεταφοράς του ενισχυτή
G_{filter}	Συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου του ενισχυτή
G_{OL}	Συνάρτηση μεταφοράς ανοιχτού βρόχου
G_{LPF}	Συνάρτηση μεταφοράς του βαθυπερατού φίλτρου ανατροφοδότησης
G_{CL}	Συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου
a	Λόγος της τάσης του προσομοιωμένου και του φυσικού συστήματος
b	Λόγος της ονομαστικής ισχύος του πλήρους και του μικρής κλίμακας δοκιμίου
c	Λόγος του ρεύματος του προσομοιωμένου και του φυσικού συστήματος
$(S_{HUT_full})_{1p}$	Ονομαστική φαινόμενη ισχύς ανά φάση του πλήρους δοκιμίου
$(S_{HUT_red})_{1p}$	Ονομαστική φαινόμενη ισχύς ανά φάση του δοκιμίου μικρής κλίμακας
ΔZ	Ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση, όπως φαίνεται από το προσομοιωμένο σύστημα
$Z_{sh}=R_{sh}+jX_{sh}$	Μετατοπιζόμενη σύνθετη αντίσταση στο φυσικό σύστημα
R_{MV}, X_{MV}	Ωμική αντίσταση και επαγωγική αντίδραση γραμμής MT
R_{transf}, X_{transf}	Ωμική αντίσταση και επαγωγική αντίδραση μετασχηματιστή
V_{cn_s}	Τάση του κοινού ζυγού στο προσομοιωμένο σύστημα
V_{cn_h}	Τάση του κοινού ζυγού στο φυσικό σύστημα
I_{HUT}	Ρεύμα του φυσικού συστήματος
R_{sh_i}, L_{sh_i}	Ωμική αντίσταση και αυτεπαγωγή που συνδέεται σε σειρά με το δοκίμιο
R_{SWcn}, L_{SWcn}	Προσομοιωμένη ωμική αντίσταση και αυτεπαγωγή σε σειρά στον κοινό ζυγό
$V_{z_{HW}}$	Τάση του δοκιμίου Z_{HW}
$V_{secondary}$	Τάση του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή
$V_{inverter}$	Τάση στους AC ακροδέκτες του αντιστροφέα
V_n	Ονομαστική τάση
$V_{Q_{min}}$	Τάση στην οποία παρέχεται μέγιστη άεργος ισχύς
$V_{QDB_{neg}}$	Κάτω όριο νεκρής ζώνης
$V_{QDB_{pos}}$	Άνω όριο νεκρής ζώνης
$V_{Q_{max}}$	Τάση στην οποία απορροφάται μέγιστη άεργος ισχύς
$\cos\phi_{min}$	Ελάχιστος συντελεστής ισχύος της μονάδας ΔΠ
H_{inv}	Δυναμική συμπεριφορά του αντιστροφέα για την άεργο ισχύ
H_{delay}	Συνάρτηση μεταφοράς της χρονικής καθυστέρησης μέτρησης της τάσης
k_{droop}	Κλίση της $Q(V)$ χαρακτηριστικής
K_{ol}	Κέρδος ανοικτού βρόχου $Q(V)$ χαρακτηριστικής και δικτύου
k_i	Κέρδος εικονικής αδράνειας
k_d	Κλίση της $P(f)$ χαρακτηριστικής
$R_{sc}+jX_{sc}$	Σύνθετη αντίσταση του ανάντη δικτύου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1) Εισαγωγή

Η ενσωμάτωση μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής (ΔΠ), συχνά από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), στα σύγχρονα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) ανοίγει νέες δυνατότητες και θέτει νέες προκλήσεις. Η ευρεία διάδοση των συσκευών ηλεκτρονικών ισχύος, μέσω των οποίων συνδέονται συνήθως οι μονάδες ΔΠ (φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες κτλ) και αποθήκευσης, αυξάνει την πολυπλοκότητα των σύγχρονων ηλεκτρικών δικτύων, τα οποία δεν μπορούν πλέον να θεωρούνται παθητικά. Επίσης, η παροχή επικουρικών υπηρεσιών από τις μονάδες ΔΠ παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα στη λειτουργία των ΣΗΕ και θεωρείται ως ένα σημαντικό συστατικό των μελλοντικών συστημάτων και των αναδυόμενων ευφών δικτύων. Η μελέτη της επίδρασης των επικουρικών υπηρεσιών από μονάδες ΔΠ στα ΣΗΕ απαιτεί προηγμένες μεθόδους. Η ακριβής και εις βάθος μοντελοποίηση των σύγχρονων μονάδων ΔΠ είναι απαιτητική, εφόσον οι συσκευές ηλεκτρονικών ισχύος διαθέτουν πολύπλοκους αλγορίθμους ελέγχου και σύνθετες τοπολογίες. Από την άλλη, οι συμβατικές δοκιμές εξοπλισμού γίνονται συνήθως σε επίπεδο μεμονωμένης συσκευής χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το σύστημα.

Οι νέες προκλήσεις για τη μετάβαση σε ενεργά δίκτυα απαιτούν προηγμένες προσεγγίσεις τόσο στην προσομοίωση των ΣΗΕ όσο και στις δοκιμές εξοπλισμού ισχύος. Τα τελευταία χρόνια η προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο λαμβάνει αυξανόμενο ενδιαφέρον διεθνώς και ειδικά η μέθοδος Power Hardware in the Loop (PHIL), όπου πραγματικός εξοπλισμός ισχύος συνδέεται σε προσομοιωμένο σύστημα [1]-[5]. Πραγματικές συσκευές ΔΠ μπορούν να υποβληθούν σε πλήθος ρεαλιστικών σεναρίων με ασφαλή και οικονομικό τρόπο ακόμα και σε ακραίες συνθήκες λειτουργίας σε ένα ευέλικτο περιβάλλον. Έτσι, μπορεί να παρατηρηθεί η απόκριση της συσκευής σε «πραγματικές» συνθήκες χωρίς όμως να είναι συνδεδεμένη με το πραγματικό ηλεκτρικό σύστημα. Η μέθοδος PHIL έχει χαρακτηριστεί από το κέντρο δοκιμών KEMA ως το «μέλλον των δοκιμών» [6].

1.2) Η εξέλιξη των ψηφιακών προσομοιώσεων και των εργαστηριακών δοκιμών

Στην ιδανική περίπτωση οι δοκιμές εξοπλισμού καθώς και η ανάλυση φαινομένων στα ΣΗΕ θα λάμβαναν χώρα σε συστήματα με πραγματικό εξοπλισμό κάτω από ελεγχόμενες, ευέλικτες και επαναλήψιμες συνθήκες. Στην πράξη αυτό είναι εφικτό μόνο για μικρά συστήματα που χρησιμοποιούνται για συγκεκριμένα πειράματα ή τυποποιημένες δοκιμές, εξαιτίας του κόστους και της δυσκολίας ανάπτυξης μεγάλων συστημάτων στο εργαστήριο. Επίσης, η περιορισμένη ευελιξία των εργαστηριακών διατάξεων καθώς και η πιθανότητα βλαβών αποτελούν μειονεκτήματα. Η εγκατάσταση μεγάλου πλήθους σύνθετων συσκευών (π.χ. αντιστροφών, έξυπνων μετρητών, ελεγκτών, τηλεπικοινωνιακών δικτύων) τα τελευταία χρόνια αυξάνουν την πολυπλοκότητα των συστημάτων και καθιστούν ακόμα πιο δύσκολη την εργαστηριακή υλοποίηση. Εκτός από την υλοποίηση εργαστηριακών

διατάξεων, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης μέρους του πραγματικού ηλεκτρικού δικτύου ως πεδίο δοκιμών που παρέχει ρεαλιστικά αποτελέσματα, όμως με δυσκολίες στην υλοποίηση και περιορισμένες δυνατότητες εφαρμογής.

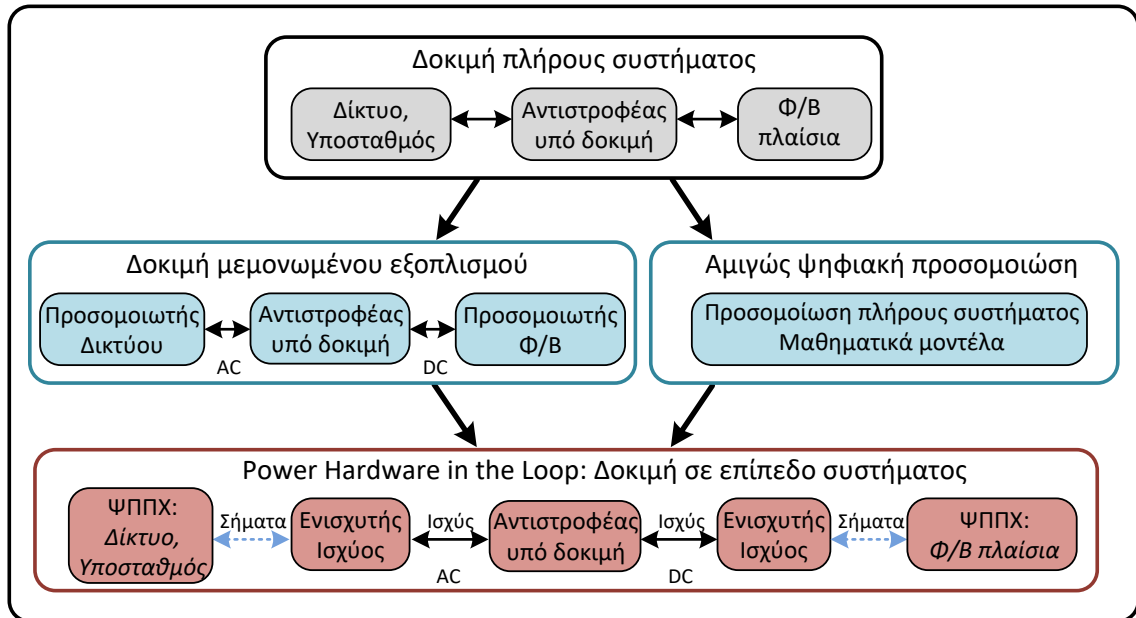
Στις τυποποιημένες δοκιμές εξοπλισμού (π.χ. αντιστροφών ΔΠ), συνήθως μία συσκευή (π.χ. προσομοιωτής AC δικτύου) εφαρμόζει προκαθορισμένα προφίλ τιμών (π.χ. τάσης και συχνότητας) στο δοκίμιο και καταγράφεται η συμπεριφορά του δοκιμίου. Με αυτόν τρόπο όμως δεν λαμβάνονται υπόψη πιθανές αλληλεπιδράσεις με άλλες συσκευές (π.χ. άλλοι αντιστροφείς, ΣΑΤΥΦ, σύγχρονες γεννήτριες, συσκευές προστασίας) και όλο το σύστημα. Όσο αυξάνεται η πολυπλοκότητα των συσκευών και των ηλεκτρικών δικτύων, οι συμβατικές μέθοδοι δοκιμών είναι πιθανό να αποδειχθούν ανεπαρκείς. Μεγάλοι οργανισμοί δοκιμών [6][7][D.1] αναφέρουν πως για την σε βάθος και ασφαλή δοκιμή εξοπλισμού που συνδέεται σε σύνθετα δίκτυα υπό μεταβατικές καταστάσεις, οι δοκιμές πρέπει πλέον να περιλαμβάνουν ολόκληρο το σύστημα, καθιστώντας τον συνδυασμό προσομοίωσης και εργαστηριακών δοκιμών αναπόφευκτο.

Από την άλλη, σε επίπεδο συστήματος χρησιμοποιούνται κατά κανόνα ψηφιακές προσομοιώσεις για την ανάλυση φαινομένων χρησιμοποιώντας μαθηματικά μοντέλα. Η μεγάλη ευελιξία και το χαμηλό κόστος είναι βασικά πλεονεκτήματα των προσομοιώσεων, αλλά η ακρίβεια των αποτελεσμάτων εξαρτάται από την ακρίβεια των μοντέλων. Η μεγάλη διείσδυση μονάδων ΔΠ που συνδέονται στο δίκτυο μέσω ηλεκτρονικών ισχύος και διαθέτουν προηγμένες δυνατότητες δημιουργεί προκλήσεις στις ψηφιακές προσομοιώσεις, καθώς αυτές οι συσκευές είναι δύσκολο να μοντελοποιηθούν πλήρως και μπορεί να συμμετέχουν σε πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις στο ΣΗΕ. Η σύνδεση των πραγματικών συσκευών, που είναι δύσκολο να μοντελοποιηθούν, σε προσομοιωμένα συστήματα μπορεί υπό συνθήκες να εντοπίσει αλληλεπιδράσεις που δεν έχουν παρασταθεί ακριβώς στα ψηφιακά μοντέλα.

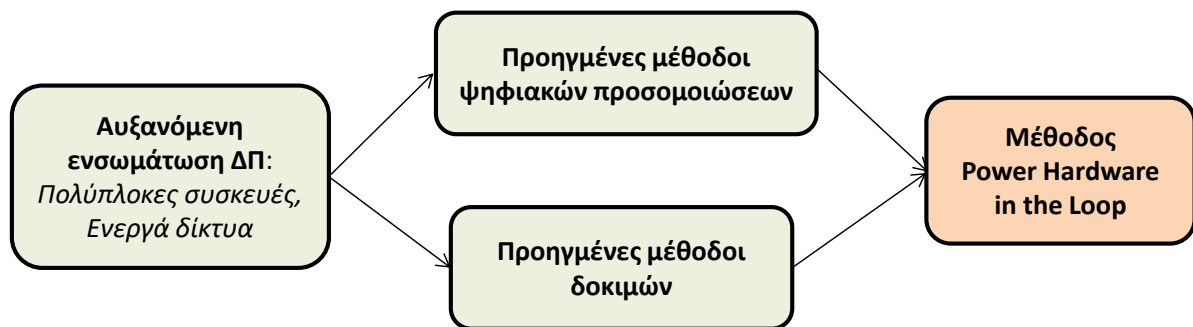
Με βάση τα παραπάνω, η μέθοδος PHIL μπορεί να συμβάλλει στην υπέρβαση των περιορισμών των συμβατικών δοκιμών εξοπλισμού, αλλά και των αμιγώς ψηφιακών προσομοιώσεων σε συγκεκριμένες περιπτώσεις. Η εξέλιξη που μόλις περιγράφηκε και η λογική των δοκιμών σε επίπεδο συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 1.1.

Η μέθοδος PHIL είναι μία ελκυστική επιλογή για την πραγματοποίηση δοκιμών σε επίπεδο συστήματος, εφόσον συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των ψηφιακών προσομοιώσεων (π.χ. ευελιξία, ασφάλεια) και των εργαστηριακών δοκιμών (π.χ. χρήση πραγματικής συσκευής) (Σχήμα 1.2). Η συσκευή που είναι δύσκολο να μοντελοποιηθεί (π.χ. αντιστροφέας ΔΠ) μπορεί να ενταχθεί ως πραγματικός εξοπλισμός και να συνδεθεί στο προσομοιωμένο ΣΗΕ. Το προσομοιωμένο σύστημα μπορεί να αλλάξει εύκολα και γρήγορα χωρίς μετατροπές στον εξοπλισμό (καλωδιώσεις κτλ.), ως εκ τούτου μπορούν να πραγματοποιηθούν δοκιμές κατ' επανάληψη και αυτοματοποιημένα. Ακραίες συνθήκες (π.χ. βραχυκυκλώματα) μπορούν να μελετηθούν με μικρό κίνδυνο για τον εξοπλισμό, ενώ είναι δυνατή η διερεύνηση προβληματικών συμπεριφορών της υπό δοκιμή συσκευής καθώς και σύνθετων αλληλεπιδράσεων [1][2][D.1]. Οι δοκιμές γίνονται υπό συνθήκες όσο το δυνατόν πλησιέστερα προς τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, εφόσον το δοκίμιο μπορεί να συνδεθεί στο σύστημα στο οποίο προορίζεται να λειτουργήσει στην πράξη. Η μέθοδος

PHIL έχει χρησιμοποιηθεί σε μελέτες ΔΠ. Πραγματικοί φωτοβολταϊκοί αντιστροφείς, ανεμογεννήτριες, ηλεκτρικά οχήματα, ή και μεγαλύτερα συστήματα μπορούν να συνδεθούν σε προσομοιωμένα ενεργά δίκτυα που περιλαμβάνουν μονάδες ΔΠ, ΣΑΤΥΦ κ.α.



Σχήμα 1.1. Η εξέλιξη των ψηφιακών προσομοιώσεων και των εργαστηριακών δοκιμών: δοκιμή σε επίπεδο συστήματος



Σχήμα 1.2. Η μέθοδος PHIL συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των ψηφιακών προσομοιώσεων και των εργαστηριακών δοκιμών

1.3) Η προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο και η μέθοδος Hardware in the Loop

Απαραίτητο μέρος της Hardware in the Loop προσομοίωσης είναι ο Ψηφιακός Προσομοιωτής Πραγματικού Χρόνου (ΨΠΠΧ) (Digital Real Time Simulator) ο οποίος εκτελεί το μοντέλο προσομοίωσης και διαθέτει εισόδους/εξόδους. Καθώς το δοκίμιο λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο, η απόκριση του προσομοιωμένου συστήματος με το οποίο θα αλληλεπιδρά πρέπει να υπολογίζεται σε πραγματικό χρόνο. Ως εκ τούτου, το βήμα της προσομοίωσης πρέπει να είναι αρκετά μικρό ώστε να αναπαράγει τη συμπεριφορά του

προσομοιωμένου συστήματος σε δυναμικές συνθήκες. Επί της αρχής, ένας υπολογιστής που διαθέτει εισόδους και εξόδους ή μία μονάδα ελέγχου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ΨΠΠΧ. Ωστόσο, έχουν σχεδιαστεί εξελιγμένοι προσομοιωτές για την προσομοίωση μεγάλων και πολύπλοκων συστημάτων σε πραγματικό χρόνο. Για δυναμικές προσομοιώσεις σε ΣΗΕ τα 50 μ s είναι μία τυπική τιμή βήματος προσομοίωσης, ενώ για την προσομοίωση γρήγορων διακοπτικών φαινομένων (π.χ. διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM)) τα 1-3 μ s.

Οι ΨΠΠΧ προήλθαν καταρχάς από την εξέλιξη των αναλογικών Transient Network Analyzers και μετέπειτα του Electromagnetic Transient Program (EMTP) [1]. Ο ΨΠΠΧ RTDS[®] (Real Time Digital Simulator, Σχήμα 1.3) αναπτύχθηκε το 1993 και χρησιμοποιείται κατά κανόνα για προσομοιώσεις ΣΗΕ [8]. Τα μοντέλα των επιμέρους συσκευών ενός ΣΗΕ (μετασχηματιστές, γεννήτριες κτλ) εκτελούνται σε διαφορετικές κάρτες επεξεργασίας, οι οποίες λειτουργούν παράλληλα, πετυχαίνοντας μικρό βήμα προσομοίωσης. Η OPAL-RT (Σχήμα 1.4) που ιδρύθηκε το 1997, κάνει χρήση πολυπύρηνων επεξεργαστών ηλεκτρονικών υπολογιστών και οι εφαρμογές της δεν περιορίζονται στον τομέα των ΣΗΕ (π.χ. εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία κ.α.) [9]. Επιπλέον ΨΠΠΧ είναι εμπορικά διαθέσιμοι και επίσης έχουν αναπτυχθεί προσομοιωτές χαμηλού κόστους από ερευνητικά κέντρα και πανεπιστήμια (π.χ. [10][11]).



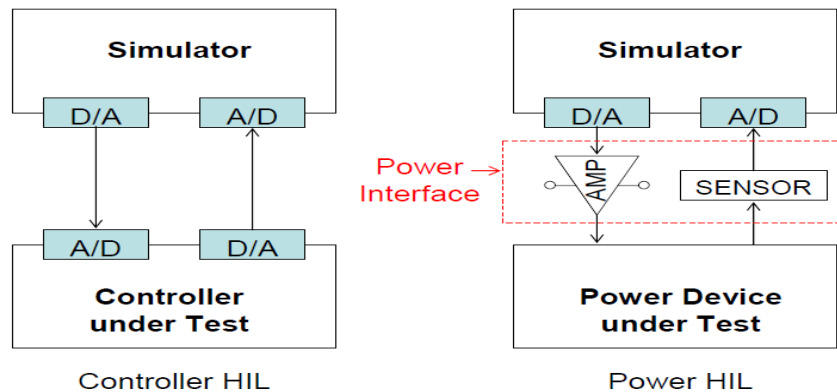
Σχήμα 1.3. Ο Ψηφιακός Προσομοιωτής Πραγματικού Χρόνου RTDS[®] [8]



Σχήμα 1.4. Ο Ψηφιακός Προσομοιωτής Πραγματικού Χρόνου OPAL-RT (eMEGAsim) [9]

Υπάρχουν δύο κατηγορίες HIL δοκιμών. Στις Controller HIL (CHIL) δοκιμές, μία πραγματική μονάδα ελέγχου (π.χ. ελεγκτής αντιστροφes, ψηφιακός ηλεκτρονόμος) συνδέεται σε προσομοιωμένο σύστημα που εκτελείται στον ΨΠΠΧ [12]-[14]. Στις Power

HIL (PHIL) δοκιμές μία πραγματική συσκευή ισχύος (π.χ. αντιστροφέας, κινητήρας) συνδέεται σε προσομοιωμένο σύστημα. Για να γίνει εφικτή αυτή η σύνδεση απαιτείται η χρήση κατάλληλης διεπαφής ισχύος (Power interface στο Σχήμα 1.5) που αποτελείται από ενισχυτή ισχύος, εφόσον ο ΨΠΠΧ μπορεί να διαχειριστεί μόνο σήματα (π.χ. $\pm 10V$), και αισθητήρα. Η διεπαφή ισχύος εισάγει σφάλμα στο σύστημα κλειστού βρόχου το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια. Επίσης, η μη ιδανικότητα της διεπαφής ισχύος μπορεί να μειώσει την ακρίβεια της προσομοίωσης. Στο Σχήμα 1.5 παριστάνονται απλοποιημένες τοπολογίες της CHIL και της PHIL μεθόδου.

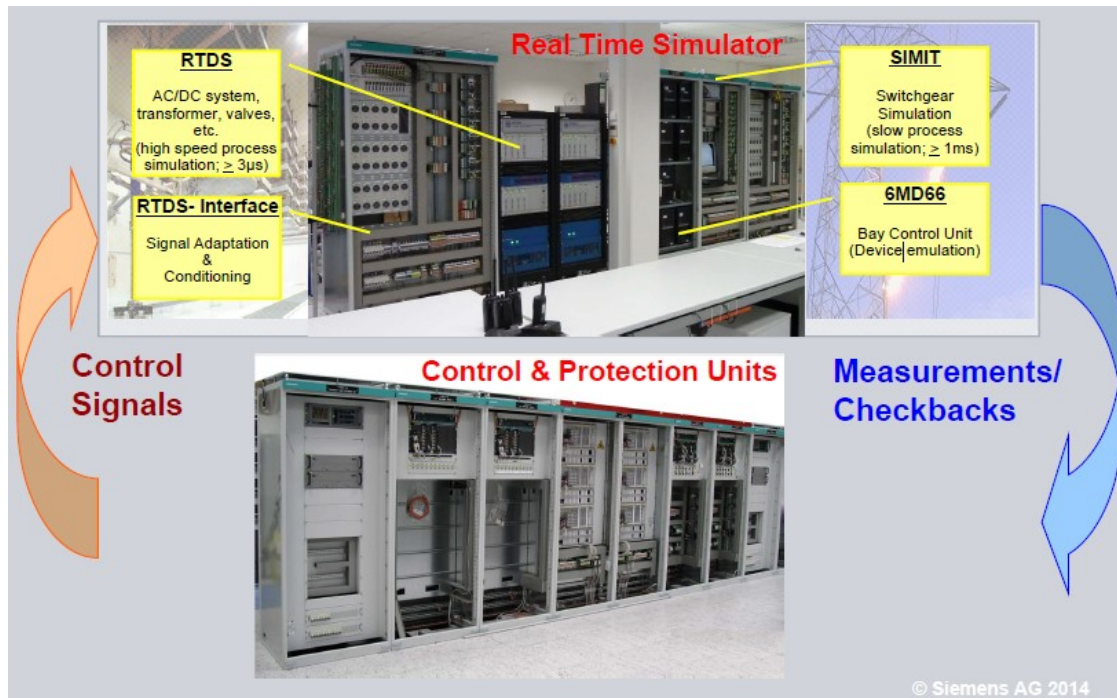


Σχήμα 1.5. Απλοποιημένες τοπολογίες της CHIL και της PHIL μεθόδου [2]

1.4) Η μέθοδος Controller Hardware in the Loop

Στις CHIL δοκιμές δοκιμάζεται μία πραγματική μονάδα ελέγχου (π.χ. Digital Signal Processor (DSP), Programmable Logic Controller, βιομηχανικό PC) πριν την εφαρμογή της στο πραγματικό σύστημα. Η CHIL μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε πολλούς τομείς, όπως στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην αεροναυτική, στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου, στη ρομποτική, στα ΣΗΕ κ.α. Επίσης, έχει χρησιμοποιηθεί για εκπαιδευτικούς σκοπούς σε πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές εφαρμογές.

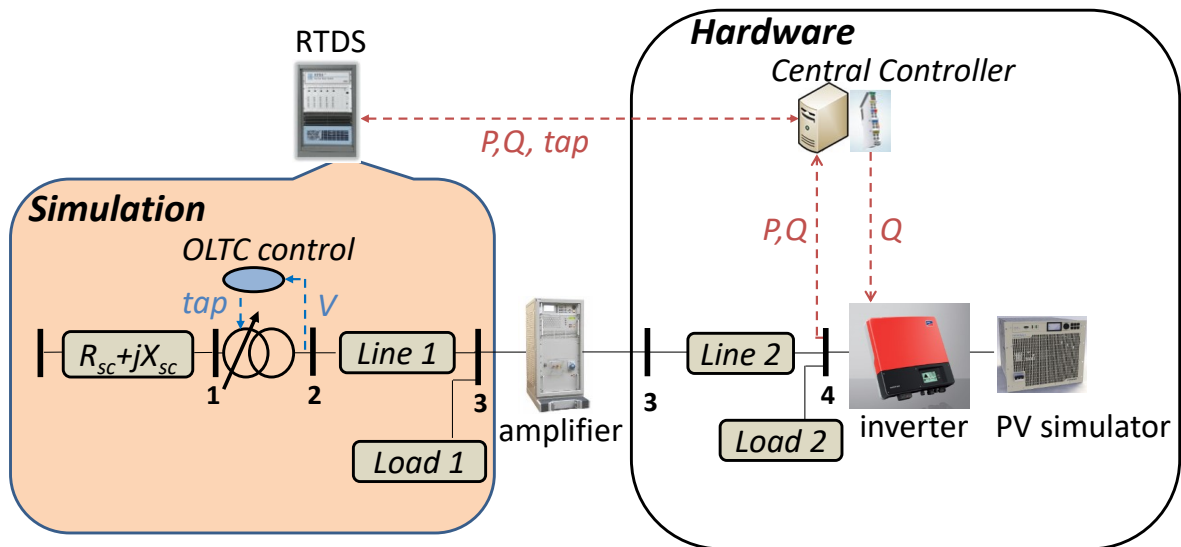
Η CHIL μέθοδος εφαρμόζεται για δοκιμές ελεγκτών συσκευών ηλεκτρονικών ισχύος. Η μονάδα ελέγχου αντιστροφέα (π.χ. DSP) συνδέεται σε προσομοιωμένο σύστημα στον ΨΠΠΧ που περιλαμβάνει τον αντιστροφέα (IGBTs, φίλτρο εξόδου κτλ) και το ηλεκτρικό δίκτυο. Ο ΨΠΠΧ στέλνει στη μονάδα ελέγχου μετρήσεις τάσης και ρεύματος μέσω των αναλογικών εξόδων του και η μονάδα ελέγχου στέλνει τα σήματα ελέγχου των διακοπτικών στοιχείων στον ΨΠΠΧ μέσω ψηφιακών εξόδων. Στο Σχήμα 1.6 παριστάνεται μία σύνθετη διάταξη που εφαρμόζεται στη βιομηχανία κατά την οποία ελέγχονται οι μονάδες ελέγχου και προστασίας High-Voltage Direct Current (HVDC) συστημάτων [15].



Σχήμα 1.6. CHIL δοκιμή μονάδων ελέγχου και προστασίας HVDC συστημάτων που εφαρμόζεται στη βιομηχανία [15]

Η CHIL μέθοδος εφαρμόζεται επίσης για δοκιμές συσκευών προστασίας [16]. Το ΣΗΕ και ο διακόπτης προσομοιώνονται στον ΨΠΠΧ και εξωτερικά συνδέεται ένας ψηφιακός ηλεκτρονόμος. Εφαρμόζεται πλήθος σφάλματος στην προσομοίωση και ελέγχεται η λειτουργία του ηλεκτρονόμου. Ο ηλεκτρονόμος δέχεται μετρήσεις (ρεύματα, τάσεις) μέσω των αναλογικών εξόδων του ΨΠΠΧ και στέλνει εντολή στον προσομοιωμένο διακόπτη μέσω της ψηφιακής εξόδου του. Συνήθως χρησιμοποιούνται ενισχυτές για την ενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου (εφαρμογή κατάλληλου επιπέδου ρεύματος, τάσης). Υπάρχει επίσης η δυνατότητα ενεργοποίησης μέσω σημάτων (low level interface), αρκεί να το επιτρέπει ο κατασκευαστής [B.9]. Τα τελευταία χρόνια δίνεται η δυνατότητα ανταλλαγής σημάτων με βάση το πρότυπο IEC 61850 [17].

Επιπλέον, η CHIL μέθοδος εφαρμόζεται για τη δοκιμή ελεγκτών συστημάτων. Στο Σχήμα 1.7 παριστάνεται η δοκιμή μονάδας ελέγχου που εκτελεί αλγόριθμο συντονισμένου ελέγχου τάσης σε δίκτυο διανομής. Η πραγματική μονάδα ελέγχου δέχεται μετρήσεις από τον ΨΠΠΧ (π.χ. ενεργός και άεργος ισχύς από διάφορους ζυγούς), εκτελεί αλγόριθμο βελτιστοποίησης και στέλνει εντολές (π.χ. άεργος ισχύς, αλλαγή λήψης του ΣΑΤΥΦ) στις προσομοιωμένες και πραγματικές συσκευές (PHIL μέθοδος). Σε αντίστοιχες εφαρμογές [18][19] δοκιμάζεται ελεγκτής μικροδικτύου.



Σχήμα 1.7. CHIL δοκιμή μονάδας ελέγχου που εκτελεί συντονισμένο έλεγχο τάσης σε δίκτυο διανομής: η CHIL μέθοδος συνδυάζεται με την PHIL μέθοδο για πιο ρεαλιστική λειτουργία

1.5) Αντικείμενο και επισκόπηση της διατριβής

Αντικείμενο της διδακτορικής διατριβής είναι η εφαρμογή της προσομοίωσης σε πραγματικό χρόνο και ειδικότερα της μεθόδου PHIL σε μελέτες επίδρασης της ΔΠ στα δίκτυα διανομής. Η μέθοδος PHIL έχει τη δυνατότητα να συμβάλλει στη μετάβαση από τις δοκιμές μεμονωμένων συσκευών σε δοκιμές σε επίπεδο συστήματος, καθώς και στην υπέρβαση της δυσκολίας πλήρους μοντελοποίησης πολύπλοκων συσκευών των ψηφιακών προσομοιώσεων σε συγκεκριμένες περιπτώσεις. Παρόλα αυτά, είναι σχετικά νέα μέθοδος και υπάρχουν προκλήσεις που περιορίζουν την ευρεία χρήση της σε πειράματα, σε τυποποιημένες δοκιμές εξοπλισμού και στην ανάλυση φαινομένων στα ΣΗΕ. Καταρχάς, ζητήματα ευστάθειας δυσχεραίνουν την ασφαλή λειτουργία και θέματα ακρίβειας μπορεί να περιορίσουν την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Επίσης, έχει καταγραφεί περιορισμένη πρακτική εμπειρία για την ανάπτυξη PHIL διατάξεων. Υπάρχει περιορισμένος αριθμός συγκεκριμένων εφαρμογών που να δείχνουν με σαφήνεια την αξία της PHIL μεθόδου σε σχέση με τις συμβατικές προσεγγίσεις και ειδικά με τις αμιγώς ψηφιακές προσομοιώσεις.

Επιπλέον, τα τελευταία χρόνια έχει αναγνωριστεί η αναγκαιότητα παροχής επικουρικών υπηρεσιών από τις μονάδες ΔΠ. Έχει δημοσιευθεί πλήθος προτύπων και οδηγιών, όμως σε αρκετές περιπτώσεις οι απαιτήσεις δεν είναι εναρμονισμένες και παράλληλα απουσιάζουν ολοκληρωμένες διαδικασίες δοκιμών για συγκεκριμένες απαιτήσεις. Επίσης, υπάρχει η ανάγκη μελέτης των αλληλεπιδράσεων μεταξύ μονάδων ΔΠ που παρέχουν επικουρικές υπηρεσίες και του δικτύου διανομής. Επιπλέον, στα πλαίσια της ανάπτυξης των ευφών δικτύων η μελέτη της επίδρασης της ΔΠ σε άλλες συσκευές, όπως στους ηλεκτρονικούς μετρητές, αποκτά μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Η αποτελεσματική εκπαίδευση των φοιτητών σε σύγχρονα θέματα των ΣΗΕ έχει αυξανόμενη σημασία και η χρήση νέων μεθόδων μπορεί να είναι ωφέλιμη, δεδομένης της περιορισμένης εξοικείωσης των φοιτητών με πραγματικά συστήματα ισχύος.

Η διατριβή αυτή επιχειρεί να συμβάλλει στην αντιμετώπιση των παραπάνω προκλήσεων. Η δομή της έχει ως εξής.

Στο πρώτο Κεφάλαιο εξηγήθηκαν οι δυνατότητες της PHIL μεθόδου σε σχέση με τις ψηφιακές προσομοιώσεις και τις εργαστηριακές δοκιμές. Παρουσιάστηκε η προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο και η μέθοδος HIL. Στη συνέχεια εξηγήθηκε η μέθοδος CHIL και παρουσιάστηκαν αντιπροσωπευτικές εφαρμογές.

Στο δεύτερο Κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η μέθοδος PHIL δίνοντας έμφαση σε ζητήματα ευστάθειας και ακρίβειας. Εξηγείται η τοπολογία, η αναγκαιότητα χρήσης διεπαφής ισχύος και αναφέρονται διαφορετικές τεχνολογίες ενισχυτών ισχύος. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το πρόβλημα της ευστάθειας της PHIL μεθόδου και αναλύονται οι βασικές μέθοδοι εκτίμησης της (κριτήρια Nyquist και Routh-Hurwitz, γεωμετρικός τόπος ριζών, δυναμική προσομοίωση). Ακολουθεί παρουσίαση της εκτίμησης της ακρίβειας της PHIL μεθόδου. Αναφέρονται οι βασικές μέθοδοι επίτευξης της ευστάθειας με χρήση κατάλληλων τοπολογιών σύνδεσης ή την εισαγωγή αλγορίθμων ελέγχου στο προσομοιωμένο σύστημα. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η προτεινόμενη μέθοδος επίτευξης ευστάθειας που διατηρεί καλή ακρίβεια. Η μέθοδος επιτρέπει τη χρήση δοκιμίου μικρότερης ισχύος για την εκτίμηση των αλληλεπιδράσεων του δοκιμίου πλήρους ισχύος με το ΣΗΕ. Αναλύονται θέματα ευστάθειας και γίνεται ποσοτικοποίηση της βελτίωσης της ακρίβειας χάρη στη χρήση της μεθόδου. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε δίκτυο διανομής με ΔΠ.

Στο τρίτο Κεφάλαιο εξετάζεται η παροχή επικουρικών υπηρεσιών από μονάδες ΔΠ. Παρουσιάζονται οι τρόποι συμβολής της ΔΠ στη ρύθμιση τάσης και αναλύεται η ευστάθεια του ελεγκτή τάσης – αέργου ισχύος ($Q(V)$). Εξηγείται η δυνατότητα συμβολής της ΔΠ και αποθήκευσης στη ρύθμιση συχνότητας κάνοντας χρήση καμπύλης στατισμού και εικονικής αδράνειας. Ακολουθεί ανασκόπηση διεθνών προτύπων/οδηγιών, συγκριτική ανάλυση και αναγνώριση ελλείψεων που αφορά στη ρύθμιση τάσης σε μόνιμη κατάσταση, στη συμπεριφορά σε μεταβατική κατάσταση και στη ρύθμιση συχνότητας. Προτείνονται προηγμένες διαδικασίες δοκιμών συμβατικού τύπου και PHIL δοκιμές για επικουρικές υπηρεσίες.

Στο τέταρτο Κεφάλαιο περιγράφεται η ανάπτυξη της εργαστηριακής διάταξης PHIL στο εργαστήριο ΣΗΕ του ΕΜΠ. Περιγράφεται ο εξοπλισμός και η επέκταση του αλγορίθμου ελέγχου ηλεκτρονικού μετατροπέα για λειτουργία ως διεπαφή ισχύος σε PHIL πειράματα. Εφαρμόζονται αλγόριθμοι προστασίας στον ΨΠΠΧ και στη διεπαφή ισχύος για την αποφυγή προβλημάτων σε περίπτωση αστάθειας. Στη συνέχεια ορίζονται διαδικασία, τοπολογία και δίκτυο αναφοράς για την πραγματοποίηση PHIL δοκιμών. Ακολουθούν προκαταρκτικά PHIL πειράματα σε απλό διαιρέτη τάσης και με πραγματικό αντιστροφέα φωτοβολταϊκών.

Στο πέμπτο Κεφάλαιο πραγματοποιούνται αμιγώς ψηφιακές προσομοιώσεις και PHIL δοκιμές για μελέτες ρύθμισης τάσης και συχνότητας. Προσομοιώνονται περιπτώσεις προβληματικής συνεργασίας τοπικού ελέγχου ΔΠ και ΣΑΤΥΦ, που αφορούν τον χρονικό συντονισμό, αύξηση της τάσης της ΔΠ εξαιτίας του ΣΑΤΥΦ, επαναλαμβανόμενες αλλαγές λήψης, εναντίωση της ΔΠ στις αλλαγές λήψης κ.α. Η ΔΠ λειτουργεί με $Q(V)$ ή $\cos\phi(P)$ έλεγχο. Στη συνέχεια εφαρμόζεται η προτεινόμενη μέθοδος επίτευξης ευστάθειας και

ακρίβειας (Κεφάλαιο 2) και πραγματοποιούνται PHIL δοκιμές προβληματικής συνεργασίας ΔΠ και ΣΑΤΥΦ χρησιμοποιώντας αντιστροφέα μικρότερης κλίμακας και βγάζοντας συμπεράσματα για τον αντιστροφέα πλήρους ισχύος. Οι PHIL δοκιμές φανερώνουν αλληλεπιδράσεις που δεν ήταν ορατές στις αμιγώς ψηφιακές προσομοιώσεις. Ακολουθεί επικύρωση μοντέλου ελεγκτή τάσης $Q(V)$ μονάδας ΔΠ συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των PHIL δοκιμών και των αμιγώς ψηφιακών προσομοιώσεων. Επιπλέον, πραγματοποιούνται PHIL δοκιμές ρύθμισης συχνότητας, όπου πραγματικός αντιστροφέας λειτουργεί με $P(f)$ χαρακτηριστική και προσομοιωμένη μονάδα αποθήκευσης παρέχει εικονική αδράνεια σε απομονωμένο σύστημα.

Στο έκτο Κεφάλαιο η μέθοδος PHIL χρησιμοποιείται σε εργαστηριακές ασκήσεις φοιτητών. Εξηγούνται τα πλεονεκτήματα της HIL μεθόδου στην εργαστηριακή εκπαίδευση και γίνεται αναφορά στη βιωματική μάθηση με βάση τον κύκλο του Kolb. Επιλέγονται τέσσερα σημαντικά θέματα για την κατανόηση της λειτουργίας των σύγχρονων ΣΗΕ: κατανομή φορτίου μεταξύ σύγχρονων γεννητριών και ΔΠ, ρύθμιση τάσης με ΔΠ, βραχυκυκλώματα σε δίκτυα με ΔΠ και λειτουργία μικροδικτύου. Για τη δυνατότητα χρήσης πραγματικού εξοπλισμού από τους φοιτητές σε μικρές ομάδες, αναπτύσσονται δύο ανεξάρτητες εργαστηριακές διατάξεις PHIL. Η αξιολόγηση των εργαστηριακών ασκήσεων από τους φοιτητές είναι σαφώς θετική, υπογραμμίζοντας την αξία της PHIL μεθόδου για την εκπαίδευση στα ΣΗΕ.

Στο έβδομο Κεφάλαιο αναλύονται προβλήματα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών αντιστροφέων ΔΠ σε ηλεκτρονικούς μετρητές που μπορούν να οδηγήσουν σε εσφαλμένη καταγραφή της ενέργειας. Γίνεται λεπτομερής ανασκόπηση των προτύπων/οδηγιών, υπογραμμίζεται το κενό στο εύρος συχνοτήτων 2 kHz - 150 kHz και περιγράφονται οι πρόσφατες εξελίξεις στην τυποποίηση και οι υπολειπόμενες εργασίες. Παρουσιάζονται διατάξεις δοκιμών εκπομπών και ατρωσίας στο εύρος 2 kHz - 150 kHz και πραγματοποιούνται δοκιμές ατρωσίας ηλεκτρονικών μετρητών και δοκιμές εκπομπών αντιστροφέων.

Τέλος, στο όγδοο Κεφάλαιο παρατίθενται τα βασικά συμπεράσματα, η συμβολή της εργασίας καθώς και προτάσεις για μελλοντική συνέχιση.

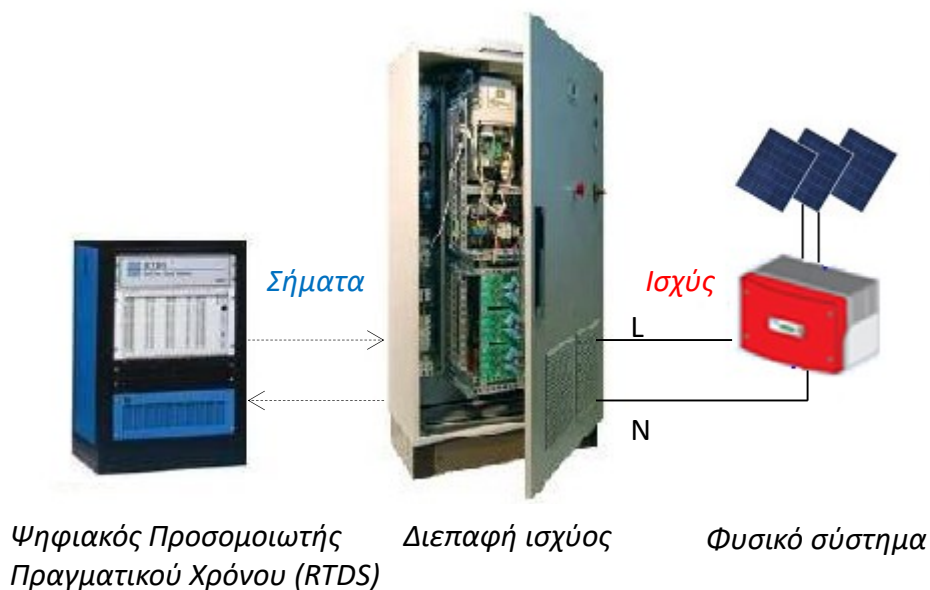
Οι PHIL δοκιμές ρύθμισης τάσης της παραγράφου 5.3 έγιναν στα πλαίσια ερευνητικής εργασίας στο ερευνητικό κέντρο Austrian Institute of Technology (AIT) στην Αυστρία. Το μεγαλύτερο μέρος των δοκιμών ατρωσίας και εκπομπών της παραγράφου 7.5 έγιναν στα πλαίσια ερευνητικής επίσκεψης στο ερευνητικό κέντρο Fraunhofer IWES στη Γερμανία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Η ΜΕΘΟΔΟΣ POWER HARDWARE IN THE LOOP: ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΚΑΙ ΑΚΡΙΒΕΙΑ

2.1) Εισαγωγή

Στη μέθοδο CHIL που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 1, μία πραγματική μονάδα ελέγχου συνδέεται σε προσομοιωμένο σύστημα. Για την ανταλλαγή σημάτων συνήθως αρκούν αναλογικοί/ψηφιακοί και ψηφιακοί/αναλογικοί μετατροπείς της μονάδας ελέγχου και του ΨΠΠΧ. Από την άλλη, στη μέθοδο PHIL συνδέεται στο προσομοιωμένο σύστημα μία πραγματική συσκευή (ή σύστημα) που παράγει ή απορροφά ισχύ (πχ. φωτοβολταϊκός αντιστροφέας, κινητήρας). Εφόσον δεν ανταλλάσσονται απλώς σήματα μεταξύ του ΨΠΠΧ και του φυσικού συστήματος, είναι απαραίτητη η χρήση κατάλληλης διεπαφής ισχύος.

Σε αντίθεση με την CHIL μέθοδο η οποία εφαρμόζεται ευρέως εδώ και αρκετά χρόνια, η PHIL είναι μία νεότερη μέθοδος με πολύ λιγότερες αλλά αυξανόμενες εφαρμογές. PHIL εφαρμογές έχουν πραγματοποιηθεί με δοκίμια ηλεκτρικούς κινητήρες, συστήματα οδήγησης κινητήρων σε κλίμακα ως και μερικά MW [20][22], καθώς και για μελέτες ΔΠ [23]-[30]. Στο Σχήμα 2.1 παριστάνεται εργαστηριακή διάταξη πραγματοποίησης PHIL πειραμάτων, όπου το φυσικό σύστημα αποτελείται από αντιστροφέα φωτοβολταϊκών και φωτοβολταϊκά πλαίσια.



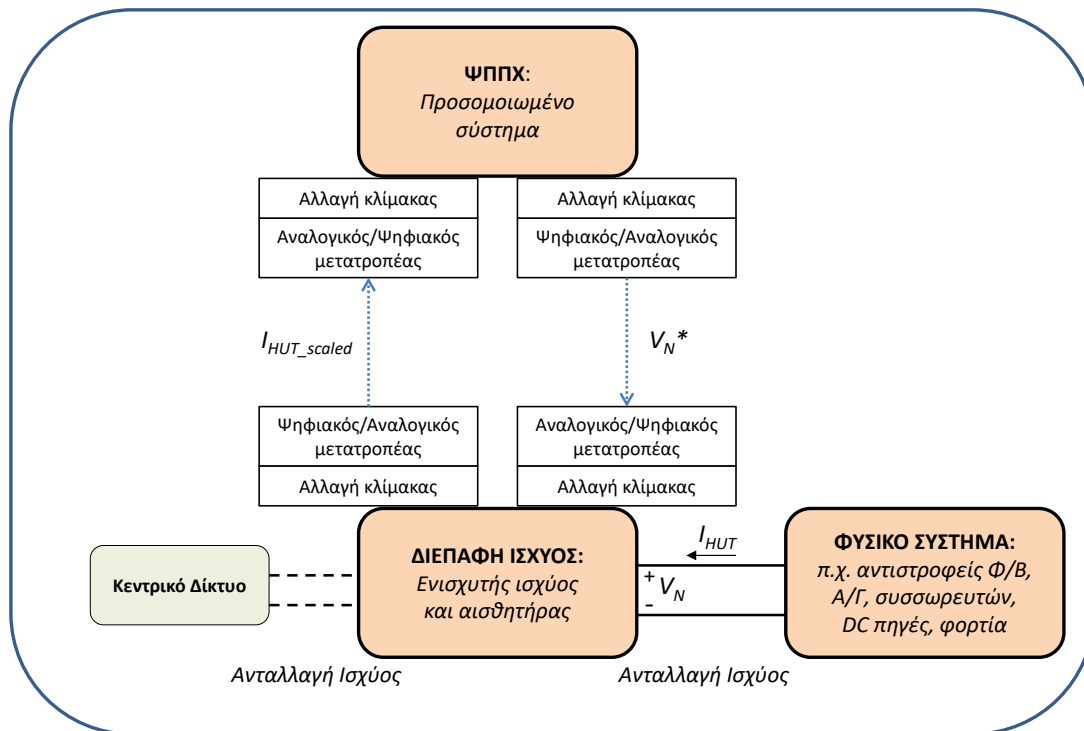
Σχήμα 2.1. Εργαστηριακή διάταξη πραγματοποίησης PHIL πειραμάτων

Σε αυτό το Κεφάλαιο [A.4][B.5] περιγράφεται η μέθοδος PHIL, εξηγείται η τοπολογία και αναφέρονται διαφορετικοί τύποι ενισχυτών ισχύος. Αναλύεται το ζήτημα της ευστάθειας της PHIL μεθόδου, περιγράφονται μέθοδοι εκτίμησης της ευστάθειας (κριτήριο Nyquist, Routh-Hurwitz, γεωμετρικός τόπος ριζών, δυναμική προσομοίωση), γίνεται σύγκριση των μεθόδων και δίνονται συστάσεις. Ακολουθεί περιγραφή μεθόδων εκτίμησης της ακρίβειας

της PHIL μεθόδου. Αναφέρονται μέθοδοι επίτευξης της ευστάθειας και ειδικότερα η εισαγωγή βαθυπερατού φίλτρου στην ανατροφοδότηση. Στη συνέχεια προτείνεται νέα μέθοδος επίτευξης της ευστάθειας διατηρώντας καλή ακρίβεια, κατά την οποία μεταφέρεται σύνθετη αντίσταση από το προσομοιωμένο στο φυσικό σύστημα και πραγματοποιείται αλλαγή κλίμακας επιτρέποντας τη σύνδεση μικρότερου δοκιμίου για την εξέταση του δοκιμίου πλήρους κλίμακας. Αναλύεται η επίδραση της αλλαγής κλίμακας στην ευστάθεια, υπολογίζεται η ελάχιστη σύνθετη αντίσταση που πρέπει να μεταφερθεί στο φυσικό σύστημα για την επίτευξη ευστάθειας και γίνεται ποσοτικοποίηση της βελτίωσης της ακρίβειας με τη χρήση της μεθόδου. Τέλος, η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόζεται με επιτυχία σε δίκτυο διανομής που περιλαμβάνει ΔΠ. Στο Κεφάλαιο 5 η προτεινόμενη μέθοδος χρησιμοποιείται για εφαρμογές ρύθμισης τάσης.

2.2) Η μέθοδος Power Hardware in the Loop

Η διεπαφή ισχύος για τη σύνδεση του προσομοιωμένου συστήματος με το φυσικό σύστημα αποτελείται από ενισχυτή ισχύος που λαμβάνει την τιμή αναφοράς μιας μεταβλητής από την προσομοίωση (π.χ. τάσης) και την εφαρμόζει στο φυσικό σύστημα, καθώς και από αισθητήρα που μετρά την αντίδραση του φυσικού συστήματος (π.χ. ρεύμα) και την εισάγει πίσω στον ΨΠΠΧ. Η διεπαφή ισχύος ανταλλάσσει σήματα με τον ΨΠΠΧ και ισχύ με το φυσικό σύστημα. Πιο αναλυτικά, τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται η PHIL διάταξη συμπεριλαμβανομένης της ανταλλαγής σημάτων και ισχύος φαίνονται στο Σχήμα 2.2. Η τάση του ζυγού στον οποίο συνδέεται το φυσικό σύστημα (κοινός ζυγός μεταξύ του προσομοιωμένου και του φυσικού συστήματος) υπολογίζεται στον ΨΠΠΧ. Η τάση υποβιβάζεται και ο ψηφιακός/αναλογικός μετατροπέας του ΨΠΠΧ στέλνει την αναφορά της τάσης (V_N^*) στον ενισχυτή ισχύος ως αναλογικό σήμα. Η αναφορά της τάσης ψηφιοποιείται από τον ψηφιακό/αναλογικό μετατροπέα της διεπαφής ισχύος, έπειτα ενισχύεται και η μονάδα ελέγχου της διεπαφής ισχύος στέλνει τα κατάλληλα σήματα ελέγχου στον μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος και παράγει την επιθυμητή τάση (V_N). Αυτή η ελεγχόμενη AC τάση εφαρμόζεται στο φυσικό σύστημα (π.χ. Φ/B αντιστροφέας). Το ρεύμα που ρέει στο φυσικό σύστημα μετρείται από τον αισθητήρα και αποστέλλεται μέσω του ψηφιακού/αναλογικού μετατροπέα της διεπαφής ισχύος στον ΨΠΠΧ ώστε να κλείσει ο βρόχος. Ο αναλογικός/ψηφιακός μετατροπέας του ΨΠΠΧ ψηφιοποιεί το σήμα ανάδρασης και το σήμα εισάγεται σε εξαρτημένη πηγή ρεύματος στο προσομοιωμένο σύστημα (στον κοινό ζυγό), η οποία αντιπροσωπεύει το ρεύμα που ρέει στο φυσικό σύστημα. Σημειώνεται πως η ισχύς που παράγει ή απορροφά το φυσικό σύστημα, καταλήγει ή προέρχεται από το κεντρικό δίκτυο μέσω του ενισχυτή ισχύος.



Σχήμα 2.2. Τοπολογία PHIL διάταξης συμπεριλαμβανομένης της ανταλλαγής σημάτων και ισχύος

2.2.1) Ενισχυτές ισχύος

Διαφορετικοί τύποι ενισχυτών ισχύος χρησιμοποιούνται σε PHIL πειράματα: γραμμικοί ενισχυτές, διακοπτόμενοι ενισχυτές (switched-mode) και συστήματα γεννήτριας-κινητήρα-φορτίου.

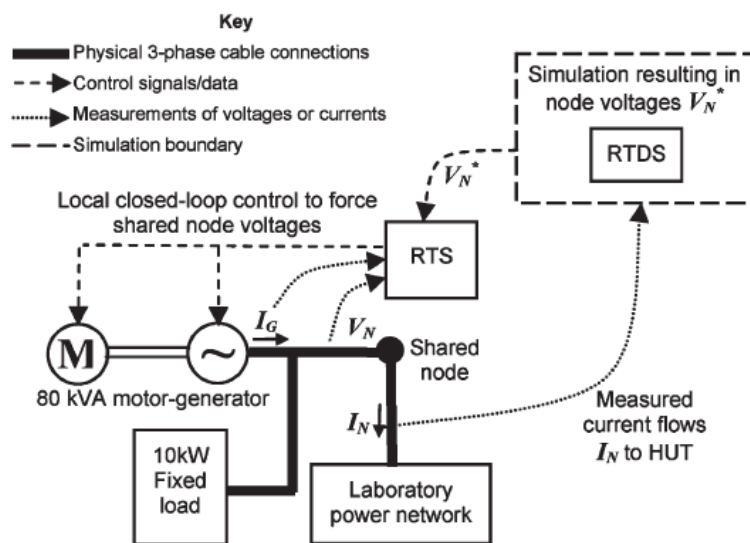
Οι γραμμικοί ενισχυτές αποτελούνται συνήθως από παράλληλα τρανζίστορ που λειτουργούν στη γραμμική περιοχή. Παρουσιάζουν πολύ μικρή χρονική καθυστέρηση (λίγα μs) και υψηλή ακρίβεια [B.20]. Για τους παρακάτω λόγους είναι η ιδανική επιλογή για PHIL εφαρμογές, εφόσον οι παραπάνω παράγοντες επηρεάζουν ιδιαίτερα την ευστάθεια και την ακρίβεια του πειράματος. Επιπλέον, έχουν γρήγορη δυναμική συμπεριφορά, μπορούν να λειτουργήσουν και στα τέσσερα τεταρτημόρια (P-Q) καθώς και ως DC ενισχυτές. Από την άλλη, παρουσιάζουν αυξημένο κόστος, μειωμένες δυνατότητες ελέγχου («μαύρο κουτί») και η κατασκευή τους για υψηλή ονομαστική ισχύ είναι δύσκολη. Επίσης, παρουσιάζουν αρκετές απώλειες και μπορεί να έχουν περιορισμούς στη μέγιστη απορροφούμενη ισχύ.

Οι διακοπτόμενοι ενισχυτές ισχύος αποτελούνται από ημιαγώγιμα στοιχεία που λειτουργούν ως διακοπτικές μονάδες. Ένας AC/DC/AC μετατροπέας, που αποτελείται από ανορθωτή και αντιστροφέα, επιτρέπει τη σύνδεση από τη μία πλευρά με το AC δίκτυο και από την άλλη με το φυσικό σύστημα. Ο ανορθωτής (AC/DC) επιτυγχάνει τη σύνδεση με το δίκτυο και κρατάει σταθερή την τάση του DC ζυγού, ενώ ο αντιστροφέας (DC/AC) λαμβάνει το σήμα αναφοράς από τον ΨΠΠΧ και το εφαρμόζει στο δοκίμιο με τη χρήση κατάλληλου αλγορίθμου ελέγχου. Διαφορετικές στρατηγικές ελέγχου (PI, PID,

προβλεπτικός έλεγχος κτλ) [31][32] και τοπολογίες του φίλτρου εξόδου (L-C ή L-C-L) έχουν προταθεί ανάλογα με την εφαρμογή. Η χρήση υψηλής διακοπτικής συχνότητας μπορεί να επιτρέψει την καλύτερη παρακολούθηση των γρήγορων δυναμικών του ΨΠΠΧ [32]. Ο ενισχυτής μπορεί να λειτουργήσει και στα τέσσερα τεταρτημόρια (P-Q).

Οι διακοπόμενοι ενισχυτές παρουσιάζουν υψηλότερη χρονική καθυστέρηση και χαμηλότερη ακρίβεια (π.χ. αρμονικές) από τους γραμμικούς ενισχυτές. Επίσης, υπάρχει η πιθανότητα ταλαντώσεων αν και το φυσικό σύστημα διαθέτει συσκευές ηλεκτρονικών ισχύος (παράγραφος 4.6.2). Από την άλλη, είναι λιγότερο ακριβοί, μπορούν να κατασκευαστούν ακόμη και σε τάξη των MW [33] και παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη ευελιξία. Η ίδια διάταξη μπορεί να λειτουργήσει ως ενισχυτής τάσης και ενισχυτής ρεύματος με την εφαρμογή κατάλληλων αλγορίθμων ελέγχου καθώς και να χρησιμοποιηθεί σε άλλες εφαρμογές.

Ένας άλλος τρόπος διασύνδεσης του προσομοιωμένου συστήματος με το φυσικό σύστημα που αναφέρεται στη βιβλιογραφία [23] είναι η χρήση σύγχρονης γεννήτριας συζευγμένης με κινητήρα (που ελέγχεται από τη μονάδα ελέγχου RTS στο Σχήμα 2.3) και ωμικό φορτίο (ώστε να είναι εφικτή η απορρόφηση ισχύος). Ο ΨΠΠΧ στέλνει την τάση αναφοράς V_N^* στον ελεγκτή και η γεννήτρια εφαρμόζει τη επιθυμητή τάση (V_N) στο φυσικό σύστημα. Το ρεύμα που ρέει στο φυσικό σύστημα μετριέται και εισάγεται πίσω στον ΨΠΠΧ όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις. Η συγκεκριμένη διάταξη παρουσιάζει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και χειρότερη δυναμική συμπεριφορά από τις προαναφερόμενες.



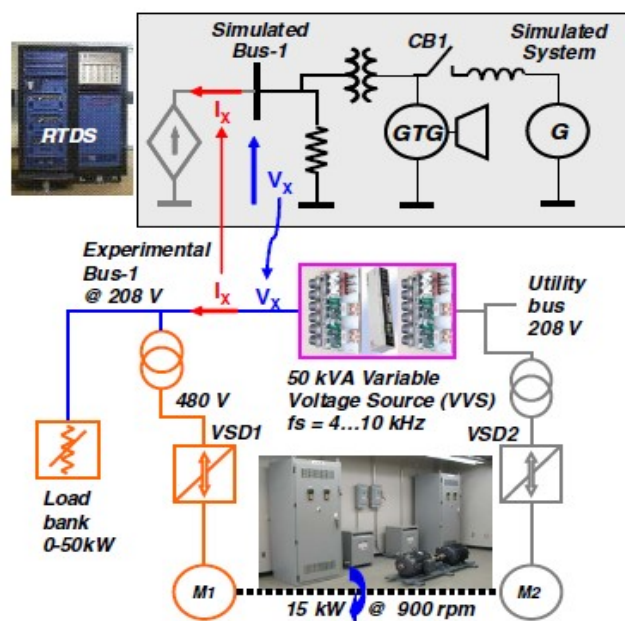
Σχήμα 2.3. Σύστημα γεννήτριας-κινητήρα-φορτίου ως διεπαφή ισχύος [23].

2.2.2) Παράδειγμα ηλεκτρικής και μηχανικής PHIL προσομοίωσης

Εκτός από την ηλεκτρική PHIL προσομοίωση που περιγράφηκε, υπάρχει και η μηχανική PHIL προσομοίωση. Στη μηχανική PHIL προσομοίωση το δοκίμιο μπορεί να αποτελεί ένα κινητήριο σύστημα ηλεκτρικού οχήματος [34], ένας κινητήρας πρόωσης πλοίου [35] κ.α. Ο ΨΠΠΧ επιλύει ένα μηχανικό μοντέλο, όπως ένα μοντέλο πρόωσης πλοίου ή ένα μοντέλο έλικας ανεμογεννήτριας. Για παράδειγμα, το δοκίμιο μπορεί να είναι μια γεννήτρια και η

διεπαφή ισχύος να είναι ένας κινητήρας με το σύστημα οδήγησης του το οποίο συνδέεται στη γεννήτρια. Ο ΨΠΠΧ παρέχει σήματα αναφοράς (π.χ. ροπής, ταχύτητας) στη γεννήτρια (μέσω της διεπαφής ισχύος) και λαμβάνει την αντίδραση της μέσω σημάτων ανάδρασης. Σημειώνεται πως αντικείμενο της διατριβής είναι η ηλεκτρική PHIL προσομοίωση, στην οποία ο ΨΠΠΧ προσομοιώνει ένα ηλεκτρικό σύστημα, οπότε η διεπαφή ισχύος συνδέεται ηλεκτρικά με το φυσικό σύστημα.

Ακολουθεί περιγραφή μίας σύνθετης PHIL εφαρμογής από τη βιβλιογραφία [24]. Μελετήθηκαν θέματα επανασυγχρονισμού σε δίκτυα με ΔΠ. Στον ΨΠΠΧ προσομοιώθηκε μεγάλη γεννήτρια (G) συνδεδεμένη με αεριοστρόβιλο (GTG) και φορτίο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4. Το φυσικό σύστημα αποτελούσε σύστημα ηλεκτρονικών ισχύος (VSD 1) και γεννήτρια (M1) που αντιπροσώπευε μία μικρή ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών. Η ηλεκτρική διεπαφή ισχύος (VVS) υλοποιούσε τη σύνδεση του φυσικού συστήματος με τον ΨΠΠΧ. Ο κινητήρας (M2) παρείχε στην ανεμογεννήτρια (M1) τη ροπή που υπολογιζόταν από ένα προσομοιωμένο μοντέλο έλικας μέσω του συστήματος οδήγησης (VSD2). Είναι φανερό πως σε αυτή την εφαρμογή υλοποιείται ταυτόχρονα ηλεκτρική PHIL προσομοίωση (με διεπαφή ισχύος το VVS) και μηχανική PHIL προσομοίωση (με διεπαφή ισχύος τα VSD2-M2). Βύθιση τάσης στην προσομοίωση οδήγησε τον διακόπτη (CB1) να νησιδοποιήσει το υποδίκτυο που αποτελείται από τον αεριοστρόβιλο και την ανεμογεννήτρια. Κατά τον επανασυγχρονισμό παρατηρήθηκε πως μεγάλες μεταβολές της συχνότητας οδηγούσαν στην αποσύνδεση της ανεμογεννήτριας (φυσικό σύστημα).



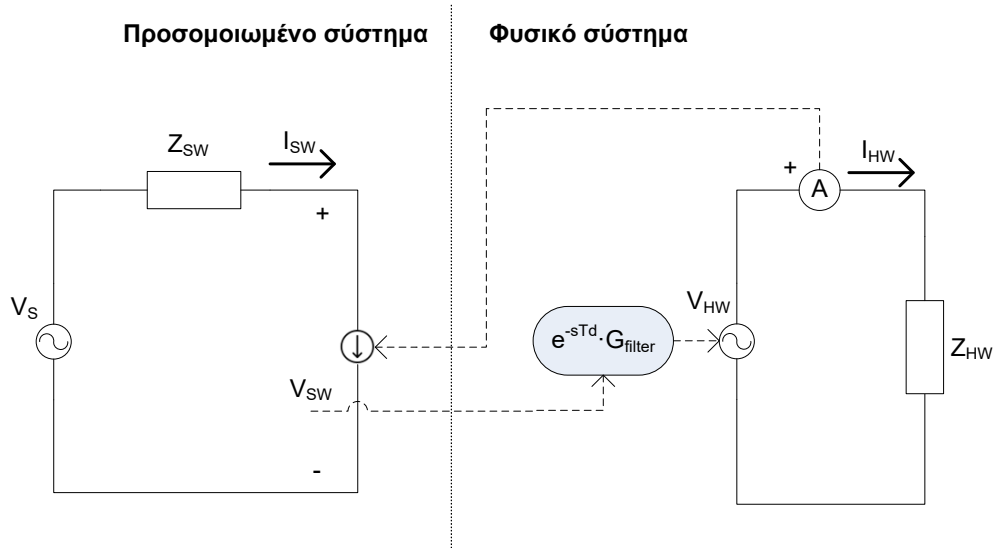
Σχήμα 2.4. PHIL διάταξη για μελέτες νησιδοποίησης και επανασυγχρονισμού [24]

2.3) Ευστάθεια της PHIL μεθόδου

Η διεπαφή ισχύος παίζει σημαντικό ρόλο στην επιτυχή υλοποίηση και την εγκυρότητα των PHIL πειραμάτων. Στην ιδανική περίπτωση, η διεπαφή ισχύος θα είχε μοναδιαίο κέρδος, άπειρο εύρος ζώνης και μηδενική χρονική καθυστέρηση [2]. Στην πράξη, παρουσιάζονται

ατέλειες όπως η χρονική καθυστέρηση του ενισχυτή, το φίλτρο του ενισχυτή, η χρονική καθυστέρηση του αισθητήρα, ο θόρυβος του αισθητήρα κ.α. Επίσης, ο ΨΠΠΧ εισάγει επιπλέον χρονική καθυστέρηση, η οποία μπορεί να είναι ίση με δύο βήματα προσομοίωσης [36][37]. Οι ατέλειες της διεπαφής ισχύος μπορούν να μειώσουν σημαντικά την ακρίβεια της PHIL προσομοίωσης και επίσης να προκαλέσουν αστάθεια. Η εκτίμηση της ευστάθειας της PHIL προσομοίωσης έχει ιδιαίτερη σημασία και είναι απολύτως απαραίτητη πριν την πραγματοποίηση οποιουδήποτε PHIL πειράματος. Σε περίπτωση αστάθειας είναι πιθανή η πρόκληση βλάβης στο φυσικό σύστημα ή ακόμα και στον ενισχυτή ισχύος. Σημειώνεται πως ενδεχόμενη αστάθεια της PHIL μεθόδου εξελίσσεται πολύ ταχύτερα από φαινόμενα αστάθειας ΣΗΕ [76], οπότε τα δύο προβλήματα μπορούν να θεωρηθούν ανεξάρτητα.

Το πρόβλημα της ευστάθειας κλειστού βρόχου μπορεί να γίνει κατανοητό εύκολα χρησιμοποιώντας το κύκλωμα του διαιρέτη τάσης (Σχήμα 2.5). Το προσομοιωμένο σύστημα αποτελείται από AC πηγή τάσης σε σειρά με σύνθετη αντίσταση (Z_{SW}) και το φυσικό σύστημα από σύνθετη αντίσταση (Z_{HW}).



Σχήμα 2.5. Υλοποίηση διαιρέτης τάσης σε PHIL πείραμα

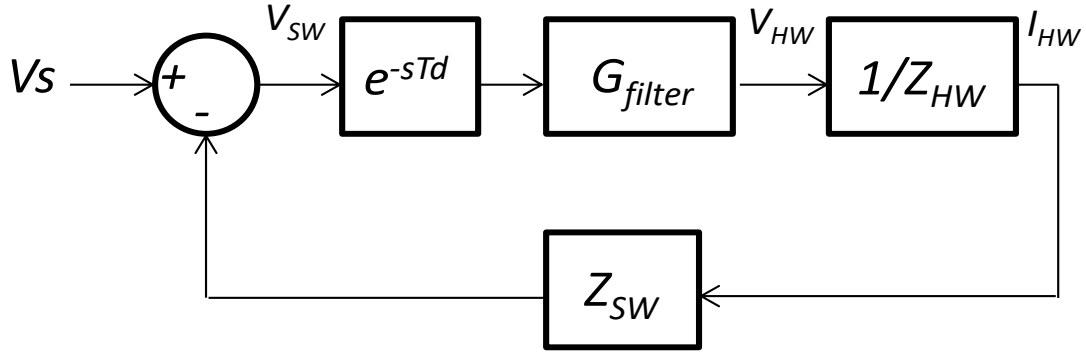
Ο ενισχυτής ισχύος μπορεί να μοντελοποιηθεί ως το γινόμενο χρονικής καθυστέρησης και βαθυπερατού φίλτρου [1][38]. Από τις παρακάτω εξισώσεις προκύπτει το διάγραμμα βαθμίδων που παριστάνεται στο Σχήμα 2.6.

$$V_{HW} = V_{SW} \cdot e^{-sT_d} \cdot G_{filter}$$

$$I_{HW} = \frac{V_{HW}}{Z_{HW}}$$

$$I_{SW} = I_{HW}$$

$$V_{SW} = V_s - I_{SW} \cdot Z_{SW} \quad (2.1)$$



Σχήμα 2.6. Διάγραμμα βαθμίδων PHIL πειράματος

Z_{SW} είναι η σύνθετη αντίσταση του προσομοιωμένου δικτύου, Z_{HW} η σύνθετη αντίσταση του φυσικού συστήματος, G_{filter} η συνάρτηση μεταφοράς του βαθυπερατού φίλτρου του ενισχυτή και T_d η συνολική χρονική καθυστέρηση (e^{-sT_d} στο πεδίο της συχνότητας). Η ευστάθεια της PHIL προσομοίωσης μπορεί να εκτιμηθεί από τη συνάρτηση μεταφοράς ανοιχτού βρόχου:

$$G_{OL}(s) = \frac{Z_{SW}(s)}{Z_{HW}(s)} e^{-sT_d} \cdot G_{filter}(s) \quad (2.2)$$

Αν αγνοηθεί η επίδραση του βαθυπερατού φίλτρου του ενισχυτή, η συνάρτηση μεταφοράς ανοιχτού βρόχου γίνεται:

$$G_{OL}(s) = \frac{Z_{SW}(s)}{Z_{HW}(s)} e^{-sT_d} \quad (2.3)$$

Για λόγους απλότητας, θεωρούμε πως οι αντιστάσεις του φυσικού συστήματος και της προσομοίωσης είναι καθαρά ωμικές.

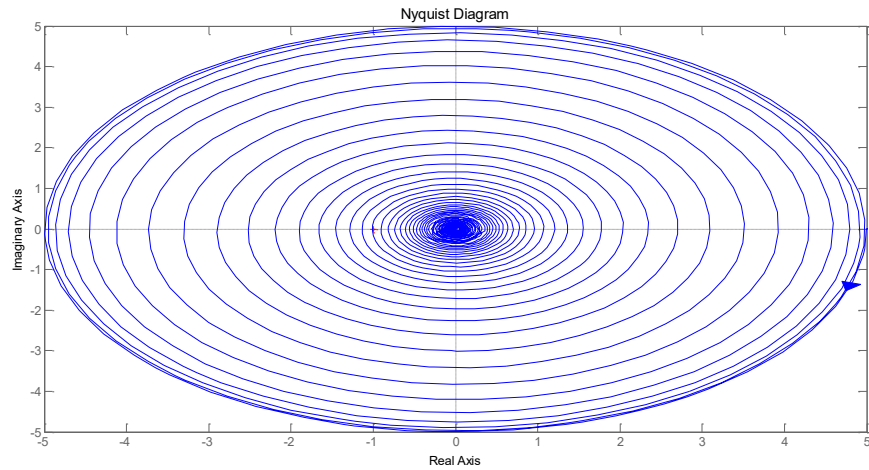
$$G_{OL}(s) = \frac{R_{SW}(s)}{R_{HW}(s)} e^{-sT_d} \quad (2.4)$$

Εφαρμόζοντας το κριτήριο Nyquist προκύπτει πως αν $R_{SW} < R_{HW}$ η PHIL προσομοίωση είναι ευσταθής, αλλά αν $R_{SW} > R_{HW}$ η προσομοίωση γίνεται ασταθής [2].

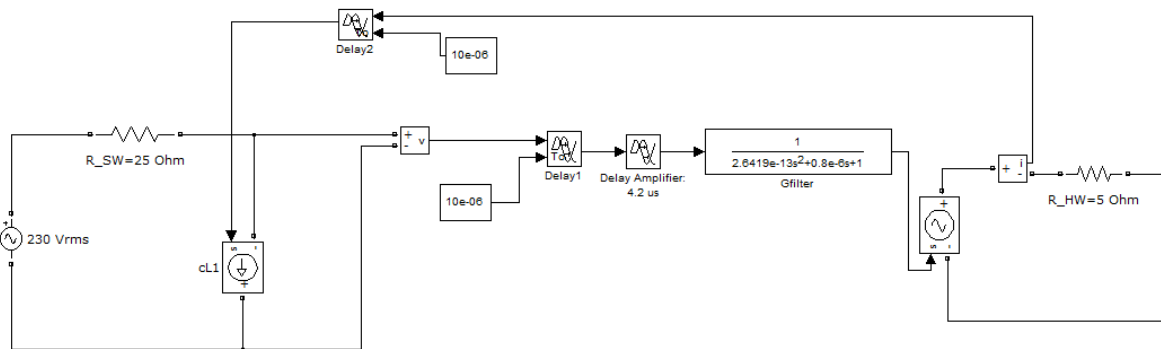
Στη συνέχεια λαμβάνεται υπόψη η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου του ενισχυτή:

$$G_{filter}(s) = \frac{1}{2.6419 \cdot 10^{-13} s^2 + 0.8 \cdot 10^{-6} s + 1} \quad (2.5)$$

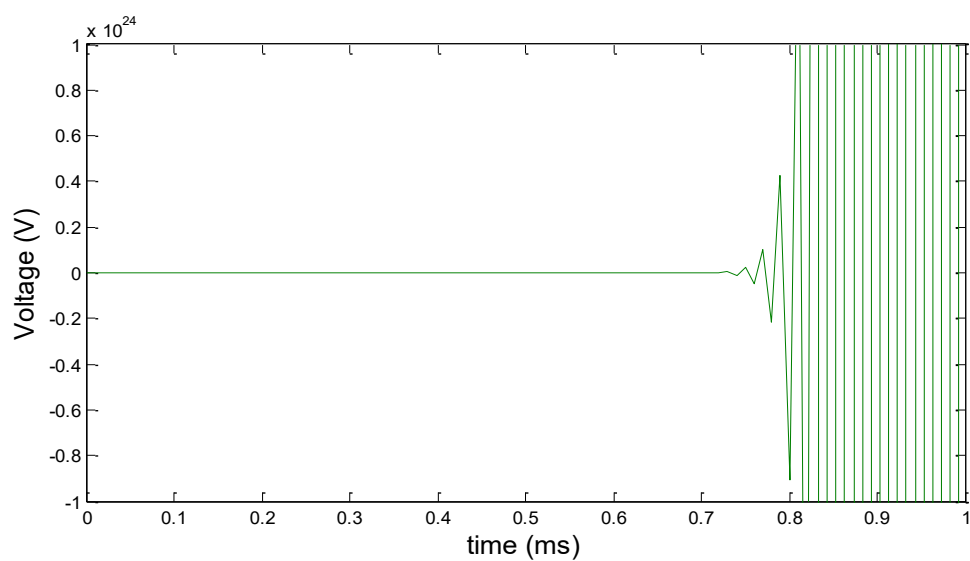
Θεωρείται περίπτωση όπου $R_{SW} > R_{HW}$ ($R_{SW} = 25 \Omega$, $R_{HW} = 5 \Omega$) και συνολική χρονική καθυστέρηση $T_d = 24.2 \mu s$. Στο διάγραμμα Nyquist (Σχήμα 2.7) φαίνεται πως το σημείο $(-1, 0)$ περικυκλώνεται, οπότε σε αυτή την περίπτωση προκύπτει αστάθεια. Η αστάθεια επιβεβαιώνεται πραγματοποιώντας δυναμική εικονική PHIL προσομοίωση [21] (στο Matlab/Simulink ή στο RSCAD/RTDS) η οποία περιλαμβάνει το προσομοιωμένο σύστημα, τη διεπαφή ισχύος και το φυσικό σύστημα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8. Όταν $R_{SW} > R_{HW}$ η τάση του προσομοιωμένου συστήματος (V_{SW}) τείνει γρήγορα προς το άπειρο (Σχήμα 2.9).



Σχήμα 2.7. Διάγραμμα Nyquist στην περίπτωση όπου $R_{SW} > R_{HW}$: αστάθεια



Σχήμα 2.8. Δυναμική εικονική PHIL προσομοίωση που περιλαμβάνει το προσομοιωμένο σύστημα, τη διεπαφή ισχύος και το φυσικό σύστημα



Σχήμα 2.9. Όταν $R_{SW} > R_{HW}$ η τάση τείνει προς το άπειρο: αστάθεια

2.3.1) Μέθοδοι εκτίμησης της ευστάθειας

Αρκετές ερευνητικές εργασίες αναφέρονται στην ευστάθεια των PHIL πειραμάτων [1][2][25][27][36][39][40]. Παρόλα αυτά, υπάρχουν ακόμα αρκετά ζητήματα που παραμένουν ανοιχτά, όπως η εκτίμηση της ευστάθειας με αναλυτικό τρόπο σε πιο σύνθετα συστήματα, η ακριβής εκτίμηση της συχνότητας αποκοπής βαθυπερατού φίλτρου για την επίτευξη ευστάθειας και κυρίως η επίτευξη ευστάθειας διατηρώντας ικανοποιητική ακρίβεια. Σε πολλές περιπτώσεις το φυσικό σύστημα δεν είναι γνωστό εις βάθος (π.χ. εμπορικός αντιστροφέας) δυσκολεύοντας την ανάλυση. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την εκτίμηση της ευστάθειας PHIL πειραμάτων. Παρακάτω περιγράφονται οι βασικότερες μέθοδοι και συγκρίνονται:

- Κριτήριο Nyquist
- Κριτήριο Routh-Hurwitz
- Γεωμετρικός τόπος ριζών
- Δυναμική προσομοίωση

Το κριτήριο Nyquist που εφαρμόστηκε παραπάνω είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος. Η υλοποίηση είναι εύκολη χρησιμοποιώντας λογισμικό (π.χ. Matlab). Αν η συνάρτηση μεταφοράς ανοιχτού βρόχου είναι γνωστή και δεν έχει πόλους στο δεξί ημιεπίπεδο, η ευστάθεια μπορεί να προσδιοριστεί από το αν το διάγραμμα Nyquist περιβάλλει το σημείο $(-1,0)$.

Ρητές προσεγγίσεις χρονικών καθυστερήσεων χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή μεθόδων ανάλυσης ευστάθειας (π.χ. Routh-Hurwitz, γεωμετρικός τόπος ριζών) που μπορούν να παρέχουν ικανοποιητική ακρίβεια σε εύλογο εύρος συχνοτήτων. Η προσέγγιση Padé πρώτης τάξης ($R_{1/1}(z)$) έχει προταθεί στη βιβλιογραφία [41] για περιπτώσεις που οι σύνθετες αντιστάσεις στο προσομοιωμένο και στο φυσικό σύστημα είναι ωμικές-επαγωγικές ($R+s \cdot L$). Με βάση το κριτήριο Routh-Hurwitz οι παρακάτω δύο συνθήκες πρέπει να πληρούνται για ευσταθή λειτουργία:

$$i) L_{SW} < L_{HW} \quad (2.6)$$

$$ii) \lambda > \frac{R_{SW} - R_{HW}}{L_{SW} + L_{HW}} \quad (2.7)$$

Όπου χρησιμοποιείται η προσέγγιση Padé πρώτης τάξης για τη χρονική καθυστέρηση:

$$e^{-sT_d} = \frac{-s + \lambda}{s + \lambda}, \quad \lambda > 0 \quad (2.8)$$

Εφαρμόζοντας την προσέγγιση Padé προκύπτει $\lambda = 2/T_d$, οπότε η σχέση (2.7) γίνεται:

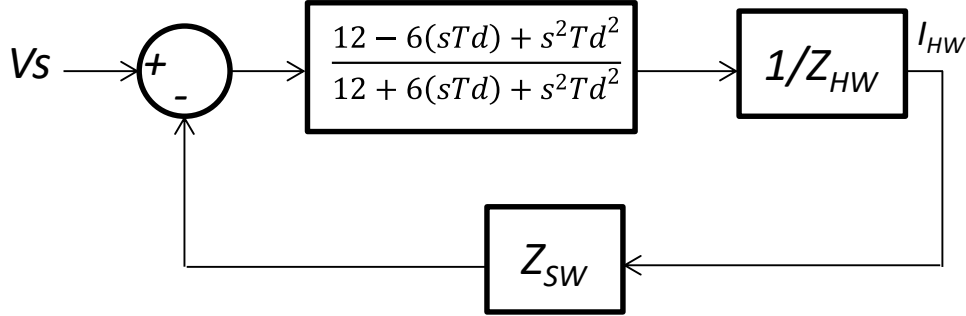
$$R_{SW} < R_{HW} + \frac{2}{T_d} \cdot (L_{SW} + L_{HW}) \quad (2.9)$$

Όμως, παρατηρήθηκε πως σε πολλές περιπτώσεις τα αποτελέσματα δεν είναι ακριβή, οπότε εφαρμόστηκε προσέγγιση Padé δεύτερης τάξης (Σχήμα 2.10). Η προσέγγιση Padé δεύτερης τάξης ($R_{2/2}(z)$) για την εκθετική συνάρτηση e^z δίνεται από τη σχέση:

$$e^z = R_{2/2}(z) = \frac{12+6z+z^2}{12-6z+z^2} \quad (2.10)$$

Θέτοντας $z = -sT_d$, η σχέση (2.10) γίνεται:

$$e^{-sT_d} = R_{2/2}(-sT_d) = \frac{12-6(sT_d)+s^2T_d^2}{12+6(sT_d)+s^2T_d^2} \quad (2.11)$$



Σχήμα 2.10. Διάγραμμα βαθμίδων PHIL προσομοίωσης με προσέγγιση Padé δεύτερης τάξης [42][B.5]

Η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου του συστήματος, σύμφωνα με το Σχήμα 2.10, προκύπτει:

$$G_{cl}(s) = \frac{\frac{12-6(sT_d)+s^2T_d^2}{12+6(sT_d)+s^2T_d^2} \cdot \frac{1}{Z_{HW}}}{1 + \frac{12-6(sT_d)+s^2T_d^2}{12+6(sT_d)+s^2T_d^2} \cdot \frac{Z_{SW}}{Z_{HW}}} \Rightarrow \quad (2.12)$$

Θεωρώντας πως η σύνθετη αντίσταση του προσομοιωμένου συστήματος είναι $Z_{SW}=R_{SW}+s \cdot L_{SW}$ και του φυσικού συστήματος $Z_{HW}=R_{HW}+s \cdot L_{HW}$, το χαρακτηριστικό πολώνυμο προκύπτει από τη σχέση (2.12):

$$\psi(s) = s^3 T_d^2 (L_{HW} + L_{SW}) + s^2 T_d (6L_{HW} - 6L_{SW} + T_d \cdot R_{HW} + T_d \cdot R_{SW}) + s(12L_{HW} + 12L_{SW} + 6T_d \cdot R_{HW} - 6T_d \cdot R_{SW}) + 12(R_{SW} + R_{HW})$$

Η εφαρμογή του κριτηρίου ευστάθειας Routh-Hurwitz οδηγεί στις παρακάτω συνθήκες ευστάθειας [42][B.5]:

$$i) 12 \cdot T_d (L_{HW}^2 - L_{SW}^2) + 6 \cdot T_d^2 (L_{HW} R_{HW} + L_{SW} R_{SW} - L_{SW} R_{HW} - L_{HW} R_{SW}) + T_d^3 (R_{HW}^2 - R_{SW}^2) > 0 \quad (2.13)$$

$$ii) L_{HW} - L_{SW} + \left(T_d \frac{R_{SW} + R_{HW}}{6} \right) > 0 \quad (2.14)$$

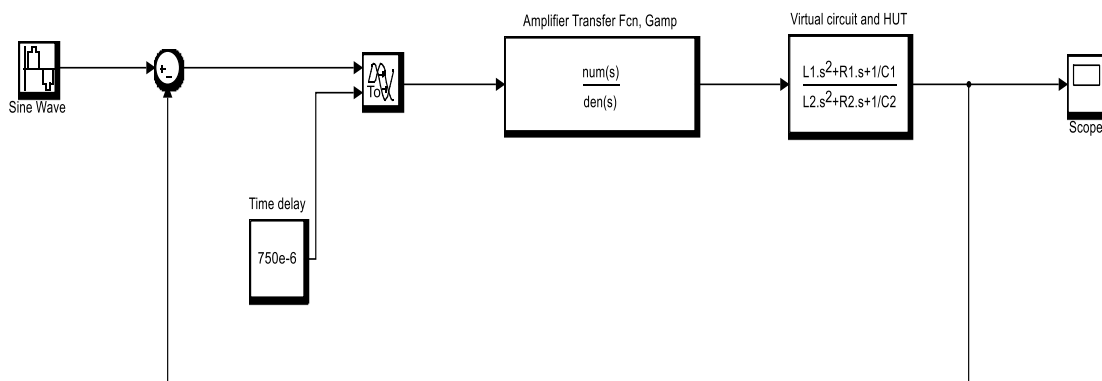
Η απόκλιση της προσέγγισης πρώτης και δεύτερης τάξης, για $L_{SW} < L_{HW}$, υπολογίστηκε σε πλήθος περιπτώσεων και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα [42][B.5]. Φαίνεται πως η προσέγγιση πρώτης τάξης που προτείνεται στη βιβλιογραφία οδηγεί σε σφάλματα, ενώ η προσέγγιση δεύτερης τάξης παρουσιάζει πολύ καλύτερα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, για $L_{SW}=0.5 \text{ mH}$, $L_{HW}=0.6 \text{ mH}$, $R_{HW}=0 \text{ } \Omega$ και χρονική καθυστέρηση $T_d=750 \text{ } \mu\text{s}$, το

πραγματικό σύστημα γίνεται ασταθές αν $R_{SW} > 1.12 \Omega$, ενώ με την εφαρμογή της προσέγγισης πρώτης τάξης το σύστημα γίνεται ασταθές αν $R_{SW} > 2.93 \Omega$. Αντιθέτως, με χρήση της προσέγγισης δεύτερης τάξης το σύστημα γίνεται ασταθές αν $R_{SW} > 1.18 \Omega$, που είναι πιο κοντά στο πραγματικό σύστημα.

Ο γεωμετρικός τόπος των ριζών παρέχει τα ίδια αποτελέσματα με το κριτήριο Routh-Hurwitz, εφόσον χρησιμοποιεί ρητή προσέγγιση (π.χ. Padé) για την αναπαράσταση της χρονικής καθυστέρησης. Ως εκ τούτου, είναι ένας εύκολος τρόπος επικύρωσης των αποτελεσμάτων του κριτηρίου Routh-Hurwitz. Η εφαρμογή του γεωμετρικού τόπου των ριζών σε λογισμικό μπορεί εύκολα να χρησιμοποιήσει προσέγγιση Padé ανώτερης τάξης για καλύτερη ακρίβεια. Επίσης, παρέχει τη δυνατότητα να φανεί γραφικά η επίδραση επιλεγμένης μεταβλητής (π.χ. προσομοιωμένη αντίσταση) στην ευστάθεια. Όμως, εφόσον χρησιμοποιείται προσέγγιση για τη χρονική καθυστέρηση (η οποία μπορεί να είναι ικανοποιητική μέχρι κάποια συχνότητα), η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων χρειάζεται να διερευνηθεί.

Η δυναμική εικονική PHIL προσομοίωση (Σχήμα 2.8) περιλαμβάνει το προσομοιωμένο σύστημα, τη διεπαφή ισχύος και το δοκίμιο και υλοποιείται σε λογισμικό (π.χ. Matlab/Simulink, λογισμικό του ΨΠΠΧ). Σε περίπτωση αστάθειας η τάση τείνει προς το άπειρο (Σχήμα 2.9). Σημειώνεται πως σε αυτή την προσομοίωση είναι απαραίτητη η εισαγωγή μίας πρόσθετης αντίστασης παράλληλα με την πηγή ρεύματος, η οποία δεν υπάρχει στο θεωρητικό σύστημα (η αντίσταση απαιτείται εξαιτίας περιορισμών στην επίλυση στο λογισμικό, αλλά στην πράξη λαμβάνει υψηλή τιμή, οπότε έχει μικρή επίδραση).

Επιπλέον, είναι δυνατή η αναπαράσταση του διαγράμματος βαθμίδων (Σχήμα 2.6) σε λογισμικό και η εξέταση της ευστάθειας (Σχήμα 2.11).



Σχήμα 2.11. Προσομοίωση διαγράμματος βαθμίδων [42][B.5]

Συμπερασματικά, το κριτήριο Nyquist μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα με χρήση λογισμικού σε πλήθος περιπτώσεων. Το κριτήριο Routh-Hurwitz, εφαρμόζοντας την προσέγγιση Padé για τη χρονική καθυστέρηση, παρέχει εξισώσεις που καθορίζουν την ευστάθεια σε απλές περιπτώσεις και μπορεί να δώσει μία εικόνα των παραγόντων που επηρεάζουν την ευστάθεια, αλλά η ακρίβεια των αποτελεσμάτων εξαρτάται από την τάξη της προσέγγισης

και μπορεί να είναι ικανοποιητική μέχρι κάποια συχνότητα. Αποδείχτηκε πως η προσέγγιση πρώτης τάξης που προτείνεται στη βιβλιογραφία είναι ανεπαρκής και χρησιμοποιήθηκε προσέγγιση δεύτερης τάξης με καλύτερα αποτελέσματα. Ο γεωμετρικός τόπος των ριζών παράγει τα ίδια αποτελέσματα με το κριτήριο Routh-Hurwitz, μπορεί εύκολα να χρησιμοποιήσει ανώτερης τάξης προσέγγιση για καλύτερη ακρίβεια και παρέχει γραφική απεικόνιση της επίδρασης συγκεκριμένων μεταβλητών στην ευστάθεια. Η δυναμική εικονική PHIL προσομοίωση αντιπροσωπεύει επαρκώς το PHIL πείραμα, αλλά μπορεί να επηρεαστεί ελαφρώς από επουσιώδεις παράγοντες, οι οποίοι όμως είναι παρόντες στο PHIL πείραμα. Τέλος, η προσομοίωση διαγράμματος βαθμίδων αντιπροσωπεύει το θεωρητικό σύστημα και παρέχει τα ίδια αποτελέσματα με το κριτήριο Nyquist. Με βάση τα παραπάνω, προτείνεται η εξέταση της ευστάθειας αρχικά θεωρητικά με το κριτήριο Nyquist και εν συνεχεία υλοποιώντας δυναμική εικονική PHIL προσομοίωση.

2.4) Ακρίβεια της PHIL μεθόδου

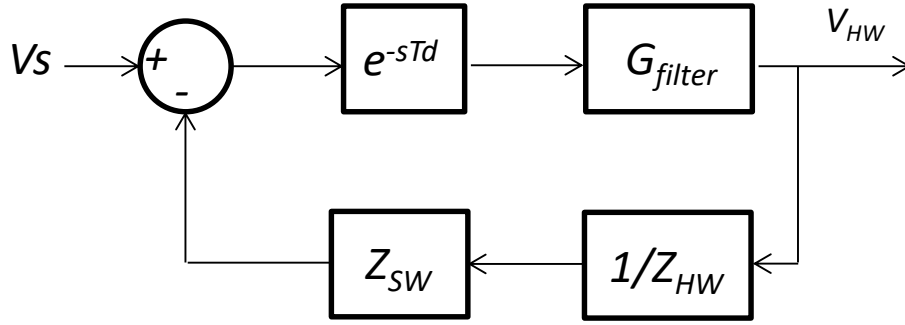
Εκτός από την ευστάθεια της PHIL μεθόδου, η οποία είναι προϋπόθεση για την υλοποίηση οποιουδήποτε PHIL πειράματος, μεγάλη σημασία έχει η ακρίβεια. Η μη ιδανική διεπαφή ισχύος (χρονική καθυστέρηση, περιορισμένο εύρος ζώνης κ.α.) μπορεί να εισάγει σημαντικά σφάλματα στα αποτελέσματα του πειράματος, καθιστώντας άσκοπη όλη την προσπάθεια. Επιπλέον, στις περισσότερες περιπτώσεις το προσομοιωμένο σύστημα δεν είναι διαθέσιμο στο εργαστήριο, οπότε δεν υπάρχει η δυνατότητα σύγκρισης των PHIL αποτελεσμάτων με κάποιο σύστημα αναφοράς. Η ακρίβεια της PHIL προσομοίωσης έχει μελετηθεί σε αρκετές δημοσιεύσεις [1][22][25][41][43][44][45]. Εφόσον το σφάλμα προέρχεται κυρίως από τη μη-ιδανική διεπαφή ισχύος, ένας απλός τρόπος για τη βελτίωση της PHIL ακρίβειας είναι η βελτίωση της ακρίβειας της διεπαφής ισχύος. Ωστόσο, μία διεπαφή ισχύος με υψηλή ακρίβεια δεν εγγυάται καλή ακρίβεια του PHIL πειράματος εξαιτίας του συστήματος κλειστού βρόχου [43].

Οι δύο βασικές μέθοδοι εκτίμησης της ακρίβειας περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω. Σύμφωνα με το [25], η εκτίμηση της ακρίβειας μπορεί να γίνει θεωρώντας αρχικά το ιδανικό σύστημα και στη συνέχεια το πραγματικό σύστημα.

Η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου του ιδανικού συστήματος ($T_d=0$, $G_{filter}=1$) ισούται με:

$$G_{IDEAL} = \frac{1}{1 + \frac{Z_{SW}(s)}{Z_{HW}(s)}} = \frac{Z_{HW}(s)}{Z_{HW}(s) + Z_{SW}(s)} \quad (2.15)$$

Το διάγραμμα βαθμίδων του πραγματικού PHIL συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τη χρονική καθυστέρηση και τη συνάρτηση μεταφοράς του ενισχυτή και θεωρώντας ως έξοδο την τάση του φυσικού συστήματος, φαίνεται στο Σχήμα 2.12.



Σχήμα 2.12. Διάγραμμα βαθμίδων PHIL πειράματος θεωρώντας ως έξοδο την τάση του φυσικού συστήματος

Η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου του πραγματικού PHIL συστήματος ισούται με:

$$G_{REAL} = \frac{G_{filter}(s) \cdot e^{(-sT_d)}}{1 + \frac{Z_{SW}(s)}{Z_{HW}(s)} \cdot G_{filter}(s) \cdot e^{(-sT_d)}} \Rightarrow$$

$$G_{REAL} = \frac{Z_{HW}(s)}{Z_{HW}(s) + Z_{SW}(s) \cdot G_{filter}(s) \cdot e^{(-sT_d)}} \cdot G_{filter}(s) \cdot e^{(-sT_d)} \quad (2.16)$$

Οπότε το σφάλμα προκύπτει ως [25]:

$$T(j\omega) = \left| \frac{G_{IDEAL}(j\omega) - G_{REAL}(j\omega)}{G_{IDEAL}(j\omega)} \right| \cdot 100\% \quad (2.17)$$

Η σχέση (2.17) αποτελεί ένα γενικό τύπο για τον προσδιορισμό του σφάλματος για διάφορες εξόδους του συστήματος (π.χ. V_{HW} , V_{SW}).

Στο [43] θεωρείται ότι το σφάλμα των αποτελεσμάτων προέρχεται από διαταραχές που εισάγονται από τη μη-ιδανική διεπαφή ισχύος. Οι διαταραχές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τις διαταραχές συνάρτησης μεταφοράς (Transfer Function Perturbations - TFP), όπως η χρονική καθυστέρηση και το βαθυπερατό φίλτρο του ενισχυτή και τις διαταραχές θορύβου, όπως ο θόρυβος του αισθητήρα και η εισαγωγή αρμονικών από τον ενισχυτή.

Το σφάλμα εξαιτίας διαταραχών συνάρτησης μεταφοράς υπολογίζεται θεωρώντας πως η συνάρτηση μεταφοράς της ιδανικής διεπαφής ισχύος ισούται με μονάδα, στην οποία αθροίζεται μία πρόσθετη διαταραχή (ΔG_{int}). Το σφάλμα ισούται με [43]:

$$E_{TFP_y_1} = \frac{\Delta y_1(t)}{y_1(t)} = \left| W_0(j\omega) \cdot \frac{G_{LP}(j\omega) \Delta G_{int}(j\omega)}{1 - G_{LP}(j\omega) \cdot (1 + \Delta G_{int}(j\omega))} \right| \quad (2.18)$$

Όπου y_I η έξοδος του ιδανικού συστήματος, $(y_I + \Delta y_I)$ η έξοδος του πραγματικού συστήματος και G_{LP} η συνάρτηση μεταφοράς ανοικτού βρόχου του ιδανικού συστήματος. Η συνάρτηση W_0 εκφράζει τα σταθμισμένα βάρη για διαφορετικές συχνότητες.

Το σφάλμα εξαιτίας διαταραχών θορύβου οφείλεται κυρίως στον θόρυβο του αισθητήρα που μετράει κάποιο μέγεθος του φυσικού συστήματος (π.χ. το ρεύμα) και είναι αισθητά μικρότερο από το σφάλμα εξαιτίας διαταραχών συνάρτησης μεταφοράς, οπότε μπορεί να αγνοηθεί σε πολλές περιπτώσεις.

Οι δύο παραπάνω μέθοδοι συγκρίθηκαν και βρέθηκαν ισοδύναμες στα [42][B.5]. Οι κύριες διαφορές τους είναι ότι στο [43] προτείνεται συνάρτηση σταθμισμένων βαρών (W_θ) για διαφορετικές συχνότητες (η οποία για παράδειγμα μπορεί να μειώσει την επίδραση των υψηλότερων συχνοτήτων) και επίσης ορίζεται ένα πρόσθετο σφάλμα εξαιτίας του θορύβου. Οπότε, προτείνεται η εφαρμογή της πρώτης μεθόδου, εφόσον είναι απλούστερη, με προεκτάσεις (π.χ. εισαγωγή σταθμισμένων βαρών αν κρίνεται χρήσιμο). Επιπλέον, προτείνεται ο διαχωρισμός της αναπαράστασης του σφάλματος (σχέσεις (2.17) και (2.18)) σε μέτρο και γωνία με διαγράμματα Bode (προς αποφυγή περιπτώσεων π.χ. που υπολογίζεται μεγάλο σφάλμα το οποίο οφείλεται όμως κυρίως στη γωνία).

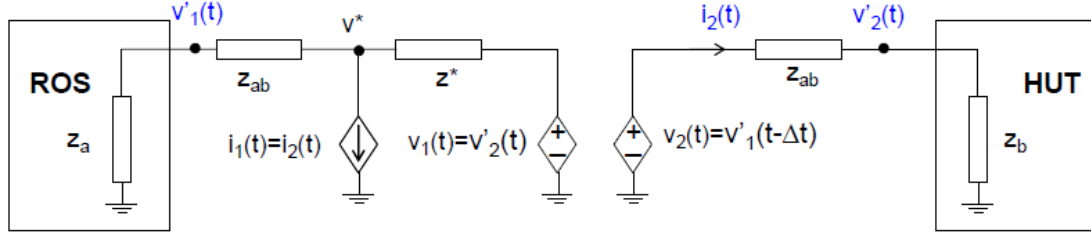
2.5) Μέθοδοι επίτευξης ευστάθειας και ακρίβειας: τοπολογίες και αλγόριθμοι

Η σημασία της επίτευξης ευστάθειας και καλής ακρίβειας των PHIL προσομοιώσεων εξηγήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Συχνά τα δύο αυτά θέματα δρουν ανταγωνιστικά το ένα προς το άλλο. Η επίτευξη ευστάθειας διατηρώντας καλή ακρίβεια αποτελεί σε πλήθος περιπτώσεων πρόκληση. Δύο στρατηγικές μπορούν να ακολουθηθούν για την αντιμετώπιση του προβλήματος: η επιλογή κατάλληλης τοπολογίας σύνδεσης και η εισαγωγή αλγορίθμων ελέγχου.

Η τοπολογία σύνδεσης (interface algorithm) ορίζει τον τρόπο διασύνδεσης του προσομοιωμένου συστήματος και του φυσικού συστήματος [1][2]. Στις εφαρμογές που εξετάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους η τάση του προσομοιωμένου συστήματος (στο σημείο σύνδεσης του φυσικού συστήματος) ενισχύεται και το ρεύμα του φυσικού συστήματος μετريέται και εισάγεται στην προσομοίωση ως πηγή ρεύματος (Σχήμα 2.5). Αυτή είναι η απλούστερη τοπολογία σύνδεσης και ονομάζεται το μοντέλο του ιδανικού μετασχηματιστή (Ideal Transformer Model - ITM) [1][2]. Όπως παρουσιάστηκε, η τοπολογία αυτή μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια σε αρκετές περιπτώσεις, αλλά παρουσιάζει καλή ακρίβεια [2].

Διαφορετικές τοπολογίες σύνδεσης έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία [2][46][47][48]. Στο [2] πέντε τοπολογίες σύνδεσης εξετάστηκαν ως προς την ευστάθεια και την ακρίβεια και προτάθηκε η μέθοδος αντίστασης απόσβεσης (Damping Impedance Method - DIM). Στη μέθοδο αντίστασης απόσβεσης επιπλέον στοιχεία εισάγονται στην προσομοίωση (αντίσταση σύνδεσης Z_{ab} , αντίσταση απόσβεσης z^* , V_I) και στο φυσικό σύστημα (αντίσταση σύνδεσης Z_{ab}), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.13. Καλή ευστάθεια και ακρίβεια μπορεί να επιτευχθεί αν η αντίσταση απόσβεσης (z^*) είναι κοντά στην πραγματική αντίσταση του δοκιμίου (Z_b). Σε αντίθετη περίπτωση η ευστάθεια και η ακρίβεια περιορίζονται. Ως εκ τούτου, η μέθοδος αυτή συνιστάται αν τα χαρακτηριστικά του δοκιμίου είναι γνωστά, το οποίο δεν ισχύει σε πολλές περιπτώσεις. Για τον παραπάνω λόγο καθώς και εξαιτίας της πολυπλοκότητας της, η μέθοδος αυτή έχει εφαρμοστεί λίγες φορές. Επιπλέον, στο [25] προτείνεται η προσθήκη μίας αυτεπαγωγής σε σειρά με το δοκίμιο, η οποία όμως περιορίζει σημαντικά την ακρίβεια, εφόσον η αυτεπαγωγή δεν υπάρχει στο αρχικό σύστημα. Στο [44] προτείνεται η εισαγωγή πρόσθετων φίλτρων στο φυσικό και στο προσομοιωμένο σύστημα, όμως παρουσιάζεται αυξημένη πολυπλοκότητα και είναι

δύσκολος ο προσδιορισμός των παραμέτρων των φίλτρων. Τέλος, έχει προταθεί η προσομοίωση με πολλαπλό χρόνο επίλυσης (multi-rate) [25][49], όπου το προσομοιωμένο σύστημα χωρίζεται σε ένα «γρήγορο» και ένα «αργό» υποσύστημα, όμως απαιτείται ΨΠΠΧ με αυτή τη δυνατότητα.



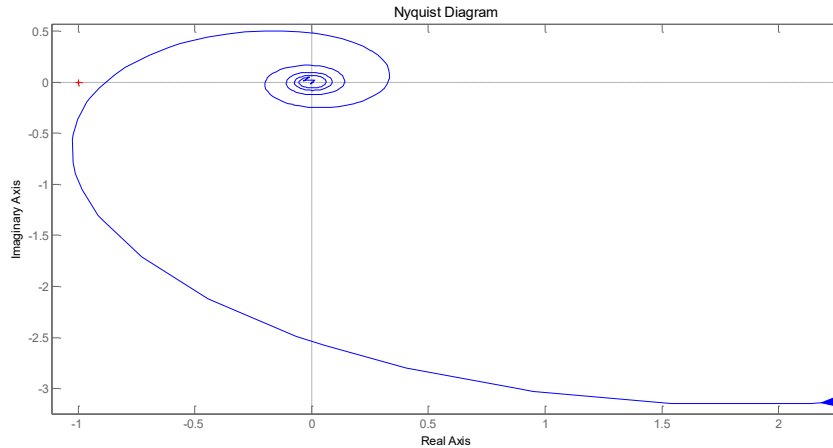
Σχήμα 2.13. Μέθοδος αντίστασης απόσβεσης [2]

Η εισαγωγή αλγορίθμων ελέγχου είναι μία άλλη μέθοδος για την επίτευξη ευστάθειας και τη βελτίωση της ακρίβειας των PHIL προσομοιώσεων [38]. Η τοπολογία σύνδεσης δεν αλλάζει, αλλά επιπλέον αλγόριθμοι ελέγχου εισάγονται στην προσομοίωση για να αντισταθμιστεί η χρονική καθυστέρηση, ο θόρυβος κτλ. Η τεχνική αυτή συνήθως συνδυάζεται με την τοπολογία του ιδανικού μετασχηματιστή που αναφέρθηκε παραπάνω. Οι πρόσθετοι έλεγχοι μπορούν να εφαρμοστούν είτε στον ευθύ δρόμο είτε στον δρόμο ανάδρασης. Για τον ευθύ δρόμο έχει προταθεί η πρόβλεψη του σήματος αναφοράς για την αντιστάθμιση της χρονικής καθυστέρησης [23][38][50], καθώς και η εισαγωγή συνάρτησης μεταφοράς για τη βελτίωση της ακρίβειας [38]. Για τον δρόμο ανάδρασης έχουν προταθεί η εισαγωγή βαθυπερατού φίλτρου [20][25][27], καθώς και η μετατόπιση της φάσης του σήματος ανάδρασης [21] (που διορθώνει τη διαφορά φάσης της τάσης και του ρεύματος στον κοινό ζυγό προσομοιωμένου και φυσικού συστήματος). Αξίζει να σημειωθεί ότι ορισμένες μέθοδοι βελτιώνουν την ευστάθεια αλλά περιορίζουν την ακρίβεια της PHIL προσομοίωσης.

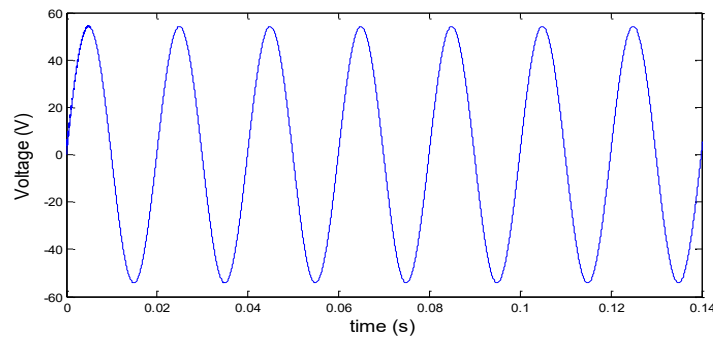
Από τις παραπάνω, η πιο συνηθισμένη μέθοδος αντιμετώπισης μίας ασταθούς περίπτωσης είναι η εισαγωγή βαθυπερατού φίλτρου στο ρεύμα ανατροφοδότησης στο προσομοιωμένο σύστημα. Το βαθυπερατό φίλτρο εισάγει μετατόπιση φάσης και μειώνει το πλάτος του σήματος, οπότε περιορίζει την ακρίβεια του πειράματος. Η συνάρτηση μεταφοράς βαθυπερατού φίλτρου πρώτης τάξης με συχνότητα αποκοπής f_c παρατίθεται παρακάτω:

$$G_{LPF} = \frac{1}{1 + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_c} s} \quad (2.19)$$

Εισάγεται βαθυπερατό φίλτρο πρώτης τάξης ($f_c=2 \text{ kHz}$) στην ασταθή περίπτωση που εξετάστηκε παραπάνω ($R_{SW} > R_{HW}$, Σχήμα 2.7). Στο Σχήμα 2.14 παριστάνεται το διάγραμμα Nyquist, όπου φαίνεται πως αν και το αρχικό σύστημα είναι ασταθές, επιτυγχάνεται ευστάθεια χάρη στο φίλτρο στην ανατροφοδότηση. Η επίτευξη ευστάθειας επιβεβαιώνεται και με δυναμική εικονική PHIL προσομοίωση, όπου η τάση παραμένει σταθερή (Σχήμα 2.15) σε αντίθεση με την ασταθή περίπτωση, όπου η τάση έτεινε προς το άπειρο (Σχήμα 2.9).



Σχήμα 2.14. Διάγραμμα Nyquist στην περίπτωση που $R_{SW} > R_{HW}$, έχοντας εισάγει φίλτρο στο ρεύμα ανατροφοδότησης



Σχήμα 2.15. Δυναμική εικονική PHIL προσομοίωση που γίνεται ευσταθής χάρη στο φίλτρο ανατροφοδότησης

2.6) Προτεινόμενη μέθοδος επίτευξης ευστάθειας και ακρίβειας με αλλαγή κλίμακας

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, αρκετές τοπολογίες σύνδεσης έχουν προταθεί περιλαμβάνοντας τοπολογίες υψηλής πολυπλοκότητας και περιορισμένης εφαρμογής. Στη συντριπτική πλειοψηφία των εφαρμογών, χρησιμοποιείται η τοπολογία του ιδανικού μετασχηματιστή (Ideal Transformer Model) λόγω της απλότητας και της καλής ακρίβειας που παρουσιάζει [2][27]. Η τοπολογία αυτή συνήθως συνδυάζεται με την εισαγωγή βαθυπερατού φίλτρου στο ρεύμα ανατροφοδότησης (στην προσομοίωση) για την επίτευξη ευστάθειας, εφόσον είναι η απλούστερη και γρηγορότερη στην υλοποίηση μέθοδος. Σε πολλές περιπτώσεις όμως, ένα φίλτρο χαμηλής συχνότητας αποκοπής είναι απαραίτητο και η μετατόπιση φάσης που προκύπτει μεταξύ της τάσης και του ρεύματος στον κοινό ζυγό (μεταξύ του προσομοιωμένου και του φυσικού συστήματος), μπορεί να οδηγήσει σε μη αποδεκτή ακρίβεια της αέργου και ενεργού ισχύος. Εναλλακτικά, η προαναφερόμενη μέθοδος εισαγωγής αυτεπαγωγής εισάγει μια πρόσθετη αυτεπαγωγή σε σειρά με το δοκίμιο (η αυτεπαγωγή του φυσικού συστήματος αυξάνεται το οποίο βελτιώνει την ευστάθεια), ωστόσο μπορεί να περιοριστεί σημαντικά η ακρίβεια του πειράματος,

καθώς η τροποποιημένη διάταξη δεν αντιπροσωπεύει ορθά το αρχικό σύστημα. Ως εκ τούτου, στην εργασία αυτή προτείνουμε τη μετακίνηση τμήματος της σύνθετης αντίστασης του προσομοιωμένου συστήματος στο φυσικό σύστημα. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να επιτευχθεί ευστάθεια αυξάνοντας εξίσου τη σύνθετη αντίσταση του φυσικού συστήματος και μειώνοντας τη σύνθετη αντίσταση του προσομοιωμένου συστήματος, χωρίς να περιορίζεται η ακρίβεια. Πρόσθετα φίλτρα μπορούν να εξαλειφθούν ή σε περίπτωση που είναι απαραίτητο μπορεί να χρησιμοποιηθεί φίλτρο ανατροφοδότησης υψηλότερης συχνότητας αποκοπής και να μειώσει σημαντικά τη μετατόπιση φάσης, άρα και το σφάλμα των αποτελεσμάτων. Με τον τρόπο αυτό, η εισαγωγή επιπλέον αλγορίθμων ελέγχου στον ΨΠΠΧ και σύνθετα πραγματικά φίλτρα δεν απαιτούνται. Ονομάζουμε την προτεινόμενη μέθοδο ως «μέθοδο μετατόπισης σύνθετης αντίστασης».

Ένα πλεονέκτημα της PHIL μεθόδου είναι η δυνατότητα ζεύξης συστημάτων με διαφορετική ισχύ και επίπεδο τάσης εφαρμόζοντας κατάλληλες μεθόδους. Για παράδειγμα, είναι πολύ δύσκολη η εκτέλεση PHIL δοκιμής σε πλήρη ισχύ στο εργαστήριο με δοκίμιο υψηλής ονομαστικής ισχύος (π.χ. >5 MW) που συνδέεται στη MT, λόγω της δυσκολίας κατασκευής και του κόστους κατάλληλου ενισχυτή ισχύος. Ως εκ τούτου, είναι χρήσιμο να σχεδιαστεί διάταξη μικρότερης κλίμακας, χρησιμοποιώντας δοκίμιο χαμηλότερης ονομαστικής ισχύος, αλλά με τα ίδια χαρακτηριστικά (κατά το δυνατό) με το δοκίμιο πλήρους ισχύος. Έτσι, ένα μικρότερο δοκίμιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αναλύσει εις βάθος τη συμπεριφορά της συσκευής πλήρους ισχύος και τις αλληλεπιδράσεις της με το προσομοιωμένο σύστημα.

Θεωρούμε δύο συστήματα με διαφορετικά επίπεδα τάσης. Στην πλευρά του προσομοιωμένου συστήματος προσομοιώνεται δίκτυο MT, ενώ στην πλευρά του φυσικού συστήματος συνδέεται εξοπλισμός XT (π.χ. αντιστροφέας ΔΠ). Οι ακόλουθες μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν για την αλλαγή κλίμακας του συστήματος σε μια PHIL προσομοίωση: αλλαγή κλίμακας με βάση την τάση, με βάση το ρεύμα και με βάση τις προσομοιωμένες αντιστάσεις. Καταρχάς, ορίζουμε τον λόγο της τάσης του προσομοιωμένου και του φυσικού συστήματος a , τον λόγο της ονομαστικής ισχύος του πλήρους και του μικρής κλίμακας δοκιμίου b και τον λόγο του ρεύματος του προσομοιωμένου και του φυσικού συστήματος c .

$$\begin{aligned} a &= \frac{V_{SW}}{V_{HW}} = \frac{V_{MVP}}{V_{LVP}} \\ b &= \frac{(S_{HUT_full})_{1p}}{(S_{HUT_red})_{1p}} = \frac{(P_{HUT_full})_{1p}}{(P_{HUT_red})_{1p}} \\ c &= \frac{I_{SW}}{I_{HW}} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Όπου V_{SW} (V_{MVP}), V_{HW} (V_{LVP}), I_{SW} , I_{HW} είναι οι φασικές ονομαστικές τάσεις και τα ρεύματα στο προσομοιωμένο (SW) και στο φυσικό σύστημα (HW) και $(S_{HUT_full})_{1p}$, $(P_{HUT_full})_{1p}$, $(S_{HUT_red})_{1p}$, $(P_{HUT_red})_{1p}$ είναι η ονομαστική φαινόμενη και ενεργός ισχύς ανά φάση του πλήρους δοκιμίου και του δοκιμίου μικρής κλίμακας αντίστοιχα.

Στη γενική περίπτωση, στον κοινό ζυγό (μεταξύ του προσομοιωμένου και του φυσικού συστήματος) η τάση και το ρεύμα του προσομοιωμένου συστήματος έχουν διαφορετικές τιμές από την τάση και το ρεύμα του φυσικού συστήματος, εξαιτίας της αλλαγής κλίμακας. Η τάση αναφοράς από τον ΨΠΠΧ προς τον ενισχυτή πολλαπλασιάζεται με $1/a$ ώστε να ταιριάζει με το επίπεδο τάσης του φυσικού συστήματος. Ομοίως, το ρεύμα ανατροφοδότησης του φυσικού συστήματος μπορεί να πολλαπλασιαστεί με τον συντελεστή c . Υποθέτοντας μία πολύ γρήγορη διεπαφή ισχύος, που επιτρέπει τον ίδιο συντελεστή ισχύος στο φυσικό και στο προσομοιωμένο σύστημα, ο λόγος των ισχύων ανά φάση στον κοινό ζυγό είναι:

$$\frac{P_{SW}}{P_{HW}} = \frac{V_{SW} \cdot I_{SW} \cdot \cos\phi}{V_{HW} \cdot I_{HW} \cdot \cos\phi} = a \cdot c \quad (2.21)$$

Όπου P_{SW} και P_{HW} είναι η ενεργός ισχύς του προσομοιωμένου και του φυσικού συστήματος στον κοινό ζυγό. Θεωρώντας τον λόγο των τάσεων (a) σταθερό (π.χ. ΜΤ στο προσομοιωμένο σύστημα και ΧΤ στο φυσικό σύστημα) και αντικαθιστώντας P_{HW} με $(P_{HUT_red})_{1p}$ και P_{SW} με $(P_{HUT_full})_{1p}$ στη σχέση (2.21), προκύπτει ο λόγος ρευμάτων για την επίτευξη της επιθυμητής αλλαγής κλίμακας:

$$c = \frac{(P_{HUT_full})_{1p}}{(P_{HUT_red})_{1p} \cdot a} = \frac{b}{a} \quad (2.22)$$

Μια εναλλακτική προσέγγιση είναι η αλλαγή κλίμακας των σύνθετων αντιστάσεων του προσομοιωμένου συστήματος, αντί της αλλαγής κλίμακας του ρεύματος (δηλαδή $I_{SW}=I_{HW}$), μετατρέποντας το δίκτυο σε ανά-μονάδα τιμές και εν συνεχεία θεωρώντας νέα βάση ισχύος. Ως αρχική βάση ισχύος (S_B) επιλέγεται η ονομαστική ενεργός ισχύς του πλήρους δοκιμίου και ως νέα βάση (S_B') επιλέγεται η ενεργός ισχύς που μεταφέρεται στο προσομοιωμένο σύστημα από το δοκίμιο μικρότερης κλίμακας σε ονομαστική ισχύ (εξαιτίας της αλλαγής κλίμακας της τάσης) και υπολογίζεται από τη σχέση (2.21):

$$S'_B = P'_{SW} = a \cdot P_{HW} = a \cdot (P_{HUT_red})_{1p} \quad (2.23)$$

Ο συντελεστής κ ορίζεται ως ο λόγος της αρχικής προς τη νέα βάση ισχύος:

$$\kappa = \frac{S_B}{S'_B} = \frac{(P_{HUT_full})_{1p}}{a \cdot (P_{HUT_red})_{1p}} = \frac{b}{a} \quad (2.24)$$

Ως εκ τούτου, οι σύνθετες αντιστάσεις του προσομοιωμένου συστήματος πολλαπλασιάζονται με τον συντελεστή κ (δηλαδή διαιρούνται με την αρχική αντίσταση βάσης και πολλαπλασιάζονται με τη νέα αντίσταση βάσης). Η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του προσομοιωμένου συστήματος Z'_{SW} ισούται με:

$$Z'_{SW}(s) = \kappa \cdot Z_{SW} = \frac{b}{a} Z_{SW} \quad (2.25)$$

Οι μέθοδοι της αλλαγής κλίμακας με βάση το ρεύμα και με βάση τις προσομοιωμένες σύνθετες αντιστάσεις είναι πανομοιότυπες. Στην ανάλυση που θα ακολουθήσει θα εφαρμοστεί η αλλαγή κλίμακας βάση των σύνθετων αντιστάσεων.

Θεωρούμε την ισοδύναμη αντίσταση στο προσομοιωμένο σύστημα MT ($\Delta Z = \Delta R + j \cdot \Delta X$) μίας σύνθετης αντίστασης του φυσικού συστήματος XT (Z_{HW}). Η ποσοστιαία πτώση τάσης στη σύνθετη αντίσταση XT (Z_{HW}) και στη σύνθετη αντίσταση MT (ΔZ) θα πρέπει να είναι ίσες. Σημειώνεται πως το ρεύμα στο φυσικό και στο προσομοιωμένο σύστημα είναι το ίδιο (I_{HW}).

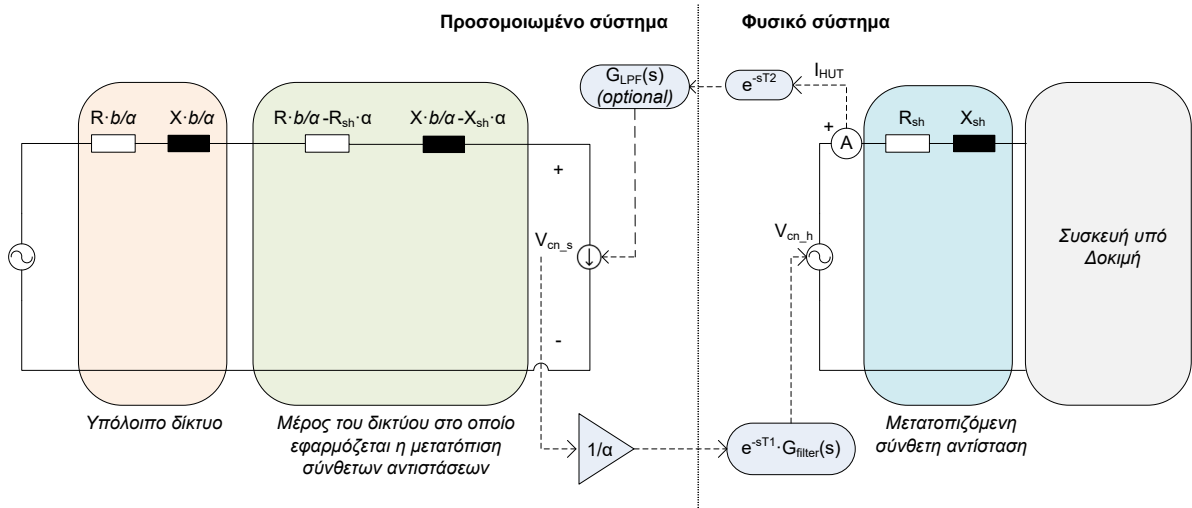
$$\frac{|\Delta V_{Z_{HW}}|}{|V_{HW}|} = \frac{|\Delta V_{\Delta Z}|}{|V_{SW}|} \Leftrightarrow \frac{|I_{HW} \cdot Z_{HW}|}{|V_{HW}|} = \frac{|I_{HW} \cdot \Delta Z|}{|V_{SW}|} \Leftrightarrow \Delta Z = \alpha \cdot Z_{HW} \quad (2.26)$$

Η παραπάνω ανάλυση δείχνει ότι η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση XT ανηγμένη στη MT πρέπει να πολλαπλασιαστεί με τον λόγο των τάσεων (α). Για την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου μετατόπισης σύνθετης αντίστασης, μια αντίσταση (Z_{sh}) εισάγεται στο φυσικό σύστημα σε σειρά με το δοκίμιο και η ισοδύναμη αντίσταση πρέπει να αφαιρεθεί από το προσομοιωμένο σύστημα. Βάση των σχέσεων (2.25), (2.26), η νέα προσομοιωμένη σύνθετη αντίσταση ισούται με:

$$Z'_{SW}(s) = \frac{b}{a} Z_{SW}(s) - a \cdot Z_{sh}(s) \quad (2.27)$$

Όπου $Z_{sh} = R_{sh} + j \cdot X_{sh}$ είναι η μετατοπιζόμενη σύνθετη αντίσταση στο φυσικό σύστημα, T_1 , T_2 είναι χρονικές καθυστερήσεις, G_{filter} και G_{LPF} είναι οι συναρτήσεις μεταφοράς του φίλτρου του ενισχυτή και του φίλτρου ανατροφοδότησης (προαιρετικό για τη βελτίωση της ευστάθειας) αντίστοιχα.

Η προτεινόμενη PHIL διάταξη που περιλαμβάνει την αλλαγή κλίμακας και τη μέθοδο μετατόπισης σύνθετης αντίστασης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.16. Η μέθοδος εφαρμόζεται στην παράγραφο 2.7, όπου αποδεικνύεται η ορθότητα της.

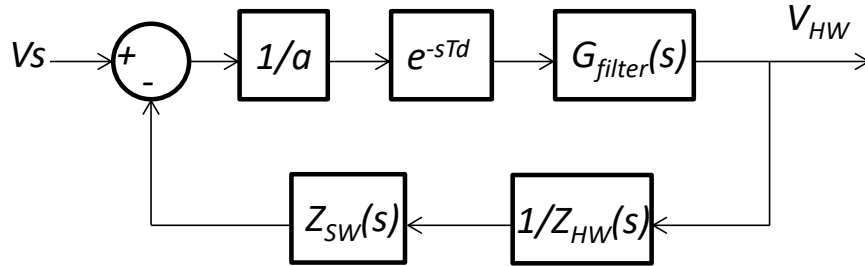


Σχήμα 2.16. Προτεινόμενη PHIL μέθοδος: μετατόπιση σύνθετης αντίστασης και αλλαγή κλίμακας

2.6.1) Επίδραση της αλλαγής κλίμακας στην ευστάθεια

Εν συνεχεία αναλύεται η επίδραση της αλλαγής κλίμακας στην ευστάθεια και υπολογίζεται η ελάχιστη σύνθετη αντίσταση που πρέπει να μετατοπιστεί στο φυσικό σύστημα για την

επίτευξη ευστάθειας. Θεωρούμε μια PHIL εφαρμογή στην οποία το προσομοιωμένο και το φυσικό σύστημα έχουν διαφορετικά επίπεδα τάσης (π.χ. MT η προσομοίωση και XT το φυσικό σύστημα). Για την ανάλυση της ευστάθειας υπολογίζεται η συνάρτηση μεταφοράς ανοικτού βρόχου από το διάγραμμα βαθμίδων του Σχήματος 2.17.



Σχήμα 2.17. Διάγραμμα βαθμίδων PHIL προσομοίωσης με αλλαγή κλίμακας της τάσης

$$G_{OL}(s) = \frac{1}{a} e^{-sTd} G_{filter}(s) \frac{Z_{SW}(s)}{Z_{HW}(s)} \quad (2.28)$$

Όπου a είναι ο λόγος των τάσεων μεταξύ του προσομοιωμένου και του φυσικού συστήματος, Z_{SW} και Z_{HW} οι σύνθετες αντιστάσεις του προσομοιωμένου και του φυσικού συστήματος, $G_{filter}(s)$ η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου του ενισχυτή και T_d η συνολική χρονική καθυστέρηση του κλειστού βρόχου: δηλαδή του ενισχυτή, του αισθητήρα και του ΨΠΠΧ. Για λόγους απλότητας η $G_{filter}(s)$ αμελείται στην εκτίμηση της ευστάθειας. Οπότε η συνάρτηση μεταφοράς ανοικτού βρόχου γίνεται:

$$G_{OL}(s) = e^{-sTd} \frac{Z_{SW}(s)}{a \cdot Z_{HW}(s)} \quad (2.29)$$

Στην παράγραφο 2.3.1 αναφέρθηκε πως για το ίδιο επίπεδο τάσης ($a=1$) και ωμικές-επαγωγικές ($R+s \cdot L$) σύνθετες αντιστάσεις, χρησιμοποιώντας προσέγγιση Padé πρώτης τάξης προκύπτουν οι παρακάτω συνθήκες για την επίτευξη ευστάθειας:

$$L_{SW} < L_{HW} \quad (2.30)$$

$$R_{SW} < R_{HW} + \frac{2}{T_d} \cdot (L_{SW} + L_{HW}) \quad (2.31)$$

Η σχέση (2.31) δεν αποτελεί αξιόπιστο κριτήριο για την εξέταση της ευστάθειας εξαιτίας της προσέγγισης πρώτης τάξης, όπως εξηγήθηκε στην παράγραφο 2.3.1. Παρόλα αυτά, παρατηρήθηκε πως αν υπάρχουν αυτεπαγωγές στο προσομοιωμένο και στο φυσικό σύστημα, μπορεί να επιτευχθεί ευστάθεια ακόμα και αν $R_{SW} > R_{HW}$ (σε αντίθεση με την περίπτωση καθαρά ωμικών αντιστάσεων, Σχήμα 2.7). Αυτό εκφράζεται με τη μεταβλητή ζ στην ακόλουθη σχέση και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης, καθώς εξαρτάται με πολύπλοκο τρόπο από το T_d και τις αντιστάσεις-αυτεπαγωγές της προσομοίωσης και του φυσικού συστήματος (η ανάλυση στην παράγραφο 2.3.1 με χρήση προσέγγισης Padé δεύτερης τάξης δεν οδήγησε σε απλή μαθηματική σχέση λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος).

$$R_{SW} < R_{HW} + \zeta, \quad \text{όπου} \quad \zeta \geq 0 \quad (2.32)$$

Για διαφορετικά επίπεδα τάσης, ($\alpha \neq 1$), το σύστημα είναι ευσταθές βάση των σχέσεων (2.29), (2.30) όταν:

$$L_{SW} < \alpha \cdot L_{HW} \quad (2.33)$$

Στη συνέχεια, θεωρείται πως το προσομοιωμένο σύστημα και το φυσικό σύστημα έχουν το ίδιο επίπεδο τάσης ($\alpha=1$), αλλά οι προσομοιωμένες σύνθετες αντιστάσεις έχουν αλλάξει κλίμακα ώστε να επιτυγχάνεται η ροή της επιθυμητής ισχύος του φυσικού συστήματος στην προσομοίωση. Οπότε, από τη σχέση (2.25), η προσομοιωμένη σύνθετη αντίσταση πολλαπλασιάζεται μόνο με τον λόγο των ισχύων b ($Z'_{SW}(s)=b \cdot Z_{SW}(s)$). Η συνάρτηση μεταφοράς ανοικτού βρόχου δίνεται από τη σχέση:

$$G_{OL}(s) = e^{-sTd} \cdot \frac{Z'_{SW}(s)}{Z_{HW}(s)} = e^{-sTd} \cdot \frac{b \cdot Z_{SW}(s)}{Z_{HW}(s)} \quad (2.34)$$

Ομοίως βάση της σχέσης (2.30), το σύστημα είναι ευσταθές όταν:

$$b \cdot L_{SW} < L_{HW} \Leftrightarrow L_{SW} < \frac{L_{HW}}{b} \quad (2.35)$$

Αν είχε υλοποιηθεί αλλαγή κλίμακας με βάση το ρεύμα αντί με βάση τις προσομοιωμένες σύνθετες αντιστάσεις (όπως αναφέρθηκε παραπάνω), θα έπρεπε να αντικατασταθεί ο λόγος των ισχύων (b) με τον λόγο των ρευμάτων (c).

Στη συνέχεια, συνδυάζοντας τις δύο παραπάνω περιπτώσεις διαφορετικών επιπέδων τάσης και αλλαγής κλίμακας βάση των προσομοιωμένων σύνθετων αντιστάσεων, η συνάρτηση μεταφοράς ανοικτού βρόχου προκύπτει σύμφωνα με τις σχέσεις (2.25) και (2.29):

$$G_{OL}(s) = e^{-sTd} \cdot \frac{Z'_{SW}(s)}{a \cdot Z_{HW}(s)} = e^{-sTd} \cdot \frac{b \cdot Z_{SW}(s)}{a^2 \cdot Z_{HW}(s)} \quad (2.36)$$

Ομοίως, το σύστημα είναι ευσταθές όταν:

$$\frac{b}{a^2} \cdot L_{SW} < L_{HW} \Leftrightarrow L_{SW} < \frac{a^2}{b} L_{HW} \quad (2.37)$$

Από την παραπάνω ανάλυση εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα (για αμετάβλητες σύνθετες αντιστάσεις στην προσομοίωση και στο φυσικό σύστημα):

- Όταν ο λόγος των τάσεων του προσομοιωμένου συστήματος και του φυσικού συστήματος αυξάνεται (συντελεστής α), η PHIL προσομοίωση γίνεται πιο ευσταθής (σχέσεις (2.33), (2.37))
- Όταν ο λόγος της ονομαστικής ισχύος του πλήρους και του μειωμένου δοκιμίου (συντελεστής b) αυξάνεται, η PHIL προσομοίωση γίνεται πιο ασταθής (σχέσεις (2.35), (2.37)). Ομοίως, για τον λόγο των ρευμάτων (συντελεστής c)
- Στο συνδυασμό των ανωτέρω περιπτώσεων, η επίδραση του λόγου των τάσεων στην ευστάθεια (a^2) είναι μεγαλύτερη από την επίδραση του λόγου των ισχύων (b) (σχέση (2.37)).

2.6.2) Ελάχιστη μετατοπιζόμενη σύνθετη αντίσταση

Στη συνέχεια, εφαρμόζεται η προτεινόμενη μέθοδος μετατόπισης σύνθετης αντίστασης, όπου Z_{sh} είναι η επιπλέον σύνθετη αντίσταση που συνδέεται σε σειρά με το δοκίμιο. Η νέα σύνθετη αντίσταση του φυσικού συστήματος ισούται με:

$$Z'_{HW}(s) = Z_{HW}(s) + Z_{sh}(s) \quad (2.38)$$

και η νέα προσομοιωμένη σύνθετη αντίσταση προκύπτει από τη σχέση (2.27).

Ομοίως, από τη σχέση (2.29), η συνάρτηση μεταφοράς ανοικτού βρόχου προκύπτει:

$$G_{OL}(s) = e^{-sTd} \frac{\frac{b}{a} Z_{SW}(s) - Z_{sh}(s) \cdot a}{a(Z_{HW}(s) + Z_{sh}(s))} = e^{-sTd} \frac{\frac{b}{a^2} Z_{SW}(s) - Z_{sh}(s)}{Z_{HW}(s) + Z_{sh}(s)} \quad (2.39)$$

Το σύστημα είναι ευσταθές αν ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$\begin{aligned} \frac{b}{a^2} L_{SW}(s) - L_{sh}(s) < L_{HW}(s) + L_{sh}(s) &\Leftrightarrow L_{sh}(s) > \frac{1}{2} \left(\frac{b}{a^2} L_{SW}(s) - L_{HW}(s) \right) \\ \Rightarrow L_{sh_min}(s) &= \frac{1}{2} \left(\frac{b}{a^2} L_{SW}(s) - L_{HW}(s) \right) \end{aligned} \quad (2.40)$$

Ομοίως, για τις ωμικές αντιστάσεις:

$$\begin{aligned} \frac{b}{a^2} R_{SW}(s) - R_{sh}(s) < R_{HW}(s) + R_{sh}(s) &\Leftrightarrow R_{sh}(s) > \frac{1}{2} \left(\frac{b}{a^2} R_{SW}(s) - R_{HW}(s) \right) \\ \Rightarrow R_{sh_min}(s) &= \frac{1}{2} \left(\frac{b}{a^2} R_{SW}(s) - R_{HW}(s) \right) \end{aligned} \quad (2.41)$$

Σημειώνεται ότι η μεταβλητή ζ της σχέσης (2.32) έχει αγνοηθεί, ωστόσο τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν περιθώριο ασφαλείας.

Οι σχέσεις (2.40), (2.41) προσδιορίζουν την ελάχιστη σύνθετη αντίσταση που πρέπει να μετατοπιστεί στο φυσικό σύστημα για την επίτευξη ευστάθειας, χωρίς την εφαρμογή επιπλέον μέτρων (π.χ. φίλτρο ανατροφοδότησης). Η μέγιστη τιμή της μετατοπιζόμενης σύνθετης αντίστασης προέρχεται από τη σχέση (2.27), ώστε $R'_{SW} \geq 0$ και $X'_{SW} \geq 0$.

$$R_{sh_max}(s) = \frac{b}{a^2} R_{SW}(s) \text{ και } L_{sh_max}(s) = \frac{b}{a^2} L_{SW}(s) \quad (2.42)$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση (2.40), η ελάχιστη μετατοπιζόμενη αυτεπαγωγή για την επίτευξη ευστάθειας ισούται με:

$$L_{sh_min}(s) = \frac{1}{2} (L_{sh_max}(s) - L_{HW}(s)) \quad (2.43)$$

2.6.3) Πρακτική προσέγγιση

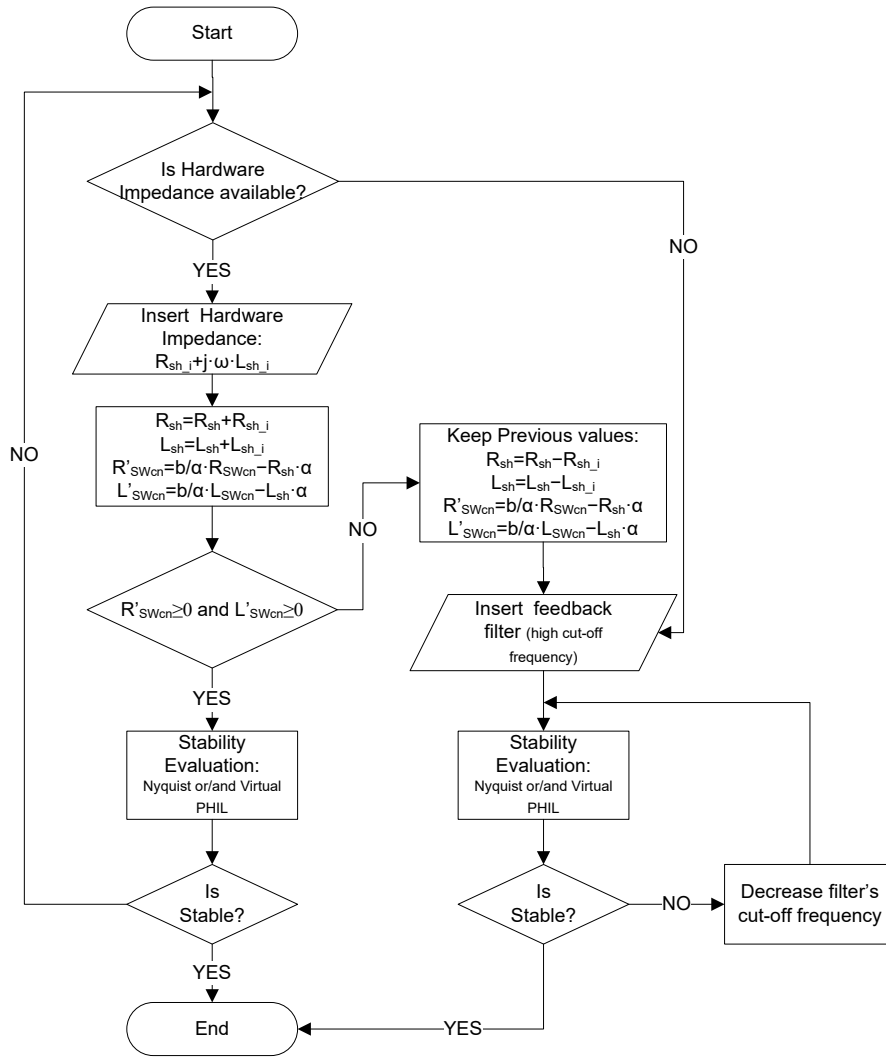
Στην πράξη, η εφαρμογή των ανωτέρω υπολογισμών μπορεί να παρουσιάσει περιορισμούς. Ο υπολογισμός της ελάχιστης σύνθετης αντίστασης Z_{sh_min} μπορεί να χρησιμοποιηθεί αν η συνάρτηση μεταφοράς του δοκιμίου είναι γνωστή, το οποίο δεν ισχύει σε πολλές

περιπτώσεις. Επιπλέον, αν το προσομοιωμένο σύστημα ή το φυσικό σύστημα περιέχουν πυκνωτές, η ανωτέρω ανάλυση δεν είναι επαρκής. Αν η ελάχιστη σύνθετη αντίσταση δεν είναι διαθέσιμη στο εργαστήριο, μία μικρότερη σύνθετη αντίσταση μπορεί να εισαχθεί σε συνδυασμό με βαθυπερατό φίλτρο στο ρεύμα ανατροφοδότησης. Συχνά το προσομοιωμένο σύστημα είναι πιο περίπλοκο (π.χ. περιέχει διακλαδώσεις), οπότε η σύνθετη αντίσταση ενός μέρους μόνο του προσομοιωμένου δικτύου μπορεί να μετατοπιστεί στο φυσικό σύστημα.

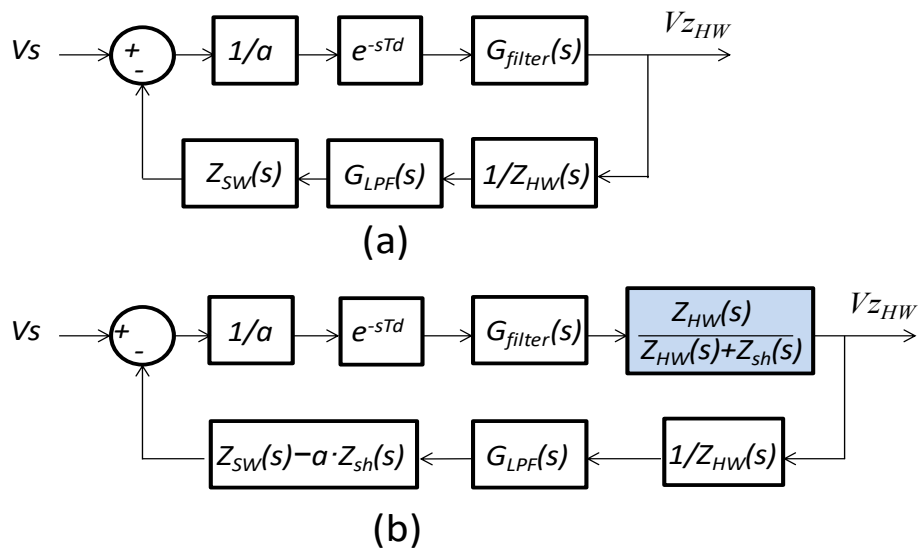
Στη συνέχεια, περιγράφεται πρακτική προσέγγιση για την εφαρμογή της μεθόδου μετατόπισης σύνθετης αντίστασης. Αρχικά, μία μικρή σύνθετη αντίσταση ($R_{sh_i} + j \cdot \omega \cdot L_{sh_i}$) συνδέεται σε σειρά με το δοκίμιο και η ισοδύναμη της αφαιρείται από την προσομοιωμένη σύνθετη αντίσταση που είναι συνδεδεμένη σε σειρά στον κοινό ζυγό ($b/a \cdot R_{SWcn}$, $b/a \cdot L_{SWcn}$). Επιπλέον σύνθετες αντιστάσεις προστίθενται στο φυσικό σύστημα μέχρι να επιτευχθεί ευστάθεια, αρκεί η προσομοιωμένη ωμική αντίσταση (R'_{SWcn}) και αυτεπαγωγή (L'_{SWcn}) να παραμένουν μεγαλύτερες από το μηδέν. Αν δεν είναι εφικτό να επιτευχθεί ευστάθεια με τη μετατόπιση σύνθετων αντιστάσεων, εισάγεται φίλτρο ανατροφοδότησης στο ρεύμα του δοκιμίου, ξεκινώντας από υψηλή συχνότητα αποκοπής η οποία μειώνεται έως ότου επιτευχθεί ευστάθεια (αρκεί η συχνότητα αποκοπής να είναι πάνω από κάποια λογική τιμή). Στην εφαρμογή της παραγράφου 2.7 (όπου το προσομοιωμένο σύστημα διαθέτει μετασχηματιστή και γραμμή MT) η μέθοδος μετατόπισης σύνθετης αντίστασης εφαρμόζεται μόνο στη σύνθετη αντίσταση της γραμμής MT (R_{SWcn} , L_{SWcn}), προκειμένου να περιληφθεί ολόκληρη η σύνθετη αντίσταση του μετασχηματιστή στην προσομοίωση (Σχήμα 2.22). Η πρακτική προσέγγιση παρουσιάζεται στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 2.18.

2.6.4) Ποσοτικοποίηση της ακρίβειας

Εξετάζεται η βελτίωση της ακρίβειας με τη μέθοδο μετατόπισης σύνθετης αντίστασης, σε σχέση με την κοινή πρακτική της χρήσης βαθυπερατού φίλτρου στην ανατροφοδότηση. Το διάγραμμα βαθμίδων μιας PHIL εφαρμογής, συμπεριλαμβανομένου του λόγου των τάσεων (α), παριστάνεται στο Σχήμα 2.19a. Εφαρμόζοντας τη μετατόπιση σύνθετων αντιστάσεων, το διάγραμμα βαθμίδων τροποποιείται στο Σχήμα 2.19b, όπου η έξοδος V_{ZHW} του Z_{HW} (χωρίς τη μετατοπιζόμενη σύνθετη αντίσταση στο φυσικό σύστημα Z_{sh}) υπολογίζεται από την τάση εξόδου του ενισχυτή ισχύος (διαιρέτης τάσης). Η ακρίβεια της PHIL προσομοίωσης υπολογίζεται από τις συναρτήσεις μεταφοράς κλειστού βρόχου του ιδανικού ($T_d=0$, $G_{filter}(s)=1$, $G_{LPF}(s)=1$) και του πραγματικού συστήματος (με βάση την πρώτη μέθοδο που περιγράφηκε στην παράγραφο 2.4 [25]), λαμβάνοντας υπόψη τον λόγο των τάσεων (α) και την επίδραση της μετατόπισης σύνθετης αντίστασης.



Σχήμα 2.18. Διάγραμμα ροής της μεθόδου μετατόπισης σύνθετης αντίστασης για την επίτευξη ευστάθειας



Σχήμα 2.19. Διάγραμμα βαθμίδων PHIL προσομοίωσης με διαφορετικά επίπεδα τάσης (α), διάγραμμα βαθμίδων εφαρμόζοντας τη μέθοδο μετατόπισης σύνθετης αντίστασης (β)

$$G_{ideal}(s) = \frac{1/a}{1 + Z_{SW}(s)/(a \cdot Z_{HW}(s))} = \frac{Z_{HW}(s)}{a \cdot Z_{HW}(s) + Z_{SW}(s)} \quad (2.44)$$

$$G_{real_shifting}(s) = \frac{1/a \cdot e^{-sT_d} \cdot G_{filter}(s) \cdot Z_{HW}(s)/(Z_{HW}(s) + Z_{sh}(s))}{1 + 1/a \cdot e^{-sT_d} \cdot G_{filter}(s) \cdot G_{LPF}(s)(Z_{SW}(s) - a \cdot Z_{sh}(s))/(Z_{HW}(s) + Z_{sh}(s))} =$$

$$= \frac{e^{-sT_d} \cdot G_{filter}(s) \cdot Z_{HW}(s)}{a \cdot (Z_{HW}(s) + Z_{sh}(s)) + e^{-sT_d} \cdot G_{filter}(s) \cdot G_{LPF}(s) \cdot (Z_{SW}(s) - a \cdot Z_{sh}(s))} \quad (2.45)$$

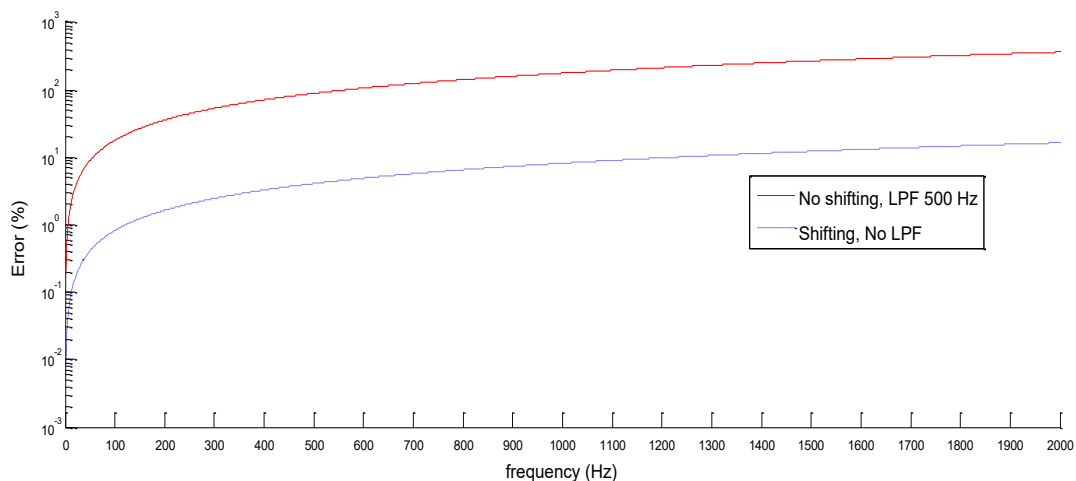
$$Error(j\omega) = \left| \frac{G_{real_shifting}(j\omega) - G_{ideal}(j\omega)}{G_{ideal}(j\omega)} \right| \cdot 100\% \quad (2.46)$$

Για να υπολογιστεί η βελτίωση της ακρίβειας με τη μετατόπιση των σύνθετων αντιστάσεων, θεωρείται μία απλή περίπτωση με ωμικές αντιστάσεις και επαγωγικές αντιδράσεις στο προσομοιωμένο και στο φυσικό σύστημα με χαρακτηριστικά που φαίνονται στον Πίνακα 2.1 (λόγος τάσεων $\alpha=1$).

Βήμα του ΨΠΠΧ	$10 \mu s$
Φίλτρο του ενισχυτή	$G_{filter}(s) = \frac{1}{2.6419 \cdot 10^{-13} s^2 + 0.8 \cdot 10^{-6} s + 1}$
Συνολική χρονική καθυστέρηση	$T_d = 25.2 \mu s$
Προσομοιωμένη σύνθετη αντίσταση	$Z_{SW} = 2 \cdot 10^{-3} s + 10$
Φυσική σύνθετη αντίσταση	$Z_{HW} = 0.1 \cdot 10^{-3} s + 1$
Μετατοπιζόμενη σύνθετη αντίσταση στο φυσικό σύστημα	$Z_{sh} = 0.955 \cdot 10^{-3} s + 4.55,$ <i>βάση των σχέσεων (2.40)(2.41) (με περιθώριο ασφαλείας)</i>

Πίνακας 2.1. Χαρακτηριστικά του PHIL συστήματος

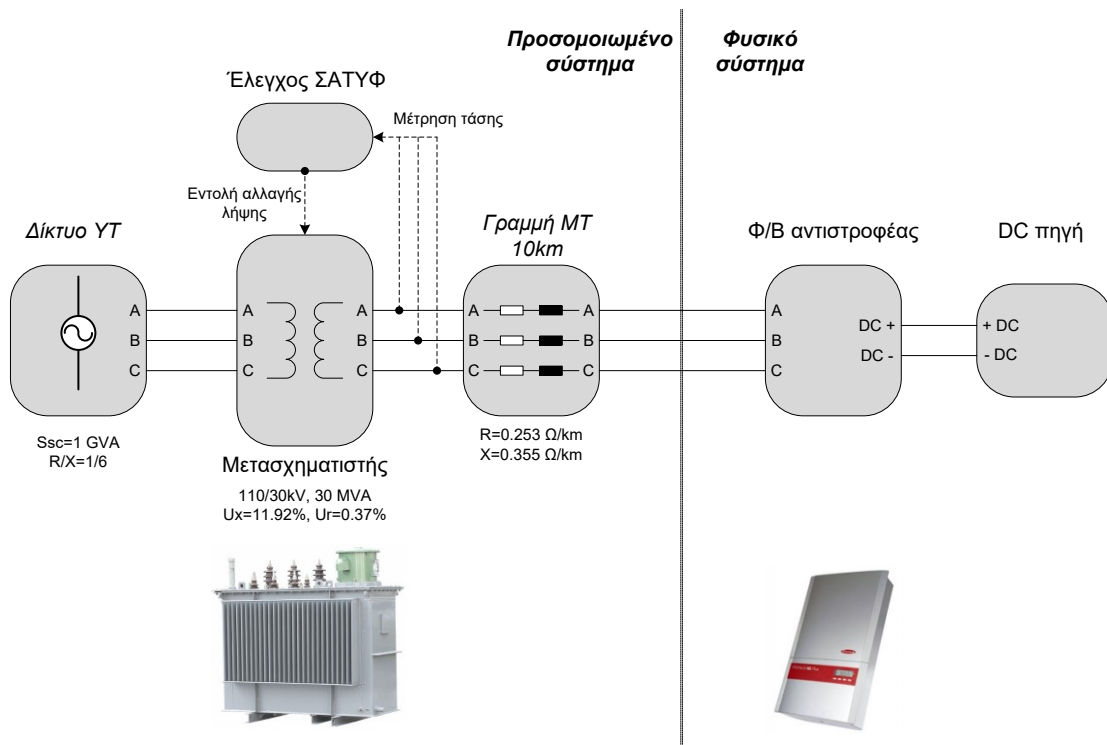
Η ανάλυση της ευστάθειας με το κριτήριο Nyquist έδειξε πως απαιτείται βαθυπερατό φίλτρο ανατροφοδότησης πρώτης τάξης με συχνότητα αποκοπής 500 Hz για την επίτευξη ευστάθειας. Με την εφαρμογή της μεθόδου μετατόπισης σύνθετης αντίστασης, επιτεύχθηκε ευστάθεια δίχως φίλτρο ανατροφοδότησης που οδηγεί σε πολύ καλύτερη ακρίβεια σε ολόκληρο το εύρος συχνοτήτων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.20 (το σφάλμα στα 50 Hz είναι 0.4% με τη μετατόπιση σύνθετων αντιστάσεων και 9% δίχως τη μετατόπιση).



Σχήμα 2.20. Βελτίωση της ακρίβειας της PHIL προσομοίωσης με τη μέθοδο μετατόπισης σύνθετης αντίστασης

2.7) Εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου σε δίκτυο διανομής με ΔΠ

Θεωρείται PHIL εφαρμογή στην οποία το προσομοιωμένο σύστημα αποτελείται από γραμμή MT που τροφοδοτείται από μετασχηματιστή YT/MT εξοπλισμένο με ΣΑΤΥΦ (Σχήμα 2.21). Το φυσικό σύστημα αποτελείται από αντιστροφέα φωτοβολταϊκών ΧΤ συνδεδεμένο σε DC πηγή.



Σχήμα 2.21. PHIL υλοποίηση με πραγματικό Φ/Β αντιστροφέα και DC πηγή σε ρόλο δοκιμίου

Η συγκεκριμένη PHIL εφαρμογή είναι ιδιαίτερα απαιτητική όσον αφορά την ευστάθεια και την ακρίβεια για τους παρακάτω λόγους:

- Σε μελέτες ρύθμισης τάσης σε δίκτυα διανομής η σύνθετη αντίσταση του προσομοιωμένου δικτύου πρέπει να είναι σχετικά μεγάλη, ώστε να προκύπτουν αξιοσημείωτες μεταβολές της τάσης από τη ροή ενεργού και αέργου ισχύος. Επιπλέον, ο πραγματικός φωτοβολταϊκός αντιστροφέας διαθέτει και πυκνωτές στο φίλτρο εξόδου του που χειροτερεύουν την ευστάθεια.
- Το δοκίμιο παρέχει ή απορροφά άεργο ισχύ προκειμένου να συνεισφέρει στη ρύθμιση τάσης. Η εισαγόμενη χρονική καθυστέρηση (από τον ενισχυτή ισχύος, τον ΨΠΠΧ και τον αισθητήρα) και πιθανά μέσα επίτευξης ευστάθειας (π.χ. βαθυπερατό φίλτρο στην ανατροφοδότηση), δημιουργούν μια πρόσθετη μετατόπιση φάσης μεταξύ της τάσης και του ρεύματος στον κοινό ζυγό μεταξύ του προσομοιωμένου και του φυσικού συστήματος. Αυτή η μετατόπιση φάσης οδηγεί σε ανακρίβειες στη μεταφορά αέργου και ενεργού ισχύος από το φυσικό σύστημα στο προσομοιωμένο σύστημα και συνεπώς σε αποκλίσεις στις τάσεις του δικτύου.

Για τους ανωτέρω λόγους ενδείκνυται η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου μετατόπισης σύνθετων αντιστάσεων, όπως θα δείξουμε στη συνέχεια. Καταρχάς είναι απαραίτητη η αλλαγή κλίμακας εφόσον το προσομοιωμένο σύστημα είναι MT και το δοκίμιο συνδέεται στη XT και επίσης χρειάζεται να προσαρμοστεί η ροή ισχύος. Η ονομαστική φαινόμενη ισχύς του εμπορικού Φ/Β αντιστροφέα είναι 2 kVA με δυνατότητα προσαρμογής του συντελεστή ισχύος μεταξύ 1 και 0.85 (υπερδιέγερση – υποδιέγερση). Θεωρώντας τον ελάχιστο συντελεστή ισχύος του αντιστροφέα, η μέγιστη DC ισχύς από τα Φ/Β μπορεί να είναι 1.7 kW, εφόσον ο συγκεκριμένος αντιστροφέας δεν περικλύπτει την ενεργό ισχύ του προκειμένου να παρέχει/απορροφήσει άεργο ισχύ (ώστε να τηρήσει το όριο μέγιστης φαινόμενης ισχύος). Εφαρμόζεται η προτεινόμενη μέθοδος αλλαγής κλίμακας θεωρώντας αντιστροφέα πλήρους κλίμακας ονομαστικής ενεργού ισχύος 15 MW (σχέσεις (2.20),(2.22),(2.23),(2.24)).

$$a = \frac{V_{SW}}{V_{HW}} = \frac{V_{MVP}}{V_{LVP}} = \frac{30/\sqrt{3} \text{ kV}}{230V} = 75.3$$

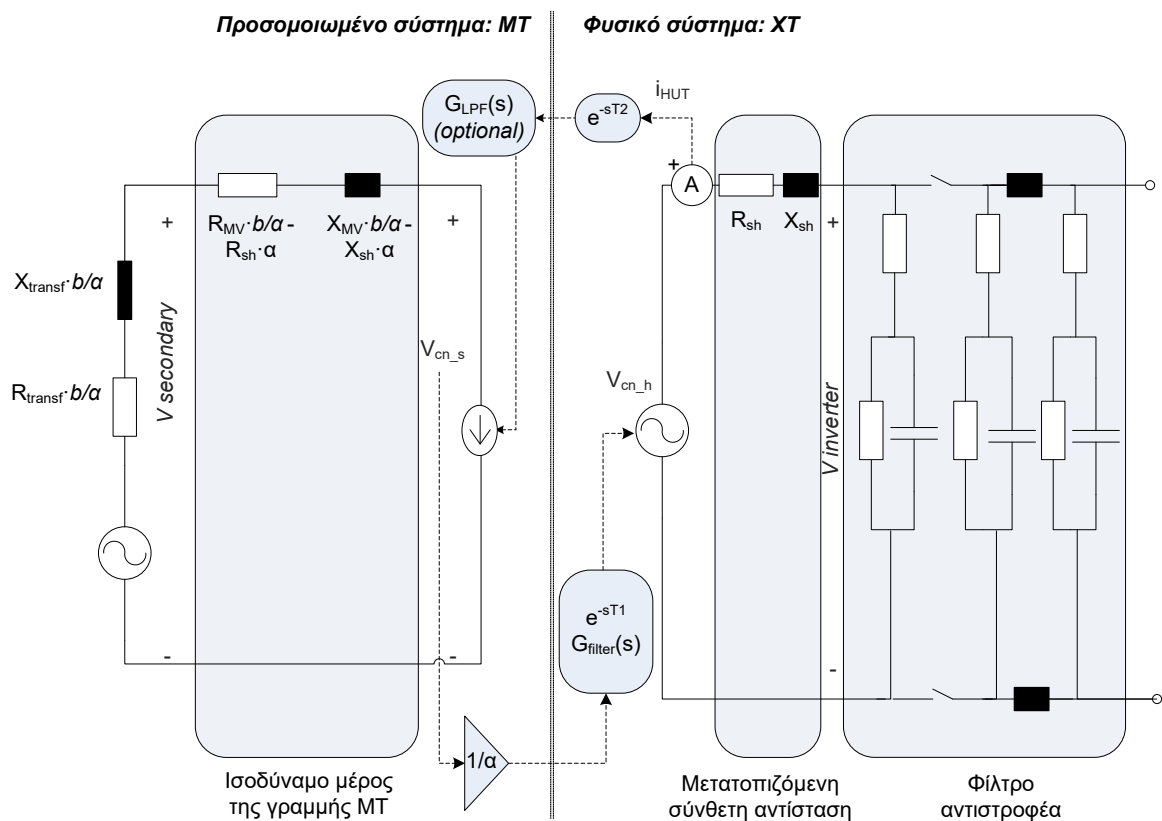
$$b = \frac{(S_{HuT_full})_{1p}}{(S_{HuT_red})_{1p}} = \frac{(P_{HuT_full})_{1p}}{(P_{HuT_red})_{1p}} = \frac{15/3 \text{ MW}}{1.7 \text{ kW}} = 2941.2$$

$$c = \frac{(P_{HuT_full})_{1p}}{(P_{HuT_red})_{1p} \cdot \alpha} = \frac{b}{a} = 39.06$$

$$S'_B = P'_{SW} = a \cdot P_{HW} = a(P_{HuT_red})_{1p} = 75.3 \cdot 1.7 \text{ kW} = 128 \text{ kW}$$

$$\kappa = \frac{S_B}{S'_B} = \frac{(P_{HuT_full})_{1p}}{a \cdot (P_{HuT_red})_{1p}} = \frac{b}{a} = 39.06$$

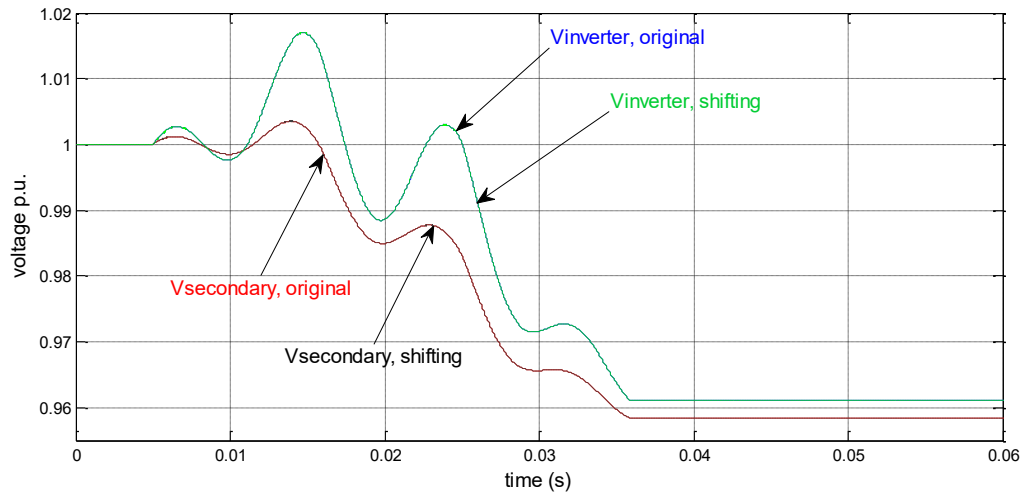
Η προτεινόμενη PHIL υλοποίηση που περιλαμβάνει αλλαγή κλίμακας και μετατόπιση σύνθετων αντιστάσεων παριστάνεται στο Σχήμα 2.22.



Σχήμα 2.22. PHIL υλοποίηση: αλλαγή κλίμακας και μέθοδος μετατόπισης σύνθετων αντιστάσεων με Φ/Β αντιστροφέα

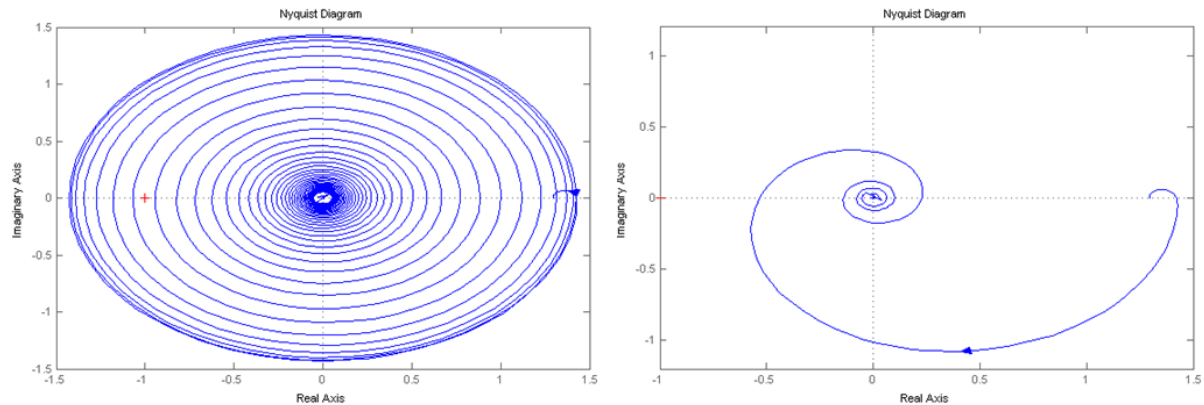
Στην παράγραφο 2.6 προτάθηκε η μέθοδος μετατόπισης σύνθετων αντιστάσεων όταν το επίπεδο τάσης είναι διαφορετικό στην προσομοίωση και στο φυσικό σύστημα (π.χ. MT και XT αντίστοιχα) (σχέση (2.27)). Η ανωτέρω ισοδυναμία αποδεικνύεται για την εφαρμογή του Σχήματος 2.21, χρησιμοποιώντας αμιγώς ψηφιακή προσομοίωση στο λογισμικό Matlab/Simulink. Σε αυτή την ανάλυση, ο πραγματικός αντιστροφέας προσομοιώνεται ως πηγή ρεύματος για λόγους απλότητας. Σε μια δεύτερη περίπτωση, εισάγεται σύνθετη αντίσταση σε σειρά με τον αντιστροφέα στη πλευρά του φυσικού συστήματος (η μετατοπιζόμενη σύνθετη αντίσταση Z_{sh}) και η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση αφαιρείται από τη σύνθετη αντίσταση της προσομοίωσης σύμφωνα με τη σχέση (2.26). Ένας επιπλέον ζυγός εισάγεται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.22, ο οποίος είναι πλέον ο κοινός ζυγός μεταξύ του προσομοιωμένου και του φυσικού συστήματος.

Το ρεύμα του αντιστροφέα αυξάνεται γρήγορα από το μηδέν έως τη μέγιστη τιμή (8.7 A) με συντελεστή ισχύος 0.85 (απορρόφηση αέργου ισχύος, όπου $T_1=0$, $T_2=0$, $G_{filter}=1$, $G_{LPF}=1$). Η τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή και η τάση εξόδου του αντιστροφέα έχουν πανομοιότυπη συμπεριφορά και στις δύο περιπτώσεις (στη μεταβατική και στη μόνιμη κατάσταση), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.23, επικυρώνοντας τη προτεινόμενη μέθοδο.



Σχήμα 2.23. Τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή και στην έξοδο του αντιστροφέα για το αρχικό σύστημα και το σύστημα μετά τη μετατόπιση των συνθέτων αντιστάσεων

Η ευστάθεια και η ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου μετατόπισης σύνθετης αντίστασης εξετάζεται με δυναμική εικονική PHIL προσομοίωση στο Matlab/Simulink και με το κριτήριο Nyquist. Χάρη στον χρησιμοποιούμενο προηγμένο εξοπλισμό (γραμμικός ενισχυτής και γρήγορος ΨΠΠΧ) η χρονική καθυστέρηση έχει πολύ μικρή τιμή. Η μελέτη ευστάθειας του αρχικού συστήματος (χωρίς μετατόπιση σύνθετων αντιστάσεων) έδειξε πως χρειαζόταν βαθυπερατό φίλτρο πρώτης τάξης στο ρεύμα ανατροφοδότησης με ιδιαίτερα χαμηλή συχνότητα αποκοπής (35 Hz) που οδηγούσε σε μη αποδεκτή μετατόπιση φάσης στο ρεύμα ανάδρασης και σε μεγάλο σφάλμα στην άεργο ισχύ και στην τάση. Επίσης, δοκιμάστηκαν Butterworth φίλτρα τρίτης τάξης χωρίς ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ως εκ τούτου, εφαρμόστηκε η μέθοδος μετατόπισης σύνθετης αντίστασης με τη προσθήκη αντίστασης αναφοράς (IEC 61000-3-3) και ενός επιπλέον πηνίου (με βάση τη διαθεσιμότητα στο εργαστήριο) στη πλευρά του φυσικού συστήματος, που οδήγησε σε υψηλή συχνότητα αποκοπής του φίλτρου ανατροφοδότησης (8 kHz) για την επίτευξη ευστάθειας, με αποτέλεσμα πολύ μικρότερη μετατόπιση φάσης και βελτιωμένη ακρίβεια. Στο Σχήμα 2.24 φαίνεται το διάγραμμα Nyquist εφαρμόζοντας τη μέθοδο μετατόπισης σύνθετης αντίστασης δίχως φίλτρο ανατροφοδότησης (αστάθεια) και με φίλτρο ανατροφοδότησης υψηλής συχνότητας αποκοπής (ευστάθεια). Σε ονομαστικό ρεύμα και ελάχιστο $\cos\phi$ το σφάλμα της τάσης του αντιστροφέα στα 50 Hz στο αρχικό σύστημα ήταν 9%, ενώ με τη μέθοδο της μετατόπισης σύνθετης αντίστασης (και με φίλτρο υψηλής συχνότητας αποκοπής) το σφάλμα ήταν 0.1%. Τα χαρακτηριστικά του εξοπλισμού και των σύνθετων αντιστάσεων που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον Πίνακα 2.2.



Σχήμα 2.24. Διάγραμμα Nyquist εφαρμόζοντας τη μέθοδο μετατόπισης σύνθετης αντίστασης δίχως φίλτρο ανατροφοδότησης (αριστερά) και με φίλτρο ανατροφοδότησης υψηλής συχνότητας αποκοπής (δεξιά)

Βήμα του ΨΠΠΧ	$10 \mu s$
Συνάρτηση μεταφοράς του ενισχυτή	$G_{amp}(s) = e^{-s \cdot 4.2 \cdot 10^{-6}} \frac{1}{2.6419 \cdot 10^{-13} s^2 + 0.8 \cdot 10^{-6} s + 1}$
Χρονική καθυστέρηση του αισθητήρα	$1 \mu s$
Μετατοπιζόμενη σύνθετη αντίσταση στο φυσικό σύστημα	$R_{sh} = 0.597 \Omega, L_{sh} = 4.84 mH$

Πίνακας 2.2. Χαρακτηριστικά της PHIL εφαρμογής

2.8) Σύνοψη και συμπεράσματα

Σε αυτό το Κεφάλαιο αρχικά αναλύθηκε η ευστάθεια της PHIL μεθόδου και περιγράφηκαν μέθοδοι εκτίμησης της ευστάθειας. Το κριτήριο Nyquist μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα με χρήση λογισμικού, ενώ με το κριτήριο Routh-Hurwitz, εφαρμόζοντας προσέγγιση Padé, μπορούν να προκύψουν εξισώσεις που δίνουν μία εικόνα των παραγόντων που επηρεάζουν την ευστάθεια σε απλές περιπτώσεις. Η προσέγγιση πρώτης τάξης που προτείνεται στη βιβλιογραφία αποδείχτηκε πως είναι ανεπαρκής και εφαρμόστηκε προσέγγιση δεύτερης τάξης με καλύτερα αποτελέσματα. Ο γεωμετρικός τόπος των ριζών παρέχει τα ίδια αποτελέσματα με το κριτήριο Routh-Hurwitz και μπορεί να δείξει γραφικά την επίδραση συγκεκριμένων μεταβλητών στην ευστάθεια. Η δυναμική εικονική PHIL προσομοίωση αντιπροσωπεύει επαρκώς το PHIL πείραμα και πρακτικά προτείνεται η χρήση της μετά τη θεωρητική εξέταση με το κριτήριο Nyquist. Η εκτίμηση της ευστάθειας και της ακρίβειας είναι δύσκολη σε πολλές περιπτώσεις που το φυσικό σύστημα δεν είναι γνωστό με ακρίβεια. Επίσης, η επίτευξη ευστάθειας διατηρώντας ικανοποιητική ακρίβεια αποτελεί πρόκληση.

Προτάθηκε νέα μέθοδος για την επίτευξη ευστάθειας με καλή ακρίβεια κατά την οποία μεταφέρεται σύνθετη αντίσταση από το προσομοιωμένο στο φυσικό σύστημα και

πραγματοποιείται αλλαγή κλίμακας. Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί ευρέως, δεν είναι πολύπλοκη και δεν απαιτεί την εισαγωγή φίλτρων στο φυσικό σύστημα και επιπλέον αλγορίθμων στο λογισμικό του ΨΠΠΧ. Ποσοτικοποιήθηκε η σημαντική βελτίωση της ακρίβειας σε σχέση με την κοινή πρακτική της εισαγωγής φίλτρου ανατροφοδότησης (εφόσον δεν απαιτείται φίλτρο ανατροφοδότησης ή αν είναι αναγκαίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί φίλτρο υψηλότερης συχνότητας αποκοπής). Επιπλέον, εφαρμόζοντας κατάλληλη αλλαγή κλίμακας, η μέθοδος επιτρέπει τη χρήση μίας μικρότερης συσκευής για την εκτίμηση της συμπεριφοράς της συσκευής πλήρους κλίμακας. Αυτή η δυνατότητα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιπτώσεις που δεν είναι εφικτή η PHIL δοκιμή πλήρους κλίμακας. Η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόστηκε σε δίκτυο διανομής που περιλαμβάνει ΔΠ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΕΠΙΚΟΥΡΙΚΕΣ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ: ΜΕΘΟΔΟΙ, ΠΡΟΤΥΠΑ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΔΟΚΙΜΩΝ

3.1) Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, τα δίκτυα διανομής και μεταφοράς έρχονται αντιμέτωπα με την αυξανόμενη ενσωμάτωση μονάδων ΔΠ, συχνά από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, που θέτουν νέες προκλήσεις στη λειτουργία του συστήματος. Έχει γίνει σαφές πως η παλαιότερη αντίληψη για την ενσωμάτωση μονάδων ΔΠ που συνοψίζεται στη φράση “fit and forget” πλέον δεν επαρκεί, αλλά οι μονάδες ΔΠ πρέπει να διαθέτουν προηγμένες λειτουργίες σε τοπικό επίπεδο καθώς και τη δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου τους. Επιπλέον, σε βάθος χρόνου κάποιοι σταθμοί παραγωγής που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα σταδιακά θα αποσυνδεθούν. Οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής συμμετέχουν ενεργά στη λειτουργία του συστήματος παρέχοντας επικουρικές υπηρεσίες. Για να γίνει εφικτή η σταδιακή αντικατάσταση τους από πλήθος μικρότερων μονάδων ΔΠ, θα πρέπει αυτές οι μονάδες να μπορούν να παρέχουν επικουρικές υπηρεσίες.

Επικουρικές υπηρεσίες ορίζονται στην οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης Directive 2009/72/EC [51] «όλες οι απαραίτητες υπηρεσίες για τη λειτουργία του δικτύου μεταφοράς ή διανομής». Σύμφωνα με την Eurelectric [52], «επικουρικές υπηρεσίες είναι όλες οι υπηρεσίες που απαιτούνται από τον διαχειριστή του δικτύου μεταφοράς ή διανομής για να διασφαλίσουν την ακεραιότητα (integrity) και ευστάθεια του συστήματος μεταφοράς ή διανομής καθώς και την ποιότητα ισχύος». Οι επικουρικές υπηρεσίες παρέχονται από μονάδες παραγωγής, ελεγχόμενα φορτία και άλλες συσκευές. Η Eurelectric κάνει τη διάκριση μεταξύ επικουρικών υπηρεσιών (ancillary services) και υπηρεσιών συστήματος (system services). Οι υπηρεσίες συστήματος περιλαμβάνουν όλες τις υπηρεσίες που παρέχονται από τον διαχειριστή του συστήματος στους χρήστες που συνδέονται στο σύστημα. Οι επικουρικές υπηρεσίες παρέχονται από τους χρήστες του συστήματος στον διαχειριστή, ώστε να μπορεί να παρέχει τις υπηρεσίες συστήματος. Αναφέρονται οι παρακάτω επικουρικές υπηρεσίες [52]:

- Ρύθμιση συχνότητας
- Ρύθμιση τάσης
- Στρεφόμενη εφεδρεία
- Στατή εφεδρεία
- Δυνατότητα αυτόνομης εκκίνησης (black start)
- Απομακρυσμένος αυτόματος έλεγχος των γεννητριών
- Αντιστάθμιση απωλειών δικτύου
- Ενέργειες έκτακτης ανάγκης

Η αυξανόμενη ενσωμάτωση μονάδων ΔΠ από ανανεώσιμες πηγές, που παρουσιάζουν μεταβλητότητα και αβεβαιότητα στην παραγωγή, καθιστά αναγκαία την παροχή επικουρικών υπηρεσιών. Για παράδειγμα, σε περιόδους υψηλής ταχύτητας ανέμου και ηλιοφάνειας, λιγότερες συμβατικές μονάδες θα είναι συνδεδεμένες ώστε να συνεισφέρουν στη ρύθμιση συχνότητας, στην παροχή αδράνειας και στη ρύθμιση τάσης [53]. Οπότε, η ΔΠ πρέπει πλέον να παρέχει επικουρικές υπηρεσίες, όπως στήριξη της τάσης σε μόνιμη κατάσταση, στήριξη της τάσης σε μεταβατική κατάσταση, συνεισφορά στη ρύθμιση συχνότητας κ.α.

Αυτή η ανάγκη έχει αναγνωριστεί και αντικατοπτρίζεται σε πλήθος εθνικών και διεθνών προτύπων/οδηγιών και σε κώδικες δικτύου που έχουν δημοσιευθεί τα τελευταία χρόνια και ορίζουν κανονισμούς σύνδεσης μονάδων παραγωγής και περιλαμβάνουν απαιτήσεις που αφορούν επικουρικές υπηρεσίες. Όμως, οι απαιτήσεις δεν είναι πάντα εναρμονισμένες και σε κάποια σημεία παρουσιάζονται αντιφάσεις. Επιπλέον, πλήθος διαδικασιών εργαστηριακών δοκιμών έχουν οριστεί, όμως λείπουν ακόμα ολοκληρωμένες διαδικασίες για συγκεκριμένες απαιτήσεις.

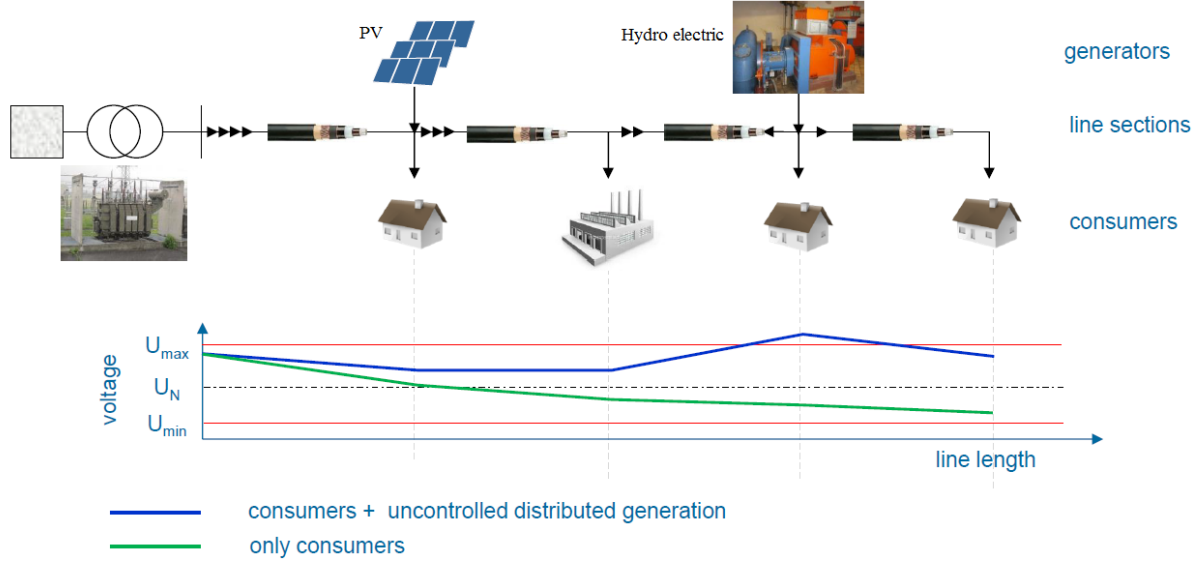
Σε αυτό το Κεφάλαιο [B.12][B.13] παρουσιάζονται οι σημαντικότερες απαιτήσεις για την παροχή επικουρικών υπηρεσιών από μονάδες ΔΠ, εστιάζοντας στη ρύθμιση τάσης και συχνότητας. Επίσης, γίνεται αναφορά στην ικανότητα αδιάλειπτης παροχής ισχύος σε συνθήκες χαμηλής τάσης (Low Voltage Ride Through - LVRT) που είναι σημαντική για την ομαλή λειτουργία του συστήματος. Η ανασκόπηση φανερώνει αντιφάσεις και απαιτήσεις που δεν είναι πλήρως ορισμένες. Δίνεται έμφαση σε πιθανά προβλήματα εξαιτίας ασαφών απαιτήσεων, όπως η περίπτωση του $Q(V)$ ελέγχου σε ασύμμετρες συνθήκες που αναλύεται με χρήση προσομοιώσεων. Παρουσιάζονται υποσχόμενες λειτουργίες που δεν έχουν συμπεριληφθεί επαρκώς ακόμα στα πρότυπα/οδηγίες.

Επιπλέον, αναφέρεται η υφιστάμενη κατάσταση των διαδικασιών δοκιμών που αφορούν τις επικουρικές υπηρεσίες. Προτείνονται προηγμένες διαδικασίες δοκιμών συμβατικού τύπου για απαιτήσεις που δεν έχουν επαρκώς οριστεί στα υφιστάμενα πρότυπα/οδηγίες. Οι δοκιμές αφορούν τη ρύθμιση τάσης σε μόνιμη κατάσταση (π.χ. $Q(V)$ έλεγχος) και τη ρύθμιση συχνότητας (έλεγχος στατισμού και παροχή εικονικής αδράνειας). Επιπλέον, προτείνονται PHIL δοκιμές που δείχνουν την αξία της μεθόδου σε σύγκριση με τις συμβατικές δοκιμές.

3.2) Συμβολή της Διесπαρμένης Παραγωγής στη ρύθμιση τάσης

Παραδοσιακά η ρύθμιση τάσης στα δίκτυα διανομής γίνεται με τη χρήση συσκευών όπως μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ, πυκνωτές κ.α., με βασικό σκοπό την αντιμετώπιση της πτώσης τάσης που προκαλείται από τη ροή ισχύος στις γραμμές για την κάλυψη του φορτίου. Με την ενσωμάτωση πλήθους μονάδων ΔΠ στη MT και στη XT, η παραγωγή από τις μονάδες ΔΠ μπορεί πλέον να καλύπτει σημαντικό μέρος του φορτίου ή ακόμα και να το ξεπερνάει προκαλώντας ανάστροφη ροή ισχύος και άρα ανύψωση τάσης. Έτσι, σε ορισμένες περιπτώσεις (όταν το φορτίο είναι χαμηλό και η παραγωγή από ΔΠ υψηλή) η τάση μπορεί να ξεπεράσει τα επίπεδα που ορίζουν τα πρότυπα (π.χ. το [54]). Σε δίκτυο

διανομής με μία κεντρική γραμμή, αν σε κάθε ζυγό η παραγωγή της ΔΠ είναι υψηλότερη από το φορτίο, η ανύψωση της τάσης γίνεται μεγαλύτερη όσο μεγαλώνει η απόσταση από τον Μ/Σ και το μεγαλύτερο πρόβλημα παρουσιάζεται στο άκρο της γραμμής (κατ' αναλογία με την πτώση τάσης στα παραδοσιακά δίκτυα διανομής). Στο Σχήμα 3.1 παριστάνονται οι τάσεις σε πραγματικό δίκτυο διανομής στην περίπτωση που συνδέονται μόνο φορτία και στην περίπτωση που συνδέεται και ΔΠ σε συγκεκριμένους ζυγούς [55].



Σχήμα 3.1. Οι τάσεις σε δίκτυο διανομής που περιλαμβάνει μόνο φορτία και με διείσδυση ΔΠ (φωτοβολταϊκό πάρκο και μικρό υδροηλεκτρικό) [55]

Η πτώση τάσης σε περίπτωση που φορτίο συνδέεται στο ανάντη δίκτυο μέσω γραμμής ωμικής αντίστασης R και επαγωγικής αντίδρασης X , δίνεται κατά προσέγγιση από την παρακάτω σχέση [56][57]:

$$\Delta V \approx I \cdot R \cdot \cos \phi + I \cdot X \cdot \sin \phi \quad (3.1)$$

Μία απόδειξη της σχέσης με βάση το διανυσματικό διάγραμμα (Σχήμα 3.2) για περίπτωση ανύψωσης τάσης εξαιτίας της διείσδυσης ΔΠ παρατίθεται παρακάτω [58].

$$\tilde{V}_{PCC} = \tilde{V}_G + \tilde{I} \cdot (R + jX) \quad (3.2)$$

Όπου V_G είναι η τάση του δικτύου και V_{PCC} η τάση του ζυγού στον οποίο συνδέεται το φορτίο (P_L , Q_L) και η μονάδα ΔΠ (P_{DG} , Q_{DG}).

Για μικρή γωνία δ θεωρείται η προβολή της V_G στον οριζόντιο άξονα και η μεταβολή της τάσης υπολογίζεται προσεγγιστικά ως:

$$\Delta V = V_{PCC} - V_G \approx oc - oa = ac = ab + bc \Rightarrow$$

$$\Delta V \approx I \cdot R \cdot \cos \phi + I \cdot X \cdot \sin \phi = \frac{V_{PCC} \cdot I \cdot \cos \phi \cdot R + V_{PCC} \cdot I \cdot \sin \phi \cdot X}{V_{PCC}} \Rightarrow$$

$$\Delta V \approx \frac{P_{PCC} \cdot R + Q_{PCC} \cdot X}{V_{PCC}} \approx \frac{P_{PCC} \cdot R + Q_{PCC} \cdot X}{V_G} \quad (3.3)$$

Όπου P_{PCC} και Q_{PCC} είναι η συνολική ενεργός και άεργος ισχύς που ρέει από τον ζυγό.

$$P_{PCC} = P_{DG} - P_L \quad (3.4)$$

$$Q_{PCC} = Q_{DG} - Q_L \quad (3.5)$$

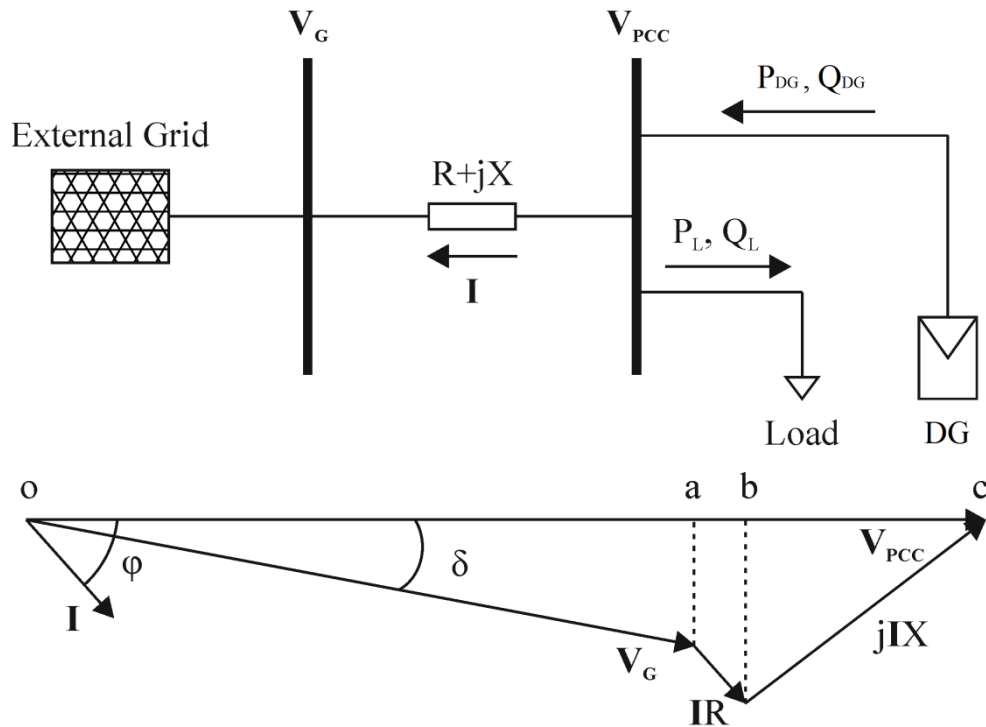
Οπότε η σχέση (3.3) τροποποιείται ως:

$$\Delta V \approx \frac{(P_{DG} - P_L) \cdot R + (Q_{DG} - Q_L) \cdot X}{V_{PCC}} \approx \frac{(P_{DG} - P_L) \cdot R + (Q_{DG} - Q_L) \cdot X}{V_G} \quad (3.6)$$

Η ποσοστιαία μεταβολή της τάσης προκύπτει ως [56]:

$$\varepsilon\% = \frac{\Delta V}{V_{PCC}} \cdot 100 \approx \frac{\Delta V}{V_G} \cdot 100 \approx \frac{P_{PCC} \cdot R + Q_{PCC} \cdot X}{V_G^2} \cdot 100 \quad (3.7)$$

Συνήθως η τάση του δικτύου (V_G) θεωρείται πως έχει την ονομαστική της τιμή (V_n). Σημειώνεται πως με την παραπάνω θεώρηση η ΔV είναι θετική όταν παρουσιάζεται ανύψωση τάσης και αρνητική όταν παρουσιάζεται πτώση τάσης.

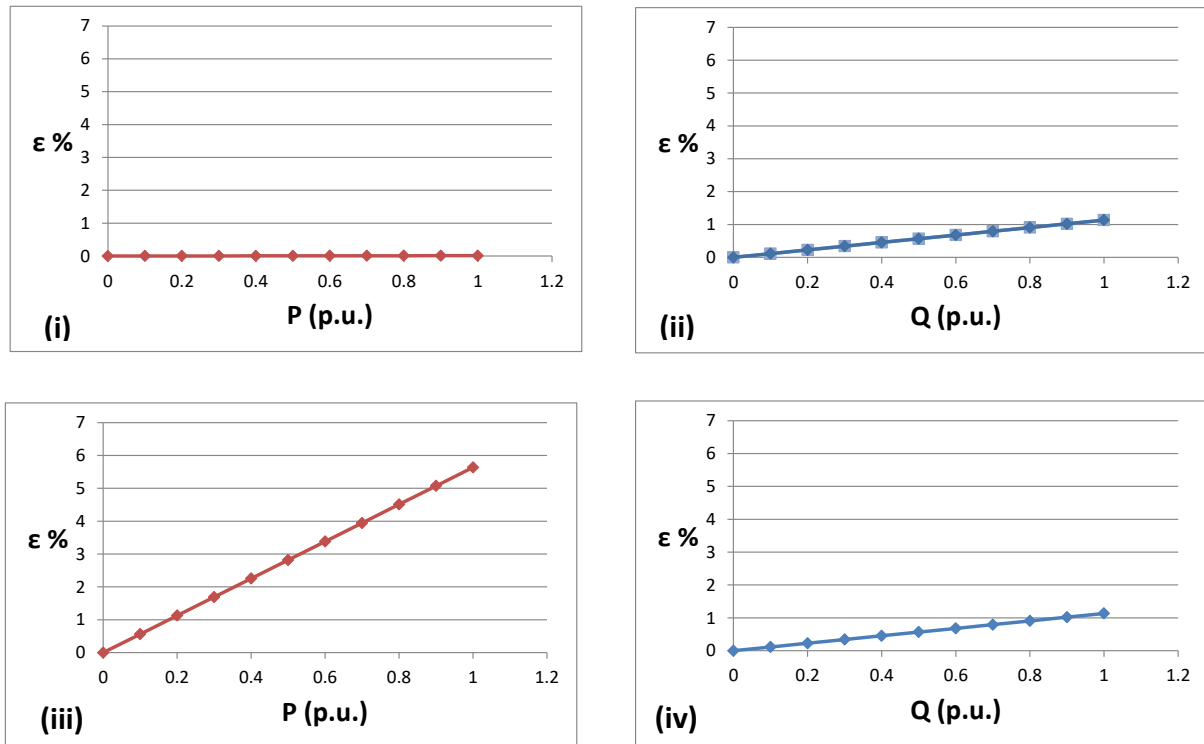


Σχήμα 3.2. Μονάδα ΔΠ και φορτίο συνδέονται στο ανάντη δίκτυο μέσω γραμμής διανομής (άνω), και το αντίστοιχο διανυσματικό διάγραμμα (κάτω) [58]

Θεωρώντας πως η μονάδα ΔΠ λειτουργεί με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, παρουσιάζεται ανύψωση τάσης στο ζυγό της ΔΠ και του φορτίου όταν:

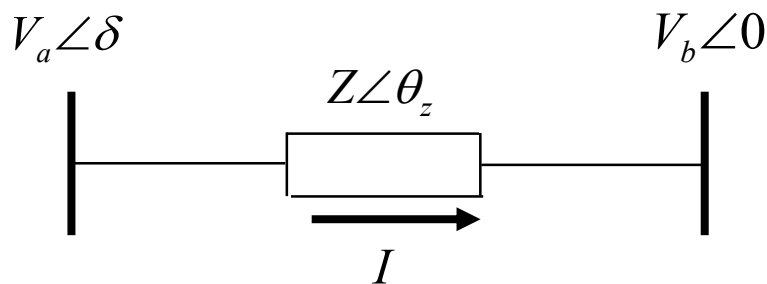
$$P_{DG} \cdot R > P_L \cdot R + Q_L \cdot X \quad (3.8)$$

Η επίδραση του λόγου R/X των γραμμών στην ανύψωση τάσης εξετάζεται για την περίπτωση του Σχήματος 3.2, όπου αγνοείται το φορτίο για λόγους απλότητας. Στο Σχήμα 3.3 φαίνεται πως για χαμηλό λόγο R/X ($R/X \approx 0.01$, εναέρια γραμμή YT) η τάση της ΔΠ επηρεάζεται σχεδόν αποκλειστικά από την άεργο ισχύ ($V=f(Q)$), ενώ για μεγαλύτερο λόγο ($R/X \approx 5$, υπόγεια καλώδια XT) η τάση επηρεάζεται περισσότερο από την ενεργό ισχύ αλλά και από την άεργο ισχύ ($V=f(P, Q)$). Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν από ανάλυση ευαισθησίας [59].



Σχήμα 3.3. Η επίδραση του λόγου R/X της γραμμής στην ποσοστιαία μεταβολή τάσης $R/X \approx 0.01$ (i),(ii), $R/X \approx 5$ (iii),(iv)

Το ζήτημα της επίδρασης του λόγου R/X μπορεί να εξεταστεί και με τον παρακάτω τρόπο. Θεωρούμε δύο ζυγούς (a, b) που συνδέονται μέσω σύνθετης αντίστασης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4. Η ροή ενεργού και άεργου ισχύος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της γραμμής. Ως αναφορά θεωρείται ο ζυγός b και δ είναι η διαφορά γωνίας των δύο ζυγών.



Σχήμα 3.4. Δίκτυο δύο ζυγών για τον υπολογισμό της ροής ενεργού και άεργου ισχύος

Υπολογίζονται η ενεργός και άεργος ισχύς που απορροφά ο ζυγός b:

$$S = \tilde{V}_b \cdot \tilde{I}^* = \tilde{V}_b \left(\frac{\tilde{V}_a - \tilde{V}_b}{\tilde{Z}} \right)^* = V_b \left(\frac{V_a \cdot e^{j\delta} - V_b}{Z \cdot e^{j\theta_z}} \right)^* = V_b \frac{V_a \cdot e^{-j\delta} - V_b}{Z \cdot e^{-j\theta_z}} =$$

$$= \frac{V_a \cdot V_b}{Z} e^{j(\theta_z - \delta)} - \frac{V_b^2}{Z} e^{j\theta_z} \quad (3.9)$$

$$P = \frac{V_a \cdot V_b}{Z} \cos(\theta_z - \delta) - \frac{V_b^2}{Z} \cos\theta_z \quad (3.10)$$

$$Q = \frac{V_a \cdot V_b}{Z} \sin(\theta_z - \delta) - \frac{V_b^2}{Z} \sin\theta_z \quad (3.11)$$

Όπου θ_z η γωνία της σύνθετης αντίστασης της γραμμής.

Αν η επαγωγική αντίδραση της γραμμής είναι πολύ μεγαλύτερη από την ωμική αντίσταση, η ωμική αντίσταση μπορεί να αγνοηθεί ($\theta_z=90^\circ$) και η ενεργός και άεργος ισχύς του ζυγού b προκύπτουν από τις σχέσεις (3.10), (3.11):

$$P = \frac{V_a \cdot V_b}{X} \sin\delta \quad (3.12)$$

$$Q = \frac{V_a \cdot V_b}{X} \cos\delta - \frac{V_b^2}{X} = \frac{V_b \cdot (V_a \cdot \cos\delta - V_b)}{X} \quad (3.13)$$

Σε αυτή την περίπτωση η ενεργός ισχύς εξαρτάται ισχυρά από τη γωνία δ μεταξύ των τάσεων ($P=f(\delta)$), ενώ η άεργος ισχύς από τη διαφορά μέτρων της τάσης ($Q=f(V)$), εφόσον η γωνία δ είναι μικρή [60]. Οπότε, η ενεργός και άεργος ισχύς είναι αποσυνδεδεμένες. Οι σχέσεις (3.12), (3.13) είναι γνωστές από τη λειτουργία των σύγχρονων γεννητριών [57].

Από την άλλη, αν η ωμική αντίσταση της γραμμής είναι πολύ μεγαλύτερη από την επαγωγική αντίδραση, η επαγωγική αντίδραση μπορεί να αγνοηθεί ($\theta_z=0$) και η ενεργός και άεργος ισχύς προκύπτουν από τις σχέσεις (3.10), (3.11):

$$P = \frac{V_a V_b}{R} \cos(-\delta) - \frac{V_b^2}{R} = \frac{V_b \cdot (V_a \cdot \cos(-\delta) - V_b)}{R} \quad (3.14)$$

$$Q = \frac{V_a V_b}{R} \sin(-\delta) \quad (3.15)$$

Σε αυτή την περίπτωση η ενεργός ισχύς εξαρτάται ισχυρά από τη διαφορά μέτρων της τάσης ($P=f(V)$), ενώ η άεργος ισχύς από τη γωνία δ ($Q=f(\delta)$) [61]. Οπότε, η ενεργός και άεργος ισχύς είναι αποσυνδεδεμένες.

Αν η επαγωγική αντίδραση και η ωμική αντίσταση είναι συγκρίσιμες, με βάση τις σχέσεις (3.10), (3.11) η ενεργός και η άεργος ισχύς εξαρτώνται και από το μέτρο της τάσης και από τη γωνία δ (δηλαδή $P=f(V, \delta)$, $Q=f(V, \delta)$). Κατά αντιστοιχία με τη σχέση (3.3), η τάση συνδέεται και με την ενεργό και την άεργο ισχύ [62].

3.2.1) Μέθοδοι αντιμετώπισης της ανύψωσης τάσης

Με βάση τη σχέση (3.6), οι βασικοί μέθοδοι αντιμετώπισης της ανύψωσης τάσης εξαιτίας της διείσδυσης ΔΠ αναφέρονται παρακάτω:

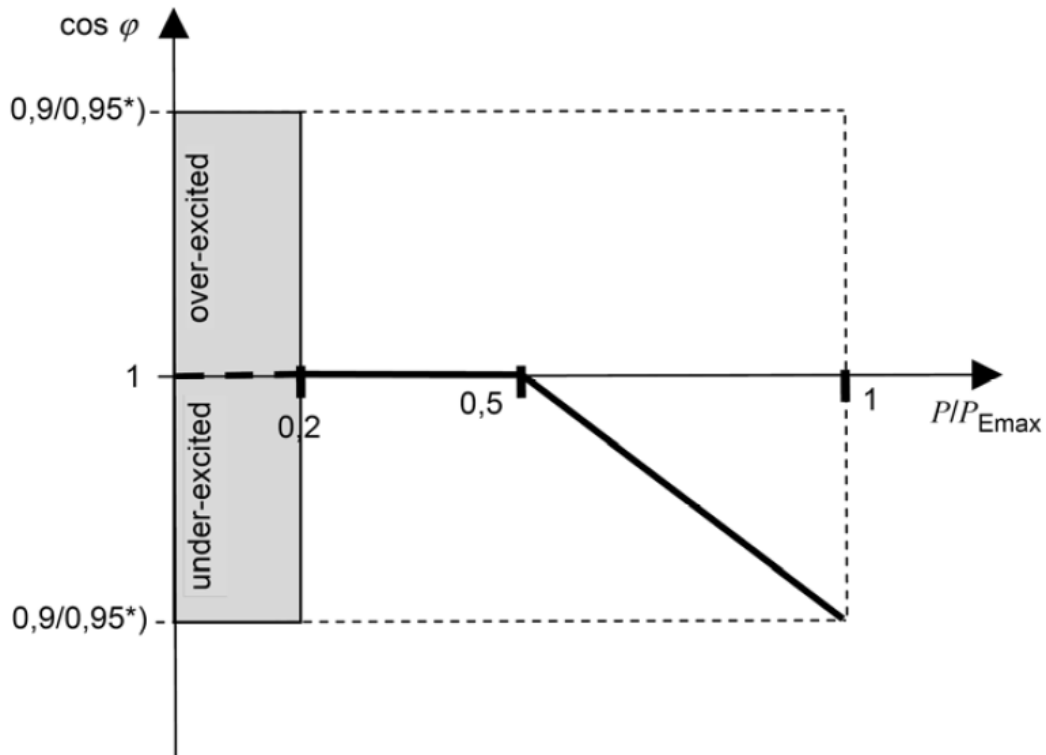
- Αναβάθμιση του δικτύου
- Απορρόφηση αέργου ισχύος από τις μονάδες ΔΠ
- Περιορισμός της ενεργού ισχύος των μονάδων ΔΠ
- Χρήση συστημάτων αποθήκευσης (π.χ. που απορροφούν ενεργό ισχύ όταν η παραγωγή από ΔΠ είναι υψηλή)

Επίσης, η χρήση μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ.

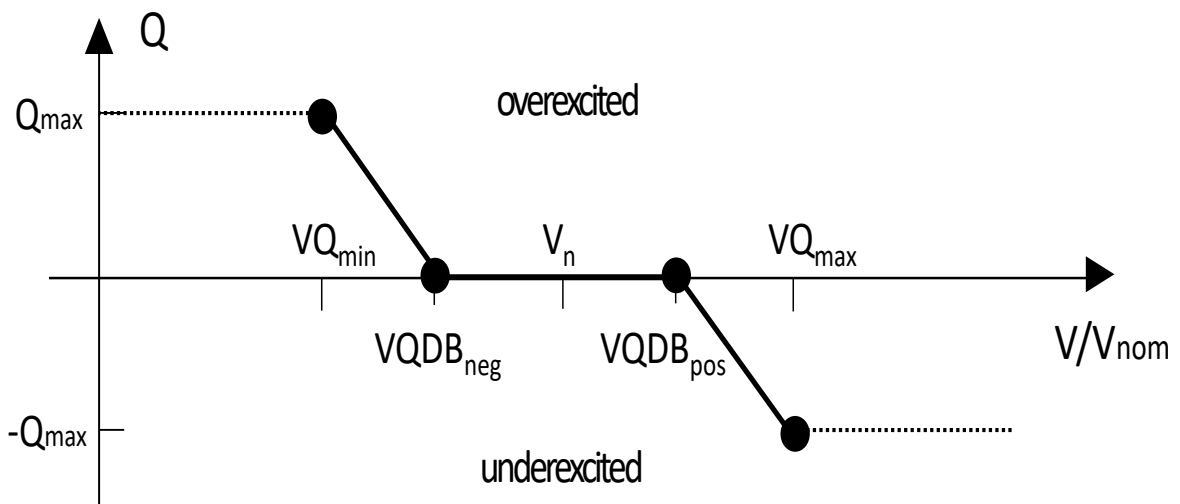
Εφόσον η αναβάθμιση του δικτύου απαιτεί υψηλό κόστος, η αξιοποίηση της ευελιξίας των ηλεκτρονικών ισχύος, μέσω των οποίων συνδέεται συνήθως η ΔΠ, αποτελεί την πρώτη επιλογή [63][64][65][66]. Τα πρότυπα που έχουν δημοσιευθεί τα τελευταία χρόνια απαιτούν από τις μονάδες ΔΠ να παρέχουν τη δυνατότητα συνεισφοράς στη ρύθμιση τάσης (ακόμα και οι μονάδες που συνδέονται στη ΧΤ). Διάφορες μέθοδοι τοπικού ελέγχου έχουν προταθεί, που υλοποιούνται στον αλγόριθμο ελέγχου του αντιστροφέα των μονάδων ΔΠ. Με την υλοποίηση χαρακτηριστικής καμπύλης $\cos\phi(P)$, η ΔΠ απορροφά άεργο ισχύ όσο μεγαλύτερη είναι η ενεργός ισχύς, εφόσον τότε είναι πιθανότερη η ύπαρξη προβλήματος ανύψωσης τάσης (Σχήμα 3.5). Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η αυξημένη ροή αέργου ισχύος και σε περιπτώσεις που δεν παρουσιάζεται ανύψωση τάσης, αυξάνοντας τις ωμικές απώλειες στο δίκτυο. Με την υλοποίηση χαρακτηριστικής καμπύλης $Q(V)$ (αναφέρεται και ως $Q(U)$ στη βιβλιογραφία), η άεργος ισχύς της ΔΠ εξαρτάται άμεσα από την τάση που μετρίεται στους ακροδέκτες της (Σχήμα 3.6). Από την άλλη, έχει αναφερθεί αστάθεια του $Q(V)$ ελέγχου υπό ορισμένες συνθήκες (το πρόβλημα είναι εντονότερο όταν απαιτείται επικοινωνία, όπως σε φωτοβολταϊκά πάρκα με πολλούς αντιστροφείς και κεντρικό ελεγκτή ή σε εφαρμογές συντονισμένου ελέγχου τάσης [A.7]). Επιπλέον, σε ορισμένες περιπτώσεις στα δίκτυα ΧΤ η άεργος ισχύς μπορεί να μην επαρκεί για τη διατήρηση της τάσης στα επιθυμητά επίπεδα, εξαιτίας της υψηλής ωμικής αντίστασης, οπότε ήδη κάποιοι κατασκευαστές αντιστροφέων παρέχουν τη δυνατότητα λειτουργίας με $P(V)$ χαρακτηριστική (Σχήμα 3.7). Εφόσον περικόπτεται ενεργός ισχύς πρέπει να ληφθούν υπόψη οικονομικές και περιβαλλοντικές παράμετροι. Οι μέθοδοι αυτές εξηγούνται περαιτέρω στην παράγραφο 3.4.1.

Στις ανωτέρω τοπικές μεθόδους ελέγχου οι μονάδες ΔΠ λαμβάνουν μετρήσεις και ελέγχουν την τάση τοπικά χωρίς επικοινωνία και συντονισμό με άλλες συσκευές. Εξαιτίας της αυξανόμενης πολυπλοκότητας των σύγχρονων δικτύων διανομής είναι πιθανό μελλοντικά οι τοπικές λύσεις να μην επαρκούν. Με βάση τα πρόσφατα πρότυπα οι μονάδες ΔΠ πρέπει επίσης να μπορούν να λαμβάνουν εξ' αποστάσεως (π.χ. από τον διαχειριστή του δικτύου) και να υλοποιούν εντολή αέργου ισχύος και ενεργού ισχύος (δευτερεύων έλεγχος). Έτσι, δίνεται η δυνατότητα για την εφαρμογή μεθόδων συντονισμένου ελέγχου των συσκευών ρύθμισης τάσης: μονάδων ΔΠ και αποθήκευσης, αλλά και συμβατικού εξοπλισμού (ΣΑΤΥΦ, πυκνωτές κ.α.) [69]-[72]. Εκτός από την ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων της τάσης των ζυγών, μπορούν να τεθούν και άλλοι στόχοι, όπως η ελαχιστοποίηση των

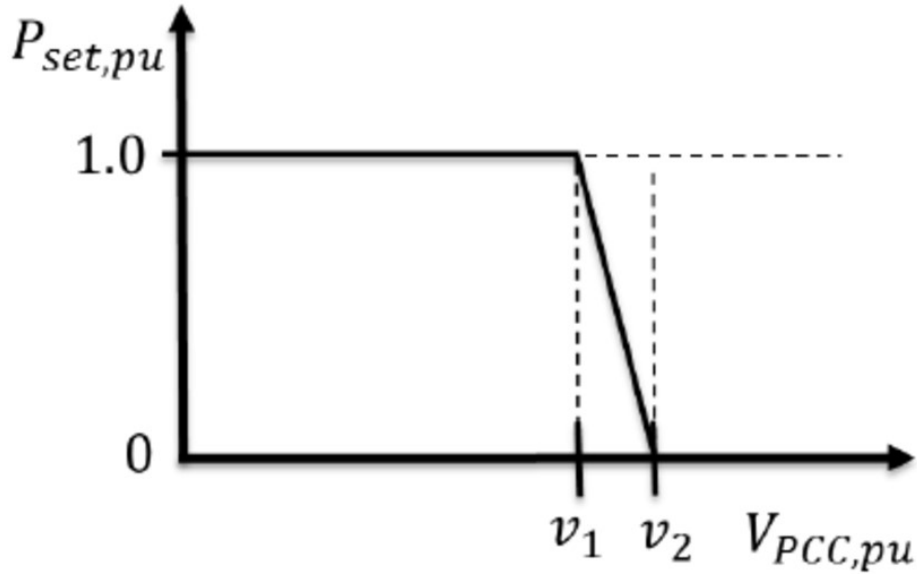
απωλειών, του αριθμού αλλαγών λήψης του ΣΑΤΥΦ κ.α. Στο πλαίσιο της ανάπτυξης των ευφυών δικτύων, η αξιοποίηση τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών, η ενσωμάτωση έξυπνων μετρητών και ελεγκτών επιτρέπουν την αποτελεσματική εποπτεία και έλεγχο των δικτύων διανομής επιτρέποντας αυξημένη διείσδυση ΔΠ, καλή ποιότητα ισχύος, αξιοπιστία και άλλα οφέλη.



Σχήμα 3.5. Cosφ(P) χαρακτηριστική με βάση τα πρόσφατα πρότυπα [67]



Σχήμα 3.6. Τυπική $Q(V)$ χαρακτηριστική: σημειώνονται τα σύμβολα VQ_{min} , $VQDB_{neg}$, V_n , $VQDB_{pos}$, VQ_{max}



Σχήμα 3.7. Ενδεικτική $P(V)$ χαρακτηριστική [68]

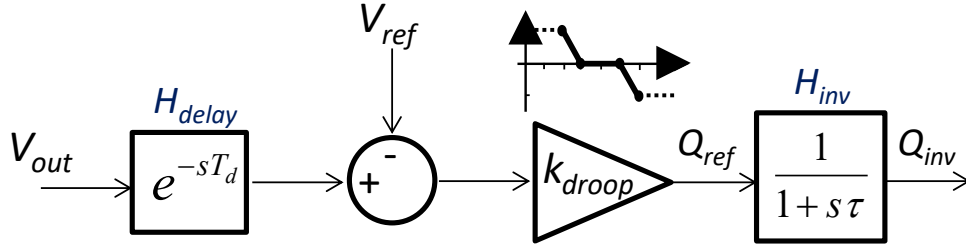
Ο συντονισμένος έλεγχος τάσης μπορεί να είναι κεντρικός ή αποκεντρωμένος. Στον κεντρικό έλεγχο, ένας κεντρικός ελεγκτής λαμβάνει μετρήσεις από διάφορους ζυγούς, εκτελεί κατάλληλο αλγόριθμο (π.χ. βελτιστοποίησης) και στέλνει εντολές στις συσκευές ρύθμισης τάσης (π.χ. απορρόφηση αέργου ισχύος στις μονάδες ΔΠ, αλλαγή λήψη στο ΣΑΤΥΦ) μέσω τηλεπικοινωνιακού δικτύου [71][72]. Στον αποκεντρωμένο έλεγχο, διάφοροι ελεγκτές τοποθετημένοι σε διαφορετικά σημεία του δικτύου επικοινωνούν μεταξύ τους και λαμβάνουν συντονισμένα αποφάσεις χωρίς την παρουσία κεντρικού ελεγκτή [73].

3.2.2) Ευστάθεια του $Q(V)$ ελεγκτή τάσης μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής

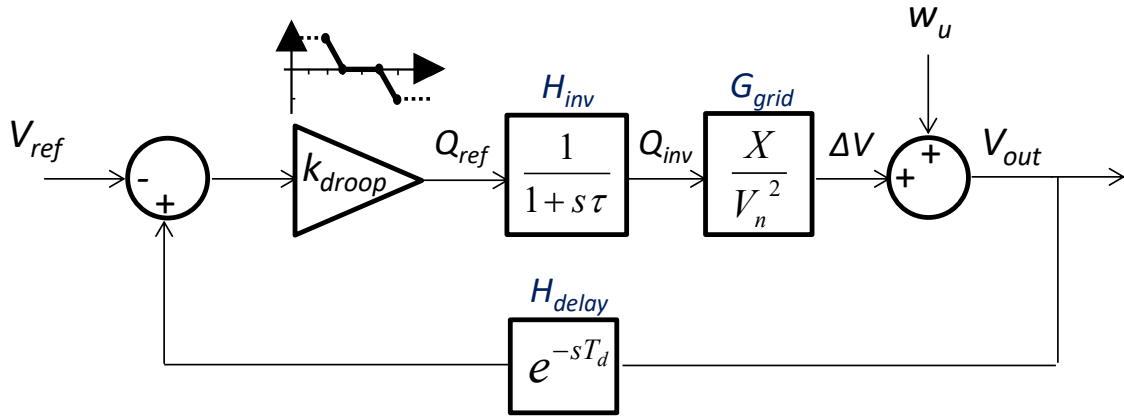
Ο $Q(V)$ ελεγκτής δέχεται ως είσοδο τη μέτρηση της τάσης ακροδεκτών της μονάδας ΔΠ και υπολογίζει την επιθυμητή άεργο ισχύ με βάση τη χαρακτηριστική καμπύλη. Εφόσον η άεργος ισχύς - έξοδος του ελεγκτή - επηρεάζει την τάση ακροδεκτών της μονάδας ΔΠ - είσοδος του ελεγκτή - υπάρχει η πιθανότητα εμφάνισης αστάθειας [65][74][75].

Ο $Q(V)$ ελεγκτής αντιστροφέα ΔΠ που συνδέεται σε συγκεκριμένο ζυγό του δικτύου μπορεί να μοντελοποιηθεί θεωρητικά με το διάγραμμα βαθμίδων που φαίνεται στο Σχήμα 3.8. Θεωρείται λειτουργία στο τμήμα γραμμικής μεταβολής της $Q(V)$ χαρακτηριστικής, εφόσον στις περιοχές μέγιστης αέργου ισχύος και νεκρής ζώνης δεν υπάρχει πιθανότητα αστάθειας. Εκτός από τη χαρακτηριστική καμπύλη, μοντελοποιείται η δυναμική συμπεριφορά του αντιστροφέα (H_{inv} για την άεργο ισχύ), καθώς και η χρονική καθυστέρηση μέτρησης της τάσης (H_{delay}), εφόσον επηρεάζουν τη συμπεριφορά του συστήματος (όπου $V_{ref}=VQDB_{pos}$). Ειδικότερα, η χρονική καθυστέρηση μπορεί να είναι κρίσιμη για την ευστάθεια του ελέγχου. Χρονική καθυστέρηση εισάγεται από τον υπολογισμό της RMS τιμής της τάσης (τουλάχιστον 10 ms), από φίλτρα εξομάλυνσης της τάσης (π.χ. κινούμενος μέσος όρος) και από επικοινωνίες (π.χ. μεταξύ διαφορετικών επεξεργαστών του αντιστροφέα ή με εξωτερικό ελεγκτή). Με βάση τη σχέση (3.7) υπολογίζεται η επίδραση της αέργου ισχύος

στην τάση εξόδου του αντιστροφέα. Το διάγραμμα βαθμίδων του Q(V) ελεγκτή και της επίδρασης του στην τάση εξόδου του αντιστροφέα παριστάνεται στο Σχήμα 3.9. Η μεταβλητή w_u εκφράζει μεταβολές στην τάση εξόδου (π.χ. από απότομες αλλαγές του φορτίου και της ηλιοφάνειας, από τη λειτουργία ΣΑΤΥΦ κ.α.) [Α.7].



Σχήμα 3.8. Απλοποιημένο διάγραμμα βαθμίδων ανοικτού βρόχου του Q(V) ελεγκτή αντιστροφέα



Σχήμα 3.9. Απλοποιημένο διάγραμμα βαθμίδων κλειστού βρόχου του Q(V) ελεγκτή και του δικτύου

Όταν ο αντιστροφέας λειτουργεί στο τμήμα γραμμικής μεταβολής της Q(V) χαρακτηριστικής, η κλίση της ευθείας ισούται με:

$$k_{droop} = -\frac{Q_{max}}{\Delta V_{droop}} = -\frac{P_n \cdot \tan(\phi_{max})}{\Delta V_{droop}} \quad (3.16)$$

Όπου P_n η ονομαστική ισχύς του αντιστροφέα, ϕ_{max} η μέγιστη γωνία μεταξύ τάσης και ρεύματος και ΔV_{droop} το πλάτος της περιοχής γραμμικής μεταβολής (ανά μονάδα).

$$\Delta V_{droop} = VQ_{max} - VQDB_{pos} \quad (3.17)$$

Αγνοώντας τη δυναμική συμπεριφορά του αντιστροφέα ($H_{inv}=1$) και τη χρονική καθυστέρηση της μέτρησης ($H_{delay}=1$) υπολογίζεται το κέρδος ανοικτού βρόχου.

$$K_{ol} = \frac{k_{droop} \cdot X}{V_n^2} = -\frac{P_n \cdot \tan(\phi_{max}) \cdot X}{\Delta V_{droop} \cdot V_n^2} \quad (3.18)$$

Όπου X η επαγωγική αντίδραση του δικτύου στο σημείο σύνδεσης και V_n η ονομαστική τάση (σε V). Η δυναμική συμπεριφορά του αντιστροφέα για την άεργο ισχύ με σταθερά

χρόνου τ μοντελοποιείται ως:

$$H_{inv} = \frac{1}{1 + s\tau} \quad (3.19)$$

Η συνάρτηση μεταφοράς της χρονικής καθυστέρησης της μέτρησης (T_d) δίνεται από προσέγγιση Padé δεύτερης τάξης:

$$H_{delay} = \frac{12 - 6sT_d + s^2T_d^2}{12 + 6sT_d + s^2T_d^2} \quad (3.20)$$

Σύμφωνα με το διάγραμμα βαθμίδων του Σχήματος 3.9, η τάση εξόδου του αντιστροφέα προκύπτει από τη διαταραχή w_u και την τάση αναφοράς V_{ref} ως:

$$V_{out} = \frac{1}{1 - K_{ol} \cdot H_{inv} \cdot H_{delay}} w_u - \frac{K_{ol} \cdot H_{inv}}{1 - K_{ol} \cdot H_{inv} \cdot H_{delay}} V_{ref} \quad (3.21)$$

Εφόσον η τάση αναφοράς V_{ref} δεν μεταβάλλεται, εξετάζεται η συνάρτηση μεταφοράς από το w_u στο V_{out} [Α.7].

$$G_{w_u V_{out}} = \frac{1}{1 - K_{ol} \cdot H_{inv} \cdot H_{delay}} = \frac{1}{1 - K_{ol} \cdot \frac{1}{1 + s\tau} \cdot \frac{12 - 6sT_d + s^2T_d^2}{12 + 6sT_d + s^2T_d^2}} \quad (3.22)$$

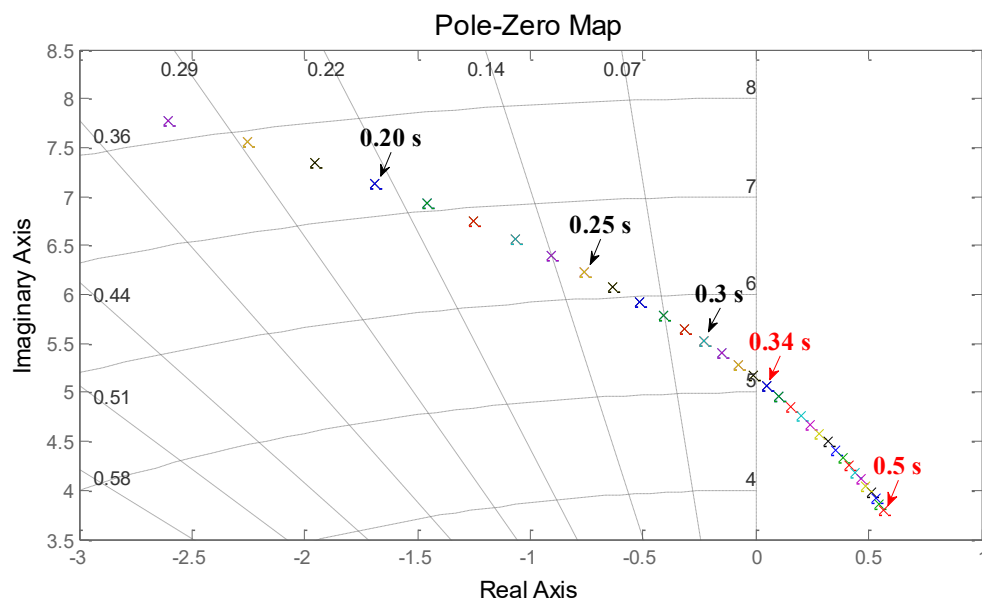
Η συνάρτηση μεταφοράς είναι τρίτης τάξης με τρεις πόλους στο μιγαδικό επίπεδο που καθορίζουν την ευστάθεια του συστήματος. Οι κύριες παράμετροι που επηρεάζουν την ευστάθεια είναι το κέρδος ανοικτού βρόχου (K_{ol}), η σταθερά χρόνου του ελεγκτή αέργου ισχύος (τ) και η χρονική καθυστέρηση (T_d) της ανατροφοδότησης. Μεγάλη επαγωγική αντίδραση του δικτύου, υψηλή ονομαστική ισχύς, μεγάλη ικανότητα αέργου ισχύος και απότομη χαρακτηριστική της ΔΠ αυξάνουν το κέρδος ανοικτού βρόχου και περιορίζουν την ευστάθεια. Ομοίως, μεγάλη χρονική καθυστέρηση της μέτρησης και γρήγορη απόκριση του ελεγκτή (μικρή σταθερά χρόνου) συνεισφέρουν σε αστάθεια.

Η ανάλυση εφαρμόζεται στο δίκτυο της εφαρμογής της παραγράφου 2.7 που θα εξεταστεί στο Κεφάλαιο 5. Η μεγάλη επαγωγική αντίδραση του δικτύου, η μεγάλη ονομαστική ισχύς και ικανότητα αέργου ισχύος της ΔΠ, καθώς και η απότομη χαρακτηριστική (που επιλέγονται ώστε ο ελεγκτής να έχει αρκετή επίδραση στην τάση) οδηγεί σε μεγάλο κέρδος ανοικτού βρόχου σύμφωνα με τη σχέση (3.18).

$$K_{ol} = -\frac{15 \cdot 10^6 \cdot \tan(31.79) \cdot 8.026}{0.01 \cdot (30 \cdot 10^3)^2} = -8.294$$

Η σταθερά χρόνου του ελεγκτή αέργου ισχύος (τ) τίθεται ίση με 1.6 s και πιθανές καθυστερήσεις στον βρόχο ανάδρασης είναι άγνωστες. Στην ανάλυση ευστάθειας η χρονική καθυστέρηση λαμβάνει τιμές από 0 s μέχρι 0.5 s. Το Σχήμα 3.10 δείχνει την εξέλιξη του πιο κρίσιμου πόλου ως συνάρτηση της χρονικής καθυστέρησης. Όταν αυξάνεται η χρονική καθυστέρηση ο πιο κρίσιμος πόλος μετατοπίζεται προς τα δεξιά. Η ανάλυση δείχνει πως χρονική καθυστέρηση μεγαλύτερη από 0.34 s οδηγεί σε αστάθεια. Το ζήτημα της ευστάθειας του Q(V) ελέγχου αναλύεται με αμιγώς ψηφιακές προσομοιώσεις και PHIL

δοκιμές στο Κεφάλαιο 5.



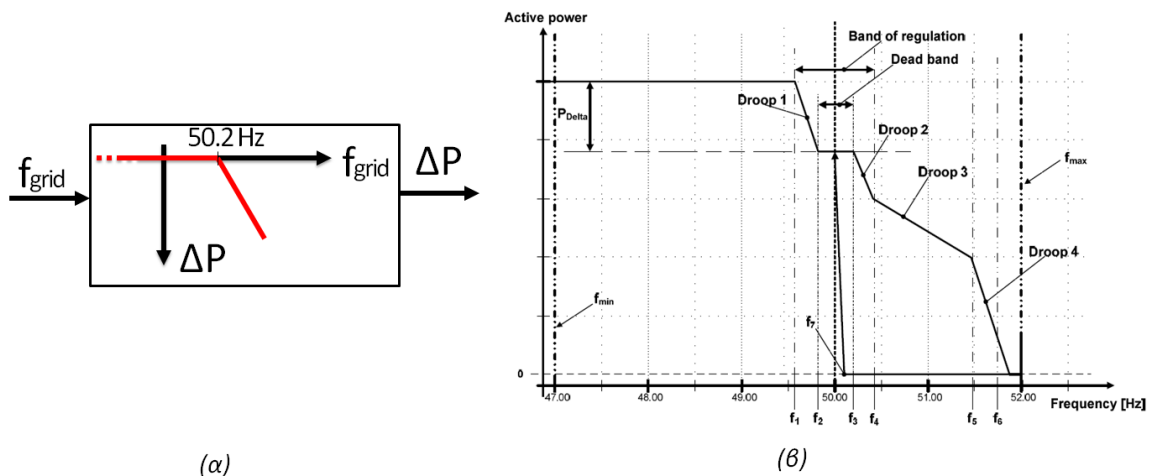
Σχήμα 3.10. Γεωμετρικός τόπος ριζών, όπου μεταβάλλεται η χρονική καθυστέρηση της ανάδρασης (T_d)

3.3) Συμβολή της Διεσπαρμένης Παραγωγής και αποθήκευσης στη ρύθμιση συχνότητας

Η εξισορρόπηση παραγόμενης ισχύος και φορτίου και η διατήρηση της επιθυμητής συχνότητας σε ένα ΣΗΕ γίνεται με τους ρυθμιστές στροφών των σύγχρονων γεννητριών, οι οποίοι ελέγχουν τη μηχανική ισχύ που παράγεται από τις κινητήριες μηχανές [76]. Η αύξηση του φορτίου μίας στρεφόμενης γεννήτριας τροφοδοτείται αρχικά από την κινητική ενέργεια της γεννήτριας (και της κινητήριας μηχανής) που οδηγεί σε επιβράδυνση και μείωση της συχνότητας (αντίστοιχα σε μείωση του φορτίου αυξάνεται η συχνότητα). Αν αυτή η μεταβολή γινόταν ανεξέλεγκτα θα προκαλούσε μεγάλη μείωση της ταχύτητας περιστροφής και της συχνότητας. Κατά τη πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας ο ρυθμιστής στροφών αντιλαμβάνεται τη μείωση της ταχύτητας περιστροφής και αυξάνει τη μηχανική ροπή-ισχύ π.χ. δίνοντας περισσότερο ατμό στον στρόβιλο. Ο ρυθμιστής στροφών υλοποιεί μια χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας (στατισμού) $\omega(P)$. Αν δύο γεννήτριες τροφοδοτούν κοινό φορτίο ο διαμοιρασμός της ισχύος και η συχνότητα λειτουργίας στη μόνιμη κατάσταση καθορίζονται από τις χαρακτηριστικές των ρυθμιστών στροφών (η συχνότητα πρέπει να είναι κοινή και το άθροισμα της παραγωγής των γεννητριών να ισούται με το φορτίο). Μετά τη πρωτεύουσα ρύθμιση παραμένει ένα μόνιμο σφάλμα στη συχνότητα. Η δευτερεύουσα ρύθμιση επαναφέρει τη συχνότητα στην ονομαστική τιμή και ανακατανέμει το φορτίο μετακινώντας παράλληλα τις χαρακτηριστικές φορτίου-συχνότητας.

3.3.1) Καμπύλη στατισμού P(f)

Η μεγάλη διείσδυση ΔΠ στα σύγχρονα ΣΗΕ και ειδικά στα απομονωμένα συστήματα, δημιουργεί νέα δεδομένα για τη ρύθμιση συχνότητας. Στην πιο απλή περίπτωση, οι σύγχρονες γεννήτριες «αντιλαμβάνονται» τη ΔΠ ως αρνητικό φορτίο, οπότε η αύξηση της παραγωγής από ΔΠ οδηγεί σε αύξηση της συχνότητας του συστήματος. Όσο αυξάνεται η διείσδυση ΔΠ είναι απαραίτητη η συνεισφορά της στη ρύθμιση συχνότητας, λαμβάνοντας υπόψη και τις διακυμάνσεις της παραγωγής από ΑΠΕ (π.χ. σε περιόδους υψηλής παραγωγής από ΔΠ, λιγότερες συμβατικές μονάδες θα είναι συνδεδεμένες ώστε να συνεισφέρουν στη ρύθμιση συχνότητας). Με βάση τα πρόσφατα πρότυπα [B.12] οι μονάδες ΔΠ (ακόμα και οι μικρές μονάδες που συνδέονται στη ΧΤ) πρέπει να περικλύπτουν σταδιακά την παρεχόμενη ενεργό ισχύ όταν η συχνότητα υπερβαίνει ένα όριο ακολουθώντας χαρακτηριστική συχνότητας-ενεργού ισχύος (Σχήμα 3.11α). Η απαίτηση αυτή προέκυψε ως απάντηση στα προηγούμενα πρότυπα με βάση τα οποία η ΔΠ έπρεπε να αποσυνδέεται σε συχνότητες μεγαλύτερες των 50.2 Hz, το οποίο θα μπορούσε να οδηγήσει σε ταυτόχρονη αποσύνδεση αρκετών GW ΔΠ από το σύστημα [77] (γνωστό ως «πρόβλημα των 50.2 Hz» στη Γερμανία). Σε πιο απαιτητικές περιπτώσεις οι μονάδες ΔΠ πρέπει να διατηρούν εφεδρεία ώστε να παρέχουν επιπλέον ενεργό ισχύ σε βυθίσεις της συχνότητας. Για παράδειγμα ο κώδικας δικτύου της Δανίας [78] απαιτεί από τα αιολικά πάρκα με ονομαστική ισχύ μεγαλύτερη των 25 MW την υλοποίηση χαρακτηριστικής που φαίνεται στο Σχήμα 3.11β.



Σχήμα 3.11. Καμπύλη στατισμού ΔΠ για υπερσυχνότητα [79] (α) και για υποσυχνότητα-υπερσυχνότητα [78] (β)

3.3.2) Εικονική αδράνεια

Ο περιορισμός της αδράνειας του συστήματος εξαιτίας της αυξημένης διείσδυσης ΔΠ μπορεί να αποτελέσει πρόκληση. Στα συμβατικά συγκεντρωτικά ΣΗΕ η αδράνεια των σύγχρονων γεννητριών συμβάλλει στην ευστάθεια του συστήματος. Οι συσκευές ηλεκτρονικών ισχύος, μέσω των οποίων συνδέονται συνήθως οι μονάδες ΔΠ, αποσυνδέουν τα μηχανικά μέρη από το σύστημα, οπότε η φυσική αδράνεια των μονάδων (π.χ. ανεμογεννητριών) δεν συνεισφέρει στο σύστημα. Έτσι, κατά τη μετάβαση σε πιο

αποκεντρωμένα συστήματα με μεγαλύτερη διείσδυση ΔΠ (και σταδιακή αντικατάσταση συμβατικών μονάδων) η αδράνεια θα μειώνεται. Η συχνότητα ενός συστήματος που διαθέτει μικρή αδράνεια μεταβάλλεται σημαντικά σε μεταβολές του φορτίου ή της παραγωγής, οπότε σε αυτή την περίπτωση επιπλέον λειτουργίες επικουρικών υπηρεσιών πρέπει να ενσωματωθούν στις μονάδες ΔΠ. Η αξιοποίηση της ευελιξίας των μοντέρνων ηλεκτρονικών ισχύος επιτρέπει την παροχή εικονικής αδράνειας (virtual or synthetic inertia) από μονάδες ΔΠ και αποτελεί μία υποσχόμενη μέθοδο [80].

Σε αυτό το πλαίσιο έχουν προταθεί αρκετές μέθοδοι ώστε οι συσκευές ηλεκτρονικών ισχύος να «μιμούνται» τη λειτουργία των σύγχρονων μηχανών. Η «εικονική σύγχρονη μηχανή» (VirtUal SynchroNous MAchine - VISMA) προσομοιώνει μία σύγχρονη γεννήτρια σε πραγματικό χρόνο [81]. Οι τάσεις στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο μετριοούνται και υπολογίζονται τα ρεύματα που θα παρήγαγε μία σύγχρονη γεννήτρια υπό τις ίδιες συνθήκες. Μία παρόμοια μέθοδος προσομοίωσης σύγχρονης γεννήτριας ονομάζεται “SynchroNverter” κατά την οποία μοντελοποιούνται επίσης οι κλασσικές καμπύλες στατισμού [82]. Τέλος, η «εικονική σύγχρονη γεννήτρια» (Virtual SynchroNous Generator - VSG) μοντελοποιεί την φυσική αδράνεια μίας σύγχρονης μηχανής χωρίς να λαμβάνει υπόψη τις υπόλοιπες ιδιότητες της [83][84][B.16]. Η τελευταία μέθοδος είναι απλούστερη στην υλοποίηση και δεν λαμβάνει υπόψη την (συχνά ανεπιθύμητη) πολυπλοκότητα των σύγχρονων μηχανών. Από την άλλη, είναι εστιασμένη στην παροχή εικονικής αδράνειας, οπότε παρουσιάζει περιορισμένες δυνατότητες σε σχέση με τις άλλες μεθόδους (π.χ. αδυναμία απομονωμένης λειτουργίας) και έχει διαφορετική δυναμική συμπεριφορά από μία σύγχρονη γεννήτρια.

Στη DC πλευρά της διάταξης μπορεί να είναι συνδεδεμένη μονάδα ΔΠ ή αποθήκευσης. Η παροχή εικονικής αδράνειας έχει εφαρμοστεί σε αντιστροφείς εμπορικών ανεμογεννητριών [84], σε πειραματική διάταξη για τη σύνδεση συσσωρευτών [31] και έχει μελετηθεί για τη σύνδεση φωτοβολταϊκών [85].

Η μέθοδος της «εικονικής σύγχρονης γεννήτριας» (VSG) αναλύεται στη συνέχεια. Η μηχανική ροπή (T_m), η ηλεκτρομαγνητική ροπή (T_e), η ροπή αδράνειας του δρομέα και της κινητήριας μηχανής (J) και η ταχύτητα περιστροφής (ω) συνδέονται με τη γνωστή σχέση:

$$T_m - T_e = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3.23)$$

Ορίζεται η ανηγμένη σταθερά αδράνειας της γεννήτριας H ως [76]:

$$H = \frac{J \cdot \omega_s^2}{2 \cdot P_n} \quad (3.24)$$

Όπου P_n είναι η ονομαστική ισχύς της γεννήτριας και ω_s η σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής. Εισάγοντας τη σχέση (3.24) στη σχέση (3.23) προκύπτει:

$$T_{m_pu} - T_{e_pu} = 2 \cdot H \frac{d\omega_{pu}}{dt} \quad (3.25)$$

Η κινητική ενέργεια του δρομέα και της κινητήριας μηχανής ισούται με:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad (3.26)$$

Η διαφορά μεταξύ της μηχανικής και της ηλεκτρικής ισχύος ισούται με την παράγωγο της κινητικής ενέργειας:

$$P_m - P_e = \frac{dE_k}{dt} = J \cdot \omega \frac{d\omega}{dt} \quad (3.27)$$

Η διαφορά αυτή τίθεται ίση με την ισχύ που μπορεί να ανταλλάσσει η μονάδα που παρέχει εικονική αδράνεια [31]:

$$P_{virtual_inertia} = J \cdot \omega \frac{d\omega}{dt} \quad (3.28)$$

Θεωρώντας μικρή μεταβολή στη ταχύτητα περιστροφής, το γινόμενο $J \cdot \omega$ μπορεί να αντικατασταθεί με την παράμετρο k_i . Η ισχύς εικονικής αδράνειας ισούται με [31]:

$$P_{virtual_inertia} = k_i \frac{d\omega}{dt} \quad (3.29)$$

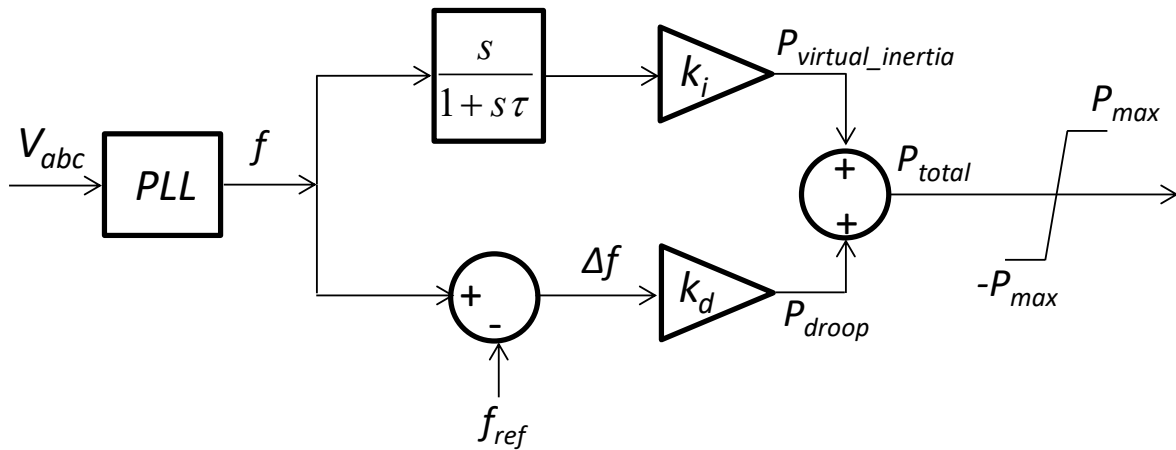
Η παράμετρος k_i επιλέγεται συνήθως ώστε να ανταλλάσσεται η ονομαστικής ισχύς σε συγκεκριμένο ρυθμό μεταβολής $d\omega/dt$ (π.χ. αν πρόκειται για μονάδα αποθήκευσης). Σε αρκετές μελέτες (π.χ. [31]) επιλέγεται τιμή που αντιστοιχεί σε 1 Hz/s ως ο μέγιστος αναμενόμενος ρυθμός μεταβολής της συχνότητας (εξήντα φορές μεγαλύτερος από τον ρυθμό μεταβολής που παρατηρήθηκε σε κανονική λειτουργία 1 Hz/min σε μετρήσεις που έγιναν στο [86]).

Η υλοποίηση του αλγορίθμου φαίνεται στο Σχήμα 3.12, θεωρώντας πως συνδέεται μονάδα αποθήκευσης στη DC πλευρά της διάταξης. Γίνεται μέτρηση της συχνότητας του δικτύου (μέσω ενός Phase-Locked Loop - PLL), εφαρμόζεται βαθυπερατό φίλτρο πρώτης τάξης (για την εξομάλυνση του σήματος), υπολογίζεται η παράγωγος της συχνότητας και γίνεται πολλαπλασιασμός με το κέρδος k_i . Παράλληλα με την παροχή εικονικής αδράνειας εφαρμόζεται χαρακτηριστική συχνότητας - ενεργού ισχύος $P(f)$, ακολουθώντας την παρακάτω σχέση:

$$P_{droop} = k_d \cdot \Delta\omega = k_d \cdot (\omega - \omega_{ref}) \quad (3.30)$$

Όταν παρουσιάζεται μείωση στη συχνότητα του συστήματος η μονάδα αποθήκευσης παρέχει ενεργό ισχύ, ενώ όταν η συχνότητα αυξάνεται η μονάδα αποθήκευσης απορροφά ενεργό ισχύ.

Η ισχύς αναφοράς του αντιστροφέα μπορεί να προκύψει από το άθροισμα της ισχύος που προκύπτει από τον κλάδο της εικονικής αδράνειας και τον κλάδο της $P(f)$ χαρακτηριστικής. Επιπλέον περιορισμοί από το σύστημα διαχείρισης της μονάδας αποθήκευσης (π.χ. η στάθμη φόρτισης αν πρόκειται για συσσωρευτές) λαμβάνονται υπόψη στον έλεγχο. Σημειώνεται πως η μετάβαση από την ισχύ αναφοράς του αντιστροφέα στα ρεύματα που εγχέονται στο δίκτυο μπορεί να υλοποιηθεί με αρκετούς τρόπους και δεν σημειώνεται στο Σχήμα 3.12.



Σχήμα 3.12. Διάγραμμα βαθμίδων του ελεγκτή παροχής εικονικής αδράνειας και της χαρακτηριστικής συχνότητας - ενεργού ισχύος

Με βάση τη σχέση (3.29), όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας τόσο περισσότερη ισχύς ανταλλάσσεται με το δίκτυο (γραμμικός έλεγχος). Στο [A.5] έγινε σύγκριση της παραπάνω γραμμικής μεθόδου με μέθοδο που ανταλλάσσει απευθείας τη μέγιστη ισχύ όταν ξεπεραστεί ένα κατώφλι του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας. Η μελέτη έδειξε πως η αργή μέτρηση της συχνότητας περιορίζει την επίδοση και των δύο αλγορίθμων και πως η δεύτερη μέθοδος δεν λειτουργεί ικανοποιητικά για τιμές του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία.

3.4) Ανασκόπηση διεθνών προτύπων/οδηγιών, συγκριτική ανάλυση και αναγνώριση ελλείψεων

Από το 2008, διάφορες χώρες (π.χ. η Γαλλία, η Γερμανία, η Αυστρία, το Βέλγιο, η Ιταλία) άρχισαν να αναθεωρούν τον κώδικα δικτύου τους, ώστε να συμπεριλάβουν και νέες τεχνικές απαιτήσεις για την παροχή επικουρικών υπηρεσιών. Έτσι, έχουν οριστεί απαιτήσεις κυρίως ακολουθώντας το παράδειγμα για μονάδες παραγωγής συνδεδεμένες στη MT στη Γερμανία.

Πλήθος διεθνών και εθνικών προτύπων, οδηγιών και κανονισμών έχουν δημοσιευτεί τα τελευταία χρόνια. Διαφορετικά είδη οργανισμών (π.χ. CENELEC, VDE, ENTSO-E) έχουν ορίσει κανόνες σύνδεσης στο δίκτυο YT, MT και XT συμπεριλαμβάνοντας απαιτήσεις που αφορούν επικουρικές υπηρεσίες. Η Γερμανική οδηγία MT BDEW [79] δημοσιεύτηκε το 2008 και ακολουθήθηκε από το FGW-Part 3 [87] που εστιάζει σε διαδικασίες δοκιμών. Οι οδηγίες XT VDE-AR-N 4105 [67] και CEI 0-21 [88] για τη Γερμανία και Ιταλία αντίστοιχα δημοσιεύτηκαν το 2011. Εναρμόνιση των προδιαγραφών που τίθενται από τους διαχειριστές δικτύων μεταφοράς Ευρωπαϊκών χωρών επιχειρείται στο ENTSO-E-RfG [89], το οποίο αναφέρεται σε μονάδες παραγωγής από 400 W μέχρι εκατοντάδες MW (επισκόπηση κωδικών δικτύου που αφορούν αιολικά πάρκα [90][91][92] και φωτοβολταϊκά συστήματα [93][94] μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία). Επιπλέον, η CENELEC δημοσίευσε το EN 50438 για μικρές μονάδες (≤ 16 A ανά φάση, XT) [95], το CLC/TS

50549-1 για τη XT [96] και το CLC/TS 50549-2 [97] για τη MT. Τα CLC/TS 50549-1/2 παρέχουν τεχνικές συστάσεις χωρίς να είναι υποχρεωτικά [98]. Πρόσφατα και άλλες χώρες αναθεώρησαν τον κώδικα δικτύου τους, όπως η Αυστρία (TOR D4 [99]). Παρόμοιες δραστηριότητες λαμβάνουν χώρα στις ΗΠΑ που στοχεύουν στην αναθεώρηση του IEEE 1547 [100].

Εξαιτίας του μεγάλου όγκου πληροφορίας η συγκριτική ανάλυση των προτύπων/οδηγιών δεν είναι εύκολη. Σε αρκετά σημεία παρουσιάζονται μη-εναρμονισμένες προσεγγίσεις καθώς και αντιφάσεις. Επίσης, κάποιες χρήσιμες λειτουργίες δεν έχουν ακόμα συμπεριληφθεί επαρκώς (όπως μέχρι πρόσφατα ο περιορισμός ενεργού ισχύος σε περιπτώσεις ανύψωσης τάσης σε δίκτυα XT και η παροχή εικονικής αδράνειας). Η απουσία εναρμόνισης προκαλεί δυσκολίες στους κατασκευαστές εξοπλισμού για την παραγωγή προϊόντων που απευθύνονται σε ευρεία αγορά. Επίσης, εξαιτίας της πολυπλοκότητας των απαιτήσεων δεν είναι εύκολο να εντοπιστεί το πιο αυστηρό πρότυπο και με βάση αυτό να παραχθούν προϊόντα.

Σε αυτό το πλαίσιο, στις παρακάτω παραγράφους γίνεται ανασκόπηση των βασικών απαιτήσεων και των διαδικασιών δοκιμών (παράγραφος 3.5) για την παροχή επικουρικών υπηρεσιών από μονάδες ΔΠ, αναγνωρίζονται ελλείψεις και προτείνονται νέες διαδικασίες δοκιμών. Αναλύθηκαν τα παρακάτω πρότυπα/οδηγίες:

- BDEW: *Generating Plants Connected to the Medium-Voltage Network. Guideline for generating plants' connection to and parallel operation with the medium-voltage network*, (Γερμανία, Ιούνιος 2008)
- FGW: *Technical Guidelines for Power Generating Units and systems. Part 3: Determination of electrical characteristics of power generating units and systems connected to MV, HV and EHV grid*, (Γερμανία Ιούλιος 2011)
- VDE-AR-N 4105: *Power generation systems connected to the low-voltage distribution network. Technical minimum requirements for the connection to and parallel operation with low-voltage distribution networks*, (Γερμανία, Αύγουστος 2011)
- CEI 0-21: *Reference technical rules for the connection of active and passive users to the LV electrical utilities*, (Ιταλία, Δεκέμβριος 2011)
- EN 50438: *Requirements for the connection of micro-generators in parallel with public low-voltage distribution networks*, (υπό επεξεργασία, Αύγουστος 2012)
- E-control, TOR D4: *Technische und organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen, Teil D: Besondere technische Regeln, Hauptabschnitt D4: Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen mit Verteilernetzen*”, V2.2, (Αυστρία, Φεβρουάριος 2016)

Επιπλέον, παρατίθενται πληροφορίες για τα CLC/TS 50549-1, CLC/TS 50549-2, IEEE 1547, ERDF NOI-RES [101], ENTSO-E RfG, DIN VDE V 0124-100 [102].

3.4.1) Ρύθμιση τάσης σε μόνιμη κατάσταση

3.4.1.1) Απαιτήσεις αέργου ισχύος και διαγράμματα ενεργού-αέργου ισχύος

Με βάση τα πρότυπα/οδηγίες, οι μονάδες ΔΠ πρέπει να μπορούν να συνεισφέρουν στη ρύθμιση τάσης στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Στα δίκτυα διανομής εφαρμόζονταν η απαίτηση αυτή μόνο στη ΜΤ, αλλά πρόσφατα τίθεται και στη ΧΤ. Οι πιο σημαντικές απαιτήσεις με βάση τα πρόσφατα πρότυπα/οδηγίες συνοψίζονται στον Πίνακα 3.1, όπου φαίνονται διαφορές στις απαιτήσεις του συντελεστή ισχύος: για τη σύνδεση στο δίκτυο ΧΤ, η Γερμανική οδηγία VDE-AR-N-4105 ορίζει πως οι μονάδες παραγωγής με S_{max} μεταξύ 3.68 kVA και 13.8 kVA πρέπει να μπορούν να λειτουργήσουν μέχρι $\cos\varphi=0.95$ (επαγωγικό-χωρητικό), ενώ η Ιταλική οδηγία CEI 0-21 ορίζει πως οι αντιστροφείς μεγαλύτεροι των 6 kW πρέπει να μπορούν να λειτουργήσουν μέχρι $\cos\varphi=0.9$ και οι αντιστροφείς μεταξύ 3 kW και 6 kW μέχρι $\cos\varphi=0.95$. Για παράδειγμα μία μονάδα ΔΠ ισχύος 10 kVA, συνδεδεμένη μέσω αντιστροφέα, θα πρέπει να μπορεί να λειτουργήσει μέχρι $\cos\varphi=0.95$ στη Γερμανία και μέχρι $\cos\varphi=0.9$ στην Ιταλία. Το πρότυπο EN 50438 (≤ 16 A ανά φάση) όριζε πως ο συντελεστής ισχύος έπρεπε απλά να παίρνει τιμές μεταξύ 0.95 χωρητικό-επαγωγικό (μη ρυθμιζόμενος) [103], αλλά στην τελική του έκδοση (το 2013 [95]) θέτει απαιτήσεις ρυθμιζόμενης αέργου ισχύος και λειτουργίας με χαρακτηριστικές καμπύλες [98]. Από την άλλη, στις ΗΠΑ το πρότυπο IEEE 1547, το οποίο θέτει απαιτήσεις για μονάδες παραγωγής, δεν επέτρεπε τον έλεγχο της τάσης από ΔΠ στα δίκτυα διανομής μέχρι πρόσφατα, όπου έγινε μερική τροποποίηση (IEEE 1547a [104]). Το πρότυπο βρίσκεται σε διαδικασία αναθεώρησης. Στην πολιτεία της Καλιφόρνια απαιτούνται πλέον προηγμένες λειτουργίες ρύθμισης τάσης [98][105].

Οι βασικές τεχνικές ρύθμισης τάσης από ΔΠ, όπως ορίζονται στα πρότυπα/οδηγίες, (Πίνακας 3.1) είναι οι εξής:

- σταθερό $\cos\varphi$
- σταθερό Q
- $\cos\varphi(P)$ χαρακτηριστική καμπύλη
- $Q(V)$ χαρακτηριστική καμπύλη

Πρότυπο/Οδηγία	Απαιτήσεις $\cos\varphi$		Τεχνικές Λειτουργίας
BDEW <i>MT, Γερμανία,</i>	Με ενεργό ισχύ	Ρυθμιζόμενο $\cos\varphi$ από 0.95 επαγωγικό μέχρι 0.95 χωρητικό Αν $P \leq 10\% P_n$, δεν πρέπει να απορροφά ή να παρέχει περισσότερο Q από το 10% της συμφωνημένης ενεργού ισχύος κατά τη σύνδεση (τροποποίηση 2011)	- σταθερό $\cos\varphi$ - $\cos\varphi(P)$ χαρακτηριστική - σταθερό Q - $Q(V)$ χαρακτηριστική

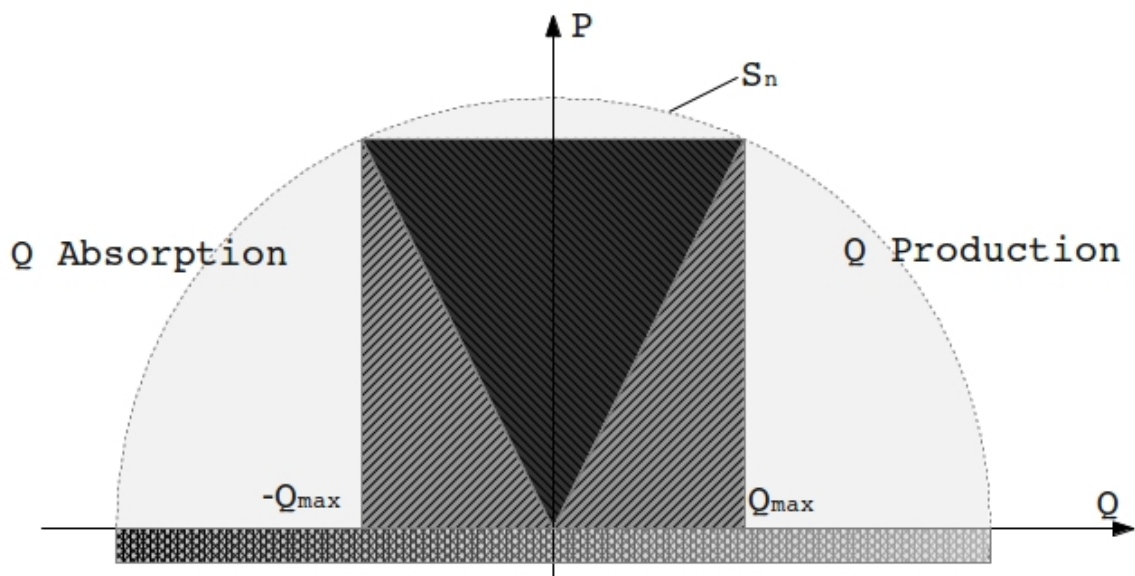
VDE-AR-N 4105 <i>XT, Γερμανία</i>	$P > 20\% P_n$	i) $S_{\max} \leq 3.68 \text{ kVA}$: $\cos\phi$ 0.95 επαγωγικό μέχρι 0.95 χωρητικό σύμφωνα με το DIN EN 50438 (χωρίς προεπιλεγμένη τιμή από τον διαχειριστή του δικτύου)	- σταθερό $\cos\phi$ - $\cos\phi(P)$ χαρακτηριστική Σημείωση: <i>Πιθανώς μελλοντικά να απαιτηθεί $Q(V)$ χαρακτηριστική καμπύλη</i> Ορίζεται η «πρότυπη» $\cos\phi(P)$ χαρακτηριστική
		ii) $3.68 \text{ kVA} < S_{\max} \leq 13.8 \text{ kVA}$: Ρυθμιζόμενο $\cos\phi$ από 0.95 επαγωγικό μέχρι 0.95 χωρητικό	
		iii) $S_{\max} > 13.8 \text{ kVA}$: Ρυθμιζόμενο $\cos\phi$ από 0.90 επαγωγικό μέχρι 0.90 χωρητικό	
CEI 0-21 <i>XT, Ιταλία</i>		i) αντιστροφείς μεταξύ 3 kW και 6 kW: ρυθμιζόμενο $\cos\phi$ μεταξύ 0.95 χωρητικό και 0.95 επαγωγικό	<u>Αντιστροφείς > 3 kW:</u> - σταθερό $\cos\phi$ - $\cos\phi(P)$ χαρακτηριστική <u>Αντιστροφείς > 6kW:</u> - σταθερό $\cos\phi$ - $\cos\phi(P)$ χαρακτηριστική - $Q(V)$ χαρακτηριστική
		ii) αντιστροφείς μεγαλύτεροι των 6 kW: ρυθμιζόμενο $\cos\phi$ μεταξύ 0.90 χωρητικό και 0.90 επαγωγικό	
TOR D4 <i>XT, MT, Αυστρία</i>	$P > 20 \% S_r$	i) $S_r \leq 3.68 \text{ kVA}$ Ρυθμιζόμενο $\cos\phi$ από 0.90 επαγωγικό μέχρι 0.90 χωρητικό	- σταθερό $\cos\phi$ - $\cos\phi(P)$ χαρακτηριστική - $Q(V)$ χαρακτηριστική - σταθερό Q (μόνο για $S_r > 3.68 \text{ kVA}$) - $\cos\phi(V)$ (προαιρετικά μόνο για τη MT) - $P(V)$ χαρακτηριστική
		ii) $S_r > 3.68 \text{ kVA}$ <u>Σύνδεση στη XT:</u> Ρυθμιζόμενο $\cos\phi$ από 0.90 επαγωγικό μέχρι 0.90 χωρητικό	
		iii) <u>Σύνδεση στη MT:</u> Απαιτείται η επιλογή II εκτός αν υπάρχουν καλώς ορισμένες απαιτήσεις από τον διαχειριστή του δικτύου.	

		I) από 0.90 επαγωγικό μέχρι 0.95 χωρητικό II) 0.925 (επαγωγικό/ χωρητικό) III) από 0.95 επαγωγικό μέχρι 0.90 χωρητικό	
--	--	--	--

Πίνακας 3.1. Σύνοψη των πρόσφατων απαιτήσεων για ρύθμιση τάσης σε μόνιμη κατάσταση

Ανύψωση της τάσης συμβαίνει εξαιτίας της υψηλής παραγωγής ενεργού ισχύος από τη ΔΠ, οπότε η $\cos\phi(P)$ χαρακτηριστική σχεδιάζεται ώστε η ΔΠ να απορροφά άεργο ισχύ μόνο όταν η ενεργός ισχύς είναι μεγαλύτερη από ένα κατώφλι (π.χ. 50% P_n) και το $\cos\phi$ παίρνει την ελάχιστη τιμή στην ονομαστική ενεργό ισχύ. Η «πρότυπη καμπύλη» ορίζεται στο VDE-AR-N 4105 και παριστάνεται στο Σχήμα 3.5. Βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η υπερβολική ροή αέργου ισχύος που οδηγεί σε μεγαλύτερες απώλειες. Μία βελτίωση που προτείνεται στο CEI 0-21 είναι η χρήση μιας στρατηγικής “lock-in”, όπου η χαρακτηριστική καμπύλη ενεργοποιείται μόνο όταν η τάση ξεπερνάει κάποια τιμή. Μια πιο εξελιγμένη τεχνική είναι η $Q(V)$ χαρακτηριστική, όπου η άεργος ισχύς προκύπτει από την τάση στους ακροδέκτες της ΔΠ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6. Όμως, μέχρι πριν λίγα χρόνια απαιτείτο μόνο από την Ιταλική οδηγία XT CEI 0-21 (ενεργοποίηση μετά από αίτημα του διαχειριστή του δικτύου διανομής) και από τη Γερμανική οδηγία MT BDEW (απλή αναφορά). Πλέον, αποτελεί απαίτηση και σε άλλα έγγραφα (TOR D4, CLC/TS 50549-1/2). Επιπλέον, αξίζει να αναφερθεί πως στα δίκτυα XT ο λόγος R/X είναι μεγαλύτερος από ό,τι στα υψηλότερα επίπεδα τάσης, που μπορεί να οδηγήσει στην ανάγκη περιορισμού ενεργού ισχύος για την αντιμετώπιση της ανύψωσης τάσης, εφόσον μπορεί η άεργος ισχύς να μην επαρκεί. Αυτή η λειτουργία δεν λαμβανόταν υπόψη στις οδηγίες/πρότυπα μέχρι πρόσφατα, αλλά πλέον ζητείται στο TOR D4 και προαιρετικά στο CLC/TS 50549-1.

Η σχέση μεταξύ της απαιτούμενης αέργου ισχύος και της παραγόμενης ενεργού ισχύος απεικονίζεται στο διάγραμμα ενεργού-αέργου ισχύος (P-Q διάγραμμα ικανότητας). Στα BDEW και VDE-AR-N-4105 ορίζεται ένα «τριγωνικό» διάγραμμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.13. Εφόσον μεγάλη ανύψωση τάσης αναμένεται όταν η ΔΠ παρέχει υψηλή ενεργό ισχύ, οι μονάδες απαιτείται να μπορούν να καταναλώνουν μικρότερα ποσά αέργου ισχύος σε χαμηλή ενεργό ισχύ. Από την άλλη, το CEI 0-21 ορίζει επίσης ένα «ορθογώνιο» διάγραμμα, το οποίο είναι «εθελοντικό», όπου η μέγιστη ποσότητα αέργου ισχύος ($\pm Q_{max}$ του «τριγωνικού» διαγράμματος) απαιτείται ακόμα και σε χαμηλή ενεργό ισχύ (Σχήμα 3.13). Πρόσφατα το «ορθογώνιο» διάγραμμα περιλήφθηκε και στο TOR D4 (για $S_r > 3.68$ kVA). Σημειώνεται πως κώδικες δικτύου που αναφέρονται σε αιολικά πάρκα έχουν εισάγει επιπλέον P-Q διαγράμματα [106].



Σχήμα 3.13. P-Q διαγράμματα: «τριγωνικό», «ορθογώνιο», «ημικυκλικό» και νυχτερινής λειτουργίας

Επίσης, το P-Q διάγραμμα θα μπορούσε δυνητικά να επεκταθεί μέχρι την ονομαστική φαινόμενη ισχύ σε όλα τα επίπεδα ενεργού ισχύος, δηλαδή σε ένα «ημικυκλικό» διάγραμμα. Παρομοίως, η ΔΠ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αντισταθμίσει το φαινόμενο Ferranti στο δίκτυο ΥΤ, εφόσον μπορεί να απορροφά την άεργο ισχύ που παράγεται από τους αγωγούς ΥΤ, ώστε να αποφευχθούν πρόστιμα για τη ροή αέργου ισχύος ή δαπανηρές μέθοδοι αντιμετώπισης της ανύψωσης τάσης. Σε αυτό το πλαίσιο, ο έλεγχος αέργου ισχύος από Φ/Β κατά τη διάρκεια της νύχτας προτάθηκε πρόσφατα [107]. Για τη νυχτερινή λειτουργία απαιτείται ένα P-Q διάγραμμα που να επιτρέπει και τη λειτουργία στο όριο μεταξύ 3^{ου} και 4^{ου} τεταρτημόριου, όταν η πρωτογενής πηγή δεν είναι διαθέσιμη (δηλαδή απορρόφηση μικρού ποσού ενεργού ισχύος), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.13. Αυτή η δυνατότητα δεν αναφέρεται στα πρότυπα/οδηγίες, αν και είναι υποσχόμενη και ήδη κάποιοι κατασκευαστές την υποστηρίζουν για μεγάλες μονάδες. Στο Σχήμα 3.13 απεικονίζεται το «τριγωνικό», «ορθογώνιο», «ημικυκλικό» και νυχτερινής λειτουργίας P-Q διάγραμμα.

Επιπλέον, το P-Q διάγραμμα μέχρι πρόσφατα οριζόταν μόνο στην ονομαστική τάση (π.χ. CEI 0-21, FGW-Part 3 κτλ) το οποίο δεν είναι επαρκές. Το μέγιστο ρεύμα καθορίζει τα όρια ενεργού και αέργου ισχύος, οπότε η τάση επηρεάζει το P-Q διάγραμμα. Η συμμόρφωση με τις απαιτήσεις αέργου ισχύος σε χαμηλές τιμές τάσης (π.χ. κάτω από 0.95 α.μ.) είναι πιο απαιτητική. Τα περισσότερα πρότυπα δεν αναφέρονται σε αυτό το ζήτημα, ενώ άλλα μερικώς. Η επίδραση της τάσης στο P-Q διάγραμμα αναφέρεται στο [108]. Πλέον στο TOR D4 και στο CLC/TS 50549-1 εξετάζεται η επίδραση της τάσης στην άεργο ισχύ (μέσω γραφικής παράστασης), όπου δίνεται προτεραιότητα στην εκτέλεση της εντολής αέργου ισχύος σε σχέση με την παραγωγή ενεργού ισχύος. Η ύπαρξη ξεκάθαρων απαιτήσεων είναι σημαντική για τους κατασκευαστές, ώστε να εξασφαλίζουν πως η συσκευή που σχεδιάζουν συμμορφώνεται με διάφορα πρότυπα.

Παρομοίως, ο υπολογισμός της μέγιστης απαιτούμενης αέργου ισχύος δεν είναι σαφής. Ανάλογα με το αν η αέργος ισχύς υπολογίζεται με βάση τη μέγιστη ενεργό ισχύ ή τη μέγιστη φαινόμενη ισχύ η απαίτηση μπορεί να διαφέρει. Επίσης, υπάρχουν διαφορές στην ελάχιστη ενεργό ισχύ στην οποία η ΔΠ πρέπει να παρέχει ή να απορροφά αέργο ισχύ (σε κάποια πρότυπα/οδηγίες δεν αναφέρεται κάποιο όριο, ενώ σε άλλα ορίζεται το 20%).

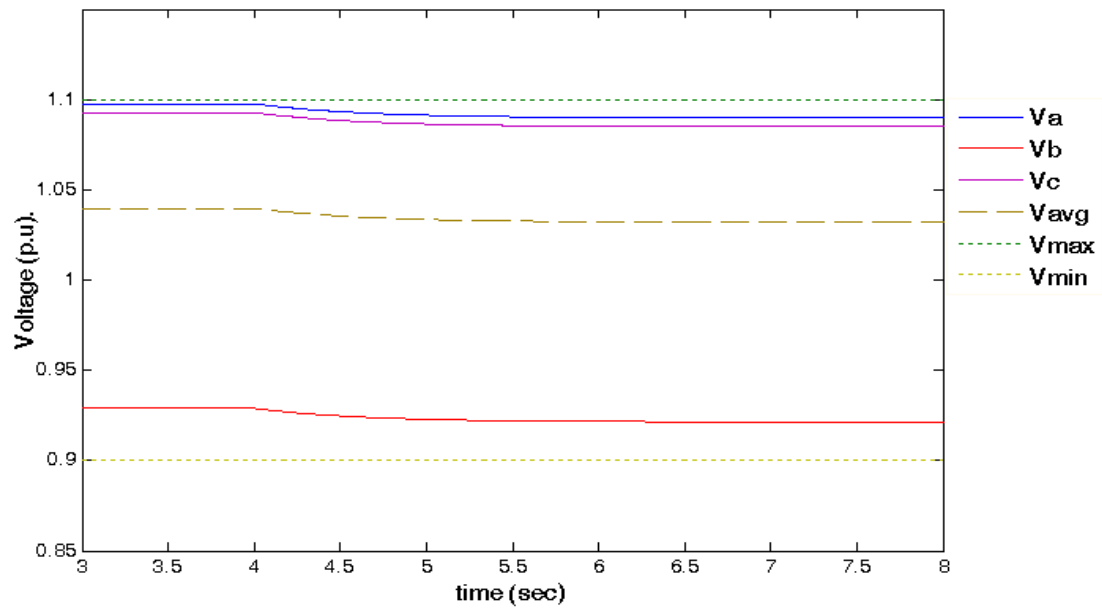
3.4.1.2) $Q(V)$ έλεγχος

Όπως αναφέρθηκε, η $Q(V)$ χαρακτηριστική είναι μία πιο εξελιγμένη τεχνική για τη συμβολή στη ρύθμιση τάσης στη μόνιμη κατάσταση και υπάρχουν θέματα που δεν έχουν εξεταστεί εις βάθος.

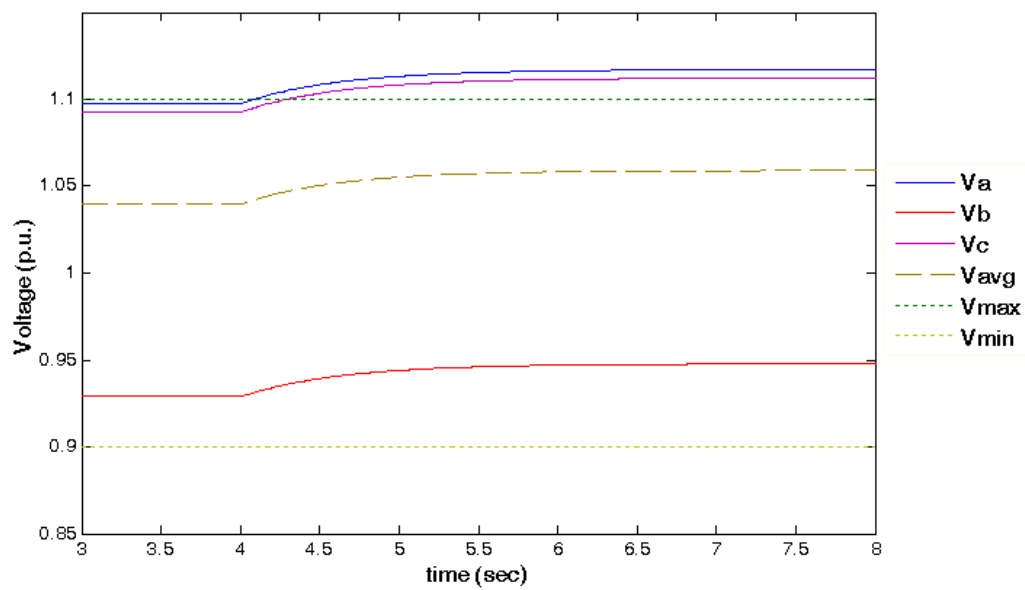
Καταρχάς, ο τρόπος υπολογισμού της τάσης εισόδου στον $Q(V)$ ελεγκτή τριφασικών αντιστροφών σε ασύμμετρες συνθήκες δεν έχει οριστεί στα τρέχοντα πρότυπα/οδηγίες. Αυτό έχει οδηγήσει τους κατασκευαστές στο να χρησιμοποιούν διαφορετικούς τρόπους [74] όπως: μέση τιμή της τάσης, τάση θετικής ακολουθίας, μέγιστη τάση, μεμονωμένη τάση, ανεξάρτητα η τάση κάθε φάσης κτλ. Εφόσον στα δίκτυα XT παρουσιάζονται ασυμμετρίες εξαιτίας των μονοφασικών φορτίων και της μονοφασικής παραγωγής, κάποιες προσεγγίσεις μπορεί να οδηγήσουν σε μη επιθυμητές τιμές των τάσεων.

Για την εξέταση αυτού του φαινομένου, αναπτύχθηκε δυναμικό μοντέλο προσομοίωσης στο Matlab/Simulink. Τριφασική μονάδα ΔΠ ονομαστικής ισχύος 10 kW συνδέεται σε ασύμμετρη πηγή τάσης (XT) μέσω γραμμής μεγάλου μήκους. Υλοποιήθηκε τυπικός $Q(V)$ ελεγκτής που αποτελείται από νεκρή ζώνη, περιοχή γραμμικής μεταβολής και περιοχή κορεσμού για ανύψωση και για πτώση τάσης αντίστοιχα. Μέγιστη παραγωγή και απορρόφηση αέργου ισχύος επιλέχθηκε για τάση $VQ_{min}=0.9$ α.μ. και $VQ_{max}=1.1$ α.μ. αντίστοιχα. Αρχικά, ο $Q(V)$ ελεγκτής ήταν απενεργοποιημένος και οι φασικές τάσεις στους ακροδέκτες της ΔΠ ήταν: $Va=1.098$ α.μ., $Vb=0.93$ α.μ., $Vc=1.093$ α.μ.

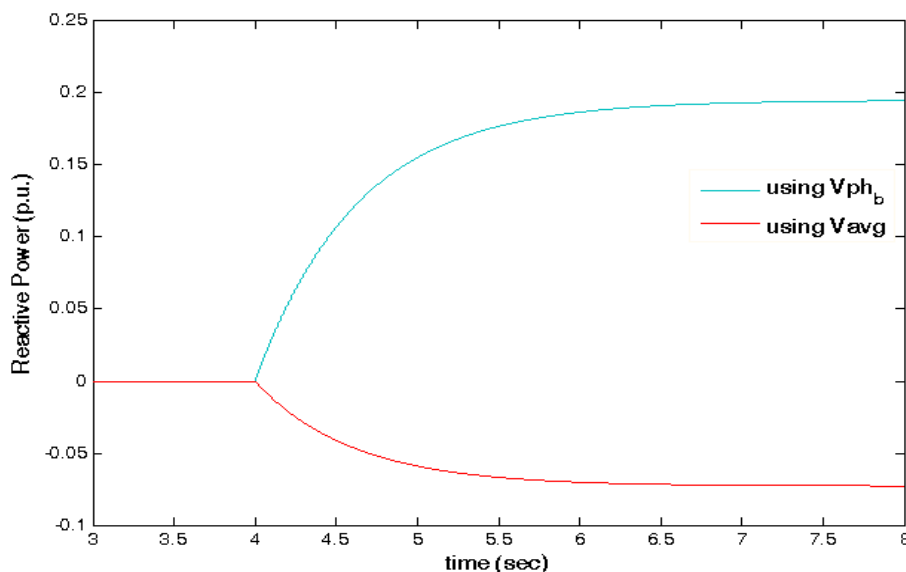
Στην πρώτη περίπτωση η είσοδος στον $Q(V)$ ελεγκτή είναι η μέση τιμή των τριών φασικών τάσεων $((Va+Vb+Vc)/3)$ και στη δεύτερη περίπτωση η φασική τάση της φάσης B. Οι προσομοιώσεις δείχνουν πως αν και ο ελεγκτής λειτουργεί ικανοποιητικά στην περίπτωση μέτρησης της μέσης τιμής των τάσεων (απορρόφηση αέργου ισχύος), στην περίπτωση της μέτρησης μεμονωμένης τάσης (φάσης B) η τάση των δύο άλλων φάσεων αυξάνεται πάνω από το επιτρεπτό όριο εξαιτίας της παροχής αέργου ισχύος. Οι φασικές τάσεις και στις δύο περιπτώσεις φαίνονται στα Σχήματα 3.14 και 3.15, ενώ η αέργος ισχύς στο Σχήμα 3.16. Οι προσομοιώσεις δείχνουν ξεκάθαρα την ανάγκη να ληφθεί αυτό το ζήτημα υπόψη στις διαδικασίες τυποποίησης και τη σημασία του να παρέχονται ξεκάθαρες απαιτήσεις στους κατασκευαστές.



Σχήμα 3.14. Φασικές τάσεις όταν η είσοδος στον Q(V) ελεγκτή είναι η μέση τιμή των τριών τάσεων (V_a , V_b , V_c)



Σχήμα 3.15. Φασικές τάσεις όταν η είσοδος στον Q(V) ελεγκτή είναι η τάση της φάσης B



Σχήμα 3.16. Τριφασική άεργος ισχύς της ΔΠ στις δύο περιπτώσεις (η άεργος ισχύς είναι θετική όταν παρέχεται)

Όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 3.2.2, η ευστάθεια του $Q(V)$ ελέγχου χρειάζεται να εξεταστεί, εφόσον η άεργος ισχύς που προκύπτει επηρεάζει την τάση, η οποία είναι η είσοδος στην $Q(V)$ χαρακτηριστική. Όσο πιο απότομη η $Q(V)$ χαρακτηριστική στην περιοχή γραμμικής μεταβολής και μεγαλύτερη η επαγωγική αντίδραση του δικτύου, τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα αστάθειας. Αν εφαρμόζεται κινούμενος μέσος όρος στις μετρούμενες τάσεις ή άλλες χρονικές καθυστερήσεις μπορεί να προκύψει αστάθεια. Αυτό το ζήτημα δεν λαμβάνεται υπόψη στα τρέχοντα πρότυπα/οδηγίες.

Επιπλέον, η $Q(V)$ χαρακτηριστική μπορεί να είναι είτε σταθερή, όπου η μέγιστη άεργος ισχύς (Q_{max} στο Σχήμα 3.6) καθορίζεται από την ονομαστική ενεργό ισχύ (και το ελάχιστο εφικτό $\cos\phi$), ή μεταβαλλόμενη όπου η μέγιστη άεργος ισχύς εξαρτάται από την τρέχουσα ενεργό ισχύ. Αν χρησιμοποιηθεί σταθερή $Q(V)$ χαρακτηριστική και η ΔΠ λειτουργεί με «τριγωνικό» P-Q διάγραμμα προκύπτουν περιορισμοί στην άεργο ισχύ σε χαμηλή ενεργό ισχύ λόγω του ελάχιστου $\cos\phi$ (Σχήμα 5.4). Επίσης, πιο εξελιγμένες τεχνικές έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία (π.χ. $Q(U,P)$ τεχνική στο [109]). Τέτοιες υβριδικές μέθοδοι θα μπορούσαν να ληφθούν υπόψη σε μελλοντικά πρότυπα.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί πως δεν δίνονται αρκετές συστάσεις για την επιλογή των παραμέτρων της $Q(V)$ χαρακτηριστικής. Σε αυτή την κατεύθυνση πρόσφατα δόθηκαν συστάσεις για τις παραμέτρους μίας μη-συμμετρικής χαρακτηριστικής στο ERDF NOI-RES [101]. Η επιλογή είναι δυσκολότερη ειδικά σε περιπτώσεις που πλήθος μονάδων ΔΠ είναι εγκατεστημένες σε διαφορετικούς ζυγούς του δικτύου. Η απόφαση μπορεί να λαμβάνεται από τον διαχειριστή του δικτύου, από κάθε ΔΠ ανεξάρτητα (π.χ. υπολογίζοντας την αντίσταση του ανάντη δικτύου στο σημείο σύνδεσης) ή συντονισμένα όπως περιγράφεται στο [63].

3.4.2) Στήριξη του δικτύου σε μεταβατική κατάσταση

Η στήριξη του δικτύου σε μεταβατική κατάσταση αναφέρεται σε βυθίσεις τάσης που προκύπτουν από σφάλματα συνήθως στα ανώτερα επίπεδα τάσης. Σε πρώτο επίπεδο, οι μονάδες ΔΠ δεν πρέπει να αποσυνδέονται από το δίκτυο κατά τη διάρκεια σφαλμάτων και σε δεύτερο επίπεδο πρέπει να στηρίζουν την τάση του δικτύου κατά τη διάρκεια σφάλματος παρέχοντας άεργο ρεύμα. Απαιτήσεις αδιάλειπτης παροχής ισχύος σε συνθήκες χαμηλής τάσης (LVRT) έχουν τεθεί σε πολλές Ευρωπαϊκές χώρες για σύνδεση στη MT, όπως στα BDEW, FGW-Part 3, TOR D4, CLC/TS 50549-2, ENTSO-E-RfG κ.α. Όσον αφορά τη XT, η Γερμανική οδηγία VDE-AR-N-4105 και η Αυστριακή οδηγία TOR D4 δεν απαιτούν τη λειτουργία LVRT, ενώ ζητείται στην Ιταλική οδηγία CEI-021 (για μονάδες μεγαλύτερες των 6kW) καθώς και στο CLC/TS 50549-1. Επιπλέον, μη εναρμονισμένες απαιτήσεις LVRT ορίζονται σε κώδικες δικτύου που αφορούν κυρίως αιολικά πάρκα και περιγράφονται στα [90][91][92].

Απότομες αλλαγές στη γωνία κατά τη διάρκεια σφαλμάτων δεν έχουν ληφθεί επαρκώς υπόψη στις δοκιμές LVRT, παρόλο που μπορούν να επηρεάσουν τη συμπεριφορά των μονάδων κατά το σφάλμα. Αυτό το ζήτημα αφορά συμμετρικά και ασύμμετρα σφάλματα και δεν υπάρχει σαφής απαίτηση στην οδηγία MT FGW-Part 3. Σε απότομες αλλαγές της γωνίας υπάρχει πιθανότητα αποσύνδεσης του αντιστροφέα (ειδικά για παλαιότερους αντιστροφείς). Επίσης, σε πολύ μεγάλες βυθίσεις τάσης υπάρχει η πιθανότητα ενεργοποίησης της προστασίας «αέργου ισχύος σε υπόταση ($Q \& U <$)» που απαιτείται από την οδηγία BDEW, εφόσον ο αντιστροφέας μπορεί να παρέχει το μέγιστο ρεύμα με ανακρίβη γωνία. Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να βρεθούν στο [B.12].

3.4.3) Ρύθμιση συχνότητας

Η ρύθμιση συχνότητας είναι μία σημαντική λειτουργία των ΣΗΕ και έχει αναγνωριστεί η ανάγκη συνεισφοράς της ΔΠ. Το γνωστό «πρόβλημα των 50.2 Hz» ήρθε στη προσοχή των διαχειριστών του δικτύου το 2011 στη Γερμανία. Προηγουμένως [110], οι μονάδες ΔΠ έπρεπε να αποσυνδέονται γρήγορα (μέσα σε 200 ms) για τιμές συχνότητας μεγαλύτερες των 50.2 Hz [111]. Αυτό σήμαινε πως σε περίπτωση αύξησης της συχνότητας πάνω από τα 50.2 Hz, αρκετά GW Φ/Β παραγωγής θα έπρεπε να αποσυνδεθούν ταυτόχρονα από το δίκτυο, περιορίζοντας την ευστάθεια του συστήματος. Για αυτό τον λόγο το όριο αποσύνδεσης έχει πλέον αυξηθεί και επιπλέον απαιτείται περιορισμός της παραγόμενης ενεργού ισχύος μέσω καμπύλης στατισμού σε συνθήκες υπερσυχνότητας (BDEW, VDE-AR-N-4105, CEI 0-21, ENTSO-E-RfG, EN50478). Στο Σχήμα 3.11α παριστάνεται η καμπύλη που απαιτείται από τις Γερμανικές οδηγίες BDEW (MT) και VDE-AR-N-4105 (XT). Η αντικατάσταση/αναβάθμιση εγκαταστάσεων ισχύος μεγαλύτερης των 10 kW που έχουν πραγματοποιηθεί μετά το 2005 προτάθηκε στο [112] και παρόμοιες απόψεις διατυπώθηκαν στο [77]. Το «πρόβλημα των 50.2Hz» δείχνει ξεκάθαρα τη μεγάλη σημασία που έχει η έγκαιρη αναγνώριση προβλημάτων στη διαδικασία τυποποίησης, που μπορεί να προκληθούν από την αυξημένη διείδυση ΔΠ, ώστε να αποφεύγονται δαπανηρές και δύσκολες λύσεις.

Αν και τα πρόσφατα πρότυπα/οδηγίες απαιτούν καμπύλη περιορισμού της ενεργού ισχύος σε υπερσυχνότητα, παρουσιάζονται διαφοροποιήσεις στη συχνότητα ενεργοποίησης του περιορισμού ισχύος. Ειδικότερα, το τιθέμενο όριο είναι 50.2 Hz στα BDEW και VDE-AR-N-4105, ενώ 50.3 Hz στο CEI 0-21 και ρυθμιζόμενο στα ENTSO-E-RfG και EN 50438 (προεπιλεγμένη τιμή 50.3 Hz). Επιπλέον, η κλίση της καμπύλης είναι σταθερή στα BDEW και VDE-AR-N-4105, ενώ είναι ρυθμιζόμενη στα CEI 0-21 (2-5%), ENTSO-E-RfG (2-12%) και EN 50438 (2-12%). Οι παραπάνω διαφοροποιήσεις δεν κρίνονται σημαντικές για την ευσταθή λειτουργία του συστήματος, αλλά αυξάνουν την πολυπλοκότητα για τους κατασκευαστές.

Επιπλέον, διαφορετικές προσεγγίσεις προτείνονται στον έλεγχο συχνότητας-ενεργού ισχύος κατά την επαναφορά της συχνότητας μετά το πέρας της υπερσυχνότητας. Τίθενται διαφορετικά όρια συχνότητας, χρόνος αναμονής και ρυθμός αύξησης της ενεργού ισχύος ή δεν γίνεται καθόλου αναφορά. Για παράδειγμα σε κάποια πρότυπα προτείνεται η λειτουργία πάνω στην καμπύλη στατισμού όταν μειώνεται η συχνότητα, ενώ σε άλλα (π.χ. BDEW) απαιτείται λειτουργία υστέρησης (κάτω από τα 50.05 Hz).

Μια πιο απαιτητική λειτουργία είναι η συμβολή της ΔΠ σε υποσυχνότητα εφόσον απαιτείται τήρηση εφεδρείας. Αυτή η λειτουργία προτείνεται κυρίως για μεγάλες μονάδες (π.χ. στο ENTSO-E RfG και στους κώδικες δικτύου της Ιρλανδίας [113] και της Δανίας [78][114]). Στο ENTSO-E-RfG λίγες συστάσεις παρέχονται για την επιλογή της εφεδρείας που είναι σημαντική παράμετρος για τις ΑΠΕ. Επιπλέον, η παροχή εικονικής/συνθετικής αδράνειας από ΔΠ, αν και είναι μια υποσχόμενη λειτουργία, αναφέρεται συνοπτικά στο ENTSO-E-RfG, χωρίς να παρέχονται επαρκείς συστάσεις για τον ρυθμό μεταβολής της συχνότητας και τον χρόνο απόκρισης. Η αποτελεσματικότητα της εικονικής αδράνειας έχει διερευνηθεί σε ερευνητικά προγράμματα [31][115] και ήδη εφαρμόζεται σε εμπορικές ανεμογεννήτριες [84].

Τέλος, σημειώνεται πως έχουν εκφραστεί προβληματισμοί για την πιθανότητα οι λειτουργίες ρύθμισης συχνότητας να επηρεάσουν τη λειτουργία της προστασίας έναντι νησιδοποίησης των αντιστροφών [103]. Κάποιες μέθοδοι ανίχνευσης νησιδοποίησης προσπαθούν να αποσταθεροποιήσουν το νησιδοποιημένο τμήμα του δικτύου π.χ. μεταβάλλοντας τη συχνότητα μέχρι να ενεργοποιηθεί η προστασία. Οπότε, ο περιορισμός της ενεργού ισχύος σε περίπτωση υπερσυχνότητας δυνητικά μπορεί να σταθεροποιήσει ένα (ακούσια) νησιδοποιημένο τμήμα του δικτύου.

3.5) Προτάσεις προηγμένων δοκιμών για την παροχή επικουρικών υπηρεσιών από Διεσπαρμένη Παραγωγή

Διαδικασίες δοκιμών που αφορούν επικουρικές υπηρεσίες έχουν οριστεί στα προαναφερόμενα πρόσφατα πρότυπα/οδηγίες για ρύθμιση τάσης σε μόνιμη κατάσταση (π.χ. δυνατότητα παροχής-απορρόφησης αέργου ισχύος, $\cos\phi(P)$ και $Q(V)$ χαρακτηριστικές), στήριξη της τάσης σε μεταβατική κατάσταση, περιορισμό ενεργού ισχύος με εντολή από τον διαχειριστή του δικτύου, περιορισμό ενεργού ισχύος σε υπερσυχνότητα κ.α. Ωστόσο, ολοκληρωμένες δοκιμές για συγκεκριμένες απαιτήσεις δεν έχουν ακόμα οριστεί. Επιπλέον,

όσο αυξάνεται η πολυπλοκότητα των ηλεκτρικών δικτύων αλλά και των επιμέρους συσκευών, οι συμβατικές δοκιμές πιθανώς να μην είναι επαρκείς στο μέλλον. Η μέθοδος PHIL αποτελεί μία υποσχόμενη προσέγγιση για τις μελλοντικές δοκιμές.

3.5.1) Υφιστάμενες διαδικασίες δοκιμών

Ειδικότερα, το FGW-Part 3 (που βασίζεται εν μέρει στο IEC 61400-4-21 [116])) περιγράφει μεθόδους μετρήσεων και διαδικασίες δοκιμών για μονάδες παραγωγής σε συμμόρφωση με τη Γερμανική οδηγία MT BDEW. Η Γερμανική οδηγία XT VDE-AR-N 4105 παρέχει ορισμένες προτάσεις για δοκιμές ρύθμισης τάσης σε μόνιμη κατάσταση και το DIN VDE V 0124-100 [102] περιγράφει αρκετές διαδικασίες δοκιμών για σύνδεση στο δίκτυο XT. Η Ιταλική οδηγία CEI 0-21 επίσης περιγράφει αρκετές διαδικασίες δοκιμών για σύνδεση στο δίκτυο XT. Επιπλέον, ο κώδικας δικτύου ENTSO-E RfG προτείνει ορισμένες δοκιμές που αφορούν κυρίως μεγάλες μονάδες. Προηγμένα εργαστήρια δοκιμών όπως τα [75][117][118] πραγματοποιούν δοκιμές με βάση και πέρα από τα πρότυπα/οδηγίες. Εμπειρίες πάνω σε δοκιμές και πιστοποίηση αντιστροφών Φ/Β στη Γερμανία περιγράφονται στο [119] και σε διεθνές επίπεδο στο [120].

Στις ΗΠΑ, το IEEE 1547 ορίζει απαιτήσεις για μονάδες παραγωγής, ενώ τα IEEE 1547.1 [121] και UL 1741 [122] αναφέρονται σε διαδικασίες δοκιμών, ωστόσο δεν δίνεται έμφαση σε επικουρικές υπηρεσίες. Όπως αναφέρθηκε, το IEEE 1547 είναι σε φάση αναθεώρησης ώστε να συμπεριλάβει προηγμένες λειτουργίες στήριξης του δικτύου, όπως και το UL 1741 για τον καθορισμό κατάλληλων διαδικασιών δοκιμών [120].

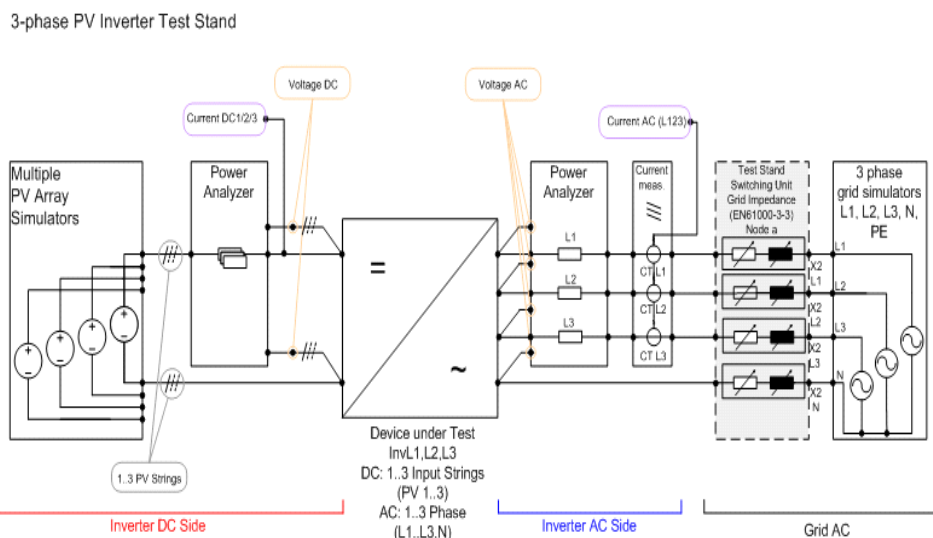
Αν και πλήθος διαδικασιών δοκιμών έχουν οριστεί στα παραπάνω έγγραφα, κάποιες δοκιμές δεν έχουν οριστεί πλήρως (π.χ. $Q(V)$ χαρακτηριστική) ή καθόλου (π.χ. περιορισμός ενεργού ισχύος για ρύθμιση τάσης $P(V)$). Επίσης, σε όλες τις διαδικασίες δοκιμών ελέγχεται μία μεμονωμένη συσκευή (π.χ. αντιστροφέας), όπου για παράδειγμα προσομοιωτής δικτύου εφαρμόζει προκαθορισμένα προφίλ τάσης και συχνότητας. Με αυτό τον τρόπο, πιθανές αλληλεπιδράσεις με άλλες συσκευές και το όλο σύστημα αγνοούνται. Οι PHIL δοκιμές μπορούν να λάβουν υπόψη τέτοιες αλληλεπιδράσεις.

3.5.2) Προτεινόμενες προηγμένες δοκιμές συμβατικού τύπου

Σε αυτή την παράγραφο προτείνονται διαδικασίες δοκιμών συμβατικού τύπου για επικουρικές υπηρεσίες. Οι διαδικασίες δοκιμών στοχεύουν στον σε βάθος έλεγχο διαθέσιμων λειτουργιών (π.χ. $Q(V)$ χαρακτηριστική), αλλά και στον έλεγχο υποσχόμενων λειτουργιών που δεν έχουν ακόμα οριστεί εις βάθος στα πρότυπα (π.χ. παροχή εικονικής/συνθετικής αδράνειας). Έμφαση δίνεται στη ρύθμιση τάσης στη μόνιμη κατάσταση και στη ρύθμιση συχνότητας.

Μία τυπική εργαστηριακή διάταξη για την πραγματοποίηση των δοκιμών απεικονίζεται στο Σχήμα 3.17. Προτείνεται ο προσομοιωτής AC δικτύου να ακολουθεί τα IEC 61000-3-2 [123] και IEC 61000-3-12 [124], καθώς και το DIN VDE V 0124-100 A.1. Για τις δοκιμές ρύθμισης τάσης μόνιμης κατάστασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και κατάλληλος μετασχηματιστής ή αυτομετασχηματιστής. Η DC πηγή ή ο προσομοιωτής Φ/Β πρέπει να

ακολουθεί το FGW-Part 3. Ενδεικτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η «σύνθετη αντίσταση αναφοράς» που ορίζεται στο [125]. Οι προτεινόμενες διαδικασίες δοκιμών περιγράφονται παρακάτω μαζί με βασικές πληροφορίες για την κάθε δοκιμή.



Σχήμα 3.17. Τυπική εργαστηριακή διάταξη για δοκιμές αντιστροφών [126]

3.5.2.1) P-Q διάγραμμα

Στην παράγραφο 3.4.1 αναφέρθηκαν οι πρόσφατες απαιτήσεις για το P-Q διάγραμμα μονάδων ΔΠ, καθώς και ελλείψεις. Όσον αφορά τις δοκιμές, δοκιμή για το P-Q διάγραμμα νυχτερινής λειτουργίας δεν έχει οριστεί. Επίσης, όπως αναφέρθηκε το P-Q διάγραμμα συνήθως ορίζεται και ελέγχεται μέσω δοκιμών μόνο στην ονομαστική τάση (π.χ. στα FGW-Part 3, CEI 0-21) το οποίο δεν είναι επαρκές, ενώ πρόσφατα λήφθηκε υπόψη η επίδραση της τάσης στις απαιτήσεις των TOR D4 και CLC/TS 50549-1. Ο περιορισμός μέγιστου ρεύματος καθορίζει τα όρια ενεργού και αέργου ισχύος, οπότε το επίπεδο τάσης επηρεάζει το P-Q διάγραμμα.

Με βάση τα παραπάνω, ακολουθεί προτεινόμενη διαδικασία δοκιμής. Για «τριγωνικό» διάγραμμα η ΔΠ πρέπει να λειτουργεί με τη μέγιστη δυνατή άεργο ισχύ για τη δεδομένη ενεργό ισχύ, υποδιεγερμένη και υπερδιεγερμένη. Για «ορθογώνιο» διάγραμμα η ΔΠ πρέπει να λειτουργεί με σταθερή μέγιστη άεργο ισχύ (π.χ. $Q=0.44 \cdot P_n$) υποδιεγερμένη και υπερδιεγερμένη (δοκιμές για το «τριγωνικό» και το «ορθογώνιο» διάγραμμα προτείνονται στα CEI 0-21 και FGW-Part 3). Για το «ημικυκλικό» διάγραμμα η ΔΠ πρέπει να λειτουργεί στο όριο του ημικυκλίου (δηλαδή σε ονομαστική φαινόμενη ισχύ). Επίσης, η δοκιμή πρέπει να λάβει χώρα με χαμηλή ενεργό ισχύ καθώς και με μικρό ποσό απορρόφησης ενεργού ισχύος (σύμφωνα με την κατανάλωση της ΔΠ).

Στις παραπάνω δοκιμές η ενεργός ισχύς πρέπει να μεταβάλλεται από 10% μέχρι 120% της ονομαστικής ενεργού ισχύος με βήματα 10% (παρομοίως με το FGW-Part 3). Προτείνουμε όλες οι δοκιμές να πραγματοποιούνται στην ονομαστική τάση, καθώς και στο 90%, 95%,

105% και 110% αυτής. Η ακρίβεια της αέργου ισχύος μετριέται και πιθανοί περιορισμοί στην παροχή/απορρόφηση αέργου ισχύος σε χαμηλή ενεργό ισχύ πρέπει να εντοπιστούν.

3.5.2.2) $Q(V)$ έλεγχος σε μόνιμη κατάσταση και συμμετρική λειτουργία

Η συνεισφορά στη ρύθμιση τάσης χρησιμοποιώντας $Q(V)$ χαρακτηριστική περιγράφηκε στην παράγραφο 3.2 (Σχήμα 3.6). Ορισμένες διαδικασίες δοκιμών έχουν προταθεί στο CIE 0-21. Στην παρούσα εργασία προτείνεται η παρακάτω διαδικασία.

Πραγματοποιούνται βήματα τάσης (π.χ. 0.01 α.μ.) που σαρώνουν όλες τις περιοχές της χαρακτηριστικής καμπύλης (νεκρή ζώνη, περιοχή γραμμικής μεταβολής, περιοχή κορεσμού). Η δοκιμή πραγματοποιείται σε διάφορα επίπεδα ενεργού ισχύος (πχ. 100%, 75%, 50%, 25%). Αν η νεκρή ζώνη ($VQDB_{pos} - VQDB_{neg}$ του Σχήματος 3.6) και οι κλίσεις των ευθειών μπορούν να παραμετροποιηθούν, προτείνεται η δοκιμή να υλοποιηθεί σε διαφορετικές τιμές (π.χ. μέγιστη, ελάχιστη και μέση).

Τα όρια της νεκρής ζώνης ($VQDB_{pos}$, $VQDB_{neg}$ του Σχήματος 3.6) και οι κλίσεις στις περιοχές γραμμικής μεταβολής πρέπει να υπολογιστούν από τις μετρήσεις και να συγκριθούν με τις παραμέτρους της ΔΠ. Η ακρίβεια ολόκληρης της $Q(V)$ χαρακτηριστικής υπολογίζεται συγκρίνοντας τη μετρούμενη άεργο ισχύ με την αναμενόμενη. Αν χρησιμοποιηθεί μία διαφορετική χαρακτηριστική που π.χ. περιλαμβάνει τέσσερις περιοχές γραμμικής μεταβολής (χωρίς νεκρή ζώνη) [74], χρειάζεται να υπολογιστούν και οι τέσσερις κλίσεις.

Περιορισμοί στην άεργο ισχύ σε χαμηλή ενεργό ισχύ μπορούν να παρατηρηθούν εξαιτίας του ορίου ελάχιστου $\cos\phi$, αν η ΔΠ λειτουργεί με σταθερή $Q(V)$ χαρακτηριστική (ανεξάρτητη από την τρέχουσα ενεργό ισχύ, όπως συνηθίζεται) και «τριγωνικό» P-Q διάγραμμα (Σχήμα 5.4). Αυτοί οι περιορισμοί πρέπει να εντοπιστούν κατά τη δοκιμή.

3.5.2.3) $Q(V)$ έλεγχος σε ασύμμετρη λειτουργία

Στην παράγραφο 3.4.1.2 εξηγήθηκε πως στα δίκτυα XT παρουσιάζονται ασυμμετρίες εξαιτίας μονοφασικών φορτίων και μονοφασικής παραγωγής και πως οι κατασκευαστές αντιστροφών χρησιμοποιούν διαφορετικές μεθόδους για την εκτίμηση της τάσης εισόδου στην $Q(V)$ χαρακτηριστική, που μπορεί να οδηγήσει σε προβληματική λειτουργία. Με βάση τα παραπάνω προτείνεται η παρακάτω διαδικασία δοκιμής.

Απαιτείται τριφασικός προσομοιωτής AC δικτύου με δυνατότητα παραγωγής ελεγχόμενων ασύμμετρων τάσεων. Επιλέγεται σύνθετη αντίσταση δικτύου με σχετικά υψηλή τιμή ώστε να αυξηθεί η επίδραση της παραγωγής/απορρόφησης αέργου ισχύος στις τάσεις των φάσεων. Αρχικά η ΔΠ λειτουργεί στην ονομαστική ενεργό ισχύ και ο $Q(V)$ ελεγκτής είναι απενεργοποιημένος.

Ο προσομοιωτής δικτύου παράγει ασύμμετρο τριφασικό σύστημα τάσεων, ώστε να εφαρμοστούν οι παρακάτω φασικές τάσεις (ή παρόμοιες) στους ακροδέκτες του αντιστροφέα της ΔΠ (οι ενδεικτικές τιμές προέκυψαν από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στην παράγραφο 3.4.1.2)

- V_A : ίση ή ελαφρώς κάτω από το VQ_{max} (π.χ. $VQ_{max} - 0.002$ α.μ.)

- V_B : στην περιοχή γραμμικής μεταβολής πτώσης τάσης, πάνω από το VQ_{min} με ένα μικρό περιθώριο (π.χ. $VQ_{min} + 0.03$ α.μ.)
- V_G : ίση ή ελαφρώς κάτω από το VQ_{max} (π.χ. $VQ_{max} - 0.002$ α.μ.)

Υπενθυμίζεται πως VQ_{max} είναι η τάση κατά την οποία απορροφάται η μέγιστη άεργος ισχύς ($-Q_{max}$) και VQ_{min} η τάση κατά την οποία παρέχεται η μέγιστη άεργος ισχύς (Q_{max}), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6.

Στη συνέχεια ενεργοποιείται ο Q(V) ελεγκτής και καταγράφονται οι φασικές τάσεις, η άεργος και ενεργός ισχύς για κάθε φάση. Η δοκιμή επαναλαμβάνεται με εναλλαγή των παραπάνω τιμών τάσης (τρεις δοκιμές συνολικά).

Η επίδραση του Q(V) ελέγχου στις φασικές τάσεις πρέπει να αξιολογηθεί. Για παράδειγμα, στην περίπτωση εισαγωγής στον Q(V) ελεγκτή μεμονωμένης τάσης (της φάσης B), η τάση της ίδιας φάσης θα αυξηθεί προς την ονομαστική τιμή, αλλά οι ήδη υψηλές τάσεις των φάσεων A και Γ θα αυξηθούν περαιτέρω (και πιθανώς να υπερβούν τη μέγιστη επιτρεπόμενη τάση), όπως φάνηκε στις προσομοιώσεις της παραγράφου 3.4.1.2 (Σχήματα 3.14, 3.15 και 3.16). Επιπλέον, τυχόν αποσύνδεση του αντιστροφέα εξαιτίας των τάσεων που προκύπτουν πρέπει να σημειωθεί.

Σημειώνεται πως απαιτείται σταθερή ενεργός ισχύς (π.χ. η ονομαστική) κατά τη δοκιμή. Αν ο αντιστροφέας ΔΠ στην ονομαστική ισχύ περιορίζει την ενεργό ισχύ προκειμένου να παρέχει/απορροφήσει άεργο ισχύ (εξαιτίας περιορισμού στο ρεύμα) η δοκιμή πρέπει να εκτελείται και σε χαμηλότερη ενεργό ισχύ.

3.5.2.4) Q(V) έλεγχος σε μεταβατική κατάσταση

Όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 3.2.2, υπάρχει η πιθανότητα αστάθειας του Q(V) ελεγκτή μονάδας ΔΠ. Παρόλα αυτά, η ευστάθεια του ελέγχου δεν εξετάζεται στις υφιστάμενες διαδικασίες δοκιμών. Στα FGW-Part3 και CEI 0-21 προτείνονται κάποιες δοκιμές δυναμικής λειτουργίας (π.χ. απόκριση σε βηματική αλλαγή της αέργου ισχύος), χωρίς όμως να γίνεται αναφορά στην ευστάθεια του Q(V) ελέγχου. Προτείνεται η παρακάτω δοκιμή.

Επιλέγεται αντίσταση δικτύου που αντιστοιχεί σε χαμηλή ισχύ βραχυκύκλωσης σε σχέση με την φαινόμενη ισχύ της ΔΠ (π.χ. $S_{short_circuit}/S_n=5$), εφόσον η αντίσταση του δικτύου επηρεάζει την ευστάθεια του Q(V) ελέγχου. Ο Q(V) ελεγκτής ενεργοποιείται με τους παρακάτω τρόπους: βηματικές αλλαγές τάσης (από τον προσομοιωτή δικτύου), βηματικές αλλαγές ενεργού ισχύος της ΔΠ και «χειροκίνητα» (π.χ. από τον διαχειριστή του δικτύου διανομής). Η προτεινόμενη διαδικασία δοκιμής φαίνεται στον Πίνακα 3.2. Σημειώνεται πως οι τιμές της τάσης αναφέρονται στους ακροδέκτες της ΔΠ, οπότε η τάση του προσομοιωτή δικτύου πρέπει να προσαρμοστεί αναλόγως.

1) Βηματικές αλλαγές τάσης	2) Βηματικές αλλαγές ενεργού ισχύος	3) «Χειροκίνητη» ενεργοποίηση
i) Από την ονομαστική τάση (V_n) στην τάση μέγιστης απορρόφησης αέργου ισχύος (VQ_{max})	i) Μετάβαση από τη νεκρή ζώνη στη περιοχή γραμμικής μεταβολής ανύψωσης τάσης. (Αρχικά η τάση της ΔΠ πρέπει να είναι λίγο μικρότερη από το άνω όριο της νεκρής ζώνης $VQDB_{pos}$)	i) Αρχικά η ΔΠ λειτουργεί με τάση εντός της περιοχής γραμμικής μεταβολής ανύψωσης ή πτώσης τάσης και ο Q(V) ελεγκτής είναι απενεργοποιημένος
ii) Από την ονομαστική τάση (V_n) στην τάση μέγιστης παροχής αέργου ισχύος (VQ_{min})	ii) Μετάβαση από τη νεκρή ζώνη στη περιοχή γραμμικής μεταβολής πτώσης τάσης. (Αρχικά η τάση της ΔΠ πρέπει να είναι λίγο μεγαλύτερη από το κάτω όριο της νεκρής ζώνης $VQDB_{neg}$)	ii) Στη συνέχεια ο Q(V) ελεγκτής ενεργοποιείται (π.χ. λαμβάνει εντολή από τον διαχειριστή του δικτύου)
iii) Από VQ_{min} σε VQ_{max} και αντίστροφα	—	—
iv) Μικρές αλλαγές στην τάση όταν η ΔΠ λειτουργεί στο μέσο της περιοχής γραμμικής μεταβολής	—	—
Συνθήκες		
Σταθερή ενεργός ισχύς της ΔΠ ίση με την ονομαστική	Σταθερή τάση εξόδου του προσομοιωτή δικτύου	Σταθερή ενεργός ισχύς της ΔΠ ίση με την ονομαστική
—	—	Σταθερή τάση εξόδου του προσομοιωτή δικτύου

Πίνακας 3.2. Προτεινόμενη διαδικασία δοκιμής του Q(V) ελεγκτή σε μεταβατική κατάσταση

Κατά τη δοκιμή καταγράφεται η χρονική απόκριση της αέργου ισχύος, η ενεργός ισχύς και η τάση. Ο χρόνος αποκατάστασης μπορεί να υπολογιστεί παρόμοια με το FGW-Part 3. Πιθανές ταλαντώσεις στην τάση, στην άεργο και στην ενεργό ισχύ πρέπει να καταγραφούν και να αξιολογηθούν. Επιπλέον, ο Q(V) ελεγκτής χρησιμοποιεί μέθοδο εξομάλυνσης της αέργου ισχύος εξόδου (π.χ. φίλτρο πρώτης τάξης ή περιοριστής ρυθμού μεταβολής) η ακρίβεια της οποίας θα μπορούσε να εκτιμηθεί.

3.5.2.5) Περιορισμός ενεργού ισχύος για ρύθμιση τάσης

Ο περιορισμός της ενεργού ισχύος μπορεί να υλοποιηθεί με γραμμική χαρακτηριστική $P(V)$ (Σχήμα 3.7) ή με PI ελεγκτή (ώστε η τάση να φτάσει την επιθυμητή τιμή). Προτείνεται η παρακάτω δοκιμή για αυτή τη λειτουργία.

Επιλέγεται αντίσταση δικτύου που αντιστοιχεί σε χαμηλή ισχύ βραχυκύκλωσης σε σχέση με την φαινόμενη ισχύ της ΔΠ. Αρχικά, ο ελεγκτής αέργου ισχύος είναι απενεργοποιημένος και η ΔΠ λειτουργεί στην ονομαστική ενεργό ισχύ. Αν η ΔΠ λειτουργεί με γραμμική χαρακτηριστική $P(V)$, εκτελείται παρόμοια δοκιμή με την προαναφερόμενη δοκιμή του $Q(V)$ ελέγχου σε μόνιμη κατάσταση και συμμετρική λειτουργία.

Αν χρησιμοποιείται PI ελεγκτής για τον περιορισμό της ενεργού ισχύος, εφαρμόζεται βηματική αύξηση της τάσης από τον προσομοιωτή δικτύου, έτσι ώστε η τάση της ΔΠ να ξεπεράσει το κατώφλι του ελεγκτή. Καταγράφονται ο απαιτούμενος χρόνος για να φτάσει η τάση της ΔΠ στην επιθυμητή τιμή, η απόκλιση της τάσης και η ενεργός ισχύς στη μόνιμη κατάσταση.

Στη συνέχεια, ενεργοποιείται ο ελεγκτής αέργου ισχύος (και για τις δύο παραπάνω περιπτώσεις) και η δοκιμή επαναλαμβάνεται για να εκτιμηθεί η συνδυασμένη λειτουργία των ελεγκτών ενεργού και αέργου ισχύος.

Ο περιορισμός της ενεργού ισχύος εφαρμόζεται και στην παρακάτω περίπτωση. Η παροχή/απορρόφηση αέργου ισχύος αυξάνει το ρεύμα. Αν ο αντιστροφέας δεν έχει υπερδιαστασιολογηθεί, όταν λειτουργεί σε υψηλή ενεργό ισχύ και απαιτηθεί παροχή/απορρόφηση αέργου ισχύος, περικόπτει ενεργό ισχύ προκειμένου να τηρηθεί το όριο υπερέντασης. Ακολουθεί μία πρόταση δοκιμής.

Επιλέγεται αντίσταση δικτύου που αντιστοιχεί σε χαμηλή ισχύ βραχυκύκλωσης σε σχέση με την φαινόμενη ισχύ της ΔΠ. Η ενεργός ισχύς αυξάνεται σταδιακά ώστε να μεταβεί ο αντιστροφέας στην περιοχή γραμμικής μεταβολής της $Q(V)$ χαρακτηριστικής. Στη μέγιστη φαινόμενη ισχύ, η ενεργός ισχύς πρέπει να περιοριστεί για την παροχή/απορρόφηση αέργου ισχύος σύμφωνα με την $Q(V)$ χαρακτηριστική. Σε περίπτωση που ο $Q(V)$ ελεγκτής είναι πολύ γρήγορος, μπορεί να προκύψουν ταλαντώσεις στην άεργο ισχύ και στην τάση, όπως παρουσιάζεται στο [75].

3.5.2.6) Ρύθμιση συχνότητας (υποσυχνότητα, μεταβατική κατάσταση, αδράνεια)

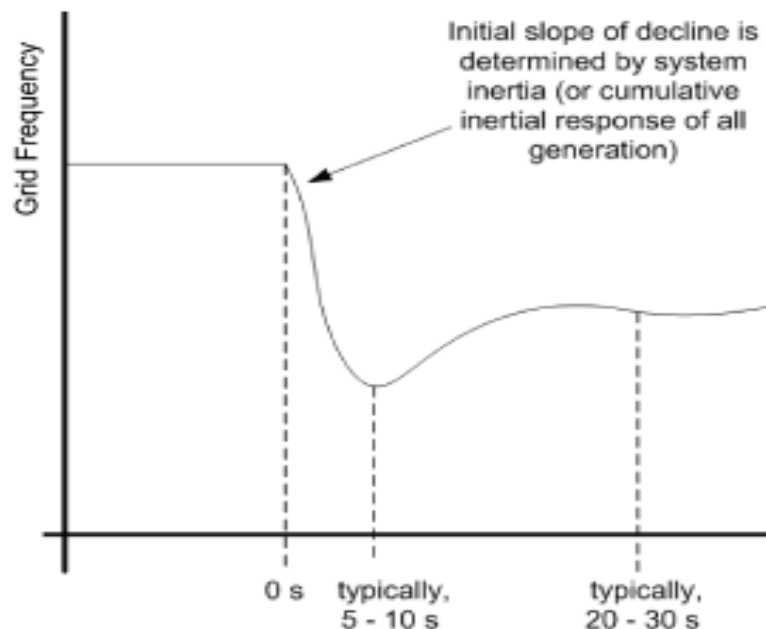
Επί του παρόντος, δεν έχουν οριστεί επαρκώς δοκιμές υποσυχνότητας, μεταβατικής κατάστασης και παροχής εικονικής αδράνειας από μονάδες ΔΠ και αποθήκευσης. Τα FGW-Part 3 και CIE-0-21 ορίζουν δοκιμές μόνιμης κατάστασης για τον περιορισμό της ενεργού ισχύος της ΔΠ σε υπερσυχνότητα με βάση την καμπύλη στατισμού $P(f)$ που αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.3 (Σχήμα 3.11α).

Προτείνεται δοκιμή υποσυχνότητας, όπου η ενεργός ισχύς της ΔΠ πρέπει να αυξάνεται σύμφωνα με καμπύλη στατισμού $P(f)$. Η δοκιμή βασίζεται στη δοκιμή υπερσυχνότητας που περιγράφεται στο FGW-Part 3. Πραγματοποιούνται μετρήσεις σε τουλάχιστον έξι τιμές συχνότητας και σε τουλάχιστον δύο επίπεδα ενεργού ισχύος (π.χ. 80% και 40% της

ονομαστικής ενεργού ισχύος). Η νεκρή ζώνη και η κλίση της καμπύλης υπολογίζονται και συγκρίνονται με τις παραμέτρους του αντιστροφέα ΔΠ.

Επιπλέον, προτείνεται δοκιμή σε μεταβατική κατάσταση για τον $P(f)$ έλεγχο σε υπερσυχνότητα και υποσυχνότητα. Καταρχάς εφαρμόζεται βηματική μεταβολή της συχνότητας από τον προσομοιωτή δικτύου και καταγράφεται η ενεργός ισχύς. Από την τιμή της ενεργού ισχύος και της συχνότητας στη μόνιμη κατάσταση υπολογίζεται η κλίση της καμπύλης στατισμού (για γνωστή νεκρή ζώνη) και συγκρίνεται με την παράμετρο του αντιστροφέα της ΔΠ. Επίσης, υπολογίζεται ο χρόνος ανόδου και αποκατάστασης της ενεργού ισχύος. Στη συνέχεια εφαρμόζεται τυπικό προφίλ μεταβολής της συχνότητας (π.χ. παρόμοιο με του Σχήματος 3.18 για υποσυχνότητα [127]), καταγράφεται η ενεργός ισχύς και αξιολογείται η απόκριση της ΔΠ στη μεταβατική και στη μόνιμη κατάσταση.

Δοκιμή για την παροχή εικονικής αδράνειας από ΔΠ ή αποθήκευση (παράγραφος 3.3.2) δεν έχει οριστεί, οπότε προτείνεται παρακάτω. Ο προαναφερόμενος $P(f)$ ελεγκτής στατισμού είναι απενεργοποιημένος ώστε να λαμβάνεται υπόψη μόνο η αδρανειακή συμπεριφορά. Καταρχάς εφαρμόζεται προφίλ συχνότητας σταθερού ρυθμού μεταβολής (π.χ. 1 Hz/s) από τον προσομοιωτή δικτύου και καταγράφεται η ενεργός ισχύς. Από την τιμή της ενεργού ισχύος υπολογίζεται το κέρδος της εικονικής αδράνειας (k_i) με βάση τη σχέση (3.29) (για την περίπτωση «εικονικής σύγχρονης γεννήτριας» (VSG) με μονάδα αποθήκευσης). Στη συνέχεια εφαρμόζεται τυπικό προφίλ μεταβολής της συχνότητας από τον προσομοιωτή δικτύου (π.χ. παρόμοιο με το Σχήμα 3.18 για υποσυχνότητα). Καταγράφεται η ενεργός ισχύς και αξιολογείται η απόκριση της συσκευής. Τέλος, μπορεί να ενεργοποιηθεί ο $P(f)$ ελεγκτής στατισμού και να δοκιμαστεί η συνδυασμένη λειτουργία των δύο ελεγκτών εφαρμόζοντας το τυπικό προφίλ συχνότητας.



Σχήμα 3.18. Τυπικό προφίλ συχνότητας [127]

3.5.3) Προτεινόμενες PHIL δοκιμές

Η PHIL μέθοδος επιτρέπει τη δοκιμή εξοπλισμού σε κλειστό βρόχο με προσομοιωμένο σύστημα που περιλαμβάνει εξοπλισμό των σύγχρονων ΣΗΕ (π.χ. αντιστροφείς ΔΠ και αποθήκευσης). Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.1, μεγάλα κέντρα δοκιμών θεωρούν την PHIL μέθοδο ως πολλά υποσχόμενη για την πραγματοποίηση τυποποιημένων δοκιμών στο μέλλον, εφόσον τα δίκτυα και ο εξοπλισμός γίνονται πιο σύνθετα.

Αν και η PHIL μέθοδος έχει εφαρμοστεί για ερευνητικούς σκοπούς και για εξειδικευμένες δοκιμές εξοπλισμού για τη βιομηχανία, δεν έχει ακόμα χρησιμοποιηθεί σε τυποποιημένες δοκιμές. Στη συνέχεια εντοπίζονται οι βασικές αιτίες. Καταρχάς απαιτείται ακριβός και εξειδικευμένος εξοπλισμός (ΨΠΠΧ και ενισχυτής ισχύος) για τη διενέργεια των δοκιμών. Επιπλέον, υπάρχουν δύο εγγενή ζητήματα της PHIL μεθόδου: η πιθανότητα αστάθειας και η πιθανή ελάττωση της ακρίβειας (Κεφάλαιο 2). Η ευστάθεια είναι προϋπόθεση για την ασφαλή εκτέλεση της δοκιμής (εφόσον μπορεί να οδηγήσει σε βλάβη του εξοπλισμού) και η ακρίβεια έχει μεγάλη σημασία για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Αρκετή έρευνα έχει εκπονηθεί και έχουν προταθεί λύσεις, παρόλα αυτά υπάρχουν ακόμα ανοιχτά θέματα, με αποτέλεσμα η PHIL μέθοδος να μην θεωρείται ώριμη για τυποποιημένες δοκιμές. Επιπλέον, υπάρχει περιορισμένος αριθμός μελετών περίπτωσης που να φανερώνουν την ξεκάθαρη αξία των PHIL δοκιμών σε σχέση με τις συμβατικές δοκιμές στον τομέα της ΔΠ.

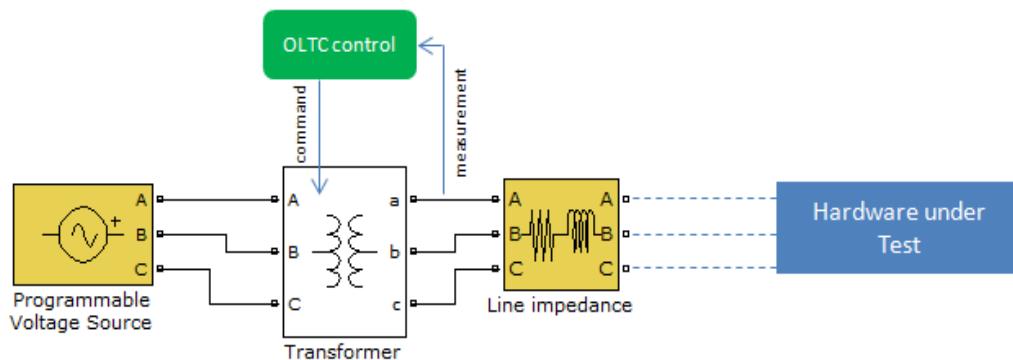
Σε αυτήν την παράγραφο προτείνονται μελέτες περίπτωσης με σκοπό να δείξουν την αξία της PHIL μεθόδου σε δοκιμές επικουρικών υπηρεσιών ΔΠ. Για τη λεπτομερή υλοποίηση των μελετών περίπτωσης, προτείνεται η διαδικασία αναφοράς PHIL δοκιμών που ορίζεται στην παράγραφο 4.5. Οι προτεινόμενες PHIL δοκιμές υλοποιούνται στις παραγράφους 5.3 και 5.5.

3.5.3.1) Συνεργασία μεταξύ ΣΑΤΥΦ και ΔΠ με δυνατότητα ρύθμισης της τάσης

Μονάδα ΔΠ που λειτουργεί με έλεγχο τάσης (π.χ. $Q(V)$, $\cos\phi(P)$ χαρακτηριστική) συνδέεται σε μετασχηματιστή που διαθέτει ΣΑΤΥΦ μέσω γραμμής διανομής. Η απορροφούμενη άεργος ισχύς από τη ΔΠ (εξαιτίας της ανύψωσης τάσης με βάση τον $Q(V)$ ελεγκτή ή εξαιτίας της παραγωγής ενεργού ισχύος με βάση τον $\cos\phi(P)$ ελεγκτή) ρέει μέσω του μετασχηματιστή. Εφόσον ο μετασχηματιστής είναι κυρίως επαγωγικό στοιχείο προκαλείται μείωση της τάσης του δευτερεύοντος τυλίγματος. Σε περίπτωση που το ΣΑΤΥΦ ρυθμίζει την τάση του δευτερεύοντος θα αυξήσει την τάση, ενώ υπάρχει ανύψωση τάσης στο ζυγό της ΔΠ. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να εξεταστεί με την προτεινόμενη PHIL δοκιμή προκειμένου να αποφευχθεί προβληματική συνεργασία των δύο ελεγκτών. Επιπλέον, στην περίπτωση βηματικής αύξησης της τάσης του ανάντη δικτύου, μπορεί να διερευνηθεί ο χρονικός συντονισμός μεταξύ των δύο ελεγκτών.

Στην PHIL υλοποίηση, το φυσικό σύστημα αποτελείται από πραγματικό αντιστροφέα ΔΠ που λειτουργεί με έλεγχο τάσης και είναι συνδεδεμένος σε DC πηγή. Το προσομοιωμένο σύστημα που εκτελείται στον ΨΠΠΧ αποτελείται από ελεγχόμενη πηγή τάσης, σύνθετη αντίσταση ανάντη δικτύου, μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ και γραμμή διανομής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.19. Το ΣΑΤΥΦ μπορεί να ρυθμίζει την τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή ή στο ζυγό της ΔΠ (εφαρμόζοντας αντιστάθμιση πτώσης τάσης ή

λαμβάνοντας απομακρυσμένη μέτρηση). Η προτεινόμενη διαδικασία δοκιμής παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.3.



Σχήμα 3.19. Τοπολογία της PHIL δοκιμής αλληλεπίδρασης ΣΑΤΥΦ και ΔΠ με δυνατότητα ρύθμισης τάσης

Διαδικασία Δοκιμής	
i) Εκτέλεση του μοντέλου στον ΨΠΠΧ	
ii) Σύνδεση του φυσικού συστήματος σε κλειστό βρόχο και εκτέλεση της PHIL δοκιμής:	
	- Αρχικά, ο ελεγκτής της τάσης της ΔΠ (π.χ. $Q(V)$ ή $\cos\phi(P)$) είναι απενεργοποιημένος. - Η ΔΠ λειτουργεί σε ονομαστική ενεργό ισχύ και προκαλεί ανύψωση της τάσης στο ζυγό της ΔΠ. - Ενεργοποιείται ο ελεγκτής της τάσης της ΔΠ. - Επιπλέον, πραγματοποιείται βηματική αύξηση της τάσης του ανάντη δικτύου.
iii) Σύγκριση/επαλήθευση των φυσικών μετρήσεων (V , P , Q) με τις μετρήσεις του ΨΠΠΧ στον κοινό ζυγό.	
iv) Αξιολόγηση των αλληλεπιδράσεων του ελεγκτή τάσης της ΔΠ και του ελεγκτή του ΣΑΤΥΦ	

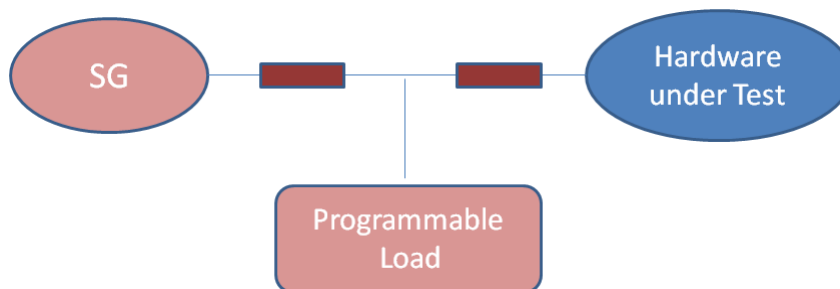
Πίνακας 3.3. Διαδικασία της PHIL δοκιμής αλληλεπίδρασης μεταξύ ΣΑΤΥΦ και ΔΠ με δυνατότητα ρύθμισης τάσης

Η προτεινόμενη δοκιμή επιτρέπει τη διερεύνηση της αλληλεπίδρασης του ελεγκτή τάσης της πραγματικής ΔΠ και του ΣΑΤΥΦ. Αντίστοιχη συμβατική δοκιμή με πραγματικό

εξοπλισμό θα ήταν δύσκολη εξαιτίας του μεγάλου κόστους και όγκου. Η αυξημένη ευελιξία επιτρέπει τον εύκολο σχεδιασμό της δοκιμής ώστε να μελετηθούν προβληματικές συνθήκες. Η σύνθετη αντίσταση της γραμμής, τα χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή και του ελεγκτή του ΣΑΤΥΦ μπορούν εύκολα να τροποποιηθούν στο περιβάλλον προσομοίωσης του ΨΠΠΧ. Επιπλέον, η ενεργός και άεργος ισχύς της πραγματικής ΔΠ μπορούν να αυξηθούν εικονικά στον ΨΠΠΧ (π.χ. πολλαπλασιάζοντας το ρεύμα του δοκιμίου με κάποιο κέρδος στον ΨΠΠΧ) προκειμένου να επιτευχθεί ανύψωση τάσης.

3.5.3.2) $P(f)$ έλεγχος και παροχή εικονικής αδράνειας

Προτείνεται PHIL δοκιμή του $P(f)$ ελέγχου και της παροχής εικονικής αδράνειας από μονάδα ΔΠ ή/και αποθήκευσης. Το προσομοιωμένο σύστημα αποτελείται από σύγχρονη γεννήτρια (με κινητήρια μηχανή, ρυθμιστή στροφών και αυτόματο ρυθμιστή τάσης), αντιστάσεις γραμμών και ελεγχόμενο φορτίο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.20. Μοντέλα μετασχηματιστών μπορούν να προστεθούν στη σύγχρονη γεννήτρια, στο φορτίο και στο δοκίμιο ανάλογα με τα επίπεδα τάσης. Η προτεινόμενη δοκιμή περιγράφεται στον Πίνακα 3.4 θεωρώντας μονάδα αποθήκευσης.



Σχήμα 3.20. Τοπολογία της PHIL δοκιμής ρύθμισης συχνότητας από ΔΠ ή/και αποθήκευση

Διαδικασία Δοκιμής	
i) Εκτέλεση του μοντέλου στον ΨΠΠΧ με αποσυνδεδεμένο το φυσικό σύστημα:	
	Βηματικές μεταβολές (αύξηση/μείωση) της ενεργού ισχύος του φορτίου στο λογισμικό του ΨΠΠΧ.
ii) Σύνδεση του φυσικού συστήματος σε κλειστό βρόχο και εκτέλεση της PHIL δοκιμής:	
	Επανάληψη των βηματικών μεταβολών (αύξηση/μείωση) της ενεργού ισχύος του φορτίου στο λογισμικό του ΨΠΠΧ.
iii) Σύγκριση/επαλήθευση των φυσικών μετρήσεων (f , P , Q) με τις μετρήσεις του ΨΠΠΧ στον κοινό ζυγό.	

iv) Σύγκριση της συχνότητας της PHIL δοκιμής με τη συχνότητα της προσομοίωσης χωρίς το φυσικό σύστημα. Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων στη μεταβατική και στη μόνιμη κατάσταση.

Πίνακας 3.4. Διαδικασία της PHIL δοκιμής ρύθμισης συχνότητας

Η PHIL δοκιμή εξετάζει την αλληλεπίδραση κλειστού βρόχου του δοκιμίου με το προσομοιωμένο σύστημα, το οποίο δεν είναι εφικτό στις συμβατικές δοκιμές εξαιτίας της απουσίας ανατροφοδότησης από το δοκίμιο. Δηλαδή, δεν αξιολογείται μόνο η απόκριση της ΔΠ (ενεργός ισχύς), αλλά και η επίδραση της στη συχνότητα του συστήματος. Επιτυγχάνεται μεγάλη ευελιξία εφόσον τα χαρακτηριστικά της σύγχρονης γεννήτριας (π.χ. σταθερά αδράνειας, στατισμός), των γραμμών και του φορτίου μπορούν εύκολα να τροποποιηθούν. Η μόνη εναλλακτική μέθοδος ελέγχου/δοκιμής των αλληλεπιδράσεων θα ήταν η σύνδεση του αντιστροφέα σε πραγματική σύγχρονη γεννήτρια κατάλληλης ισχύος, σταθεράς αδράνειας, ρυθμιστή στροφών κτλ και φορτίο. Η δυσκολία που θα είχε αυτή η υλοποίηση και η ιδιαίτερα περιορισμένη ευελιξία της φανερώνει τα πλεονεκτήματα της PHIL μεθόδου. Δοκιμή PHIL με αντίστοιχη μέθοδο υλοποιήθηκε στο [31].

Τέλος, σημειώνεται πως η PHIL μέθοδος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε τυποποιημένες δοκιμές της προστασίας έναντι νησιδοποίησης αντιστροφέν ΔΠ. Τα ωμικά, επαγωγικά και χωρητικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται για την ελαχιστοποίηση της ανταλλαγής ισχύος με το δίκτυο θα μπορούσαν να προσομοιωθούν στον ΨΠΠΧ, παρέχοντας έτσι πολύ ακριβή ρύθμιση, χωρίς τη χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού (ελεγχόμενα R-L-C στοιχεία υψηλής ακρίβειας) και τους περιορισμούς του. Η προστασία έναντι νησιδοποίησης δεν αποτελεί επικουρική υπηρεσία, αλλά όπως αναφέρθηκε μπορεί να επηρεαστεί από αλγορίθμους επικουρικών υπηρεσιών (π.χ. $P(f)$ χαρακτηριστική).

3.6) Σύνοψη και συμπεράσματα

Έχει γίνει πλέον σαφής η ανάγκη παροχής επικουρικών υπηρεσιών από τις μονάδες ΔΠ. Στο Κεφάλαιο αυτό περιγράφηκε το πρόβλημα της ανύψωσης τάσης εξαιτίας της διείσδυσης ΔΠ, καθώς και οι βασικές μέθοδοι συμβολής της ΔΠ στη ρύθμιση τάσης. Αναλύθηκε θεωρητικά η ευστάθεια του ελέγχου τάσης $Q(V)$ που εφαρμόζεται τοπικά τους αντιστροφείς των μονάδων ΔΠ. Παρουσιάστηκε η δυνατότητα συνεισφοράς της ΔΠ και αποθήκευσης στη ρύθμιση συχνότητας μέσω καμπύλης στατισμού και παροχής εικονικής αδράνειας.

Τα τελευταία χρόνια έχει δημοσιευθεί πλήθος προτύπων/οδηγιών εξαιτίας της αυξημένης ενσωμάτωσης μονάδων ΔΠ, στα οποία ορίζονται απαιτήσεις που αφορούν επικουρικές υπηρεσίες. Σε αυτό το Κεφάλαιο αναλύονται και συγκρίνονται τα σημαντικότερα έγγραφα και γίνονται φανερές οι διαφοροποιήσεις. Η απουσία εναρμόνισης δυσκολεύει τους κατασκευαστές εξοπλισμού, αλλά και τα εργαστήρια διαπιστευμένων δοκιμών. Εντοπίζονται αντιφάσεις, ασαφείς και ελλιπείς απαιτήσεις και τονίζονται υποσχόμενες

προσεγγίσεις. Ειδικότερα, πραγματοποιούνται προσομοιώσεις για τον $Q(V)$ έλεγχο σε ασύμμετρες συνθήκες, που δείχνουν την ανάγκη καθορισμού ξεκάθαρων απαιτήσεων για την αποφυγή μελλοντικών προβλημάτων. Πιο προηγμένες απαιτήσεις επικουρικών υπηρεσιών θα χρειαστεί να οριστούν για την ομαλή μετάβαση σε δίκτυα με υψηλή ενσωμάτωση ΔΠ και παραγωγής από ΑΠΕ. Όπως έδειξε το «πρόβλημα των 50.2Hz», είναι σημαντική η πρόβλεψη πιθανών προβλημάτων στη διαδικασία τυποποίησης ώστε να αποφεύγονται δύσκολες λύσεις στο μέλλον.

Οι προηγμένες λειτουργίες που απαιτούνται από τα πρόσφατα πρότυπα/οδηγίες για τις μονάδες ΔΠ σηματοδοτούν την ανάγκη για ολοκληρωμένες διαδικασίες εργαστηριακών δοκιμών. Αν και αρκετές διαδικασίες δοκιμών έχουν οριστεί στα πρότυπα/οδηγίες, ολοκληρωμένες δοκιμές για ορισμένες απαιτήσεις απουσιάζουν. Επιπλέον, οι δοκιμές που ορίζονται σε διαφορετικά έγγραφα δεν είναι πάντα εναρμονισμένες. Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συνοπτικά υφιστάμενες διαδικασίες δοκιμών και προσδιορίζονται ελλείψεις. Προτείνονται προηγμένες διαδικασίες δοκιμών συμβατικού τύπου για συγκεκριμένες απαιτήσεις, αλλά και για προηγμένες λειτουργίες που δεν έχουν ακόμα οριστεί σε βάθος στα πρότυπα. Γίνεται φανερό πως εξαιτίας της εγγενούς πολυπλοκότητας της ΔΠ και των προηγμένων πρόσφατων απαιτήσεων, πολλές παράμετροι και περιορισμοί πρέπει να ληφθούν υπόψη για τον εις βάθος έλεγχο της συσκευής-υπό-δοκιμή. Ο έλεγχος της αλληλεπίδρασης της ΔΠ με άλλες συσκευές του δικτύου είναι εφικτός πραγματοποιώντας PHIL δοκιμές. Προτείνονται PHIL δοκιμές που αναδεικνύουν την αξία της PHIL μεθόδου σε σχέση με τις συμβατικές δοκιμές, που θα ήταν δύσκολο και δαπανηρό να πραγματοποιηθούν σε συμβατικό περιβάλλον δοκιμών. Οι προτεινόμενες PHIL δοκιμές υλοποιούνται εργαστηριακά στο Κεφάλαιο 5. Όσο η πολυπλοκότητα των δικτύων/συσκευών αυξάνεται και η PHIL μέθοδος γίνεται πιο ώριμη, ο ρόλος της στις μελλοντικές δοκιμές αναμένεται να γίνει πιο σημαντικός.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ POWER HARDWARE IN THE LOOP

4.1) Εισαγωγή

Η ανάπτυξη κατάλληλων εργαστηριακών υποδομών για την εκτέλεση PHIL πειραμάτων είναι απαιτητική. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο σχεδιασμό της τοπολογίας, όπως στη διασύνδεση μεταξύ του προσομοιωμένου και του φυσικού συστήματος. Όπως εξηγήθηκε στο Κεφάλαιο 2, πιθανή εκδήλωση αστάθειας μπορεί να προκαλέσει βλάβη στον εξοπλισμό. Επίσης, απαιτείται εξέταση της ακρίβειας της προσομοίωσης.

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν καταγραφεί λίγες εμπειρίες και πρακτικές συμβουλές πάνω στην εργαστηριακή ανάπτυξη PHIL τοπολογιών: όπως στην επιλογή κατάλληλου εξοπλισμού (π.χ. τεχνολογία του ενισχυτή ισχύος), στην προστασία του πειράματος, σε ζητήματα διασύνδεσης, στα στάδια του πειράματος κ.α. Η αναλυτική περιγραφή της σχεδίασης και ανάπτυξης της PHIL διάταξης και των εφαρμογών στο ΕΜΠ έχει ως στόχο να συνεισφέρει στην ανάπτυξη αντίστοιχων διατάξεων σε άλλα εργαστήρια και στην ευρύτερη εφαρμογή αυτής της μεθόδου.

Πρωτοπόροι στην ανάπτυξη της PHIL μεθόδου ήταν το South Carolina University (ΗΠΑ) και στην πραγματοποίηση σύνθετων εφαρμογών το CAPS-Florida State University (ΗΠΑ). Το 2010 (που το ΕΜΠ ξεκίνησε την ανάπτυξη της διάταξης) 7 εργαστήρια είχαν αναπτύξει PHIL διάταξη. Στη βιβλιογραφία υπήρχαν περιορισμένες πληροφορίες για την υλοποίηση τέτοιων εφαρμογών. Στον Πίνακα 4.1 φαίνονται τα περισσότερα εργαστήρια που έχουν αναφέρει αυτή τη δυνατότητα μέχρι σήμερα. Είναι σαφές πως παρουσιάζεται αυξανόμενο ενδιαφέρον σε παγκόσμιο επίπεδο.

Στο παρόν Κεφάλαιο [A.9][B.18] περιγράφεται η σχεδίαση και ανάπτυξη ενός PHIL περιβάλλοντος στο εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) του ΕΜΠ για εφαρμογές ΔΠ. Παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του εξοπλισμού, με έμφαση στη διεπαφή ισχύος, η συνάρτηση μεταφοράς και αλγόριθμοι προστασίας του πειράματος σε περίπτωση αστάθειας. Επιπλέον, ορίζεται διαδικασία, τοπολογία και δίκτυο αναφοράς για την πραγματοποίηση PHIL δοκιμών. Η επιτυχής λειτουργία της διάταξης επαληθεύεται με πειραματικές μετρήσεις. Αρχικά, υλοποιείται διαιρέτης τάσης σε PHIL διάταξη. Εν συνεχεία, τα Φ/Β πλαίσια και ο Φ/Β αντιστροφέας του εργαστηρίου συνδέονται σε απλό προσομοιωμένο δίκτυο ώστε να φανεί καθαρά η αλληλεπίδραση με το προσομοιωμένο σύστημα. Διατηρώντας το ίδιο δοκίμιο, προσομοιώνεται στον ΨΠΠΧ δίκτυο αγροτικής περιοχής ΧΤ που περιλαμβάνει Φ/Β, τα οποία δέχονται ως είσοδο πραγματικές μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας. Πραγματοποιούνται προσομοιώσεις σε μόνιμη και μεταβατική κατάσταση, όπου καταγράφεται η τάση στους ζυγούς.

South Carolina University (ΗΠΑ)	State Grid Smart Grid Research Institute (Κίνα)
CAPS-Florida State University (ΗΠΑ)	Idaho National Laboratory (ΗΠΑ)
Grenoble Institute of Technology (Γαλλία)	RTDS Technologies (Καναδάς)
Osaka University (Ιαπωνία)	Aalborg University (Δανία)
University of Strathclyde (Ηνωμένο Βασίλειο)	University of Illinois (ΗΠΑ)
Korea Electrotechnology Research Institute (Κορέα)	Kiel University (Γερμανία)
Queensland University of Technology (Αυστραλία)	Institut National de l'Énergie Solaire (Γαλλία)
Delft University of Technology (Ολλανδία)	DNV-GL (KEMA) (Ολλανδία)
Austrian Institute of Technology (Αυστρία)	West Virginia University (ΗΠΑ)
National Technical University of Athens (Ελλάδα)	University of Lille Nord de France (Γαλλία)
RWTH Aachen University (Γερμανία)	Clemson University (ΗΠΑ)
University of Manitoba (Καναδάς)	Nagoya Institute of Technology (Ιαπωνία)
National Renewable Energy Laboratory (ΗΠΑ)	Indian Institute of Technology Kanpur (Ινδία)
Fraunhofer IWES (Γερμανία)	Tsinghua University (Κίνα)
Technical University of Denmark (Δανία)	University of Guadalajara (Μεξικό)
University of Alcalá (Ισπανία)	Pohang University of Science and Technology (Κορέα)
University Carlos III of Madrid (Ισπανία)	Federal University of Campina Grande (Βραζιλία)

Πίνακας 4.1. Εργαστήρια ανά τον κόσμο που έχουν αναπτύξει PHIL διάταξη

4.2) Χαρακτηριστικά του εξοπλισμού

4.2.1) Ψηφιακός Προσομοιωτής Πραγματικού Χρόνου

Το εργαστήριο ΣΗΕ του ΕΜΠ διαθέτει Ψηφιακό Προσομοιωτή Πραγματικού Χρόνου (ΨΠΠΧ) της εταιρείας RTDS Technologies [8]. Ο ΨΠΠΧ εκμεταλλεύεται την αρχιτεκτονική της παράλληλης επεξεργασίας, χρησιμοποιώντας διαφορετικούς επεξεργαστές, που μπορεί να βρίσκονται σε ανεξάρτητες μονάδες που ονομάζονται racks. Κάθε rack αποτελείται από διάφορες κάρτες επεξεργασίας, επικοινωνίας, εισόδων και

εξόδων. Ένα backbone συνδέει όλες τις κάρτες ενός rack και διεκπεραιώνει την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ τους. Ο υπολογιστής του χρήστη συνδέεται με τον ΨΠΠΧ και αλληλεπιδρά μαζί του μέσω του λογισμικού RSCAD. Το RSCAD διαθέτει δύο υπο-προγράμματα το Draft και το Run-Time. Στο περιβάλλον Draft ο χρήστης σχεδιάζει το ΣΗΕ χρησιμοποιώντας έτοιμα μοντέλα από τη βιβλιοθήκη (π.χ. γεννήτριες, μετασχηματιστές, γραμμές κτλ) και δημιουργώντας δικά του μοντέλα (π.χ. ΔΠ, αποθήκευσης). Στο περιβάλλον Run-Time ο χρήστης ελέγχει παραμέτρους, έχει την εποπτεία του προσομοιωμένου συστήματος και μπορεί να αποθηκεύσει γραφικές παραστάσεις.

Οι κάρτες επεξεργασίας, επικοινωνίας, εισόδων και εξόδων παρέχονται από την RTDS. Οι παλαιότερες κάρτες επεξεργασίας είναι οι TPC (Tandem Processor Card), που διαθέτουν 2 επεξεργαστές τύπου DSP (Digital Signal Processor) στα 12 MHz. Οι TPC κάρτες αντικαταστάθηκαν από τις 3PC (Triple Processor Card), που διαθέτουν 3 επεξεργαστές τύπου DSP στα 40 MHz και τις RPC (RISC Processor Card) που χρησιμοποιούν δύο επεξεργαστές τύπου Power PC στα 600 MHz. Οι παραπάνω κάρτες μπορούν να πετύχουν βήμα προσομοίωσης της τάξης των 50 μ s. Οι πιο εξελιγμένες κάρτες ονομάζονται GPC (Giga Processor Card), που χρησιμοποιούν δύο επεξεργαστές τύπου Power PC στο 1 GHz, και PB5 που χρησιμοποιούν δύο επεξεργαστές τύπου Power PC στα 1.7 GHz. Οι GPC και PB5 κάρτες έχουν πολύ μεγαλύτερες υπολογιστικές δυνατότητες και μπορούν να λειτουργήσουν με βήμα προσομοίωσης έως 1-2 μ s, οπότε είναι κατάλληλες για τη μοντελοποίηση γρήγορων διακοπτικών φαινομένων (π.χ. PWM έλεγχος αντιστροφών). Οι κάρτες επικοινωνίας WIC (Workstation Interface Card) και οι πιο εξελιγμένες WIF, GTWIF επιτρέπουν την επικοινωνία του υπολογιστή του χρήστη με το RTDS μέσω Ethernet TCP/IP και οι IRC (Inter-Rack Communication Card) την παράλληλη λειτουργία μεταξύ διαφορετικών racks. Επιπλέον κάρτες έχουν αναπτυχθεί για αναλογικές και ψηφιακές εισόδους και εξόδους, για επικοινωνία με βάση το πρότυπο IEC 61850 κ.α.

Το εργαστήριο ΣΗΕ του ΕΜΠ διαθέτει 1 RTDS rack που αγοράστηκε το 1997. Στην πρώτη του μορφή [128][129] διέθετε 18 TPC κάρτες, δίνοντας τη δυνατότητα αναπαράστασης ΣΗΕ μέχρι 36 μονοφασικών ζυγών και μία κάρτα επικοινωνίας WIC. Η περιορισμένη υπολογιστική ισχύς επέτρεπε τη μοντελοποίηση μόνο μικρών δικτύων και επιπλέον οι βιβλιοθήκες που ήταν συμβατές με αυτές τις κάρτες δεν διέθεταν σημαντικά μοντέλα (π.χ. μονοφασική rms μέτρηση τάσης, ελεγχόμενο φορτίο P-Q). Το 2012 ο προσομοιωτής αναβαθμίστηκε με δύο κάρτες επεξεργασίας 3PC, μία κάρτα επικοινωνίας WIF και μία κάρτα αναλογικών εισόδων OADC (Optical Analogue Digital Converter). Το 2015 αποκτήθηκε μία σύγχρονη κάρτα επεξεργασίας GPC, η οποία αντικατέστησε τις 18 κάρτες παλαιού τύπου TPC, καθώς και κάρτα αναλογικών εισόδων GTAI (Gigabit-Transceiver Analogue Input), κάρτα αναλογικών εξόδων GTAO (Gigabit-Transceiver Analogue Output) και κάρτα ψηφιακών εισόδων/εξόδων GTFPI (Gigabit-Transceiver Front Panel Interface). Χάρη στις ισχυρότερες κάρτες επεξεργασίας πλέον αυξάνονται σημαντικά οι δυνατότητες προσομοίωσης και όσον αφορά τη μοντελοποίηση μεγαλύτερων δικτύων, αλλά και τη μοντελοποίηση γρήγορων διακοπτικών φαινομένων. Το RTDS του εργαστηρίου διαθέτει σήμερα τις παρακάτω κάρτες:

- Μία GPC κάρτα επεξεργασίας
- Δύο 3PC κάρτες επεξεργασίας
- Μία WIF κάρτα επικοινωνίας μεταξύ του RTDS και του υπολογιστή του χρήστη
- Μία κάρτα αναλογικών εισόδων OADC (6 εισοδοί, $\pm 10V$ peak)
- Μία κάρτα αναλογικών εισόδων GTAI (12 εισοδοί, $\pm 10V$ peak)
- Μία κάρτα αναλογικών εξόδων GTAO (12 εξοδοί, $\pm 10V$ peak)
- Μία κάρτα ψηφιακών εισόδων/εξόδων GTFPI (16 εισοδοί, 16 εξοδοί)

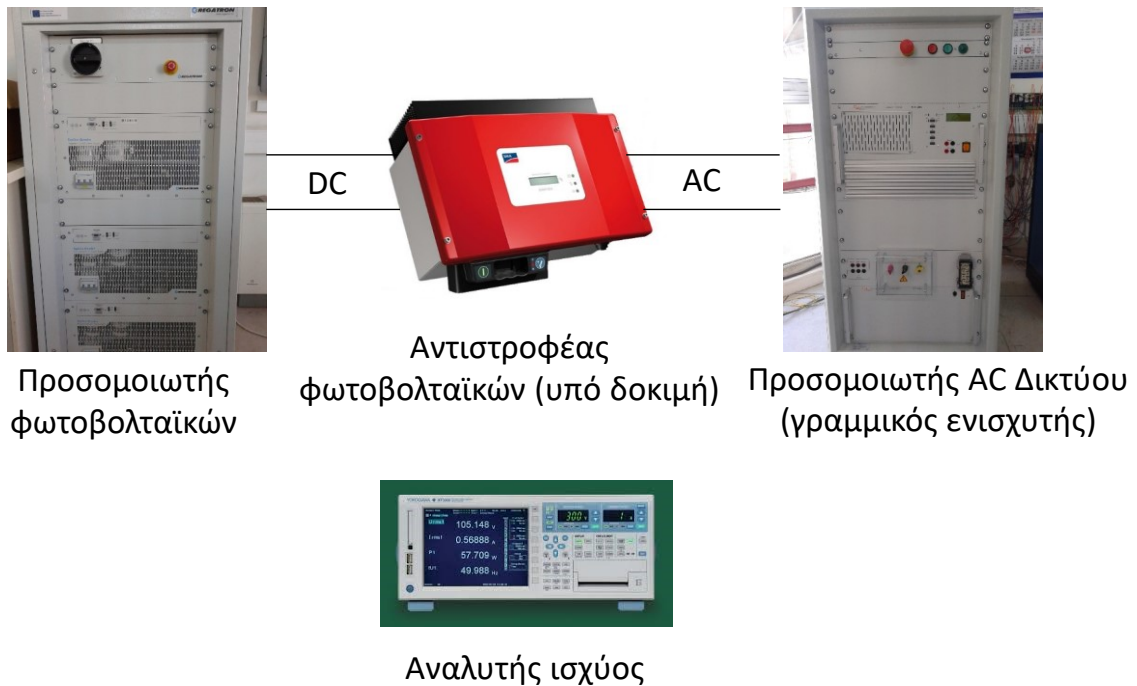
4.2.2) Φυσικό σύστημα

Το φυσικό σύστημα στα PHIL πειράματα αποτελείται από τους αντιστροφείς ΔΠ του μονοφασικού μικροδίκτυου του εργαστηρίου ΣΗΕ. Το μονοφασικό μικροδίκτυο περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά πλαίσια (1.1 kWp), μικρή ανεμογεννήτρια (1.7 kW), μονάδα αποθήκευσης (συσσωρευτές μολύβδου οξέος 60V, 250Ah, αντιστροφέας 3.3 kW), ελεγχόμενα φορτία και ελεγχόμενη διασύνδεση με το τοπικό δίκτυο XT [130]. Οι συσσωρευτές, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και η ανεμογεννήτρια συνδέονται στο AC δίκτυο μέσω ηλεκτρονικών μετατροπών (DC/DC και DC/AC). Οι μετατροπές επιτρέπουν τη λειτουργία του μικροδίκτυου σε διασυνδεδεμένη ή απομονωμένη κατάσταση, με αδιάλειπτη λειτουργία κατά τη μετάβαση από τη μία κατάσταση στην άλλη. Τα ελεγχόμενα φορτία του μικροδίκτυου περιλαμβάνουν 15 kW ωμικών αντιστάσεων, 2.5 kVAr επαγωγικών αντιδράσεων, πυκνωτές, συσκευές φωτισμού, και μικρό κινητήρα [B.7]. Τρεις επιπλέον φωτοβολταϊκοί αντιστροφείς λειτουργούν συνδεδεμένοι με το δίκτυο XT (2 kW, 2.5 kW και 3 kW αντίστοιχα) με τη δυνατότητα σύνδεσης στο μικροδίκτυο. Το μονοφασικό μικροδίκτυο, ο διακοπτόμενος ενισχυτής ισχύος, ο γραμμικός ενισχυτής ισχύος και ο ΨΠΠΧ φαίνονται στο Σχήμα 4.1.

Επιπλέον, το εργαστήριο διαθέτει προσομοιωτή φωτοβολταϊκών που αποτελείται από τρεις ανεξάρτητες μονάδες με δυνατότητα παράλληλης λειτουργίας (της εταιρείας Regatron [131]). Κάθε μονάδα του προσομοιωτή φωτοβολταϊκών αποτελείται από ελεγχόμενη DC πηγή (V_{dc} : 0-1000 V, I_{dc} : 0-13 A) που συνδέεται στους φωτοβολταϊκούς αντιστροφείς και παρέχει τη δυνατότητα πραγματοποίησης πειραμάτων σε ελεγχόμενες συνθήκες. Ο χρήστης θέτει τα χαρακτηριστικά των προσομοιωμένων φωτοβολταϊκών πλαισίων και μπορεί να μεταβάλλει την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία. Επιπλέον, ο προσομοιωτής επιτρέπει την πραγματοποίηση δοκιμών ελέγχου της ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking - MPPT) αντιστροφών με βάση το πρότυπο EN 50530. Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται συμβατική εργαστηριακή διάταξη δοκιμών φωτοβολταϊκού αντιστροφέα που συνδέεται στη DC πλευρά με τον προσομοιωτή φωτοβολταϊκών και στην AC πλευρά με τον προσομοιωτή AC δικτύου (ενισχυτής ισχύος). Κατά τα PHIL πειράματα ο αντιστροφέας φωτοβολταϊκών συνδέεται στον προσομοιωτή φωτοβολταϊκών ή στα πραγματικά φωτοβολταϊκά πλαίσια και ο ΨΠΠΧ συνδέεται με τον ενισχυτή ισχύος.



Σχήμα 4.1. Το μονοφασικό μικροδίκτυο, ο διακοπτόμενος ενισχυτής ισχύος, ο γραμμικός ενισχυτής ισχύος και ο ΨΠΙΧ (RTDS[®]) του εργαστηρίου ΣΗΕ (αριστερά προς τα δεξιά)



Σχήμα 4.2. Συμβατική διάταξη δοκιμής φωτοβολταϊκού αντιστροφέα στο εργαστήριο ΣΗΕ

4.2.3) Διεπαφή ισχύος

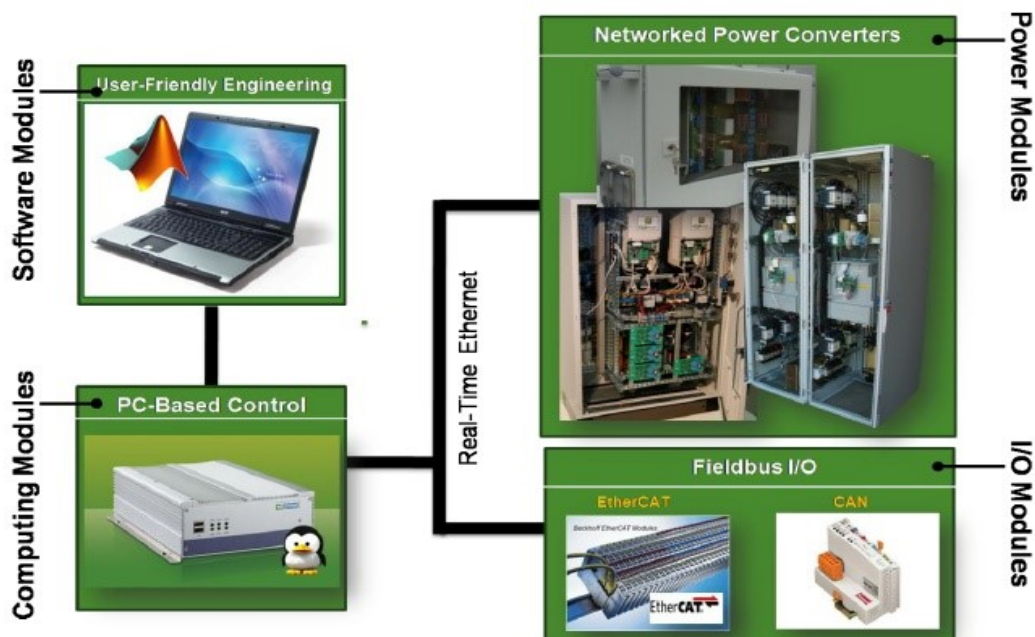
Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφηκε αναλυτικά η τοπολογία PHIL διάταξης (Σχήμα 2.2). Όπως εξηγήθηκε, για τη σύνδεση του ΨΠΠΧ με το φυσικό σύστημα είναι απαραίτητη η χρήση κατάλληλης διεπαφής ισχύος. Η διεπαφή ισχύος αποτελείται από ενισχυτή ισχύος που λαμβάνει την τιμή αναφοράς μιας μεταβλητής από την προσομοίωση (π.χ. τάσης) και την εφαρμόζει στο φυσικό σύστημα, καθώς και από αισθητήρα που μετρά την αντίδραση του φυσικού συστήματος (π.χ. ρεύμα) και την εισάγει πίσω στον ΨΠΠΧ. Το φυσικό σύστημα αναπαρίσταται στην προσομοίωση ως εξαρτημένη πηγή ρεύματος. Η λειτουργία σε κλειστό βρόχο καθιστά δυνατή την αλληλεπίδραση του προσομοιωμένου συστήματος, που εκτελείται στον ΨΠΠΧ, με το φυσικό σύστημα ισχύος.

Η επιλογή κατάλληλης διεπαφής ισχύος, και ειδικά ενισχυτή ισχύος, είναι καθοριστική για την επιτυχή υλοποίηση PHIL πειραμάτων. Διαφορετικές τεχνολογίες ενισχυτών ισχύος περιγράφηκαν στην παράγραφο 2.2.1 (γραμμικός, διακοπτόμενος, γεννήτρια). Στην ιδανική περίπτωση ένας ενισχυτής ισχύος δεν θα παρουσίαζε χρονική καθυστέρηση, θα είχε 100% ακρίβεια και άπειρο εύρος ζώνης, αλλά προφανώς αυτό δεν είναι εφικτό στην πράξη. Ως εκ τούτου, συνήθως λαμβάνει χώρα ένας συμβιβασμός μεταξύ ποιότητας και κόστους, λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της εφαρμογής.

Η διεπαφή ισχύος του ΕΜΠ αποτελείται από μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος AC/DC/AC και ανεξάρτητη μονάδα ελέγχου (της εταιρείας Triphase [132]). Η μονάδα ελέγχου είναι ένας διακομιστής (server) σε λειτουργικό σύστημα Linux που αλληλεπιδρά με τον μετατροπέα, δέχεται εντολές από τον χρήστη και συλλέγει δεδομένα, όπως μετρήσεις ρεύματος και τάσης. Δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να σχεδιάσει έναν αλγόριθμο ελέγχου στο λογισμικό Matlab/Simulink και να τον «φορτώσει» στη μονάδα ελέγχου. Έτσι, συνδέεται ο υπολογιστής του χρήστη με τη μονάδα ελέγχου, ώστε να γίνεται έλεγχος του μετατροπέα από τον χρήστη [133]. Ένα Field-Programmable Gate Array (FPGA) στέλνει τους PWM παλμούς στα διακοπτικά στοιχεία (IGBTs) του μετατροπέα. Επιπλέον, είσοδοι/έξοδοι με αναλογικούς/ψηφιακούς και ψηφιακούς/αναλογικούς μετατροπείς χρησιμοποιούνται για να είναι εφικτή η ανταλλαγή σημάτων με εξωτερικές συσκευές. Στο Σχήμα 4.3 παριστάνεται ο υπολογιστής του χρήστη, η μονάδα ελέγχου, ο μετατροπέας ηλεκτρονικών ισχύος και οι κάρτες εισόδων και εξόδων. Ο μετατροπέας ηλεκτρονικών ισχύος χρησιμοποιείται στο εργαστήριο και για άλλες εφαρμογές [134].

Ένας AC/DC/AC μετατροπέας μπορεί να συνδεθεί από τη μία πλευρά στο AC δίκτυο και από την άλλη να λειτουργεί ως ελεγχόμενη πηγή AC τάσης και συχνότητας. Μονοφασικοί AC/DC/AC μετατροπείς συνήθως αποτελούνται από τέσσερις ημιγέφυρες, δηλαδή δύο ημιγέφυρες για τον ανορθωτή και δύο ημιγέφυρες για τον αντιστροφέα. Μία αντισυμβατική διάταξη μονοφασικού AC/DC/AC μετατροπέα που αποτελείται από τρεις ημιγέφυρες προτείνεται στα [135][136]. Σε αυτή τη διάταξη, ο κοινός ουδέτερος χρησιμοποιείται και για τη σύνδεση στο δίκτυο και για τη λειτουργία ως πηγή AC τάσης. Ένας ευρέως χρησιμοποιούμενος τριφασικός αντιστροφέας (DC/AC), που περιλαμβάνει τρεις ημιγέφυρες, μπορεί να μετατραπεί σε έναν αμφίδρομο μονοφασικό AC/DC/AC μετατροπέα, εφαρμόζοντας κατάλληλο αλγόριθμο ελέγχου. Εφόσον η διάταξη με τις τρεις

ημιγέφυρες περιλαμβάνει μικρότερο αριθμό ημιαγωγών μπορεί να έχει χαμηλότερο κόστος και μικρότερο μέγεθος.

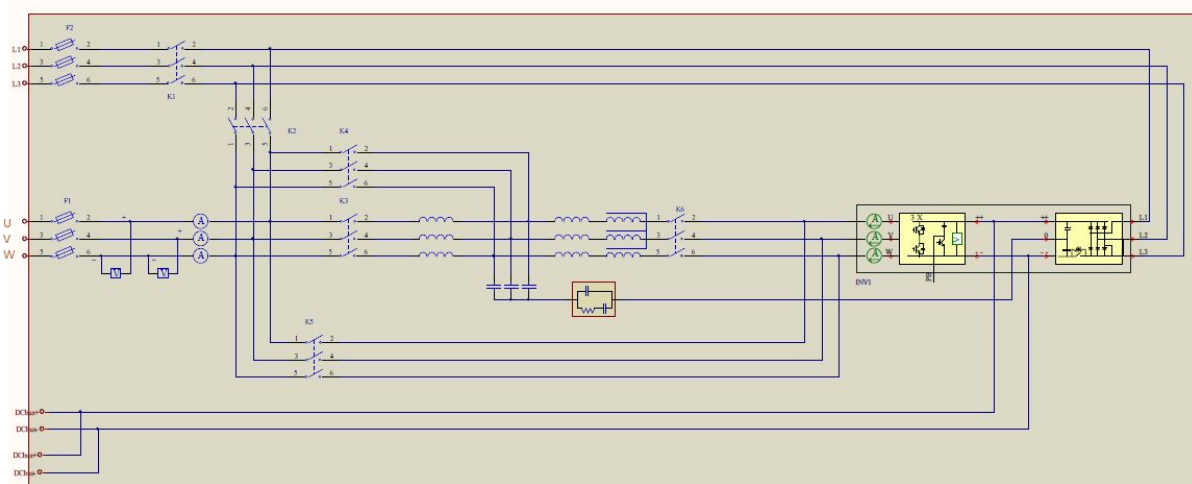


Σχήμα 4.3. Παρουσίαση της διεπαφής ισχύος με μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος [132]

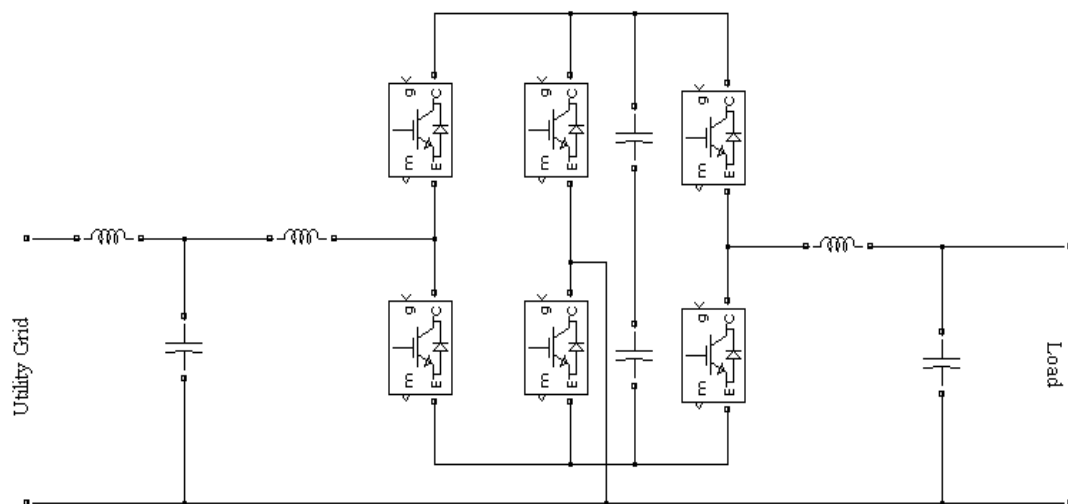
Η διεπαφή ισχύος του ΕΜΠ αποτελείται από μονοφασικό αμφίδρομο AC/DC/AC μετατροπέα ονομαστικής ισχύος 5 kVA, που διαθέτει τρεις ημιγέφυρες. Το κύκλωμα ισχύος του μετατροπέα παριστάνεται στο Σχήμα 4.4. Η σύνδεση στο AC δίκτυο γίνεται μέσω των ακροδεκτών U (φάση) και W (ουδέτερος) και η πηγή AC τάσης λαμβάνεται στους ακροδέκτες V (φάση) και W (ουδέτερος). Για τη σύνδεση στο AC δίκτυο χρησιμοποιείται L-C-L φίλτρο και για τη λειτουργία ως πηγή AC τάσης L-C φίλτρο (Σχήμα 4.5). Η διακοπτική συχνότητα του μετατροπέα είναι 8 kHz και είναι ίση με τη συχνότητα επίλυσης της μονάδας ελέγχου. Επιπλέον, πλήθος ελεγχόμενων διακοπών που χρησιμοποιούνται για τη φόρτιση του DC ζυγού, τη σύνδεση στο AC δίκτυο, την αλλαγή της τοπολογίας των φίλτρων (Σχήμα 4.4) ελέγχονται και επιτηρούνται από ψηφιακή κάρτα εξόδων και εισόδων. Οι αισθητήρες τάσης και ρεύματος φαίνονται στο Σχήμα 4.4. Το εσωτερικό του μετατροπέα παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6.

Η διεπαφή ισχύος μπορεί να ανταλλάσσει αναλογικά σήματα με εξωτερικές συσκευές (π.χ. με τον ΨΠΠΧ) μέσω αναλογικών/ψηφιακών και ψηφιακών/αναλογικών μετατροπέων [137] με ανάλυση 16 bit και εύρος $\pm 10V$ (Σχήμα 4.7). Η ακρίβεια της αναλογικής εξόδου είναι μικρότερη από 0.1%.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου συστήματος είναι η δυνατότητα ανάπτυξης αλγορίθμων ελέγχου στο λογισμικό ευρείας χρήσης Matlab/Simulink και η εύκολη και γρήγορη δοκιμή τους στον πραγματικό μετατροπέα. Πριν από την εφαρμογή του αλγορίθμου ελέγχου στον πραγματικό μετατροπέα, πραγματοποιείται προσομοίωση για την αποφυγή ανεπιθύμητων καταστάσεων.



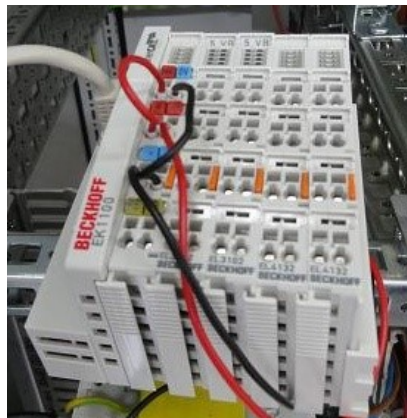
Σχήμα 4.4. Κύκλωμα ισχύος του μετατροπέα της διεπαφής ισχύος [132]



Σχήμα 4.5. Απλοποιημένο διάγραμμα του μετατροπέα της διεπαφής ισχύος με τρεις ημιγέφυρες



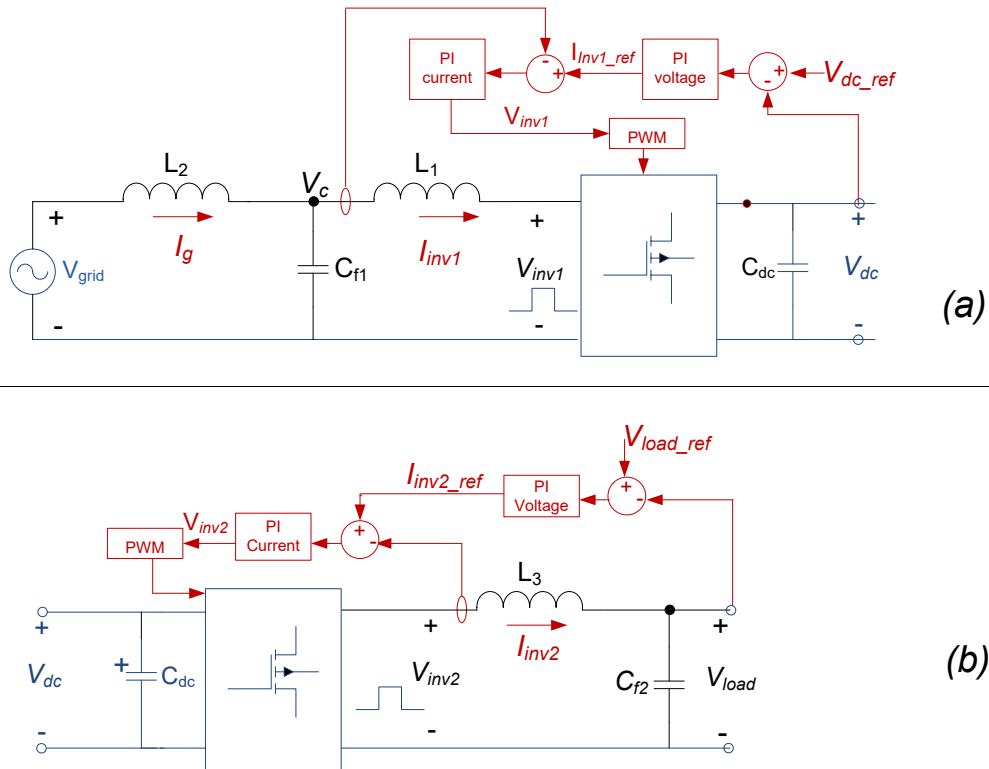
Σχήμα 4.6. Το εσωτερικό του μετατροπέα της διεπαφής ισχύος



Σχήμα 4.7. Αναλογική κάρτα εισόδων και εξόδων της διεπαφής ισχύος

Ο κατασκευαστής παρείχε αρχικό αλγόριθμο ελέγχου για τον μονοφασικό AC/DC/AC μετατροπέα με προοπτική βελτίωσης και επέκτασης. Περιλαμβάνει αλγορίθμους για τη σύνδεση στο δίκτυο και για λειτουργία ως πηγή τάσης που βασίζονται σε PI (Proportional–Integral) ελεγκτές. Στο Σχήμα 4.8 παριστάνεται γενικός αλγόριθμος ελέγχου [134][264] στον οποίο βασίζεται ο έλεγχος του μετατροπέα. Η επίλυση γίνεται στο σύγχρονα στρεφόμενο d-q πλαίσιο αναφοράς, που διευκολύνει τη χρήση PI ελεγκτών. Για τη σύνδεση στο δίκτυο, ο πρώτος PI ελεγκτής ελέγχει την τάση του DC ζυγού και έχει ως έξοδο την αναφορά του ρεύματος του πηνίου (I_{inv1}), που δίνεται ως είσοδος στον δεύτερο PI ελεγκτή. Η έξοδος του δεύτερου PI ελεγκτή είναι η τάση αναφοράς (V_{inv1}) του AC/DC μετατροπέα. Όταν ζητείται ισχύς από το φορτίο, μειώνεται μεταβατικά η τάση του DC ζυγού και ο

AC/DC μετατροπέας (που συνδέεται στο δίκτυο) μεταφέρει ισχύ από το δίκτυο, ώστε να επαναφέρει την τάση του DC ζυγού (αντίστοιχα αν παράγεται ισχύς). Για τη λειτουργία ως πηγή τάσης, ο πρώτος PI ελεγκτής ελέγχει την τάση του φορτίου και έχει ως έξοδο την αναφορά του ρεύματος του πηνίου (I_{inv2}), που δίνεται ως είσοδος στον δεύτερο PI ελεγκτή. Η έξοδος του δεύτερου PI ελεγκτή είναι η τάση αναφοράς (V_{inv2}) του DC/AC μετατροπέα. Επειδή οι εξισώσεις των τάσεων και των ρευμάτων στο d-q πλαίσιο αναφοράς δεν είναι αποσυνδεδεμένες, εισάγονται όροι αποσύνδεσης [264]. Τα υπολογισμένα σήματα ελέγχου αποστέλλονται από τη μονάδα ελέγχου στο FPGA που υλοποιεί τη διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM) και εφαρμόζονται στα IGBTs. Σημειώνεται πως στον αλγόριθμο ελέγχου του Σχήματος 4.8 δεν παριστάνονται οι προσαρμογές για τη λειτουργία της αντισυμβατικής διάταξης με τρεις ημιγέφυρες [135][136].



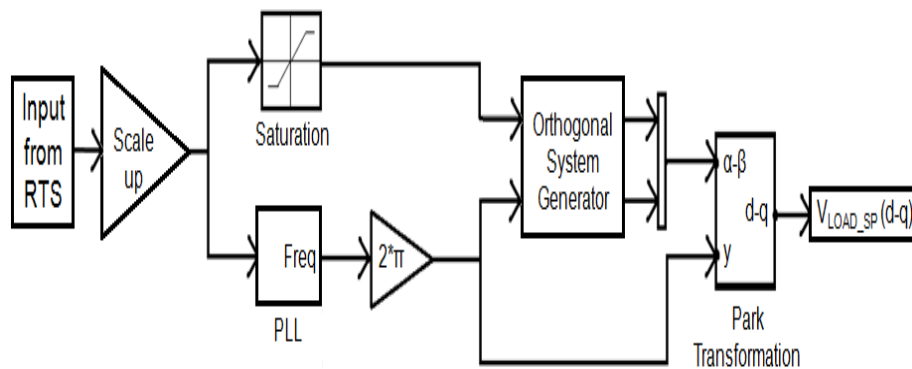
Σχήμα 4.8. Αλγόριθμος ελέγχου AC/DC μετατροπέα για σύνδεση στο δίκτυο (a) και DC/AC μετατροπέα για λειτουργία ως πηγή τάσης (b) [134][264].

Πρόσφατα αποκτήθηκε γραμμικός ενισχυτής (της εταιρείας Spitzenberger & Spies [138]) που φαίνεται στα Σχήματα 4.1 και 4.2. Αποτελείται από παράλληλα MOSFET που λειτουργούν στη γραμμική περιοχή. Ο ενισχυτής διαθέτει πολύ γρήγορη δυναμική απόκριση (52 V/μs) με χρόνο ανόδου στην ονομαστική τάση (230 V_{rms}) μικρότερο από 5 μs. Το εύρος ζώνης είναι 0-15 kHz και το THD σε τυπικές συνθήκες λειτουργίας ισούται με 0.3% [B.20]. Ο ενισχυτής δέχεται σήμα εισόδου από τον ΨΠΠΧ ή από εξωτερική συσκευή μέχρι $\pm 5 V_p$. Ημιτονοειδές σήμα εισόδου 5 V_p (3.535 V_{rms}) αντιστοιχεί στη μέγιστη δυνατή τάση εξόδου 270 V_{rms} (ομοίως σήμα εισόδου 3.011 V_{rms} αντιστοιχεί σε τάση εξόδου 230 V_{rms}). Σημειώνεται πως για την παροχή του σήματος ανάδρασης στον ΨΠΠΧ χρησιμοποιήθηκε εξωτερικός αισθητήρας ρεύματος [139], εφόσον δεν δίνεται πρόσβαση στους αισθητήρες του γραμμικού ενισχυτή.

4.3) Επέκταση του αλγορίθμου του ηλεκτρονικού μετατροπέα και συνάρτηση μεταφοράς

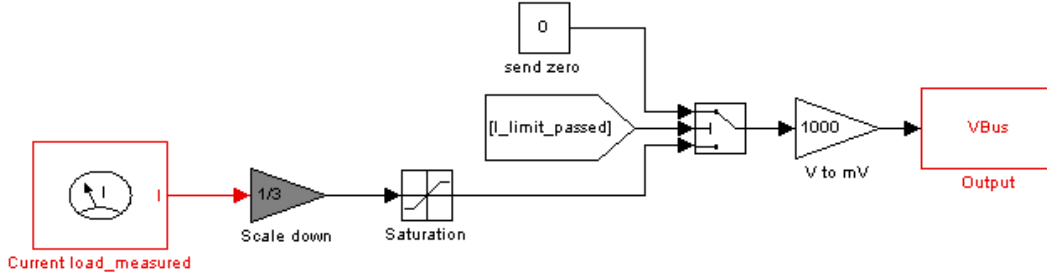
Ο αλγόριθμος ελέγχου του AC/DC/AC μετατροπέα που παρείχε ο κατασκευαστής είχε σχεδιαστεί για την παραγωγή τάσης σε φορτίο υλοποιώντας εντολή rms τιμής και συχνότητας που τίθεται στο λογισμικό του. Ως εκ τούτου, χρειάστηκε ο αλγόριθμος να επεκταθεί/βελτιωθεί ώστε ο μετατροπέας να λειτουργήσει ως διεπαφή ισχύος για PHIL πειράματα, δηλαδή ως ενισχυτής τάσης και ως αισθητήρας ρεύματος που παρέχει σήμα εξόδου.

Για τη λειτουργία ως ενισχυτής τάσης πρέπει ο μετατροπέας να μπορεί να λαμβάνει ένα εξωτερικό σήμα και να το χρησιμοποιεί ως αναφορά για την ελεγχόμενη πηγή τάσης. Η τάση αναφοράς από τον ΨΠΠΧ (αναλογικό ημιτονοειδές σήμα) λαμβάνεται από τον αναλογικό/ψηφιακό μετατροπέα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9. Το σήμα πολλαπλασιάζεται με κατάλληλο κέρδος και ένα Phase-Locked-Loop (PLL) χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της συχνότητας του. Στη συνέχεια, το σήμα διέρχεται από μία γεννήτρια ορθογώνιου συστήματος, εφαρμόζεται μετασχηματισμός Park και ακολουθεί ο αλγόριθμος ελέγχου του μετατροπέα [196]. Με αυτόν τον τρόπο, ο μετατροπέας λειτουργεί ως μονοφασικός ενισχυτής τάσης και το σήμα αναφοράς μπορεί να φιλτραριστεί αν χρειάζεται.



Σχήμα 4.9. Αλγόριθμος που αναπτύχθηκε για τη λειτουργία του μετατροπέα ως ενισχυτής τάσης

Ο αισθητήρας που μετράει το ρεύμα του φορτίου που εισάγεται στον αλγόριθμο ελέγχου του μετατροπέα, χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του ρεύματος του φυσικού συστήματος και την αποστολή της τιμής του στον ΨΠΠΧ (η ακρίβεια του αισθητήρα είναι μικρότερη από $\pm 0.5\%$ σε πλήρη φόρτιση (90 A), το εύρος ζώνης είναι 4 kHz). Στο μοντέλο στο λογισμικό Matlab/Simulink το μετρούμενο ρεύμα πολλαπλασιάζεται με κατάλληλο κέρδος και αποστέλλεται στην έξοδο που αντιστοιχεί στον ψηφιακό/αναλογικό μετατροπέα της διεπαφής ισχύος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10. Επίσης, παριστάνονται αλγόριθμοι προστασίας που θα περιγραφούν στην παράγραφο 4.4. Σημειώνεται πως στο ίδιο μοντέλο στο Matlab/Simulink επιλύονται όλοι οι αλγόριθμοι της διεπαφής ισχύος και παριστάνονται οι μετρήσεις τάσης και ρεύματος των αισθητήρων και τα σήματα εισόδων/εξόδων.



Σχήμα 4.10. Αλγόριθμος για την παροχή του σήματος ανάδρασης στον ΨΠΠΧ

Για την εκτίμηση της ευστάθειας και της ακρίβειας της PHIL προσομοίωσης είναι απαραίτητη η εύρεση της συνάρτησης μεταφοράς του ενισχυτή ισχύος και της συνολικής χρονικής καθυστέρησης. Η συνάρτηση μεταφοράς των διακοπτόμενων ενισχυτών ισχύος περιλαμβάνει τη χρονική καθυστέρηση και τη συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου εξόδου του μετατροπέα [1][38].

$$G_{amp} = e^{-sT_{dl}} \cdot G_{filter} \quad (4.1)$$

Όπου T_{dl} είναι η χρονική καθυστέρηση και G_{filter} η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου εξόδου του μετατροπέα. Η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου εξόδου δεν ήταν εφικτό να υπολογιστεί με ακρίβεια από την τοπολογία και τα χαρακτηριστικά του εξαιτίας της πολυπλοκότητας της τοπολογίας (κοινός ουδέτερος κ.α.). Έγινε προσεγγιστική εκτίμηση πραγματοποιώντας μετρήσεις αρμονικών της PWM τάσης πριν το φίλτρο εξόδου και της τάσης μετά το φίλτρο. Θεωρήθηκε φίλτρο δεύτερης τάξης με την παρακάτω συνάρτηση μεταφοράς:

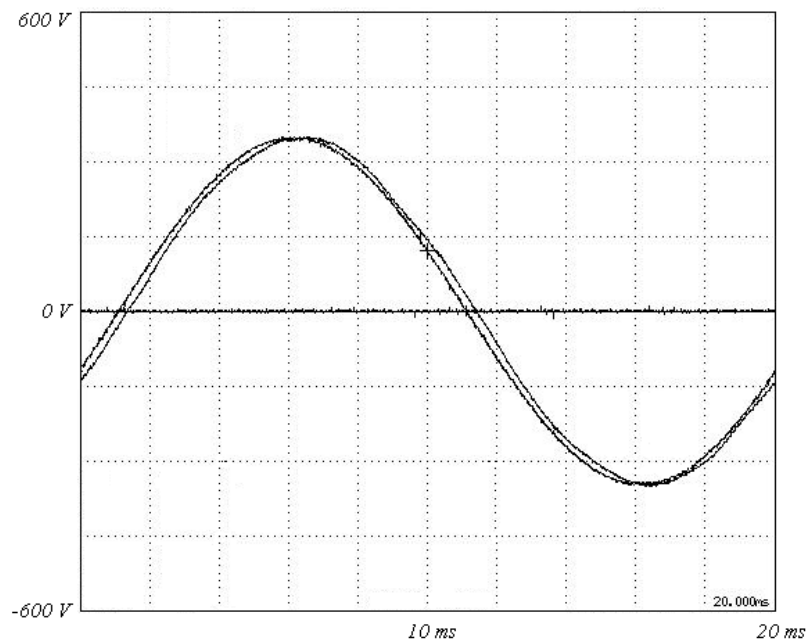
$$G_{filter} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2} = \frac{(2\pi \cdot 750)^2}{s^2 + 1.4 \cdot 2\pi \cdot 750 \cdot s + (2\pi \cdot 750)^2} \quad (4.2)$$

Όπου ω_n είναι η φυσική συχνότητα και ξ ο λόγος απόσβεσης.

Η χρονική καθυστέρηση που εισάγει ο ενισχυτής στη μόνιμη κατάσταση μετρήθηκε με παλμογράφο. Στο Σχήμα 4.11 συγκρίνεται το σήμα αναφοράς και η τάση εξόδου και προκύπτει χρονική καθυστέρηση περίπου ίση με 300 μ s.

Σημειώνεται πως για την εκτίμηση της συνάρτησης μεταφοράς γραμμικών ενισχυτών μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέθοδος «μαύρου κουτιού», κατά την οποία εφαρμόζεται βηματική DC τάση στην είσοδο του ενισχυτή και μετριέται η απόκριση του. Από την απόκριση του ενισχυτή υπολογίζεται η συνάρτηση μεταφοράς του. Αντίστοιχη μέθοδος εφαρμόστηκε στον διακοπτόμενο ενισχυτή χωρίς ικανοποιητικά αποτελέσματα, εφόσον δεν μπορεί να ενισχύσει DC σήματα [42].

Η χρονική καθυστέρηση που εισάγεται κατά τη μέτρηση και αποστολή του ρεύματος εκτιμήθηκε περίπου ίση με δύο φορές το χρονικό βήμα της μονάδας ελέγχου του ηλεκτρονικού μετατροπέα, δηλαδή 250 μ s. Επιπλέον, ο ΨΠΠΧ εισάγει χρονική καθυστέρηση εξαιτίας των εισόδων/εξόδων και των υπολογισμών του, που προσεγγιστικά μπορεί να θεωρηθεί ίση με δύο φορές το βήμα της προσομοίωσης [36][37], δηλαδή 100 μ s.



Σχήμα 4.11. Χρονική καθυστέρηση του ενισχυτή στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας: σήμα αναφοράς (αριστερά), παραγόμενη τάση 230 V_{rms} (δεξιά)

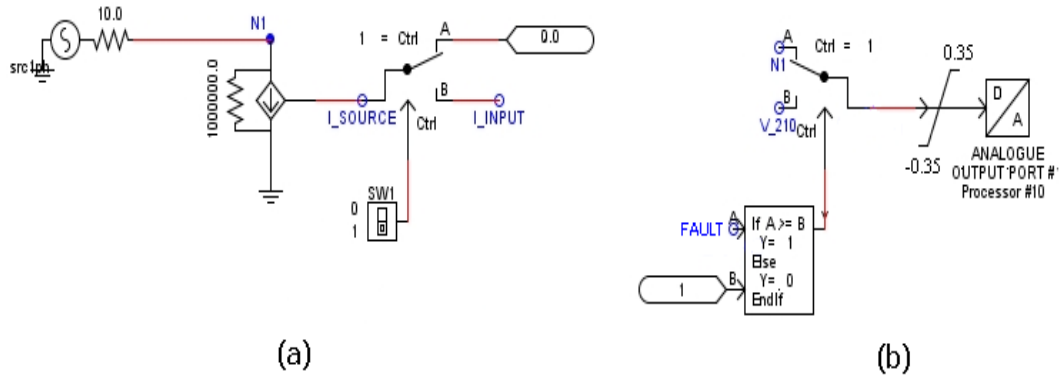
4.4) Εφαρμογή αλγορίθμων προστασίας του πειράματος

Η εξασφάλιση της ασφαλούς εκτέλεσης ενός PHIL πειράματος είναι μεγάλης σημασίας. Η κύρια απειλή προέρχεται από την εμφάνιση αστάθειας που μπορεί να οδηγήσει σε υψηλές τάσεις και ρεύματα, θέτοντας σε κίνδυνο το φυσικό σύστημα και υπό συνθήκες τον ενισχυτή ισχύος και τις κάρτες εισόδων του ΨΠΠΧ. Εκτίμηση της ευστάθειας πρέπει πάντα να πραγματοποιείται πριν από την εκτέλεση του πειράματος, αλλά αν το φυσικό σύστημα (π.χ. Φ/Β αντιστροφέας) δεν είναι γνωστό σε βάθος δεν μπορεί να εξασφαλιστεί η ευσταθής λειτουργία. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητη η εισαγωγή φυσικών και προσομοιωμένων διατάξεων προστασίας.

4.4.1) Προστασίες στον Ψηφιακό Προσομοιωτή Πραγματικού Χρόνου

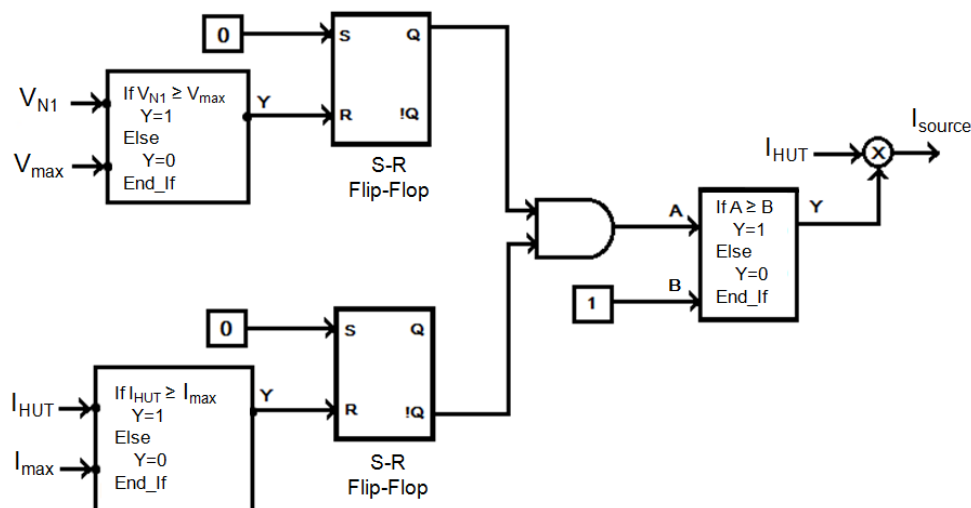
Προτείνεται η εισαγωγή επιπλέον μέσων προστασίας (ασφάλειες) στο φυσικό σύστημα με βάση τα ονομαστικά του στοιχεία, πέραν των ενσωματωμένων προστασιών του ενισχυτή ισχύος. Ωστόσο, οι πιο σημαντικές προστασίες εφαρμόζονται στην προσομοίωση καθώς μπορούν να αποτρέψουν την εμφάνιση ακραίων φαινομένων και να μην γίνουν «αντιληπτά» από το φυσικό σύστημα. Η μεγάλη ευελιξία και το μηδενικό κόστος είναι επιπλέον πλεονεκτήματα των προσομοιωμένων προστασιών. Στο Σχήμα 4.12 παριστάνεται το προσομοιωμένο σύστημα στο λογισμικό του ΨΠΠΧ, που για λόγους απλότητας, αποτελείται από πηγή τάσης σε σειρά με ωμική αντίσταση, στο οποίο εφαρμόζονται αλγόριθμοι προστασίας. Η τάση του κοινού ζυγού μεταξύ προσομοιωμένου και φυσικού συστήματος (NI) αποστέλλεται στον ψηφιακό/αναλογικό μετατροπέα του ΨΠΠΧ (Σχήμα

4.12b). Το μετρούμενο ρεύμα του φυσικού συστήματος εισάγεται στην εξαρτημένη πηγή ρεύματος (Σχήμα 4.12a). Ο διακόπτης *SW1* χρησιμοποιείται για να κλείσει ο βρόχος και να ξεκινήσει το PHIL πείραμα.



Σχήμα 4.12. Το προσομοιωμένο σύστημα και η πηγή ρεύματος που αναπαριστά το φυσικό σύστημα (a). Η τάση εξόδου (*NI*) που αποστέλλεται στον ψηφιακό/αναλογικό μετατροπέα του ΨΠΠΧ (b)

Προστασίες υπερέντασης και υπέρτασης εφαρμόζονται στον κοινό ζυγό στο λογισμικό του ΨΠΠΧ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.13. Αν ξεπεραστούν τα καθορισμένα όρια, η τιμή της πηγής ρεύματος που αντιπροσωπεύει το φυσικό σύστημα στον ΨΠΠΧ γίνεται μηδενική (δηλαδή διακόπτεται το PHIL πείραμα, Σχήμα 4.13) και η τάση αναφοράς που αποστέλλεται στον ενισχυτή διατηρείται σταθερή σε μια προκαθορισμένη τιμή (*V_210* στο Σχήμα 4.12b), προκειμένου να αποφευχθούν ανεπιθύμητα μεταβατικά φαινόμενα. Χρησιμοποιούνται flip-flops ώστε οι συνθήκες σφάλματος να διατηρούνται όταν στη συνέχεια η τάση και το ρεύμα του κοινού ζυγού επανέλθουν εντός ορίων. Επιπλέον, εισάγεται περιοριστής στην τάση αναφοράς που αποστέλλεται στον ψηφιακό/αναλογικό μετατροπέα του ΨΠΠΧ (προς τον ενισχυτή ισχύος). Με την εφαρμογή του εν λόγω συστήματος προστασίας, σε περίπτωση αστάθειας το φυσικό σύστημα δεν θα αντιμετωπίσει ακραίες συνθήκες. Το σύστημα προστασίας έχει δοκιμαστεί με επιτυχία σε περιπτώσεις αστάθειας κατά τη διάρκεια PHIL πειραμάτων.



Σχήμα 4.13. Μέρος του συστήματος προστασίας στο λογισμικό του ΨΠΠΧ [140]

4.4.2) Προστασίες στο λογισμικό της διεπαφής ισχύος

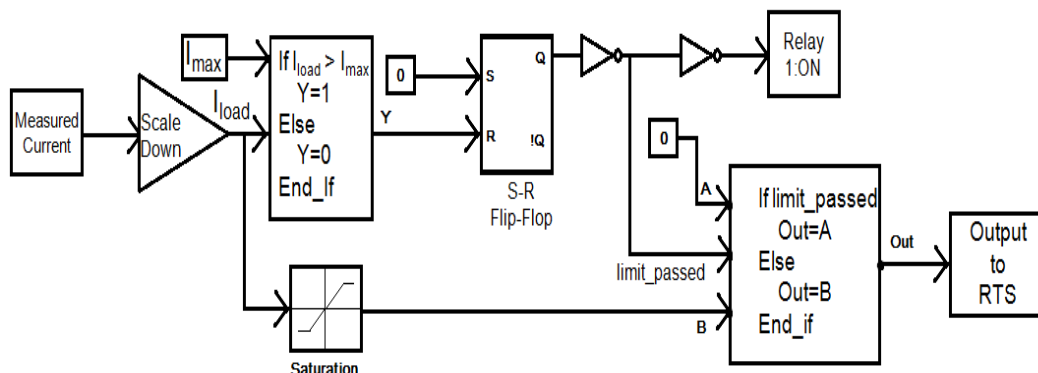
Εκτός από το σύστημα προστασίας που υλοποιήθηκε στον ΨΠΠΧ, σύστημα προστασίας εισήχθη και στο λογισμικό της διεπαφής ισχύος. Οι αλγόριθμοι προστασίας που αναπτύχθηκαν αφορούν τη λειτουργία ως ενισχυτή και την παροχή σήματος εξόδου προς τον ΨΠΠΧ και συνοψίζονται στον Πίνακα 4.2. Αφορούν την τάση και το ρεύμα του φορτίου (φυσικού συστήματος), αλλά επίσης το σήμα αναφοράς (για να μην ενισχυθεί προβληματικό σήμα εισόδου) και το σήμα εξόδου (για την προστασία της κάρτας αναλογικών εισόδων του ΨΠΠΧ).

Τάση φορτίου ($\pm$): μέγιστη τιμή	Τάση σήματος αναφοράς από τον ΨΠΠΧ ($\pm$): μέγιστη τιμή
Τάση φορτίου (rms): ελάχιστη τιμή	Τάση σήματος αναφοράς από τον ΨΠΠΧ (rms): ελάχιστη τιμή
Λόγος της 3 ^{ης} αρμονικής προς τη θεμελιώδη της τάσης φορτίου: μέγιστη τιμή	Συχνότητα σήματος αναφοράς: μέγιστη και ελάχιστη τιμή
Ρεύμα φορτίου ($\pm$): μέγιστη τιμή	Σήμα εξόδου προς τον ΨΠΠΧ ($\pm$) (μέτρηση ρεύματος): μέγιστη τιμή

Πίνακας 4.2. Αλγόριθμοι προστασίας που αναπτύχθηκαν στο λογισμικό της διεπαφής ισχύος

Οι αλγόριθμοι προστασίας σχεδιάστηκαν ώστε σε περίπτωση που γίνεται υπέρβαση σε οποιοδήποτε από τα παραπάνω όρια, το φυσικό σύστημα να αποσυνδέεται από τον ενισχυτή ισχύος (αυτόματο άνοιγμα διακόπτη στον ενισχυτή), να χρησιμοποιείται προκαθορισμένη

τιμή αναφοράς τάσης στον ενισχυτή και να αποστέλλεται μηδενικό σήμα εξόδου στον ΨΠΠΧ. Επίσης, εισήχθησαν περιοριστές στην τάση αναφοράς και στο σήμα εξόδου (ρεύμα). Μέρος του συστήματος προστασίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.14, όπου παριστάνεται η μέτρηση του ρεύματος του φυσικού συστήματος, η αλλαγή κλίμακας, η σύγκριση με το άνω όριο του ρεύματος, ο περιοριστής, το αυτόματο άνοιγμα του διακόπτη, ο μηδενισμός του σήματος εξόδου προς τον ΨΠΠΧ και το flip-flop για τη διατήρηση των συνθηκών σφάλματος. Αντίστοιχοι αλγόριθμοι προστασίας αναπτύχθηκαν για τα άλλα μεγέθη του Πίνακα 4.2. Η υλοποίηση έγινε στο ίδιο μοντέλο στο Matlab/Simulink που ελέγχει τον AC/DC/AC μετατροπέα.



Σχήμα 4.14. Μέρος του συστήματος προστασίας που αναπτύχθηκε στο λογισμικό της διεπαφής ισχύος

4.5) Καθορισμός διαδικασίας/τοπολογίας αναφοράς PHIL δοκιμών

Ο καθορισμός μίας κοινής βάσης για την εκτέλεση PHIL πειραμάτων και δοκιμών είναι σημαντικός, καθώς δεν υφίστανται σχετικές οδηγίες και συστάσεις ούτε σε ερευνητικές εργασίες ούτε σε πρότυπα/οδηγίες. Επιπλέον σημασία αποκτάται με την πιθανή μελλοντική χρήση της PHIL μεθόδου σε τυποποιημένες δοκιμές (παράγραφος 3.5.3). Έτσι, σε αυτή την παράγραφο παρέχονται συστάσεις για τις προδιαγραφές του εξοπλισμού, προτείνεται διαδικασία δοκιμών αναφοράς, τοπολογία αναφοράς καθώς και δίκτυο αναφοράς.

4.5.1) Συστάσεις για τις προδιαγραφές του εξοπλισμού

Ο ΨΠΠΧ πρέπει να παρουσιάζει μικρό χρονικό βήμα προσομοίωσης για την αναπαραγωγή της δυναμικής συμπεριφοράς του προσομοιωμένου συστήματος σε πραγματικό χρόνο. Τυπική τιμή για κλασικές δυναμικές προσομοιώσεις είναι τα 50 μ s ενώ για γρήγορα διακοπικά φαινόμενα (π.χ. διαμόρφωση εύρους παλμών - PWM) 1-3 μ s. Το χρονικό βήμα του ΨΠΠΧ εισάγει επιπλέον χρονική καθυστέρηση που χειροτερεύει την ευστάθεια και την ακρίβεια της PHIL προσομοίωσης, οπότε μικρό χρονικό βήμα είναι επιθυμητό. Επίσης, ο ΨΠΠΧ χρειάζεται να περιλαμβάνει επαρκή αριθμό θυρών εισόδου/εξόδου (αναλογικούς/ψηφιακούς και ψηφιακούς/αναλογικούς μετατροπείς) καλής ακρίβειας και υψηλής ταχύτητας, καθώς και ένα φιλικό προς το χρήστη γραφικό περιβάλλον. Εκτός από τις προαναφερόμενες εμπορικές επιλογές (παράγραφος 1.3) τα τελευταία χρόνια έχει υπάρξει προσπάθεια ανάπτυξης ΨΠΠΧ από διάφορα εργαστήρια, με αποτέλεσμα ο

καθορισμός σαφών απαιτήσεων να γίνεται πιο σημαντικός.

Ο ενισχυτής ισχύος λαμβάνει ένα σήμα αναφοράς από τον ΨΠΠΧ και το ενισχύει. Σημειώνεται πως χρησιμοποιούνται διαφορετικές τεχνολογίες ενισχυτών ισχύος (γραμμικοί, διακοπτόμενοι, γεννήτριες) με διαφορετικές δυνατότητες που περιγράφηκαν στην παράγραφο 2.2.1. Οι κύριες απαιτήσεις παρατίθενται παρακάτω:

- Επαρκής ονομαστικής ισχύς
- Κατάλληλο εύρος τάσεων (θεμελιώδης) και συχνότητας
- Λειτουργία τεσσάρων τεταρτημορίων (P-Q)
- Γρήγορη απόκριση (μικρός χρόνος ανόδου)
- Μεγάλο εύρος ζώνης
- Υψηλή ακρίβεια
- Χαμηλό θόρυβο (THD)
- Θύρα εισόδου υψηλής ταχύτητας και ακρίβειας (αναλογικός/ψηφιακός μετατροπέας για την περίπτωση διακοπτόμενου ενισχυτή)

Επιπλέον, ο αισθητήρας που μετράει την απόκριση του δοκιμίου θα πρέπει να εμφανίζει υψηλή ακρίβεια, επαρκή περιοχή μέτρησης, μεγάλο εύρος συχνοτήτων και μικρή χρονική καθυστέρηση. Προτείνεται η χρήση ανεξάρτητου αισθητήρα (όχι ενσωματωμένου στον ενισχυτή ισχύος) για την επίτευξη χαμηλότερης χρονικής καθυστέρησης.

Ειδικότερες απαιτήσεις εξαρτώνται από τη συγκεκριμένη μελέτη. Ενδεικτικά, για ταχέα μεταβατικά φαινόμενα προτείνονται συχνότητες τουλάχιστον έως 5 kHz, ενώ για αργά μεταβατικά έως 1 kHz. Με βάση αυτή ή αντίστοιχη ταξινόμηση μπορούν να οριστούν απαιτήσεις για τον ενισχυτή ισχύος, τον αισθητήρα, τις θύρες εισόδων/εξόδων κτλ.

4.5.2) Διαδικασία αναφοράς PHIL δοκιμών

Η προτεινόμενη διαδικασία αναφοράς παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.3. Η διαδικασία προτείνεται τόσο για τη δοκιμή εξοπλισμού, όσο και για τη διενέργεια πειραμάτων για ερευνητικούς σκοπούς.

Βήματα	Προετοιμασία της δοκιμής
I) Εκτίμηση ευστάθειας και ακρίβειας	Προτείνεται η εκτίμηση της ευστάθειας με τους δύο παρακάτω τρόπους: • Εφαρμογή του κριτηρίου Nyquist στη συνάρτηση μεταφοράς ανοιχτού βρόχου • Αμιγώς ψηφιακή προσομοίωση που περιλαμβάνει το προσομοιωμένο σύστημα, τη διεπαφή ισχύος και το

	δοκίμιο (δυναμική εικονική PHIL προσομοίωση) Επιπλέον, συστήνεται η εκτίμηση της ακρίβειας με βάση τη μέθοδο που περιγράφηκε στην παράγραφο 2.4 ή/και την προαναφερόμενη δυναμική εικονική PHIL προσομοίωση.
II) Έλεγχος των μέσων προστασίας και επίτευξης ευστάθειας	• Ελέγχεται η λειτουργία των αλγόριθμων προστασίας του ΨΠΠΧ, της διεπαφής ισχύος και οι φυσικές διατάξεις προστασίας (π.χ. ρεύματος, θερμοκρασίας). • Ελέγχεται η ύπαρξη μέσων επίτευξης ευστάθειας (π.χ. βαθυπερατό φίλτρο στο ρεύμα ανατροφοδότησης) αν είναι απαραίτητα (με βάση την ανάλυση ευστάθειας).
Εκτέλεση της δοκιμής	
III) Εκτέλεση του μοντέλου στο λογισμικό του ΨΠΠΧ.	Το μοντέλο του προσομοιωμένου συστήματος εκτελείται στον ΨΠΠΧ. Η αναλογική έξοδος του ΨΠΠΧ στέλνει το σήμα αναφοράς (τάση) στον ενισχυτή ισχύος.
IV) Εκκίνηση του ενισχυτή ισχύος και παραγωγή τάσης	• Εκκίνηση του ενισχυτή • Ο ενισχυτής παράγει τάση με βάση το σήμα αναφοράς από τον ΨΠΠΧ. Συνιστάται να ελέγχεται (οπτικά) εκ των προτέρων η κυματομορφή και η rms τιμή του σήματος αναφοράς.
V) Σύνδεση του δοκιμίου στον ενισχυτή ισχύος	Η τάση του ενισχυτή ισχύος εφαρμόζεται στο δοκίμιο (π.χ. με το κλείσιμο ενός διακόπτη)
VI) Αποστολή του σήματος ανάδρασης από τον αισθητήρα στον ΨΠΠΧ	Το ρεύμα του δοκιμίου μετριέται από αισθητήρα του ενισχυτή ισχύος ή από ανεξάρτητο αισθητήρα και αποστέλλεται στον ΨΠΠΧ (σήμα ανάδρασης). Συνιστάται να ελέγχεται (οπτικά) εκ των προτέρων η κυματομορφή του σήματος.
VII) Κλείσιμο του βρόχου: εκτέλεση της PHIL δοκιμής	Ο βρόχος κλείνει στο λογισμικό του ΨΠΠΧ (κλείσιμο προσομοιωμένου διακόπτη) και εκτελείται η PHIL δοκιμή. Συνιστάται να ελέγχεται (οπτικά) εκ των προτέρων η κυματομορφή του σήματος ανάδρασης στο λογισμικό του ΨΠΠΧ (σωστή rms τιμή: έλεγχος ορθής αλλαγής κλίμακας, σωστή γωνία: έλεγχος ορθής φοράς της διασύνδεσης).
VIII) Πραγματοποίηση ενεργειών για τη μελέτη περίπτωσης	Πραγματοποίηση ενεργειών στο προσομοιωμένο σύστημα (π.χ. μεταβολές στο φορτίο και στην παραγωγή, ενεργοποίηση ΣΑΤΥΦ) ή/και στο φυσικό σύστημα (π.χ.

	παροχή/απορρόφηση αέργου ισχύος από αντιστροφέα, μεταβολή της ηλιοφάνειας σε προσομοιωτή Φ/Β).
ΙΧ) Λήψη των αποτελεσμάτων	Κυματομορφές τάσης και ρεύματος καταγράφονται σε παλμογράφο, ενώ rms τιμές, ενεργός/άεργος ισχύς και συχνότητα σε αναλυτή ισχύος. Πλήθος γραφικών παραστάσεων λαμβάνονται στο λογισμικό του ΨΠΠΧ και πιθανώς της διεπαφής ισχύος.
Διακοπή της δοκιμής	
Χ) Διακοπή της δοκιμής	Ακολουθείται η αντίστροφη διαδικασία της εκτέλεσης της δοκιμής.

Πίνακας 4.3. Η προτεινόμενη διαδικασία αναφοράς PHIL δοκιμών

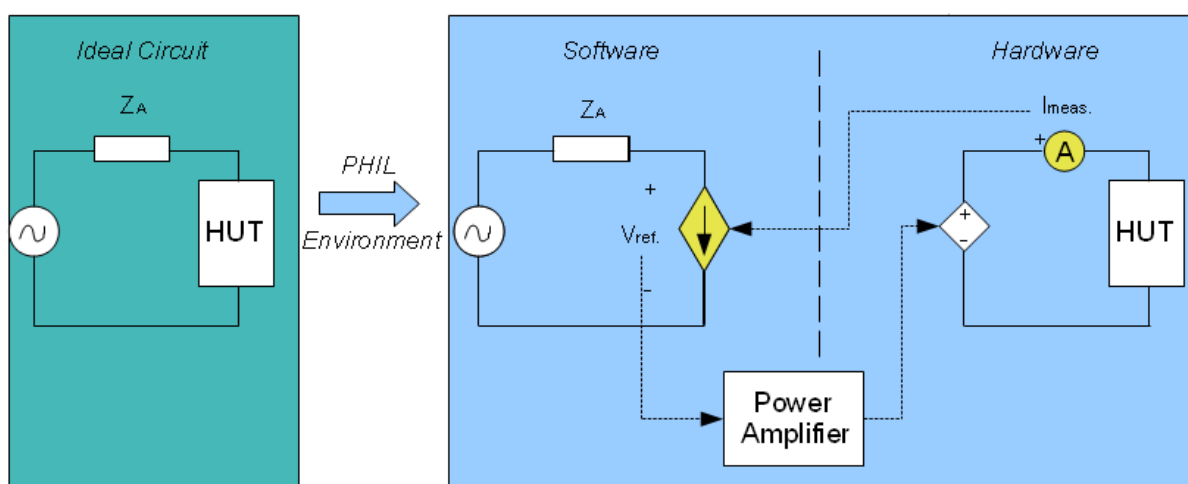
Η αναγραφόμενη στον Πίνακα 4.3 εκκίνηση του ενισχυτή εξαρτάται από τον χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό. Η εκκίνηση του γραμμικού ενισχυτή του ΕΜΠ πραγματοποιείται με το κλείσιμο ενός διακόπτη. Από την άλλη, η εκκίνηση του διακοπόμενου ενισχυτή του ΕΜΠ (AC/DC/AC μετατροπέας) γίνεται με τα παρακάτω βήματα:

- Σύνδεση στο AC δίκτυο (κλείσιμο διακόπτη)
- Φόρτιση του DC ζυγού (μη ελεγχόμενη ανόρθωση)
- Ενεργοποίηση του ελεγχόμενου ανορθωτή
- Αύξηση της τάσης του DC ζυγού σε τιμή αναφοράς (ελεγχόμενη ανόρθωση)
- Ενεργοποίηση του ελεγχόμενου αντιστροφέα (πηγή AC τάσης)

Σημειώνεται πως σε περίπτωση που το δοκίμιο είναι αντιστροφέας ΔΠ διακρίνονται δύο καταστάσεις λειτουργίας κατά την εφαρμογή AC τάσης: αναμονή σύνδεσης (πολύ μικρό ρεύμα) και κανονική λειτουργία στην οποία ο αντιστροφέας παρέχει ενεργό ισχύ. Ο οπτικός έλεγχος του σήματος ανάδρασης (ρεύμα) στον ΨΠΠΧ πριν κλείσει ο βρόχος (βήμα VII στον Πίνακα 4.3) πρέπει να γίνει σε κανονική λειτουργία, οπότε σύμφωνα με τον Πίνακα 4.3, ο βρόχος θα κλείσει ενώ ο αντιστροφέας λειτουργεί με μεγάλο ρεύμα. Για την ομαλότερη εκκίνηση του PHIL πειράματος προτείνεται σε πρώτη φάση η πραγματοποίηση πειράματος ανοιχτού βρόχου για τον έλεγχο του σήματος ανάδρασης στην κανονική λειτουργία. Αν το μέτρο και η γωνία του ρεύματος είναι σωστά, ο αντιστροφέας αποσυνδέεται από τον ενισχυτή ισχύος και στη συνέχεια επανασυνδέεται και κλείνει ο βρόχος στην πρώτη κατάσταση λειτουργίας του δοκιμίου (πολύ μικρό ρεύμα). Αντίστοιχη διαδικασία μπορεί να εφαρμοστεί σε άλλες περιπτώσεις που το δοκίμιο έχει δύο καταστάσεις λειτουργίας.

4.5.3) Τοπολογία αναφοράς

Προτείνεται η χρήση της τοπολογίας σύνδεσης του ιδανικού μετασχηματιστή (παράγραφος 2.5). Το φυσικό σύστημα αναπαρίσταται στο λογισμικό του ΨΠΠΧ ως εξαρτημένη πηγή ρεύματος. Η φορά της πηγής ρεύματος μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του δοκιμίου (π.χ. προς τον αγωγό φάσης του δικτύου αν πρόκειται για παραγωγή ή προς τον ουδέτερο αγωγό αν πρόκειται για φορτίο). Ωστόσο, καθώς αυτή η φορά θα πρέπει να είναι σε συμφωνία με την φορά του πραγματικού αισθητήρα ρεύματος του φυσικού συστήματος, η ανωτέρω προσέγγιση μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα (π.χ. η παραγωγή να εκληφθεί ως φορτίο). Ως εκ τούτου, στο Σχήμα 4.15 προτείνεται φορά αναφοράς για την προσομοιωμένη πηγή ρεύματος και τον αισθητήρα ρεύματος, ανεξάρτητα από τον τύπο του φυσικού συστήματος. Επίσης, σημειώνεται η φορά της τάσης αναφοράς (είσοδος του ενισχυτή) και της εξαρτημένης πηγής τάσης (έξοδος του ενισχυτή).



Σχήμα 4.15. Προτεινόμενη φορά αναφοράς της προσομοιωμένης πηγής ρεύματος και του αισθητήρα ρεύματος του φυσικού συστήματος

4.5.4) Δίκτυο αναφοράς

Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί αρκετά συστήματα/δίκτυα αναφοράς για αμιγώς ψηφιακές προσομοιώσεις. Η IEEE έχει προτείνει αρκετά συστήματα/δίκτυα αναφοράς για τη μεταφορά και τη διανομή. Ενδεικτικά αναφέρουμε τα δίκτυα 13, 16, 33 και 70 ζυγών για τη διανομή. Το 2013, η CIGRE δημοσίευσε την αναφορά “Συστήματα αναφοράς (benchmark) για την ένταξη στο δίκτυο ανανεώσιμων και διεσπαρμένων ενεργειακών πόρων” [141] που προτείνει συστήματα/δίκτυα για την YT, MT και XT για τη Βόρεια Αμερική [142] και την Ευρώπη. Με βάση το ευρωπαϊκό δίκτυο XT της CIGRE προτάθηκε το μικροδίκτυο αναφοράς XT [143], που περιέχει αντιπροσωπευτικές πηγές από δημοφιλείς τεχνολογίες, όπως φωτοβολταϊκά, μικροστροβίλους (CHP), ανεμογεννήτριες, κυψέλες καυσίμου και αποθήκευση. Το μικροδίκτυο αναφοράς διατηρεί τα σημαντικά τεχνικά χαρακτηριστικά των πραγματικών δικτύων διανομής, ενώ μειώνει την πολυπλοκότητα τους για να επιτρέψει την αποτελεσματική μοντελοποίηση και προσομοίωση της λειτουργίας του μικροδικτύου.

Τα προαναφερθέντα δίκτυα αναφοράς της CIGRE έχουν χρησιμοποιηθεί σε αρκετές δημοσιεύσεις. Για παράδειγμα, το δίκτυο αναφοράς MT της CIGRE και το σύστημα 12 ζυγών YT της IEEE ελέγχθηκαν μαζί σε σενάρια υψηλής διείσδυσης φωτοβολταϊκών σε προσομοίωση πραγματικού χρόνου [144]. Διάγνωση σφαλμάτων στο δίκτυο αναφοράς MT της CIGRE πραγματοποιήθηκε στο [145] και οι καταστάσεις λειτουργίας του μικροδικτύου αναφοράς XT προσομοιώθηκαν στο [146]. Επιπλέον δίκτυα διανομής αναφοράς έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία, όπως τα δίκτυα MT για την Κίνα [147] και την Ινδία [148].

Δεδομένου ότι τα προαναφερθέντα συστήματα/δίκτυα αναφοράς προτάθηκαν για κλασικές ψηφιακές προσομοιώσεις, απαιτούνται προσαρμογές ώστε να χρησιμοποιηθούν για προσομοιώσεις πραγματικού χρόνου και PHIL πειράματα/δοκιμές. Το δίκτυο διανομής XT της CIGRE και το μικροδίκτυο αναφοράς XT προτείνονται ως βάση για την ανάπτυξη δικτύων αναφοράς για PHIL πειράματα/δοκιμές με ΔΠ. Οι υπολογιστικές δυνατότητες του ΨΠΠΧ καθορίζουν το μέγιστο εφικτό μέγεθος του δικτύου, τον αριθμό και τη λεπτομέρεια των μοντέλων ΔΠ και τον αριθμό των μπλοκ ελέγχου συνολικά (ώστε να επιτευχθεί μικρό χρονικό βήμα). Αν αναλύονται συμμετρικά φαινόμενα μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μονοφασικό ισοδύναμο ώστε να μειωθεί το μέγεθος του δικτύου. Επίσης, η κατάλληλη διαίρεση του δικτύου στο προσομοιωμένο σύστημα και στο φυσικό σύστημα μπορεί να μειώσει περαιτέρω τον αριθμό των προσομοιωμένων ζυγών του δικτύου. Όπως προτάθηκε στο Κεφάλαιο 2, μέρος της σύνθετης αντίστασης του προσομοιωμένου συστήματος μπορεί να μεταφερθεί στο φυσικό σύστημα, βελτιώνοντας την ευστάθεια του PHIL πειράματος χωρίς τη χρήση μέσων που περιορίζουν την ακρίβεια (π.χ. φίλτρων). Οπότε, το φυσικό σύστημα μπορεί να περιλαμβάνει μονάδα ΔΠ αλλά και τις παρακείμενες γραμμές διανομής, μειώνοντας τον αριθμό των ζυγών του προσομοιωμένου συστήματος. Επιπλέον, το επίπεδο λεπτομέρειας των μοντέλων ΔΠ εξαρτάται από τις υπολογιστικές δυνατότητες του ΨΠΠΧ και το υπό μελέτη ζήτημα. Η ΔΠ μπορεί να μοντελοποιηθεί ως πηγή P-Q (ή πηγή ρεύματος), ως απλοποιημένο μοντέλο αντιστροφέα (average model), ως αντιστροφέας με πλήρες PWM μοντέλο, ως αντιστροφέας μαζί με DC/DC μετατροπέα κτλ. Σημειώνεται ότι οι ΨΠΠΧ νεότερης τεχνολογίας επιτρέπουν τη μοντελοποίηση γρήγορων διακοπτικών φαινομένων (π.χ. PWM με βήμα 1-3 μ s), όμως δεν διαθέτουν όλα τα εργαστήρια αυτή τη δυνατότητα.

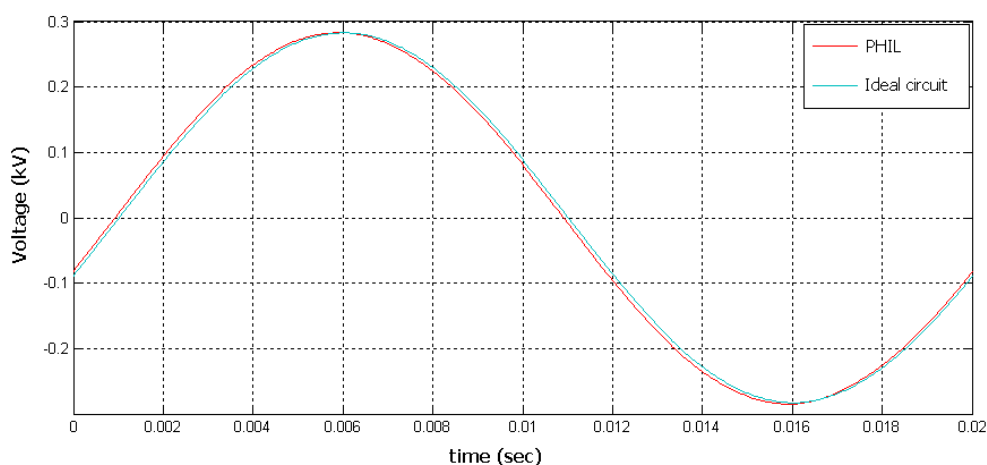
Με βάση τα παραπάνω, προτείνονται δύο δίκτυα αναφοράς: για ΨΠΠΧ με μεγάλες υπολογιστικές δυνατότητες και για ΨΠΠΧ με μικρές υπολογιστικές δυνατότητες. Για την πρώτη περίπτωση προτείνεται η πλήρης μοντελοποίηση του μικροδικτύου αναφοράς XT και η μοντελοποίηση των μονάδων ΔΠ με πλήρη PWM μοντέλα των αντιστροφέων (ειδικά αν μελετώνται θέματα αρμονικών). Για τη δεύτερη περίπτωση προτείνεται η απλοποιημένη μοντελοποίηση του μικροδικτύου αναφοράς, η χρήση μοντέλων πηγής P-Q για τις μονάδες ΔΠ και η τοποθέτηση στο φυσικό σύστημα της μονάδας ΔΠ με την παρακείμενη γραμμή διανομής. Ενδεικτικές απλοποιήσεις του μικροδικτύου είναι η μονοφασική αναπαράσταση, η σύμπτυξη των γραμμών στις οποίες δεν συνδέεται φορτίο ή παραγωγή και η μεταφορά του φορτίου και των μονάδων ΔΠ στην κύρια γραμμή (ενδεικτικά το αρχικό δίκτυο 12 ζυγών μπορεί να απλοποιηθεί σε δίκτυο 4 ζυγών).

Το δίκτυο αναφοράς, με την τοπολογία σύνδεσης και τη διαδικασία αναφοράς μπορεί να αποτελέσει μία κοινή βάση για την πραγματοποίηση PHIL πειραμάτων και δοκιμών.

4.6) Προκαταρκτικά PHIL πειράματα

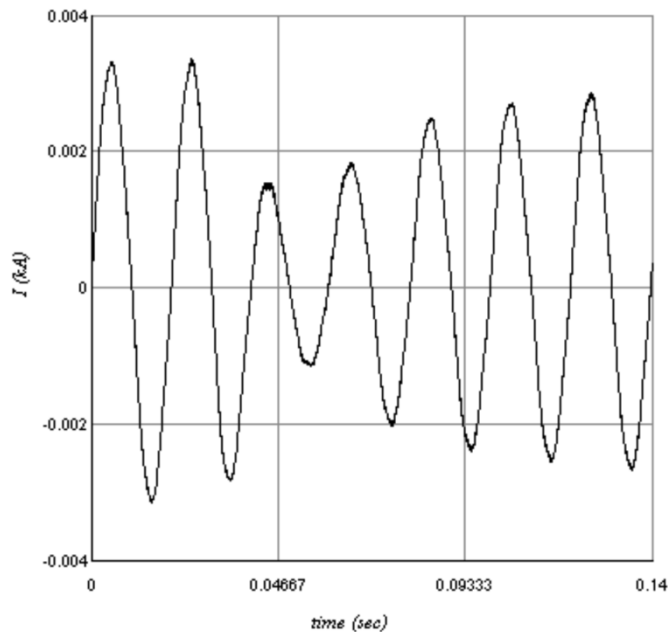
4.6.1) PHIL υλοποίηση διαιρέτη τάσης

Προτείνεται η υλοποίηση διαιρέτη τάσης ως το αρχικό PHIL πείραμα, εφόσον είναι απλό στην υλοποίηση και μπορούν να φανερωθούν πιθανά προβλήματα. Το προσομοιωμένο σύστημα αποτελείται από πηγή τάσης σε σειρά με ωμική αντίσταση και το φυσικό σύστημα από ωμική αντίσταση. Θεωρούμε ένα ευσταθές σενάριο, όπου $R_{SW} < R_{HW}$. Παράλληλα, στον ΨΠΠΧ προσομοιώνεται το κύκλωμα του ιδανικού διαιρέτη τάσης. Στο Σχήμα 4.16 φαίνεται η τάση του κοινού ζυγού, όπως προκύπτει από το PHIL πείραμα και από τον ιδανικό διαιρέτη τάσης. Το μέγιστο σφάλμα είναι της τάξης του 5%.



Σχήμα 4.16. Σύγκριση της τάσης που προκύπτει από το PHIL πείραμα και της τάσης του ιδανικού διαιρέτη τάσης

Αρχικά, το πείραμα εκτελείται σε ανοιχτό βρόχο, δηλαδή το ρεύμα του δοκιμίου δεν εισέρχεται στο προσομοιωμένο σύστημα. Κατά τη μετάβαση σε λειτουργία κλειστού βρόχου (κλείνοντας διακόπτη στο λογισμικό του ΨΠΠΧ) η τάση αναφοράς από τον ΨΠΠΧ μειώνεται, οδηγώντας σε μείωση της τάσης του ενισχυτή ισχύος. Το μεταβατικό φαινόμενο στην τάση του ενισχυτή «αντανακλάται» στο ρεύμα ανατροφοδότησης στον ΨΠΠΧ και φαίνεται στο Σχήμα 4.17. Στη συνέχεια, υλοποιήθηκε ανιχνευτής μηδενικής τιμής διέλευσης (zero-crossing detection) στο λογισμικό του ΨΠΠΧ, ώστε να κλείνει ο βρόχος όταν το στιγμιαίο ρεύμα διέρχεται από τη μηδενική τιμή και να εκκινεί πιο ομαλά το PHIL πείραμα.



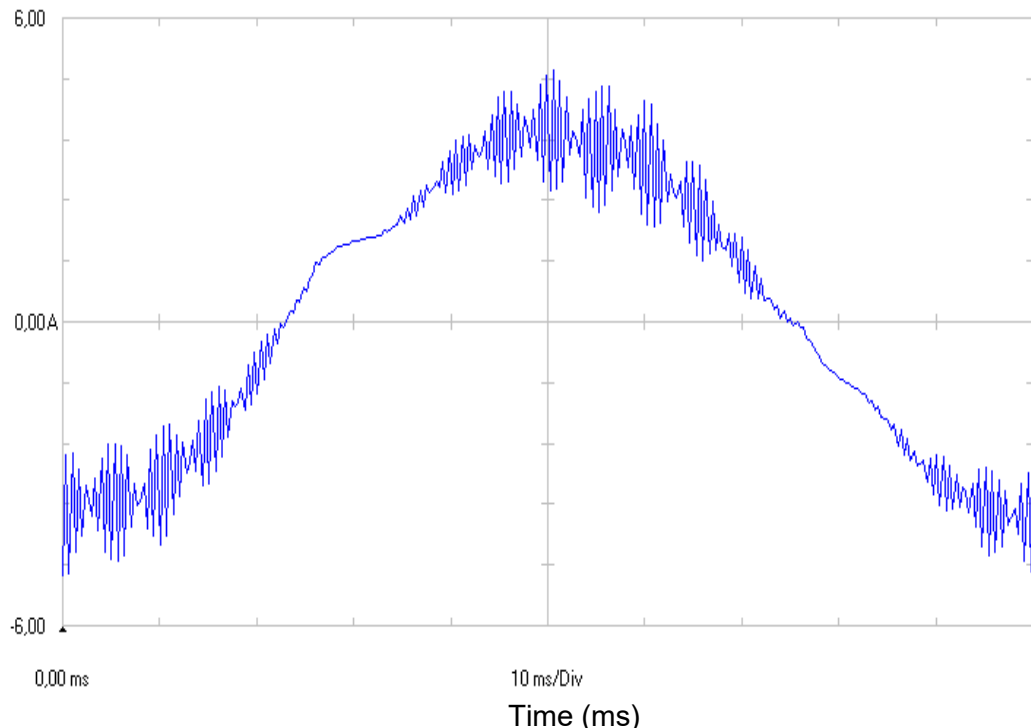
Σχήμα 4.17. Μεταβατικό φαινόμενο στο ρεύμα ανατροφοδότησης κατά τη μετάβαση από λειτουργία ανοιχτού βρόχου σε κλειστού βρόχου στο λογισμικό του ΨΠΠΧ

4.6.2) Σύνδεση φωτοβολταϊκού αντιστροφέα στον AC/DC/AC μετατροπέα

Ο Φ/Β αντιστροφέας συνδέθηκε στον AC/DC/AC μετατροπέα της διεπαφής ισχύος δίχως να συνδεθεί ο ΨΠΠΧ. Κατά το κλείσιμο του διακόπτη που συνδέει τον Φ/Β αντιστροφέα παρατηρήθηκαν αιχμές ρεύματος (spikes) πλάτους μεταξύ 5 και 15 A και διάρκειας 10 με 100 μ s. Οι αιχμές οφείλονταν στο φίλτρου εξόδου του Φ/Β αντιστροφέα, το οποίο κατά το κλείσιμο του διακόπτη «τραβούσε» ρεύμα αιχμής. Η προστασία υπέρεντασης του AC/DC/AC μετατροπέα ενεργοποιούνταν με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η πραγματοποίηση του πειράματος.

Οι αιχμές ρεύματος μειώθηκαν παρεμβάλλοντας μία ωμική αντίσταση 50 Ω σε σειρά μεταξύ του Φ/Β αντιστροφέα και του AC/DC/AC μετατροπέα. Μετά το κλείσιμο του διακόπτη, αλλά πριν ξεκινήσει ο Φ/Β αντιστροφέας να παρέχει ισχύ, η αντίσταση παρακάμπτεται (μέσω ενός άλλου διακόπτη), οπότε το πείραμα εκτελείται κανονικά.

Εν συνεχεία, όταν ο Φ/Β αντιστροφέας παρείχε ισχύ στον AC/DC/AC μετατροπέα το ρεύμα παρουσίαζε ταλαντώσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.18. Παρατηρούμε την ύπαρξη τριών συχνοτήτων (θεμελιώδης 50Hz, εκατοντάδες Hz, και kHz). Το Total Harmonic Distortion (THD) του ρεύματος σε ονομαστικές συνθήκες μετρήθηκε με αναλυτή ισχύος και βρέθηκε 8%, ενώ όταν ο Φ/Β αντιστροφέας συνδεόταν στο δίκτυο το THD ήταν χαμηλότερο του 3%. Το πρόβλημα αυτό οφειλόταν στο γεγονός πως ο εμπορικός Φ/Β αντιστροφέας («μαύρο κουτί») είναι κατασκευασμένος για να συνδέεται στο δίκτυο και όχι σε άλλον ηλεκτρονικό μετατροπέα, με αποτέλεσμα να «εμπλέκονται» οι αλγόριθμοι ελέγχου των 2 μετατροπέων. Το πρόβλημα λύθηκε τοποθετώντας μία επιπλέον αυτεπαγωγή στο φίλτρο εξόδου του AC/DC/AC μετατροπέα, δηλαδή μετατρέποντας το L-C φίλτρο σε L-C-L φίλτρο.

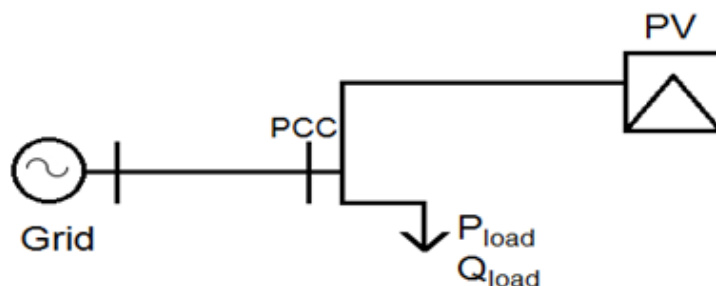


Σχήμα 4.18. Ταλαντώσεις που παρουσιάστηκαν στο ρεύμα του Φ/Β αντιστροφέα κατά τη σύνδεση του με τον AC/DC/AC μετατροπέα

4.6.3) PHIL πείραμα με φωτοβολταϊκό αντιστροφέα και γραμμή μεγάλου μήκους

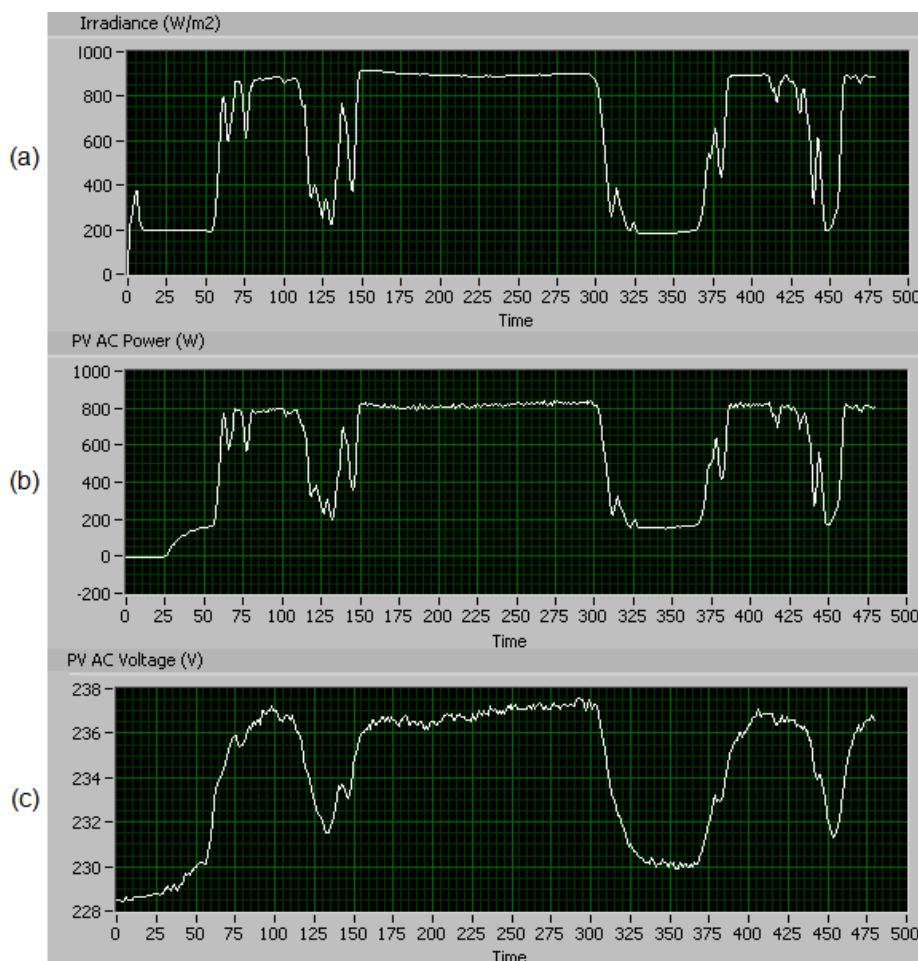
Στη συνέχεια εξετάζεται το φαινόμενο της ανύψωσης τάσης στα δίκτυα XT εξαιτίας της διείσδυσης Φ/Β. Στο λογισμικό του ΨΠΠΧ μοντελοποιείται απλό δίκτυο που περιλαμβάνει πηγή τάσης, γραμμή μεγάλου μήκους και φορτίο (Σχήμα 4.19). Το SCADA που έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο [B.7] επιτρέπει την ταυτόχρονη μέτρηση των παρακάτω μεγεθών: τάση, ρεύμα, ισχύς του Φ/Β αντιστροφέα, ηλιακή ακτινοβολία κ.α.

Για την PHIL υλοποίηση επιλέχθηκε η τοπολογία του ιδανικού μετασχηματιστή (παράγραφος 2.5) και η ανάλυση της ευστάθειας έδειξε την ανάγκη χρήσης βαθυπερατού φίλτρου στο ρεύμα ανατροφοδότησης.



Σχήμα 4.19. Προσομοιωμένο σύστημα: δίκτυο με γραμμή μεγάλου μήκους και φορτίο. Φυσικό σύστημα: Φ/Β αντιστροφέας και Φ/Β πλαίσια

Η ενεργός ισχύς που παράγεται από τα Φ/Β μεταβάλλεται σε σχέση με την ηλιακή ακτινοβολία για δεδομένη θερμοκρασία. Το PHIL πείραμα δείχνει πως η τάση του Φ/Β αντιστροφέα αυξάνεται ακολουθώντας την ακτινοβολία και την παραγόμενη ενεργό ισχύ από τα πραγματικά Φ/Β πλαίσια (Σχήμα 4.20). Με αυτό το πείραμα γίνεται ξεκάθαρη η αλληλεπίδραση μεταξύ του προσομοιωμένου συστήματος και της συσκευής-υπό-δοκιμή.

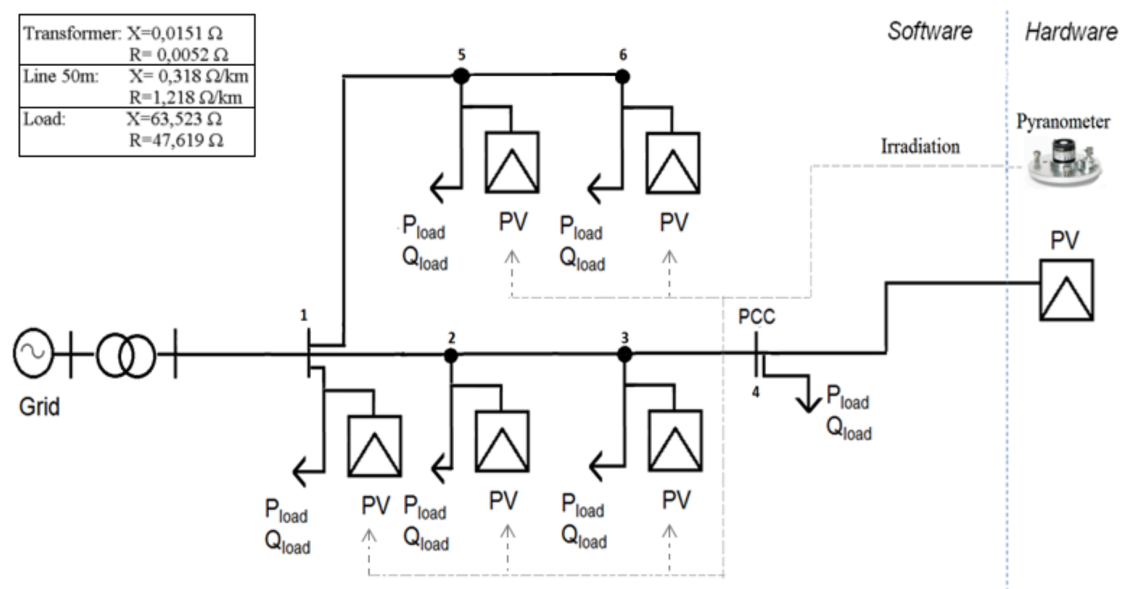


Σχήμα 4.20. Μετρήσεις κατά τη διάρκεια του PHIL πειράματος: ηλιακή ακτινοβολία (a), ενεργός ισχύς του Φ/Β αντιστροφέα (b), τάση του Φ/Β αντιστροφέα (c)

Σημειώνεται πως για να παρατηρηθεί ανύψωση τάσης, δεδομένης της χαμηλής ονομαστικής ισχύος του αντιστροφέα (1.1 kW), η ισχύς του μπορεί να αυξηθεί εικονικά εφαρμόζοντας κέρδος στο ρεύμα ανατροφοδότησης στον ΨΠΠΧ. Όμως, αυτό το κέρδος εφαρμόζεται σε σύστημα κλειστού βρόχου και μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια το PHIL πείραμα. Οπότε, στην παραπάνω εφαρμογή επιλέχθηκε κέρδος ίσο με 2 για να φανεί μεγαλύτερη ανύψωση τάσης, χωρίς όμως να παρουσιαστεί αστάθεια. Η επίδραση του κέρδους ανατροφοδότησης στην ευστάθεια έχει αναλυθεί στην παράγραφο 2.6.1.

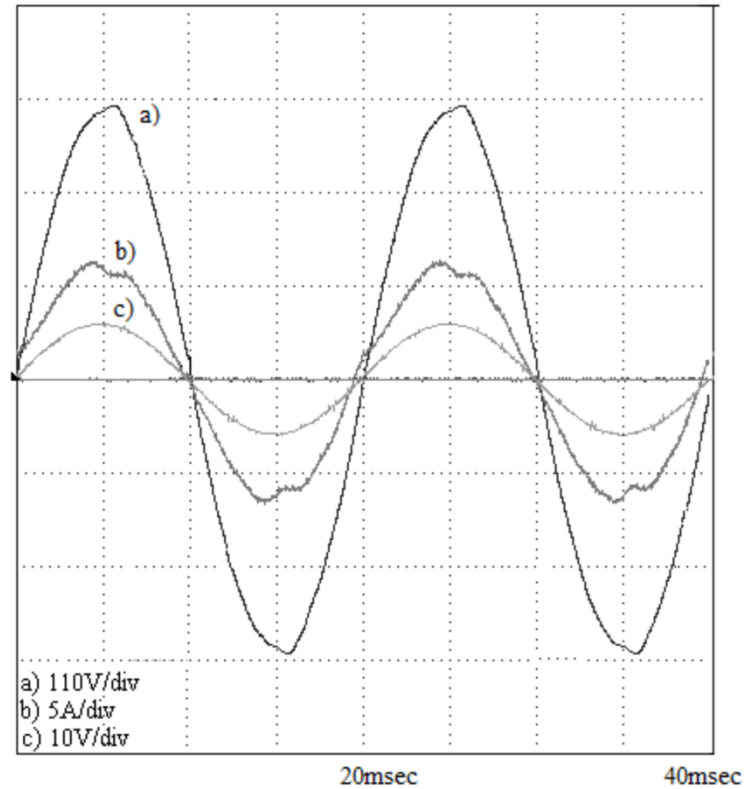
4.6.4) PHIL πείραμα με φωτοβολταϊκό αντιστροφέα σε αγροτικό δίκτυο χαμηλής τάσης

Μοντελοποιείται αγροτικό δίκτυο XT στον ΨΠΠΧ που αποτελείται από μετασχηματιστή MT/XT, γραμμές διανομής ίσου μήκους, φορτία και Φ/Β (Σχήμα 4.21). Θεωρείται περίπτωση χαμηλού φορτίου σε όλους τους ζυγούς και υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας. Στον ΨΠΠΧ προσομοιώνονται 5 Φ/Β παραγωγές (στους ζυγούς 1,2,3,5,6), ενώ ο πραγματικός Φ/Β αντιστροφέας συνδέεται στον ζυγό 4 και αναπαρίσταται στον ΨΠΠΧ ως εξαρτημένη πηγή ρεύματος. Ο ΨΠΠΧ μπορεί να δέχεται σήματα από επιπλέον εξωτερικές συσκευές. Έτσι, ένα πραγματικό πυρανόμετρο που έχει τοποθετηθεί στο επίπεδο των Φ/Β πλαισίων παρέχει μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας, οι οποίες εισάγονται στα προσομοιωμένα Φ/Β στον ΨΠΠΧ. Με αυτόν τον τρόπο το πείραμα είναι πιο ρεαλιστικό, εφόσον η παραγόμενη ισχύς από τα προσομοιωμένα Φ/Β μεταβάλλεται σε σχέση με την ηλιακή ακτινοβολία, όπως γίνεται και με τα πραγματικά Φ/Β.



Σχήμα 4.21. Προσομοιωμένο αγροτικό δίκτυο XT με Φ/Β στον ΨΠΠΧ και ο πραγματικός εξοπλισμός

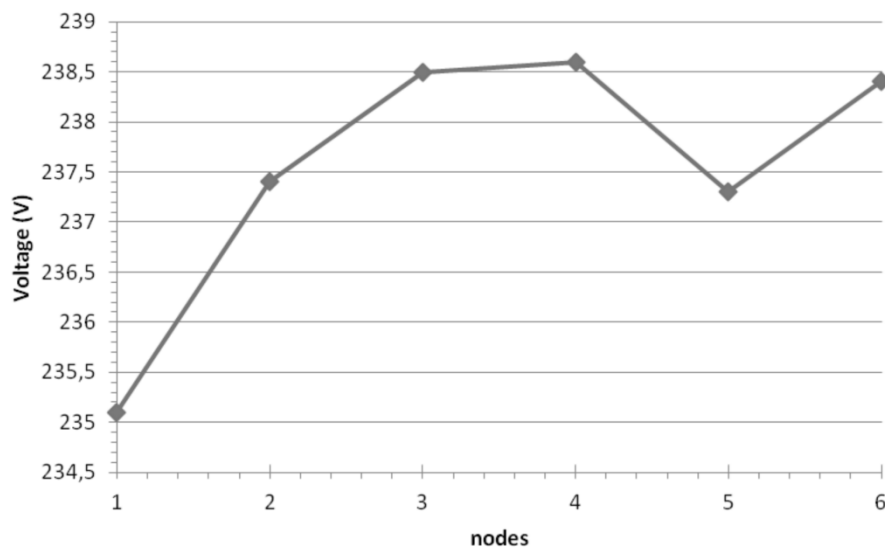
Μετρήσεις με παλμογράφο πραγματοποιούνται στον κοινό ζυγό μεταξύ προσομοιωμένου και φυσικού συστήματος (ζυγός 4). Η τάση αναφοράς που παρέχει ο ΨΠΠΧ ($4.68 \text{ V}_{\text{rms}}$), η παραγόμενη τάση από τον ενισχυτή ισχύος ($234 \text{ V}_{\text{rms}}$) και το ρεύμα που εγγεί ο πραγματικός Φ/Β αντιστροφέας (2 A_{rms}) παριστάνονται στο Σχήμα 4.22. Ο Φ/Β αντιστροφέας απορροφά άεργο ισχύ με συντελεστή ισχύος 0.98. Στο Σχήμα 4.22 παρατηρείται διαφορά φάσης μεταξύ της τάσης του ΨΠΠΧ και της τάσης που παράγει ο ενισχυτής που αντιστοιχεί στη χρονική καθυστέρηση του ενισχυτή.



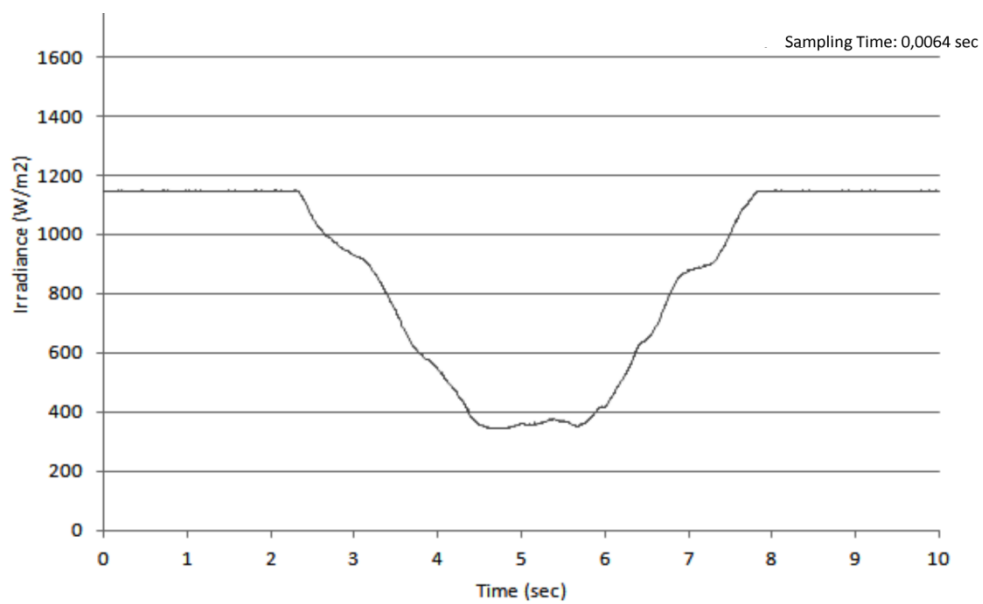
Σχήμα 4.22. Τάση του ενισχυτή ισχύος (a), ρεύμα του Φ/B αντιστροφέα (b), τάση αναφοράς από τον ΨΠΠΧ (c)

Στο Σχήμα 4.23 παρουσιάζονται οι τάσεις σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας (ηλιακή ακτινοβολία=1200 W/m², $P_{pv_simulated}=4$ kW, $P_{pv_hardware}=950$ W). Ο υψηλός λόγος R/X των δικτύων XT αυξάνει την ευαισθησία της τάσης ως προς την ενεργό ισχύ. Φαίνεται πως η τάση όλων των ζυγών αυξάνεται εξαιτίας της ενεργού ισχύος που παρέχουν τα Φ/B και ο πιο απομακρυσμένος ζυγός παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αύξηση. Η τάση του ζυγού 2 είναι υψηλότερη από την τάση του ζυγού 5 και η τάση του ζυγού 3 είναι υψηλότερη από την τάση του ζυγού 6. Αυτό οφείλεται στην παραγόμενη ισχύ από τα πραγματικά Φ/B που οδηγεί σε μεγαλύτερη μεταφορά ενεργού ισχύος στην αντίστοιχη γραμμή.

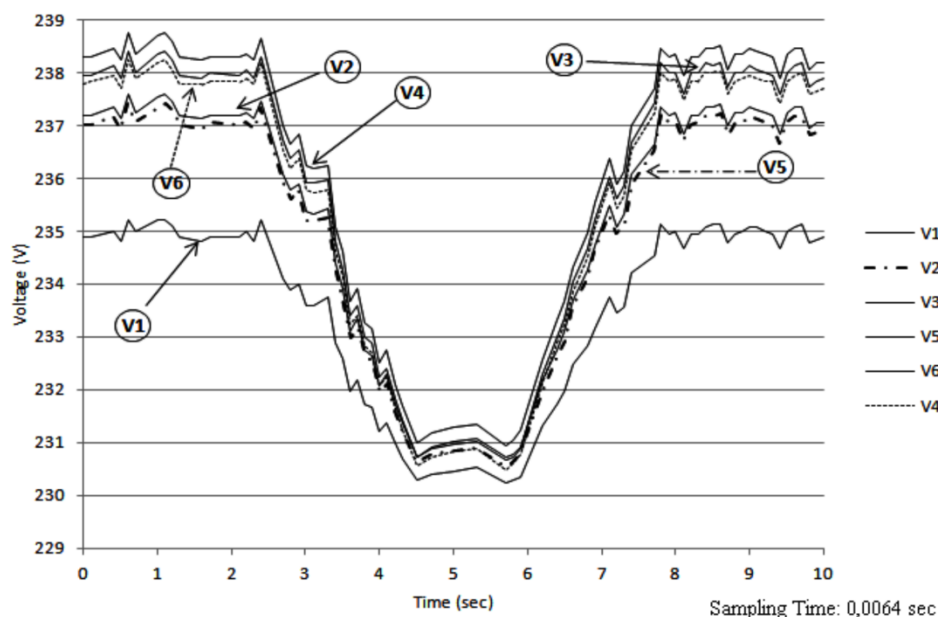
Στη συνέχεια πραγματοποιείται πείραμα σε μεταβατική κατάσταση, όπου παρατηρείται μεταβολή στην ηλιακή ακτινοβολία (Σχήμα 4.24). Η ηλιακή ακτινοβολία καθώς και οι τάσεις των ζυγών απεικονίζονται στο λογισμικό του ΨΠΠΧ (ηλιακή ακτινοβολία=1150 W/m², $P_{pv_simulated}=3.8$ kW, $P_{pv_hardware}=900$ W πριν τη μεταβολή). Η ενεργός ισχύς που παράγεται από τα προσομοιωμένα Φ/B και από τον πραγματικό Φ/B αντιστροφέα μειώνεται, οπότε η τάση σε όλους τους ζυγούς μειώνεται (Σχήμα 4.25). Η σχέση μεταξύ των τάσεων των ζυγών παραμένει η ίδια με το πείραμα μόνιμης κατάστασης.



Σχήμα 4.23. Οι τάσεις στους ζυγούς σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας κατά τη διάρκεια PHIL πειράματος



Σχήμα 4.24. Η μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας από το πυρανόμετρο παριστάνεται στο λογισμικό του ΨΠΠΧ



Σχήμα 4.25. Οι τάσεις των ζυγών κατά τις μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας

4.7) Σύνοψη και συμπεράσματα

Σε αυτό το Κεφάλαιο γίνεται λεπτομερής περιγραφή του σχεδιασμού και της ανάπτυξης μίας εργαστηριακής διάταξης PHIL για μελέτες ΔΠ, εστιάζοντας στην ανάπτυξη της διεπαφής ισχύος, σε αλγορίθμους προστασίας για την αντιμετώπιση αστάθειας και σε προβλήματα κατά τη διασύνδεση συσκευών ηλεκτρονικών ισχύος. Η επιτυχημένη ανάπτυξη της εργαστηριακής διάταξης επιβεβαιώνεται μέσω εργαστηριακών PHIL πειραμάτων, όπου επιτυγχάνεται αλληλεπίδραση κλειστού βρόχου μεταξύ προσομοιωμένου δικτύου διανομής και πραγματικού Φ/Β αντιστροφέα. Επίσης, μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας από πραγματικό πυρανόμετρο εισάγονται σε προσομοιωμένα Φ/Β και πραγματοποιούνται PHIL πειράματα σε μόνιμη και μεταβατική κατάσταση λειτουργίας. Η ανάπτυξη της PHIL διάταξης ανοίγει δυνατότητες πραγματοποίησης πειραμάτων που δεν παρέχονται από συμβατικές πειραματικές μεθόδους. Επιπλέον, ορίζεται διαδικασία/τοπολογία αναφοράς με σκοπό να αποτελέσει μία κοινή βάση για PHIL πειράματα και δοκιμές και να καλύψει την απουσία συστάσεων σε ερευνητικές εργασίες και πρότυπα/οδηγίες. Παρέχονται συστάσεις για τον εξοπλισμό, διαδικασία δοκιμών αναφοράς και δίκτυο αναφοράς με την προοπτική μελλοντικής χρήσης σε τυποποιημένες δοκιμές. Τα παραπάνω μπορούν να συμβάλλουν στην ανάπτυξη PHIL διατάξεων σε άλλα εργαστήρια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΚΑΙ PHIL ΔΟΚΙΜΕΣ ΓΙΑ ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

5.1) Εισαγωγή

Σε αυτό το Κεφάλαιο [Α.4] πραγματοποιούνται προσομοιώσεις και PHIL δοκιμές ρύθμισης τάσης και συχνότητας σε δίκτυα με ΔΠ. Καταρχάς, εξετάζεται η συνεργασία μεταξύ τοπικού ελέγχου τάσης ΔΠ και Συστήματος Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ) εγκατεστημένο σε μετασχηματιστή ΥΤ/ΜΤ σε ασθενές δίκτυο. Πραγματοποιούνται αμιγώς ψηφιακές προσομοιώσεις στο λογισμικό Matlab/Simulink. Παρουσιάζονται πέντε περιπτώσεις προβληματικής συνεργασίας: χρονικός συντονισμός, αύξηση της τάσης της ΔΠ με αυξημένη ροή αέργου ισχύος, επαναλαμβανόμενες αλλαγές λήψης του ΣΑΤΥΦ και εναντίωση της ΔΠ στις αλλαγές λήψης. Συχνές αλλαγές λήψης του ΣΑΤΥΦ οδηγούν σε αυξημένες ανάγκες συντήρησης και περιορίζουν το χρόνο ζωής του, ενώ η επιπλέον ροή αέργου ισχύος αυξάνει τις ωμικές απώλειες στο δίκτυο.

Αρκετές προηγμένες εφαρμογές της PHIL μεθόδου για μελέτες ΔΠ έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία [4][31][126][149][150][B.15]. Σε αρκετές περιπτώσεις (π.χ. [150][B.15]) μπορεί να ληφθούν παρόμοια αποτελέσματα μεταξύ της PHIL προσομοίωσης και αμιγώς ψηφιακών μεθόδων προσομοίωσης, οι οποίες είναι συνήθως απλούστερες και ταχύτερες στην υλοποίηση. Δεν έχουν εντοπιστεί με σαφήνεια πλεονεκτήματα της PHIL μεθόδου σε σύγκριση με τις αμιγώς ψηφιακές μεθόδους προσομοίωσης.

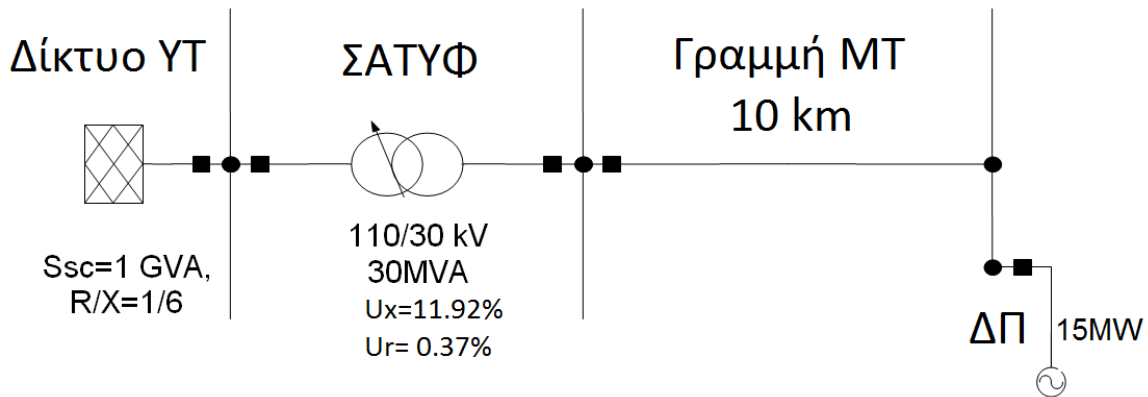
Η PHIL μέθοδος επιτρέπει τη χρήση μιας μονάδας ΔΠ μικρότερης κλίμακας (αντιστροφέας και DC πηγή) με ακριβώς τις ίδιες λειτουργίες (π.χ. $Q(V)$ έλεγχος) για την αξιολόγηση της σύνδεσης στο δίκτυο της μονάδας ΔΠ πλήρους ισχύος. Στην PHIL υλοποίηση σε αυτό το Κεφάλαιο, εφαρμόστηκε η προτεινόμενη μέθοδος αλλαγής κλίμακας και μετατόπισης σύνθετης αντίστασης, η οποία οδηγεί σε ευσταθή λειτουργία χωρίς να περιορίζει την ακρίβεια (Κεφάλαιο 2). Οι PHIL δοκιμές που πραγματοποιούνται δείχνουν με επιτυχία προβλήματα στη συνεργασία του ΣΑΤΥΦ με τον ελεγκτή τάσης της μονάδας ΔΠ. Επιπλέον, παρατηρούνται επαναλαμβανόμενες ταλαντώσεις του ελεγκτή τάσης του πραγματικού αντιστροφέα σε ορισμένες περιπτώσεις. Η αστάθεια στον $Q(V)$ έλεγχο του αντιστροφέα, που δεν είναι ορατή στις αμιγώς ψηφιακές προσομοιώσεις και στις τυποποιημένες δοκιμές, φανερώνει την αξία των PHIL δοκιμών για την τρέχουσα και μελλοντική ανάλυση των ΣΗΕ και τις εργαστηριακές δοκιμές.

Επιπλέον, επικυρώνεται μοντέλο $Q(V)$ ελεγκτή αντιστροφέα, που συνδέεται στο δίκτυο διανομής που περιλαμβάνει μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ, χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις των PHIL δοκιμών.

Τέλος, πραγματοποιούνται PHIL δοκιμές πρωτεύουσας ρύθμισης συχνότητας, όπου εξετάζεται η επίδραση του στατισμού και της εικονικής αδράνειας [Α.2]. Σε απομονωμένο σύστημα συνδέεται εμπορικός αντιστροφέας φωτοβολταϊκών με $P(f)$ χαρακτηριστική και προσομοιωμένη μονάδα αποθήκευσης που παρέχει εικονική αδράνεια.

5.2) Προσομοιώσεις προβληματικής συνεργασίας τοπικού ελέγχου τάσης ΔΠ και ΣΑΤΥΦ

Μονάδα ΔΠ (π.χ. Φ/Β ή αιολικό πάρκο) ονομαστικής ισχύος 15 MW συνδέεται σε μετασχηματιστή ΥΤ/ΜΤ εξοπλισμένο με ΣΑΤΥΦ, μέσω γραμμής ΜΤ 10 χιλιομέτρων. Στο Σχήμα 5.1 παριστάνεται το υπό μελέτη δίκτυο και τα χαρακτηριστικά του αναγράφονται στον Πίνακα 5.1.



Σχήμα 5.1. Το υπό μελέτη δίκτυο

Η ΔΠ λειτουργεί με $Q(V)$ ή $\cos\phi(P)$ χαρακτηριστική (παράγραφος 3.2.1) με βάση τα πρόσφατα πρότυπα. Τα σύμβολα VQ_{min} , $VQDB_{neg}$, $VQDB_{pos}$, VQ_{max} , V_n της $Q(V)$ χαρακτηριστικής ορίζονται στο Σχήμα 3.6. Το P_{thresh} της $\cos\phi(P)$ χαρακτηριστικής είναι το κατώφλι πάνω από το οποίο το $\cos\phi$ λαμβάνει μικρότερες τιμές από τη μονάδα (ίσο με 0.5 α.μ. στο Σχήμα 3.5). Οι παράμετροι της $Q(V)$ χαρακτηριστικής, της $\cos\phi(P)$ χαρακτηριστικής και του ΣΑΤΥΦ που αναγράφονται στον Πίνακα 5.1 χρησιμοποιούνται στις προσομοιώσεις/δοκιμές που ακολουθούν, εκτός και αν αναφέρεται διαφορετικά.

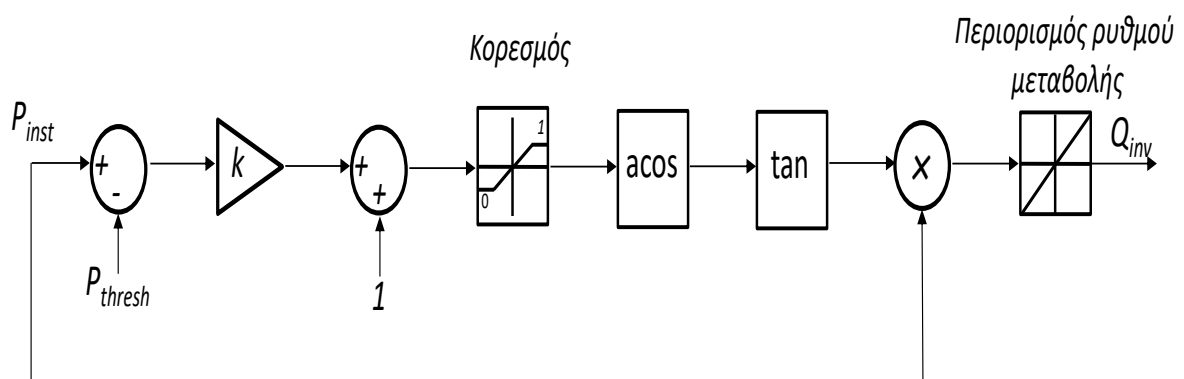
Η υλοποίηση της $\cos\phi(P)$ χαρακτηριστικής παριστάνεται στο Σχήμα 5.2. Η κλίση της καμπύλης (k) ισούται με:

$$k = \frac{1 - \cos\phi_{min}}{P_{thresh} - P_n} \quad (5.1)$$

Από την τρέχουσα ενεργό ισχύ του αντιστροφέα (P_{inst}), το κατώφλι (P_{thresh}), την κλίση (k), το μοναδιαίο $\cos\phi$ και εφαρμόζοντας περιορισμό μέγιστης τιμής προκύπτει το $\cos\phi$. Στη συνέχεια υπολογίζεται η άεργος ισχύς από το $\cos\phi$ που προέκυψε από τη χαρακτηριστική και από την τρέχουσα ενεργό ισχύ και εφαρμόζεται περιορισμός στον ρυθμό μεταβολής της άεργου ισχύος.

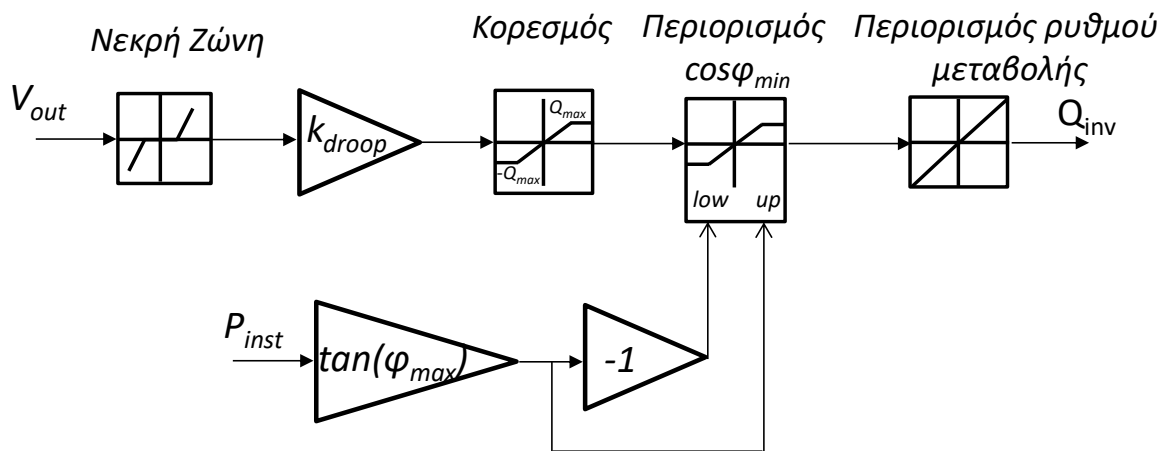
Ισχύς βραχυκύκλωσης	1 GVA, $R/X=1/6$
Μετασχηματιστής	110 kV/30 kV, 30 MVA $U_x=11.92\%$, $U_r=0.37\%$
ΣΑΤΥΦ	-Τάση αναφοράς=100%, Νεκρή ζώνη: $\pm 0.7\%$ -Βήμα τάσης: 1%. -Χρονική καθυστέρηση ενεργοποίησης: 1 s -Μηχανική χρονική καθυστέρηση: 4 s -17 λήψεις: 8 θετικές, 8 αρνητικές και η μηδενική -Ρυθμίζει την τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή
Γραμμή MT	Εναέρια 10 km, Al 120 mm ² $R=0.253 \Omega/\text{km}$ $X=0.355 \Omega/\text{km}$
Διεσπαρμένη Παραγωγή	15 MW, ελάχιστο $\cos\phi=0.85$ Περιορισμός ρυθμού μεταβολής της αέργου ισχύος: 20% της μέγιστης αέργου ισχύος ανά δευτερόλεπτο
Q(V) χαρακτηριστική της ΔΠ	$V_n=100\%$, $VQDB_{pos}=101\%$, $VQ_{max}=104\%$ $VQDB_{neg}=99\%$, $VQ_{min}=96\%$ (Σχήμα 3.6)
$\cos\phi(P)$ χαρακτηριστική της ΔΠ	$\cos\phi=1$ μέχρι το ήμισυ της ονομαστικής ενεργού ισχύος ($P_{thresh}=0.5$ α.μ.) $\cos\phi_{min}=0.9$ στην ονομαστική ενεργό ισχύ (Σχήμα 3.5)

Πίνακας 5.1. Χαρακτηριστικά του δικτύου και της μονάδας ΔΠ



Σχήμα 5.2. Υλοποίηση της $\cos\phi(P)$ χαρακτηριστικής

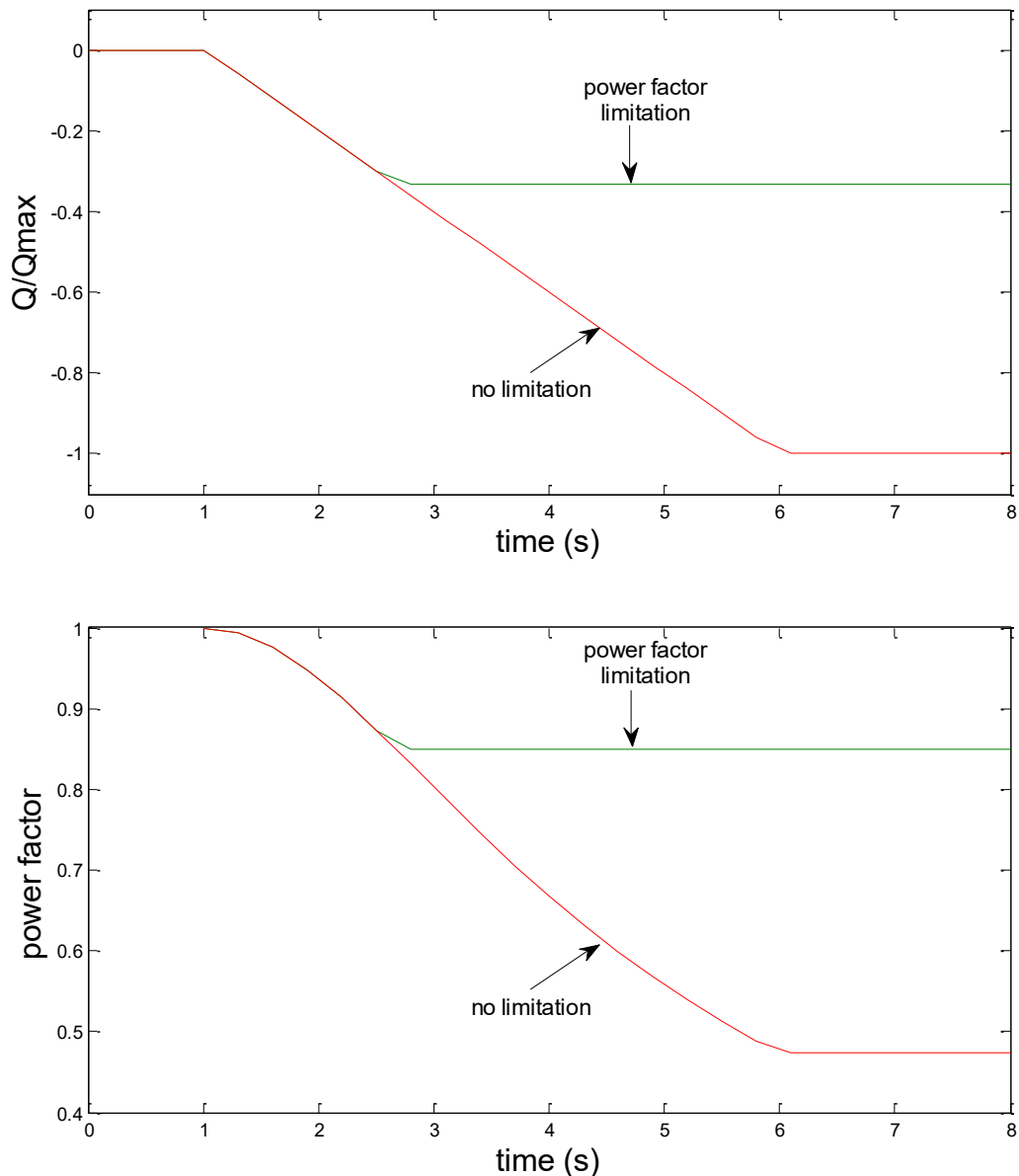
Η υλοποίηση της $Q(V)$ χαρακτηριστικής παριστάνεται στο Σχήμα 5.3. Θεωρείται μονάδα ΔΠ με σταθερή $Q(V)$ χαρακτηριστική (η μέγιστη άεργος ισχύς δεν εξαρτάται από την τρέχουσα ενεργό ισχύ, $Q_{max}=P_n \cdot \tan(\varphi_{max})$) και «τριγωνικό» P-Q διάγραμμα (Σχήμα 3.13). Ως εκ τούτου, εφαρμόζεται περιορισμός στην άεργο ισχύ εξαιτίας του ελάχιστου συντελεστή ισχύος για χαμηλότερη ενεργό ισχύ από την ονομαστική. Η μετρούμενη τάση στους ακροδέκτες του αντιστροφέα διέρχεται από νεκρή ζώνη (μεταξύ $VQDB_{neg}$ και $VQDB_{pos}$) και η διαφορά που προκύπτει πολλαπλασιάζεται με το κέρδος k_{droop} (σχέση (3.16)). Εφαρμόζεται περιορισμός στη μέγιστη άεργο ισχύ (Q_{max} , $-Q_{max}$) για την αναπαράσταση της περιοχής κορεσμού της χαρακτηριστικής. Επιπλέον, η τρέχουσα ενεργός ισχύς της ΔΠ (P_{inst}) πολλαπλασιάζεται με το $\tan(\varphi_{max})$ για τον υπολογισμό της μέγιστης εφικτής αέργου ισχύος για τη δεδομένη ενεργό ισχύ. Τέλος εφαρμόζεται περιορισμός ρυθμού μεταβολής στην άεργο ισχύ.



Σχήμα 5.3. Υλοποίηση της $Q(V)$ χαρακτηριστικής

Στις ανωτέρω μοντελοποιήσεις θεωρείται μόνο το μέρος του αντιστροφέα που σχετίζεται με τη ρύθμιση τάσης. Το φίλτρο εξόδου του αντιστροφέα δεν λαμβάνεται υπόψη εφόσον η επίδραση του στην άεργο ισχύ αντισταθμίζεται από τον ελεγκτή ρεύματος σε σύντομο χρονικό διάστημα. Επίσης, σημειώνεται πως δεν περιλαμβάνεται η διαδικασία μέτρησης και επεξεργασίας της ενεργού ισχύος (Σχήμα 5.2) και της τάσης (Σχήμα 5.3).

Στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζεται ο περιορισμός της αέργου ισχύος εξαιτίας του ελάχιστου $\cos\varphi$ όταν η ΔΠ λειτουργεί με $Q(V)$ έλεγχο, «τριγωνικό» P-Q διάγραμμα και παρέχει το 1/3 της ονομαστικής ενεργού ισχύος. Η τάση της ΔΠ αυξάνεται βηματικά από το 1 α.μ. στο 1.06 α.μ. και γίνεται σύγκριση της αέργου ισχύος και του $\cos\varphi$ με την περίπτωση που δεν υπήρχε ο περιορισμός.



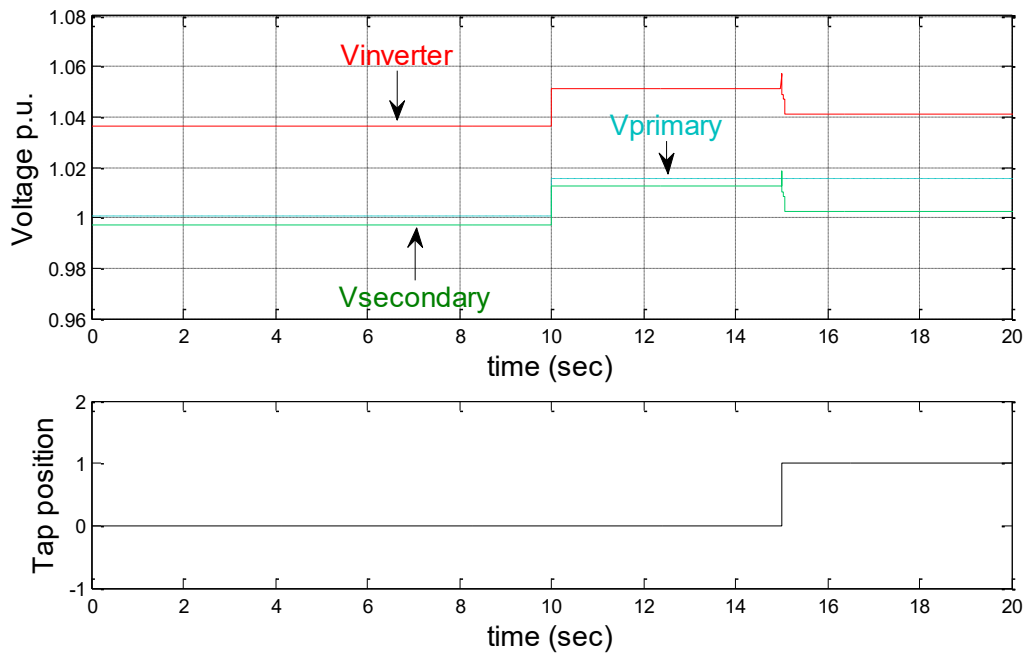
Σχήμα 5.4. Περιορισμός της αέργου ισχύος εξαιτίας του ελάχιστου εφικτού $\cos\phi$ όταν η ΔΠ λειτουργεί σε ισχύ χαμηλότερη της ονομαστικής («τριγωνικό» P-Q διάγραμμα)

5.2.1) Χρονικός συντονισμός μεταξύ ΣΑΤΥΦ και Q(V) ελεγκτή

Αν η τάση του δικτύου YT αυξηθεί, μπορεί ο Q(V) ελεγκτής της ΔΠ να αντιδράσει γρηγορότερα από το ΣΑΤΥΦ και το ΣΑΤΥΦ να μην αλλάξει λήψη. Σε αυτή την περίπτωση, ο Q(V) ελεγκτής απορροφά άεργο ισχύ παρόλο που το ΣΑΤΥΦ θα μπορούσε να αντιμετωπίσει την κατάσταση. Η αύξηση της ροής αέργου ισχύος οδηγεί σε αύξηση των απωλειών στο δίκτυο. Αυτή η περίπτωση διερευνάται εφαρμόζοντας βηματική αύξηση της τάσης κατά 1.5% στο δίκτυο YT τη στιγμή $t=10$ s.

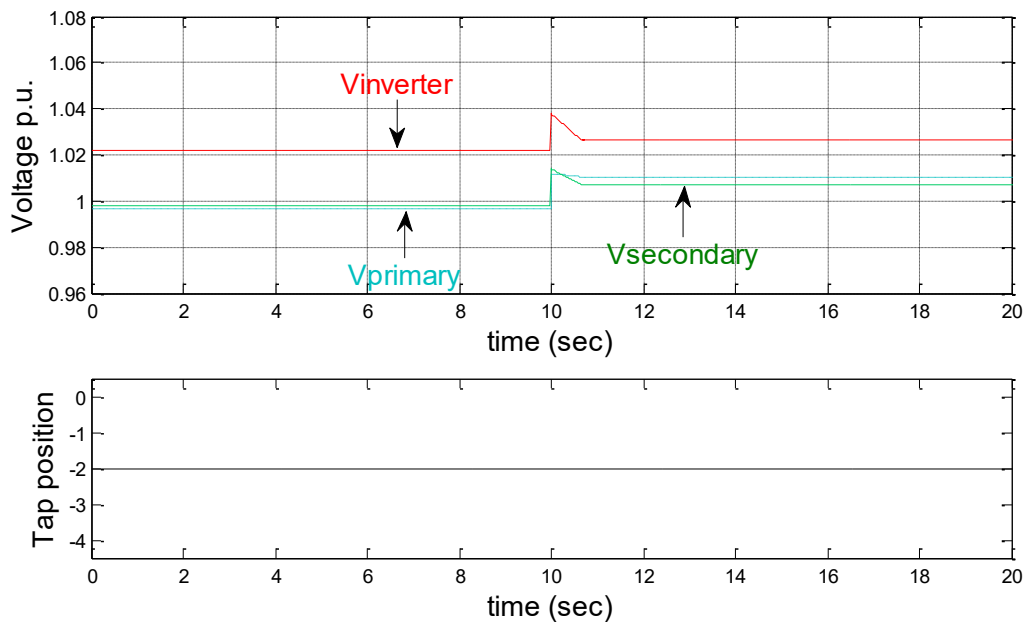
Αρχικά, η ΔΠ λειτουργεί με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος (ο Q(V) έλεγχος είναι απενεργοποιημένος) και το ΣΑΤΥΦ ρυθμίζει την τάση του δευτερεύοντος του Μ/Σ. Η τάση του μετασχηματιστή (πρωτεύον, δευτερεύον) και του αντιστροφέα της ΔΠ και οι αλλαγές

λήψης του ΣΑΤΥΦ παριστάνονται στο Σχήμα 5.5, όπου φαίνεται πως το ΣΑΤΥΦ ανταποκρίνεται στην αύξηση της τάσης. Η ενεργός ισχύς της ΔΠ διατηρείται σταθερή.

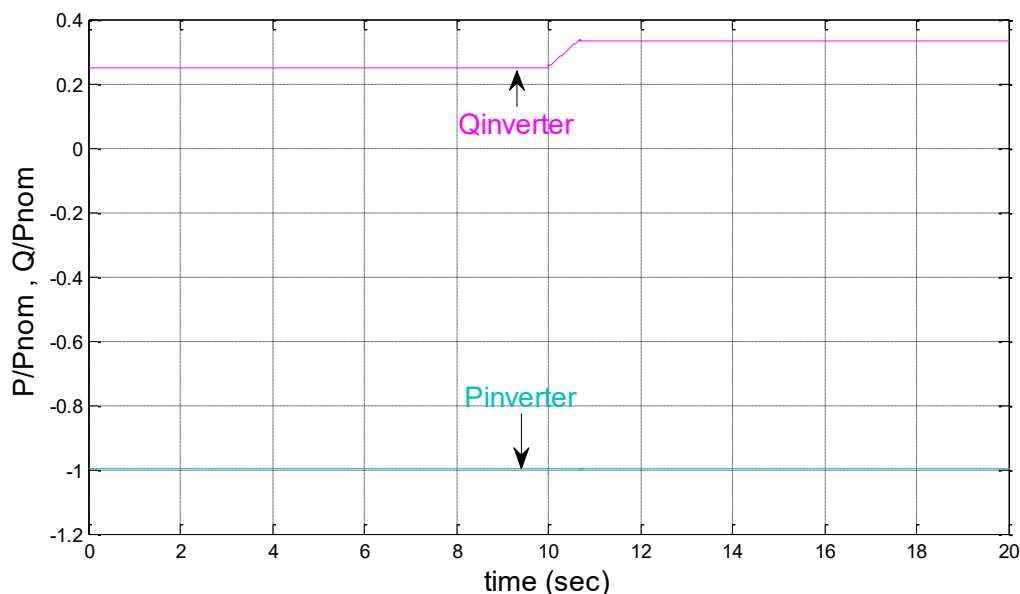


Σχήμα 5.5. Βηματική αύξηση της τάσης του δικτύου YT, όπου $\cos\phi=1$ και το ΣΑΤΥΦ βρίσκεται εν λειτουργία

Εν συνεχεία, ενεργοποιείται ο Q(V) έλεγχος της ΔΠ. Η απορροφούμενη άεργος ισχύς από τη ΔΠ περιορίζει την τάση, οπότε το ΣΑΤΥΦ δεν αλλάζει λήψη (Σχήμα 5.6). Έτσι, επιπλέον άεργος ισχύς (αύξηση κατά 33.4%) ρέει στο δίκτυο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7.

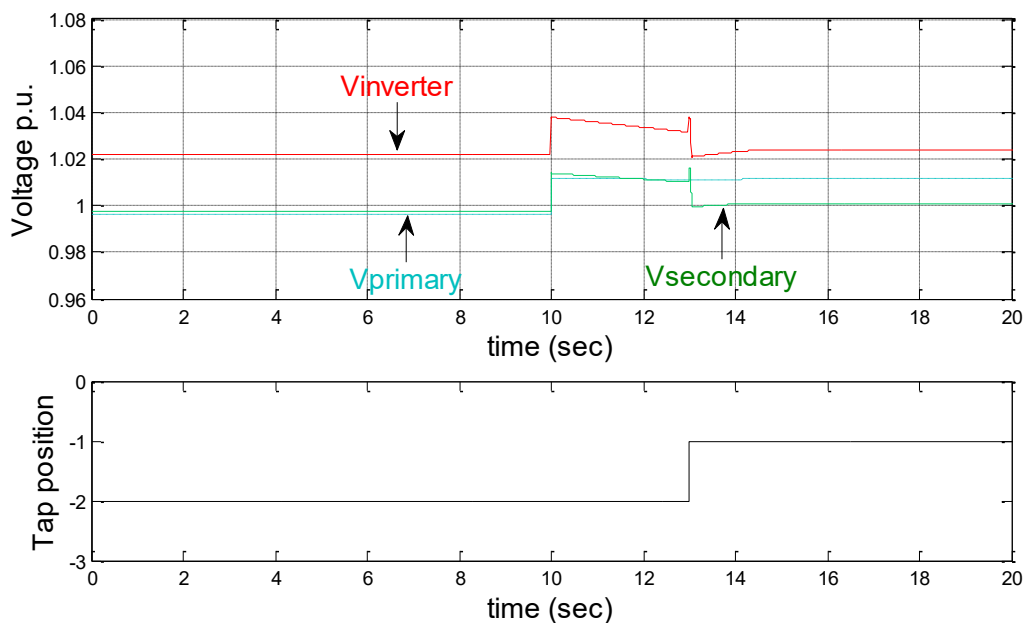


Σχήμα 5.6. Βηματική αύξηση της τάσης του δικτύου YT, όπου ο Q(V) ελεγκτής και το ΣΑΤΥΦ βρίσκονται εν λειτουργία

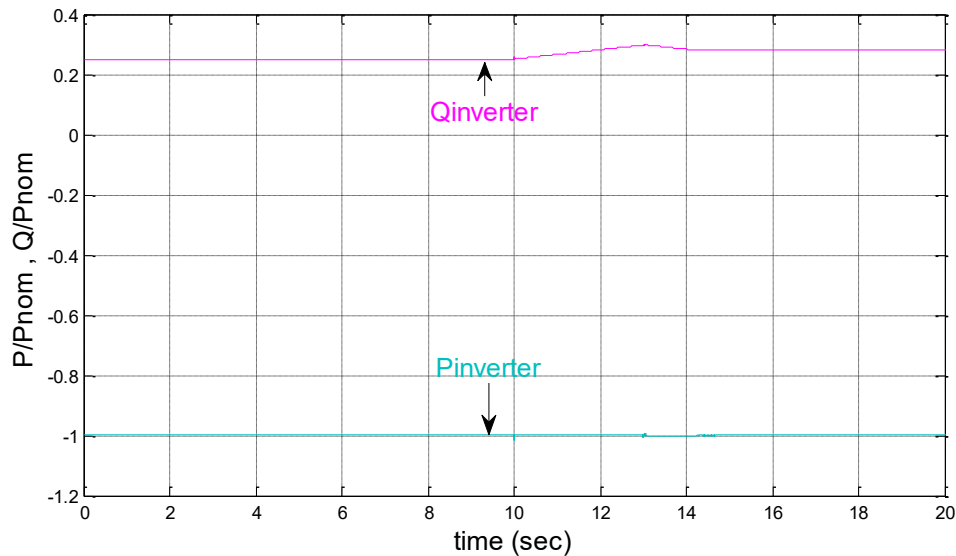


Σχήμα 5.7. Ενεργός και άεργος ισχύς της ΔΠ κατά την αύξηση της τάσης του δικτύου YT

Τέλος, επιλέγονται πιο αργές ρυθμίσεις στον $Q(V)$ ελεγκτή και ταχύτερες στο ΣΑΤΥΦ. Συγκεκριμένα, ο περιορισμός ρυθμού μεταβολής της άεργου ισχύος τίθεται ίσος με $2.5\% Q_{max}/s$ αντί για $20\% Q_{max}/s$. Επιπλέον, η συνολική χρονική καθυστέρηση του ΣΑΤΥΦ τίθεται ίση με 3 s αντί για 5 s . Οι τάσεις και οι αλλαγές λήψης του ΣΑΤΥΦ φαίνονται στο Σχήμα 5.8. Η άεργος ισχύς αυξάνεται λιγότερο (11.6% μετά την αλλαγή λήψης) σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση αφού το ΣΑΤΥΦ προλαβαίνει να αλλάξει λήψη (Σχήμα 5.9).



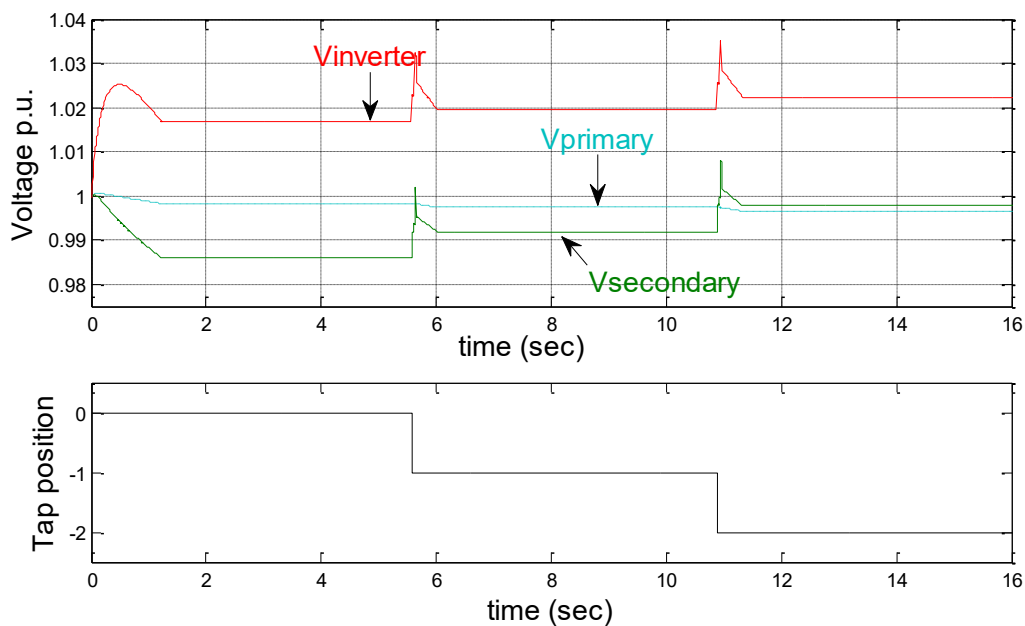
Σχήμα 5.8. Βηματική αύξηση της τάσης του δικτύου YT με πιο αργό $Q(V)$ ελεγκτή και ταχύτερο ΣΑΤΥΦ



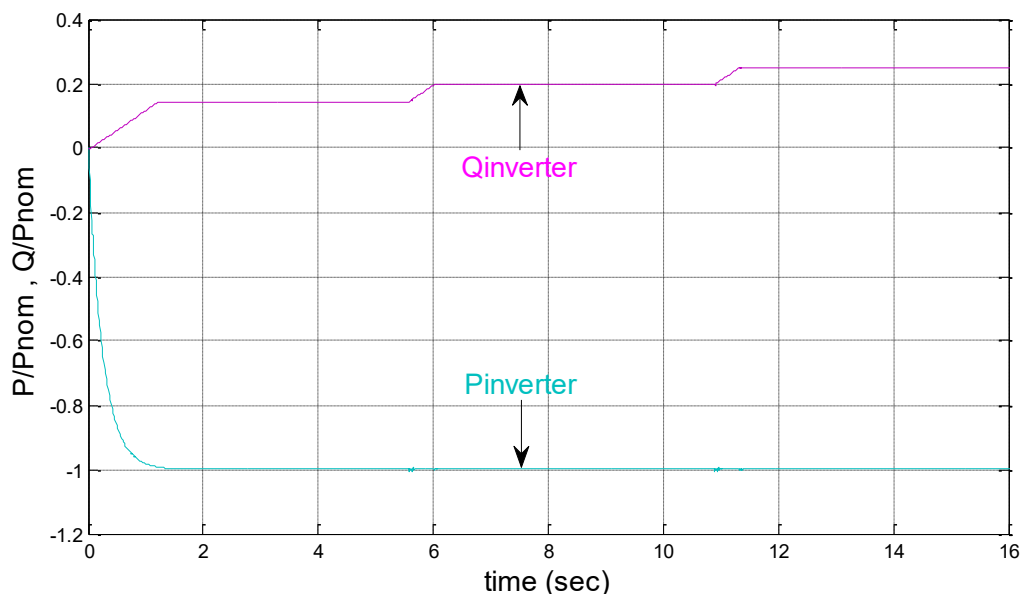
Σχήμα 5.9. Ενεργός και άεργος ισχύς της ΔΠ κατά την αύξηση της τάσης του δικτύου ΥΤ

5.2.2) Η τάση της ΔΠ αυξάνεται εξαιτίας του ΣΑΤΥΦ και του Q(V) ελεγκτή

Το ΣΑΤΥΦ ρυθμίζει την τάση του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή και η ΔΠ λειτουργεί με Q(V) έλεγχο. Η τάση της ΔΠ αυξάνεται εξαιτίας της παραγόμενης ενεργού ισχύος, ενώ η ροή αέργου ισχύος (απορρόφηση) μέσω του μετασχηματιστή (κυρίως επαγωγικό στοιχείο) προκαλεί μείωση της τάσης του δευτερεύοντος τυλίγματος. Εφόσον το ΣΑΤΥΦ ρυθμίζει την τάση του δευτερεύοντος, αλλάζει λήψη για να αυξήσει την τάση, με αποτέλεσμα να αυξηθεί επιπλέον η τάση της ΔΠ (Σχήμα 5.10). Η αύξηση της τάσης της ΔΠ προκαλεί ανεπιθύμητη αύξηση της ροής αέργου ισχύος κατά 75% (Σχήμα 5.11). Αν το ΣΑΤΥΦ ήταν απενεργοποιημένο η τάση της ΔΠ και του δευτερεύοντος θα ήταν αποδεκτές.



Σχήμα 5.10. Το ΣΑΤΥΦ αυξάνει περαιτέρω την τάση της ΔΠ



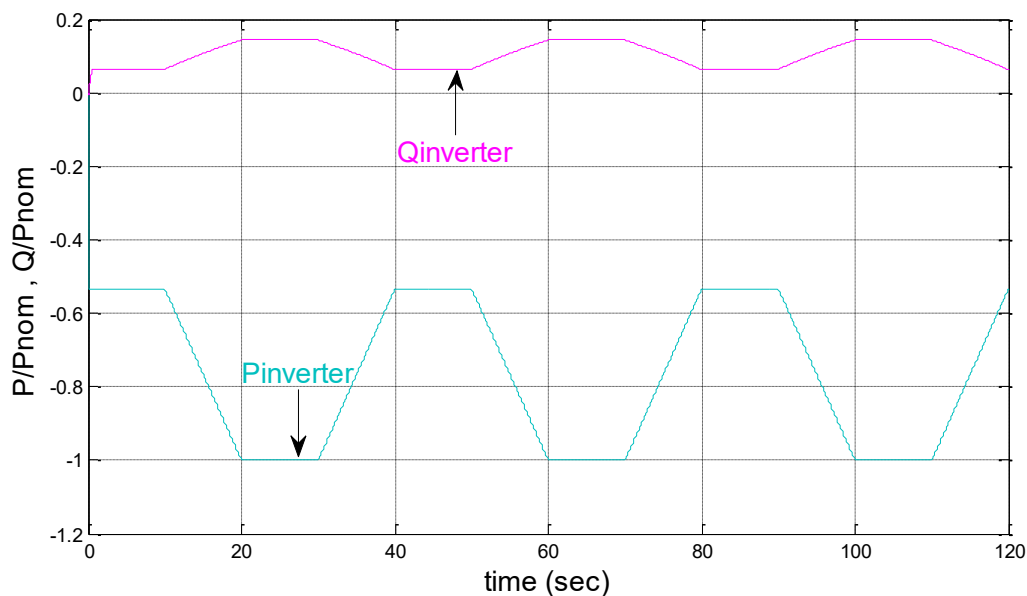
Σχήμα 5.11. Η άεργος ισχύς της ΔΠ αυξάνεται εξαιτίας του ΣΑΤΥΦ

5.2.3) Επαναλαμβανόμενες αλλαγές λήψης του ΣΑΤΥΦ

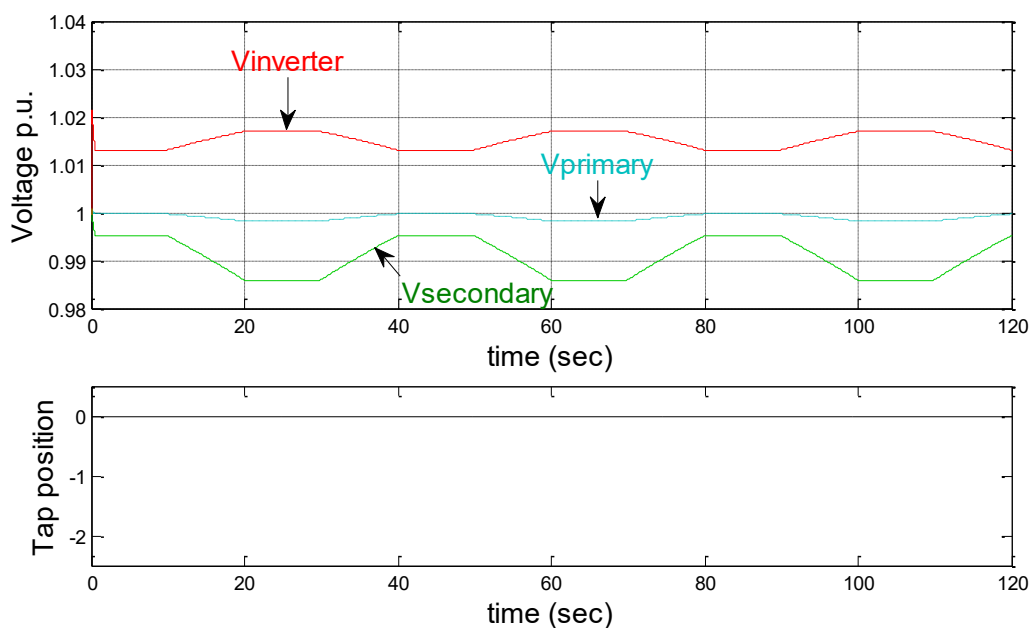
5.2.3.1) Λειτουργία με $Q(V)$ έλεγχο

Η νεκρή ζώνη του $Q(V)$ ελεγκτή είναι ίση με $\pm 1\%$ και η μέγιστη άεργος ισχύς ($\cos\phi_{min}=0.85$) απορροφάται σε τάση $VQ_{max} = 102.5\%$. Το ΣΑΤΥΦ ρυθμίζει την τάση του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή. Η ενεργός ισχύς της ΔΠ αυξάνεται από το 53% της ονομαστικής στην ονομαστική τιμή, παραμένει σταθερή, στη συνέχεια μειώνεται στο 53% της ονομαστικής και το προφίλ επαναλαμβάνεται (Σχήμα 5.12).

Καταρχάς, η ΔΠ λειτουργεί με $Q(V)$ έλεγχο και το ΣΑΤΥΦ βρίσκεται εκτός λειτουργίας. Η αύξηση της ενεργού ισχύος της ΔΠ προκαλεί αύξηση της τάσης ακροδεκτών της και της απορροφούμενης άεργου ισχύος με βάση τη $Q(V)$ χαρακτηριστική (Σχήμα 5.12). Η ροή άεργου ισχύος προκαλεί μείωση της τάσης του δευτερεύοντος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.13. Στη συνέχεια, η ενεργός ισχύς της ΔΠ μειώνεται, οπότε η τάση ακροδεκτών της μειώνεται. Ως εκ τούτου, η άεργος ισχύς που απορροφάται μειώνεται (με βάση τη $Q(V)$ χαρακτηριστική) προκαλώντας αύξηση της τάσης στο δευτερεύον του μετασχηματιστή (Σχήμα 5.13).



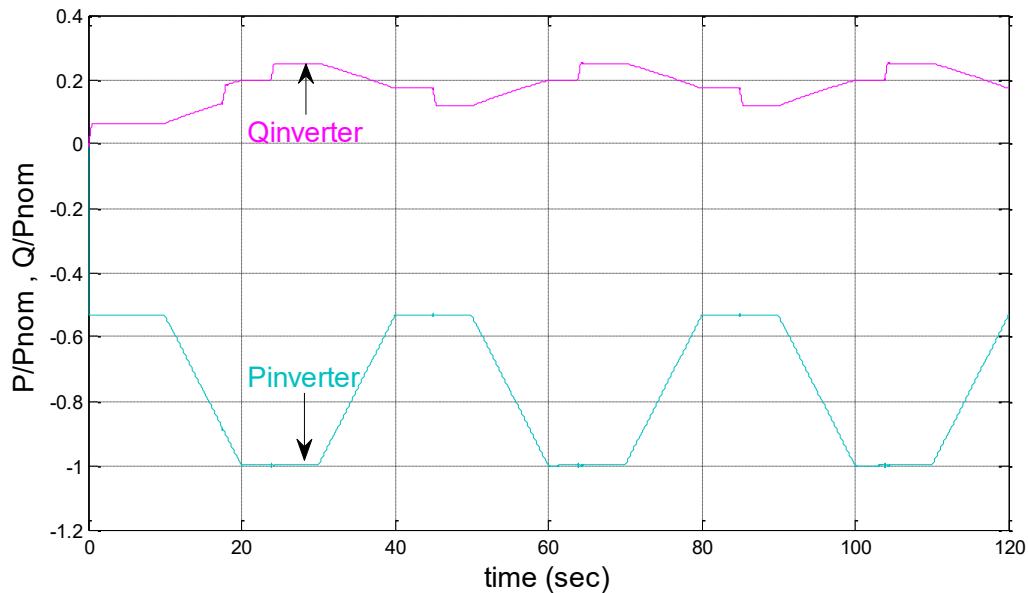
Σχήμα 5.12. Ενεργός και άεργος ισχύς της ΔΠ, όπου η ΔΠ λειτουργεί με Q(V) έλεγχο και το ΣΑΤΥΦ βρίσκεται εκτός λειτουργίας



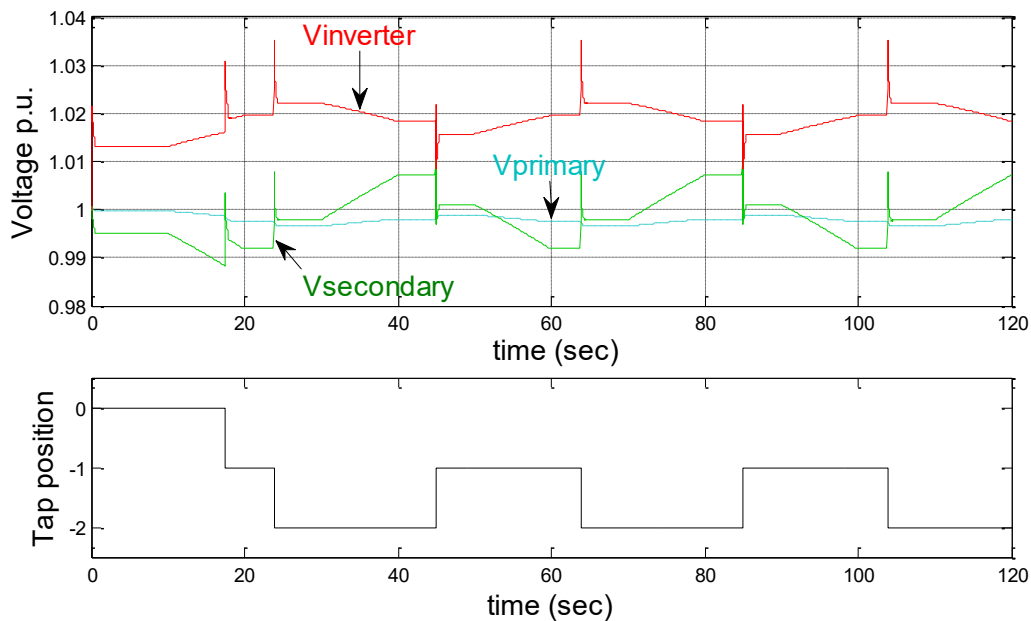
Σχήμα 5.13. Τάσεις δικτύου και αλλαγές λήψης του ΣΑΤΥΦ, όπου η ΔΠ λειτουργεί με Q(V) έλεγχο και το ΣΑΤΥΦ βρίσκεται εκτός λειτουργίας

Στη συνέχεια, η ΔΠ εξακολουθεί να λειτουργεί με Q(V) έλεγχο, το ΣΑΤΥΦ τίθεται σε λειτουργία και εφαρμόζεται το ίδιο προφίλ ενεργού ισχύος. Ομοίως, η ενεργός ισχύς αυξάνεται, η τάση της ΔΠ αυξάνεται, η απορρόφηση άεργου ισχύος αυξάνεται (Σχήμα 5.14) και η τάση του δευτερεύοντος μειώνεται κάτω από το κάτω όριο της νεκρής ζώνης του ΣΑΤΥΦ που αντιδρά αυξάνοντας την τάση (Σχήμα 5.15). Στη συνέχεια, η ενεργός ισχύς μειώνεται, η τάση της ΔΠ μειώνεται, η απορρόφηση άεργου ισχύος μειώνεται και η

τάση του δευτερεύοντος αυξάνεται, οπότε το ΣΑΤΥΦ μειώνει την τάση. Στα Σχήματα 5.14 και 5.15 παριστάνονται επαναλαμβανόμενες αλλαγές λήψης εξαιτίας της αλληλεπίδρασης των ελεγκτών της ΔΠ και του ΣΑΤΥΦ. Σημειώνεται πως οι αλλαγές λήψης προκαλούν επιπρόσθετη ροή αέργου ισχύος στο δίκτυο, αφού η τάση της ΔΠ αυξάνεται (Σχήμα 5.14 σε σχέση με το Σχήμα 5.12). Αυτή η περίπτωση υλοποιείται και σε PHIL δοκιμή στην παράγραφο 5.3.2.2.



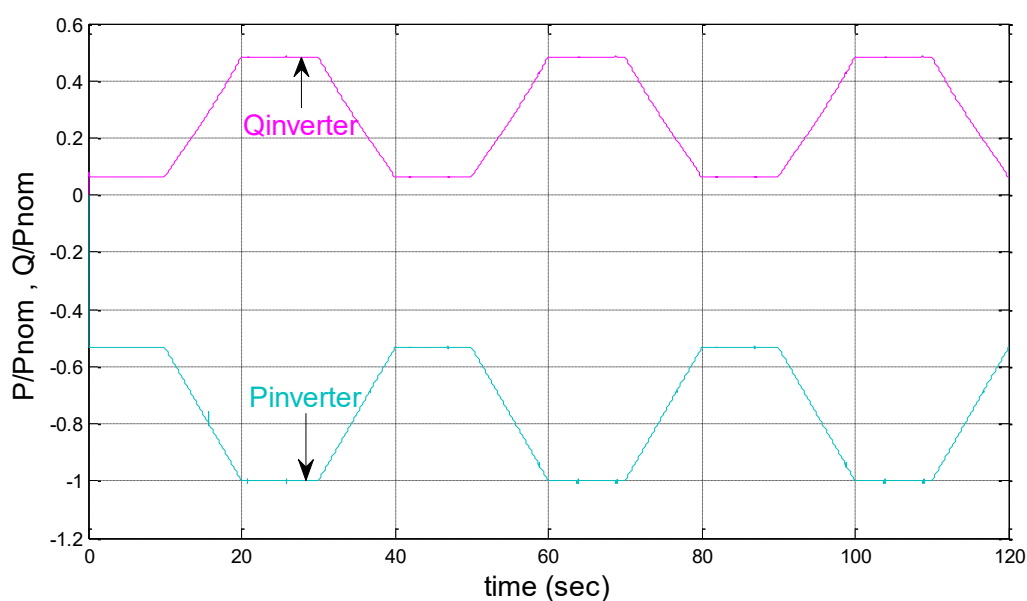
Σχήμα 5.14. Ενεργός και άεργος ισχύς της ΔΠ, όπου η ΔΠ λειτουργεί με Q(V) έλεγχο και το ΣΑΤΥΦ βρίσκεται εν λειτουργία



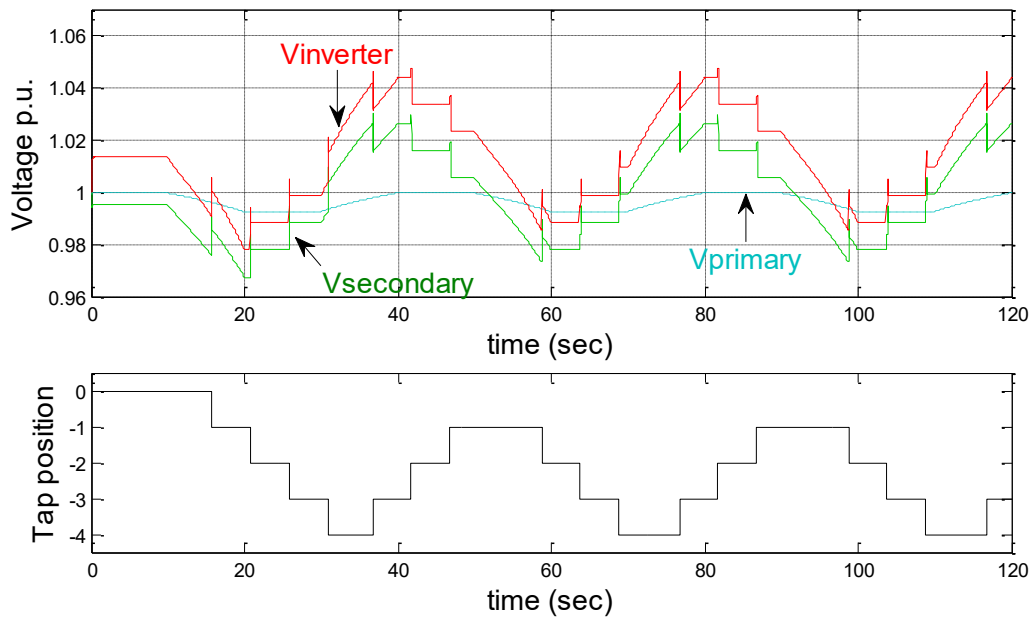
Σχήμα 5.15. Τάσεις δικτύου και αλλαγές λήψης του ΣΑΤΥΦ, όπου η ΔΠ λειτουργεί με Q(V) έλεγχο και το ΣΑΤΥΦ βρίσκεται εν λειτουργία

5.2.3.2) Λειτουργία με $\cos\phi(P)$ έλεγχο

Η ΔΠ λειτουργεί με $\cos\phi(P)$ έλεγχο, το ΣΑΤΥΦ βρίσκεται εν λειτουργία και εφαρμόζεται το ίδιο προφίλ ενεργού ισχύος με την προηγούμενη παράγραφο. Η ενεργός ισχύς της ΔΠ αυξάνεται και οδηγεί σε απορρόφηση αέργου ισχύος με βάση την $\cos\phi(P)$ χαρακτηριστική (Σχήμα 5.16). Ως εκ τούτου, η τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή μειώνεται κάτω από το κάτω όριο της νεκρής ζώνης του ΣΑΤΥΦ και το ΣΑΤΥΦ αυξάνει την τάση (Σχήμα 5.17). Εν συνεχεία, η ενεργός ισχύς της ΔΠ μειώνεται με αποτέλεσμα τη μείωση της απορρόφησης αέργου ισχύος (σύμφωνα με την $\cos\phi(P)$ χαρακτηριστική), προκαλώντας αύξηση της τάσης στο δευτερεύον και το ΣΑΤΥΦ αντιδρά μειώνοντας την τάση. Το ίδιο προφίλ ενεργού ισχύος εφαρμόζεται και το φαινόμενο επαναλαμβάνεται. Επαναλαμβανόμενες αλλαγές λήψης φαίνονται καθαρά στο Σχήμα 5.17, οι οποίες μπορεί να φθείρουν το ΣΑΤΥΦ. Στα Σχήματα 5.15 και 5.17 φαίνεται πως στην περίπτωση του $\cos\phi(P)$ ελεγκτή πραγματοποιούνται περισσότερες αλλαγές λήψης από την περίπτωση του $Q(V)$ ελεγκτή, εξαιτίας της μεγαλύτερης απορρόφησης αέργου ισχύος (που εξαρτάται μόνο από την ενεργό ισχύ της ΔΠ). Αυτή η περίπτωση υλοποιείται και σε PHIL δοκιμή στην παράγραφο 5.3.2.1.



Σχήμα 5.16. Ενεργός και άεργος ισχύς της ΔΠ, όπου η ΔΠ λειτουργεί με $\cos\phi(P)$ έλεγχο και το ΣΑΤΥΦ βρίσκεται εν λειτουργία



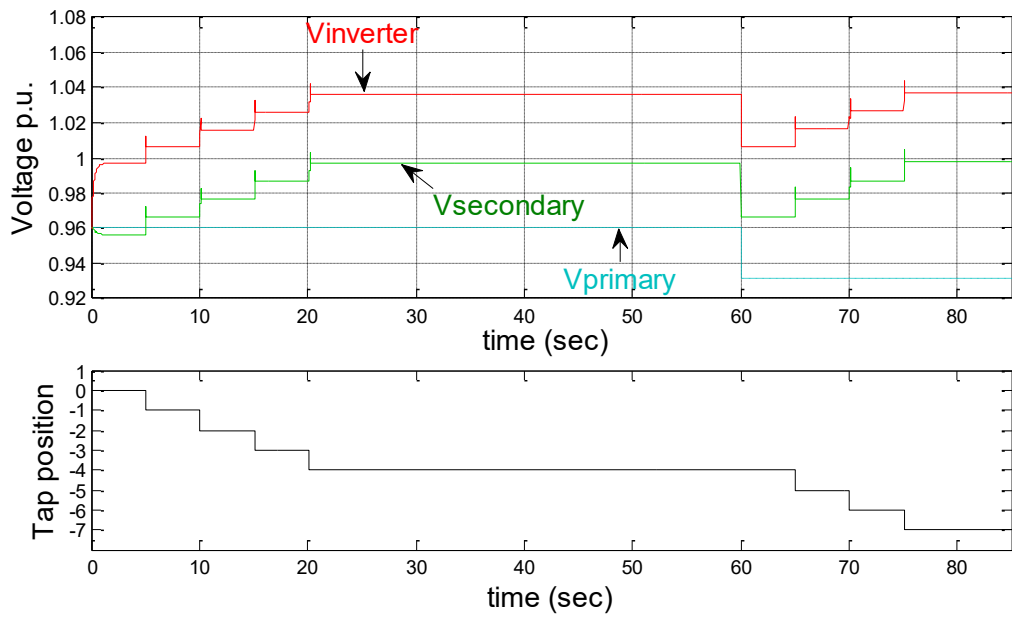
Σχήμα 5.17. Τάσεις δικτύου και αλλαγές λήψης του ΣΑΤΥΦ, όπου η ΔΠ λειτουργεί με $\cos\phi(P)$ έλεγχο και το ΣΑΤΥΦ βρίσκεται εν λειτουργία

5.2.4) Ο Q(V) ελεγκτής αντιτίθεται στις αλλαγές λήψης

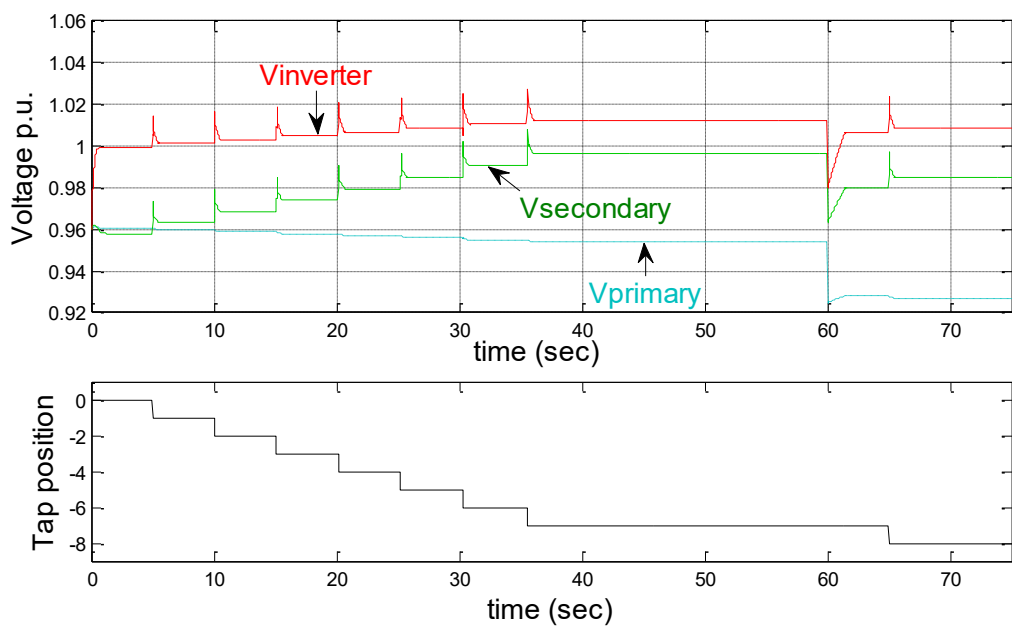
Όταν το ΣΑΤΥΦ αλλάζει λήψη για να αυξήσει την τάση, η αύξηση της τάσης της ΔΠ προκαλεί επιπλέον ροή αέργου ισχύος εξαιτίας του Q(V) ελεγκτή, που οδηγεί σε μείωση της τάσης. Ως εκ τούτου, ο Q(V) ελεγκτής μπορεί να αντιτίθεται στη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ. Υπό ορισμένες συνθήκες, το ΣΑΤΥΦ μπορεί να μην είναι σε θέση να επαναφέρει την τάση στο εσωτερικό της νεκρής ζώνης. Για την προσομοίωση αυτής της συμπεριφοράς, η τάση του δικτύου YT είναι αρχικά ίση με 96% α.μ. και τη χρονική στιγμή $t=60$ s εφαρμόζεται βηματική μείωση ίση με 3% α.μ. Στην αρχή της προσομοίωσης, η ενεργός ισχύς της ΔΠ αυξάνεται γρήγορα στην ονομαστική ισχύ και έπειτα διατηρείται σταθερή.

Καταρχάς, η ΔΠ λειτουργεί με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος και το ΣΑΤΥΦ βρίσκεται εν λειτουργία. Στο Σχήμα 5.18 φαίνεται πως το ΣΑΤΥΦ καταφέρνει να διατηρήσει την τάση στο επιθυμητό εύρος και μετά την επιπλέον μείωση της τάσης του δικτύου YT.

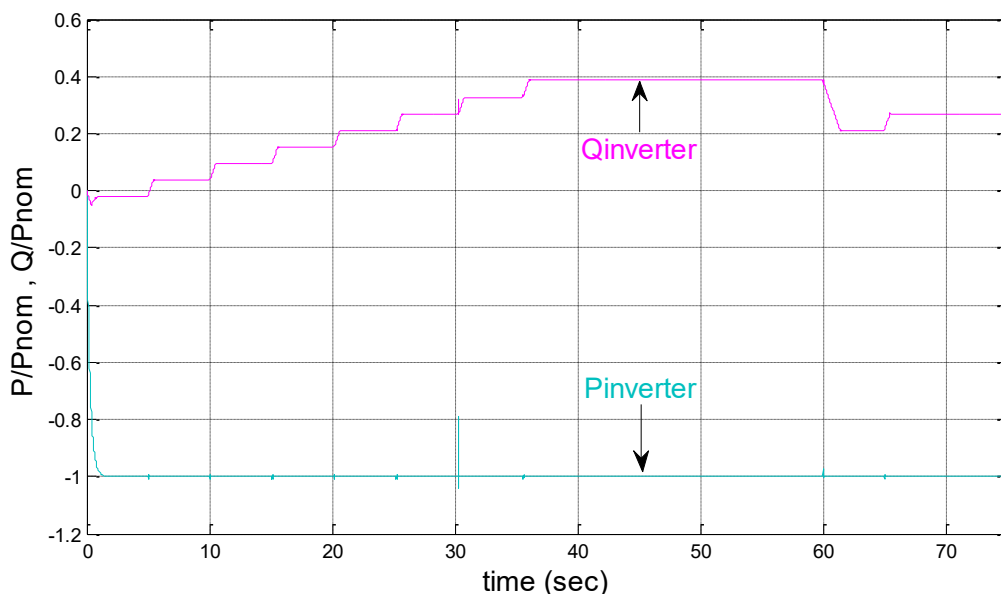
Στη συνέχεια ενεργοποιείται ο Q(V) ελεγκτής χωρίς νεκρή ζώνη και με μέγιστη απορρόφηση αέργου ισχύος ($\cos\phi_{min}=0.85$) σε τάση $VQ_{max}=102\%$. Απαιτούνται 7 αλλαγές λήψης (Σχήμα 5.19) αντί για 4 (Σχήμα 5.18) για την αντιμετώπιση της αρχικής χαμηλής τιμής της τάσης, επειδή ο Q(V) ελεγκτής αντιτίθεται στη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ. Ως εκ τούτου, το ΣΑΤΥΦ δεν μπορεί να ανταπεξέλθει στην επιπλέον μείωση της τάσης ($t=60$ s), επειδή έχει μόνο 1 λήψη διαθέσιμη, με αποτέλεσμα η τάση στο δευτερεύον (0.985 α.μ.) να παραμένει κάτω από το όριο του ΣΑΤΥΦ. Η ενεργός και άεργος ισχύς της ΔΠ παριστάνονται στο Σχήμα 5.20.



Σχήμα 5.18. Τάσεις δικτύου και αλλαγές λήψης του ΣΑΤΥΦ, όπου $\cos\phi=1$ και το ΣΑΤΥΦ βρίσκεται εν λειτουργία. Η τάση του δικτύου YT μειώνεται τη στιγμή $t=60$ s



Σχήμα 5.19. Ο Q(V) ελεγκτής αντιτίθεται στις αλλαγές λήψης του ΣΑΤΥΦ

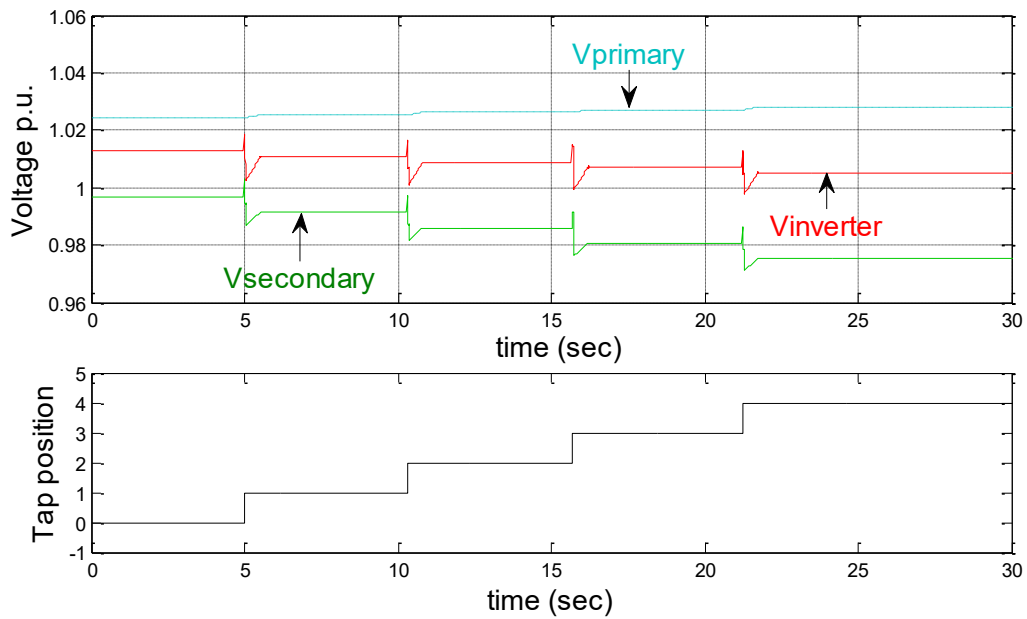


Σχήμα 5.20. Ενεργός και άεργος ισχύς της ΔΠ

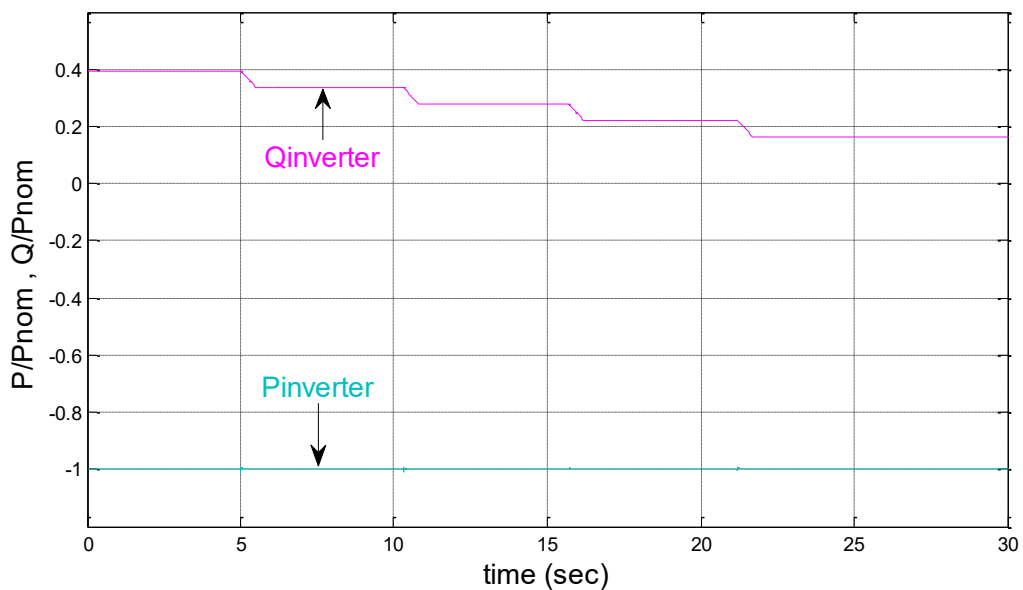
5.2.5) Ο Q(V) ελεγκτής αντιτίθεται στις αλλαγές λήψης: το ΣΑΤΥΦ λειτουργεί με αντιστάθμιση πτώσης τάσης

Το ΣΑΤΥΦ ρυθμίζει την τάση της ΔΠ είτε λαμβάνοντας απομακρυσμένη μέτρηση, είτε εφαρμόζοντας αντιστάθμιση πτώσης τάσης (εφόσον δεν υπάρχουν διακλαδώσεις και άλλα φορτία/ΔΠ η εκτίμηση μπορεί να γίνει με καλή ακρίβεια). Ο Q(V) ελεγκτής λειτουργεί χωρίς νεκρή ζώνη και με μέγιστη απορρόφηση αέργου ισχύος ($\cos\phi_{min}=0.85$) σε τάση $VQ_{max}=102\%$.

Η ΔΠ παρέχει ονομαστική ενεργό ισχύ στο δίκτυο και οδηγεί σε αύξηση της τάσης στον ζυγό της. Το ΣΑΤΥΦ προσπαθεί να μειώσει την τάση της ΔΠ, όμως προκαλεί μείωση της απορρόφησης αέργου ισχύος εξαιτίας του Q(V) ελεγκτή, με αποτέλεσμα στη συνέχεια η τάση να αυξάνεται. Στο Σχήμα 5.21 φαίνεται πως ο Q(V) ελεγκτής αντιτίθεται στη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ. Για απόκλιση τάσης που θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί με 1 αλλαγή λήψης (1.013 α.μ.), απαιτούνται 4 αλλαγές λήψης εξαιτίας του Q(V) ελεγκτή. Επιπλέον, οι αλλαγές λήψης οδηγούν σε περαιτέρω μείωση της τάσης του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή. Η ενεργός και άεργος ισχύς της ΔΠ παριστάνονται στο Σχήμα 5.22.



Σχήμα 5.21. Ο Q(V) ελεγκτής αντιτίθεται στις αλλαγές λήψης του ΣΑΤΥΦ (το ΣΑΤΥΦ ρυθμίζει την τάση της ΔΠ)



Σχήμα 5.22. Ενεργός και άεργος ισχύς της ΔΠ

5.3) PHIL δοκιμές προβληματικής συνεργασίας τοπικού ελέγχου τάσης ΔΠ και ΣΑΤΥΦ

Η πραγματοποίηση PHIL πειραμάτων/δοκιμών σε υψηλή ισχύ παρουσιάζει επιπλέον προκλήσεις, εφόσον είναι δύσκολη η κατασκευή ενισχυτών με ικανοποιητική ακρίβεια και καλή δυναμική συμπεριφορά. Επίσης, σε περίπτωση αστάθειας πιθανή βλάβη στον εξοπλισμό θα έχει σοβαρότερες επιπτώσεις. Οπότε, είναι χρήσιμη η εκτέλεση PHIL

πειραμάτων/δοκιμών σε μικρότερη κλίμακα εφαρμόζοντας κατάλληλες μεθόδους, με σκοπό την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του συστήματος πλήρους ισχύος.

Προβληματικές περιπτώσεις συνεργασίας τοπικού ελέγχου ΔΠ και ΣΑΤΥΦ μελετώνται με χρήση της PHIL μεθόδου στη διάταξη του Σχήματος 2.21. Μονάδα ΔΠ μεγάλης ισχύος που συνδέεται στο δίκτυο μέσω ηλεκτρονικών ισχύος αποτελεί το φυσικό σύστημα. Το προσομοιωμένο σύστημα περιλαμβάνει γραμμή MT που τροφοδοτείται από μετασχηματιστή ΥΤ/ΜΤ εξοπλισμένο με ΣΑΤΥΦ. Η υψηλή ονομαστική ισχύς της ΔΠ (15 MW) και η σύνδεση στη MT καθιστούν την πραγματοποίηση PHIL δοκιμής πλήρους κλίμακας πολύ απαιτητική (εξαιτίας της μη διαθεσιμότητας κατάλληλου ενισχυτή ισχύος). Οπότε υλοποιείται εργαστηριακή τοπολογία μικρότερης κλίμακας, όπου χρησιμοποιείται εμπορικός Φ/Β αντιστροφέας ονομαστικής φαινόμενης ισχύος 2 kVA (1.7 kW σε $\cos\phi=0.85$), με τις ίδιες προηγμένες δυνατότητες ελέγχου της τάσης δικτύου με τον αντιστροφέα πλήρους κλίμακας. Η ονομαστική ισχύς του αντιστροφέα αυξάνεται στην προσομοίωση και το προσομοιωμένο δίκτυο αλλάζει κλίμακα για να ταιριάζει με την αυξημένη ισχύ του αντιστροφέα σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο του Κεφαλαίου 2. Ο πραγματικός αντιστροφέας μπορεί να προσαρμόσει τον συντελεστή ισχύος του στην περιοχή μεταξύ 1 και 0.85 – επαγωγικός/χωρητικός. Τα χαρακτηριστικά του δικτύου είναι τα ίδια με τις αμιγώς ψηφιακές προσομοιώσεις (Πίνακας 5.1).

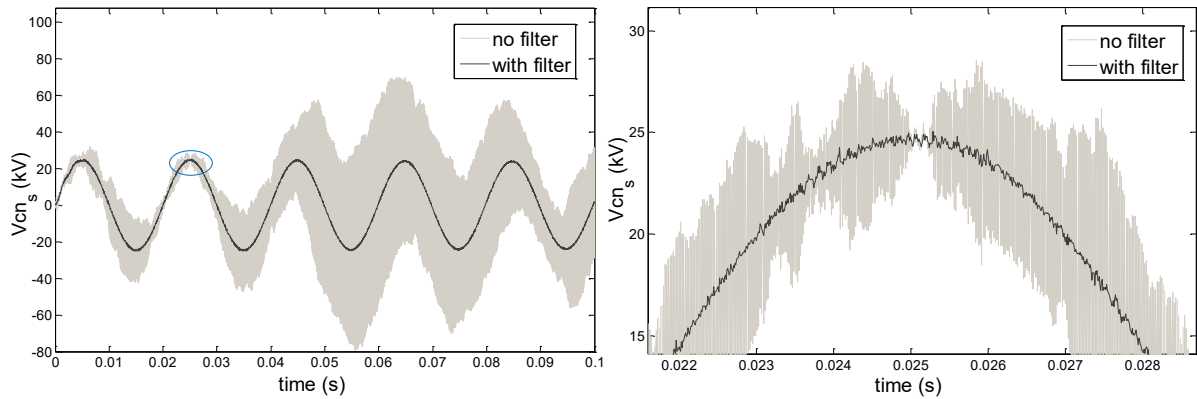
5.3.1) Προετοιμασία των PHIL δοκιμών

Στις δοκιμές που ακολουθούν χρησιμοποιήθηκε ο Ψηφιακός Προσομοιωτής Πραγματικού Χρόνου (ΨΠΠΧ) OPAL-RT, eMEGAsim. Ο προσομοιωτής βασίζεται στην τεχνολογία πολυπύρηνων υπολογιστών και προγραμματίζεται στο λογισμικό ευρείας χρήσης Matlab/Simulink. Κατάλληλη σχεδίαση μπορεί να μειώσει το βήμα της προσομοίωσης. Επιτεύχθηκε μικρό βήμα προσομοίωσης ίσο με 10 μ s. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών όλες οι μετρήσεις από το προσομοιωμένο και το φυσικό σύστημα λήφθηκαν στον ίδιο παλμογράφο και εν συνεχεία τέθηκαν σε επεξεργασία (ο συγκεκριμένος ΨΠΠΧ δεν επέτρεπε την απεικόνιση των αποτελεσμάτων στο λογισμικό του). Η επεξεργασία έγινε σε μοντέλο στο Matlab/Simulink που είχε ως είσοδο τις κυματομορφές όλων των τάσεων και των ρευμάτων του προσομοιωμένου και του φυσικού συστήματος και ως έξοδο τις rms τιμές των τάσεων και ρευμάτων, την ενεργό και άεργο ισχύ και τον συντελεστή ισχύος.

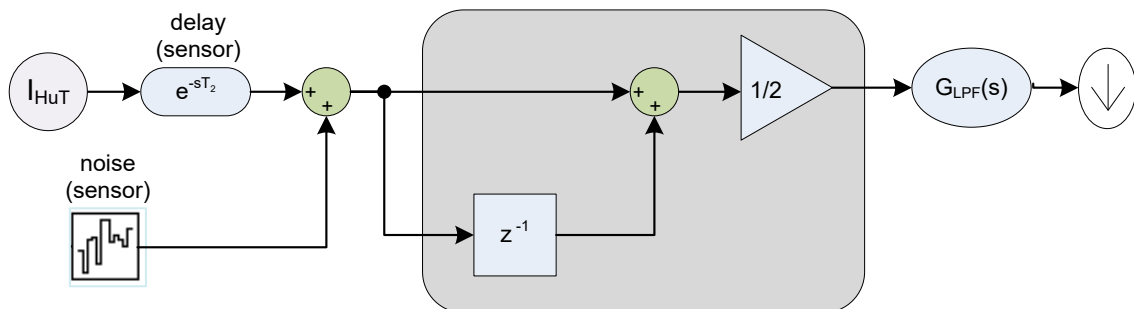
Πριν από την εκτέλεση των PHIL δοκιμών, ο αισθητήρας ρεύματος συνδέθηκε στον ΨΠΠΧ ενώ το φυσικό σύστημα ήταν αποσυνδεδεμένο, οπότε ο αισθητήρας έστελνε μόνο θόρυβο. Η τάση του κοινού ζυγού στην προσομοίωση $V_{cn,s}$ (Σχήμα 2.22) παρουσίασε ταλαντώσεις. Για την κατανόηση αυτής της συμπεριφοράς υλοποιήθηκε δυναμική εικονική PHIL προσομοίωση, όπου προστέθηκε θόρυβος (μέγιστη τιμή 40 mA) στο ρεύμα του φυσικού συστήματος. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.23, ο θόρυβος οδηγεί σε ιδιαίτερα παραμορφωμένη τάση παρά την παρουσία βαθυπερατού φίλτρου πρώτης τάξης (με συχνότητα αποκοπής 5 kHz) στο ρεύμα.

Ένας πιθανός τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος θα ήταν η μείωση της συχνότητας αποκοπής του βαθυπερατού φίλτρου, η οποία όμως θα μείωνε την ακρίβεια των PHIL αποτελεσμάτων. Προσεκτική παρατήρηση της τάσης έδειξε συμμετρική συμπεριφορά ανά

χρονικό βήμα, οπότε εφαρμόστηκε διακριτός κινούμενος μέσος όρος που υπολογίζει τον μέσο όρο της τιμής του παρόντος και του προηγούμενου βήματος (Σχήμα 5.24). Στο Σχήμα 5.23 φαίνεται πως το φίλτρο κινούμενου μέσου όρου αντιμετωπίζει με επιτυχία την παραμόρφωση της τάσης που προκαλείται από το θόρυβο του αισθητήρα. Το φίλτρο εισάγει αμελητέα μετατόπιση φάσης που δεν επηρεάζει την ακρίβεια, καθιστώντας το καλύτερη λύση από ένα ισχυρότερο βαθυπερατό φίλτρο.



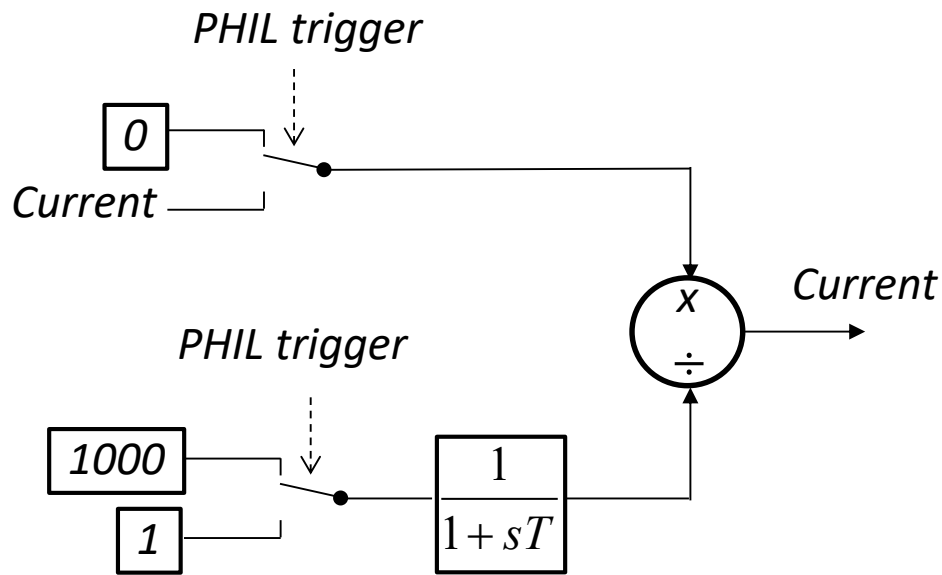
Σχήμα 5.23. Τάση του κοινού ζυγού δίχως τη χρήση και με χρήση του διακριτού κινούμενου μέσου όρου



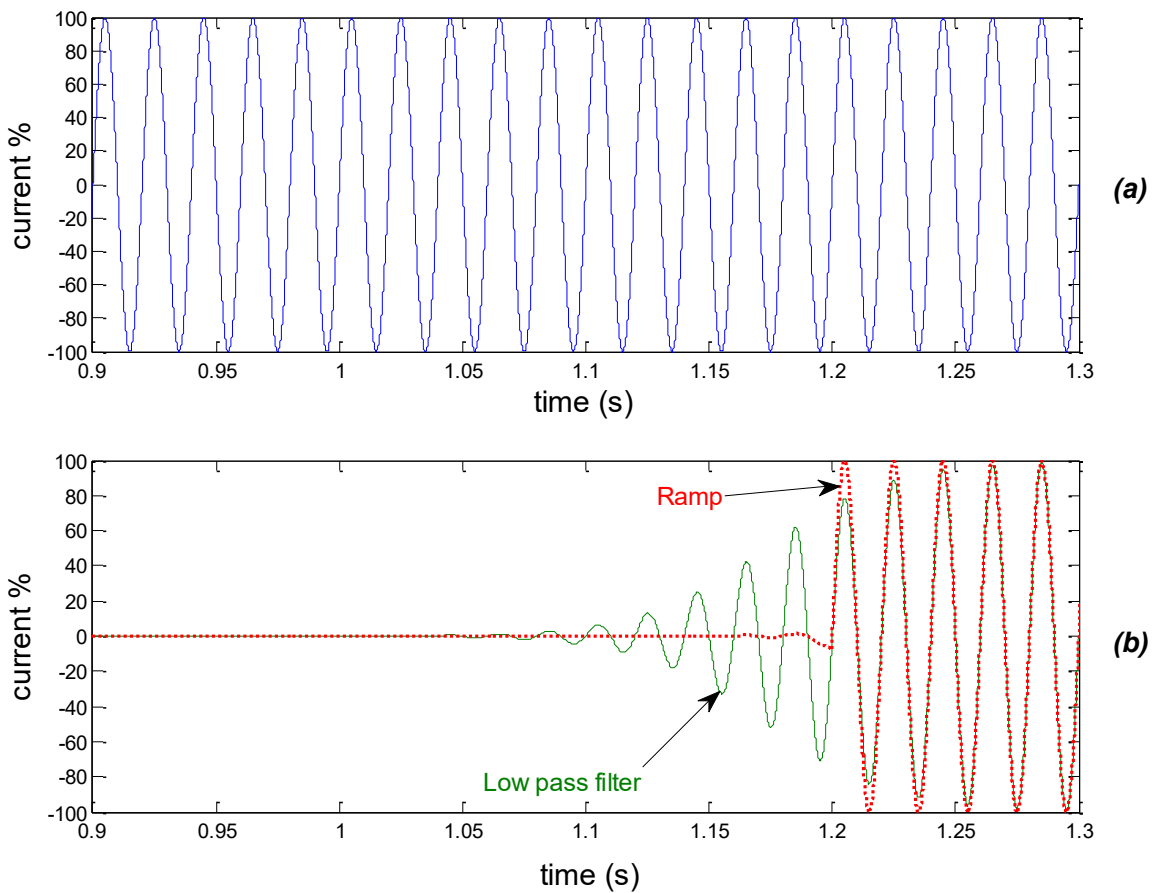
Σχήμα 5.24. Το φίλτρο διακριτού κινούμενου μέσου όρου για την αντιμετώπιση της επίδρασης του θορύβου του αισθητήρα

Τέλος, προκειμένου να αποφευχθούν ανεξέλεγκτα μεταβατικά φαινόμενα κατά την εκκίνηση των PHIL δοκιμών (σύνδεση του αντιστροφέα) υλοποιήθηκε αλγόριθμος ελέγχου για την ομαλή αύξηση του ρεύματος του φυσικού συστήματος από το μηδέν στην πραγματική τιμή. Υλοποιήθηκε ανιχνευτής μηδενικής τιμής διέλευσης (zero crossing detector) [140] ώστε ο βρόχος να κλείνει όταν το ρεύμα διέρχεται από τη μηδενική τιμή. Όταν κλείσει ο βρόχος, το ρεύμα διαιρείται με ένα ομαλά μειούμενο σήμα που προκύπτει από βαθυπερατό φίλτρο πρώτης τάξης (χρονικής σταθεράς $T=0.025$), όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.25. Το Σχήμα 5.26 δείχνει πως το βαθυπερατό φίλτρο πρώτης τάξης οδηγεί σε ομαλότερη εκκίνηση από αντίστοιχη γραμμική μεταβολή (ο βρόχος κλείνει τη χρονική στιγμή $t=1$ s). Ο αλγόριθμος ομαλής εκκίνησης χρησιμοποιήθηκε στη προετοιμασία των

PHIL δοκιμών για την κατανόηση και επίλυση προβλημάτων αστάθειας (δεν κρίθηκε απαραίτητος στις PHIL δοκιμές που παρουσιάζονται στη συνέχεια).



Σχήμα 5.25. Αλγόριθμος ομαλής εκκίνησης με χρήση βαθυπερατού φίλτρου πρώτης τάξης



Σχήμα 5.26. Ρεύμα του φυσικού συστήματος (a). Ρεύμα με εφαρμογή αλγορίθμου ομαλής εκκίνησης, όπου συγκρίνεται η υλοποίηση με βαθυπερατό φίλτρο και με γραμμική μεταβολή (b)

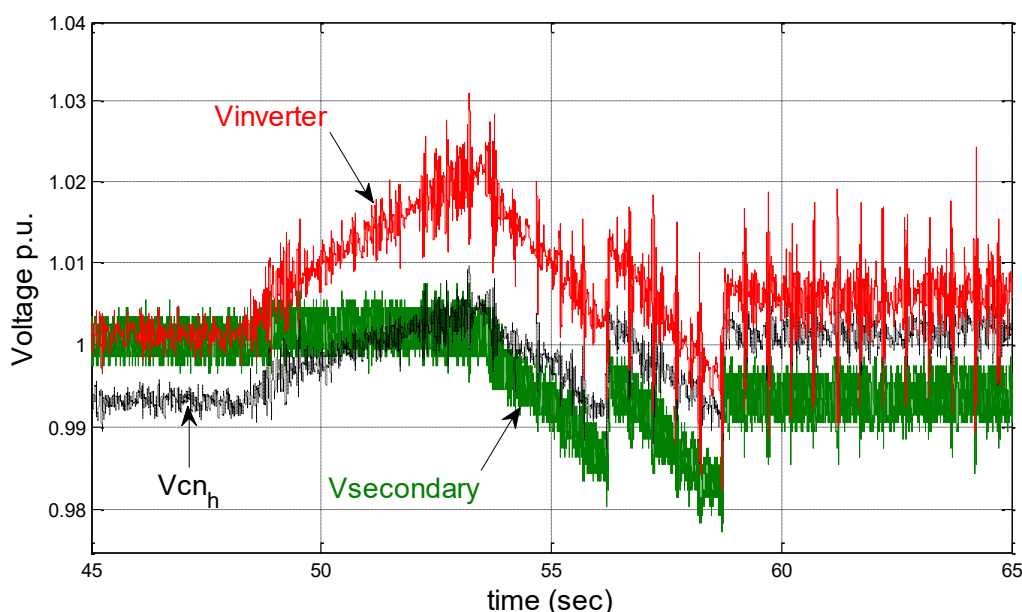
5.3.2) PHIL δοκιμές

Με βάση τις προπαρασκευαστικές εργασίες, επιλεγμένες περιπτώσεις από τις αμιγώς ψηφιακές προσομοιώσεις υλοποιούνται σε PHIL διάταξη με τον πραγματικό Φ/Β αντιστροφέα (ονομαστικής ισχύος 2 kVA) και την προτεινόμενη μέθοδο αλλαγής κλίμακας και μετατόπισης σύνθετης αντίστασης (Σχήμα 2.22).

Στις PHIL δοκιμές μελετώνται αλληλεπιδράσεις του πραγματικού Φ/Β αντιστροφέα με το δίκτυο διανομής MT που περιλαμβάνει ΣΑΤΥΦ. Το ΣΑΤΥΦ ρυθμίζει την τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή με τις ακόλουθες ρυθμίσεις: τάση αναφοράς 1 α.μ., βήμα τάσης 1% και η νεκρή ζώνη ορίζεται στην αντίστοιχη παράγραφο. Οι PHIL δοκιμές με το δοκίμιο μικρότερης κλίμακας (αντιστροφέας 2 kVA) συγκρίνονται με τις αμιγώς ψηφιακές προσομοιώσεις με τον αντιστροφέα πλήρους κλίμακας (15 MW). Σημειώνεται πως η μετρούμενη ενεργός ισχύς του πραγματικού αντιστροφέα κατά τις PHIL δοκιμές δίνεται ως είσοδος στις αμιγώς ψηφιακές προσομοιώσεις (σε ανά μονάδα).

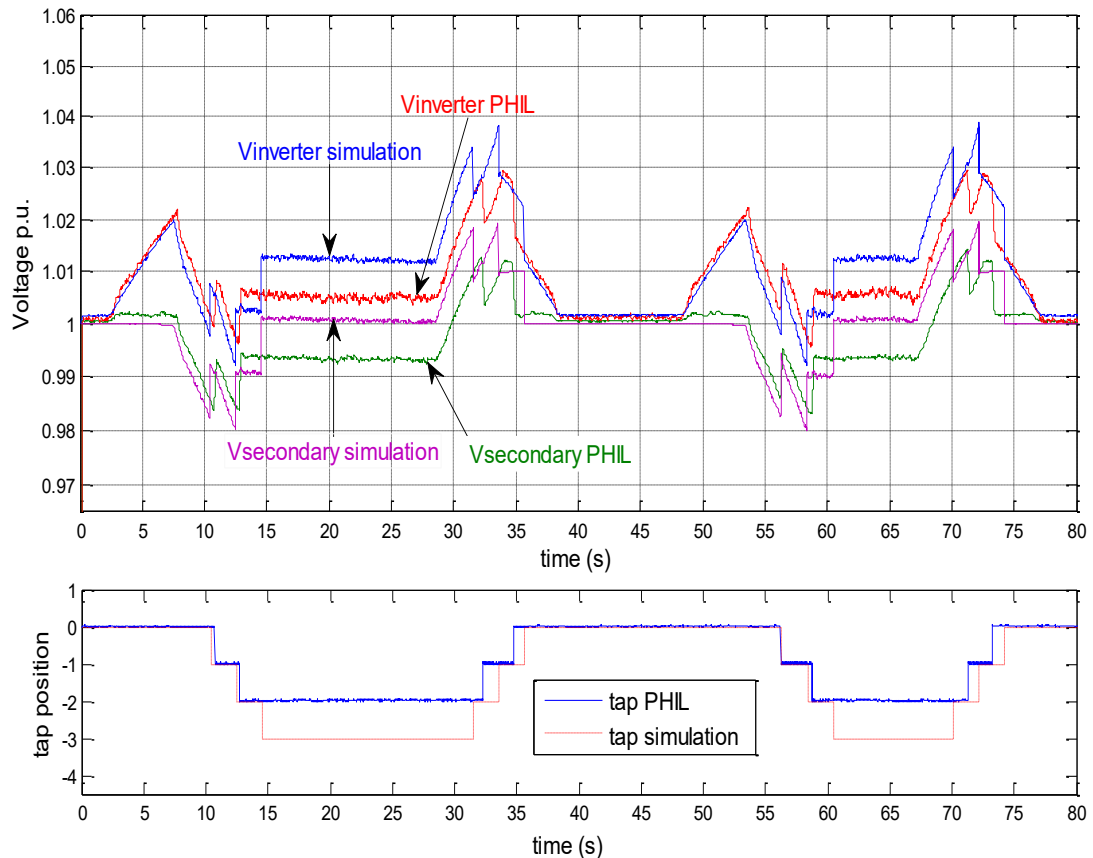
5.3.2.1) Λειτουργία με $\cos\phi(P)$ έλεγχο

Οι επαναλαμβανόμενες αλλαγές λήψης του ΣΑΤΥΦ που προσομοιώθηκαν παραπάνω υλοποιούνται σε PHIL διάταξη. Καταρχάς ο Φ/Β αντιστροφέας λειτουργεί με $\cos\phi(P)$ έλεγχο. Όλες οι στιγμιαίες μετρήσεις τάσης/ρεύματος λαμβάνονται στον ίδιο παλμογράφο και στη συνέχεια τίθενται σε επεξεργασία για τον υπολογισμό rms τιμών, ενεργού/αέργου ισχύος κτλ. Το Σχήμα 5.27 δείχνει την τάση του δευτερεύοντος, του κοινού ζυγού και του αντιστροφέα κατά τη PHIL δοκιμή, όπου οι μετρήσεις δεν έχουν υποστεί περαιτέρω επεξεργασία. Στο Σχήμα 5.28 και στα επόμενα Σχήματα της παραγράφου 5.3.2 οι μετρήσεις έχουν εξομαλυνθεί με κινούμενο μέσο όρο.

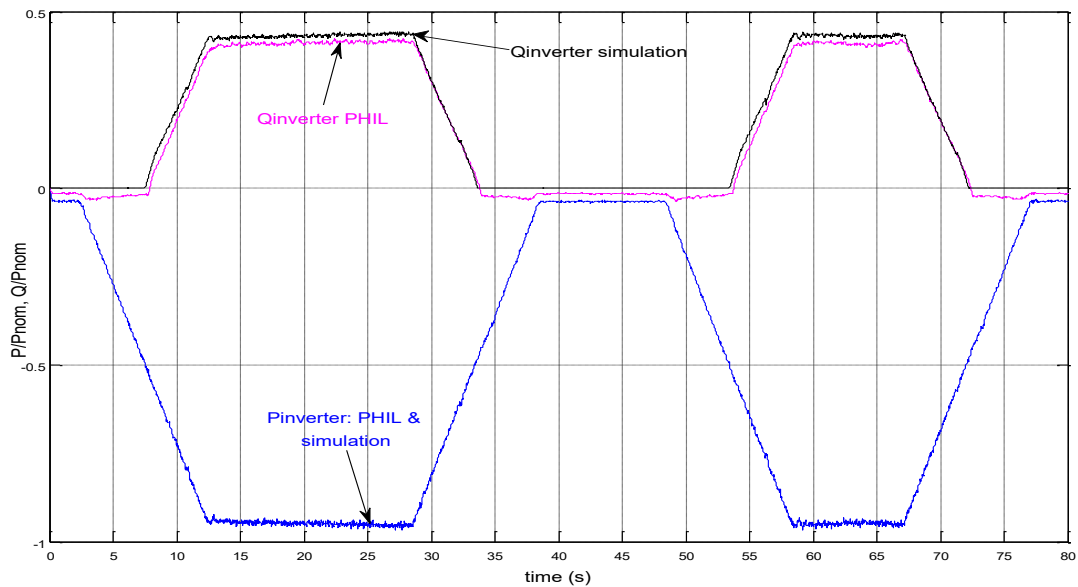


Σχήμα 5.27. PHIL δοκιμή με $\cos\phi(P)$ έλεγχο: καταγραφή από παλμογράφο χωρίς εξομάλυνση των μετρήσεων (παριστάνεται και η τάση του κοινού ζυγού στο φυσικό σύστημα V_{cn_h})

Στο Σχήμα 5.28 παρατηρείται η ίδια συμπεριφορά στην αμιγώς ψηφιακή προσομοίωση της ΔΠ πλήρους κλίμακας και στην PHIL δοκιμή. Μικρές αποκλίσεις στις τάσεις οφείλονται στη μη ιδανική $\cos\phi(P)$ χαρακτηριστική του πραγματικού αντιστροφέα (απόκλιση στην άεργο ισχύ για την ίδια ενεργό ισχύ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.29) και σε θέματα που σχετίζονται με τη PHIL μέθοδο (χρονική καθυστέρηση, συνάρτηση μεταφοράς του ενισχυτή κτλ). Μία επιπλέον αλλαγή λήψης (3^η) λαμβάνει χώρα στην αμιγώς ψηφιακή προσομοίωση, επειδή η τάση του δευτερεύοντος βρίσκεται εκτός της νεκρής ζώνης του ΣΑΤΥΦ ($\pm 0.7\%$), ενώ στη PHIL δοκιμή βρίσκεται οριακά εντός.



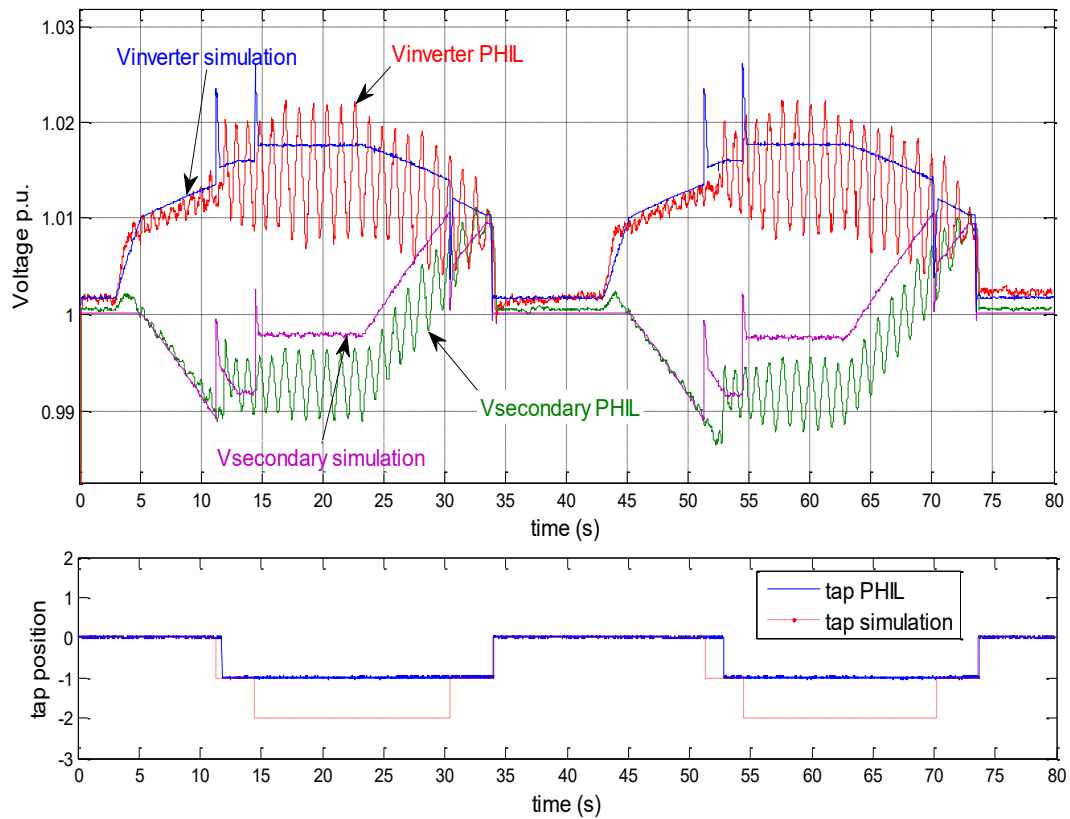
Σχήμα 5.28. PHIL δοκιμή και αμιγώς ψηφιακή προσομοίωση της περίπτωσης επαναλαμβανόμενων αλλαγών λήψης: $\cos\phi(P)$ έλεγχος



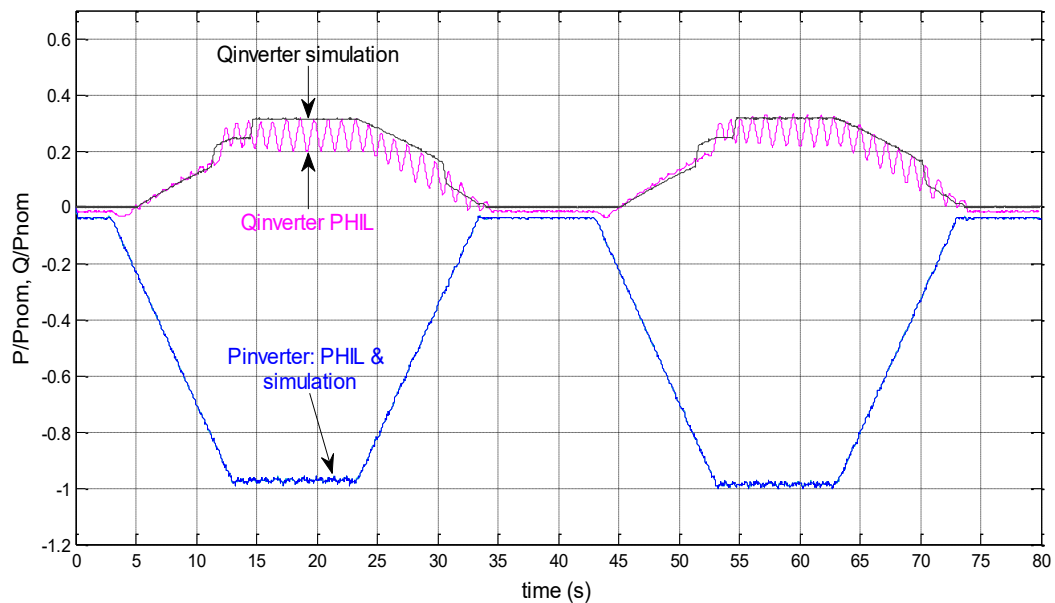
Σχήμα 5.29. Ενεργός και άεργος ισχύς του αντιστροφέα στη PHIL δοκιμή και στην αμιγώς ψηφιακή προσομοίωση: $\cos\phi(P)$ έλεγχος

5.3.2.2) Λειτουργία με $Q(V)$ έλεγχο

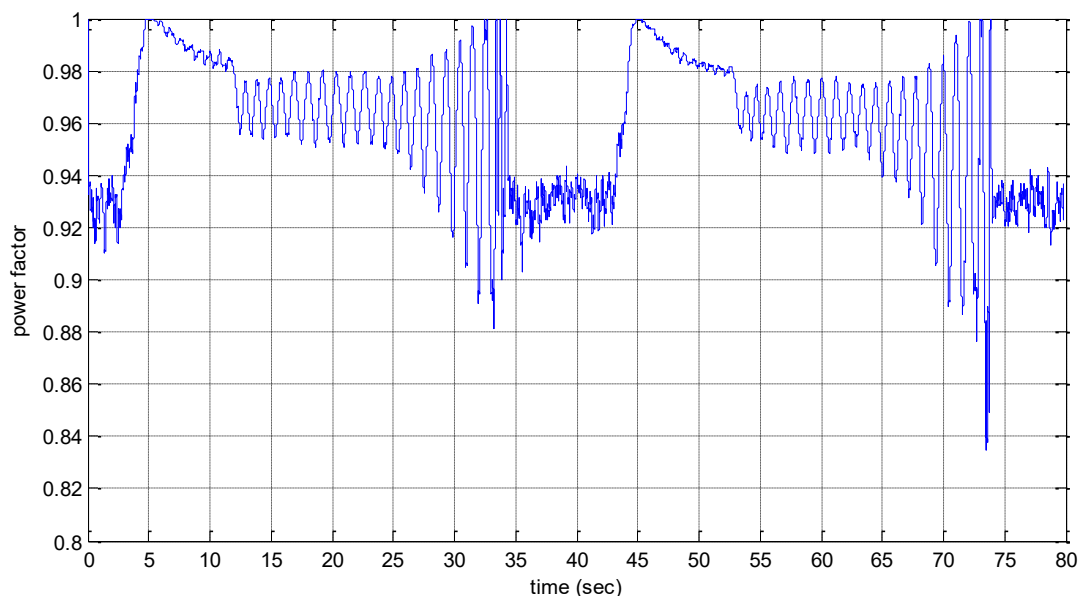
Στη συνέχεια ο αντιστροφέας λειτουργεί με $Q(V)$ έλεγχο και πραγματοποιείται PHIL δοκιμή της περίπτωσης των επαναλαμβανόμενων αλλαγών λήψης που προσομοιώθηκε παραπάνω. Όταν το ΣΑΤΥΦ αλλάζει λήψη, παρατηρούνται ταλαντώσεις στις τάσεις και στην άεργο ισχύ (Σχήματα 5.30 και 5.31) που φανερώνουν την εμφάνιση αστάθειας του $Q(V)$ ελεγκτή. Ο συντελεστής ισχύος του αντιστροφέα κατά τη PHIL δοκιμή παριστάνεται στο Σχήμα 5.32. Στα Σχήματα 5.30 και 5.31 παρουσιάζονται επίσης τα αποτελέσματα από την αμιγώς ψηφιακή προσομοίωση, όπου δεν παρατηρούνται ταλαντώσεις. Είναι φανερό πως η αμιγώς ψηφιακή προσομοίωση σε αυτή την περίπτωση δεν αναπαριστά πλήρως την πραγματική συμπεριφορά του συστήματος, εξαιτίας της δυσκολίας μοντελοποίησης της πολυπλοκότητας των ηλεκτρονικών ισχύος. Περαιτέρω διερεύνηση έδειξε πως η αστάθεια του $Q(V)$ ελεγκτή οφείλεται σε εσωτερικές χρονικές καθυστερήσεις στον ελεγκτή του εμπορικού αντιστροφέα (π.χ. κινούμενος μέσος όρος στη μέτρηση της τάσης, καθυστέρηση στην επικοινωνία μεταξύ επεξεργαστών), οι οποίες είναι άγνωστες και δεν μπορούσαν να ληφθούν υπόψη με ακρίβεια στην αμιγώς ψηφιακή προσομοίωση. Θεωρητική ανάλυση της ευστάθειας του $Q(V)$ ελεγκτή παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.2.2. Σημειώνεται πως και στις τυποποιημένες δοκιμές του αντιστροφέα δεν παρατηρήθηκε αυτή η συμπεριφορά που δείχνει πως οι PHIL δοκιμές μπορούν να αποκαλύψουν ατέλειες της υπό δοκιμή συσκευής.



Σχήμα 5.30. PHIL δοκιμή και αμιγώς ψηφιακή προσομοίωση της περίπτωσης επαναλαμβανόμενων αλλαγών λήψης: αστάθεια του Q(V) ελέγχου



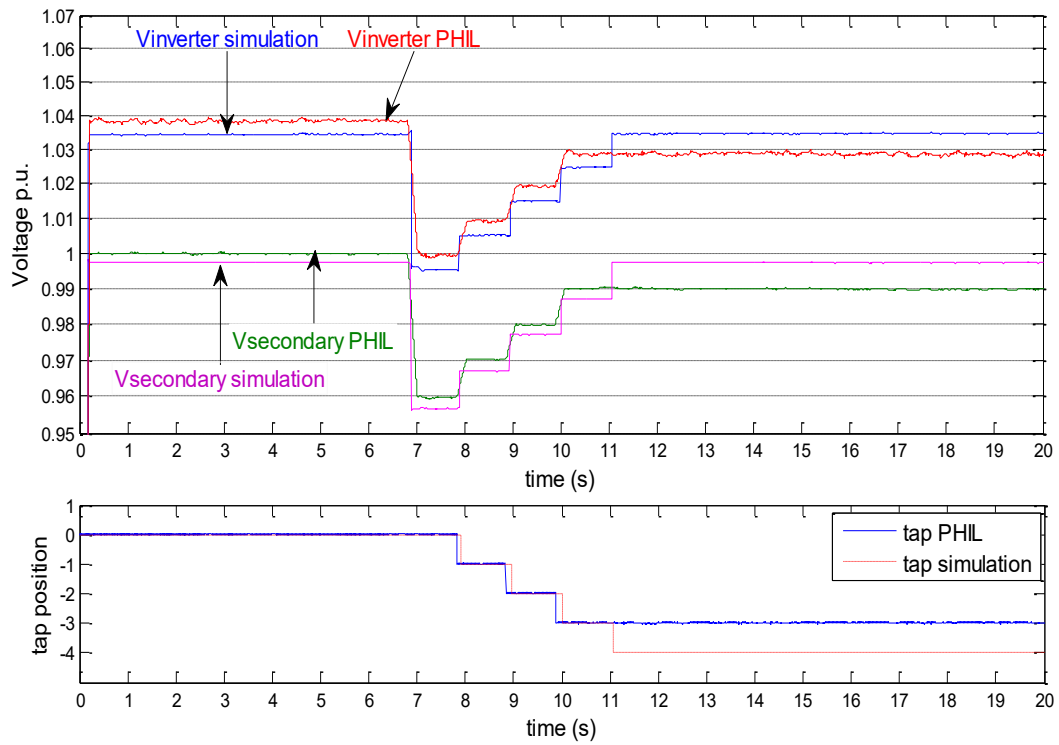
Σχήμα 5.31. Ενεργός και άεργος ισχύς του αντιστροφέα στη PHIL δοκιμή και στην αμιγώς ψηφιακή προσομοίωση: επαναλαμβανόμενες αλλαγές λήψης και αστάθεια του Q(V) ελέγχου



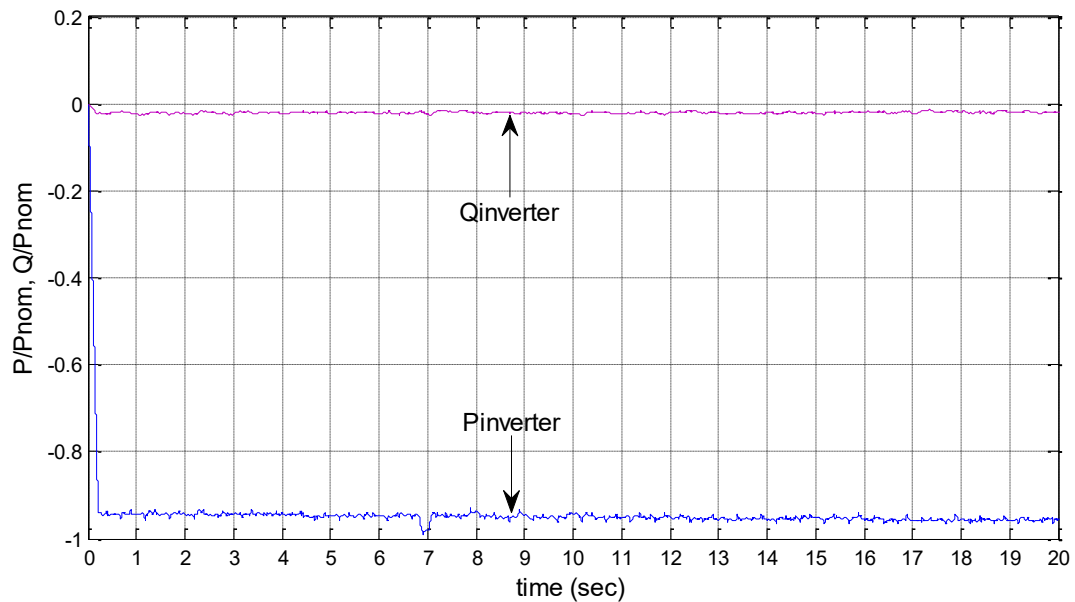
Σχήμα 5.32. Συντελεστής ισχύος του πραγματικού αντιστροφέα κατά τη PHIL δοκιμή

Επιπλέον, η απόκλιση των δύο τάσεων και της αέργου ισχύος πριν από τη 2^η αλλαγή λήψης στην αμιγώς ψηφιακή προσομοίωση είναι μικρή, που δείχνει πως επιτυγχάνεται επαρκής ακρίβεια με τη μέθοδο της μετατόπισης σύνθετης αντίστασης και την εφαρμογή κατάλληλης αλλαγής κλίμακας. Οι ταλαντώσεις στην τάση στη PHIL δοκιμή δεν διατηρούν την τάση εκτός ορίων για επαρκές χρονικό διάστημα, οπότε το ΣΑΤΥΦ δεν εκτελεί μία επιπλέον αλλαγή λήψης σε αντίθεση με την αμιγώς ψηφιακή προσομοίωση.

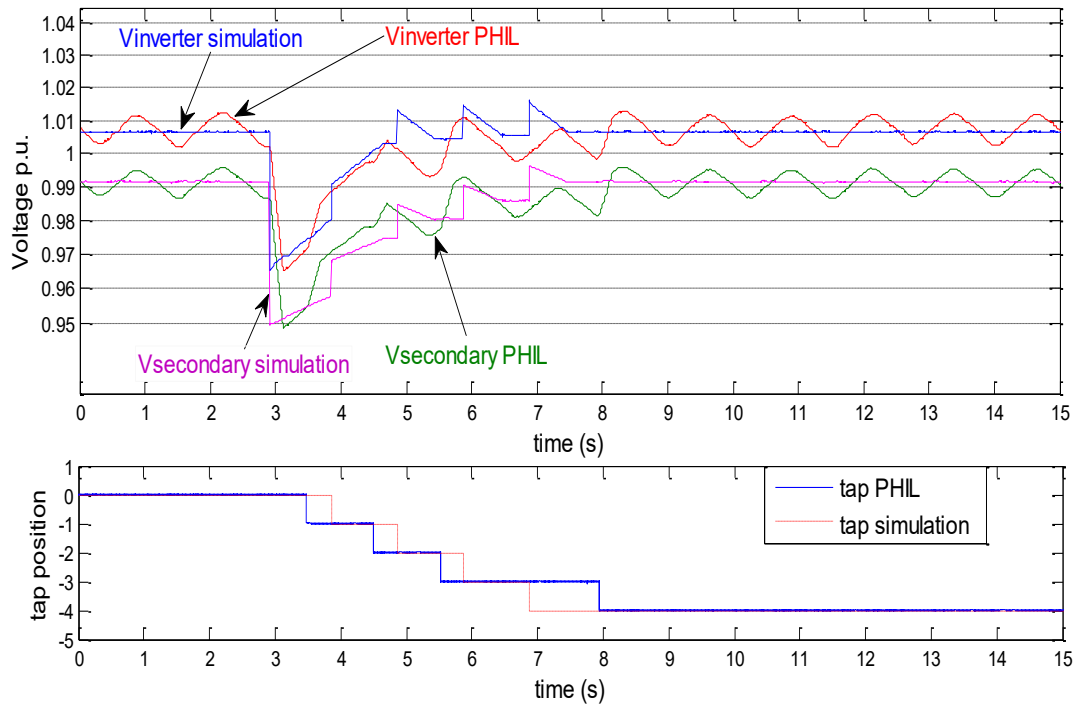
Εν συνεχεία, πραγματοποιείται η παρακάτω PHIL δοκιμή. Η ενεργός ισχύς του αντιστροφέα αυξάνεται γρήγορα μέχρι την ονομαστική τιμή και διατηρείται σταθερή. Η τάση του δικτύου YT μειώνεται βηματικά από 1 α.μ. σε 0.96 α.μ. (η νεκρή ζώνη του ΣΑΤΥΦ είναι $\pm 1\%$). Ο ελεγκτής αέργου ισχύος του αντιστροφέα είναι απενεργοποιημένος και τα αποτελέσματα της PHIL δοκιμής και της αμιγώς ψηφιακής προσομοίωσης φαίνονται στο Σχήμα 5.33. Η ενεργός και άεργος ισχύς του αντιστροφέα κατά τη PHIL δοκιμή παριστάνονται στο Σχήμα 5.34 (στην αμιγώς ψηφιακή προσομοίωση η άεργος ισχύς είναι μηδενική). Ο Q(V) ελεγκτής ενεργοποιείται και λειτουργεί δίχως νεκρή ζώνη και με μέγιστη απορρόφηση αέργου ισχύος ($\cos\varphi_{min}=0.85$) σε τάση $VQ_{max}=101\%$. Παρατηρούνται ταλαντώσεις στις τάσεις και στην άεργο ισχύ κατά τις PHIL δοκιμές, ακόμη και πριν από τη μείωση της τάσης του δικτύου YT, που φανερώνουν αστάθεια του Q(V) ελεγκτή. Η αστάθεια και πάλι δεν έγινε αντιληπτή στην αμιγώς ψηφιακή προσομοίωση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.35. Ο συντελεστής ισχύος του αντιστροφέα κατά τη PHIL δοκιμή φαίνεται στο Σχήμα 5.36.



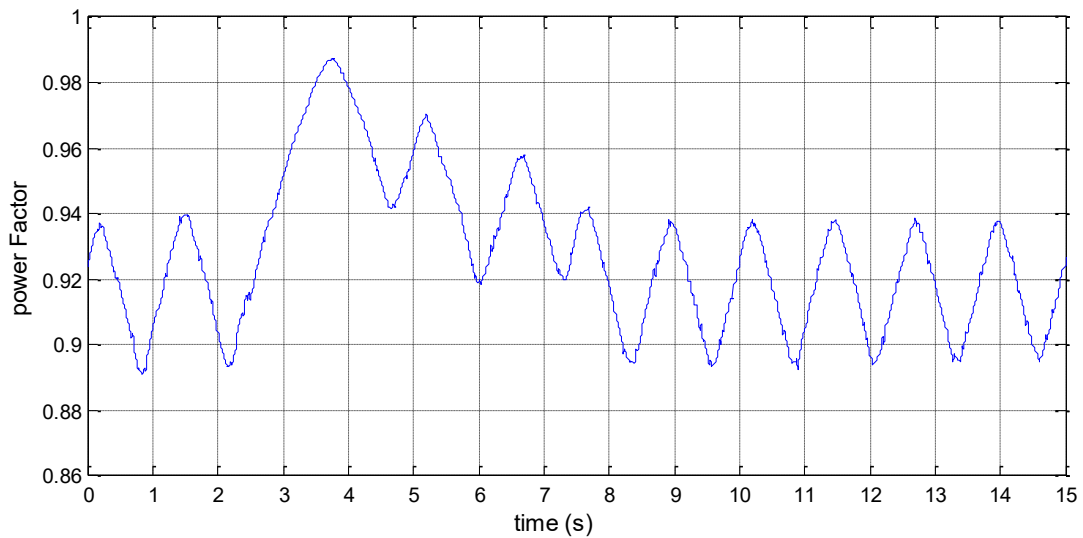
Σχήμα 5.33. PHIL δοκιμή και αμιγώς ψηφιακή προσομοίωση με απενεργοποιημένο τον Q(V) ελεγκτή: μείωση της τάσης του δικτύου YT



Σχήμα 5.34. Ενεργός και άεργος ισχύς του πραγματικού αντιστροφέα κατά τη PHIL δοκιμή με απενεργοποιημένο τον Q(V) ελεγκτή



Σχήμα 5.35. PHIL δοκιμή και αμιγώς ψηφιακή προσομοίωση με Q(V) έλεγχο: αστάθεια του Q(V) ελέγχου



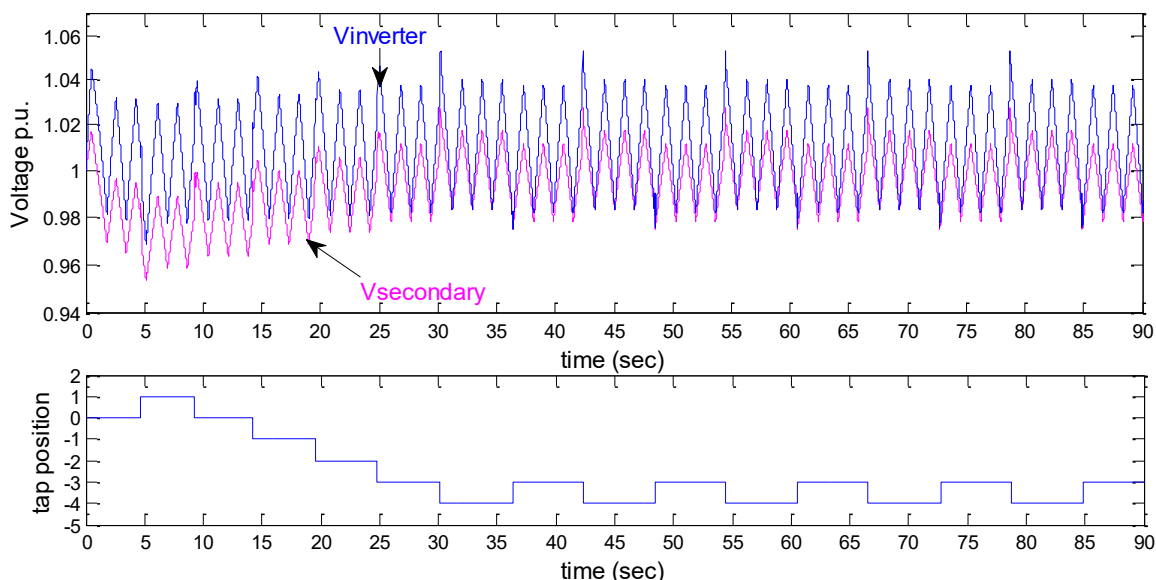
Σχήμα 5.36. Συντελεστής ισχύος του πραγματικού αντιστροφέα κατά τη PHIL δοκιμή με Q(V) έλεγχο

5.4) Επικύρωση μοντέλου ελεγκτή τάσης ΔΠ με χρήση της PHIL μεθόδου

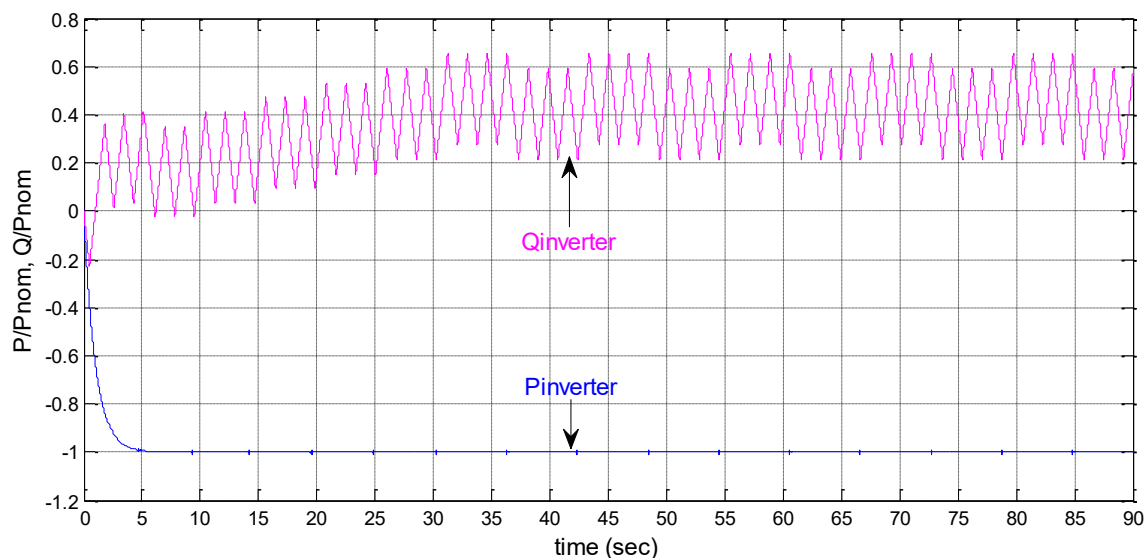
Η ακριβής μοντελοποίηση της ΔΠ είναι σημαντική για την πραγματοποίηση μελετών για τη μετάβαση σε πιο ενεργά δίκτυα. Η χρήση επικυρωμένων μοντέλων ΔΠ μπορεί να παρέχει αξιόπιστα συμπεράσματα στους διαχειριστές του δικτύου και άλλους ενδιαφερόμενους. Η επικύρωση μοντέλων μπορεί να οριστεί ως «η τεκμηρίωση ότι ένα υπολογιστικό μοντέλο,

εντός του πεδίου εφαρμογής, διαθέτει ικανοποιητικό εύρος ακρίβειας για την προβλεπόμενη εφαρμογή του μοντέλου» [151]. Η πολυπλοκότητα των λειτουργιών των σύγχρονων αντιστροφέων αυξάνει τη σημασία αλλά και τη δυσκολία της επικύρωσης μοντέλων. Αρκετές πρωτοβουλίες έχουν πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια σε αυτόν τον τομέα [152], όπως η δημοσίευση των οδηγιών FGW-Part 4 [153] στη Γερμανία και της WECC [154] στις ΗΠΑ. Σε αυτό το πλαίσιο, η χρησιμοποίηση και επικύρωση μοντέλων γενικής χρήσης (που προτείνονται π.χ. στο IEC 61400-27-1 [155] για ανεμογεννήτριες) αποκτά ενδιαφέρον [156].

Η επικύρωση μοντέλων προσομοίωσης συνήθως γίνεται συγκρίνοντας αποτελέσματα ψηφιακών προσομοιώσεων με εργαστηριακές μετρήσεις ή μετρήσεις πεδίου. Εδώ θα χρησιμοποιηθεί η PHIL μέθοδος για την επικύρωση μοντέλου του Q(V) ελεγκτή τάσης αντιστροφέα ΔΠ. Όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 3.2.2 και στις PHIL δοκιμές στις προηγούμενες παραγράφους, η παρουσία χρονικών καθυστερήσεων στο βρόχο ανάδρασης (μέτρηση της τάσης) μπορεί να προκαλέσουν αστάθεια του Q(V) ελεγκτή σε ασθενή δίκτυα. Καταρχάς το φαινόμενο αυτό εξετάζεται με αμιγώς ψηφιακή προσομοίωση ενός αντιστροφέα ΔΠ που συνδέεται σε γραμμή MT μεγάλου μήκους που τροφοδοτείται από μετασχηματιστή ΥΤ/MT εξοπλισμένο με ΣΑΤΥΦ (Σχήμα 5.1). Στο Σχήμα 5.37 φαίνεται πως σε συγκεκριμένες τιμές χρονικής καθυστέρησης του ελεγκτή τάσης της ΔΠ και ρυθμίσεις του ΣΑΤΥΦ, η αστάθεια του ελεγκτή τάσης μπορεί να οδηγήσει σε συνεχείς επαναλαμβανόμενες αλλαγές λήψης του ΣΑΤΥΦ σε σταθερή ενεργό ισχύ της ΔΠ. Στο Σχήμα 5.38 παριστάνεται η ενεργός και άεργος ισχύς. Τέτοια συμπεριφορά σε πραγματική εγκατάσταση θα ήταν ιδιαίτερα προβληματική. Έτσι, γίνεται σαφής η σημασία της απόκτησης ενός λεπτομερούς επικυρωμένου μοντέλου του ελεγκτή τάσης της ΔΠ, που να μπορεί να φανερώσει αυτές τις σύνθετες αλληλεπιδράσεις.



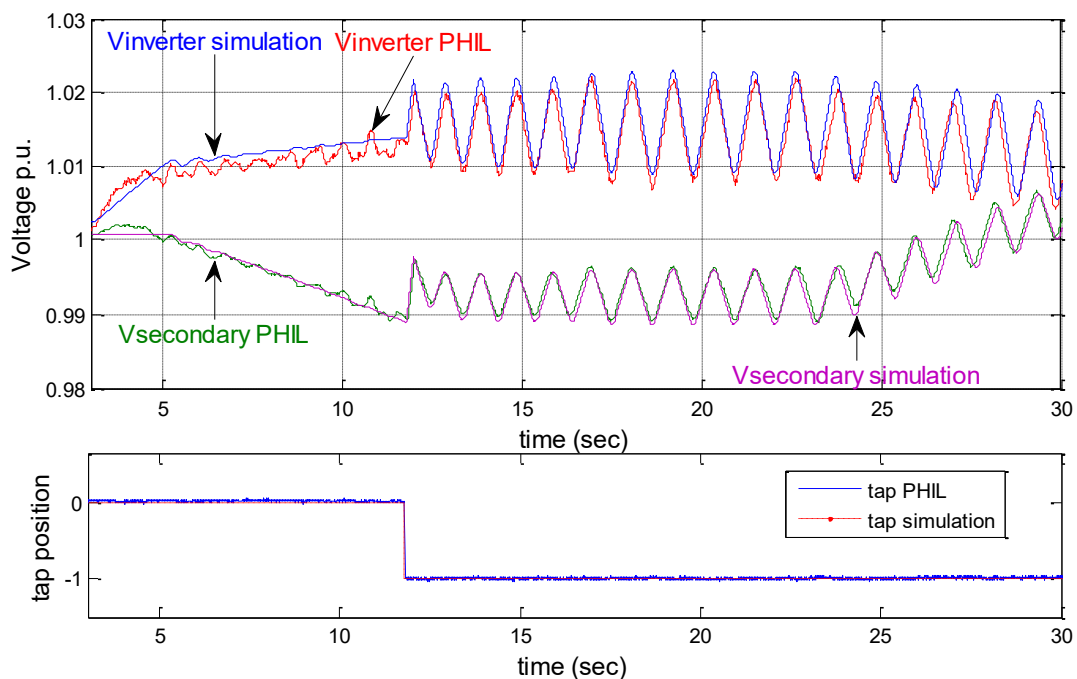
Σχήμα 5.37. Η αστάθεια του Q(V) ελέγχου οδηγεί σε συνεχείς επαναλαμβανόμενες αλλαγές λήψης του ΣΑΤΥΦ για σταθερή ενεργό ισχύ της ΔΠ



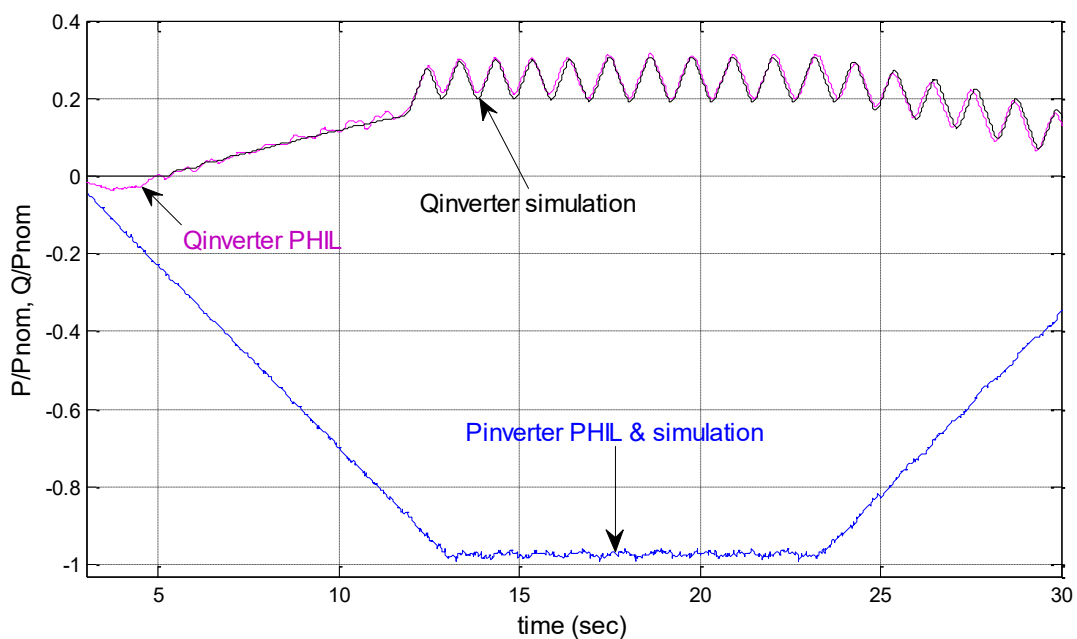
Σχήμα 5.38. Ενεργός και άεργος ισχύς του αντιστροφέα

Επιλέχθηκαν οι παρακάτω παράμετροι για τον εντοπισμό του ανωτέρω προβλήματος, οι οποίες είναι πιο «επιθετικές» σε σχέση με τις προηγούμενες προσομοιώσεις: χρονική καθυστέρηση ενεργοποίησης ΣΑΤΥΦ ίση με 0.5 s, Q(V) ελεγκτής χωρίς νεκρή ζώνη με μέγιστη απορρόφηση άεργου ισχύος ($\cos\phi_{min}=0.80$) σε τάση $VQ_{max}=102\%$, περιορισμός ρυθμού μεταβολής της άεργου ισχύος ίσος με $60\% Q_{max}/s$, χρονική καθυστέρηση μέτρησης της τάσης (T_d) του Q(V) ελεγκτή ίση με 0.5 s.

Στη συνέχεια χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα των PHIL δοκιμών του εμπορικού Φ/B αντιστροφέα κατά τη λειτουργία του με το ΣΑΤΥΦ που παρουσιάστηκαν στα Σχήματα 5.30 και 5.31. Όλες οι παράμετροι του Q(V) ελεγκτή του αντιστροφέα είναι γνωστές εκτός από τη χρονική καθυστέρηση του βρόχου ανάδρασης (μέτρηση και επεξεργασία της τάσης, Σχήμα 3.9). Κάνοντας δοκιμές για την τιμή της χρονικής καθυστέρησης στην αμιγώς ψηφιακή προσομοίωση και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με τις PHIL μετρήσεις είναι εφικτή η εκτίμηση της χρονικής καθυστέρησης του εμπορικού Φ/B αντιστροφέα και η επικύρωση του μοντέλου. Η ενεργός ισχύς που μετρήθηκε κατά τη PHIL δοκιμή χρησιμοποιήθηκε ως είσοδος στην αμιγώς ψηφιακή προσομοίωση. Τα Σχήματα 5.39 και 5.40 δείχνουν την επιτυχημένη σύγκλιση του μοντέλου της αμιγούς ψηφιακής προσομοίωσης και των PHIL μετρήσεων στην τάση του αντιστροφέα, στην άεργο ισχύ του αντιστροφέα, στην τάση του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή και στις αλλαγές λήψης. Η σύγκλιση επιτυγχάνεται με την εισαγωγή κινούμενου μέσου όρου (χρονικό παράθυρο 0.6 s) που ακολουθείται από χρονική καθυστέρηση (0.04 s) στη μέτρηση της τάσης του Q(V) ελεγκτή. Συμπερασματικά, επικυρώθηκε το μοντέλο του ελεγκτή τάσης της ΔΠ στη διάρκεια αλληλεπιδράσεων στο δίκτυο διανομής και σε ασταθή λειτουργία.



Σχήμα 5.39. Επικύρωση του μοντέλου ελεγκτή τάσης του εμπορικού Φ/Β αντιστροφέα με την PHIL μέθοδο: τάσεις και αλλαγές λήψης

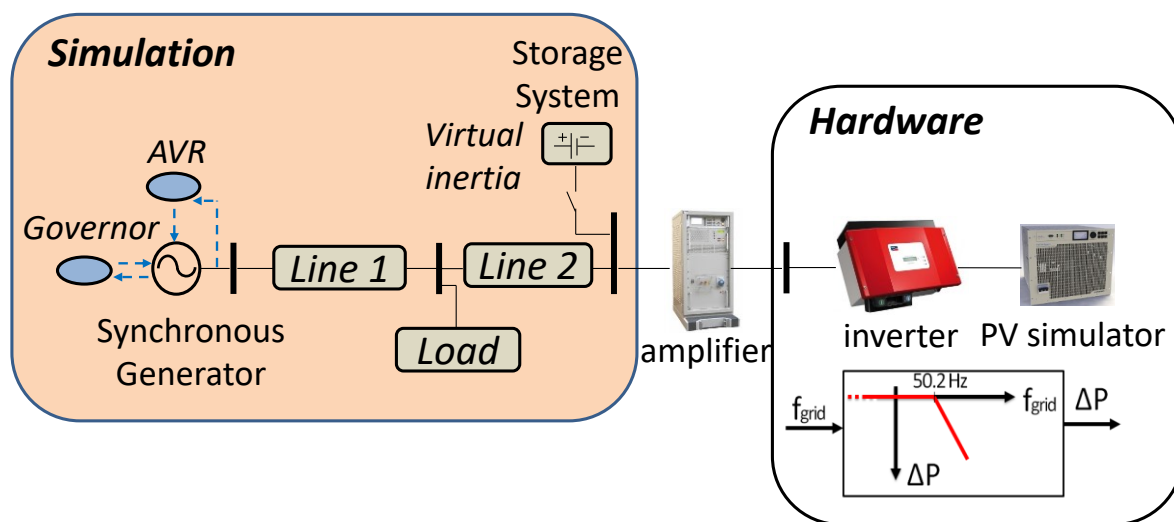


Σχήμα 5.40. Επικύρωση του μοντέλου ελεγκτή τάσης του εμπορικού Φ/Β αντιστροφέα με την PHIL μέθοδο: ενεργός και άεργος ισχύς του αντιστροφέα

5.5) PHIL δοκιμές ρύθμισης συχνότητας με ΔΠ και αποθήκευση: στατισμός και εικονική αδράνεια

Στην παράγραφο 3.3 εξηγήθηκε η δυνατότητα συνεισφοράς της ΔΠ και της αποθήκευσης στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας μέσω χαρακτηριστικής στατισμού και εικονικής

αδράνειας. Σε αυτή την παράγραφο πραγματοποιούνται PHIL δοκιμές χρησιμοποιώντας την τοπολογία που φαίνεται στο Σχήμα 5.41. Εμπορικός φωτοβολταϊκός αντιστροφέας (ονομαστικής ισχύος 3 kW) συνδέεται σε απομονωμένο σύστημα που προσομοιώνεται στον ΨΠΠΧ και αποτελείται από σύγχρονη γεννήτρια (15 kVA , 400 V , $H=1.5\text{ s}$) (με κινητήρια μηχανή, ρυθμιστή στροφών (στατισμός $R=6\%$) και αυτόματο ρυθμιστή τάσης), γραμμές διανομής, φορτίο και μονάδα αποθήκευσης. Ο φωτοβολταϊκός αντιστροφέας μπορεί να λειτουργήσει με χαρακτηριστική στατισμού $P(f)$ για υπερσυχνότητα, όπως ζητείται στα πρόσφατα πρότυπα (Σχήμα 3.11α).



Σχήμα 5.41. Τοπολογία PHIL δοκιμής σε απομονωμένο σύστημα με σύγχρονη γεννήτρια, μονάδα αποθήκευσης (εικονική αδράνεια) και πραγματικό Φ/Β αντιστροφέα (P(f) χαρακτηριστική)

Επίσης, εξετάζεται η ικανότητα μονάδας αποθήκευσης να αντισταθμίσει τη μειωμένη αδράνεια των ΣΗΕ εξαιτίας της αυξημένης ένταξης ΔΠ. Εφαρμόζεται η μέθοδος της «εικονικής σύγχρονης γεννήτριας» (VSG) (παράγραφος 3.3.2), όπου προσομοιώνεται η φυσική αδράνεια των σύγχρονων μηχανών με βάση την παράγωγο της συχνότητας. Η μονάδα αποθήκευσης που παρέχει εικονική αδράνεια προσομοιώνεται στον ΨΠΠΧ υλοποιώντας τον αλγόριθμο του Σχήματος 3.12 (δίχως έλεγχο στατισμού). Πραγματοποιούνται οι ακόλουθες PHIL δοκιμές:

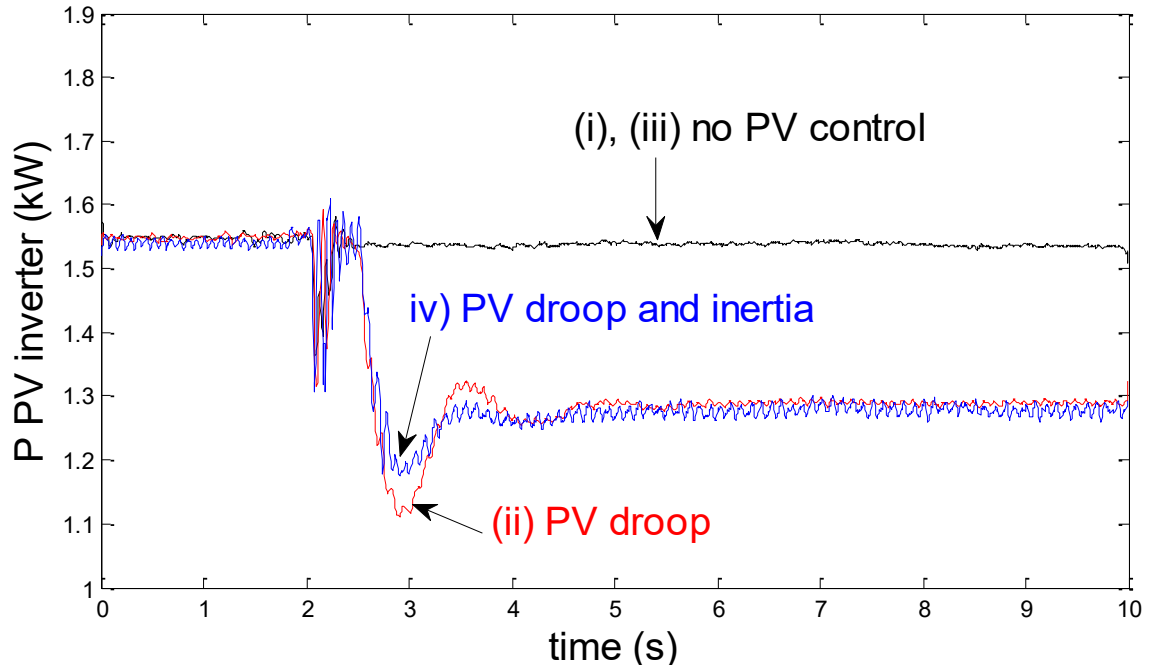
- i) Ο φωτοβολταϊκός αντιστροφέας δεν συμμετέχει στη ρύθμιση συχνότητας και η μονάδα αποθήκευσης δεν ανταλλάσσει ισχύ με το δίκτυο
- ii) Ο φωτοβολταϊκός αντιστροφέας λειτουργεί με $P(f)$ χαρακτηριστική και η μονάδα αποθήκευσης δεν ανταλλάσσει ισχύ με το δίκτυο
- iii) Ο φωτοβολταϊκός αντιστροφέας δεν συμμετέχει στη ρύθμιση συχνότητας και η μονάδα αποθήκευσης παρέχει εικονική αδράνεια
- iv) Ο φωτοβολταϊκός αντιστροφέας λειτουργεί με $P(f)$ χαρακτηριστική και η μονάδα αποθήκευσης παρέχει εικονική αδράνεια

Η ενεργός ισχύς του προσομοιωμένου φορτίου στον ΨΠΠΧ μειώνεται βηματικά (από 13 kW σε 11 kW) και η ενεργός ισχύς του πραγματικού φωτοβολταϊκού αντιστροφέα

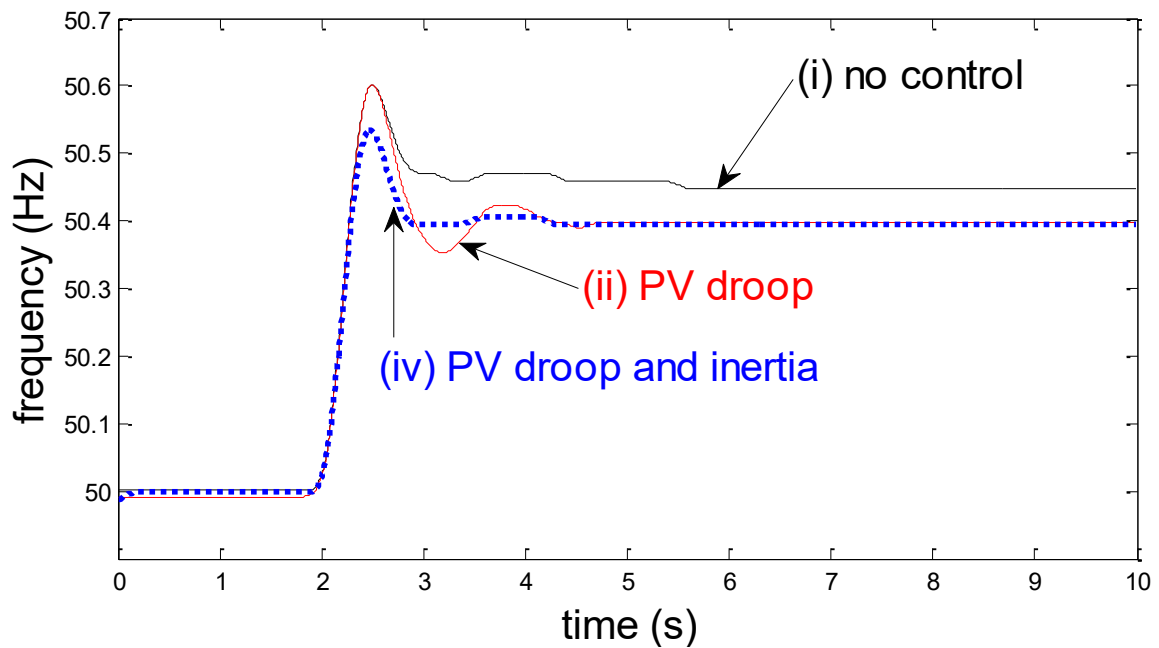
παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.42 (η διαθέσιμη ενεργός ισχύς είναι 1.55 kW). Στις περιπτώσεις (i) και (iii) η ενεργός ισχύς δεν μεταβάλλεται. Στις περιπτώσεις (ii) και (iv) η μείωση της ενεργού ισχύος του αντιστροφέα με βάση την $P(f)$ χαρακτηριστική οδηγεί σε συχνότητα πιο κοντά στην ονομαστική τιμή στη μόνιμη κατάσταση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.43. Η ενεργός ισχύς του φωτοβολταϊκού αντιστροφέα μειώνεται λιγότερο στη μεταβατική κατάσταση στην περίπτωση της συνδυασμένης λειτουργίας των δύο ελεγκτών (περίπτωση (iv)), εφόσον η παροχή αδράνειας από τη μονάδα αποθήκευσης βελτιώνει μεταβατικά τη συχνότητα.

Η συχνότητα κατά τη λειτουργία εικονικής αδράνειας δίχως $P(f)$ χαρακτηριστική (περίπτωση (iii)) παριστάνεται στο Σχήμα 5.44 για λόγους ευκρίνειας. Φαίνεται πως η $P(f)$ χαρακτηριστική βελτιώνει τη συχνότητα στη μόνιμη κατάσταση (περίπτωση (ii)), η εικονική αδράνεια στη μεταβατική κατάσταση (περίπτωση (iii)) και πως η συνδυασμένη λειτουργία των δύο ελεγκτών (περίπτωση (iv)) οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα στη μεταβατική και στη μόνιμη κατάσταση. Επίσης, η συνδυασμένη λειτουργία περιορίζει τις ταλαντώσεις στη συχνότητα σε σχέση με τη λειτουργία μόνο με $P(f)$ χαρακτηριστική. Επιπλέον, παρατηρείται πως ο $P(f)$ έλεγχος του αντιστροφέα είναι αργός (Σχήμα 5.42), οπότε δεν συμβάλλει στον περιορισμό της μέγιστης απόκλισης της συχνότητας.

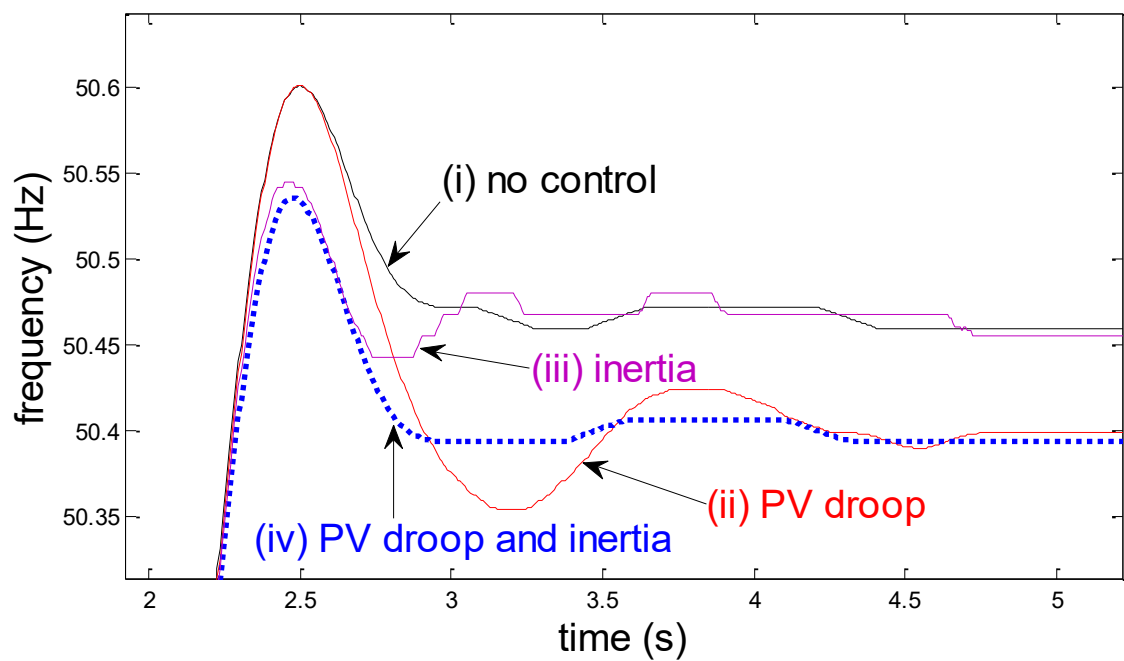
Η ενεργός ισχύς της μονάδας αποθήκευσης όταν παρέχει εικονική αδράνεια (περιπτώσεις (iii) και (iv)) φαίνεται στο Σχήμα 5.45. Η μονάδα αποθήκευσης κατά κύριο λόγο απορροφά ισχύ στη μεταβατική κατάσταση και στη μόνιμη κατάσταση δεν ανταλλάσσει ισχύ.



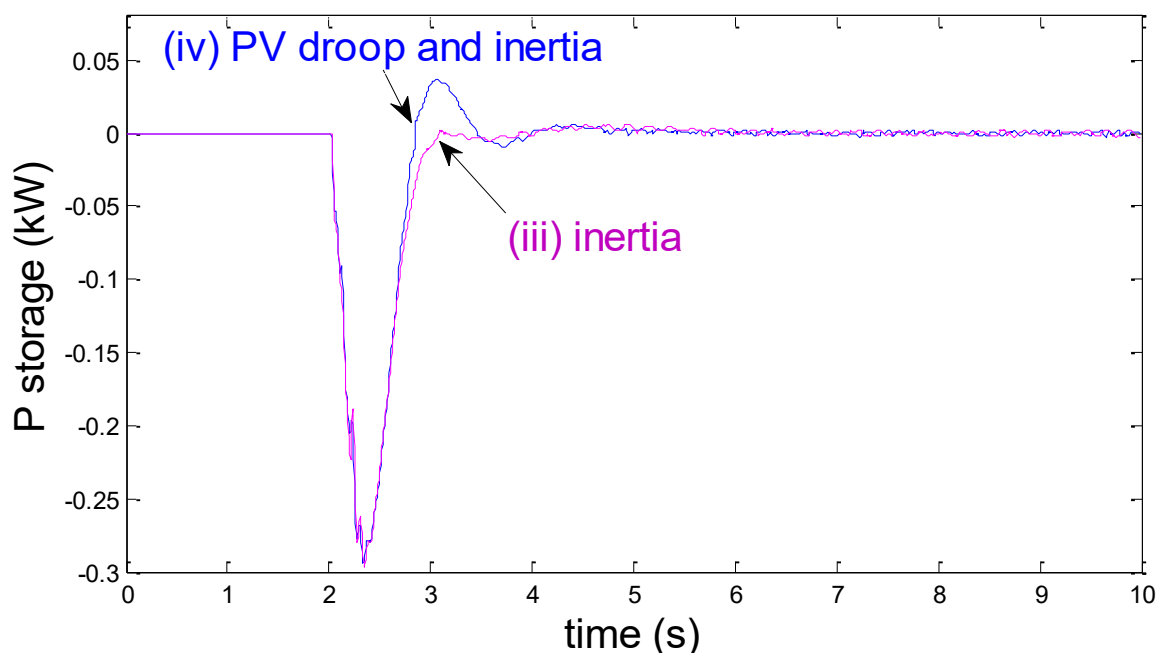
Σχήμα 5.42. Ενεργός ισχύς του πραγματικού Φ/Β αντιστροφέα δίχως $P(f)$ έλεγχο, με $P(f)$ έλεγχο και σε συνδυασμό με παροχή εικονική αδράνειας από μονάδα αποθήκευσης (PHIL δοκιμές)



Σχήμα 5.43. Συχνότητα δίχως έλεγχο, με P(f) έλεγχο του Φ/B αντιστροφέα και σε συνδυασμένη λειτουργία με παροχή εικονικής αδράνειας από μονάδα αποθήκευσης (PHIL δοκιμές)



Σχήμα 5.44. Μεγέθυνση του Σχήματος 5.43: παριστάνεται και η περίπτωση που η μονάδα αποθήκευσης παρέχει εικονική αδράνεια δίχως P(f) έλεγχο του Φ/B αντιστροφέα (PHIL δοκιμές)



Σχήμα 5.45. Ενεργός ισχύς της προσομοιωμένης μονάδας αποθήκευσης που παρέχει εικονική αδράνεια δίχως και με P(f) έλεγχο του Φ/B αντιστροφέα (PHIL δοκιμές)

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.5.3, στις τυποποιημένες δοκιμές της P(f) χαρακτηριστικής ο αντιστροφέας εξετάζεται σε δεδομένο προφίλ συχνότητας, δίχως να παρέχεται ανατροφοδότηση από τον αντιστροφέα, και δεν εξετάζονται αλληλεπιδράσεις με άλλες συσκευές. Με τις PHIL δοκιμές που υλοποιήθηκαν σε αυτή την παράγραφο δεν δοκιμάζεται μόνο ο μεμονωμένος αντιστροφέας (ενεργός ισχύς), αλλά αξιολογείται επίσης η επίδραση του στο σύστημα (συχνότητα), υπογραμμίζοντας τη δυνατότητα μετάβασης από δοκιμές μεμονωμένου εξοπλισμού σε δοκιμές σε επίπεδο συστήματος με χρήση της PHIL μεθόδου.

5.6) Σύνοψη και συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο αυτό εξετάστηκαν αλληλεπιδράσεις μεταξύ τοπικού ελέγχου ΔΠ και ΣΑΤΥΦ. Παρουσιάστηκαν πέντε περιπτώσεις προβληματικής συνεργασίας που οδηγούν σε συχνές αλλαγές λήψης, επιπλέον ροή αέργου ισχύος, αύξηση της τάσης της ΔΠ κ.α. Εκτός από τις αμιγώς ψηφιακές προσομοιώσεις, εφαρμόστηκε η PHIL μέθοδος για την ανάλυση σε επίπεδο συστήματος της συμπεριφοράς μονάδας ΔΠ υψηλής ονομαστικής ισχύος που συνδέεται στη MT. Εμπορικός αντιστροφέας χαμηλότερης ισχύος χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση των αλληλεπιδράσεων του ελεγκτή τάσης του αντιστροφέα πλήρους κλίμακας. Εφαρμόστηκε με επιτυχία η μέθοδος αλλαγής κλίμακας και μετατόπισης σύνθετης αντίστασης που προτάθηκε στο Κεφάλαιο 2, εξασφαλίζοντας ευστάθεια και παρέχοντας καλή ακρίβεια, παρά την πολυπλοκότητα της τοπολογίας. Ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε πως η αμιγώς ψηφιακή προσομοίωση δεν μπόρεσε να αναπαράξει πλήρως την πραγματική συμπεριφορά του συστήματος, ενώ η PHIL δοκιμή παρουσίασε αποτελεσματικά ταλαντώσεις που προέκυψαν εξαιτίας αστάθειας του Q(V) ελεγκτή της ΔΠ

(Κεφάλαιο 3), αναδεικνύοντας την αξία της PHIL μεθόδου.

Στη συνέχεια, παρουσιάστηκε επιπλέον πρόβλημα συνεργασίας του ελεγκτή τάσης της ΔΠ και του ΣΑΤΥΦ εξαιτίας της αστάθειας του $Q(V)$ ελεγκτή (επαναλαμβανόμενες αλλαγές λήψης για σταθερή ενεργό ισχύ της ΔΠ). Επίσης, η PHIL μέθοδος εφαρμόστηκε για την επικύρωση μοντέλου ελεγκτή τάσης αντιστροφέα ΔΠ που συνδέεται σε δίκτυο διανομής που περιλαμβάνει ΣΑΤΥΦ. Συγκρίνοντας τις μετρήσεις των PHIL δοκιμών με αμιγώς ψηφιακές προσομοιώσεις έγινε εκτίμηση παραμέτρων και επικύρωση του μοντέλου του εμπορικού Φ/B αντιστροφέα. Η επικύρωση έγινε κατά τη διάρκεια αλληλεπιδράσεων σε επίπεδο συστήματος και σε ασταθή λειτουργία του $Q(V)$ ελεγκτή.

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν PHIL δοκιμές πρωτεύουσας ρύθμισης συχνότητας, όπου εξετάστηκε η επίδραση του στατισμού και της εικονικής αδράνειας. Σε αντίθεση με τις συμβατικές δοκιμές, οι PHIL δοκιμές εκτός από τον έλεγχο της συσκευής (ενεργός ισχύς του αντιστροφέα) αξιολογούν την επίδραση της στο σύστημα (συχνότητα), συμβάλλοντας στη μετάβαση από δοκιμές μεμονωμένου εξοπλισμού σε δοκιμές σε επίπεδο συστήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ PHIL ΜΕΘΟΔΟΥ ΓΙΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟΥΣ ΣΚΟΠΟΥΣ

6.1) Εισαγωγή

Οι εργαστηριακές ασκήσεις αποτελούν σημαντικό μέρος του προγράμματος σπουδών των μηχανικών, καθώς παρέχουν μια γέφυρα ανάμεσα στη θεωρία και την πράξη και προάγουν την κατανόηση φαινομένων και εξισώσεων. Στον τομέα των ΣΗΕ, η αυξανόμενη ενσωμάτωση ΔΠ και η εμφάνιση των ευφών δικτύων τα τελευταία χρόνια, έχουν δημιουργήσει νέες προκλήσεις αλλά και νέες δυνατότητες. Οι φοιτητές θα αντιμετωπίσουν αυτά τα θέματα στη μελλοντική καριέρα τους, καθιστώντας τις εργαστηριακές ασκήσεις σε αυτό τον τομέα σημαντικές.

Σε αυτό το Κεφάλαιο [Α.2] περιγράφεται η χρήση της PHIL μεθόδου για εκπαιδευτικούς σκοπούς με συστηματικό τρόπο για πρώτη φορά. Γίνεται αναφορά στην εργαστηριακή εκπαίδευση, στα πλεονεκτήματα της HIL μεθόδου και στη βιωματική μάθηση σύμφωνα με το μοντέλο του Kolb. Παρουσιάζονται οι εκπαιδευτικοί στόχοι, η μεθοδολογία και οργανωτικά ζητήματα. Επιλέγονται τέσσερα σημαντικά θέματα για την κατανόηση της λειτουργίας των ΣΗΕ και σχεδιάζονται εργαστηριακές ασκήσεις. Τα θέματα επικεντρώνονται σε ζητήματα που προκύπτουν από την αυξανόμενη ενσωμάτωση ΔΠ: κατανομή φορτίου μεταξύ σύγχρονων γεννητριών και ΔΠ, ρύθμιση τάσης με ΣΑΤΥΦ και ΔΠ, βραχυκυκλώματα σε δίκτυα με αντιστροφείς ΔΠ και λειτουργία μικροδικτύου. Οι ασκήσεις ξεκινούν από τη λειτουργία των παραδοσιακών ΣΗΕ και σταδιακά εντάσσονται θέματα που αφορούν τη ΔΠ παρουσιάζοντας προκλήσεις αλλά και οφέλη. Αναπτύσσονται δύο ανεξάρτητες εργαστηριακές διατάξεις PHIL που δημιουργούν δύο πάγκους εργασίας. Οι φοιτητές αποκτούν πρακτική εμπειρία στη χρήση εξοπλισμού σε μικρές ομάδες, εφαρμόζοντας βιωματική μάθηση, όπου είναι εφικτό. Δίνονται ερωτηματολόγια στους φοιτητές για την αξιολόγηση των εργαστηριακών ασκήσεων. Η αξιολόγηση είναι σαφώς θετική, υπογραμμίζοντας την αξία της PHIL μεθόδου για την εκπαίδευση στα ΣΗΕ.

6.2) Εργαστηριακή εκπαίδευση

Η εργαστηριακή εκπαίδευση παρέχει πολύτιμη πρακτική εμπειρία στους φοιτητές και η ανάγκη ένταξης εργαστηριακών ασκήσεων στον τομέα των ΣΗΕ έχει αναγνωριστεί εδώ και δεκαετίες. Η ευρεία ενσωμάτωση ΔΠ και ο εν εξελίξει μετασχηματισμός των παραδοσιακών ΣΗΕ σε ευφυή δίκτυα, απαιτούν την εισαγωγή νέου υλικού στο πρόγραμμα σπουδών. Ως εκ τούτου, χρειάζεται να εισαχθούν κατάλληλες εργαστηριακές ασκήσεις. Αρκετά πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα έχουν αναγνωρίσει αυτή την ανάγκη και συμβάλλουν στην εργαστηριακή εκπαίδευση στον τομέα αυτό [157]-[163].

Η εργαστηριακή εκπαίδευση στα ΣΗΕ πραγματοποιείται συνήθως με κατάλληλο λογισμικό [162]-[166] και πιο σπάνια με πειραματικές διατάξεις [157][158][159][161]. Από την άλλη, η εργαστηριακή εκπαίδευση στα ηλεκτρονικά ισχύος και στις ηλεκτρικές μηχανές πραγματοποιείται συνήθως χρησιμοποιώντας πραγματικό εξοπλισμό, καθώς η μελέτη

γίνεται σε επίπεδο συσκευής. Η περιορισμένη χρήση πραγματικού εξοπλισμού στην εκπαίδευση στα ΣΗΕ οφείλεται προφανώς στη δυσκολία και στο κόστος απόκτησης ενός ρεαλιστικού ΣΗΕ στο εργαστήριο (που περιλαμβάνει π.χ. γεννήτριες, μετασχηματιστές, γραμμές, φορτία, ΣΑΤΥΦ, αντιστροφείς ΔΠ). Ως αποτέλεσμα, χρησιμοποιούνται μικρές εκπαιδευτικές πειραματικές διατάξεις που εκτελούν συνήθως συγκεκριμένες λειτουργίες και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν εύκολα για ευρύ φάσμα πειραμάτων.

Πριν από αρκετές δεκαετίες, στα πανεπιστήμια χρησιμοποιούνταν αναλογικά μοντέλα γραμμών μεταφοράς και γεννήτριες μικρής κλίμακας, ενώ στις επιχειρήσεις ηλεκτρισμού αναλυτές AC δικτύου [167]. Η εμφάνιση των ηλεκτρονικών υπολογιστών (H/Y) και η ανάπτυξη προηγμένων λογισμικών, επέτρεψε τη χρήση ψηφιακών προσομοιώσεων για την ανάλυση, την έρευνα και την εκπαίδευση στα ΣΗΕ, λόγω της ευελιξίας, της δυνατότητας δημιουργίας σύνθετων μοντέλων, του χαμηλού κόστους, της ύπαρξης φιλικού γραφικού περιβάλλοντος κτλ. Αν και αυτή η εξέλιξη άνοιξε νέα μονοπάτια στην εκπαίδευση, περιόρισε την άμεση επαφή με τα πραγματικά συστήματα ισχύος και την εμπειρική κατανόηση των φαινομένων [167][168].

Η μέθοδος HIL αποτελεί συνδυασμό ψηφιακής προσομοίωσης και δοκιμής εξοπλισμού, οπότε μπορεί να παρέχει στους φοιτητές την εμπειρία χρήσης εξοπλισμού και ταυτόχρονα αξιοποιεί τα πλεονεκτήματα της ψηφιακής προσομοίωσης. Οι παρακάτω δυνατότητες της HIL μεθόδου είναι χρήσιμες για εκπαιδευτικούς σκοπούς:

- Οι φοιτητές αντικρίζουν ένα σύστημα πραγματικού χρόνου (όπως ένα SCADA), όπου μπορούν να πραγματοποιούν χειρισμούς και να παρακολουθούν τη λειτουργία σε ρεαλιστικές συνθήκες. Η ευελιξία και η ευκολία μοντελοποίησης και σχεδιασμού σεναρίων των ψηφιακών προσομοιώσεων διατηρείται.
- Η σύνδεση πραγματικού εξοπλισμού (π.χ. αντιστροφών ΔΠ, κινητήρων, ψηφιακών ηλεκτρονόμων) είναι εφικτή, ώστε οι φοιτητές να αποκτήσουν την εμπειρία της λειτουργίας της πραγματικής συσκευής. Η μέτρηση πραγματικών μεγεθών και ο έλεγχος πραγματικού εξοπλισμού είναι πολύτιμες εμπειρίες για τους φοιτητές.
- Συσκευές που δεν είναι διαθέσιμες στο εργαστήριο (π.χ. ΣΑΤΥΦ, σύγχρονη γεννήτρια) μπορούν να προσομοιωθούν σε πραγματικό χρόνο και να μελετηθεί η αλληλεπίδρασή τους με τον πραγματικό εξοπλισμό.
- Δύσκολες δοκιμές, όπως σφάλματα, μπορούν να εκτελεστούν με ασφάλεια στο περιβάλλον προσομοίωσης πραγματικού χρόνου, χωρίς φθορά ή κίνδυνο για τον εξοπλισμό. Ο τύπος, η διάρκεια και η θέση των σφαλμάτων μπορούν εύκολα να τροποποιηθούν από τους φοιτητές, το οποίο θα ήταν δύσκολο να γίνει σε μια πραγματική εγκατάσταση.

Η μέθοδος CHIL έχει χρησιμοποιηθεί πολλές φορές για εκπαιδευτικούς σκοπούς [169] στους τομείς των συστημάτων ελέγχου [170], οδήγησης ηλεκτρικών μηχανών [171] κ.α. Όσον αφορά την εκπαίδευση στα ΣΗΕ, η μέθοδος CHIL έχει εφαρμοστεί κυρίως για μελέτες προστασίας. Για παράδειγμα, στο [172] ένας εμπορικός ψηφιακός ηλεκτρονόμος δοκιμάστηκε σε διάφορα είδη σφαλμάτων συνδεδεμένος με προσομοιωμένο δίκτυο σε πραγματικό χρόνο, στα πλαίσια πανεπιστημιακού μαθήματος. Μια διαδραστική πλατφόρμα για τη μελέτη προηγμένων συστημάτων αυτοματισμού ευφών δικτύων για εκπαιδευτικούς

σκοπούς υλοποιήθηκε στο [173], όπου οι χρήστες μπορούσαν να ενσωματώσουν αλγορίθμους προστασίας και λύσεις αυτοματισμού (π.χ. προσαρμοστική προστασία). Στο [162] πραγματικά συστήματα αυτοματισμού συνδέθηκαν σε προσομοιωμένο φωτοβολταϊκό αντιστροφέα και προσομοιωμένο κύκλωμα R-L-C και πραγματοποιήθηκαν δοκιμές της προστασίας έναντι νησιδοποίησης για την εκπαίδευση του προσωπικού του εργαστηρίου. Προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο χωρίς σύνδεση πραγματικού εξοπλισμού (δηλαδή όχι HIL) χρησιμοποιήθηκε στο [172] για εργασίες φοιτητών σε θέματα ρύθμισης συχνότητας, ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς, ευστάθειας τάσης, μεταβατικής ευστάθειας και προτάθηκε στο [174] για εκπαίδευση σε μελέτες προστασίας σε πλήθος σεναρίων σφαλμάτων.

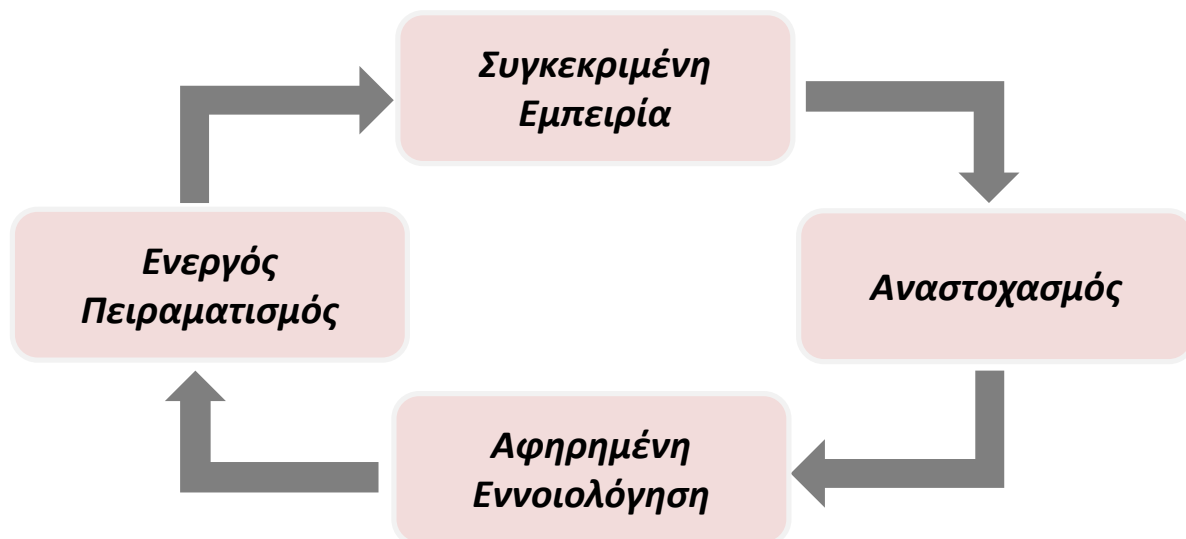
Από την άλλη, η αξιοποίηση της μεθόδου PHIL για εκπαιδευτικούς σκοπούς δεν έχει ακόμα διερευνηθεί, εφόσον είναι νεότερη και πιο πολύπλοκη μέθοδος από την CHIL (ανάγκη χρήσης ενισχυτή, ζητήματα ευστάθειας, ακρίβειας κ.α.).

6.3) Βιωματική εκπαίδευση

Η βιωματική/εμπειρική εκπαίδευση (experiential education) είναι μια προσέγγιση σύμφωνα με την οποία οι εκπαιδευτικοί εκθέτουν τους μαθητές τους άμεσα στο γνωστικό αντικείμενο και στη συνέχεια σε έναν αναστοχασμό πάνω στην εν λόγω εμπειρία, προκειμένου να αυξήσουν τις γνώσεις, να αναπτύξουν δεξιότητες, να αποσαφηνίσουν αξίες και να συνεισφέρουν στην κοινωνία. Σύμφωνα με τον φιλόσοφο και εκπαιδευτικό μεταρρυθμιστή John Dewey [175], η μάθηση δεν γίνεται μόνο μέσα από βιβλία και διαλέξεις, αλλά αφήνεται να αναδυθεί κατά την επεξεργασία των εμπειριών των ίδιων των μαθητών. Οι μαθητές ενθαρρύνονται να συμμετέχουν σε εργασίες, πειράματα κτλ και μέσα από αυτή τη διαδικασία οδηγούνται στη γνώση. Αυτή η εκπαιδευτική προσέγγιση έχει περιγραφεί ως «μάθηση μέσω της πράξης».

Το 1984 ο David Kolb [176] πρότεινε έναν κύκλο μάθησης τεσσάρων σταδίων για να περιγράψει τη διαδικασία μετασχηματισμού των εμπειριών. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, η αρχική συγκεκριμένη εμπειρία τίθεται σε αναστοχασμό, προκειμένου ο μαθητής να φτάσει σε μια αφηρημένη εννοιολόγηση, που αποτελεί το τρίτο στάδιο του κύκλου μάθησης. Αυτή η αφηρημένη έννοια εφαρμόζεται σε πραγματικές καταστάσεις της ζωής (ενεργός πειραματισμός), ώστε να προκύψει μια νέα συγκεκριμένη εμπειρία, η οποία τίθεται σε αναστοχασμό και ούτω καθεξής. Στο Σχήμα 6.1 παριστάνεται ο κύκλος βιωματικής μάθησης του Kolb. Η διαδικασία μάθησης μπορεί να ξεκινήσει από οποιοδήποτε στάδιο, αλλά προτείνεται η έναρξη από τη συγκεκριμένη εμπειρία.

Η συγκεκριμένη εμπειρία και η αφηρημένη εννοιολόγηση είναι δύο διαμετρικά αντίθετοι τρόποι σύλληψης της εμπειρίας του κόσμου. Επίσης, ο αναστοχασμός και ο ενεργός πειραματισμός αποτελούν δύο αντίθετους τρόπους μετασχηματισμού αυτής της σύλληψης, μέσω εσωτερικού στοχασμού ή μέσω εξωτερικού χειρισμού της πραγματικότητας αντίστοιχα [177][178]. Εφόσον ο ενεργός πειραματισμός αποτελεί και μία καινούργια συγκεκριμένη εμπειρία, προς αποφυγή επανάληψης του κύκλου, προτείνεται μία σπειροειδής πορεία.



Σχήμα 6.1. Ο κύκλος βιωματικής μάθησης τεσσάρων σταδίων του Kolb [176]

Η βιωματική εκπαίδευση έχει εφαρμοστεί αρκετές φορές στην εκπαίδευση μηχανικών. Για παράδειγμα, φοιτητές κατασκεύασαν σύστημα οδήγησης κινητήρα στα πλαίσια μαθήματος [179], μαθητές και φοιτητές κατασκεύασαν μικρές μονάδες ΑΠΕ (ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά) [B.4], εργαζόμενοι στη διαχείριση ΣΗΕ εκπαιδεύτηκαν μέσω κατάλληλου προσομοιωτή [180], πρακτικές δραστηριότητες προτάθηκαν στον τομέα των ΣΗΕ για την προσέλκυση μαθητών [181] και χρησιμοποιήθηκε παιχνίδι σε υπολογιστή για τη σχεδίαση συστήματος οδήγησης σκάφους που τροφοδοτείται από ΑΠΕ [182]. Ειδικότερα, το προαναφερόμενο μοντέλο μάθησης του Kolb εφαρμόστηκε στην εκμάθηση του προβλήματος της ροής φορτίου σε φοιτητές σε συνεργασία με τη βιομηχανία [183], στην επίλυση πραγματικού προβλήματος σε μεταφορικές ταινίες εργοστασίου [184] και στην εκμάθηση συστημάτων ελέγχου, όπου συνδυάζονται εργαστηριακές ασκήσεις με εικονικό και απομακρυσμένο εργαστήριο [185]. Επίσης, αντίστοιχες δραστηριότητες υλοποιούνται στα [186][187] κ.α.

6.4) Εκπαιδευτικοί στόχοι, επιλεγμένα θέματα και μεθοδολογία

Οι εργαστηριακές ασκήσεις γίνονται στο πλαίσιο βασικού προπτυχιακού μαθήματος με θέμα την Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (Ασύμμετρες και Μεταβατικές Καταστάσεις) της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ. Οι βασικοί εκπαιδευτικοί στόχοι των εργαστηριακών ασκήσεων είναι:

- Η κατανόηση βασικών αρχών της λειτουργίας των ΣΗΕ.
- Η κατανόηση σημαντικών σύγχρονων θεμάτων που προκύπτουν από την ενσωμάτωση ΔΠ: τεχνικές προκλήσεις, οφέλη και προοπτικές.
- Η εξοικείωση με πραγματικό εξοπλισμό, η λήψη μετρήσεων και οι χειρισμοί ελέγχου.

Για την επίτευξη αυτών των στόχων, οι εργαστηριακές ασκήσεις ξεκινούν από τη λειτουργία των παραδοσιακών ΣΗΕ και σταδιακά ενσωματώνονται θέματα που σχετίζονται

με τη ΔΠ, προκειμένου οι φοιτητές να κατανοήσουν τη μετάβαση από το παραδοσιακό σύστημα στο πιο πολύπλοκο αποκεντρωμένο περιβάλλον. Η επιλογή των θεμάτων των εργαστηριακών ασκήσεων περιγράφεται στη συνέχεια.

Στις διαλέξεις των βασικών μαθημάτων οι φοιτητές διδάσκονται βασικές αρχές της λειτουργίας των ΣΗΕ όπως: πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας (σύγχρονες γεννήτριες - στατισμός), ρύθμιση τάσης (π.χ. πυκνωτές, ΣΑΤΥΦ) και ανάλυση βραχυκυκλωμάτων (συμπεριφορά σύγχρονων γεννητριών και κινητήρων/γεννητριών επαγωγής, ασύμμετρες συνθήκες κ.α.). Οι προκλήσεις της ενσωμάτωσης ΔΠ έχουν επιφανειακά εξεταστεί στα βασικά μαθήματα, ενώ διδάσκονται αναλυτικά σε επόμενα μαθήματα επιλογής. Στις εργαστηριακές ασκήσεις, οι φοιτητές έρχονται σε επαφή με τα θέματα ενσωμάτωσης ΔΠ άμεσα στο εργαστήριο (συγκεκριμένη εμπειρία), χωρίς προηγούμενη σε βάθος θεωρητική γνώση. Ειδικότερα, η ανύψωση της τάσης ως βασική τεχνική πρόκληση για την ενσωμάτωση ΔΠ στα αγροτικά δίκτυα διανομής, η συνεισφορά της ΔΠ σε βραχυκυκλώματα και η λειτουργία των μικροδικτύων είναι θέματα ιδιαίτερου ενδιαφέροντος, δεδομένης της λειτουργίας αρκετών μη διασυνδεδεμένων μεσαίου και μικρού μεγέθους νησιών στην Ελλάδα.

Σε αυτό το πλαίσιο επιλέγονται τέσσερα θέματα για τις εργαστηριακές ασκήσεις:

- i) Παράλληλη λειτουργία σύγχρονων γεννητριών – παράλληλη λειτουργία με ΔΠ
- ii) Ρύθμιση της τάσης σε δίκτυα διανομής – συνεισφορά της ΔΠ
- iii) Μελέτες βραχυκυκλωμάτων – συνεισφορά μονάδων ΔΠ που συνδέονται μέσω ηλεκτρονικών ισχύος
- iv) Λειτουργία και έλεγχος μικροδικτύου

Η προσέγγιση που εφαρμόζεται παρέχει εμπειρία χρήσης εξοπλισμού στους φοιτητές σε συνδυασμό με τη βιωματική μέθοδο τεσσάρων σταδίων του κύκλου του Kolb, όπου είναι εφικτό. Οι τέσσερις εργαστηριακές ασκήσεις ομαδοποιούνται σε δύο ενότητες με διάρκεια 50 λεπτών η κάθε μία. Οι φοιτητές χωρίζονται σε οκτώ ομάδες των πέντε ή έξι φοιτητών και κατά τη διάρκεια μίας εργαστηριακής ενότητας η κάθε ομάδα χρησιμοποιεί διαδοχικά τους δύο πάγκους εργασίας, χάρη στη διπλή διάταξη PHIL (που περιγράφεται στην παράγραφο 6.5).

Μετά από κάθε πείραμα (συγκεκριμένη εμπειρία) τίθενται κατάλληλες ερωτήσεις στους φοιτητές, λαμβάνοντας υπόψη τις υπάρχουσες γνώσεις τους (αναστοχασμός). Καθοδηγούμενες συζητήσεις με τους φοιτητές ή απευθείας διδασκαλία, όταν κρίνεται αναγκαίο, οδηγούν σε νέες έννοιες (αφηρημένη εννοιολόγηση). Σε αυτή τη βάση, πραγματοποιούνται νέα πειράματα (ενεργός πειραματισμός και νέα συγκεκριμένη εμπειρία). Οι αναφορές προς συμπλήρωση που δίνονται στο τέλος της εργαστηριακής ενότητας έχουν στόχο να συλλογιστούν οι φοιτητές πάνω στην εργαστηριακή εμπειρία (αναστοχασμός).

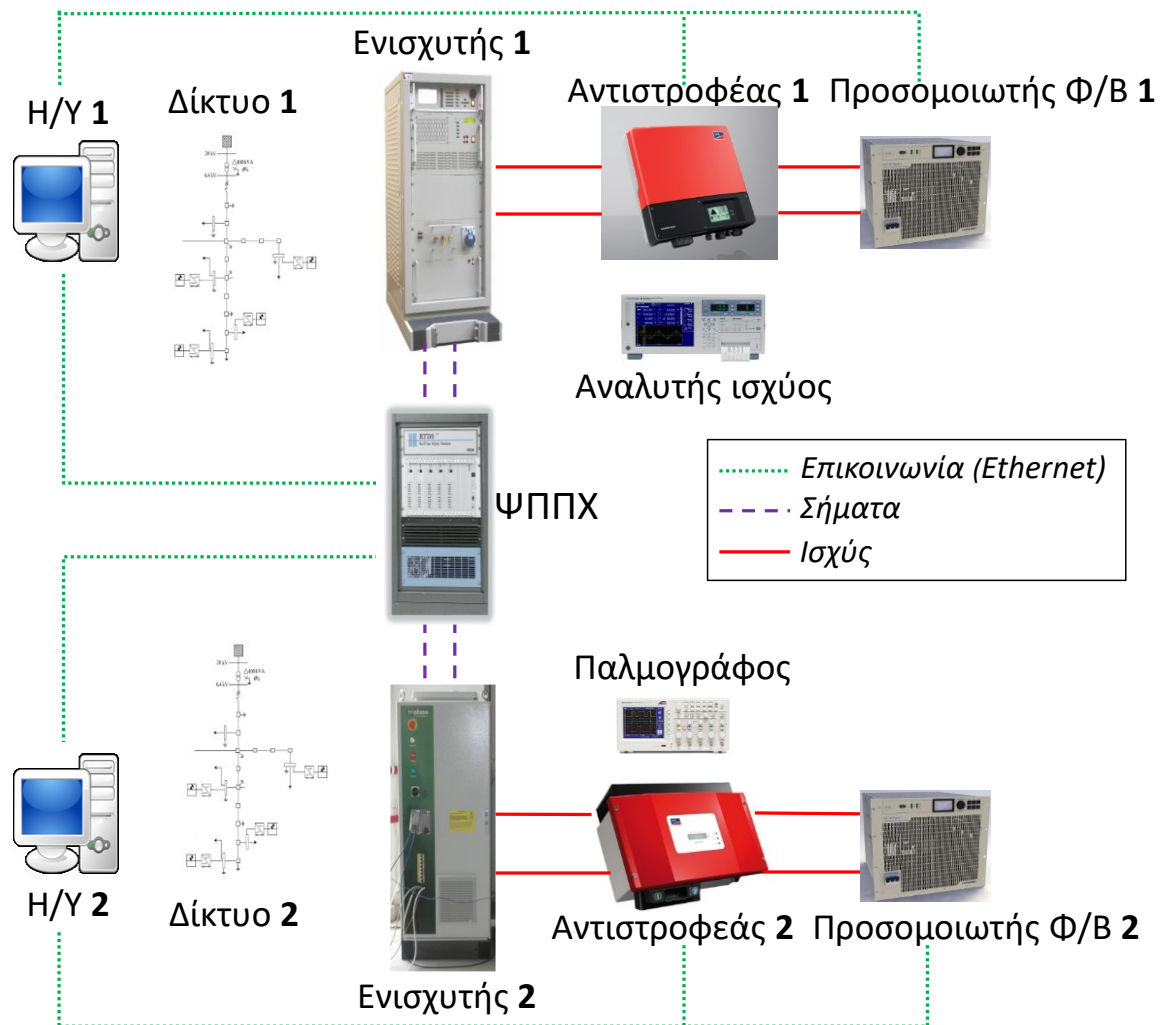
Σημειώνεται πως δεν ισχυριζόμαστε ότι η βιωματική εκπαίδευση μπορεί να αντικαταστήσει τις διαλέξεις στο αμφιθέατρο, αλλά μπορεί κάλλιστα να συμπληρώσει και να υποστηρίξει την εκπαιδευτική διαδικασία.

6.5) Διπλή διάταξη PHIL για χρήση εξοπλισμού από τους φοιτητές

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στα PHIL πειράματα στο εργαστήριο ΣΗΕ του ΕΜΠ περιγράφηκε στην παράγραφο 4.2. Στις εργαστηριακές ασκήσεις χρησιμοποιούνται ο ΨΠΠΧ, ο διακοπτόμενος ενισχυτής, ο γραμμικός ενισχυτής, αντιστροφείς φωτοβολταϊκών και συσσωρευτών, δύο προσομοιωτές φωτοβολταϊκών, ομοίωμα γραμμής διανομής, φορτία καθώς και παλμογράφος και αναλυτής ισχύος.

Η σύνδεση προσομοιωμένου και φυσικού συστήματος γίνεται ενισχύοντας την τάση ενός ζυγού του προσομοιωμένου συστήματος και μετρώντας το ρεύμα του φυσικού συστήματος (τοπολογία ιδανικού μετασχηματιστή που περιγράφηκε στην παράγραφο 2.5). Για την επίτευξη ευστάθειας εφαρμόζεται βαθυπερατό φίλτρο στο ρεύμα ανατροφοδότησης ή/και η προτεινόμενη μέθοδος μετατόπισης σύνθετης αντίστασης (στην παράγραφο 6.6.2). Σημειώνεται ότι η κατανόηση ειδικών ζητημάτων που σχετίζονται με τη PHIL μέθοδο από τους φοιτητές δεν αποτελεί στόχο των εργαστηριακών ασκήσεων. Παρόλα αυτά, εξηγείται εν συντομία η μέθοδος διασύνδεσης (δηλαδή ενίσχυση της τάσης και μέτρηση του ρεύματος).

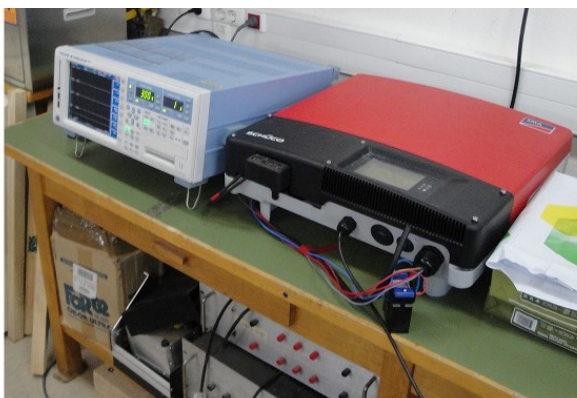
Η μετάβαση από ένα εργαστήριο όπου πραγματοποιείται απλή επίδειξη πειραμάτων, σε εργαστήριο που επιτρέπει χειρισμούς από τους φοιτητές, περιγράφεται στη συνέχεια. Εφόσον το εργαστήριο διαθέτει δύο ενισχυτές ισχύος είναι εφικτή η εκτέλεση ενός PHIL πειράματος με δύο φυσικά συστήματα που συνδέονται σε διαφορετικούς ζυγούς του ίδιου προσομοιωμένου συστήματος, ή δύο ανεξάρτητων PHIL πειραμάτων, όπου το καθένα διαθέτει το δικό του προσομοιωμένο και φυσικό σύστημα. Για εκπαιδευτικούς σκοπούς επιλέγεται η δεύτερη διάταξη, καθώς επιτρέπει την ταυτόχρονη εκτέλεση δύο ανεξάρτητων πειραμάτων. Εκτός από τη χρήση δύο ενισχυτών και δύο φυσικών συστημάτων (αντιστροφέων φωτοβολταϊκών), είναι απαραίτητη η εκτέλεση δύο ανεξάρτητων μοντέλων δικτύου στον ίδιο ΨΠΠΧ και ο έλεγχος από δύο υπολογιστές. Η διπλή διάταξη PHIL απεικονίζεται στο Σχήμα 6.2. Δύο ανεξάρτητοι προσομοιωτές φωτοβολταϊκών συνδέονται στη DC πλευρά των φωτοβολταϊκών αντιστροφέων, εφόσον η ενεργός ισχύς των φωτοβολταϊκών πρέπει να ελέγχεται από διαφορετικούς υπολογιστές. Χρησιμοποιούνται σύγχρονοι φωτοβολταϊκοί αντιστροφείς με προηγμένες λειτουργίες, που παρέχουν πρόσβαση στον χρήστη (π.χ. για να στείλει εντολή αέργου ισχύος, περικοπής ενεργού ισχύος, να ορίσει συγκεκριμένη χαρακτηριστική καμπύλη) μέσω λογισμικού του κατασκευαστή. Ο εξοπλισμός εν λειτουργία και οι δύο πάγκοι εργασίας παριστάνονται στα Σχήματα 6.3 και 6.4 αντίστοιχα.



Σχήμα 6.2. Εργαστηριακή υποδομή για την εκπαίδευση φοιτητών μέσω εμπειρίας χρήσης: διπλή διάταξη PHIL



Σχήμα 6.3. Εκτέλεση των εργαστηριακών ασκήσεων: διακοπτόμενος ενισχυτής, ομοίωμα γραμμής, γραμμικός ενισχυτής, φορτίο, ΨΠΠΧ, ψηφιακός ηλεκτρονόμος (αριστερά προς τα δεξιά)



Πάγκος εργασίας 1



Πάγκος εργασίας 2

Σχήμα 6.4. Δύο πάγκοι εργασίας: αντιστροφέας, παλμογράφος ή αναλυτής ισχύος και υπολογιστής (σύνδεση με τον ΨΠΠΧ, έλεγχος του προσομοιωτή Φ/Β και του αντιστροφέα)

6.6) Εργαστηριακές ασκήσεις

6.6.1) Παράλληλη λειτουργία σύγχρονων γεννητριών – παράλληλη λειτουργία με ΔΠ

Στον ΨΠΠΧ έχει μοντελοποιηθεί απλό δίκτυο που αποτελείται από δύο σύγχρονες γεννήτριες, γραμμές διανομής και φορτίο. Οι φοιτητές μεταβάλλουν την ενεργό ισχύ του φορτίου στο λογισμικό του ΨΠΠΧ και μετρούν την ενεργό ισχύ της κάθε σύγχρονης γεννήτριας και τη συχνότητα λειτουργίας (στη μόνιμη κατάσταση καθώς και την ελάχιστη ή μέγιστη τιμή).

Στη συνέχεια ένας πραγματικός φωτοβολταϊκός αντιστροφέας αντικαθιστά τη μία σύγχρονη γεννήτρια και συνδέεται στο προσομοιωμένο σύστημα στον ΨΠΠΧ. Πραγματοποιούνται οι PHIL δοκιμές που περιγράφηκαν στην παράγραφο 5.5 (σε πιο απλοϊκή μορφή), χρησιμοποιώντας την εργαστηριακή διάταξη του Σχήματος 5.41. Οι φοιτητές αυξάνουν την ηλιακή ακτινοβολία στο λογισμικό του προσομοιωτή φωτοβολταϊκών (π.χ. σε βήματα των 100 W/m^2) και παρατηρούν την αύξηση της συχνότητας του συστήματος (συγκεκριμένη εμπειρία). Ταυτόχρονα, στο ίδιο λογισμικό παρατηρούν τη μεταβολή του διαγράμματος I-V των προσομοιωμένων φωτοβολταϊκών πλαισίων και την ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) που πραγματοποιεί ο αντιστροφέας. Εφαρμόζεται μάθηση βασισμένη σε

προβλήματα (problem based learning) χρησιμοποιώντας το «πρόβλημα των 50.2 Hz» που παρουσιάστηκε το 2011 στη Γερμανία. Σύμφωνα με τα προηγούμενα πρότυπα, η ΔΠ έπρεπε να αποσυνδέεται σε τιμές συχνότητας άνω των 50.2 Hz που θα μπορούσε να οδηγήσει σε ταυτόχρονη αποσύνδεση αρκετών GW φωτοβολταϊκής παραγωγής (παράγραφος 3.4.3). Οι φοιτητές καλούνται να λύσουν αυτό το πρόβλημα και να σχολιάσουν με ποιο τρόπο η ΔΠ μπορεί να συμμετέχει στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας (αναστοχασμός). Μέσα από συζήτηση, οδηγούνται στη λύση της εισαγωγής μίας χαρακτηριστικής στατισμού $P(f)$ στον φωτοβολταϊκό αντιστροφέα κατ' αναλογία με τη συμβατική παραγωγή (αφηρημένη εννοιολόγηση).

Εν συνεχεία, ενεργοποιείται η χαρακτηριστική στατισμού $P(f)$ του φωτοβολταϊκού αντιστροφέα. Η ενεργός ισχύς του προσομοιωμένου φορτίου μειώνεται βηματικά και ξανά το φορτίο κατανέμεται μεταξύ της σύγχρονης γεννήτριας και της ΔΠ (ενεργός πειραματισμός). Η ενεργός ισχύς του φωτοβολταϊκού αντιστροφέα με και δίχως $P(f)$ έλεγχο παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.42 (περιπτώσεις (i) και (ii)) και η βελτιωμένη συχνότητα στο Σχήμα 5.43. Γίνεται κατανοητό πως σε περιπτώσεις χαμηλού φορτίου και υψηλής παραγωγής από ΔΠ, η ενεργός ισχύς της ΔΠ ελέγχεται χωρίς την ανάγκη χρήσης τηλεπικοινωνιακού δικτύου.

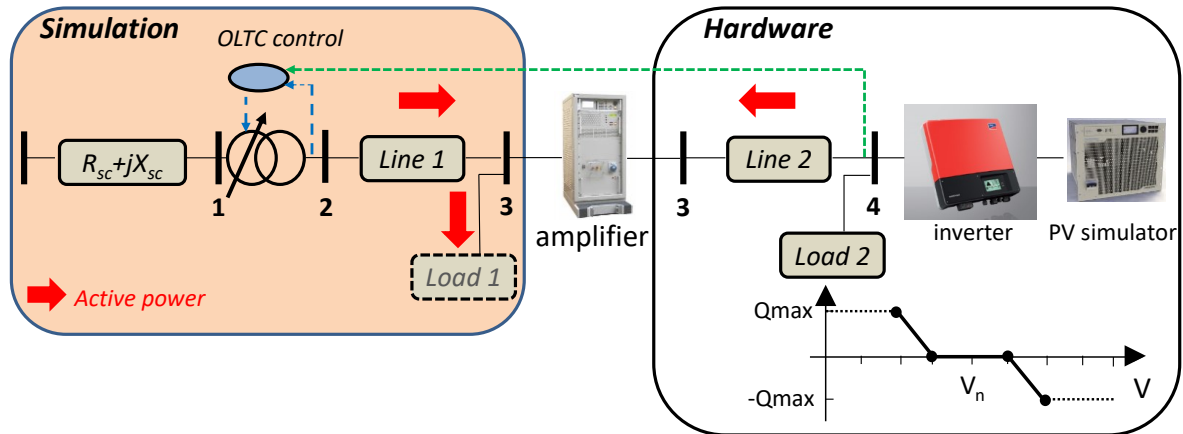
Επιπλέον, εξηγείται η δυνατότητα μονάδων ΔΠ και αποθήκευσης, που συνδέονται στο δίκτυο μέσω ηλεκτρονικών ισχύος, να αντισταθμίσουν τη μειωμένη αδράνεια των ΣΗΕ εξαιτίας της αυξημένης ενσωμάτωσης ΔΠ. Στον ΨΠΠΧ προσομοιώνεται μονάδα αποθήκευσης που παρέχει εικονική αδράνεια και η ενεργός ισχύς της κατά τη PHIL δοκιμή φαίνεται στο Σχήμα 5.45 (περίπτωση (iv)). Η βελτιωμένη συχνότητα στη μεταβατική κατάσταση φαίνεται στο Σχήμα 5.43.

Τα πειράματα έχουν σχεδιαστεί ώστε οι φοιτητές να έχουν ενεργό συμμετοχή π.χ. ενεργοποιώντας και θέτοντας παραμέτρους της $P(f)$ χαρακτηριστικής του φωτοβολταϊκού αντιστροφέα μέσω λογισμικού του κατασκευαστή, μεταβάλλοντας την ηλιακή ακτινοβολία στον πραγματικό προσομοιωτή φωτοβολταϊκών και το φορτίο στον ΨΠΠΧ. Επίσης, θα μπορούσαν να πειραματιστούν με διαφορετικά κέρδη εικονικής αδράνειας (k_i) (σχέση (3.29)). Επιπλέον, μετρούν την ενεργό ισχύ του πραγματικού φωτοβολταϊκού αντιστροφέα και τη συχνότητα του συστήματος μέσω αναλυτή ισχύος, καθώς και την ενεργό ισχύ της σύγχρονης γεννήτριας και τη συχνότητα στον ΨΠΠΧ. Στο τέλος της άσκησης, καλούνται να συμπληρώσουν μία αναφορά χρησιμοποιώντας τις πειραματικές μετρήσεις. Ζητείται να υπολογίσουν για τη συγκεκριμένη περίπτωση (σύγχρονη γεννήτρια και φωτοβολταϊκός αντιστροφέας με $P(f)$ χαρακτηριστική) την κατανομή φορτίου και τη συχνότητα στη μόνιμη κατάσταση και να τα συγκρίνουν με τα πειραματικά αποτελέσματα. Τίθενται επιπλέον ερωτήσεις, για παράδειγμα να εξηγήσουν γιατί ο έλεγχος στατισμού εφαρμόζεται σε μονάδες ΔΠ κυρίως για υπερσυχνότητα και όχι τόσο συχνά για υποσυχνότητα κ.α.

6.6.2) Ρύθμιση της τάσης σε δίκτυα διανομής – συνεισφορά της ΔΠ

Οι φοιτητές είναι ήδη εξοικειωμένοι με τη συμβατική ρύθμιση τάσης, κάνοντας χρήση πυκνωτών, ΣΑΤΥΦ κ.α, καθώς και με την επίδραση της ενεργού και αέργου ισχύος του φορτίου στην τάση, όπως φαίνεται στη σχέση (3.3).

Η τοπολογία του PHIL πειράματος που χρησιμοποιήθηκε στην εργαστηριακή άσκηση παριστάνεται στο Σχήμα 6.5. Πραγματικός φωτοβολταϊκός αντιστροφέας και φορτίο συνδέονται σε ασθενές δίκτυο διανομής που τροφοδοτείται από μετασχηματιστή εξοπλισμένο με ΣΑΤΥΦ. Ο μετασχηματιστής με ΣΑΤΥΦ προσομοιώνεται στον ΨΠΠΧ, εφόσον δεν είναι διαθέσιμος στο εργαστήριο. Επιπλέον φορτίο εισάγεται στην προσομοίωση πραγματικού χρόνου στον ζυγό 3.



Σχήμα 6.5. Τοπολογία PHIL πειράματος ρύθμισης τάσης από ΣΑΤΥΦ και ΔΠ

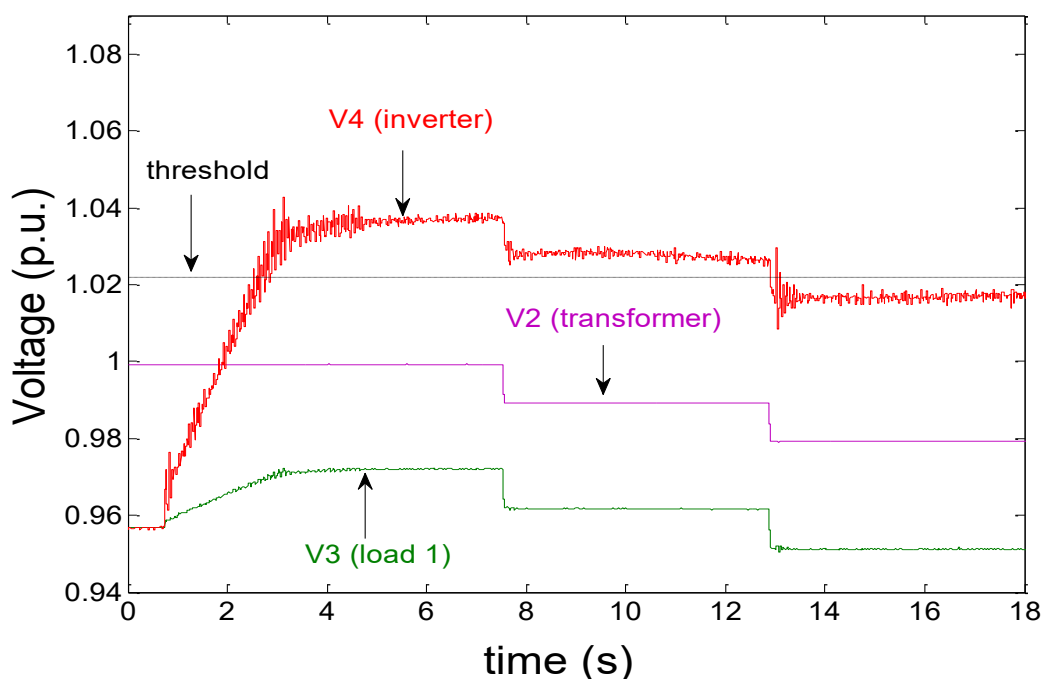
Αρχικά εφαρμόζεται συμβατικός έλεγχος τάσης δίχως σύνδεση του φωτοβολταϊκού αντιστροφέα και του προσομοιωμένου φορτίου (στον ζυγό 3). Ο ελεγκτής του ΣΑΤΥΦ λειτουργεί με αντιστάθμιση πτώσης τάσης, δηλαδή κάνει εκτίμηση της τάσης στο άκρο της γραμμής με βάση τη μετρούμενη τάση και το ρεύμα στο δευτερεύον του μετασχηματιστή. Το πραγματικό φορτίο (στον ζυγό 4) αυξάνεται σταδιακά, οδηγώντας σε μείωση της τάσης κάτω από το κατώφλι του ΣΑΤΥΦ, οπότε το ΣΑΤΥΦ αλλάζει λήψη.

Στη συνέχεια, ο πραγματικός φωτοβολταϊκός αντιστροφέας συνδέεται στο άκρο της γραμμής και το ΣΑΤΥΦ απενεργοποιείται. Οι φοιτητές ελέγχουν την ηλιακή ακτινοβολία στο λογισμικό του προσομοιωτή φωτοβολταϊκών. Έτσι, αυξάνουν σταδιακά την ενεργό ισχύ των φωτοβολταϊκών στην ονομαστική τιμή, διατηρώντας το φορτίο χαμηλό (ζυγός 4), και παρατηρούν την ανύψωση της τάσης στους ακροδέκτες του αντιστροφέα (συγκεκριμένη εμπειρία). Οι φοιτητές προσπαθούν να κατανοήσουν και να λύσουν αυτό το πρόβλημα, που αποτελεί μία από τις κύριες προκλήσεις για την ευρεία ενσωμάτωση ΔΠ στα αγροτικά δίκτυα διανομής (αναστοχασμός).

Επεκτείνοντας τη σχέση (3.3) ώστε να περιλαμβάνει και παραγωγή, οι φοιτητές κατανοούν την επίδραση της απορρόφησης αέργου ισχύος από τον φωτοβολταϊκό αντιστροφέα στην ανύψωση της τάσης (αφηρημένη εννοιολόγηση). Στέλνουν εντολές απορρόφησης αέργου ισχύος στον αντιστροφέα (μέχρι το ελάχιστο $\cos\phi=0.8$) μέσω λογισμικού και παρακολουθούν την τάση επιβεβαιώνοντας την ορθότητα της σχέσης (ενεργός πειραματισμός). Στη συνέχεια, ενεργοποιείται $Q(V)$ χαρακτηριστική (Σχήμα 3.6) στον αλγόριθμο ελέγχου του αντιστροφέα, όπως απαιτείται από τα πρόσφατα πρότυπα, και το πείραμα επαναλαμβάνεται με παρόμοια αποτελέσματα. Με αυτό τον τρόπο υπογραμμίζεται η ανάγκη παροχής επικουρικών υπηρεσιών από τις μονάδες ΔΠ (όπως και στην προηγούμενη παράγραφο). Επιπλέον λύσεις συζητιούνται, που μπορούν να προκύψουν

επίσης από τη σχέση (3.3) (αναβάθμιση του δικτύου, περικοπή ενεργού ισχύος της ΔΠ, αποθήκευση).

Μία άλλη σειρά πειραμάτων περιλαμβάνει τη χρήση του ΣΑΤΥΦ. Το ΣΑΤΥΦ ενεργοποιείται και ρυθμίζει την τάση στο άκρο της γραμμής, ενώ ο φωτοβολταϊκός αντιστροφέας λειτουργεί με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος (το φορτίο του ζυγού 4 παραμένει χαμηλό). Μεγάλο φορτίο συνδέεται στον ζυγό 3 και η προκύπτουσα ροή ενεργού ισχύος φαίνεται στο Σχήμα 6.5 (η άεργος ισχύς δεν παρουσιάζεται για λόγους απλότητας καθώς έχει μικρή επίδραση σε αυτό το πείραμα). Προφανώς η προαναφερόμενη μέθοδος αντιστάθμισης πτώσης τάσης δεν είναι ικανοποιητική, εξαιτίας της παρουσίας του φορτίου στον ζυγό 3, επομένως μετριέται η τάση στο άκρο της γραμμής και αποστέλλεται στον ελεγκτή του ΣΑΤΥΦ (μετριέται η τάση του πραγματικού αντιστροφέα, υποβιβάζεται και εισάγεται στον ΨΠΠΧ). Το Σχήμα 6.6 δείχνει πως το ΣΑΤΥΦ καταφέρνει να περιορίσει την ανύψωση της τάσης στον ζυγό του φωτοβολταϊκού αντιστροφέα (ζυγός 4), ωστόσο προκαλεί επιπλέον μείωση της τάσης του φορτίου (ζυγός 3). Έτσι, υπογραμμίζεται η ανάγκη συνεργασίας των υφιστάμενων συσκευών ρύθμισης τάσης (π.χ. ΣΑΤΥΦ) με μοντέρνες συσκευές (π.χ. αντιστροφείς φωτοβολταϊκών και αποθήκευσης) και γίνεται αναφορά στον συντονισμένο έλεγχο τάσης (παράγραφος 3.2.1). Πιο σύνθετες αλληλεπιδράσεις μεταξύ ΣΑΤΥΦ και ΔΠ [Α.4] μπορούν να εξεταστούν αν κρίνεται χρήσιμο.



Σχήμα 6.6. Η ενεργός ισχύς των Φ/Β αυξάνει την τάση στο ζυγό του αντιστροφέα (V_4), η οποία περιορίζεται από το ΣΑΤΥΦ, μειώνοντας όμως επιπλέον την τάση του φορτίου (V_3), (PHIL πείραμα)

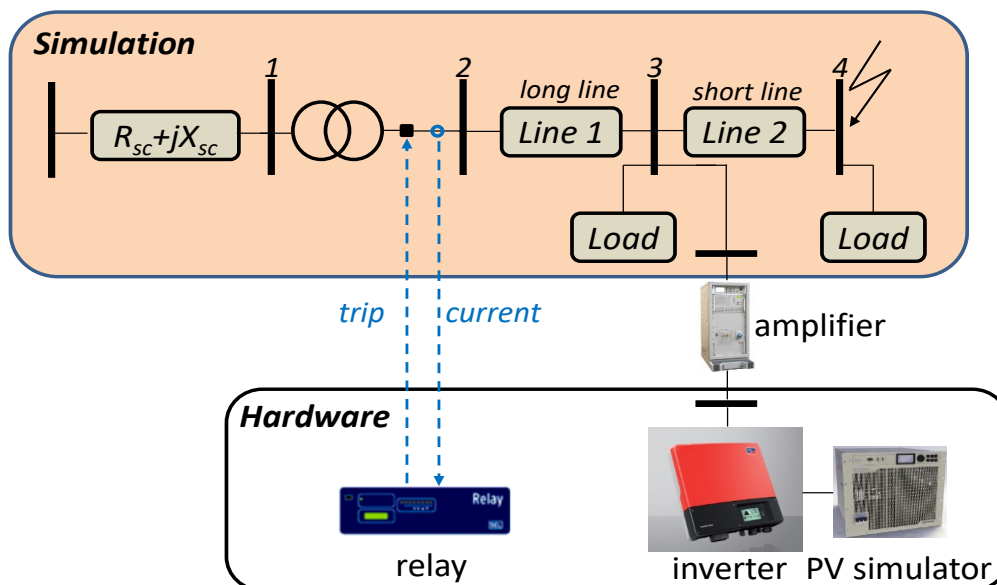
Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων οι φοιτητές μετρούν την ενεργό και άεργο ισχύ, καθώς και την τάση και το ρεύμα (rms τιμές, κυματομορφές και διανυσματικό διάγραμμα για να φανεί η μετατόπιση φάσης και αλλαγές στο πλάτος του ρεύματος) του πραγματικού

φωτοβολταϊκού αντιστροφέα. Επίσης, παρακολουθούν την τάση του μετασχηματιστή και του φορτίου, τον αριθμό των αλλαγών λήψης, τη χρονική καθυστέρηση του ΣΑΤΥΦ κ.α. στο λογισμικό του ΨΠΠΧ. Στην αναφορά ζητείται να υπολογίσουν την επίδραση της ενεργού και αέργου ισχύος στην τάση για διαφορετικούς λόγους R/X των γραμμών (XT, MT, YT) μεταξύ άλλων θεμάτων. Με αυτό τον τρόπο, τονίζεται η εντονότερη επίδραση της ενεργού ισχύος στην τάση σε δίκτυα με υψηλό λόγο R/X (π.χ. υπόγεια καλώδια XT), σε αντίθεση με δίκτυα με χαμηλό λόγο R/X (π.χ. εναέριες γραμμές YT), όπου η τάση επηρεάζεται κυρίως από την άεργο ισχύ (παράγραφος 3.2).

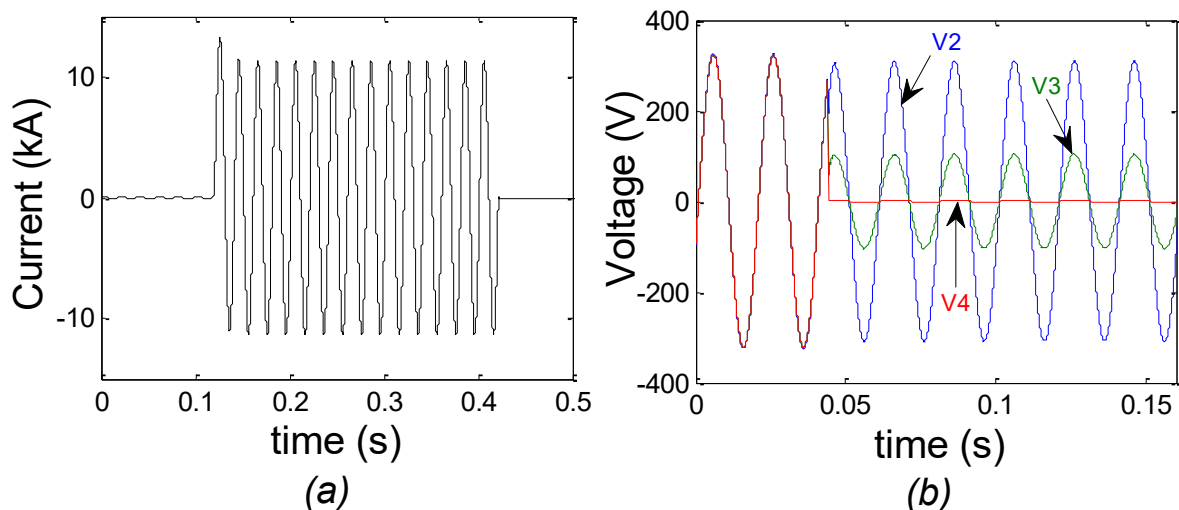
6.6.3) Μελέτες βραχυκυκλωμάτων – συνεισφορά αντιστροφέων ΔΠ

Η εργαστηριακή άσκηση επικεντρώνεται στη μελέτη της συμπεριφοράς μονάδων ΔΠ που συνδέονται μέσω ηλεκτρονικών ισχύος (π.χ. φωτοβολταϊκών, ανεμογεννητριών με σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών) κατά τη διάρκεια σφαλμάτων. Παράλληλα μελετώνται θέματα της κλασικής ανάλυσης βραχυκυκλωμάτων.

Καταρχάς, οι φοιτητές εφαρμόζουν συμμετρικά βραχυκυκλώματα σε διαφορετικούς ζυγούς του προσομοιωμένου δικτύου διανομής XT του Σχήματος 6.7 και παρακολουθούν το προκύπτον ρεύμα. Πραγματικός ψηφιακός ηλεκτρονόμος ελέγχει τον προσομοιωμένο διακόπτη που βρίσκεται στο δευτερεύον του μετασχηματιστή [129][188]. Οι φοιτητές παρατηρούν πως όταν η θέση του σφάλματος απομακρύνεται από τον μετασχηματιστή, το ρεύμα βραχυκύκλωσης από το ανάντη δίκτυο μειώνεται (εξαιτίας της μεγαλύτερης ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης) και ο χρόνος απόκρισης του πραγματικού ηλεκτρονόμου αυξάνεται. Επίσης, παρακολουθείται η τάση στους ζυγούς στη διάρκεια των βραχυκυκλωμάτων. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 6.8a παριστάνεται το ρεύμα που ρέει στο δευτερεύον του μετασχηματιστή σε βραχυκύκλωμα στον ζυγό 2, όπου φαίνεται το άνοιγμα του διακόπτη από τον ψηφιακό ηλεκτρονόμο. Στο Σχήμα 6.8b φαίνονται οι τάσεις στους ζυγούς στη διάρκεια βραχυκυκλώματος στον ζυγό 4.



Σχήμα 6.7. Τοπολογία για δοκιμές βραχυκυκλωμάτων σε αντιστροφέα ΔΠ και λειτουργίας ψηφιακού ηλεκτρονόμου

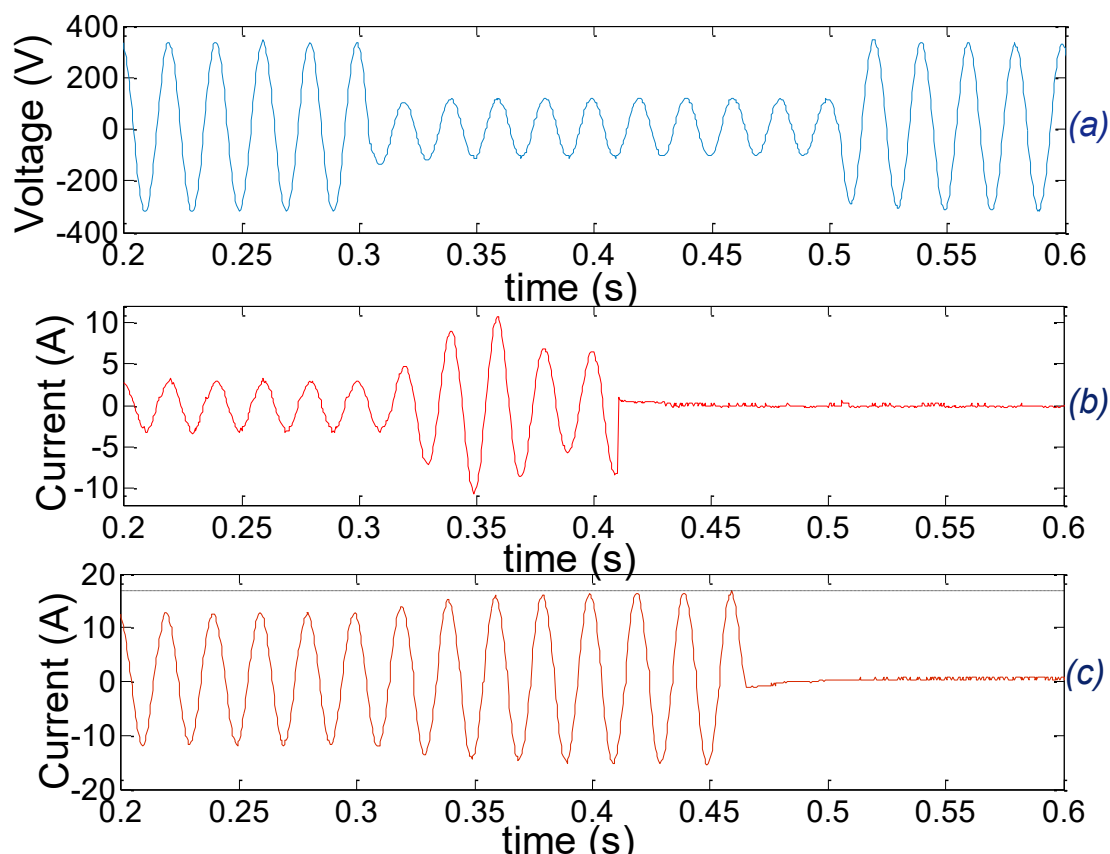


Σχήμα 6.8. Ρεύμα στη διάρκεια βραχυκυκλώματος στον ζυγό 2 και άνοιγμα του διακόπτη (a). Τάσεις στους ζυγούς 2,3,4 στη διάρκεια βραχυκυκλώματος στον ζυγό 4 (b)

Πριν τη σύνδεση του πραγματικού φωτοβολταϊκού αντιστροφέα στο δίκτυο σε PHIL διάταξη, ζητείται από τους φοιτητές να επιλέξουν τη θέση του βραχυκυκλώματος και του φωτοβολταϊκού αντιστροφέα, (επιλογή μεταξύ των ζυγών 2,3,4 του Σχήματος 6.7) ώστε η τάση του αντιστροφέα να μειωθεί κατά το βραχυκύκλωμα περίπου στο 1/3 της τιμής προ-σφάλματος. Ο φωτοβολταϊκός αντιστροφέας δεν λαμβάνεται υπόψη σε αυτόν τον προσεγγιστικό υπολογισμό, εφόσον η ονομαστική του ισχύς είναι μικρή και η συνεισφορά του στο βραχυκύκλωμα είναι πολύ μικρότερη από τη συνεισφορά του ανάντη δικτύου. Ομοίως, τα φορτία δεν λαμβάνονται υπόψη. Οπότε, ο πραγματικός αντιστροφέας συνδέεται στο προσομοιωμένο δίκτυο στον ζυγό 3 και το βραχυκύκλωμα εφαρμόζεται στον ζυγό 4, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.7.

Ο πραγματικός φωτοβολταϊκός αντιστροφέας λειτουργεί σε χαμηλή ενεργό ισχύ πριν το σφάλμα και η συμπεριφορά του καταγράφεται σε παλμογράφο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.9b. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης παίρνει σχεδόν τριπλάσια τιμή από το ρεύμα προ σφάλματος, εξαιτίας της βύθισης της τάσης στο 1/3 της τιμής προ σφάλματος (συγκεκριμένη εμπειρία). Αυτό συμβαίνει γιατί ο αλγόριθμος ελέγχου των φωτοβολταϊκών αντιστροφέων είναι συνήθως σχεδιασμένος ώστε ο αντιστροφέας να διατηρεί σταθερή ενεργό ισχύ (και συντελεστή ισχύος) για σταθερή είσοδο στην DC πλευρά (αναστοχασμός). Το πείραμα επαναλαμβάνεται σε ονομαστική ισχύ. Το Σχήμα 6.9c δείχνει πως υπάρχει ένα όριο στο μέγιστο ρεύμα (περίπου 1.3 φορές το ονομαστικό ρεύμα) που δεν επιτρέπει μεγαλύτερη αύξηση (συγκεκριμένη εμπειρία). Συμπεραίνεται πως ο περιορισμός του ρεύματος (συνήθως κάτω από το διπλάσιο του ονομαστικού, ανάλογα με τον κατασκευαστή) ενσωματώνεται στον αλγόριθμο ελέγχου του αντιστροφέα, ώστε να τηρηθούν τα θερμικά όρια των διακοπτικών του στοιχείων (αφηρημένη εννοιολόγηση). Στη συνέχεια χρησιμοποιείται φωτοβολταϊκός αντιστροφέας διαφορετικού κατασκευαστή και το πείραμα επαναλαμβάνεται (ενεργός πειραματισμός). Παρατηρείται πως οι αντιστροφείς επιδεικνύουν εν μέρει διαφορετική συμπεριφορά κατά το βραχυκύκλωμα: σταδιακή αύξηση του ρεύματος μέχρι τη μέγιστη τιμή (Σχήμα 6.9c) ή ταχεία αύξηση του ρεύματος μέχρι τη

μέγιστη τιμή και στη συνέχεια σταδιακή μείωση. Έτσι, οι φοιτητές μαθαίνουν πως η συνεισφορά των μονάδων ΔΠ που συνδέονται μέσω ηλεκτρονικών ισχύος, εξαρτάται από την κατάσταση λειτουργίας του αντιστροφέα προ σφάλματος, τη βύθιση της τάσης στους ακροδέκτες του και τον συγκεκριμένο αλγόριθμο ελέγχου του (αφηρημένη εννοιολόγηση). Η συνήθης παραδοχή που εφαρμόζεται σε πρακτικούς υπολογισμούς, δηλαδή 1.5-2 φορές το ονομαστικό ρεύμα [189], δοκιμάζεται. Μια ενδιαφέρουσα ανάλυση της λειτουργίας αντιστροφέων ΔΠ κατά τη διάρκεια σφαλμάτων μπορεί να βρεθεί στο [190].

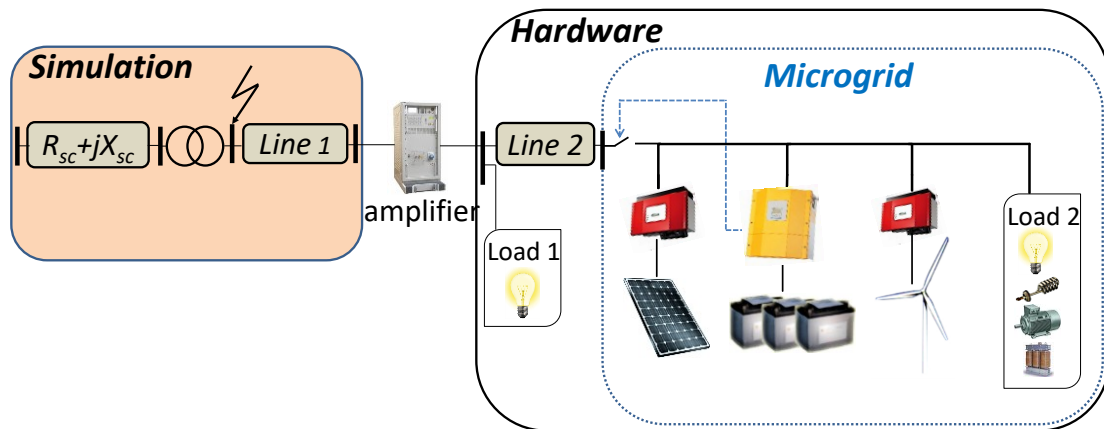


Σχήμα 6.9. Συμπεριφορά Φ/Β αντιστροφέα σε βραχυκύκλωμα: τάση ακροδεκτών (a), ρεύμα σε χαμηλή ισχύ (b) και ρεύμα σε ονομαστική ισχύ (c) (PHIL πειράματα)

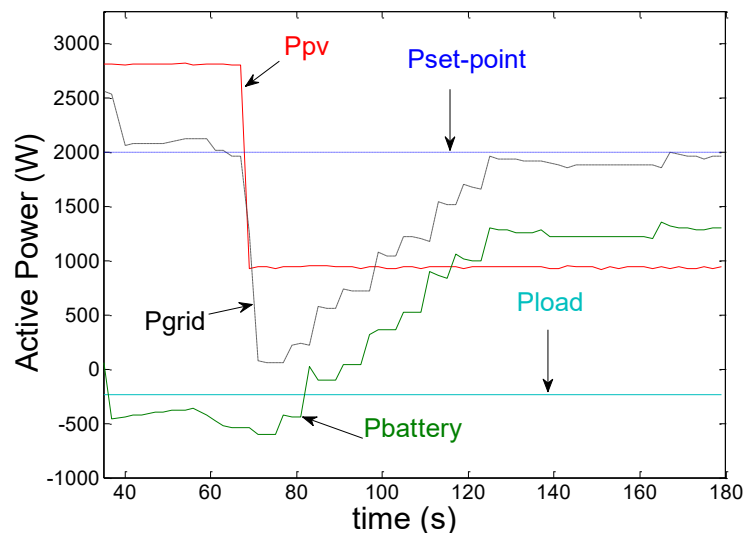
6.6.4) Λειτουργία και έλεγχος μικροδικτύου

Το εργαστηριακό μικροδίκτυο που περιγράφηκε συνοπτικά στην παράγραφο 4.2.2 χρησιμοποιείται στην εργαστηριακή άσκηση (Σχήμα 6.10). Καταρχάς, το μικροδίκτυο λειτουργεί διασυνδεδεμένο με το δίκτυο και οι φοιτητές παρακολουθούν την ενεργό ισχύ των φωτοβολταϊκών, της ανεμογεννήτριας, των συσσωρευτών και του φορτίου από το εργαστηριακό SCADA [191][B.7] (συγκεκριμένη εμπειρία). Τονίζεται ο κεντρικός ρόλος του συστήματος αποθήκευσης ως η πιο ελεγχόμενη μονάδα και συζητούνται πιθανές εφαρμογές όπως η εξισορρόπηση της παραγωγής από φωτοβολταϊκά ή ανεμογεννήτριες, ο περιορισμός της αιχμής του συστήματος, η συμμετοχή στη ρύθμιση τάσης, η λειτουργία ιδιοκατανάλωσης κτλ. Στο πείραμα θεωρείται πως ο διαχειριστής του δικτύου ή της αγοράς απαιτεί συγκεκριμένη ποσότητα ενεργού ισχύος από το μικροδίκτυο [192], ως ελεγχόμενη οντότητα, για τεχνικούς (π.χ. συμφόρηση, ρύθμιση τάσης) ή οικονομικούς λόγους [193]. Οι φοιτητές λαμβάνουν το ρόλο του διαχειριστή του μικροδικτύου που πρέπει να υλοποιήσει

την εντολή, ελέγχοντας το σύστημα αποθήκευσης και ενδεχομένως τα ελεγχόμενα φορτία. Με βάση μετρήσεις της ενεργού ισχύος των φωτοβολταϊκών, της ανεμογεννήτριας και του φορτίου του μικροδικτύου, οι φοιτητές υπολογίζουν την απαιτούμενη ενεργό ισχύ του αντιστροφέα συσσωρευτών (αναστοχασμός). Η εντολή ενεργού ισχύος υλοποιείται στον εμπορικό αντιστροφέα συσσωρευτών μέσω λογισμικού που έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο [130] (ενεργός πειραματισμός). Το Σχήμα 6.11 δείχνει την ενεργό ισχύ των επιμέρους συσκευών, καθώς και την ανταλλαγή ισχύος με το δίκτυο όταν λαμβάνεται η εντολή ($t = 35$ s), και οι συσσωρευτές αρχίζουν να απορροφούν ενεργό ισχύ. Στη συνέχεια, μειώνεται η ηλιακή ακτινοβολία στον προσομοιωτή φωτοβολταϊκών ($t = 67$ s) και οι συσσωρευτές περιορίζουν την απορρόφηση και στη συνέχεια παράγουν ενεργό ισχύ. Με βάση το πείραμα, υπογραμμίζεται η σημασία των διαφορετικών επιπέδων ελέγχου στα ευφυή δίκτυα (αφηρημένη εννοιολόγηση) και ο σημαντικός ρόλος των τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών.



Σχήμα 6.10. Τοπολογία πειραμάτων λειτουργίας μικροδικτύου



Σχήμα 6.11. Οι φοιτητές ελέγχουν την ενεργό ισχύ του αντιστροφέα συσσωρευτών για να υλοποιήσουν εντολή παραγωγής 2 kW από το μικροδίκτυο

Το μικροδίκτυο μπορεί να συνδεθεί σε PHIL διάταξη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.10, για την πραγματοποίηση πιο σύνθετων πειραμάτων. Ενδεικτικά, μπορεί να εφαρμοστεί βραχυκύκλωμα στον μετασχηματιστή, οπότε η βύθιση τάσης αναγκάζει το μικροδίκτυο να μεταβεί σε απομονωμένη λειτουργία, χωρίς όμως να διακοπεί η τροφοδοσία του τοπικού φορτίου (σε αντίθεση με το φορτίο εκτός του μικροδικτύου). Έτσι, επισημαίνεται η ικανότητα των μικροδικτύων να αυξάνουν την αξιοπιστία και να διατηρούν την τροφοδοσία κατά τη διάρκεια εξωτερικών διαταραχών και διακοπών της ηλεκτροδότησης. Σημειώνεται πως η PHIL διάταξη με όλο το μικροδίκτυο βρίσκεται υπό ανάπτυξη (επίλυση ζητημάτων ευστάθειας).

Τέλος, εξετάζεται η απομονωμένη λειτουργία του μικροδικτύου [B.8], όπου εξηγείται η δυνατότητα λειτουργίας του αντιστροφέα συσσωρευτών με έλεγχο στατισμού κατ' αναλογία με τις σύγχρονες γεννήτριες. Οι φοιτητές μαθαίνουν ότι απομονωμένα μικροδίκτυα εγκαθίστανται σε απομακρυσμένες τοποθεσίες, όπως αγροτικές κοινότητες σε αναπτυσσόμενες χώρες [B.2] κτλ.

6.7) Αξιολόγηση των εργαστηριακών ασκήσεων από τους φοιτητές

Για την αξιολόγηση των εργαστηριακών ασκήσεων από τους φοιτητές ετοιμάστηκαν ερωτηματολόγια (ακαδημαϊκό έτος 2015-2016). Οι ερωτήσεις 1 έως 6 αναφέρονται στην αξιολόγηση των ασκήσεων και οι ερωτήσεις 7 έως 10 σε γενικότερα ζητήματα. Οι φοιτητές καλούνται να δώσουν μια απάντηση από το 1 έως το 5 χρησιμοποιώντας την κλίμακα Likert:

1= Καθόλου, 2=Λίγο, 3= Μέτρια, 4= Πολύ, 5= Πάρα πολύ.

Επίσης, συμπεριλήφθηκαν δύο ανοιχτές ερωτήσεις για βελτιωτικές προτάσεις και γενικά σχόλια. Περίπου 50 φοιτητές παρακολούθησαν κάθε εργαστηριακή ενότητα. Τα ερωτηματολόγια δόθηκαν στους φοιτητές στο τέλος και των δύο εργαστηριακών ενοτήτων, οπότε παρελήφθησαν 95 ερωτηματολόγια (απάντησε το 96% των συμμετεχόντων). Οι ερωτήσεις και τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των απαντήσεων των φοιτητών παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1. Αναλυτικά τα αποτελέσματα ανά ερώτηση παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.12 έως 6.21.

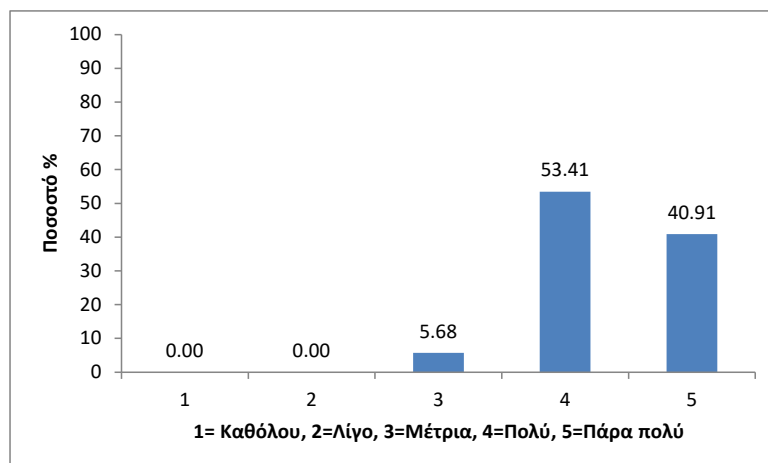
Οι φοιτητές έκριναν τις εργαστηριακές ασκήσεις συνολικά ενδιαφέρουσες (55% πολύ, 34% πάρα πολύ - ερώτηση 6). Εκτίμησαν ιδιαίτερα τη χρήση της προσομοίωσης σε πραγματικό χρόνο για εκπαιδευτικούς σκοπούς (37% πολύ, 55% πάρα πολύ - ερώτηση 7), παρά την πολυπλοκότητα της διάταξης (ενισχυτές, αισθητήρες κτλ). Έμειναν ικανοποιημένοι από το βαθμό συμμετοχής τους και χρήσης του εξοπλισμού (42% πολύ, 35% πάρα πολύ - ερώτηση 3). Επίσης, προτιμούν τη χρήση εξοπλισμού αντί απλής επίδειξης (51% πάρα πολύ - ερώτηση 8) και βρίσκουν την εισαγωγή σύγχρονων θεμάτων στο εργαστήριο και γενικά στα μαθήματα ενδιαφέρονσα (51% πάρα πολύ - ερώτηση 9). Επιπλέον, θεωρούν πολύ χρήσιμη την εισαγωγή επιπλέον εργαστηριακών ασκήσεων στα μαθήματα των ΣΗΕ (53% πάρα πολύ - ερώτηση 10).

Η χαμηλότερη βαθμολογία αφορούσε την κατανόηση της λειτουργίας των παραδοσιακών ΣΗΕ (38% μέτρια, 47% πολύ - ερώτηση 4) και θα ληφθεί υπόψη στις εργαστηριακές

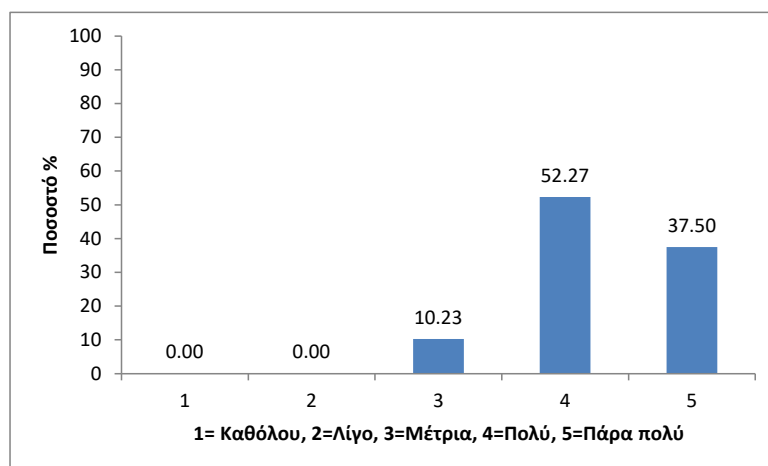
ασκήσεις σε επόμενα έτη. Από τις βελτιωτικές προτάσεις των φοιτητών, καθώς και συζητήσεις, φαίνεται πως θεωρούν χρήσιμο να αυξηθεί η διάρκεια των ασκήσεων ώστε να κάνουν περισσότερη χρήση του εξοπλισμού. Επίσης, επισήμαναν τη χρησιμότητα ένταξης περισσότερων εργαστηριακών ασκήσεων.

<u>Ερωτήσεις:</u>	<u>Μέσος Όρος</u>	<u>Τυπική απόκλιση</u>
1) Οι θεματικές της εργαστηριακής άσκησης είναι ενδιαφέρουσες	4.35	0.58
2) Η παρουσίαση των θεμάτων κατά τη διάρκεια της άσκησης είναι ικανοποιητική	4.27	0.63
3) Ενθαρρύνεται η ενεργός συμμετοχή και η χρήση του εξοπλισμού από τους φοιτητές	4.03	0.95
4) Η εργαστηριακή άσκηση με βοήθησε στην κατανόηση της λειτουργίας των «παραδοσιακών» ΣΗΕ	3.61	0.75
5) Η εργαστηριακή άσκηση με βοήθησε στην κατανόηση της λειτουργίας των σύγχρονων ΣΗΕ με διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής	4.16	0.69
6) Η εργαστηριακή άσκηση (συνολικά) είναι ενδιαφέρουσα	4.23	0.63
7) Η προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο είναι χρήσιμο εκπαιδευτικό εργαλείο	4.45	0.71
8) Η χρήση πραγματικού εξοπλισμού από τους φοιτητές αυξάνει το ενδιαφέρον σε σχέση με μία απλή επίδειξη	4.39	0.70
9) Η εισαγωγή σύγχρονων θεμάτων (διεσπαρμένη παραγωγή) αυξάνει το ενδιαφέρον μου στις εργαστηριακές ασκήσεις και γενικότερα στα μαθήματα των ΣΗΕ	4.46	0.60
10) Η ένταξη επιπλέον εργαστηριακών ασκήσεων στα μαθήματα των ΣΗΕ είναι χρήσιμη	4.43	0.68

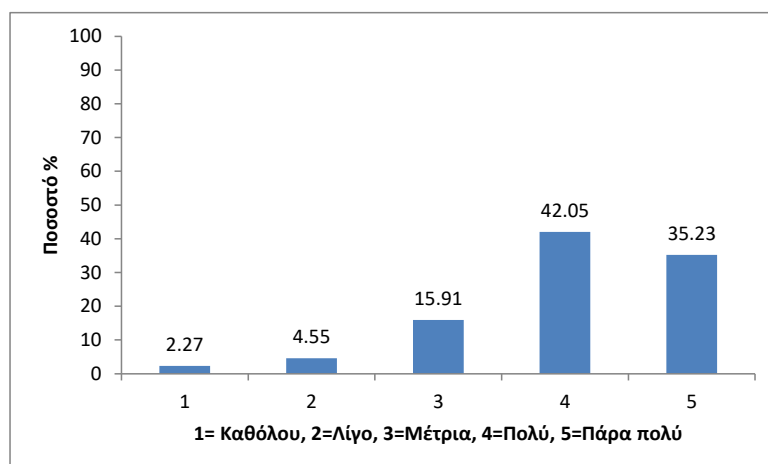
Πίνακας 6.1. Συγκεντρωτική παρουσίαση των απαντήσεων των φοιτητών



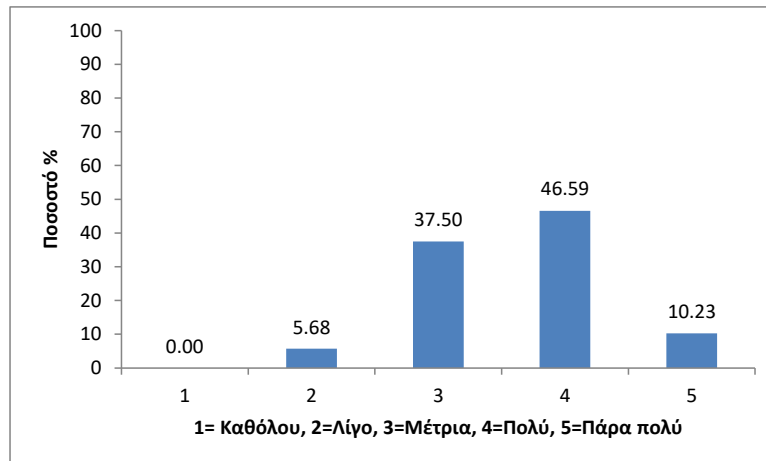
Σχήμα 6.12. Ερώτηση 1: *Οι θεματικές της εργαστηριακής άσκησης είναι ενδιαφέρουσες*



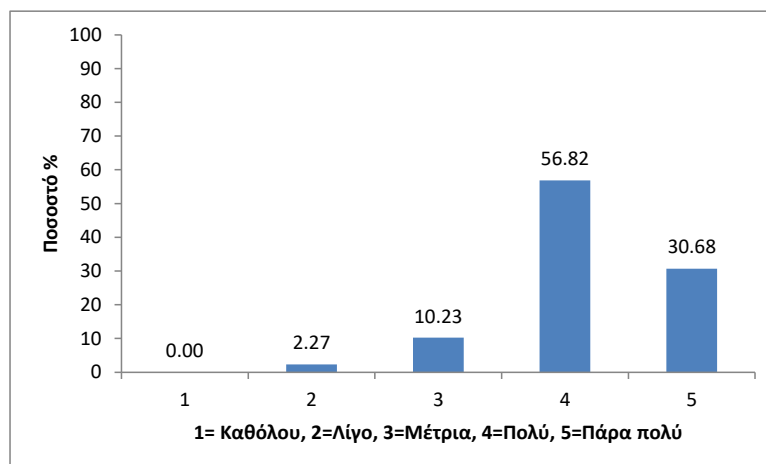
Σχήμα 6.13. Ερώτηση 2: *Η παρουσίαση των θεμάτων κατά τη διάρκεια της άσκησης είναι ικανοποιητική*



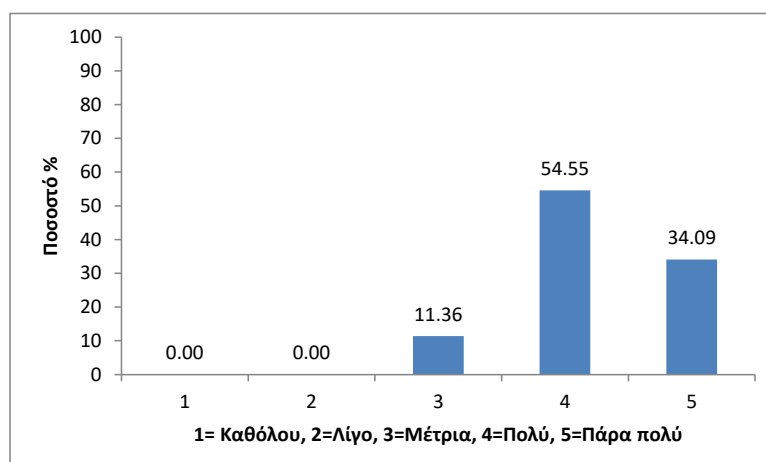
Σχήμα 6.14. Ερώτηση 3: *Ενθαρρύνεται η ενεργός συμμετοχή και η χρήση του εξοπλισμού από τους φοιτητές*



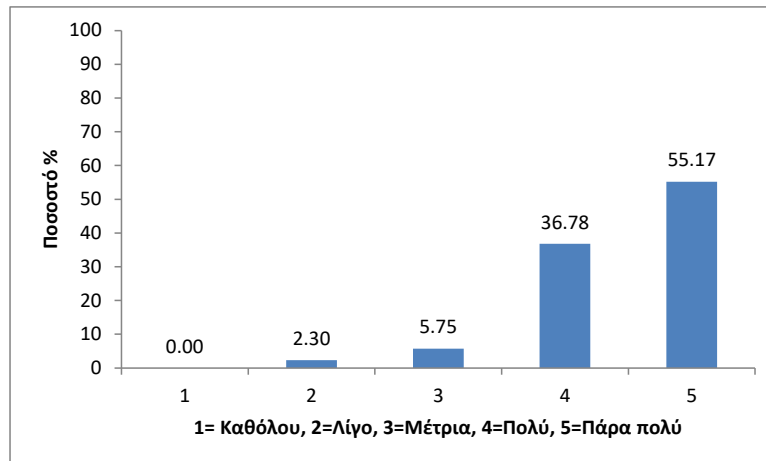
Σχήμα 6.15. Ερώτηση 4: *Η εργαστηριακή άσκηση με βοήθησε στην κατανόηση της λειτουργίας των «παραδοσιακών» ΣΗΕ*



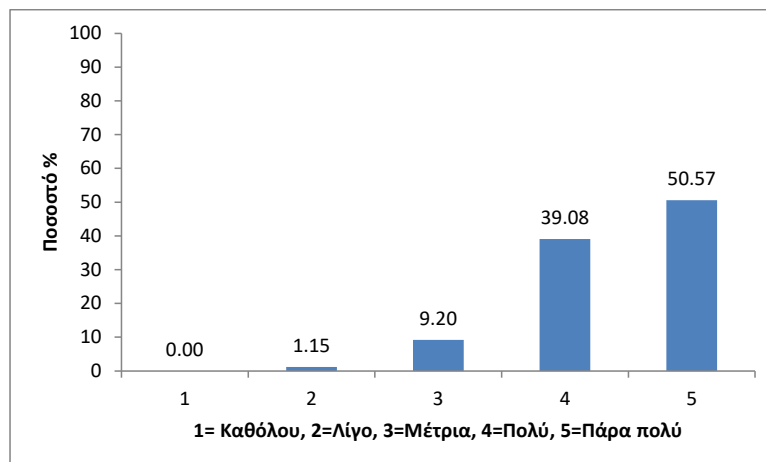
Σχήμα 6.16. Ερώτηση 5: *Η εργαστηριακή άσκηση με βοήθησε στην κατανόηση της λειτουργίας των σύγχρονων ΣΗΕ με διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής*



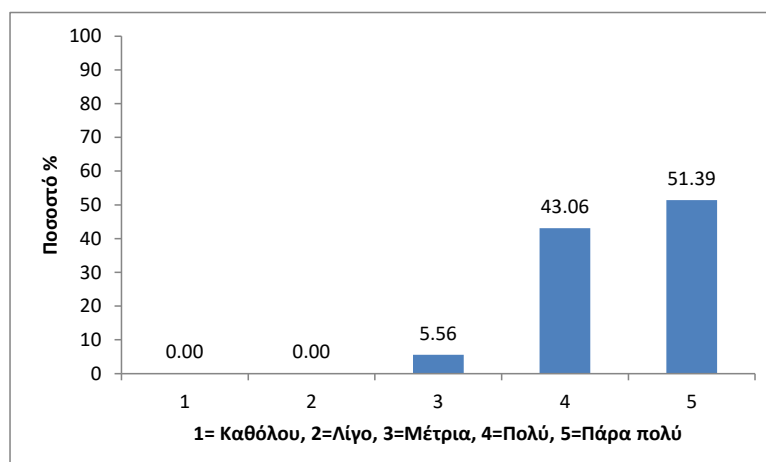
Σχήμα 6.17. Ερώτηση 6: *Η εργαστηριακή άσκηση (συνολικά) είναι ενδιαφέρουσα*



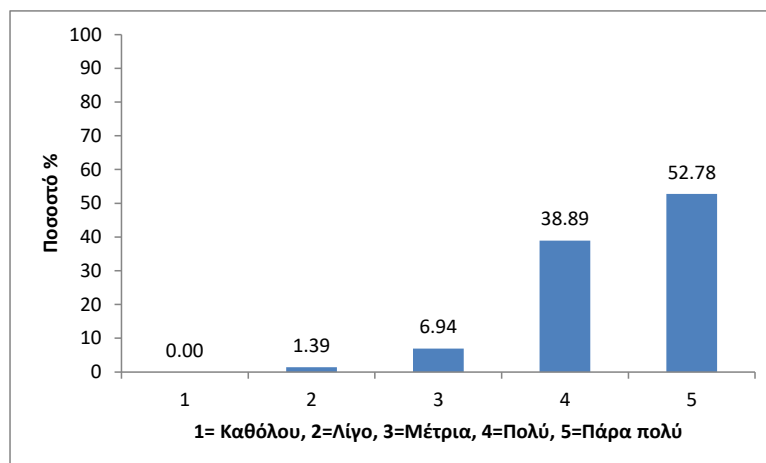
Σχήμα 6.18. Ερώτηση 7: *Η προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο είναι χρήσιμο εκπαιδευτικό εργαλείο*



Σχήμα 6.19. Ερώτηση 8: *Η χρήση πραγματικού εξοπλισμού από τους φοιτητές αυξάνει το ενδιαφέρον σε σχέση με μία απλή επίδειξη*



Σχήμα 6.20. Ερώτηση 9: *Η εισαγωγή σύγχρονων θεμάτων (δισπαρμένη παραγωγή) αυξάνει το ενδιαφέρον μου στις εργαστηριακές ασκήσεις και γενικότερα στα μαθήματα των ΣΗΕ*



Σχήμα 6.21. Ερώτηση 10: *Η ένταξη επιπλέον εργαστηριακών ασκήσεων στα μαθήματα των ΣΗΕ είναι χρήσιμη*

Σύμφωνα με τους υποστηρικτές της βιωματικής μάθησης, η μάθηση γίνεται πιο ελκυστική όταν προσεγγίζει καταστάσεις της πραγματικής ζωής. Ομοίως, οι απαντήσεις στην ερώτηση 7 δείχνουν πως οι φοιτητές εκτίμησαν τη δυνατότητα της HIL μεθόδου να προσεγγίσει ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας. Οι φοιτητές προτίμησαν τον πειραματισμό με πραγματικό εξοπλισμό (ερώτηση 8) πιθανώς επειδή διέρχονται και από τα τέσσερα στάδια του κύκλου του Kolb, ενώ σε απλή εργαστηριακή επίδειξη δεν φτάνουν στο τέταρτο στάδιο (ενεργός πειραματισμός), καθώς και εξαιτίας της συμμετοχής περισσότερων αισθήσεων [194][195] και πιο περίπλοκων νοητικών διεργασιών.

Από εκπαιδευτική σκοπιά, επίσης παρουσιάζει ενδιαφέρον η χρήση της προσομοίωσης σε πραγματικό χρόνο στις διπλωματικές εργασίες φοιτητών. Από το 2011, δέκα προπτυχιακοί φοιτητές έχουν ολοκληρώσει τις διπλωματικές τους εργασίες στο εργαστήριο ΣΗΕ του ΕΜΠ σε θέματα όπως: μελέτη PHIL προσομοίωσης και ανύψωσης τάσης εξαιτίας της διείσδυσης φωτοβολταϊκών [140], έλεγχος ενισχυτή για PHIL πειράματα [196], ευστάθεια και ακρίβεια της PHIL μεθόδου [42], έλεγχος αυτόνομων υβριδικών συστημάτων [197] (PHIL και CHIL), συντονισμένος έλεγχος τάσης δικτύων διανομής [198] (CHIL), μοντελοποίηση ανεμογεννήτριας σε πραγματικό χρόνο για συμμετοχή στη ρύθμιση συχνότητας [199] κ.α. Σε αυτό το διάστημα, έχουν δημοσιευτεί επτά εργασίες με συμμετοχή των φοιτητών (ένα περιοδικό [A.9], τέσσερα διεθνή συνέδρια [B.5][B.18][200][201] και δύο εγχώρια συνέδρια [B.17][B.21]).

Ετοιμάστηκε ερωτηματολόγιο και δόθηκε στους δέκα αποφοίτους. Οι απαντήσεις τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2. Οι συμμετέχοντες εκτίμησαν ιδιαίτερα τη χρήση της προσομοίωσης σε πραγματικό χρόνο στις διπλωματικές τους εργασίες (25% πολύ, 75% πάρα πολύ - ερώτηση ι). Αnéφεραν θετική επίδραση στη διαδικασία μάθησης, εκτίμησαν την ομοιότητα με πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και την καινοτομία της προσέγγισης. Ως μειονεκτήματα ανέφεραν την επιπλέον δυσκολία στη μοντελοποίηση, την ανάγκη για καλά εκπαιδευμένους επιβλέποντες και τους φυσικούς περιορισμούς του εξοπλισμού. Επιπλέον, οι απόφοιτοι βρίσκουν την εμπειρία της χρήσης πραγματικού εξοπλισμού πολύ πιο ενδιαφέρουσα και αναφέρουν ότι τους δίνει περισσότερα κίνητρα σε σχέση με τις

αμιγώς ψηφιακές προσομοιώσεις και την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας (25% πολύ, 75% πάρα πολύ - ερώτηση ii).

<u>Ερωτήσεις:</u>	<u>Μέσος Όρος</u>	<u>Τυπική απόκλιση</u>
i) Η προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο είναι χρήσιμο εργαλείο σε διπλωματικές εργασίες	4.75	0.43
ii) Η χρήση πραγματικού εξοπλισμού σε διπλωματικές εργασίες είναι πιο ενδιαφέρουσα και χρήσιμη από αμιγώς ψηφιακές προσομοιώσεις ή βιβλιογραφική έρευνα	4.75	0.43

Πίνακας 6.2. Συγκεντρωτική παρουσίαση των απαντήσεων των αποφοίτων

6.8) Σύνοψη και συμπεράσματα

Σε αυτό το Κεφάλαιο περιγράφονται εργαστηριακές ασκήσεις σε σύγχρονα θέματα της λειτουργίας των ΣΗΕ με ΔΠ, που λαμβάνουν χώρα στο εργαστήριο ΣΗΕ του ΕΜΠ. Εξηγούνται τα πλεονεκτήματα χρήσης της PHIL μεθόδου για εκπαιδευτικούς σκοπούς. Η PHIL μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του εξοπλισμού που δεν ήταν διαθέσιμος στο εργαστήριο και τη μελέτη αλληλεπιδράσεων σε επίπεδο συστήματος. Αναπτύχθηκε προηγμένη διπλή εργαστηριακή διάταξη PHIL δημιουργώντας δύο πάγκους εργασίας για τους φοιτητές. Η διάταξη παρέχει εμπειρία χρήσης πραγματικού εξοπλισμού στους φοιτητές σε μικρές ομάδες. Εφαρμόστηκε βιωματική μάθηση με βάση τον κύκλο του Kolb.

Από τις απαντήσεις των προπτυχιακών φοιτητών στα ερωτηματολόγια, αλλά και των αποφοίτων (για τις διπλωματικές τους εργασίες) εξάγονται χρήσιμα εκπαιδευτικά συμπεράσματα. Οι φοιτητές αξιολόγησαν τις εργαστηριακές ασκήσεις σαφώς θετικά και εκτίμησαν ιδιαίτερα τη χρήση της προσομοίωσης σε πραγματικό χρόνο για εκπαιδευτικούς σκοπούς. Έδειξαν έντονο ενδιαφέρον για την ενσωμάτωση σύγχρονων θεμάτων στις εργαστηριακές ασκήσεις και την απόκτηση εμπειρίας χρήσης πραγματικού εξοπλισμού. Επιπλέον, θεωρούν πολύ χρήσιμη την ένταξη περισσότερων εργαστηριακών ασκήσεων στα μαθήματα των ΣΗΕ.

Συμπερασματικά, φάνηκε πως η PHIL μέθοδος μπορεί να συμβάλλει στην εκπαιδευτική διαδικασία, εξοικειώνοντας τους φοιτητές με το εργαστήριο πραγματικού εξοπλισμού και παράλληλα διατηρώντας την ευελιξία και τις δυνατότητες μοντελοποίησης των ψηφιακών προσομοιώσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΤΩΝ

7.1) Εισαγωγή

Οι μονάδες ΔΠ συνδέονται στα δίκτυα διανομής συνήθως μέσω μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος που εγχέουν αρμονικές ρεύματος στο δίκτυο. Οι αρμονικές ρεύματος μπορούν να επηρεάσουν την τάση του δικτύου περιορίζοντας την ποιότητα ισχύος [B.3]. Επίσης, η μεγάλη διείσδυση Φ/Β συστημάτων στη ΧΤ μπορεί να προκαλέσει ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές σε άλλες συσκευές. Παράλληλα, οι ηλεκτρονικοί (έξυπνοι) μετρητές εγκαθίστανται όλο και περισσότερο στα ηλεκτρικά δίκτυα ανά τον κόσμο. Σε αρκετές περιπτώσεις έχουν παρατηρηθεί σφάλματα στη μέτρηση κατά την παράλληλη λειτουργία των μετρητών με αντιστροφείς Φ/Β και άλλες συσκευές ηλεκτρονικών ισχύος που μπορούν να φτάσουν μέχρι και 45%. Στην πράξη, αυτό το πρόβλημα δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί επαρκώς με τα σημερινά πρότυπα εξαιτίας ενός κενού στην τυποποίηση της ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας και των εκπομπών στο εύρος συχνοτήτων 2 kHz - 150 kHz.

Σε αυτό το Κεφάλαιο [A.3] γίνεται αναλυτική ανασκόπηση των διεθνών και εθνικών προτύπων, οδηγιών, τεχνικών αναφορών και δημοσιεύσεων σχετικά με αυτό το απαιτητικό ζήτημα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility - EMC) υπογραμμίζοντας το κενό στην περιοχή 2 kHz - 150 kHz. Η συνεχιζόμενη δραστηριότητα τυποποίησης για τον καθορισμό ορίων εκπομπών και ατρωσίας, καθώς και κατάλληλων διαδικασιών δοκιμών περιγράφεται λεπτομερώς, όπου δίνεται έμφαση στη πρόοδο που έχει γίνει και στα εναπομείναντα βήματα. Περιγράφονται εργαστηριακές διατάξεις για τον έλεγχο της ατρωσίας των ηλεκτρονικών μετρητών και των εκπομπών των αντιστροφέων και παρουσιάζονται εργαστηριακά αποτελέσματα.

7.2) Παρεμβολές στους ηλεκτρονικούς μετρητές από αντιστροφείς Διεςπαρμένης Παραγωγής

Η ευρείας κλίμακας ένταξη των ηλεκτρονικών μετρητών είναι σε εξέλιξη σε πολλές χώρες, ενθαρρυμένη κυρίως από κυβερνητικές πολιτικές, με σκοπό την προώθηση της ενεργού συμμετοχής των καταναλωτών για την επίτευξη εξοικονόμησης ενέργειας. Σήμερα, σχεδόν το ένα στα τρία νοικοκυριά στις ΗΠΑ διαθέτει έξυπνο μετρητή [202], ενώ προβλέπεται πως 170-180 εκατομμύρια θα έχουν εγκατασταθεί μέχρι το 2020 στην ΕΕ [203]. Οι έξυπνοι μετρητές προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα στους προμηθευτές ηλεκτρικής ενέργειας και τους καταναλωτές και έχουν αναφερθεί αρκετές προσπάθειες για τη βελτίωση των δυνατοτήτων τους [204][205]. Παρόλα αυτά, έχει αναφερθεί σε διάφορες χώρες δυσλειτουργία των ηλεκτρονικών μετρητών και άλλων συσκευών (π.χ. συστημάτων Power Line Communication (PLC)) όταν χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με Φ/Β αντιστροφείς και άλλες συσκευές ηλεκτρονικών ισχύος [206]-[209]. Σε αρκετές περιπτώσεις, η μετρούμενη ενέργεια από τον ηλεκτρονικό μετρητή είναι σημαντικά χαμηλότερη από την

πραγματική κατανάλωση ή παραγωγή. Είναι σαφές ότι ενόψει των φιλόδοξων στόχων για την ένταξη μεγάλης κλίμακας των έξυπνων μετρητών σε πολλές χώρες καθώς και της αυξανόμενης σύνδεσης μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος στα δίκτυα διανομής, όπως Φ/Β αντιστροφών, το πρόβλημα αυτό θα μπορούσε να έχει σοβαρές λειτουργικές, οικονομικές και νομικές επιπτώσεις.

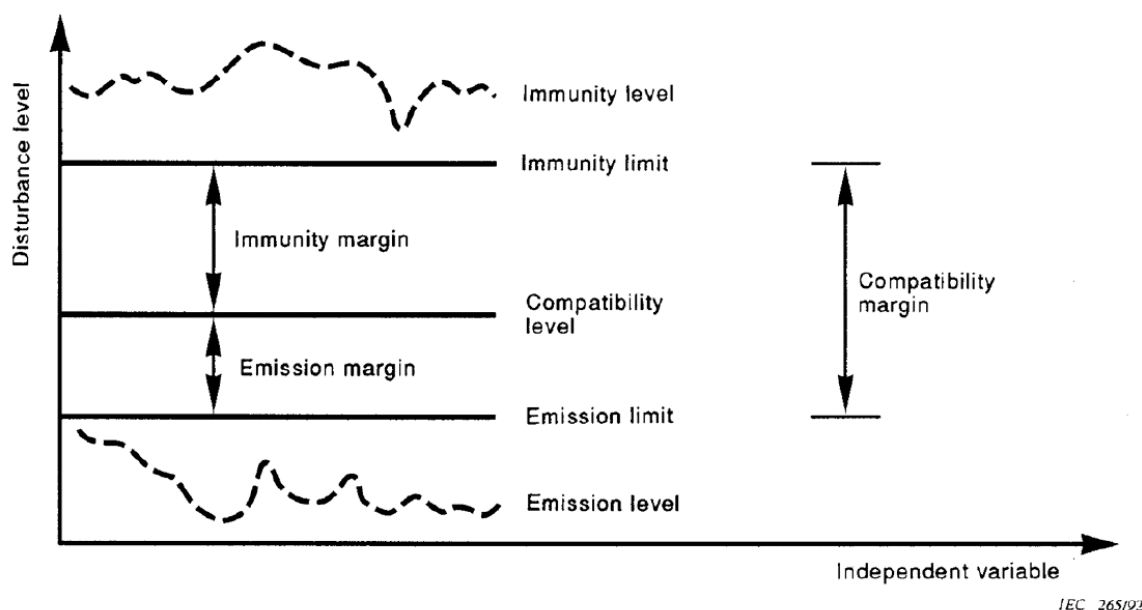
Αυτό το πρόβλημα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας [210] διαπιστώθηκε για πρώτη φορά στη Γερμανία το 2007 [211]. Αργότερα, δοκιμές πεδίου σε Φ/Β εγκαταστάσεις ΧΤ που διενεργήθηκαν το 2009, παρουσίασαν σφάλμα -20% στη μετρούμενη ενέργεια [206]. Το 2010, ο Σουηδικός οργανισμός τυποποίησης (SWEDAC) ανέφερε περιπτώσεις δυσλειτουργίας ηλεκτρονικών μετρητών που επηρεάστηκαν από διάφορες συσκευές, όπως αντλίες θερμότητας, τηλεοράσεις, υπολογιστές και λαμπτήρες φθορισμού [209] και υπογράμμισε την αναποτελεσματικότητα των τρεχόντων προτύπων ατρωσίας (EN-50470-1 και EN50470-3) για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Στην Ελλάδα έχουν παρατηρηθεί εσφαλμένες μετρήσεις σε Φ/Β εγκαταστάσεις ΧΤ που φθάνουν μέχρι και -45% σε κάποιες περιπτώσεις. Το ζήτημα έχει επίσης αναγνωριστεί από τους ευρωπαϊκούς κατασκευαστές έξυπνων μετρητών (ESMIG) [212], αναφέρεται στη δημόσια διαβούλευση για την οδηγία του ευρωπαϊκού κοινοβουλίου Measuring Instrument Directive (MID) 2004/22/EC [213] και σε αρκετές δημοσιεύσεις και αναφορές [214][215][216]. Μια επισκόπηση του θέματος παρέχεται στο [217] και πιο πρόσφατες μελέτες στο [218].

Το κενό στην περιοχή 2 kHz-150 kHz αφορά τόσο τα πρότυπα ατρωσίας των ηλεκτρονικών μετρητών, όσο και τα πρότυπα εκπομπών των συσκευών ηλεκτρονικών ισχύος. Η διακοπτική συχνότητα των διασυνδεδεμένων στο δίκτυο συσκευών ηλεκτρονικών ισχύος βρίσκεται συνήθως σε αυτή την περιοχή σε κανονική λειτουργία. Η έγχυση υψίσυχων αρμονικών ρεύματος από τις συσκευές ηλεκτρονικών ισχύος επηρεάζει τη διαδικασία μέτρησης του ρεύματος του ηλεκτρονικού μετρητή οδηγώντας σε σφάλμα στη μέτρηση της ενέργειας (π.χ. εξαιτίας κορεσμού στον αναλογικό/ψηφιακό μετατροπέα του μετρητή).

Η εισαγωγή επιπλέον φίλτρων θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί κατά περίπτωση για να περιοριστεί το πρόβλημα, αλλά δεν αποτελεί πρακτική και οικονομική λύση για ευρύτερη εφαρμογή. Η πιθανότητα παρακώλυσης της σηματοδότησης του δικτύου και η εμφάνιση συντονισμού θα πρέπει να ληφθούν υπόψη [219].

7.3) Ανασκόπηση των προτύπων/οδηγιών

Η τυποποίηση ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας πρέπει να εξασφαλίζει επαρκές περιθώριο μεταξύ των ορίων εκπομπών και των απαιτήσεων ατρωσίας. Στο Σχήμα 7.1 διασαφηνίζονται οι όροι όρια εκπομπών, όρια ατρωσίας και επίπεδο συμβατότητας [220]. Ακολουθεί ανασκόπηση των σχετικών προτύπων και οδηγιών.



Σχήμα 7.1. Όρια εκπομπών, όρια ατρωσίας και επίπεδο συμβατότητας σε παράδειγμα μίας συσκευής που εκπέμπει και μίας που «αμύνεται» συναρτήσει μίας ανεξάρτητης μεταβλητής (π.χ. συχνότητας) [220]

7.3.1) Κενά στα πρότυπα εκπομπών και ατρωσίας στο εύρος 2 kHz - 150 kHz πριν την αναγνώριση του προβλήματος

Ατρωσία μιας ηλεκτρικής συσκευής είναι η ικανότητα της να λειτουργεί σύμφωνα με τις προδιαγραφές της, παρά την παρουσία ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών. Αρκετά βασικά πρότυπα ατρωσίας έχουν συνταχθεί από τη Διεθνή Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC) στη σειρά 61000-4. Τα πιο σχετικά με το ζήτημα αναφέρονται στη συνέχεια. Το IEC 61000-4-3 [221] αναφέρεται σε δοκιμές ατρωσίας σε ακτινοβολούμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία στο εύρος συχνοτήτων 80 MHz έως 2 GHz. Το IEC 61000-4-6 [222] περιγράφει δοκιμές ατρωσίας σε αγόμενες διαταραχές στο εύρος 150 kHz έως 80 MHz. Επιπλέον, το IEC 61000-4-13 [223] προτείνει διαδικασίες δοκιμών ατρωσίας σε αρμονικές, διαρμονικές, συμπεριλαμβανόμενης της σηματοδότησης του δικτύου. Το IEC 61000-4-16 [224] αναφέρεται στο εύρος συχνοτήτων 0-150 kHz, αλλά θεωρούνται μόνο κοινότροπες διαταραχές (common mode), οι οποίες δεν σχετίζονται με το υπό μελέτη ζήτημα.

Το 2003 δημοσιεύθηκαν πρότυπα που αναφέρονται ειδικά στην ατρωσία των ηλεκτρονικών μετρητών: EN 62052-11 [225] και EN 62053-21 [226]. Το 2004 το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο υιοθέτησε την οδηγία «Measuring Instrument Directive (MID) 2004/22/EC» [227], προκειμένου να ενοποιήσει τη νομοθεσία των κρατών-μελών για 10 διαφορετικές κατηγορίες συσκευών μέτρησης. Με βάση την οδηγία MID, τα παρακάτω πρότυπα δημοσιεύθηκαν το 2006: το EN 50470-1 [228] για ηλεκτρομηχανικούς και ηλεκτρονικούς μετρητές και το EN 50470-3 [229] για ηλεκτρονικούς μετρητές. Ωστόσο, η περιοχή συχνοτήτων 2 kHz-150 kHz δεν καλύπτεται από τα προαναφερθέντα πρότυπα [209].

Επιπλέον, μία από τις τεχνολογίες που εφαρμόζεται σε εφαρμογές έξυπνων μετρητών είναι η επικοινωνία μέσω του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας (Power Line communication - PLC)

[230]. Συστήματα PLC για εφαρμογές έξυπνων μετρητών στην Ευρώπη χρησιμοποιούν τη CENELEC A ζώνη (3 kHz-95 kHz).

Όσον αφορά τις εκπομπές Φ/Β αντιστροφών και άλλων συσκευών ηλεκτρονικών ισχύος, καταρχάς χρησιμοποιούνται τα υφιστάμενα πρότυπα για την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα οικιακού, εμπορικού και βιομηχανικού εξοπλισμού. Τα IEC 61000-3-2 [123] και IEC 61000-3-12 [124] αναφέρονται σε εκπομπές μέχρι 2 kHz, ενώ το CISPR11/EN55011 [231] θέτει όρια εκπομπών στο εύρος συχνοτήτων μεταξύ 9 kHz έως 150 kHz για επαγωγικές εστίες. Το IEC 61000-6-3 [232] αναφέρεται σε εκπομπές σε εγκαταστάσεις οικιακές, εμπορικές και ελαφριάς βιομηχανίας στην περιοχή συχνοτήτων 0-400 GHz, αλλά δεν περιλαμβάνει το εύρος 2 kHz-150 kHz. Επιπλέον, το EN 55022 [233] θέτει όρια εκπομπών ραδιοσυχνοτήτων στην περιοχή 9 kHz-400 GHz για εξοπλισμό τεχνολογιών πληροφορικής.

Ειδικά για Φ/Β αντιστροφείς μέχρι 10 kVA που συνδέονται στη XT, το IEC 61727 [234] αναφέρει όρια εκπομπών μέχρι την 33^η αρμονική και απαιτεί συντελεστή ολικής αρμονικής παραμόρφωσης (Total Harmonic Distortion - THD) του ρεύματος μικρότερο ή οριακά ίσο με 5%. Στον Πίνακα 7.1 παρατίθενται τα προβλεπόμενα όρια από το πρότυπο IEC 61727, το οποίο βασίστηκε σε σημαντικό βαθμό σε κανονισμούς που αναπτύχθηκαν από την εκτεταμένη εφαρμογή Φ/Β συστημάτων στη Γερμανία [235]. Επιπλέον, ο σύνδεσμος βιομηχανιών ενέργειας και υδάτων της Γερμανίας δημοσίευσε το 2008 τεχνική οδηγία για τη σύνδεση των μονάδων παραγωγής στο δίκτυο MT, η οποία προτείνει όρια αρμονικών ρεύματος για συγκεκριμένες τιμές ονομαστικής τάσης του δικτύου (10 kV, 20 kV και 30 kV) [79]. Επιπλέον, οι διαχειριστές των δικτύων διανομής μπορούν να επιβάλουν παρόμοιες ή πρόσθετες απαιτήσεις.

Μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση Αρμονικών Περιττής Τάξης (A)		Μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση Αρμονικών Άρτιας Τάξης (A)
Τάξη Αρμονικής		Οι αρμονικές άρτιας τάξης οφείλουν να είναι μικρότερες, τουλάχιστον κατά 25%, από το μέτρο των αντίστοιχων αρμονικών περιττής τάξης
3 ^η -9 ^η	4.0% του μέγιστου ρεύματος εξόδου	
11 ^η -15 ^η	2.0% του μέγιστου ρεύματος εξόδου	
17 ^η -21 ^η	1.5% του μέγιστου ρεύματος εξόδου	
23 ^η -33 ^η	0.6% του μέγιστου ρεύματος εξόδου	
Μέγιστη τιμή του Συντελεστή Αρμονικής Παραμόρφωσης (T.H.D.)		5%

Πίνακας 7.1. Τιθέμενα όρια στις αρμονικές ρεύματος με βάση το πρότυπο IEC 61727 [234][235]

7.3.2) Πρόσφατες εξελίξεις στην τυποποίηση

Στην παράγραφο αυτή περιγράφεται η διεθνής προσπάθεια για να καλυφθεί το κενό της τυποποίησης στο εύρος συχνοτήτων 2 kHz-150 kHz.

7.3.2.1) Ατρωσία στο εύρος 2 kHz-150 kHz

Τον Νοέμβριο του 2011, ο τεχνικός και επιστημονικός οργανισμός της Γερμανίας VDE και η επιτροπή της FNN εξέδωσαν την «Οδηγία για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας των μετρήσεων μετρητών ηλεκτρικού ρεύματος και βοηθητικών συσκευών» [236], που προτείνει επίπεδα ατρωσίας και διαδικασίες δοκιμών για απευθείας συνδεδεμένους (χωρίς μετασχηματιστή έντασης) ηλεκτρονικούς μετρητές στο εύρος συχνοτήτων 2 kHz-150 kHz.

Το 2012 η τεχνική επιτροπή CLC TC13 της CENELEC δημοσίευσε την τεχνική αναφορά CLC/TR 50579 [237] «Εξοπλισμός μέτρησης ηλεκτρισμού (εναλλασσόμενου ρεύματος) - επίπεδα αυστηρότητας (severity levels), απαιτήσεις ατρωσίας και μέθοδοι δοκιμών για αγόμενες διαταραχές στο εύρος συχνοτήτων 2 kHz - 150 kHz». Η αναφορά ορίζει επίπεδα ατρωσίας και διαδικασίες δοκιμών για την περιοχή συχνοτήτων 2 kHz έως 150 kHz, ως προσωρινή λύση στα προβλήματα ακρίβειας μετρητών ηλεκτρικής ενέργειας κλάσεων A, B και C. Αναφέρεται σε απευθείας συνδεδεμένους μετρητές και σε μετρητές που χρησιμοποιούν μετασχηματιστή. Η μέγιστη επιτρεπτή επιπρόσθετη απόκλιση για απευθείας συνδεδεμένους μετρητές σύμφωνα με την οδηγία της VDE-FNN και την τεχνική αναφορά CLC/TR 50579 παρουσιάζονται μαζί στον Πίνακα 7.2, όπου γίνεται φανερό πως τίθενται διαφορετικές απαιτήσεις.

Σημειώνεται πως σύμφωνα με τα [227][228] οι μετρητές χωρίζονται σε τρεις κλάσεις (A, B και C) με βάση την ακρίβεια μέτρησης της ενεργού ισχύος (οι μετρητές της κλάσης C παρουσιάζουν την υψηλότερη ακρίβεια και ακολουθούν της κλάσης B και μετά της κλάσης A). Τα όρια του ποσοστιαίου σφάλματος σε συνθήκες αναφοράς για κάθε κλάση ορίζονται στο [229].

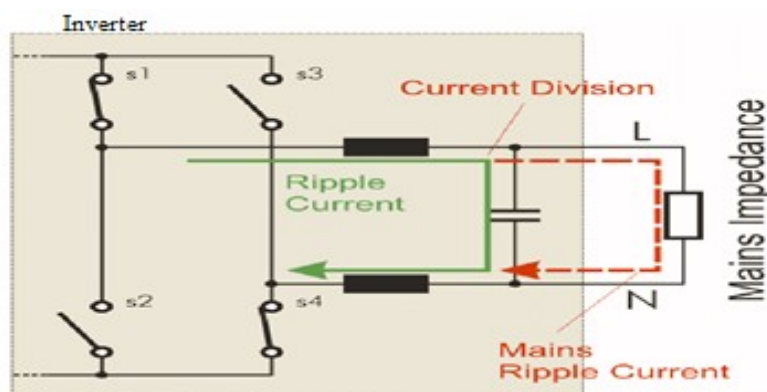
	Εύρος συχνοτήτων	Ρεύμα διαταραχής	Θεμελιώδες ρεύμα (50 Hz)	cosφ	Μέγιστη επιτρεπτή επιπρόσθετη απόκλιση για μετρητές κλάσης [%]		
					A	B	C
VDE-FNN	2-25 kHz	2 A	10 A	1	±3	±2	-
	25-150 kHz	1 A	10 A	1	±3	±2	-
CLC/TR 50579	2-30 kHz	2 A	I _{ref}	>0.9	±6	±4	±2
	30-150 kHz	1 A	I _{ref}	>0.9	±6	±4	±2

Πίνακας 7.2. Μέγιστη επιτρεπτή απόκλιση για απευθείας συνδεδεμένους ηλεκτρονικούς μετρητές σύμφωνα με την οδηγία της VDE-FNN και την τεχνική αναφορά CLC/TR 50579

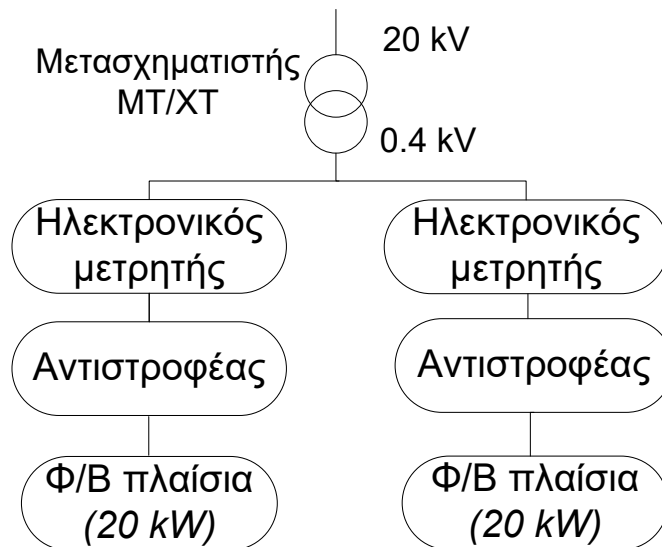
Όσον αφορά τα συστήματα επικοινωνίας PLC, η υποεπιτροπή SC 205A της CENELEC δημοσίευσε το 2010 την πρώτη της αναφορά σχετικά με τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές σε συχνότητες κάτω των 150 kHz, η οποία αναθεωρήθηκε το 2013, όπου ανέφερε προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας των PLC συστημάτων [214]. Οι συσκευές που αναφέρονται πως μπορεί να προκαλέσουν τέτοια προβλήματα είναι οι Φ/Β αντιστροφείς, φορτία με ηλεκτρονικά ισχύος, λάμπες φθορισμού, φορτιστές μπαταριών κτλ. Επιπλέον, αρκετές δημοσιεύσεις αναφέρουν τέτοια EMC προβλήματα τα τελευταία χρόνια [238]-[242]. Η CENELEC/SC 205A κυκλοφόρησε τον Νοέμβριο του 2015 την τεχνική αναφορά CLC/TR 50627:2015 «Μελέτη πάνω στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές μεταξύ ηλεκτρικού εξοπλισμού/συστημάτων στην περιοχή συχνοτήτων κάτω των 150 kHz» [219], η οποία αναφέρεται σε EMC προβλήματα των PLC συστημάτων μεταξύ άλλων θεμάτων. Επιπλέον, η ομάδα εργασίας IEC SC77A/WG8 είναι επί του παρόντος επιφορτισμένη με την ανάπτυξη επιπέδων συμβατότητας (compatibility levels) στο εύρος συχνοτήτων 2 kHz-150 kHz [243]. Η ομάδα εργασίας έχει επιβεβαιώσει μέσω εργαστηριακών δοκιμών (που περιγράφονται στο [219]) τις πιθανές επιπτώσεις των διαταραχών που παράγονται από αντιστροφείς στην PLC επικοινωνία [244].

7.3.2.2) Εκπομπές κάτω από τα 150 kHz

Οι εγγεόμενες αρμονικές από τις συσκευές ηλεκτρονικών ισχύος εξαρτώνται από την αρμονική σύνθετη αντίσταση του δικτύου στο σημείο σύνδεσης. Στο Σχήμα 7.2 παριστάνεται αντιστροφέας με το φίλτρο εξόδου του (L-C) συνδεδεμένος στο δίκτυο, το οποίο αναπαρίσταται μόνο από τη σύνθετη αντίσταση του δικτύου για συχνότητες ανώτερες των 50Hz (οι αρμονικές της τάσης του δικτύου αγνοούνται για λόγους απλότητας). Όταν η σύνθετη αντίσταση του δικτύου είναι σχετικά μικρή, υψίσυχνες αρμονικές υψηλότερου πλάτους εγχέονται στο δίκτυο αντί στον πυκνωτή του φίλτρου εξόδου του αντιστροφέα [206]. Μία τέτοια περίπτωση μπορεί να παρουσιαστεί όταν δύο Φ/Β αντιστροφείς συνδέονται παράλληλα και τροφοδοτούν μετασχηματιστή MT/XT, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.3 (οι μετρητές είναι συνδεδεμένοι σε κάθε αντιστροφέα ξεχωριστά). Η συνολική σύνθετη αντίσταση που «βλέπει» ο κάθε αντιστροφέας μειώνεται εξαιτίας του πυκνωτή του φίλτρου εξόδου του άλλου αντιστροφέα και μπορεί να παρουσιαστεί ροή αρμονικών ρευμάτων μεταξύ των δύο αντιστροφέων. Σημειώνεται πως σε αυτή τη διάταξη παρατηρήθηκε δυσλειτουργία των ηλεκτρονικών μετρητών στην Ελλάδα.



Σχήμα 7.2. Αντιστροφέας με φίλτρο εξόδου και η σύνθετη αντίσταση του δικτύου [206]



Σχήμα 7.3. Δύο αντιστροφείς συνδεδεμένοι παράλληλα σε μετασχηματιστή MT/XT

Το IEC 61000-4-7 [245] περιγράφει τη μέση σύνθετη αντίσταση του δικτύου στο εύρος συχνοτήτων έως 9 kHz. Πάνω από αυτή τη συχνότητα, είναι δυνατή η εφαρμογή γραμμικής παρεμβολής (υποθέτοντας καθαρά επαγωγική συμπεριφορά της σύνθετης αντίστασης) για συχνότητες έως 100 kHz. Στην περίπτωση αυτή, η υπολογιζόμενη διαφορική αντίσταση καλύπτει τη συμπεριφορά του κλασικού «κυκλώματος σταθεροποίησης αντίστασης γραμμής» (Line Impedance Stabilization Network (LISN) του CISPR 16 (παράγραφος 7.4.2). Αυτές οι αντιστάσεις είχαν εκτιμηθεί παλαιότερα όταν σχεδόν κάθε ηλεκτρική συσκευή τροφοδοτείτο από μετασχηματιστή 50 Hz χωρίς EMC φίλτρα συνδεδεμένα στο δίκτυο. Αντίθετα, σήμερα σχεδόν κάθε ηλεκτρική συσκευή χρησιμοποιεί διακοπτόμενα τροφοδοτικά (switched-mode) και ενεργή διόρθωση του συντελεστή ισχύος (PFC). Εξαιτίας των διαταραχών ραδιοσυχνοτήτων που παράγονται από τα σύγχρονα τροφοδοτικά, κάθε συσκευή είναι εξοπλισμένη με EMC φίλτρα. Αυτό οδηγεί σε μεγάλες κατανεμημένες χωρητικότητες στο σύγχρονο δίκτυο XT. Έρευνες [206] έδειξαν ότι το 50% των εξεταζόμενων δικτύων είχαν αντιστάσεις μικρότερες από το ένα τέταρτο των τιμών που αναφέρονται στο IEC 61000-4-7.

Ερευνητικές εργασίες έχουν δημοσιευθεί σχετικά με τις εκπομπές Φ/Β αντιστροφέων στο εύρος 2 kHz-150 kHz [246][247][248] και ηλεκτρικών οχημάτων [249]. Στο [246] παρατηρείται παραμόρφωση της τάσης εξαιτίας της Φ/Β παραγωγής μεταξύ 16 kHz και 20 kHz που μπορεί να φτάσει μέχρι το 1 V. Στα [247] και [248] συμπεραίνεται ότι αν και οι εκπομπές από μια Φ/Β εγκατάσταση μπορεί να είναι μικρές, οι εκπομπές από πολλές εγκαταστάσεις αθροιστικά σε μία περιοχή κατοικιών μπορεί δυνητικά να είναι πρόβλημα. Συστάσεις για μεθόδους μέτρησης διαταραχών στην περιοχή 2 kHz-150 kHz (στο πεδίο του χρόνου, στο πεδίο της συχνότητας, στο πεδίο του χρόνου-συχνότητας) παρέχονται στα [250][251]. Επιπλέον, το IEC 61000-4-30 Ed. 3 [252], που δημοσιεύθηκε το 2015, ορίζει μεθόδους για τη μέτρηση και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων που αφορούν την ποιότητα ισχύος και περιλαμβάνει παράρτημα για τις εκπομπές στο εύρος 2 kHz έως 150 kHz.

Όσον αφορά την τυποποίηση, το IEC/TS 62578 [253], περιγράφει τις συνθήκες λειτουργίας

και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των «ενεργών μετατροπέων» (Active in-feed Converters - AIC), δηλαδή μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος εξαναγκασμένης μεταγωγής (self-commutated) που συνδέονται μεταξύ του AC δικτύου και DC πλευράς σταθερού ρεύματος ή τάσης (π.χ. συστήματα μετάδοσης ισχύος ρυθμιζόμενης ταχύτητας, συστήματα αδιάλειπτης τροφοδοσίας (UPS), ενεργά φίλτρα, Φ/Β συστήματα, συστήματα ανεμογεννητριών κτλ). Το έγγραφο αυτό, που δημοσιεύτηκε το 2009 και αναθεωρήθηκε το 2015 (προσχέδια το 2012 και το 2014), αναφέρεται σε EMC θέματα των ενεργών μετατροπέων και περιλαμβάνει συστάσεις για ακριβείς μετρήσεις διαταραχών και επίπεδα εκπομπών σε συχνότητες κάτω των 150 kHz. Προτείνει επίσης κατάλληλο «κύκλωμα σταθεροποίησης αντίστασης γραμμής» (LISN) για δοκιμές εκπομπών. Στο IEC/TS 62578 Ed.2 (προσχέδιο 2012 [254]) προτείνονται μέγιστες τιμές εκπομπών για ενεργούς μετατροπείς διαφορετικών κατηγοριών στην περιοχή συχνοτήτων 9 kHz- 150 kHz, ενώ στην περιοχή συχνοτήτων 2 kHz - 9 kHz προτείνεται ένας σταθμισμένος συντελεστής παραμόρφωσης (παρόμοιος με τον μερικώς σταθμισμένο συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης που ορίζεται στο IEC 61000-3-12).

Προβληματισμοί είχαν εκφραστεί ωστόσο για τα επίπεδα εκπομπών που προτεινόταν στο πλαίσιο της αναθεώρησης του IEC/TS 62578. Τον Νοέμβριο του 2012 η EURELECTRIC (η ένωση των βιομηχανιών ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη) κυκλοφόρησε την επίσημη θέση της για τα προτεινόμενα επίπεδα εκπομπών. Ισχυρίστηκε ότι τα προτεινόμενα επίπεδα θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε παρεμβολές σε συστήματα PLC (σηματοδότηση δικτύου), καθώς και ενδεχομένως να επηρεάσουν την ακρίβεια των ηλεκτρονικών μετρητών ηλεκτρικής ενέργειας στις εγκαταστάσεις των πελατών [255]. Από την άλλη πλευρά, οι κατασκευαστές ηλεκτρονικών μετατροπέων υπογράμμισαν τις μεγάλες δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας χάρη στη χρήση ηλεκτρονικών ισχύος και επεσήμαναν πως η χρήση μεγαλύτερων φίλτρων δεν θα είναι μόνο δαπανηρή, αλλά θα δημιουργήσει επίσης συντονισμούς σε χαμηλές συχνότητες και μείωση της ενεργειακής απόδοσης του εξοπλισμού [256]. Η αντιπαράθεση αυτή οδήγησε στην πρόταση τιμών εκπομπών, αντί για ορίων εκπομπών στο IEC/TS 62578 ως συστάσεις στους κατασκευαστές ηλεκτρονικών μετατροπέων [219]. Σύμφωνα με την προαναφερθείσα τεχνική αναφορά CLC/TR 50627, ενώ αυτό μπορεί να φαίνεται σαν κάποια πρόοδος, οι προτεινόμενες τιμές φαίνεται ότι δεν είναι συμβατές με τη σηματοδότηση του δικτύου. Στην τελική έκδοση του IEC/TS 62578 (το 2015) αναφέρεται ότι οι συστάσεις των μέγιστων τιμών εκπομπών βασίζονται σε παρατηρήσεις και στην εμπειρία από τη σημερινή λειτουργία σύγχρονων ενεργών μετατροπέων από κοινού με άλλες συσκευές χωρίς να δημιουργούνται ανεπιτρεπτες παρεμβολές. Επιπλέον, αναφέρει ότι τα όρια εκπομπών που αναπτύσσονται επί του παρόντος από τις EMC επιτροπές της IEC μπορεί να είναι διαφορετικά [253].

7.3.3.3) Υπολειπόμενες εργασίες

Οι προαναφερθείσες εξελίξεις σχετικά με την ατρωσία (CLC/TR 50579) και τις εκπομπές (IEC/TS 62578) δεν έχουν ακόμα λύσει το πρόβλημα και μπορεί να θεωρηθούν ως προσωρινές λύσεις μέχρι τον καθορισμό επιπέδων συμβατότητας [220][244]. Επίπεδο συμβατότητας ορίζεται από την IEC ως «το καθορισμένο επίπεδο ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής που χρησιμοποιείται ως επίπεδο αναφοράς για το συντονισμό στον καθορισμό των ορίων εκπομπών και ατρωσίας» (Σχήμα 7.1). Η αναφορά CLC/TR 50627 [219]

αναφέρει ότι τα EMC προβλήματα σε αυτό το εύρος συχνοτήτων δεν περιορίζονται σε επιμέρους τύπους εξοπλισμού, όπως αντιστροφείς ή συστήματα επικοινωνίας μέσω του δικτύου, αλλά αποτελούν ένα γενικότερο EMC πρόβλημα που αφορά ένα μεγαλύτερο εύρος ηλεκτρικών συσκευών. Σύμφωνα με αυτή την αναφορά, είναι απαραίτητη μια πιο γενική λύση, αντί του κατά περίπτωση περιορισμού των EMC προβλημάτων. Ο καθορισμός επιπέδων συμβατότητας αποτελεί βασική προϋπόθεση για τον καθορισμό ορίων εκπομπών και απαιτήσεων ατρωσίας σε διάφορα πρότυπα.

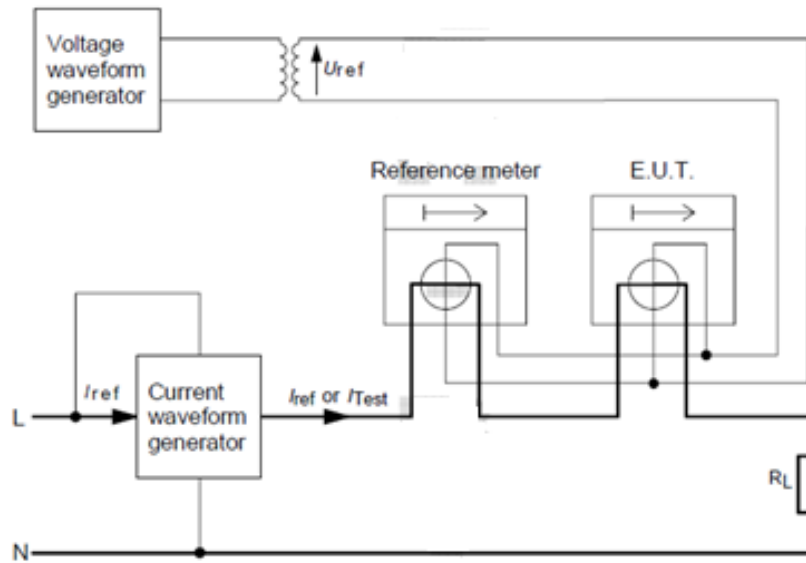
Επί του παρόντος, ο ορισμός των επιπέδων συμβατότητας για οποιαδήποτε χρήση του εύρους συχνοτήτων 2 kHz-150 kHz (όχι μόνο για σηματοδότηση δικτύου) είναι έργο της ομάδας εργασίας IEC/SC77A/WG8, η οποία περιλαμβάνει εκπροσώπους από όλους τους εμπλεκόμενους φορείς (κατασκευαστές ηλεκτρονικών μετατροπών, κατασκευαστές έξυπνων μετρητών κτλ). Αυτή η ομάδα εργασίας αναθεωρεί τα πρότυπα EN 61000-2-2 (για δίκτυα XT) και EN 61000-2-12 (για δίκτυα MT) ώστε να ορίσει επίπεδα συμβατότητας σε αυτό το φάσμα συχνοτήτων [219][220]. Έχει επίσης προτείνει να χωριστεί το εύρος 2 kHz - 150 kHz σε τρεις κύριες ζώνες συχνοτήτων (0-2, 2-9 και 9-150 kHz), καθώς ορισμένες από αυτές τις ζώνες είναι καθοριστικής σημασίας για την έξυπνη μέτρηση, ενώ άλλες θα μπορούσαν να επιτρέψουν πιο χαλαρές απαιτήσεις για τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς [257]. Με βάση τα επίπεδα συμβατότητας, θα πρέπει να καθοριστούν όρια εκπομπών και απαιτήσεις ατρωσίας [219]. Αυτή δεν είναι μια γρήγορη διαδικασία, αλλά παρατηρείται πρόοδος.

Επιπλέον, περιορισμένη έρευνα για το ζήτημα έχει λάβει χώρα στη Βόρεια Αμερική [243]. Έχουν εκφραστεί προβληματισμοί για το κατά πόσο τα επίπεδα συμβατότητας που θα καθοριστούν με βάση το ευρωπαϊκό δίκτυο XT θα ισχύουν και για τις διαφορετικές συνθήκες του δικτύου στη Βόρεια Αμερική (δίκτυο XT 120 V).

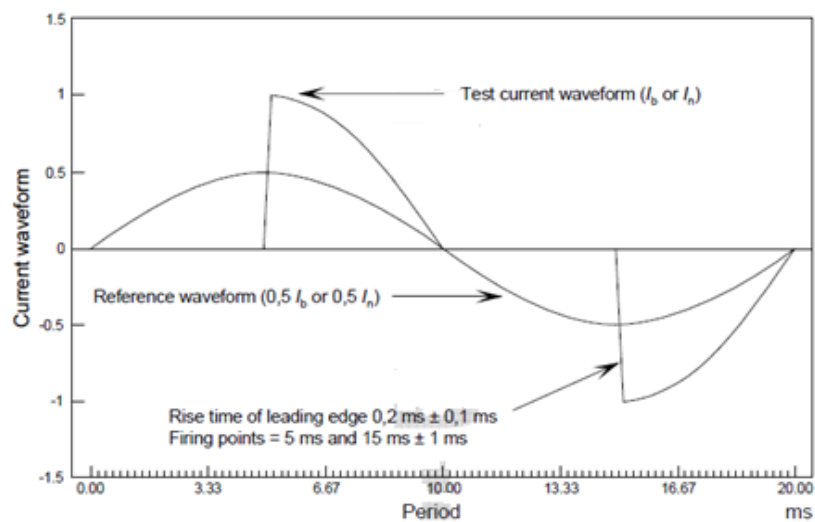
7.4) Διατάξεις και διαδικασίες δοκιμών εκπομπών και ατρωσίας στο εύρος συχνοτήτων 2 kHz-150 kHz

7.4.1) Διατάξεις ατρωσίας

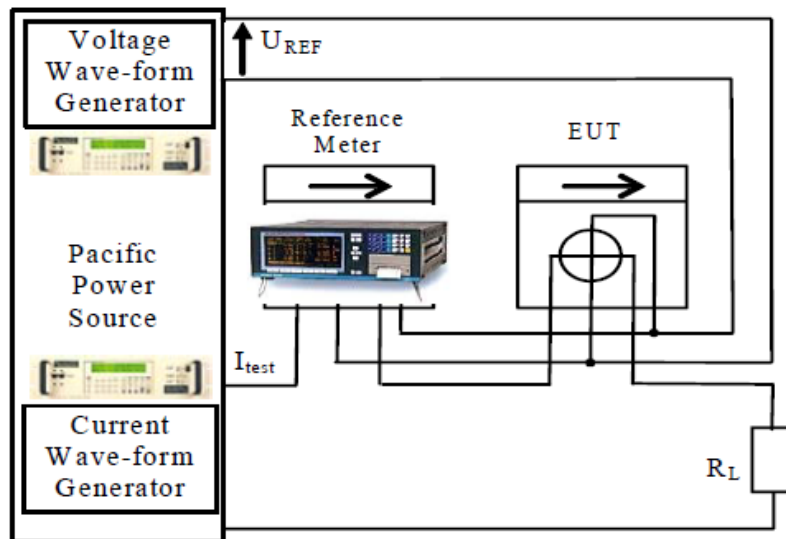
Το πρότυπο EN 50470-3 [229], προτείνει διατάξεις δοκιμών ατρωσίας ηλεκτρονικών μετρητών στις οποίες χρησιμοποιούνται απλά διακοπτικά στοιχεία (π.χ. δίοδοι, θυρίστορ) για την παραγωγή αρμονικών. Η προτεινόμενη διάταξη που παράγει ρεύμα με περιττές αρμονικές φαίνεται στο Σχήμα 7.4 και η κυματομορφή του ρεύματος στο Σχήμα 7.5. Με αυτή τη μέθοδο όμως δεν είναι δυνατή η πραγματοποίηση ελεγχόμενων δοκιμών σε υψηλότερες συχνότητες. Στο [258] αναφέρεται συσκευή που μπορεί να παράγει αρμονικές ρεύματος μέχρι τα 50 kHz (Σχήμα 7.6).



Σχήμα 7.4. Διάταξη δοκιμών για περιττές αρμονικές με βάση το πρότυπο EN 50470-3 [229]



Σχήμα 7.5. Η κυματομορφή του ρεύματος που διαθέτει περιττές αρμονικές κατά το πρότυπο EN 50470-3 [229]

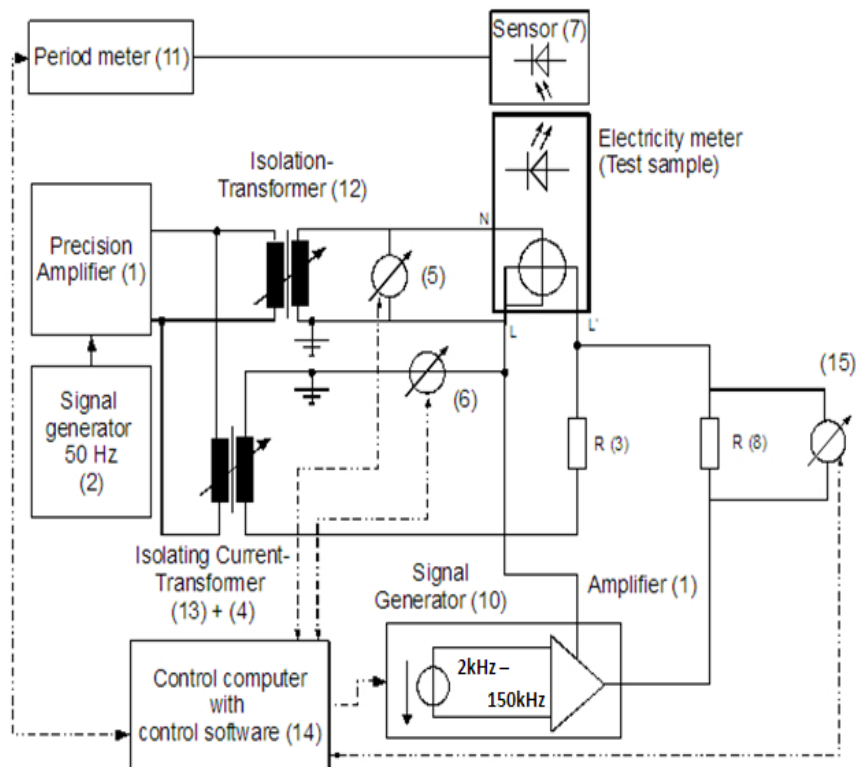


Σχήμα 7.6. Πειραματική διάταξη για την πραγματοποίηση δοκιμών σε συχνότητες μέχρι τα 50 kHz [258]

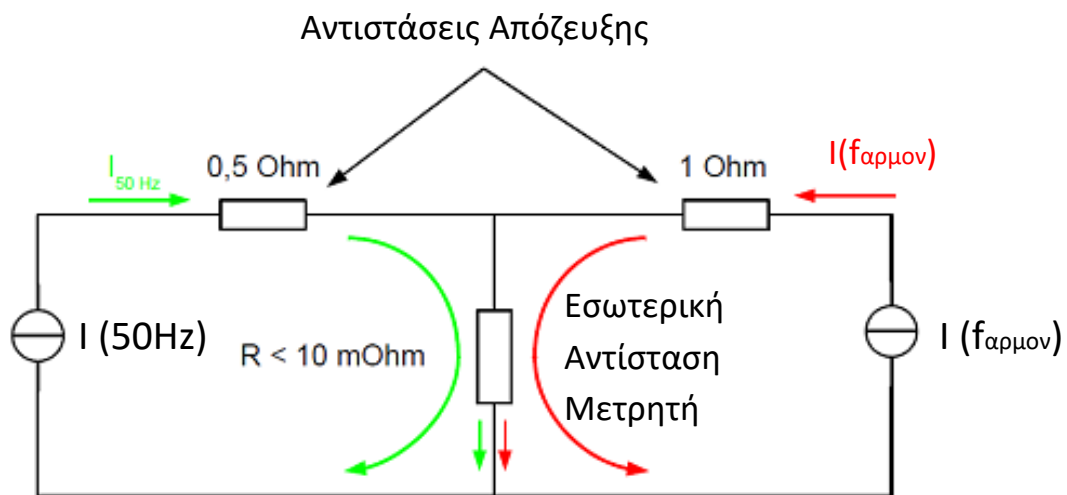
Διαδικασίες δοκιμών ατρωσίας ηλεκτρονικών μετρητών για την περιοχή συχνοτήτων 2 kHz -150 kHz προτάθηκαν για πρώτη φορά στην προαναφερθείσα οδηγία της VDE-FNN [236], όπου περιγράφονται δύο διαφορετικές διατάξεις που παρουσιάζονται παρακάτω.

7.4.1.1) Διάταξη άμεσης (αγώγιμης) έγχυσης αρμονικών

Το βασικό χαρακτηριστικό της διάταξης αυτής είναι η άμεση έγχυση των αρμονικών στο κύκλωμα. Η διάταξη μπορεί να χωριστεί σε κύκλωμα θεμελιώδους συχνότητας και σε κύκλωμα υψηλότερων συχνοτήτων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.7. Το υψίσυχο ρεύμα (διαταραχή) υπερτίθεται στο θεμελιώδες ρεύμα και το συνολικό ρεύμα διέρχεται από τον μετρητή (Σχήμα 7.8). Το κύκλωμα θεμελιώδους συχνότητας αποτελείται από πηγή ακριβείας που πρέπει να έχει τη δυνατότητα να παράγει ένα καθαρό ημίτονο στα 50 Hz (χαμηλό THD, μικρότερο του 1%) ώστε να μην εισάγονται αρμονικές που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τις μετρήσεις. Η διάταξη περιλαμβάνει δύο ξεχωριστά κυκλώματα που συνδέονται με τον μετρητή, το κύκλωμα τάσης και το κύκλωμα ρεύματος. Το κύκλωμα υψηλών συχνοτήτων περιλαμβάνει τη γεννήτρια διαταραχών, η οποία αποτελείται από γεννήτρια συχνοτήτων και ενισχυτή ισχύος για την παραγωγή των αρμονικών του ρεύματος. Τέλος, χρησιμοποιούνται δύο αντιστάσεις απόζευξης προκειμένου να γίνει δυνατή η σύνδεση της πηγής ακριβείας (50 Hz) με τη γεννήτρια διαταραχών. Ένας μετρητής ενέργειας υψηλής ακρίβειας (π.χ. αναλυτής ισχύος) χρησιμοποιείται ως όργανο αναφοράς. Η δοκιμή ελέγχεται από λογισμικό σε υπολογιστή που οδηγεί τη σάρωση συχνοτήτων στο επιθυμητό εύρος.



Σχήμα 7.7. Εργαστηριακή διάταξη άμεσης έγχυσης αρμονικών [236][259]

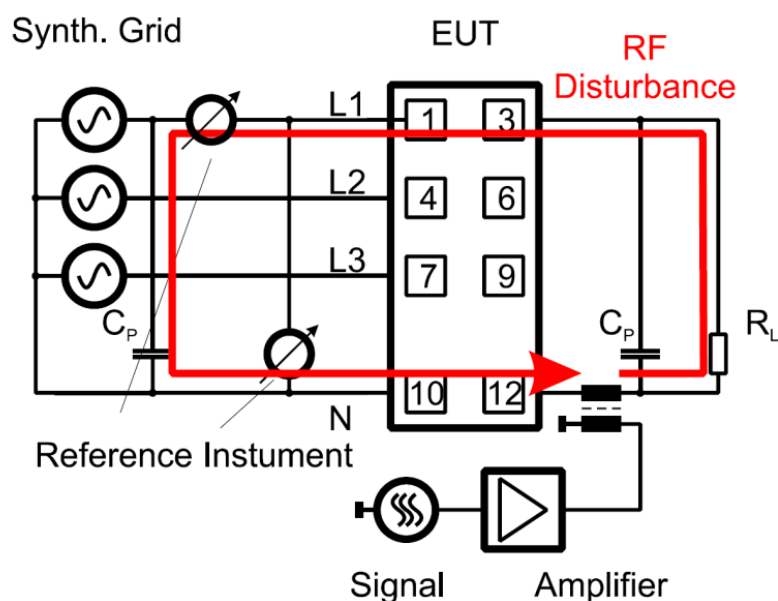


Σχήμα 7.8. Απλουστευμένο σχέδιο της διάταξης άμεσης έγχυσης αρμονικών [236]

7.4.1.2) Διάταξη έμμεσης έγχυσης αρμονικών

Σε αυτή τη διάταξη οι υψίσυχνες αρμονικές επάγονται έμμεσα στο κύκλωμα ισχύος. Χρησιμοποιείται προσομοιωτής AC δικτύου με πολύ χαμηλό THD (τουλάχιστον κατά EN 61000-3-2) για την παραγωγή καθαρού ημιτόνου τάσης 230V/50Hz. Παράλληλα στον προσομοιωτή δικτύου συνδέεται ωμικό φορτίο (R_L) από το οποίο προκύπτει το θεμελιώδες

ρεύμα (50 Hz), όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.9. Δύο πυκνωτές (C_p) συνδέονται στην πηγή τάσης και στο φορτίο προκειμένου να εγχέονται αρμονικές ρεύματος μεγαλύτερου πλάτους (χαμηλότερη αντίσταση σε υψηλές συχνότητες) και να μην ρέουν αρμονικές ρεύματος στον προσομοιωτή δικτύου. Για την παραγωγή των αρμονικών ρεύματος χρησιμοποιείται γεννήτρια συχνοτήτων που συνδέεται σε ενισχυτή ισχύος. Οι αρμονικές εγχέονται στο κύκλωμα 50 Hz μέσω κατάλληλης συσκευής ζεύξης (ειδικός μετασχηματιστής για υψηλές συχνότητες). Ως όργανο αναφοράς χρησιμοποιείται μετρητής ενέργειας υψηλής ακρίβειας (π.χ. αναλυτής ισχύος).



Σχήμα 7.9. Εργαστηριακή διάταξη έμμεσης έγχυσης αρμονικών [206][236][260]

Η διάταξη άμεσης έγχυσης απαιτεί πηγή τάσης χαμηλότερης ισχύος σε σύγκριση με τη διάταξη έμμεσης έγχυσης, εφόσον χρησιμοποιούνται δύο ξεχωριστά κυκλώματα τάσης και ρεύματος, ενώ στη διάταξη έμμεσης έγχυσης το ρεύμα του φορτίου πρέπει να παρέχεται σε τάση 230 V. Η διάταξη έμμεσης έγχυσης είναι απλούστερη και προσομοιώνει πιο ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας, εφόσον στη διάταξη άμεσης έγχυσης η σύνδεση μεταξύ των εισόδων ρεύματος και τάσης του ηλεκτρονικού μετρητή πρέπει να διακοπεί (μέσω ενός “jumper” που αποσυνδέει το κύκλωμα τάσης και ρεύματος και το οποίο είναι κλειστό όταν ο μετρητής είναι κανονικά συνδεδεμένος στο δίκτυο).

7.4.1.3) Το πρότυπο IEC 61000-4-19

Το 2014 δημοσιεύθηκε το πρότυπο IEC 61000-4-19 [259] με τίτλο «Τεχνικές δοκιμών και μετρήσεων - Δοκιμές ατρωσίας έναντι αγόμενων διαφορικών διαταραχών στο εύρος συχνοτήτων από 2 kHz έως 150 kHz σε AC θύρες» που αναφέρεται σε δοκιμές ατρωσίας ηλεκτρονικών μετρητών στο εύρος 2 kHz-150 kHz μεταξύ άλλων συσκευών. Το πρότυπο ορίζει προδιαγραφές του εξοπλισμού και περιγράφει διάταξη δοκιμών. Ειδικότερα, προτείνει διάταξη άμεσης έγχυσης αρμονικών που περιλαμβάνει βρόχο βαθμονόμησης της γεννήτριας διαταραχών, ώστε να επιτυγχάνεται ακρίβεια κατά τη δοκιμή. Εξοπλισμός δοκιμών με βάση αυτό το πρότυπο έχει ήδη εμφανιστεί στην αγορά. Σημειώνεται ότι το

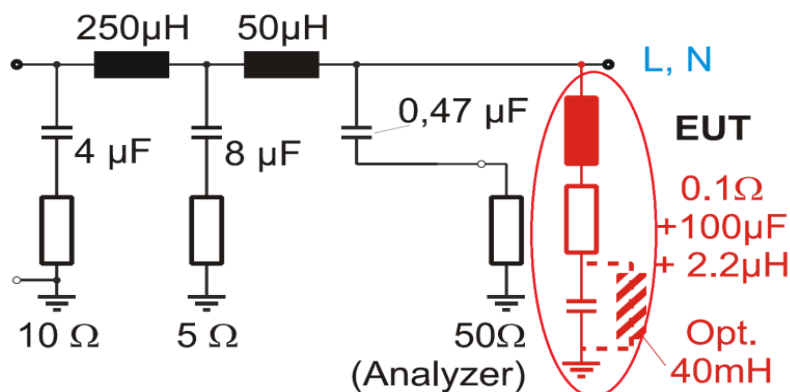
πρότυπο ορίζει διαδικασίες δοκιμών και επίπεδα δοκιμών (τιμές ρεύματος διαταραχής) χωρίς όμως να ορίζει την επιτρεπόμενη απόκλιση της μέτρησης του ηλεκτρονικού μετρητή. Δοκιμές με βάση αυτό το πρότυπο έχουν αναφερθεί στο [261].

Προβληματισμοί έχουν εκφραστεί στο [262] για την αξιοπιστία της προτεινόμενης διαδικασίας δοκιμών ατρωσίας στο IEC 61000-4-19. Σε αυτή τη δημοσίευση προτείνεται μια εναλλακτική διαδικασία δοκιμών ατρωσίας που εφαρμόζει ευρυζωνικούς παλμούς δοκιμής στον μετρητή, σε αντίθεση με τη σάρωση μεμονωμένων συχνοτήτων που υιοθετήθηκε στο πρότυπο.

7.4.2) Διατάξεις εκπομπών

Τα διεθνή πρότυπα προτείνουν τη χρήση «κυκλωμάτων σταθεροποίησης αντίστασης γραμμής» (Line Impedance Stabilization Networks - LISN) για τις δοκιμών εκπομπών διαφόρων συσκευών. Υπάρχουν δύο βασικοί λόγοι για τη χρήση «κυκλωμάτων σταθεροποίησης αντίστασης γραμμής». Ο πρώτος είναι η αποτροπή του εξωτερικού θορύβου από το να επηρεάσει τις μετρήσεις. Ο δεύτερος είναι η παρουσίαση σταθερής αντίστασης στην έξοδο της συσκευής-υπό-δοκιμή στο εύρος συχνοτήτων που διεξάγεται η δοκιμή εκπομπών [263].

Το πρότυπο CISPR11/EN55011 [231] περιλαμβάνει διάταξη δοκιμών (LISN) επαγωγικής εστίας στο εύρος 9 kHz-150 kHz. Η συγκεκριμένη διάταξη παρουσιάζει σχετικά υψηλή αντίσταση δικτύου, οπότε δεν είναι κατάλληλη για δοκιμές εκπομπών σε αντιστροφείς, εφόσον το ρεύμα διαταραχής του αντιστροφέα περιορίζεται από τη διαφορική αντίσταση του LISN. Μία διάταξη με χαμηλότερη αντίσταση δικτύου προτείνεται στο [206], που λαμβάνει υπόψη τη χαμηλή διαφορική αντίσταση στα σύγχρονα δίκτυα διανομής εξαιτίας της υψηλής ενσωμάτωσης διακοπτόμενων τροφοδοτικών και EMC φίλτρων. Βασίζεται στη διάταξη του CISPR11/EN55011 με την προσθήκη των στοιχείων εντός του κύκλου που φαίνονται στο Σχήμα 7.10 (η συσκευή-υπό-δοκιμή (EUT) συνδέεται στη δεξιά πλευρά της διάταξης). Στο IEC/TS 62578:2015 προτείνεται «κύκλωμα σταθεροποίησης αντίστασης γραμμής» (LISN) για ενεργούς μετατροπείς (AIC) στο εύρος 2 kHz-9 kHz. Επίσης, η ομάδα εργασίας IEC SC 77A/WG6 εργάζεται επί του παρόντος στην ανάπτυξη μεθόδων δοκιμών εκπομπών [219].



Σχήμα 7.10. Τροποποιημένη διάταξη δοκιμών του CISPR 11 για δοκιμές εκπομπών Φ/Β αντιστροφών [206]

7.5) Πραγματοποίηση δοκιμών

7.5.1) Δοκιμές ατρωσίας ηλεκτρονικών μετρητών

7.5.1.1) Μέθοδος έμμεσης έγχυσης στο εύρος 9 kHz-150 kHz

Δοκιμάστηκαν τρεις ηλεκτρονικοί μετρητές διαφορετικών κατασκευαστών (πληροφορίες για τις κλάσεις A, B και C αναφέρονται στην παράγραφο 7.3.2.1).

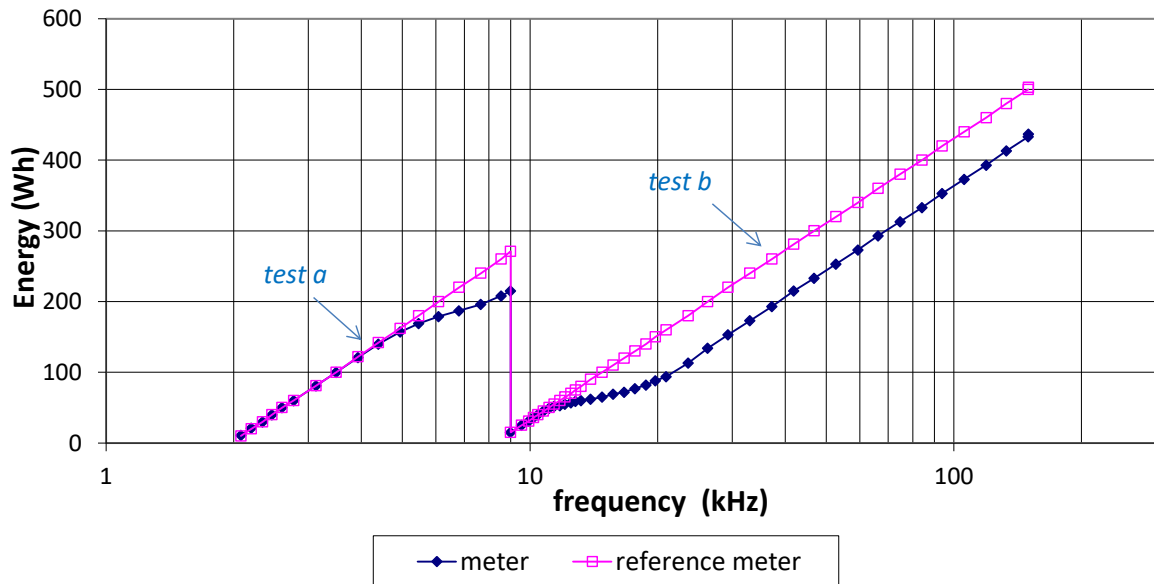
- Μετρητής A: Μετρητής XT χωρίς μετασχηματιστή έντασης, κλάση B ενεργός ισχύς, κλάση 2 άεργος ισχύς.
- Μετρητής B: Μετρητής XT χωρίς μετασχηματιστή έντασης, κλάση B ενεργός ισχύς, κλάση 1 άεργος ισχύς.
- Μετρητής Γ: Μετρητής XT με μετασχηματιστή έντασης 400A/5A, κλάση B ενεργός ισχύς, κλάση 2 άεργος ισχύς.

Εφαρμόζεται η προαναφερθείσα μέθοδος έμμεσης έγχυσης (Σχήμα 7.9). Οι ηλεκτρονικοί μετρητές διαθέτουν οπτική έξοδο που αναβοσβήνει με ορισμένη συχνότητα (π.χ. 500 φορές για 1 kWh). Αυτοί οι παλμοί μετατρέπονται σε ηλεκτρικά σήματα μέσω οπτικού ανιχνευτή και στέλνονται σε ψηφιακό μετρητή ώστε να καταγράφεται η μετρούμενη ενέργεια. Επιπλέον, χρησιμοποιείται αναλυτής ισχύος ως μετρητής αναφοράς κατά τη δοκιμή.

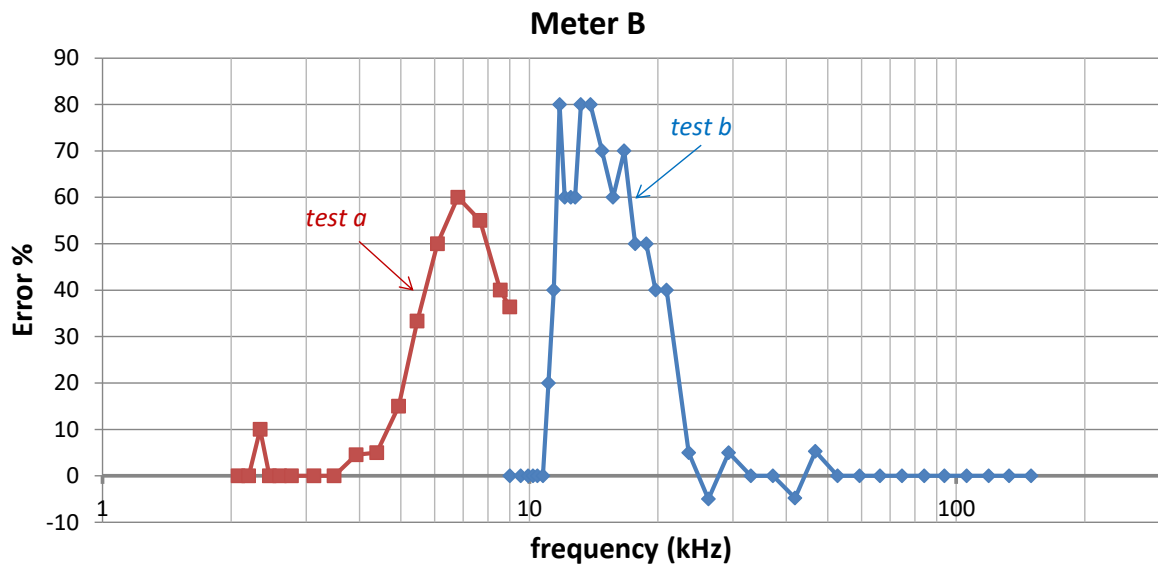
Υλοποιήθηκαν δοκιμές στο εύρος 9 kHz-150 kHz. Η συχνότητα του ρεύματος διαταραχής αυξανόταν από το λογισμικό της γεννήτριας συχνοτήτων κατά 1% της προηγούμενης τιμής κάθε 6 δευτερόλεπτα. Για τις συχνότητες μεταξύ 9 kHz και 25 kHz η rms τιμή του υψίσυχνου ρεύματος ήταν ίση με 3 A, ενώ για τις συχνότητες μεταξύ 25 kHz και 150 kHz ήταν ίση με 1 A, δηλαδή χρησιμοποιήθηκαν πιο αυστηρές τιμές από τις προτεινόμενες στις οδηγίες/τεχνικές αναφορές (Πίνακας 7.2). Η ισχύς του φορτίου στις δοκιμές των μετρητών A, B και Γ - με αποσυνδεδεμένο τον μετασχηματιστή έντασης - ήταν ίση με 1 kW, ενώ στη δοκιμή του μετρητή Γ - με συνδεδεμένο τον μετασχηματιστή έντασης - ήταν ίση με 2 kW (ώστε να μετρηθεί περισσότερη ενέργεια εξαιτίας του μετασχηματιστή). Η καταναλισκόμενη ενέργεια στο φορτίο (ωμική αντίσταση) καταγραφόταν ταυτόχρονα από τον ηλεκτρονικό μετρητή (μέσω της οπτικής εξόδου) και από αναλυτή ισχύος κατά τη «σάρωση» του εύρους συχνοτήτων. Το Σχήμα 7.11b παρουσιάζει τη μετρούμενη ενέργεια του μετρητή B, όπου χρησιμοποιείται λογαριθμική κλίμακα για τις τιμές της συχνότητας. Ο μετρητής επηρεάζεται μεταξύ των συχνοτήτων 5 kHz και 20 kHz, εφόσον κάτω και πάνω από αυτές τις τιμές οι δύο καμπύλες έχουν την ίδια κλίση. Στο Σχήμα 7.12b παριστάνεται το σχετικό σφάλμα στη μετρούμενη ενέργεια του μετρητή για κάθε συχνότητα κατά τη «σάρωση» συχνοτήτων. Το σφάλμα στη μετρούμενη ενέργεια των μετρητών A και Γ αναγράφεται στον Πίνακα 7.3 στην παράγραφο 7.5.3.

Οι μετρήσεις δείχνουν πως ο μετρητής A παρουσιάζει αποδεκτή απόκλιση ίση με -0.13% στην καταγραφή της συνολικής ενέργειας. Απεναντίας ο μετρητής B παρουσιάζει σημαντικό σφάλμα στην καταγραφή της ενέργειας ίσο με -13.12%. Ο μετρητής Γ που διαθέτει μετασχηματιστή έντασης παρουσιάζει αποδεκτή απόκλιση ίση με -0.20%. Εν συνεχεία, αποσυνδέθηκε ο μετασχηματιστής έντασης και ο μετρητής Γ συνδέθηκε απευθείας στο κύκλωμα, όπου παρουσίασε ιδιαίτερα μεγάλο σφάλμα ίσο με -92.46%. Αυτή

η συμπεριφορά είναι αποδεκτή, εφόσον ο μετρητής Γ είναι κατασκευασμένος για να λειτουργεί μόνο με μετασχηματιστή έντασης, ο οποίος περιορίζει αισθητά το πλάτος των υψίσυχνων αρμονικών.



Σχήμα 7.11. Δοκιμές ατρωσίας του μετρητή Β στο εύρος 2 kHz-9 kHz (α) και 9 kHz-150 kHz (β)



Σχήμα 7.12. Σχετικό σφάλμα στη μετρούμενη ενέργεια του μετρητή Β για κάθε συχνότητα στο εύρος 2 kHz-9 kHz (α) και 9 kHz-150 kHz (β)

7.5.1.2) Μέθοδος άμεσης έγχυσης στο εύρος 9 kHz-150 kHz

Χρησιμοποιήθηκε η προαναφερθείσα διάταξη άμεσης έγχυσης (με βάση το Σχήμα 7.7) με τριφασικές πηγές τάσης και έντασης για τη θεμελιώδη τάση και το ρεύμα αντίστοιχα. Οι πηγές τάσης και έντασης, η γεννήτρια διαταραχών και ο μετρητής αναφοράς (αναλυτής ισχύος) ελέγχονταν από ξεχωριστά λογισμικά των κατασκευαστών. Οι μετρήσεις των παραγόμενων παλμών από τον ηλεκτρονικό μετρητή (δηλαδή η καταγραφή της ενέργειας) εισάγονταν στο ίδιο λογισμικό με τον μετρητή αναφοράς. Έτσι, η μετρούμενη ενέργεια από τον ηλεκτρονικό μετρητή και τον μετρητή αναφοράς μπορούσαν να συγκριθούν άμεσα. Εφαρμόστηκαν οι ίδιες τιμές ρεύματος διαταραχής με τη δοκιμή έμμεσης έγχυσης και το θεμελιώδες ρεύμα ήταν ίσο με 5 A. Πραγματοποιήθηκε δοκιμή στον Μετρητή Β και το συνολικό σφάλμα στην καταγραφή της ενέργειας ήταν ίσο με -17.93%.

7.5.1.3) Δοκιμές στο εύρος 2 kHz-9 kHz

Εξαιτίας τεχνικών περιορισμών στην έγχυση του ρεύματος διαταραχής στο κυρίως κύκλωμα σε συχνότητες κάτω των 9 kHz, υλοποιήθηκε διαφορετική διάταξη [260] με βάση τη μέθοδο έμμεσης έγχυσης. Ο προσομοιωτής AC δικτύου (που πρόκειται για γραμμικό ενισχυτή) χρησιμοποιήθηκε ως πηγή των διαταραχών, εφόσον μπορεί να παράγει αρμονικές τάσης μέχρι 9 kHz. Δηλαδή, χρησιμοποιήθηκε παρόμοια διάταξη με το Σχήμα 7.9, χωρίς τη γεννήτρια ραδιοσυχνοτήτων, τον ενισχυτή ραδιοσυχνοτήτων και την ειδική συσκευή ζεύξης. Οι παραγόμενες αρμονικές τάσης εφαρμόστηκαν στο (ωμικό) φορτίο προκαλώντας ροή αρμονικών ρεύματος στο κύκλωμα. Στο λογισμικό του προσομοιωτή δικτύου «σαρώθηκε» το εύρος συχνοτήτων 2 kHz - 9 kHz αυξάνοντας τη συχνότητα κατά 1% της προηγούμενης τιμής κάθε 6 δευτερόλεπτα. Το ρεύμα διαταραχής ήταν ίσο με 3 A. Ο μετρητής Α παρουσίασε σφάλμα +3.20% στην καταγραφή της συνολικής ενέργειας, ενώ ο μετρητής Β παρουσίασε σημαντικό σφάλμα ίσο με -20.66%, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.11α (σε κοινό διάγραμμα με τις συχνότητες 9 kHz-150 kHz). Ο μετρητής Γ με τον μετασχηματιστή έντασης παρουσίασε σφάλμα -1.27%. Ομοίως, στο Σχήμα 7.12α παριστάνεται το σχετικό σφάλμα στη μετρούμενη ενέργεια του μετρητή Β για κάθε συχνότητα. Αξίζει να σημειωθεί πως σε αυτή τη μέθοδο ο μετρητής εκτίθεται ταυτόχρονα σε αρμονικές ρεύματος και τάσης οδηγώντας σε μεγαλύτερα σφάλματα, ενώ η μέγιστη επιτρεπτή απόκλιση στις οδηγίες/τεχνικές αναφορές (Πίνακας 7.2) αναφέρεται μόνο σε αρμονικές ρεύματος.

Συμπερασματικά για τις δοκιμές ατρωσίας, ο μετρητής Β κατέγραψε σημαντικά εσφαλμένη ενέργεια στις περιοχές 2 kHz - 9 kHz και 9 kHz - 150 kHz σε σχέση με τα προτεινόμενα όρια (Πίνακας 7.2). Οι μετρητές Α και Γ (με τον μετασχηματιστή έντασης) παρουσίασαν αποδεκτό σφάλμα στην περιοχή 9 kHz - 150 kHz. Ο μετρητής Α ήταν λίγο εκτός ορίων (σε σχέση με την οδηγία της VDE-FNN) στην περιοχή 2 kHz - 9 kHz, ενώ ο μετρητής Γ παρουσίασε αποδεκτό σφάλμα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 7.3 στην παράγραφο 7.5.3. Όπως αναφέρθηκε, οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με μεγαλύτερο ρεύμα διαταραχής στο εύρος 2 kHz - 25 kHz από το προτεινόμενο στις οδηγίες/τεχνικές αναφορές (Πίνακας 7.2) για να εντοπιστούν δυσλειτουργίες των μετρητών.

7.5.2) Δοκιμές εκπομπών φωτοβολταϊκών αντιστροφών

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εκπομπών σε δύο μονοφασικούς Φ/Β αντιστροφείς (χωρίς εσωτερικό μετασχηματιστή) διαφορετικών κατασκευαστών.

- Αντιστροφέας A: σύγχρονος αντιστροφέας
- Αντιστροφέας B: αντιστροφέας παλαιότερης τεχνολογίας (κατασκευασμένος το 2004)

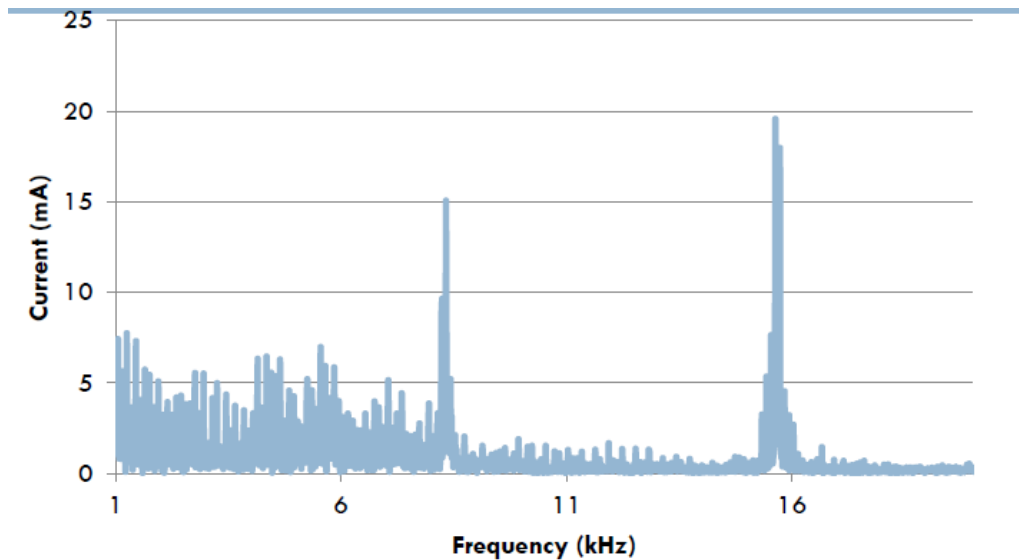
Χρησιμοποιήθηκε DC πηγή ως είσοδος στους αντιστροφείς και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις αρμονικών από μετρητικό όργανο που λειτουργεί στο πεδίο της συχνότητας. Για κάθε αντιστροφέα μετρήθηκε το ρεύμα και η τάση στους AC ακροδέκτες. Αρχικά οι αντιστροφείς συνδέθηκαν στο προαναφερόμενο «κύκλωμα σταθεροποίησης αντίστασης γραμμής» (LISN) του CISPR11/EN55011. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 7.4.2, η διάταξη αυτή παρουσιάζει σχετικά υψηλή αρμονική αντίσταση για δοκιμές αντιστροφών [206], οπότε στη συνέχεια συνδέθηκε επιπλέον πυκνωτής μεταξύ της φάσης και του ουδετέρου των αντιστροφών. Οι μετρήσεις στο εύρος 9 kHz - 150 kHz δείχνουν πως ο αντιστροφέας B, που είναι παλαιότερης τεχνολογίας, εγγχεί υψηλότερο ρεύμα διαταραχής από τον αντιστροφέα A. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο [A.3].

Επιπλέον, διεξήχθησαν μετρήσεις υψίσυχων αρμονικών ρεύματος ενός επιπλέον αντιστροφέα Φ/Β ονομαστικής ισχύος 1.1 kW και αντιστροφέα συσσωρευτών ονομαστικής ισχύος 3.3 kW. Για τη μέτρηση των αρμονικών χρησιμοποιήθηκε αναλυτής ισχύος (Σχήμα 7.13) που πραγματοποιεί μετρήσεις στο πεδίο του χρόνου.



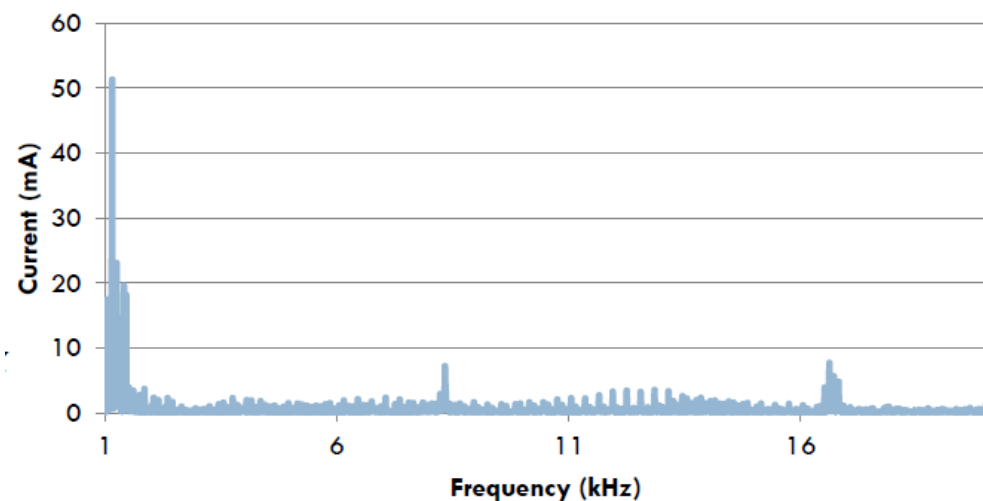
Σχήμα 7.13. Αναλυτής ισχύος (Yokogawa) που επιτρέπει τη μέτρηση υψίσυχων αρμονικών ρεύματος αντιστροφών

Ο Φ/Β αντιστροφέας συνδέθηκε στο δίκτυο και καταγράφηκαν οι αρμονικές ρεύματος στις συχνότητες 1 kHz-20 kHz. Το θεμελιώδες ρεύμα του αντιστροφέα ήταν ίσο με 3.5 A. Στο Σχήμα 7.14 φαίνεται το μέγιστο υψίσυχο ρεύμα ίσο με 19 mA στη συχνότητα 16 kHz, η οποία είναι η διακοπτική συχνότητα του αντιστροφέα.



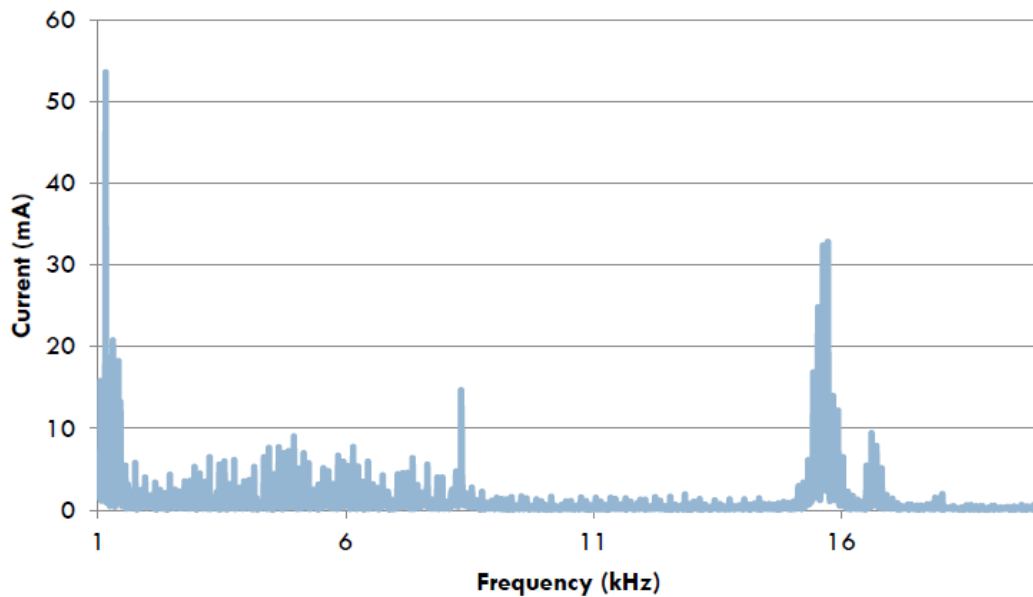
Σχήμα 7.14. Αρμονικές ρεύματος του αντιστροφέα Φ/Β στο εύρος συχνοτήτων 1 kHz - 20 kHz

Στη συνέχεια συνδέθηκε στο δίκτυο αντιστροφέας συσσωρευτών με θεμελιώδες ρεύμα ίσο με 2.5 A. Στο Σχήμα 7.15 φαίνεται το μέγιστο υψίσυχο ρεύμα ίσο με 9 mA στη συχνότητα 16.6 kHz, η οποία είναι η διακοπτική συχνότητα του αντιστροφέα.



Σχήμα 7.15. Αρμονικές ρεύματος του αντιστροφέα συσσωρευτών στο εύρος συχνοτήτων 1 kHz - 20 kHz

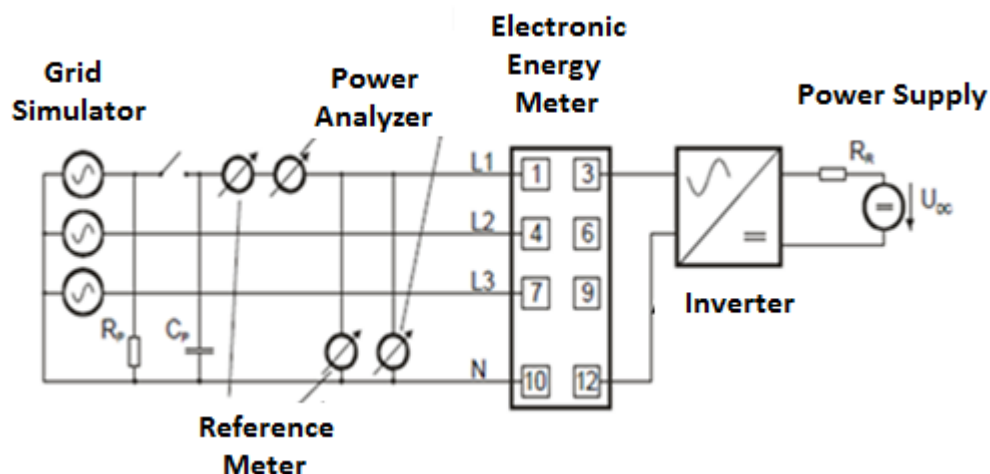
Τέλος, και οι δύο αντιστροφείς συνδέθηκαν παράλληλα στο δίκτυο με θεμελιώδες ρεύμα του Φ/Β αντιστροφέα ίσο με 3.5 A και του αντιστροφέα συσσωρευτών ίσο με 2.5 A. Στο Σχήμα 7.16 φαίνονται οι μέγιστες τιμές αρμονικών ρεύματος στις συχνότητες 16 kHz και 16.6 kHz, ενώ το ρεύμα στα 16 kHz παίρνει υψηλότερη τιμή ίση με 32 mA.



Σχήμα 7.16. Αρμονικές ρεύματος κατά την παράλληλη λειτουργία των αντιστροφών Φ/Β και συσσωρευτών στο εύρος συχνοτήτων 1 kHz-20 kHz

7.5.3) Δοκιμές παράλληλης λειτουργίας αντιστροφέα και μετρητή

Τέλος, υλοποιήθηκε διάταξη [260] που προσομοιώνει τη συνδυασμένη λειτουργία Φ/Β αντιστροφέα και ηλεκτρονικού μετρητή που συναντάται στην πράξη και παριστάνεται στο Σχήμα 7.17. Πυκνωτής (C_p) συνδέθηκε στη έξοδο του προσομοιωτή AC δικτύου ώστε να προκαλέσει αυξημένη ροή αρμονικών ρεύματος, οι οποίες διέρχονται από τον ηλεκτρονικό μετρητή. Στη DC πλευρά του αντιστροφέα συνδέθηκε DC πηγή. Η παραγόμενη ενέργεια από τον Φ/Β αντιστροφέα καταγράφηκε από τον ηλεκτρονικό μετρητή και μετρητή αναφοράς.



Σχήμα 7.17. Διάταξη δοκιμών της παράλληλης λειτουργίας αντιστροφέα και μετρητή [260]

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με τους προαναφερθέντες δύο Φ/Β αντιστροφείς και τους τρεις ηλεκτρονικούς μετρητές. Το σφάλμα που προέκυψε στην καταγραφή της ενέργειας

παρατίθεται στον Πίνακα 7.3 (που περιλαμβάνει και τα αποτελέσματα των δοκιμών ατρωσίας της παραγράφου 7.5.1).

	Μετρητής Α	Μετρητής Β	Μετρητής Γ (με Μ/Σ)
<i>Δοκιμές ατρωσίας μετρητών:</i>			
Μέθοδος έμμεσης έγχυσης: 9 kHz – 150 kHz	-0.13%	-13.12%	-0.20%
Μέθοδος άμεσης έγχυσης: 9 kHz – 150 kHz	-	-17.93%	-
Δοκιμή 2 kHz – 9 kHz	+3.20%	-20.66%	-1.27%
<i>Παράλληλη λειτουργία αντιστροφών και μετρητών:</i>			
Αντιστροφέας Α	-	-0.61%	-0.17%
Αντιστροφέας Β	+0.20%	-3.66%	-0.06%

Πίνακας 7.3. Σφάλματα μέτρησης κατά τις δοκιμές

Ο μετρητής Β που παρουσίασε προβληματική συμπεριφορά στις δοκιμές ατρωσίας, λειτουργεί ικανοποιητικά με τον σύγχρονο αντιστροφέα Α. Από την άλλη, παρουσιάζει αξιοσημείωτο σφάλμα κατά τη λειτουργία με τον αντιστροφέα Β παλαιότερης τεχνολογίας, εφόσον εγχέει αρμονικές μεγαλύτερου πλάτους. Οι υπόλοιποι μετρητές παρουσίασαν μικρά σφάλματα.

7.6) Σύνοψη και συμπεράσματα

Υπογραμμίζεται η ύπαρξη κενού στην τυποποίηση της ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας και των εκπομπών στο εύρος 2 kHz-150 kHz. Ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές Φ/Β αντιστροφών και άλλων συσκευών ηλεκτρονικών ισχύος έχουν οδηγήσει σε ανακριβή καταγραφή της ενέργειας των ηλεκτρονικών μετρητών σε αρκετές περιπτώσεις. Το πρόβλημα μπορεί να λυθεί μέσω ορθής και έγκαιρης τυποποίησης, όμως ενδεχομένως να απαιτηθούν δαπανηρά μέτρα (π.χ. αντικατάσταση εξοπλισμού). Η επιβολή μόνο αυστηρών απαιτήσεων ατρωσίας στους έξυπνους μετρητές δεν μπορεί να αποτελέσει λύση. Καθώς εμπλέκονται διάφοροι τύποι εξοπλισμού, είναι αναγκαία μια γενικότερη λύση, δηλαδή ο καθορισμός επιπέδων συμβατότητας. Με βάση τα επίπεδα συμβατότητας, θα πρέπει να καθοριστούν όρια εκπομπών και απαιτήσεις ατρωσίας. Τα ήδη δημοσιευμένα πρότυπα/οδηγίες/αναφορές για την ατρωσία και τις εκπομπές στην περιοχή 2 kHz -150 kHz μπορούν να θεωρηθούν προσωρινές λύσεις. Επιπλέον, ο καθορισμός κατάλληλων διαδικασιών δοκιμών είναι σημαντικός. Οι οργανισμοί τυποποίησης εργάζονται σε αυτά τα ζητήματα λαμβάνοντας υπόψη τις απόψεις των κατασκευαστών και των επιχειρήσεων ηλεκτρισμού.

Σε αυτό το Κεφάλαιο μελετώνται τα παραπάνω θέματα, αναδεικνύεται η τρέχουσα κατάσταση (διαφορετικές απαιτήσεις στα υπάρχοντα έγγραφα, ανεπαρκείς προδιαγραφές δοκιμών, αντιπαράθεση μεταξύ οργανισμών) και οι υπολειπόμενες εργασίες και παρουσιάζονται εργαστηριακά αποτελέσματα δοκιμών ατρωσίας ηλεκτρονικών μετρητών και εκπομπών αντιστροφών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΣΥΝΟΨΗ, ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΣΥΜΒΟΛΗ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΣΥΝΕΧΙΣΗ

8.1) Σύνοψη και συμπεράσματα

Οι προκλήσεις που προκύπτουν από την αυξανόμενη ενσωμάτωση ΔΠ, συχνά από ανανεώσιμες πηγές, απαιτούν προηγμένες προσεγγίσεις τόσο στην προσομοίωση των ΣΗΕ, όσο και στις δοκιμές εξοπλισμού ισχύος. Η μέθοδος PHIL δυνητικά μπορεί από τη μία να συμβάλλει στη μετάβαση από τις δοκιμές μεμονωμένων συσκευών σε δοκιμές σε επίπεδο συστήματος και από την άλλη να υπερβεί τη δυσκολία πλήρους μοντελοποίησης πολύπλοκων συσκευών των αμιγώς ψηφιακών προσομοιώσεων σε συγκεκριμένες περιπτώσεις. Όμως, ως σχετικά νέα μέθοδος, υπάρχουν προκλήσεις που περιορίζουν την ευρεία χρήση της.

Επίσης, έχει πλέον αναγνωριστεί ευρέως η αναγκαιότητα παροχής επικουρικών υπηρεσιών από τις μονάδες ΔΠ, που αντικατοπτρίζεται σε πλήθος προτύπων/οδηγιών που έχουν δημοσιευθεί τα τελευταία χρόνια. Η ανάλυση σύνθετων αλληλεπιδράσεων στα δίκτυα διανομής που περιλαμβάνουν μονάδες ΔΠ με λειτουργίες επικουρικών υπηρεσιών αποκτά αυξανόμενο ενδιαφέρον. Επιπλέον, η ανάδυση των ευφών δικτύων καθιστά αναγκαία τη μελέτη της επίδρασης της ΔΠ στους ηλεκτρονικούς μετρητές, που εγκαθίστανται όλο και περισσότερο στα δίκτυα διανομής. Η αποτελεσματική εκπαίδευση των φοιτητών σε σύγχρονα θέματα των ΣΗΕ είναι σημαντική, δεδομένων των προκλήσεων της αυξανόμενης ενσωμάτωσης ΔΠ.

Στη διατριβή καταρχάς αναλύθηκαν ζητήματα ευστάθειας και ακρίβειας της PHIL μεθόδου. Περιγράφηκαν και συγκρίθηκαν μέθοδοι εκτίμησης της ευστάθειας (κριτήρια Nyquist και Routh-Hurwitz, γεωμετρικός τόπος ριζών, δυναμική προσομοίωση). Χρησιμοποιώντας το κριτήριο Routh-Hurwitz, αποδείχτηκε πως η προσέγγιση Padé πρώτης τάξης για τη χρονική καθυστέρηση που προτείνεται στη βιβλιογραφία είναι ανεπαρκής και εφαρμόστηκε προσέγγιση δεύτερης τάξης με καλύτερα αποτελέσματα. Η εκτίμηση της ευστάθειας και της ακρίβειας είναι δύσκολη σε πολλές περιπτώσεις που το φυσικό σύστημα δεν είναι γνωστό με ακρίβεια. Επίσης, η επίτευξη ευστάθειας διατηρώντας ικανοποιητική ακρίβεια αποτελεί πρόκληση. Προτάθηκε νέα μέθοδος για την επίτευξη ευστάθειας που διατηρεί καλή ακρίβεια, κατά την οποία μεταφέρεται σύνθετη αντίσταση από το προσομοιωμένο στο φυσικό σύστημα και πραγματοποιείται αλλαγή κλίμακας. Ποσοτικοποιήθηκε η σημαντική βελτίωση της ακρίβειας σε σχέση με την κοινή πρακτική της εισαγωγής φίλτρου ανατροφοδότησης. Εφαρμόζοντας κατάλληλη αλλαγή κλίμακας, η μέθοδος επιτρέπει τη χρήση μίας συσκευής χαμηλότερης ισχύος για την εκτίμηση της συμπεριφοράς της συσκευής πλήρους ισχύος. Η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόστηκε σε δίκτυο διανομής που περιλαμβάνει ΔΠ.

Στη συνέχεια παρουσιάστηκαν μέθοδοι παροχής επικουρικών υπηρεσιών από μονάδες ΔΠ, με έμφαση στη ρύθμιση τάσης και συχνότητας, και εξηγήθηκε το ζήτημα της ευστάθειας του ελεγκτή τάσης-αέργου ισχύος ($Q(V)$). Έγινε συγκριτική ανάλυση των σχετικών προτύπων/οδηγιών που έχουν δημοσιευτεί τα τελευταία χρόνια. Εντοπίστηκαν αντιφάσεις,

ασαφείς και ελλιπείς απαιτήσεις και τονίστηκαν υποσχόμενες προσεγγίσεις. Η απουσία εναρμόνισης σε συγκεκριμένες απαιτήσεις δυσκολεύει τους κατασκευαστές εξοπλισμού αλλά και τα εργαστήρια διαπιστευμένων δοκιμών. Ειδικότερα, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για τη λειτουργία του Q(V) ελέγχου σε ασύμμετρες συνθήκες που έδειξαν την ανάγκη καθορισμού ξεκάθαρων απαιτήσεων για την αποφυγή μελλοντικών προβλημάτων. Τονίστηκε η σημασία της έγκαιρης πρόβλεψης πιθανών προβλημάτων στη διαδικασία τυποποίησης, ώστε να αποφεύγονται δύσκολες λύσεις στο μέλλον. Επιπλέον, απαιτούνται ολοκληρωμένες διαδικασίες εργαστηριακών δοκιμών για τις προηγμένες λειτουργίες επικουρικών υπηρεσιών ΔΠ. Αναφέρθηκαν συνοπτικά υφιστάμενες διαδικασίες δοκιμών και προτάθηκαν προηγμένες διαδικασίες δοκιμών συμβατικού τύπου για συγκεκριμένες απαιτήσεις, αλλά και για προηγμένες λειτουργίες που δεν έχουν ακόμα οριστεί σε βάθος στα πρότυπα. Έγινε φανερό πως εξαιτίας της εγγενούς πολυπλοκότητας της ΔΠ και των προηγμένων πρόσφατων απαιτήσεων, πολλές παράμετροι και περιορισμοί πρέπει να ληφθούν υπόψη για τον εις βάθος έλεγχο της συσκευής υπό δοκιμή. Προτάθηκαν PHIL δοκιμές που λαμβάνουν υπόψη αλληλεπιδράσεις με άλλες συσκευές του συστήματος, που θα ήταν δύσκολο και δαπανηρό να πραγματοποιηθούν σε συμβατικό περιβάλλον δοκιμών. Συμπεραίνεται πως όσο η πολυπλοκότητα των συσκευών/δικτύων αυξάνεται και η PHIL μέθοδος γίνεται πιο ώριμη, είναι πιθανό να χρησιμοποιηθεί μελλοντικά σε τυποποιημένες δοκιμές.

Εν συνεχεία, έγινε λεπτομερής περιγραφή του σχεδιασμού και της ανάπτυξης μίας εργαστηριακής διάταξης PHIL για μελέτες ΔΠ, εστιάζοντας στην ανάπτυξη της διεπαφής ισχύος, σε αλγορίθμους προστασίας για την αντιμετώπιση αστάθειας και σε προβλήματα κατά τη διασύνδεση συσκευών ηλεκτρονικών ισχύος. Η επιτυχημένη ανάπτυξη της εργαστηριακής διάταξης επιβεβαιώνεται μέσω PHIL πειραμάτων, όπου επιτυγχάνεται αλληλεπίδραση κλειστού βρόχου και εισάγονται πραγματικές μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας σε μόνιμη και μεταβατική κατάσταση. Επιπλέον, ορίζονται διαδικασία, τοπολογία και δίκτυο αναφοράς με σκοπό να αποτελέσουν μία κοινή βάση για PHIL πειράματα/δοκιμές, δεδομένης της έλλειψης συστάσεων σε ερευνητικές εργασίες, πρότυπα, οδηγίες και με την προοπτική μελλοντικής χρήσης της μεθόδου σε τυποποιημένες δοκιμές.

Έπειτα, μελετήθηκαν θέματα ρύθμισης τάσης και συχνότητας. Εξετάστηκαν αλληλεπιδράσεις μεταξύ τοπικού ελέγχου τάσης ΔΠ και ΣΑΤΥΦ. Παρουσιάστηκαν πέντε περιπτώσεις προβληματικής συνεργασίας, που οδηγούν σε συχνές αλλαγές λήψης, επιπλέον ροή αέργου ισχύος, αύξηση της τάσης της ΔΠ κ.α. κάνοντας χρήση αμιγώς ψηφιακών προσομοιώσεων. Εφαρμόστηκε η PHIL μέθοδος για την ανάλυση σε επίπεδο συστήματος της συμπεριφοράς μονάδας ΔΠ υψηλής ονομαστικής ισχύος που συνδέεται στη MT. Εμπορικός αντιστροφέας χαμηλότερης ισχύος χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση των αλληλεπιδράσεων του ελεγκτή τάσης του αντιστροφέα πλήρους ισχύος. Η προτεινόμενη μέθοδος μετατόπισης σύνθετης αντίστασης και αλλαγής κλίμακας εφαρμόστηκε με επιτυχία στο εργαστήριο, εξασφαλίζοντας ευστάθεια και παρέχοντας καλή ακρίβεια, παρά την πολυπλοκότητα της τοπολογίας. Οι PHIL δοκιμές με τον πραγματικό αντιστροφέα φανέρωσαν ταλαντώσεις εξαιτίας της αστάθειας του Q(V) ελεγκτή, οι οποίες δεν ήταν ορατές στις αμιγώς ψηφιακές προσομοιώσεις. Επίσης, παρουσιάστηκε επιπλέον πρόβλημα συνεργασίας του ελεγκτή τάσης της ΔΠ και του ΣΑΤΥΦ εξαιτίας της αστάθειας του Q(V)

ελεγκτή (επαναλαμβανόμενες αλλαγές λήψης για σταθερή ενεργό ισχύ της ΔΠ). Επιπλέον, τα αποτελέσματα των PHIL δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν για την επικύρωση μοντέλου ελεγκτή τάσης $Q(V)$ αντιστροφέα ΔΠ. Η επικύρωση έγινε κατά τη διάρκεια αλληλεπιδράσεων σε επίπεδο συστήματος και σε ασταθή λειτουργία του $Q(V)$ ελεγκτή. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε η PHIL μέθοδος για μελέτες ρύθμισης συχνότητας σε απομονωμένο σύστημα, κάνοντας χρήση στατισμού και εικονικής αδράνειας.

Η PHIL μέθοδος εφαρμόστηκε επίσης για εκπαιδευτικούς σκοπούς σε σύγχρονα θέματα της λειτουργίας των ΣΗΕ με ΔΠ. Αναπτύχθηκε προηγμένη διπλή εργαστηριακή διάταξη PHIL για τη δημιουργία δύο πάγκων εργασίας και προσομοιώθηκε ο εξοπλισμός που δεν ήταν διαθέσιμος στο εργαστήριο. Η διάταξη επέτρεψε τη χρήση πραγματικού εξοπλισμού από τους φοιτητές σε μικρές ομάδες, σε συνδυασμό με βιωματική μάθηση με βάση το μοντέλο του Kolb. Χρήσιμα εκπαιδευτικά συμπεράσματα προέκυψαν από τις απαντήσεις των φοιτητών και των αποφοίτων σε ερωτηματολόγια. Οι εργαστηριακές ασκήσεις αξιολογήθηκαν σαφώς θετικά και εκτιμήθηκε ιδιαίτερα η χρήση της προσομοίωσης σε πραγματικό χρόνο για εκπαιδευτικούς σκοπούς. Οι φοιτητές έδειξαν έντονο ενδιαφέρον για την ενσωμάτωση σύγχρονων θεμάτων στις εργαστηριακές ασκήσεις και την απόκτηση εμπειρίας χρήσης πραγματικού εξοπλισμού. Επιπλέον, θεώρησαν πολύ χρήσιμη την ένταξη περισσότερων εργαστηριακών ασκήσεων στα μαθήματα των ΣΗΕ.

Τέλος, αναλύθηκε πρόβλημα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών φωτοβολταϊκών αντιστροφέων και άλλων συσκευών ηλεκτρονικών ισχύος, που έχουν οδηγήσει σε ανακριβή καταγραφή της ενέργειας των ηλεκτρονικών μετρητών σε αρκετές περιπτώσεις. Υπογραμμίστηκε η ύπαρξη κενού στην τυποποίηση της ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας και των εκπομπών στο εύρος 2 kHz-150 kHz, περιγράφηκε η τρέχουσα κατάσταση και οι υπολειπόμενες εργασίες. Παρουσιάστηκαν εργαστηριακά αποτελέσματα δοκιμών ατρωσίας ηλεκτρονικών μετρητών και εκπομπών αντιστροφέων. Συμπεραίνεται πως το πρόβλημα μπορεί να λυθεί μέσω ορθής και έγκαιρης τυποποίησης, όμως ενδεχομένως να απαιτηθούν δαπανηρά μέτρα. Η επιβολή αυστηρών απαιτήσεων ατρωσίας μόνο στους ηλεκτρονικούς μετρητές δεν μπορεί να αποτελέσει λύση. Καθώς εμπλέκονται διάφοροι τύποι εξοπλισμού, είναι αναγκαία μια γενικότερη λύση, δηλαδή ο καθορισμός επιπέδων συμβατότητας, με βάση τα οποία θα πρέπει να καθοριστούν όρια εκπομπών και απαιτήσεις ατρωσίας. Έτσι, τα ήδη δημοσιευμένα πρότυπα/οδηγίες/αναφορές για την ατρωσία και τις εκπομπές στην περιοχή 2 kHz-150 kHz μπορούν να θεωρηθούν ως προσωρινές λύσεις. Επιπλέον, ο καθορισμός κατάλληλων διαδικασιών δοκιμών είναι σημαντικός.

8.2) Συμβολή

Η κύρια συμβολή της διατριβής συνοψίζεται στα εξής:

1. Η επίτευξη ευστάθειας χωρίς σημαντικό περιορισμό της ακρίβειας των PHIL πειραμάτων/δοκιμών αποτελεί πρόκληση. Προτάθηκε νέα μέθοδος για την επίτευξη ευστάθειας που διατηρεί καλή ακρίβεια, κατά την οποία μεταφέρεται σύνθετη αντίσταση από το προσομοιωμένο στο φυσικό σύστημα και πραγματοποιείται αλλαγή κλίμακας. Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί ευρέως, δεν είναι πολύπλοκη και δεν

απαιτεί την εισαγωγή φίλτρων στο φυσικό σύστημα και επιπλέον αλγορίθμων στο λογισμικό του ΨΠΠΧ. Ποσοτικοποιήθηκε η σημαντική βελτίωση της ακρίβειας σε σχέση με την κοινή πρακτική της εισαγωγής φίλτρου ανατροφοδότησης. Επιπλέον, εφαρμόζοντας κατάλληλη αλλαγή κλίμακας, η μέθοδος επιτρέπει τη χρήση μίας μικρότερης συσκευής για την εκτίμηση της συμπεριφοράς της συσκευής πλήρους κλίμακας. Αυτή η δυνατότητα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιπτώσεις που είναι δύσκολη και δαπανηρή η πραγματοποίηση PHIL δοκιμής πλήρους μεγέθους. Η μέθοδος εφαρμόστηκε με επιτυχία χρησιμοποιώντας αντιστροφέα μικρότερης ισχύος για την εκτίμηση της συμπεριφοράς του αντιστροφέα πλήρους ισχύος και καταγράφηκαν πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις.

2. Οι αμιγώς ψηφιακές προσομοιώσεις είναι η κυρίαρχη μέθοδος για την ανάλυση φαινομένων στα ΣΗΕ, όμως η πολυπλοκότητα των ηλεκτρονικών ισχύος μέσω των οποίων συνδέονται οι μονάδες ΔΠ, μπορεί να δημιουργήσει προκλήσεις σε συγκεκριμένες περιπτώσεις. Από την άλλη, οι συμβατικές δοκιμές εξοπλισμού εξετάζουν μεμονωμένες συσκευές και αγνοούν το σύστημα στο οποίο συνδέονται. Στη διατριβή έγινε φανερό πως σε συγκεκριμένες περιπτώσεις οι PHIL δοκιμές μπορούν να εντοπίσουν αλληλεπιδράσεις (ταλαντώσεις εξαιτίας αστάθειας του $Q(V)$ ελεγκτή) που δεν έχουν παρασταθεί στις αμιγώς ψηφιακές προσομοιώσεις, αναδεικνύοντας την αξία της μεθόδου. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν PHIL δοκιμές που τονίζουν τη δυνατότητα μετάβασης από δοκιμές μεμονωμένου εξοπλισμού σε δοκιμές σε επίπεδο συστήματος.
3. Στις μέρες μας, η εργαστηριακή εκπαίδευση φοιτητών στα ΣΗΕ γίνεται συνήθως χρησιμοποιώντας κατάλληλο λογισμικό και σπανιότερα με μικρές πειραματικές διατάξεις με συγκεκριμένες δυνατότητες. Στην εργασία εφαρμόστηκε η PHIL μέθοδος για εκπαιδευτικούς σκοπούς για πρώτη φορά και φάνηκαν τα πλεονεκτήματά της. Έγινε σαφές πως η PHIL μέθοδος μπορεί να συμβάλει στην εξοικείωση των φοιτητών με πραγματικό εξοπλισμό, διατηρώντας παράλληλα την ευελιξία και τις δυνατότητες μοντελοποίησης των ψηφιακών προσομοιώσεων. Μελετήθηκαν σημαντικά θέματα των σύγχρονων ΣΗΕ σε προηγμένη διπλή διάταξη PHIL.
4. Η επίδραση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών αντιστροφέων ΔΠ στους ηλεκτρονικούς μετρητές μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητες καταστάσεις, λαμβάνοντας υπόψη την αυξανόμενη εγκατάσταση ηλεκτρονικών μετρητών, αλλά και αντιστροφέων στα δίκτυα διανομής. Η εργασία παρέχει μία ολοκληρωμένη επισκόπηση του θέματος, αντιστοιχί της οποίας δεν υπάρχει στη βιβλιογραφία, και παρουσιάζει πρακτικό ενδιαφέρον για τη βιομηχανία. Υπογραμμίστηκε το κενό στα πρότυπα/οδηγίες, παρουσιάστηκε η τρέχουσα κατάσταση (διαφορετικές απαιτήσεις, ανεπαρκείς προδιαγραφές δοκιμών, αντιπαράθεση μεταξύ οργανισμών), οι υπολειπόμενες εργασίες, καθώς και εργαστηριακές δοκιμές.

Στη συνέχεια, παρατίθενται δευτερεύουσες συνεισφορές της διατριβής:

5. Η PHIL μέθοδος εφαρμόστηκε για την επικύρωση μοντέλου ελεγκτή τάσης αντιστροφέα ΔΠ που συνδέεται σε δίκτυο διανομής που περιλαμβάνει ΣΑΤΥΦ. Έγινε

σύγκριση των μετρήσεων των PHIL δοκιμών με τις αμιγώς ψηφιακές προσομοιώσεις και εκτιμήθηκαν παράμετροι ενός εμπορικού φωτοβολταϊκού αντιστροφέα. Η επικύρωση του μοντέλου έγινε κατά τη διάρκεια αλληλεπιδράσεων σε επίπεδο συστήματος και σε ασταθή λειτουργία του Q(V) ελεγκτή.

6. Καταγράφηκαν προβληματικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ ΣΑΤΥΦ και ελεγκτή τάσης μονάδας ΔΠ, που οδηγούν σε συχνές αλλαγές λήψης, επιπλέον ροή αέργου ισχύος, αύξηση της τάσης της ΔΠ κ.α. Επίσης, φάνηκε πως οι ταλαντώσεις που προκύπτουν από αστάθεια του Q(V) ελεγκτή μπορεί να οδηγήσουν σε ιδιαίτερα προβληματικές καταστάσεις σε ειδικές περιπτώσεις.
7. Η ανασκόπηση των προτύπων/οδηγιών για την παροχή επικουρικών υπηρεσιών από μονάδες ΔΠ έδειξε διαφοροποιήσεις και συγκεκριμένες ελλείψεις. Παράλληλα, προτάθηκαν προηγμένες διαδικασίες δοκιμών για συγκεκριμένες απαιτήσεις, αλλά και για προηγμένες λειτουργίες που δεν έχουν ακόμα οριστεί σε βάθος στα πρότυπα/οδηγίες. Επίσης, προτάθηκαν PHIL δοκιμές που θα ήταν δύσκολο και δαπανηρό να πραγματοποιηθούν σε συμβατικό εργαστηριακό περιβάλλον.
8. Καταγράφηκε χρήσιμη πρακτική εμπειρία για την ανάπτυξη PHIL εργαστηριακών διατάξεων, που μπορεί να συμβάλλει στην ανάπτυξη αντίστοιχων διατάξεων σε άλλα εργαστήρια. Επίσης, ορίστηκε διαδικασία/τοπολογία αναφοράς με σκοπό να αποτελέσει μία κοινή βάση για PHIL πειράματα και δοκιμές και να συμβάλλει στην έλλειψη συστάσεων σε ερευνητικές εργασίες και πρότυπα/οδηγίες.

Οι συνεισφορές 1,2,3 και 8 μπορούν να συμβάλλουν στην ευρύτερη διάδοση της PHIL μεθόδου, εφόσον επιχειρούν να απαντήσουν σε βασικές προκλήσεις: στην ευστάθεια που είναι προϋπόθεση για την ασφαλή εκτέλεση του πειράματος/δοκιμής, στην ακρίβεια που καθορίζει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και στον περιορισμένο αριθμό εφαρμογών που να δείχνουν την αξία της PHIL μεθόδου σε σχέση με τις συμβατικές προσεγγίσεις.

8.3) Προτάσεις για μελλοντική συνέχιση

Εντοπίζονται τα παρακάτω ζητήματα ως χρήσιμα για μελλοντική έρευνα. Όσον αφορά την ευστάθεια και την ακρίβεια της PHIL μεθόδου, καταρχάς θα είχε αξία η θεωρητική εκτίμηση της ευστάθειας με αναλυτικό τρόπο, χωρίς τη χρήση προσέγγισης για τη χρονική καθυστέρηση, καθώς και η εκτίμηση της ευστάθειας σε πιο σύνθετα συστήματα. Η εκτίμηση της συχνότητας αποκοπής του βαθυπερατού φίλτρου στην ανατροφοδότηση για την επίτευξη ευστάθειας παρουσιάζει ενδιαφέρον. Επίσης, η ανάπτυξη αποτελεσματικών μεθόδων αντιστάθμισης της χρονικής καθυστέρησης μπορεί να συμβάλλει σε καλύτερη ευστάθεια και ακρίβεια (ειδικά για διακοπτόμενους ενισχυτές που παρουσιάζουν μεγαλύτερη καθυστέρηση). Η προτεινόμενη μέθοδος μετατόπισης σύνθετης αντίστασης θα μπορούσε να επεκταθεί και σε πιο σύνθετες περιπτώσεις, όπως σε βροχοειδή δίκτυα. Ενδεικτικά, θα μπορούσε να γίνει απλοποίηση του προσομοιωμένου δικτύου (π.χ. μετατροπές τριγώνου σε αστέρα, ισοδύναμο Thevenin) και να μεταφερθεί στο φυσικό σύστημα μέρος της ισοδύναμης αντίστασης ή της αντίστασης που συνδέεται στον κοινό ζυγό. Το κατά πόσο θα είναι εφικτό να διατηρηθούν τα χαρακτηριστικά του

προσομοιωμένου δικτύου (π.χ. ώστε να υπολογιστούν οι τάσεις των επιμέρους ζυγών) χρειάζεται περαιτέρω έρευνα.

Όσον αφορά μελλοντικά ενδιαφέροντα PHIL πειράματα/δοκιμές, θα μπορούσαν να συνδεθούν δύο δοκίμια σε διαφορετικούς ζυγούς ενός προσομοιωμένου δικτύου, μέσω των δύο ενισχυτών ισχύος του εργαστηρίου. Με αυτό τον τρόπο θα μπορούσαν να διερευνηθούν αλληλεπιδράσεις μεταξύ των δύο δοκιμών (π.χ. αντιστροφών) στο σύστημα. Η ανάλυση ευστάθειας σε αυτή την τοπολογία είναι πιο απαιτητική και χρειάζεται να μελετηθεί. Επίσης, στα πλαίσια της πιθανής μελλοντικής χρήσης της PHIL μεθόδου σε τυποποιημένες δοκιμές εξοπλισμού, θα είχε ενδιαφέρον η εκτέλεση δοκιμών της προστασίας έναντι νησιδοποίησης αντιστροφών ΔΠ, εφόσον τα ρυθμιζόμενα R-L-C στοιχεία θα μπορούσαν να προσομοιωθούν στον ΨΠΠΧ, παρέχοντας έτσι πολύ ακριβή ρύθμιση χωρίς τη χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο συνδυασμός της PHIL μεθόδου με την CHIL μέθοδο. Μπορεί να υλοποιηθεί CHIL δοκιμή ελεγκτή συντονισμένου ελέγχου τάσης δικτύου διανομής, χρησιμοποιώντας πραγματικούς αντιστροφείς ΔΠ (PHIL δοκιμή) για την επίτευξη πιο ρεαλιστικής λειτουργίας. Επιπλέον, σε απομονωμένο σύστημα με υψηλή διείσδυση φωτοβολταϊκών μπορεί να δοκιμαστεί ελεγκτής που περικλύπτει την φωτοβολταϊκή παραγωγή, ώστε να τηρείται το τεχνικό ελάχιστο της σύγχρονης γεννήτριας (CHIL δοκιμή), χρησιμοποιώντας πραγματικό φωτοβολταϊκό αντιστροφέα (PHIL δοκιμή). Επιπλέον, θα είχε ενδιαφέρον η εκτέλεση PHIL πειραμάτων με ταυτόχρονη σύνδεση πραγματικών συσκευών προστασίας (ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι σε CHIL διάταξη). Για παράδειγμα, σε απομονωμένο σύστημα θα μπορούσαν να εφαρμοστούν διάφορα σενάρια (π.χ. υψηλή παραγωγή ΔΠ με χαμηλό φορτίο, απώλεια παραγωγής, βραχυκυκλώματα) και να διερευνηθούν αλληλεπιδράσεις με το σύστημα προστασίας. Τέλος, στα πλαίσια των ευφυών δικτύων, θα μπορούσε να εφαρμοστεί πολυπρακτορικό σύστημα με πράκτορες που ελέγχουν προσομοιωμένο (CHIL διάταξη) και πραγματικό εξοπλισμό (PHIL διάταξη).

Όσον αφορά τη χρήση της PHIL μεθόδου για εκπαιδευτικούς σκοπούς, παρουσιάζει ενδιαφέρον η πληρέστερη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας της στη μάθηση των φοιτητών με μετρήσιμα αποτελέσματα (π.χ. συγκρίνοντας τις επιδόσεις διαφορετικών δειγμάτων φοιτητών). Επίσης, θα μπορούσαν να αναπτυχθούν δυνατότητες εικονικού (virtual lab) και απομακρυσμένου εργαστηρίου (remote lab) για χρήση πριν ή/και μετά τις εργαστηριακές ασκήσεις για πληρέστερη εμπειρία μάθησης. Τέλος, θα μπορούσε το μοντέλο βιωματικής μάθησης να χρησιμοποιηθεί εκτενέστερα και επίσης να δοκιμαστούν επιπλέον εκπαιδευτικές μέθοδοι (π.χ. problem based learning, active learning).

Κλείνοντας, ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η σύνδεση περισσότερων του ενός αντιστροφών ΔΠ στο ίδιο δίκτυο με ηλεκτρονικούς μετρητές και η πραγματοποίηση πιο σύνθετων δοκιμών ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Επίσης, θα μπορούσε να γίνει προσομοίωση της επίδρασης της έγχυσης υψίσυχων αρμονικών από πολλούς αντιστροφείς στο ίδιο δίκτυο διανομής και να εντοπιστούν προβληματικές περιπτώσεις καθώς και πιθανές λύσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] W. Ren, “Accuracy evaluation of power hardware-in-the-loop simulation”, Ph.D. dissertation, Electrical Computer Engineering Department, Florida State University, Tallahassee, FL, 2007
- [2] W. Ren, M. Steurer and T. L. Baldwin, “Improve the Stability and Accuracy of Power Hardware-in-the-Loop Simulation by Selecting Appropriate Interface Algorithms”, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.44, No. 4, pp.1286-1294, July-august 2008
- [3] H. Li, M. Steurer , K.L. Shi , S. Woodruff and D. Zhang, “Development of a Unified Design, Test, and Research Platform for Wind Energy Systems based on Hardware-In-the-Loop Real Time Simulation”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 53, Issue 4, June 2006 Page(s):1144 – 1151
- [4] C. Molitor, A. Benigni, A. Helmedag, Kan Chen, D. Cali, P. Jahangiri, D. Muller, A. Monti, “Multiphysics Test Bed for Renewable Energy Systems in Smart Homes”, IEEE Trans. Ind. Electron, Volume:60, Issue: 3, pp 1235 – 1248, March 2013
- [5] G.F. Lauss, M. O. Faruque, K. Schoder, C. Dufour, A. Viehweider, J. Langston, “Characteristics and Design of Power Hardware-in-the-Loop Simulations for Electrical Power Systems”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume: 63, Issue: 1, Jan. 2016
- [6] E. C.W. De Jong, “Real-time power hardware in the loop - The future of testing”, Power System Services from RES workshop, Risø DTU, Roskilde, Denmark, March 2011
- [7] E. C. De Jong, D. H. Liang, “Validation and testing for grid acceptance using hardware-in-the-Loop”, CIRED Workshop - Rome, June 2014
- [8] RTDS Technologies, www.rtds.com
- [9] OPAL RT eMEGAsim (2010), www.opal-rt.com
- [10] B. Lu, X. Wu, H. Figueroa, A. Monti, “A Low-Cost Real-Time Hardware-in-the-Loop Testing Approach of Power Electronics Controls”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, No. 2, April 2007
- [11] W. Lee, M. Yoon and M Sunwoo, “A cost- and time-effective hardware-in-the-loop simulation platform for automotive engine control systems”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering 2003 217: 41
- [12] Faruque, M.O.; Dinavahi, V., "Hardware-in-the-Loop Simulation of Power Electronic Systems Using Adaptive Discretization," IEEE Trans. Ind. Electron., vol.57, no.4, pp.1146,1158, April 2010
- [13] A. Hasanzadeh, C.S. Edrington, N. Stroupe, T. Bevis, "Real-Time Emulation of a High-Speed Microturbine Permanent-Magnet Synchronous Generator Using Multiplatform Hardware-in-the-Loop Realization," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 6, pp. 3109-3118, June 2014
- [14] Chinchul Choi, Wootaik Lee, "Analysis and Compensation of Time Delay Effects in Hardware-in-the-Loop Simulation for Automotive PMSM Drive System ," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 59, no. 9, pp. 3403-3410, September 2012
- [15] T. Timm, H. Schuldt, “Offsite Testing at Siemens AG HVDC”, RTDS European User’s Group Meeting, Lyngby, Denmark, October 2014
- [16] P. Forsyth, R. Kuffel, “Utility applications of a RTDS® Simulator”, International Power Engineering Conference, IPEC 2007, Singapore, December 2007
- [17] R. Kuffel, D. Ouellette, P. Forsyth, “Real time simulation and testing using IEC 61850”, Proceedings of the International Symposium Modern Electric Power Systems (MEPS), September 2010

- [18] J.H. Jeon, J.Y. Kim, H.M. Kim, S.K. Kim, C. Cho, J.M. Kim, J.B. Ahn, K.Y. Nam, "Development of Hardware In-the-Loop Simulation System for Testing Operation and Control Functions of Microgrid", IEEE Transactions on Power Electronics, Volume: 25, Issue: 12, December 2010
- [19] J. Wang, Y. Song, W. Li, J. Guo, A. Monti, "Development of a Universal Platform for Hardware In-the-Loop Testing of Microgrids", IEEE Trans. Ind. Informat., Vol. 10, Issue 4, November 2014
- [20] M. Steurer, C.S. Edrington, M. Solderbeck, W. Ren, J. Langston, "A Megawatt-Scale Power Hardware-in-the-Loop Simulation Setup for Motor Drives", IEEE Trans. on Ind. Electron., Vol 57, No4. April 2010
- [21] W. Ren, M. Steurer, S. Woodruff, "Applying Controller and Power Hardware-in-the-Loop Simulation in Designing and Prototyping Apparatuses for Future All Electric Ship", Proc. IEEE, Electric Ship Technologies Symposium, 2007
- [22] S. Lentijo, S. D'Arco, A. Monti, "Comparing the dynamic performances of power hardware-in-the-loop interfaces", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, pp. 1195–1207, 2010
- [23] A.J. Roscoe, A. Mackay, G.M. Burt, J.R. McDonald "Architecture of a Network-in-the-Loop Environment for Characterizing AC Power-System Behavior", IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 57, No 4, pp. 1245-1253, 2010
- [24] Steurer, M.; Bogdan, F.; Ren, W.; Sloderbeck, M.; Woodruff, S, "Controller and Power Hardware-In-Loop Methods for Accelerating Renewable Energy Integration," Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE , vol., no., pp.1-4, 24-28 June 2007
- [25] A. Viehweider, G. Lauss, L. Felix, "Stabilization of Power Hardware-in-the-Loop simulations of electric energy systems", Simulation Modelling Practice and Theory, Volume 19, Issue 7,b, Pages 1699-1708, August 2011
- [26] D. Ocasnu, "Modelisation, Commande et Simulation Temps-Réel Hybride des Systèmes de Génération Non Conventionnels", PhD Thesis Université Joseph Fourier, 2008
- [27] G. Lauss, F. Lehfuss, A. Viehweider, and T. Strasser, "Power Hardware in the Loop Simulation with Feedback Current Filtering for Electric Systems," 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'2011), November 7-10, Australia, 2011
- [28] O. Vodyakho, C.S Edrington, M. Steurer, S. Azongha, F. Fleming, "Synchronization of three-phase converters and virtual microgrid implementation utilizing the Power-Hardware-in-the-Loop concept", Twenty-Fifth IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010
- [29] Hyo-Ryong Seo, Minwon Park, In-Keun Yu, Byeong-Mun Song, "Performance analysis and evaluation of a multifunctional grid connected PV system using power hardware-in-the-loop simulation," Proc. IEEE Applied Power Electronic Conference and Exposition (APEC), pp.1945-1948, March 6-11, 2011
- [30] E. S. Kim, D.W Kim, "Performance testing of grid connected photovoltaic inverter based on an integrated electronic protection device", IEEE T&D Asia 2009
- [31] V. Karapanos, S. de Haan, K. Zwetsloot, "Real Time Simulation of a Power System with VSG Hardware in the Loop", Proc. IEEE Industrial Electronics Society IECON'2011, Australia, November 2011
- [32] A. Benigni, A. Helmedag, A. Abdalrahman, G. Piłatowicz, A. Monti, "FlePS: A power interface for Power Hardware In the Loop", Proceedings of the 2011-14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2011)
- [33] M. Sloderbeck, F. Bogdan, J. Hauer, L. Qi, and M. Steurer "The addition of a 5 MW variable voltage source to a hardware-in-the loop simulation and test facility", in Proc. EMTS, Philadelphia, PA, Aug. 12–13, 2008.

- [34] A. Bouscayrol, W. Lhomme, P. Delarue, B. Lemaire-Semail, S. Aksas, "Hardware-in-the-loop simulation of electric vehicle traction systems using energetic macroscopic representation", Proceedings of the IEEE-IECON'06, Paris, France, 2006
- [35] M. Steurer, S. Woodruff, T. Baldwin, H. Boenig, F. Bogdan, T. Fikse, M. Sloderbeck, and G. Snitchler "Hardware-in-the-Loop Investigation of Rotor Heating in a 5 MW HTS Propulsion Motor", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 17, issue 2, part 2, pp. 1595–1598, June 2007
- [36] M. Hong, S. Horie, Y. Miura, T. Ise and C. Dufour, "A Method to Stabilize a Power Hardware-in-the-loop Simulation of Inductor Coupled Systems", International Conference on Power Systems Transients, Kyoto (Japan), June 2009
- [37] D. Ocnasu, C. Gombert, S. Bacha, D. Roye, F. Blache and S. Mekhtoub, "Real-time hybrid facility for the study of distributed power generation systems", Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11, No.3, pp 343-356, July 2008.
- [38] W. Ren, M. Sloderbeck, M. Steurer, V. Dinavahi, T. Noda, S. Filizadeh, A. R. Chevretils, M. Matar, R. Iravani, C. Dufour, J. Belanger, O. M. Faruque, K. Strunz, and J. A. Martinez, "Interfacing Issues in Real-Time Digital Simulators", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, no. 2, pp. 1221–1230, April 2011
- [39] A. Monti, H. Figueroa, S. Lentijo, X. Wu, R. Dougal, Interface issues in hardware-in-the-loop simulation, in: Proc. IEEE Electric Ship Technologies Symposium, IEEE, 2005, pp. 39–45.
- [40] S. Ayasun, R. Fischl, T. Chmielewski, S. Vallieu, K. Miu and C. Nwankpa, "Evaluation of the Static Performance of a Simulation–Stimulation Interface for Power Hardware in the Loop", in: Proc. IEEE Bologna Power Tech Conference, 2003.
- [41] M. Hong, L. Chien-ru, Y. Miura, and T. Ise, "Accuracy Evaluation of Power Hardware-in-the-loop Simulation of a Boost Chopper", The 2010 International Power Electronics Conference, 2010
- [42] Δ. Μπαράκος, «Μελέτη ευστάθειας και ακρίβειας της τεχνικής Power-Hardware-In the-Loop για δοκιμές διεσπαρμένης παραγωγής», Διπλωματική εργασία ΕΜΠ, Ιούλιος 2014
- [43] W. Ren, M. Steurer, T. L. Baldwin, "An Effective Method for Evaluating the Accuracy of Power Hardware-in-the-Loop Simulations", IEEE Transactions on Industry Applications, Volume: 45, Issue: 4, 2007
- [44] Il Do Yoo, A.M Gole, "Compensating for Interface Equipment Limitations to Improve Simulation Accuracy of Real-Time Power Hardware In Loop Simulation," IEEE Transactions on Power Delivery, vol.27, no.3, pp.1284,1291, July 2012
- [45] M. S. MacDiarmid and M. Bacic, "Quantifying the accuracy of hardware-in-the-loop simulations," presented at the American Control Conf., New York, 2007
- [46] X. Wu, S. Lentijo, A. Deshmuk, A. Monti, and F. Ponci, "Design and implementation of a power-hardware-in-the-loop interface: A nonlinear load case study," in Proc. 20th Annual IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo., Mar. 2005, vol. 2, pp. 1332–1338.
- [47] R. Kuffel, R. P. Wierckx, H. Duchon, M. Lagerkvist, X. Wang, P. Forsyth and P. Holmberg, "Expanding an analogue HVDC simulator's modelling capability using a real-time digital simulator (RTDS)," in Proc. 1st ICDS, Apr. 1995, pp. 199–204.
- [48] V. B. Dmitriev-Zdorov, "Generalized coupling as a way to improve the convergence in relaxation-based solvers," in Proc. EURO-DAC EUROVHDL, Sep. 16–20, 1996, pp. 15–20
- [49] F. Lehfuß, G. Lauss, T. Strasser, "Implementation of a multi-rating interface for Power-Hardware-in-the-Loop simulations", 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society IECON 2012, Montreal, Canada, October 2012
- [50] E. Guillo-Sansano, A.J. Roscoe, G.M. Burt, "Harmonic-by-harmonic time delay compensation method for PHIL simulation of low impedance power systems", 2015

- International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST), September 2015
- [51] Directive 2009/72/EC of the European Parliament and of the Council of 13 July 2009, concerning common rules for the internal market in electricity and repealing Directive 2003/54/EC
 - [52] EURELECTRIC Thermal Working Group, “Ancillary Services. Unbundling Electricity Products—an Emerging Market”, February 2004
 - [53] Reservices project, D2.2, “Ancillary services: technical specifications, system needs and costs”, November 2012
 - [54] EN 50160, “Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks”, August 2010
 - [55] D. Reiter, S. Ghaemi “Smart Grids Model Region Salzburg”, ISGAN Webinar, December 2013
 - [56] Μ. Π. Παπαδόπουλος, “Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, τόμος Ι”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1994
 - [57] Β. Παπαδιάς, “Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας-Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας” Τόμος 1, Εκδόσεις Ε.Μ.Π. 1985
 - [58] K. Pantziris, “Voltage support strategies in a rural low voltage network with high photovoltaic penetration”, MSc Thesis, Delft University of Technology, May 2014
 - [59] Θ. Κορλός, «Αντιμετώπιση φαινομένου ανύψωσης τάσης λόγω διείσδυσης φωτοβολταϊκών στη Χαμηλή Τάση», Διπλωματική εργασία ΕΜΠ, Νοέμβριος 2012
 - [60] K. D. Brabandere, B. Bolsens, J. Van den Keybus, A. Woyte, J. Driesen, R. Belmans, “A Voltage and Frequency Droop Control Method for Parallel Inverters”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol 22, No 4, July 2007
 - [61] Ν.Α. Σουλτάνης, «Συμβολή στον έλεγχο και στην προσομοίωση συστημάτων ισχύος χαμηλής τάσης με διεσπαρμένη παραγωγή», Διδακτορική διατριβή ΕΜΠ, Μάρτιος 2009
 - [62] B. M. Weedy, B. J. Cory, N. Jenkins, J.B. Ekanayake, G.Strbac, “Electric Power Systems”, 5th edition, John Wiley & Sons, 2012
 - [63] E. Demirok, D. Sera, R. Teodorescu, P. Rodriguez and U. Borup, “Evaluation of the voltage support strategies for the Low Voltage grid connected PV generators”, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010
 - [64] T. Stetz, F. Marten, and M. Braun, “Improved Low Voltage Grid-Integration of Photovoltaic Systems in Germany,” IEEE Trans. Sustain. Energy, vol.4, no.2, pp.534,542, April 2013
 - [65] A. Constantin and R. D. Lazar, “Open Loop Q(U) Stability Investigation in Case of PV Power Plants”, 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Frankfurt, 2012
 - [66] C. Vournas, T. Souxes, “Modeling reactive support from distributed resources in hellenic interconnected system”, IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), July 2016
 - [67] VDE-AR-N 4105, “Power generation systems connected to the low-voltage distribution network. Technical minimum requirements for the connection to and parallel operation with low-voltage distribution networks”, August 2011
 - [68] M.J Reno, M.S. Lave, R.J Broderick, J. Seuss, S. Grijalva, “Multi-Objective Advanced Inverter Controls to Dispatch the Real and Reactive Power of Many Distributed PV Systems”, Technical Report, Sandia National Laboratories, January 2016
 - [69] Chen S., Hu W., Su C., Zhang X, Chen Z.: 'Optimal reactive power and voltage control in distribution networks with distributed generators by fuzzy adaptive hybrid particle swarm optimisation method', IET Generation, Transmission & Distribution, 9, (11), pp. 1096-1103, 2015

- [70] A. Kulmala, S. Repo, P. Järventausta, “Coordinated Voltage Control in Distribution Networks Including Several Distributed Energy Resources”, IEEE Transactions on Smart Grid, 5, (4), pp. 2010-2020, 2014
- [71] Anagnostopoulos P., Papathanassiou S., Hatziargyriou N.: 'Optimal Coordinated Control for Enhancing DER Integration in MV Distribution Networks'. CIRED – 23rd International Conference on Electricity Distribution, Lyon, France, June 2015
- [72] Liu X., Aichhorn A., Liu L., Li H.: 'Coordinated Control of Distributed Energy Storage System With Tap Changer Transformers for Voltage Rise Mitigation Under High Photovoltaic Penetration', IEEE Transactions on Smart Grid, 3, (2), pp. 897-906, 2012
- [73] B. Zhang, A.Y.S. Lam, A.D. Domínguez-García, D. Tse, “An Optimal and Distributed Method for Voltage Regulation in Power Distribution Systems”, IEEE Transactions on Power Systems, Volume 30, Issue 4, July 2015
- [74] P. Esslinger, “Studie Q(U)”, Technischen Universität München, August 2012
- [75] B. Bletterie, A. Stojanovic, S. Kadam, G. Lauss, M. Heidl, C. Winter, D. Hanek, A. Pamer, A. Abart, “Local voltage control by PV inverters: first operating experience from simulation, laboratory tests and field tests”, 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Frankfurt, Germany, September 2012
- [76] Κ. Βουρνάς, Β.Κ. Παπαδιάς, Κ. Ντελκής, «Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας: έλεγχος και ευστάθεια συστήματος», Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 2011
- [77] J. Boemer, K. Burges, P. Zolotarev, J. Lehner, P. Wajant, M. Fürst, R. Brohm, T. Kumm, “Overview of German Grid Issues and Retrofit of Photovoltaic Power Plants in Germany for the Prevention of Frequency Stability Problems in Abnormal System Conditions of the ENTSO-E Region Continental Europe”, 1st International Workshop on Integration of Solar Power into Power Systems, 24 October 2011, Aarhus, Denmark
- [78] Energinet.dk, “Technical regulation 3.2.5 for wind power plants above 11 kW”, 2016
- [79] BDEW, “Generating Plants Connected to the Medium-Voltage Network.Guideline for generating plants’ connection to and parallel operation with the medium-voltage network”, June 2008
- [80] J. Van de Vyver, J. D. M. De Kooning, B. Meersman, L. Vandeveld, T. L. Vandoorn, “Droop Control as an Alternative Inertial Response Strategy for the Synthetic Inertia on Wind Turbines”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 31, no. 2, March 2016
- [81] Y. Chen, R. Hesse, D. Turschner, H. P. Beck, “Comparison of methods for implementing virtual synchronous machine on inverters”, International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ’12), Spain, March, 2012
- [82] Q. C. Zhong, G. Weiss, “Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 4, pp. 1259 – 1267, 2011
- [83] T. V. Van, K. Visscher, J. Diaz, V. Karapanos, A. Woyte, M. Albu, J. Bozelie, T. Loix, and D. Federenciuc, “Virtual synchronous generator: An element of future grids,” In proceeding of IEEE Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), Oct. 2010
- [84] G. Kaestle, T. Vrana, “Improved requirements for the connection to the low voltage grid”, 21st International Conference on Electricity Distribution CIRED, Frankfurt, June 2011
- [85] Β. Θεοδωρόπουλος, “Συνεισφορά φωτοβολταϊκών πάρκων στη ρύθμιση συχνότητας: έμφαση σε ασθενή-αυτόνομα ηλεκτρικά δίκτυα”, Διπλωματική εργασία ΕΜΠ, Ιούλιος 2013
- [86] K. Visscher, S.W.H. de Haan, “Virtual synchronous machines for frequency stabilization in future grids with a significant share of decentralized generation”, in Proceedings of the CIRED SmartGrids Conference, 23–24 June, Frankfurt, 2008.

- [87] FGW, “Technical Guidelines for Power Generating Units and systems, Part 3: Determination of electrical characteristics of power generating units and systems connected to MV, HV and EHV grids”, July 2011
- [88] CEI 0-21, “Reference technical rules for the connection of active and passive users to the LV electrical utilities”, December 2011
- [89] ENTSO-E, “Requirements for Grid Connection Applicable to all Generators”, March 2013
- [90] M. Mohseni, S. Islam, “Review of international grid codes for wind power integration: Diversity, technology and a case for global standard”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 16, Issue 6, Pages 3876–3890, August 2012
- [91] W.L. Kling, L. Söder, I. Erlich, P. Sørensen, M. Power, H. Holttinen, J. Hidalgo, B.G. Rawn, “Wind power grid integration: The European Experience”, 17th Power Systems Computation Conference, Stockholm, August 2011
- [92] M. Tsili, S. Papathanassiou, “Review of grid code technical requirements for wind farms”, *IET Renewable Power Generation*, Volume 3, Issue 3, Pages 308 – 332, September 2009
- [93] M. Braun, T. Stetz, R. Bründlinger, C. Mayr, K. Ogimoto, H. Hatta, H. Kobayashi, B. Kroposki, B. Mather, M. Coddington, K. Lynn, G. Graditi, A. Woyte, and I. MacGill, “Is the distribution grid ready to accept large-scale photovoltaic deployment? State of the art, progress, and future prospects”, 26th EU PVSEC, Hamburg, Germany 2011
- [94] B. Crăciun, T. Kerekes, D. Séra, R. Teodorescu, “Overview of Recent Grid Codes for PV Power Integration”, 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), Brasov, 2012
- [95] EN 50438:2013, Requirements for micro-generating plants to be connected in parallel with public low-voltage distribution networks, CENELEC, 2013
- [96] CLC/TS 50549-1:2015 Requirements for generating plants to be connected in parallel with distribution networks - Part 1: Connection to a LV distribution network above 16 A, CENELEC, 2015
- [97] CLC/TS 50549-2:2015 Requirements for generating plants to be connected in parallel with distribution networks - Part 2: Connection to a MV distribution network; CENELEC, 2015
- [98] R. Bründlinger, “Review and Assessment of Latest Grid Code Developments in Europe and Selected International Markets with Respect to High Penetration PV”, 6th Solar Integration Workshop, Vienna, November 2016
- [99] E-control, TOR D4 “Technische und organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen, Teil D: Besondere technische Regeln, Hauptabschnitt D4: Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen mit Verteilernetzen”, V2.2, February 2016
- [100] IEEE 1547, “IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems”, July 2003
- [101] ERDF NOI-RES, “Principe et conditions de mise en oeuvre d’une régulation locale de puissance réactive pour les installations de production raccordées au réseau public de distribution HTA”, 2016
- [102] DIN VDE V 0124-100, Grid integration of generator plants - Low Voltage-Test requirements for generator units to be connected to and operated in parallel with low-voltage distribution grids, July 2012
- [103] EN 50438, “Requirements for the connection of micro-generators in parallel with public low-voltage distribution networks”, under revision, August 2012
- [104] IEEE Draft Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems -Amendment 1, IEEE Standard P1547a, 2013

- [105] California Public Utilities Commission, “Electric Rule No.21 Generating facility interconnections”, July 2016
- [106] EWEA, “Generic Grid Code Format for Wind Power Plants”, November 2009
- [107] G. Monfredini, D. Martini, S. Grotti, S. Soldani, M. Trova, “PV inverter extended grid services – From “day-time” to “full-time” operation”, 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Frankfurt Germany, September 2012
- [108] S. Vieluf, Z. Fan, T. Wehrend, M. Scholz, T. Gehlhaar, “International Possibilities for Test and Verification of PV Power Plant Integration Based on German Experience”, Germanischer Lloyd, 2012
- [109] E. Demirok, D. Sera, R. Teodorescu, K. Frederiksen, “An optimized local reactive power control for high penetration of distributed solar inverters in low voltage networks”, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany, Sept. 2011
- [110] DIN V VDE V 0126-1-1_A1: “Automatic disconnection device between a generator and the public low-voltage grid Amendment 1, February 2012”
- [111] DIN V VDE V 0126-1-1, “Automatic disconnection device between a generator and the public low-voltage grid”, February 2006
- [112] Ecofys, “Impact of Large-scale Distributed Generation on Network Stability During Over-Frequency Events & Development of Mitigation Measures”, September 2011
- [113] EirGrid, “Grid Code Version 3.5”, March 15th 2011
- [114] Energinet, “Technical regulation 3.2.5 for wind power plants with a power output greater than 11 kW”, September 2010
- [115] H.P. Beck, R. Hesse, “Virtual synchronous machine”, In International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, 2007.
- [116] IEC 61400-21, “Wind turbines - Part 21: Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines”, August 2008
- [117] D. Geibel, G. Arnold, D. Martini, “Confirmation of extended electrical properties of PV inverters according to German MV-Grid code – Experiences in the certification process”, CIRED 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt, June 2011
- [118] A. Hoke, S. Chakraborty, and T. Basso, “Testing of advanced PV inverters conforming to IEEE Standard 1547—Amendment 1,” in Proc. IEEE Photovoltaic Specialists Conf. (PVSC), Denver, CO, June 2014
- [119] S. Vieluf, Z. Fan, T. Wehrend, M. Scholz, T. Gehlhaar, “International Possibilities for Test and Verification of PV Power Plant Integration Based on German Experience”, Germanischer Lloyd, 2012
- [120] R. Brundlinger, T. Strasser, G. Lauss, A. Hoke, S. Chakraborty, G. Martin, B. Kroposki, J. Johnson, E. de Jong, “Lab Tests: Verifying That Smart Grid Power Converters Are Truly Smart”, IEEE Power and Energy Magazine, Volume: 13, Issue: 2, March-April 2015
- [121] IEEE 1547.1-2005, “IEEE Standard Conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems”, August 2005
- [122] Underwriters Laboratories UL1741 Ed. 2, “Inverters, Converters, Controllers and Interconnection System Equipment for use with Distributed Energy Resources” 2010.
- [123] IEC 61000-3-2, “Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)”, April 2009
- [124] IEC 61000-3-12, “Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-12: Limits - Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current >16 A and ≤ 75 A per phase”, May 2011

- [125] IEC/TR 60725 ed2.0, “Consideration of reference impedances and public supply network impedances for use in determining disturbance characteristics of electrical equipment having a rated current = < 75 A per phase”, May 2005
- [126] G. Lauss, F. Lehfuss, B. Bletterie; T. Strasser, R. Brundlinger, “Examination of LV grid phenomena by means of PHIL testing”, IEEE 38th Annual IES IECON conference, 4771-4776, Montreal, Oct. 2012
- [127] J. Aho, A. Buckspan, J. Laks, P. Fleming, Y. Jeong, F. Dunne, M. Churchfield, L. Pao, K. Johnson, “A Tutorial of Wind Turbine Control for Supporting Grid Frequency through Active Power Control”, American Control Conference Montreal, June 2012
- [128] Γ. Κορρές, Χ. Αποστολόπουλος, Π. Κατσίκας, Δ. Τσακίρης, «Έλεγχος λειτουργίας ψηφιακών ηλεκτρονόμων με τον ψηφιακό εξομοιωτή πραγματικού χρόνου και υπολογιστικά μοντέλα», Πρακτικά Συνόδου Ελληνικής Επιτροπής Διεθνούς Συμβουλίου Μεγάλων Ηλεκτρικών Δικτύων (CIGRE), Αθήνα, Δεκέμβριος 2005
- [129] C. A. Apostolopoulos, G. N. Korres: “Real-time implementation of digital relay models using MATLAB/SIMULINK and RTDS”, Eur. Trans. Elect. Power (ETEP), vol. 20, no. 3, pp. 290-305, Apr. 2010
- [130] Α.Ε. Δημέας, «Συμβολή στον κατανεμημένο έλεγχο συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής στην χαμηλή τάση», Διδακτορική Διατριβή ΕΜΠ, 2006
- [131] Regatron, www.regatron.com
- [132] Triphase NV, www.triphase.com
- [133] T. Loix, S. de Breucker, P. Vanassche, J. van den Keybus, J. Driesen and K. Visscher, “Layout and performance of the power electronic converter platform for the VSYNC project”, Proceedings of the IEEE Powertech conference, June 28th - July 2nd, Bucharest, Romania, 2009
- [134] NOBEL GRID project, “Design and development of power interfaces for distributed energy generation and Storage”, Deliverable D7.2, April 2016
- [135] Jacobina C.B., Oliveira T.M., da Silva E.R.C., “Control of the Single-Phase Three-Leg AC/AC Converter”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, no.2, pp. 467-476, 2 April 2006
- [136] Park H.W., Park S.J., Park J.G., Kim C.U, “A Novel High-Performance Voltage Regulator for Single-Phase AC Sources”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 48, pp. 554-562, June 2001
- [137] Beckhoff EL4132, www.beckhoff.com
- [138] Spitzenberger & Spies, www.spitzenberger.de
- [139] Chauvin Arnoux, www.chauvin-arnoux.com
- [140] Β. Κλεφτάκης, «Μελέτη προσομοίωσης «Power Hardware In The Loop» και διερεύνηση ανύψωσης της τάσης εξαιτίας της διείσδυσης φωτοβολταϊκών στη χαμηλή τάση», Διπλωματική εργασία ΕΜΠ, 2011
- [141] CIGRE Task Force C6.04.02, “Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources”, May 2013
- [142] K. Strunz, R. H. Fletcher, R. Campbell, F. Gao, “Developing Benchmark Models for Low-voltage Distribution Feeders”, IEEE Power Engineering Society General Meeting, Calgary, Canada, July 2009
- [143] S. Papathanassiou, N. Hatziargyriou, and K. Strunz, “A benchmark low voltage microgrid network”. In CIGRE Symposium on Power Systems with Dispersed Generation, Athens, Greece, April 2005.
- [144] B. I. Craciun, T. Kerekes, D. Sera, R. Teodorescu, A. Timbus, “Benchmark networks for grid integration impact studies of large PV plants”, Aalborg University, Denmark

- [145] A. M. El-Zonkoly, "Fault diagnosis in distribution networks with distributed generation", *Smart Grid and Renewable Energy*, 2011, 2, 1-11, Arab Academy of Science & Technology, Egypt 2011
- [146] Soultanis, N.L., Papathanasiou, S.A., Hatziargyriou, N.D. "A Stability Algorithm for the Dynamic Analysis of Inverter Dominated Unbalanced LV Microgrids", *IEEE Transactions on Power Systems*, Feb. 2007
- [147] Yang Fan, Fan Ming-tian, Zhang Zu-ping, Su Jiam, "China MV distribution network benchmark for network integrated of renewable and distributed energy resources", *China International Conference on Electricity Distribution (CICED 2010)*, China 2010
- [148] R. Bhakar, N. P. Padhy, H. O. Gupta, "Reference network development for distribution network pricing", *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2010, New Orleans, LA, USA 2010
- [149] Craciun, B. I.; Kerekes, T.; Sera, D.; Teodorescu, R.; Brandl, R.; Degner, T.; Geibel, D.; Hernandez, H., "Grid integration of PV power based on PHIL testing using different interface algorithms," *IEEE 39th Annual IES IECON conference*, Vienna, November 2013
- [150] I. Munteanu, A. I. Bratcu, S. Bacha, D. Roze, J. Guiraud "Hardware-in-the-Loop-based Simulator for a Class of Variable-speed Wind Energy Conversion Systems: Design and Performance Assessment", *IEEE Trans. Energy Convers.*, Vol. 25, No. 2, June 2010
- [151] Schlesinger S. et al. "Terminology for model credibility", *Simulation* 32 (3): 103-104, 1979
- [152] F. Martin, I. Purellku, T. Gehlhaar, "Modelling of and Simulation with Grid Code validated Wind Turbine Models," in *Proc. 2009 EWEC Conference*
- [153] FGW-Part 4, "Technical Guidelines for Power Generating Units and systems: Demands on Modelling and Validating Simulation Models of the Electrical Characteristics of Power Generating Units and Systems", March 2010
- [154] WECC Guideline, "Generating Facility Data, Testing and Model Validation Requirements", July 2012
- [155] IEC 61400-27, "Wind turbines - Part 27-1: Electrical simulation models - Wind turbines", February 2015
- [156] P. Eguia, A. Etxegarai, E. Torres, J.I. San Martin, I. Albizu, "Modeling and validation of photovoltaic plants using generic dynamic models", *2015 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, June 2015
- [157] S. Santoso, M. Lwin, J. Ramos, M. Singh, E. Muljadi, J. Jonkman, "Designing and Integrating Wind Power Laboratory Experiments in Power and Energy Systems Courses", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 4, July 2014
- [158] M. Rasheduzzaman, B. H. Chowdhury, S. Bhaskara, "Converting an Old Machines Lab Into a Functioning Power Network With a Microgrid for Education", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 4, July 2014
- [159] I. Kuzle, J. Havelka, H. Pandžić, T. Capuder, "Hands-On Laboratory Course for Future Power System Experts", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 4, July 2014
- [160] H. Qinran, L. Fangxing, C. Chien-fei, "A Smart Home Test Bed for Undergraduate Education to Bridge the Curriculum Gap From Traditional Power Systems to Modernized Smart Grids", *IEEE Transactions on Education*, vol. 58, no. 1, Feb. 2015
- [161] A.S. Deese, "Development of Smart Electric Power System (SEPS) Laboratory for Advanced Research and Undergraduate Education", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 3, May 2015
- [162] T. Strasser, M. Stifter, F. Andrén, P. Palensky, "Co-Simulation Training Platform for Smart Grids", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 4, July 2014

- [163] P.S. Georgilakis, G.A. Orfanos, N.D. Hatziargyriou, "Computer-Assisted Interactive Learning for Teaching Transmission Pricing Methodologies", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 29, no. 4, July 2014
- [164] N. D. Hatziargyriou, C. D. Vournas, B. C. Papadias, "The educational role of personal computers in power system laboratories", IEEE Transactions on Education, Volume 32, Issue 2, May 1989
- [165] C.D. Vournas, E.G. Potamianakis, C. Moors, T. Van Cutsem, "An educational simulation tool for power system control and stability", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 19, Issue 1, February 2004
- [166] P. S. Georgilakis, G. N. Korres, "Computer aided education on flexible transmission systems", 8th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (Medpower 2012), Cagliari, October 2012
- [167] G.G. Karady, G.T. Heydt, K.J. Olejniczak, H.A. Mantooth, S. Iwamoto, M.L. Crow, "Role of laboratory education in power engineering: is the_virtual laboratory feasible? I", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Seattle, 2000
- [168] G.G. Karady, "Roll of laboratory education in electrical power engineering education", IEEE Power and Energy Society General Meeting, Pittsburgh, 2008
- [169] P.M. Menghal, A.J. Laxmi, "Real time simulation: A novel approach in engineering education", 3rd International Conference on Electronics Computer Technology (ICECT), Kanyakumari, India, April 2011
- [170] S. Usenmez, U. Yaman, M. Dolen, A.B. Koku, "A new hardware-in-the-loop simulator for control engineering education", IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), Istanbul, April 2014,
- [171] O.A. Mohammed, S. Liu, Z. Liu, N. Abed, S. Ganu, "Innovations in teaching energy systems utilizing an integrated simulation environment", IEEE Power Engineering Society General Meeting, San Francisco, June 2005
- [172] A. Srivastava, N. Schulz, "Applications of a real-time digital simulator in power system education and research", 116th Annual Conference & Exposition, American Society for Engineering Education, Austin, 2009
- [173] D. Celeita, M. Hernandez, G. Ramos, N. Penafiel, M. Rangel, J. D. Bernal, "Implementation of an educational real-time platform for relaying automation on smart grids", Electric Power Systems Research, vol. 130, pp. 156–166, January 2016
- [174] C. Dufour, C. Andrade, J. Bélanger, "Real-time simulation technologies in education: a link to modern engineering methods and practices", Proceedings of the 11th International Conference on Engineering and Technology Education (INTERTECH 2010), Ilhéus, Brazil, March 2010
- [175] J. Dewey, "Experience and Education", Kappa Delta Pi, West Lafayette, Indiana, 1938/1998
- [176] D.A. Kolb, "Experiential Learning", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1984
- [177] M. Δεδούλη, «Βιωματική μάθηση - Δυνατότητες αξιοποίησής της στο πλαίσιο της Ευέλικτης Ζώνης», Επιθεώρηση Εκπαιδευτικών Θεμάτων, Τεύχος 6, 2001
- [178] A. Georgopoulos, M. Birbili, A. Dimitriou, "Environmental Education (EE) and experiential education: a promising "marriage" for Greek pre-school teachers", Creative Education, Vol.2, No.2, June 2011
- [179] A. S. Abdel-Khalik, A. M. Massoud, S. Ahmed, "A Senior Project-Based Multiphase Motor Drive System Development", IEEE Transactions on Education, Volume 59, Issue 4, November 2016
- [180] M. Bronzini, S. Bruno, M. De Benedictis, S. Lamonaca, M. La Scala, G. Rotondo, U. Stecchi, "Operator Training Simulator for power systems: Training evaluation

- methodologies based on fuzzy logic”, IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2010), Bari, July 2010
- [181] H. Louie, A. Srivastava, “Resources for pre-university power engineering outreach”, IEEE Power and Energy Society General Meeting, Detroit, July 2011
 - [182] A. Cetin, “A 3D game based learning application in engineering education: Powering a recreational boat with renewable energy sources”, 15th International Conference on Interactive Collaborative Learning (ICL), Villach, September 2012
 - [183] R. F. Ammerman, P. K. Sen, R. A. Streveler, “Work in Progress–The Kolb Learning Model Applied to an Advanced Energy Systems Laboratory”, 35th Annual Conference Frontiers in Education, Indianapolis, October 2005
 - [184] R.J. Durkin, “Experiential Learning in Engineering Technology: A Case Study on Problem Solving in Project-Based Learning at the Undergraduate Level”, Journal of Engineering Technology, vol. 33, no. 1, pp. 22-29, Spring 2016
 - [185] M. Abdulwahed, Z.K. Nagy, “Applying Kolb's Experiential Learning Cycle for Laboratory Education”, Journal of Engineering Education, vol. 98, no. 3, pp. 283-294, July 2009
 - [186] A. Konak, T. Clark, M. Nasereddin, “Best practices to design hands-on activities for virtual computer laboratories”, 2013 IEEE Integrated STEM Education Conference (ISEC), Princeton, March 2013
 - [187] C. Samoila, D. Ursutiu, V. Jinga, “The position of the remote experiment in the experiential learning and SECI”, International Conference on Interactive Collaborative Learning (ICL), Dubai, December 2014
 - [188] V. A. Papaspiliotopoulos, G. N. Korres, V. A. Kleftakis, N. D. Hatziaargyriou, “Hardware-In-the-Loop Design and Optimal Setting of Adaptive Protection Schemes for Distribution Systems with Distributed Generation”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 32, Issue 1, February 2017
 - [189] T. N. Boutsika, S. A. Papathanassiou, “Short-circuit calculations in networks with distributed generation”, Electric Power Systems Research, vol. 78, no. 7, July 2008
 - [190] C. A. Plet, T. C. Green, “Fault response of inverter interfaced distributed generators in grid-connected applications”, Electric Power Systems Research, vol. 106, pp. 21–28, January 2014
 - [191] A. Μάρκου, «Μελέτη και υλοποίηση συστήματος ελέγχου, παρακολούθησης και καταγραφής εργαστηριακού μικροδικτύου», Διπλωματική εργασία ΕΜΠ, Μάρτιος 2015
 - [192] N. Hatziaargyriou “Microgrids: Architectures and Control”, Wiley-IEEE Press, January 2014
 - [193] M. H. Gomes, J. T. Saraiva, “Allocation of reactive power support, active loss balancing and demand interruption ancillary services in MicroGrids”, Electric Power Systems Research, vol. 80, no. 10, October 2010
 - [194] A. Konttinen, N. Moilanen, “Experiential Learning with Multisensory and Digital Elements”, Interdisciplinary Studies Journal, vol. 4, no. 1, pp. 28-40, January 2015
 - [195] J. Pine, J. Gilmore, “The experience economy”, Harvard Business Review Press, Boston, 2011
 - [196] A. Ρήγας, «Έλεγχος AC/DC/AC μετατροπέα για λειτουργία ενισχυτή σε προσομοίωση πραγματικού χρόνου», Διπλωματική εργασία ΕΜΠ, Ιούλιος 2011
 - [197] N. Νταβαρίνος, «Μελέτη αυτόνομων υβριδικών συστημάτων με προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο», Διπλωματική εργασία ΕΜΠ, Οκτώβριος 2016
 - [198] Μ. Μανιατόπουλος, «Τοπικός και συντονισμένος έλεγχος τάσης σε δίκτυα με διεσπαρμένη παραγωγή σε πραγματικό χρόνο», Διπλωματική εργασία ΕΜΠ, Νοέμβριος 2014

- [199] Ν. Κατσουλάκος, «Μοντελοποίηση ανεμογεννήτριας σε πραγματικό χρόνο για μελέτη ρύθμισης συχνότητας», Διπλωματική εργασία ΕΜΠ, Μάρτιος 2013
- [200] V. Kleftakis; A. Rigas; C. Papadimitriou; N. Katsoulakos; P. Moutis; N. Hatziargyriou, “Contribution to frequency control by a PMSG wind turbine in a Diesel-Wind Turbine microgrid for rural electrification”, 9th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission Distribution and Energy Conversion (MedPower), Athens, November 2014
- [201] T. Sarris, G. Messinis, N. Hatziargyriou, “Residential demand response with low cost smart load controllers”, 10th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (Medpower), Belgrade, November 2016
- [202] Institute for Electric Efficiency, “Utility scale smart meter deployments, Plans and proposals”, IEE report, May 2012
- [203] V. Giordano, A. Meletiou, C.F. Covrig, A. Mengolini, M. Ardelean, G. Fulli, M. S. Jimenez, C. Filiou., “Smart Grid projects in Europe: lessons learned and current developments”, European Commission Joint Research Centre Report, 2011
- [204] F. Benzi, N. Anglani, E. Bassi and L. Frosini, “Electricity Smart Meters Interfacing the Households”, IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 58, no. 10, pp. 4487-4494, Oct. 2011
- [205] A. Dimeas, S. Drenkard, N. Hatziargyriou, S. Karnouskos, K. Kok, J. Ringelstein, A. Weidlich, “Smart Houses in the Smart Grid: Developing an interactive network”, IEEE Electrification Magazine, Volume:2, Issue: 1, Pages 81 – 93, March 2014
- [206] J. Kirchhof, G. Klein “Results of the OPTINOS Project – Deficits and Uncertainties in Photovoltaic Inverter Test Procedures”, 24th EU PV SEC Conference and Exhibition, Hamburg, Germany, September 2009
- [207] S. K. Rönnerberg, M. Wahlberg, M. H. J. Bollen, A. Larsson, C. M. Lundmark, “Measurements of interaction between equipment in the frequency range 9 to 95 kHz”, 20th CIREN Conf., Prague, Sept. 2009
- [208] J. Kirchhof, “Ergebnisse aus dem Projekt OPTINOS – Defizite und Unsicherheiten bei der Prüfung von PV-Wechselrichtern”, presented at the EMV 2010 International Exhibition and Conference on Electromagnetic Compatibility (EMC), Düsseldorf, Germany
- [209] Swedish Board for Accreditation and Conformity Assessment, “Noise and standards for electricity meters”, EN-50470-1 & EN 50470-3”, 2010
- [210] S. Z. Djokic, J.V. Milanovic, “Power Quality and Compatibility Levels: A General Approach”, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume:22, Issue: 3, July 2007
- [211] M. B. Krause, “Zählstörung”, Photon profi magazine, November 2010
- [212] European Smart Metering Industry Group (ESMIG), “Result of the EMC workshop held in Brussels on 12-4-2011”, Brussels, Belgium, June 2011
- [213] EU reactions to PC, “Review of the Measuring Instruments Directive 2004/22/EC”, 2010
- [214] CENELEC SC 205A “Study Report on Electromagnetic Interference between Electrical Equipment / Systems in the Frequency Range below 150 kHz”, SC205A/Sec0260/R, April 2010
- [215] IEC Smart Grid Standardization Roadmap, June 2010, p. 102&3
- [216] M. Olofsson, “EMC requirements in European network codes”, IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, Vol. 2, Issue 2, 2nd Quarter 2013
- [217] B. W. Jaekel, “Current Situation in the Frequency Range from 2 to 150 kHz with regard to Electromagnetic compatibility”, presented at the 22nd International Conference on Electromagnetic Disturbances, Vilnius, Lithuania, September 2012

- [218] J. Meyer, S. Haehle, P. Schegner, "Impact of higher frequency emission above 2kHz on electronic mass-market equipment", 22nd CIRED conference, Stockholm, June 2013
- [219] CLC/TR 50627:2015, Study Report on Electromagnetic Interference between Electrical Equipment/Systems in the Frequency Range Below 150 kHz, November 2015
- [220] R. Bauknech, "EMC in the 2–150 kHz range: a standardization gap is being closed", IEEE Industrial electronics society (Swiss chapter) Workshop on EMC and harmonic mitigation: Forthcoming standards and advances in filter technology, Luterbach, November 2015
- [221] IEC 61000-4-3, Electromagnetic compatibility (EMC) – Testing and measurement techniques - Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test, 2010.
- [222] IEC 61000-4-6, Electromagnetic compatibility (EMC) – Testing and measurements techniques- Immunity to conducted disturbances, induced by radio frequency fields, 2008.
- [223] IEC 61000-4-13, Electromagnetic compatibility (EMC) – Testing and measurement techniques - Harmonics and interharmonics including mains signaling at a.c. power port, low frequency immunity tests, 2009.
- [224] IEC 61000-4-16, Electromagnetic compatibility (EMC) – Testing and measurement techniques - Test for immunity to conducted, common mode disturbances in the frequency range 0 Hz to 150 kHz, 2002
- [225] EN 62052-11, Electricity metering equipment (AC) – General requirements, tests and test conditions- Part 11: Metering equipment, 2003.
- [226] EN 62053-21, Electricity metering equipment (AC) – Particular requirements- Part 21: Static meters for active energy (classes 1 and 2), 2003.
- [227] Measuring Instrument Directive (MID) 2004/22/EC, European parliament, 2004.
- [228] EN 50470-1, Electricity metering equipment (AC) – Part 1: General requirements, tests and test conditions – Metering equipment (class indexes A, B and C), 2006.
- [229] EN 50470-3, Electricity metering equipment (AC) – Part 3: Particular requirements – Static meters for active energy (class indexes A, B and C), 2006.
- [230] S. Kim, E. Y. Kwon, M. Kim, J. H. Cheon, S. Ju, Y. Lim and M. Choi, "A secure smart-metering protocol over power-line communication", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, no. 4, pp.2370 -2379, 2011
- [231] EN 55011, Industrial, scientific and medical equipment – Radio-frequency disturbance characteristics - Limits and methods of measurement, 2009.
- [232] IEC 61000-6-3 ed.2, Electromagnetic compatibility (EMC) – Generic standards – Emission standard for residential, commercial and light-industrial environments, 2006.
- [233] EN 55022, Information technology equipment – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement, 2010
- [234] IEC 61727 ed2.0, Photovoltaic (PV) systems – Characteristics of the utility interface, 2004
- [235] Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, «Οδηγίες για την εγκατάσταση Φ/Β συστημάτων σε κτηριακές εγκαταστάσεις», Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, Αύγουστος 2009
- [236] VDE FNN, "Leitfaden zur Bewertung der Zuverlässigkeit and Messbeständigkeit von Elektrizitatzählern und Zusatzeinrichtungen", November 2011
- [237] CLC/TR 50579:2012, Electricity metering equipment (a.c.) – Severity levels, immunity requirements and test methods for conducted disturbances in the frequency range 2 kHz - 150 kHz, 2012
- [238] S. K. Ronnberg, M. H. J. Bollen ; M. Wahlberg, " Interaction Between Narrowband Power-Line Communication and End-User Equipment", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol:26 , Issue:3, July 2011

- [239] G. F. Bartak, A. Abart, "EMI of emissions in the frequency range 2 kHz – 150 kHz", presented at the 22th International Conference on Electricity Distribution, Stockholm, Sweden, Jun. 10 – 13, 2013.
- [240] G. F. Bartak, A. Abart "EMI in the Frequency Range 2 - 150 kHz", International Symposium on Electromagnetic Compatibility, (EMC'14/Tokyo), Tokyo, May 2014
- [241] K. Murakawa, N. Hirasawa, H. Ito, Y. Ogura, "Electromagnetic interference examples of telecommunications system in the frequency range from 2kHz to 150kHz", International Symposium on Electromagnetic Compatibility, (EMC'14/Tokyo), Tokyo, May 2014
- [242] L. Bettinsoli, R. Napolitano, C. Imposimato, P. Giubbini, "Impact of non intentional disturbance on distribution line communication", 23rd CIRED conference, Lyon, June 2015
- [243] M. Arechavaleta, M. Halpin, A. Birchfield, W. Pittman, E. Griffin, M. Mitchell, "Potential Impacts of 9-150 kHz Harmonic Emissions on Smart Grid Communications in the United States", 5th ENERGY Conference, Rome, Italy, May 2015
- [244] W. Radasky, "Emission Standardization in the 2-150 kHz Frequency Band", Asia-Pacific International EMC Symposium and Exhibition (APEMC 2015), Taipei, May 2015.
- [245] IEC 61000-4-7, Electromagnetic compatibility (EMC) – Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto, 2009
- [246] M. Klatt, J. Meyer, P. Schegner, A. Koch, J. Myrzik, T. Darda, G. Eberl, "Emission levels above 2 kHz — Laboratory results and survey measurements in public low voltage grids", 22nd CIRED conference, Stockholm, June 2013
- [247] S. Rönnberg, M. Bollen, A. Larsson, "Emission from small scale PV installations on the low voltage grid", International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICRE PQ'14), Cordoba, 2014
- [248] S. Rönnberg, M. Bollen, A. Larsson, "Grid impact from PV-installations in northern Scandinavia", 22nd CIRED conf., Stockholm, June 2013
- [249] S. Schottke, J. Meyer, P. Schegner, S. Bachmann, "Emission in the frequency range of 2 kHz to 150 kHz caused by electrical vehicle charging", International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe), Gothenburg, September 2014
- [250] E. Larsson, M. Bollen, M. Wahlberg, C. Lundmark, S. Ronnberg, "Measurements of High-Frequency (2–150 kHz) Distortion in Low-Voltage Networks", IEEE Trans. on Power Del, Volume:25, Issue: 3, July 2010
- [251] A. Larsson, M. Bollen, "Towards a standardized measurement method for voltage and current distortion in the frequency range 2 to 150 kHz", 22nd CIRED conference, Stockholm, June 2013
- [252] IEC 61000-4-30 Ed. 3, Electromagnetic compatibility (EMC) – Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods, February 2015
- [253] IEC/TS 62578:2015, Power electronics systems and equipment – Operation conditions and characteristics of active infeed converter (AIC) applications including design recommendations for their emission values below 150 kHz, April 2015
- [254] IEC/TS 62578 Ed.2, Power electronics systems and equipment – Operation conditions and characteristics of active infeed converter (AIC) applications including design recommendations for their emission values below 150 kHz, 2013, under revision. Available online: <http://www.beama.org.uk/download.cfm/docid/17AC5E9A-897A-4576-AEF99D6EB9409EC6>

- [255] EURELECTRIC, “EURELECTRIC position regarding emission levels at frequencies below 150 khz of equipment connected to low and medium voltage electricity networks”, November 2012
- [256] CEN, CENELEC, ESMIG, Eurelectric and ORGALIME joint workshop, “Electromagnetic Interference in the Cenelec-A band”, Brussels, September 2013
- [257] Don Heirman, “EMC standards activity”, IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, Volume:3, Issue: 2, 2nd Quarter 2014
- [258] D. Gallo, A. Liccardo and N. Pasquino, "Performance analysis of an active energy induction meter using an innovative approach", XVIII IMEKO World Congress, Metrology for a Sustainable Development, Rio de Janeiro, Brazil, September, 17-22, 2006.
- [259] IEC 61000-4-19, Electromagnetic Compatibility (EMC) – Testing and measurement techniques – Test for immunity to conducted, differential mode disturbances and signalling in the frequency range 2 kHz to 150 kHz at a.c. power ports, 2014
- [260] J. Kirchhof, “EMV-Unverträglichkeiten zwischen Elektrizitätszählern und Stromrichtern”, Power Quality Vertiefungs Seminar, Mannheim, Germany, March 2011
- [261] M. Fuhrer, “Test procedures for conducted transient immunity testing for low frequency energy meters”, Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), Melbourne, May, 2013
- [262] F. Gronwald, R. Conrads, R. Janssen and T. Weber, “Efficient immunity testing of smart meter devices in the frequency range 2-150 kHz”, 22nd CIRED conference, Stockholm, Sweden, June 2013
- [263] C.R. Paul, “Introduction to Electromagnetic Compatibility”, 2nd ed., Wiley, New Jersey, USA, 2006
- [264] A. Yazdani, R. Iravani, “Voltage sourced converters in power systems: Modeling, control and applications”, Wiley-IEEE Press, 2010

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

Περιοδικά:

- [A.1] M. Maniatopoulos, D. Lagos, P. Kotsampopoulos, N. Hatziargyriou, “Combined Control and Power Hardware-in-the-Loop simulation for testing Smart grid control algorithms”, IET Generation, Transmission & Distribution, Early Access, DOI: 10.1049/iet-gtd.2016.1341, March 2017
- [A.2] P. Kotsampopoulos, V. Kleftakis, N. Hatziargyriou, “Laboratory Education of Modern Power Systems using PHIL Simulation”, IEEE Transactions on Power Systems, Early Access, DOI: 10.1109/TPWRS.2016.2633201, December 2016
- [A.3] P. Kotsampopoulos, A. Rigas, J. Kirchhof, G. Messinis, A. Dimeas, N. Hatziargyriou, V. Rogakos, K. Andreadis, “EMC issues in the interaction between smart meters and power electronic interfaces”, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume: 32, Issue: 2, April 2017
- [A.4] P. Kotsampopoulos, F. Lehfuss, G. Lauss, B. Bletterie, N. Hatziargyriou, “The limitations of digital simulation and the advantages of PHIL testing in studying Distributed Generation provision of ancillary services”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume: 62, Issue: 9, September 2015
- [A.5] V. Karapanos, P. Kotsampopoulos, N. Hatziargyriou, “Performance of the linear and binary algorithm of virtual synchronous generators for the emulation of rotational inertia”, Electric Power Systems Research, Volume: 123, June 2015
- [A.6] M.O. Faruque, T. Strasser, G. Lauss, V. Jalili-Marandi, P. Forsyth, C. Dufour, V. Dinavahi, A. Monti, P. Kotsampopoulos, J.A. Martinez, K. Strunz, M. Saeedifard, X. Wang, D. Shearer, M. Paolone (IEEE PES Task Force), “Real-Time Simulation Technologies for Power Systems Design, Testing, and Analysis”, IEEE Power and Energy Technology Systems Journal, Volume: 2, Issue: 2, June 2015
- [A.7] F. Andren, B. Bletterie, S. Kadam, P. Kotsampopoulos, C. Bucher, “On the Stability of local Voltage Control in Distribution Networks with a High Penetration of Inverter-Based Generation”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume: 62, Issue: 4, April 2015
- [A.8] F. Andrén, F. Lehfuss, P. Jonke, T. Strasser, E. Rikos, P. Kotsampopoulos, P. Moutis, F. Belloni, C. Sandroni, C. Tornelli, A. Villa, A. Krusteva, R. Stanev, “DERri Common Reference Model for Distributed Energy Resources—modeling scheme, reference implementations and validation of results”, e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, Volume: 131, Issue: 8, Springer Vienna, December 2014
- [A.9] P. Kotsampopoulos, A. Kapetanaki, G. Messinis, V. Kleftakis, N. Hatziargyriou, “A PHIL facility for Microgrids”, International Journal of Distributed Energy Resources, Volume: 9, No: 1, January-March 2013
- [A.10] T. Strasser, M. Stifter, W. Hribernik, E. Lambert, P. Kotsampopoulos, P. Crolla, and C. Tornelli, “Improving the Portability and Exchangeability of Model Data for Smart Grids Real-Time Simulations—Definition of a Common Reference Model,” e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, Springer Vienna, January 2013

- [A.11] K. Latoufis, G. Messinis, P. Kotsampopoulos, N. Hatziargyriou “Axial flux permanent magnet generator design for low cost manufacturing of small wind turbines”, Wind Engineering, Volume: 36, No: 4, August 2012

Εργασίες στα πρακτικά συνεδρίων με κρίση:

- [B.1] T. Strasser, F. Andrén, G. Lauss, R. Bründlinger, H. Brunner, C. Moyo, C. Seitzl, S. Rohjans, S. Lehnhoff, P. Palensky, P. Kotsampopoulos, N. Hatziargyriou, G. Arnold, W. Heckmann, E.C.W De Jong, M. Verga, G. Franchioni, L. Martini, A.M. Kosek, O. Gehrke, H. Bindner, F. Coffele, G. Burt, M. Calin, J.E. Rodriguez-Seco, “Towards Holistic Power Distribution System Validation and Testing – An Overview and Discussion of Different Possibilities”, CIGRE Session 46, Paris, August 2016
- [B.2] A. Dimitriou, P. Kotsampopoulos, N. Hatziargyriou, “Electrifying rural areas in developing countries: Best practices and case study of hybrid system”, CIGRE IEC International Symposium, Cape Town, South Africa, October 2015
- [B.3] I. Kouveliotis-Lysikatos, P. Kotsampopoulos, N. Hatziargyriou, “Harmonic Study in LV networks with high penetration of PV systems”, IEEE PowerTech 2015, Eindhoven, July 2015
- [B.4] Π. Κοτσαμπόπουλος, Κ. Λατούφης, Ν. Χατζηαργυρίου, «Πρακτική προσέγγιση στην εκπαίδευση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας», Πανελλήνιο Συνέδριο: Η εκπαίδευση στην Εποχή των Τ.Π.Ε., Αθήνα, Νοέμβριος 2014
- [B.5] D. Barakos, P. Kotsampopoulos, A. Vassilakis, V. Kleftakis, N. Hatziargyriou, “Methods for Stability evaluation of Power Hardware in the Loop Simulations”, 9th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission Distribution and Energy Conversion (MedPower), Athens, November 2014
- [B.6] A. Dimitriou, P. Kotsampopoulos, N. Hatziargyriou, “Best Practices of Rural Electrification in Developing Countries”, 9th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission Distribution and Energy Conversion (MedPower), Athens, November 2014
- [B.7] G. Messinis, V. Kleftakis, I. Kouveliotis-Lysikatos, A. Rigas, A. Vassilakis, P. Kotsampopoulos, N. Hatziargyriou, “A Multi-Microgrid Laboratory Infrastructure for Smart Grid Applications”, 9th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission Distribution and Energy Conversion (MedPower), Athens, November 2014
- [B.8] P. Kotsampopoulos, G. Messinis, A. Vassilakis, V. Kleftakis, A. Rigas, N. Hatziargyriou, “Laboratory education on distributed energy resources making use of an advanced infrastructure”, 9th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission Distribution and Energy Conversion (MedPower), Athens, November 2014
- [B.9] V. Papaspiliotopoulos, V. Kleftakis, P. Kotsampopoulos, G. Korres, N. Hatziargyriou, “Hardware-in-the-loop simulation for protection blinding and sympathetic tripping in distribution grids with high penetration of distributed generation”, 9th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission Distribution and Energy Conversion, (MedPower), Athens, November 2014

- [B.10] F. Andren, F. Lehfuss, P. Jonke, T. Strasser, E. Rikos, P. Kotsampopoulos, P. Moutis, F. Belloni, C. Sandroni, C. Tornelli, A. Villa, A. Krusteva, R. Stanev: “DERri Common Reference Model for Distributed Energy Resources - Modelling Scheme, Reference Implementations and Validation of Results”, CIGRE Session 45, Paris, August 2014
- [B.11] K. Mentesidi, E. Rikos, V. Kleftakis, P. Kotsampopoulos, M. Santamaria, M. Aguado, “Implementation of a microgrid model for DER integration in real-time simulation platform”, IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Istanbul, June 2014
- [B.12] P. Kotsampopoulos, N. Hatziargyriou, B. Bletterie, G. Lauss, “Review, analysis and recommendations on recent guidelines for the provision of ancillary services by Distributed Generation”, IEEE International Workshop on Intelligent Energy Systems (IWIES), Vienna, November 2013
- [B.13] P. Kotsampopoulos, N. Hatziargyriou, B. Bletterie, G. Lauss, T. Strasser, “Introduction of advanced testing procedures including PHIL for DG providing ancillary services”, 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society IECON 2013, Vienna, November 2013
- [B.14] K. Mentesidi, M. Santamaria, M. Aguado, A. Vassilakis, A. Rigas, V. Kleftakis, P. Kotsampopoulos, “Power Hardware-In-The- Loop technique applied to a LV Network for integrating a Supercapacitor with an Average Model of STATCOM”, IEEE International Workshop on Intelligent Energy Systems (IWIES), Vienna, November 2013
- [B.15] V. Kleftakis, A. Rigas, A. Vassilakis, P. Kotsampopoulos, N. Hatziargyriou, "Power-Hardware-in-the-loop simulation of a D-STATCOM equipped MV network interfaced to an actual PV inverter", IEEE PES, Innovative Smart Grid Technologies ISGT Europe 2013, Copenhagen, October 2013
- [B.16] A. Vassilakis, P. Kotsampopoulos, N. Hatziargyriou, V. Karapanos, "A Battery Energy Storage Based Virtual Synchronous Generator", In proceeding of: 2013 IREP Symposium - Bulk Power System Dynamics and Control - IX Optimization, Security and Control of the Emerging Power Grid, Rethymnon, August 2013
- [B.17] Θ. Κορλός, Π. Κοτσαμπόπουλος, Β. Κλεφτάκης, "Αντιμετώπιση Φαινομένου Ανύψωσης Τάσης Λόγω Διείσδυσης Φωτοβολταϊκών στη Χαμηλή Τάση", 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Φοιτητών Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Αθήνα, Απρίλιος 2013
- [B.18] P. Kotsampopoulos, V. Kleftakis, G. Messinis, N. Hatziargyriou, “Design, development and operation of a PHIL environment for Distributed Energy Resources”, 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society IECON 2012, Montreal, October 2012
- [B.19] T. Strasser, M. Stifter, W. Hribernik, E. Lambert, P. Kotsampopoulos, P. Crolla, C. Tornelli, “Improving the Portability and Exchangeability of Model Data for Smart Grids focusing on Real-Time Simulations – Definition of a Common Reference Model”, CIGRE Session 44, Paris, August 2012
- [B.20] F. Lehfuss, G. Lauss, P. Kotsampopoulos, N. Hatziargyriou, P. Crolla, A. Roscoe, “Comparison of multiple Power Amplification types for Power Hardware-in-the-Loop

Applications”, IEEE Workshop on Complexity in Engineering (COMPENG 2012), Aachen, June 2012

- [B.21] B. Κλεφτάκης, Π. Κοτσαμπόπουλος, “Μελέτη προσομοίωσης Power Hardware In The Loop και διερεύνηση ανύψωσης της τάσης εξαιτίας της διείσδυσης φωτοβολταϊκών στη Χαμηλή Τάση”, 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Φοιτητών Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Ξάνθη, Απρίλιος 2012
- [B.22] P. Kotsampopoulos, G. Messinis, A. Gkravas, K. Latoufis, N. Hatziaargyriou, “Design, construction, simulation and performance of axial flux small wind turbines”, EWEA 2011, Brussels, March 2011
- [B.23] Π. Κοτσαμπόπουλος, Κ. Λατούφης, “Μελέτη, κατασκευή και προσομοίωση της λειτουργίας μικρής ανεμογεννήτριας αξονικής ροής”, 4ο Συνέδριο Φοιτητών Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πάτρα, Νοέμβριος 2010

Διαλέξεις και παρουσιάσεις σε συνέδρια χωρίς κρίση:

- [C.1] N. Hatziaargyriou, M. Maniatopoulos, P. Kotsampopoulos, V. Kleftakis, “Testing Local and Coordinated Voltage Control Approaches with CHIL and PHIL Simulation”, Presentation in Panel at the 10th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower), Belgrade, November 2016
- [C.2] N. Hatziaargyriou, M. Maniatopoulos, D. Lagos, V. Kleftakis, V. Papaspiliotopoulos, P. Kotsampopoulos, G. Korres, “CHIL and PHIL simulation for testing modern distribution network control and DER”, Presentation in Panel at the IEEE Power & Energy Society General Meeting 2016, Boston, July 2016
- [C.3] P. Kotsampopoulos, “Best Practices of Rural Electrification in Developing Countries”, 11th Symposium on Microgrids, Aalborg, August 2015
- [C.4] P. Kotsampopoulos, “Sustainable communities”, Presentation in Panel at the 11th Symposium on Microgrids, Aalborg, August 2015
- [C.5] P. Kotsampopoulos, F. Lehfuß, G. Lauss, B. Bletterie, N. Hatziaargyriou, “Limitations of Digital Simulation and Advantages of PHIL Testing for DG providing Ancillary Services”, Joint SIRFN/DERlab Workshop on Advanced Laboratory Testing Methods, Paris, March 2015
- [C.6] P. Kotsampopoulos, V. Kleftakis, V. Papaspiliotopoulos, A. Rigas, A. Vassilakis, N. Hatziaargyriou, G. Korres, “Experiences with PHIL and CHIL testing for DER at NTUA”, RTDS European User’s Group Meeting, Lyngby, October 2014
- [C.7] P. Kotsampopoulos, V. Kleftakis, V. Papaspiliotopoulos, A. Rigas, A. Vassilakis, N. Hatziaargyriou, G. Korres, “Power System testing by means of Hardware-in-the-Loop simulation”, DERlab workshop on “Power System Testing”, Luxembourg, April 2014
- [C.8] N. Hatziaargyriou, P. Kotsampopoulos, V. Kleftakis, A. Vassilakis, A. Rigas, “DER supporting the grid simulations by means of Power-Hardware-in-the-Loop”, In proceeding of: 2013 IEEE PES General Meeting, Volume: GM2471 presentation in Panel “Control of Converter Interfaced DER Connected at Distribution Networks”, Vancouver, July 2013
- [C.9] T. Strasser, F. Lehfuß, P. Kotsampopoulos, P. Crolla, C. Tornelli, S. Numminen: “Harmonising hardware-in-the-loop simulation procedures for power systems and

distributed energy resources components”, IRED 2012 conference, Berlin, December 2012

- [C.10] P. Kotsampopoulos, “Laboratory Experiences with Power-hardware-in-the-loop Simulation for Distributed Energy Resources”, Presentation in Panel at the IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT) conference, Berlin, October 2012
- [C.11] P. Kotsampopoulos, "Real-Time simulation and microgrids", DERlab's PhD and Young Researcher Seminar: Distributed and Renewable Generation, Glasgow, April 2011
- [C.12] K. Latoufis, P. Kotsampopoulos, “Design, construction and simulation of a small scale axial flux wind turbine”, International Workshop on Small Scale Wind Energy for Developing Countries, Pokhara, November 2010

Βιβλία:

- [D.1] E. de Jong, R. de Graaff, P. Vaessen, P. Crolla, A. Roscoe, F. Lehfuss, G. Lauss, P. Kotsampopoulos, F. Gafaro, “European White Book on Real-Time Power Hardware-in-the-loop testing”, DERlab e.V., 2012