



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

**Συγκριτική μελέτη για τη χρήση συνεχούς ρεύματος σε δίκτυο
ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού
αερίου (LNG)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΙΑΚΩΒΟΥ ΓΑΡΥΦΑΛΛΟΥ

Επιβλέπων : Ιωάννης Προυσαλίδης
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2015

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

Συγκριτική μελέτη για τη χρήση συνεχούς ρεύματος σε δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΙΑΚΩΒΟΥ ΓΑΡΥΦΑΛΛΟΥ

Επιβλέπων : Ιωάννης Προυσαλίδης
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Δεκεμβρίου 2015.

(Υπογραφή)

.....
Ιωάννης Προυσαλίδης
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Δημήτριος Λυρίδης
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Χρήστος Παπαδόπουλος
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2015

(Υπογραφή)

.....

Ιάκωβος Γαρυφαλλος

Διπλωματούχος Ναυπηγός Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

© 2015 – All rights reserved

Ευχαριστίες

Θα ήθελα καταρχήν να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλλαν με οποιοδήποτε τρόπο στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Προυσαλίδη που επέβλεψε τη διπλωματική μου και μου έδωσε την ευκαιρία να εκπονήσω διπλωματική εργασία σε έναν από τους πιο ενδιαφέροντες τομείς της σχολής Ναυπηγών, αυτόν του τομέα Ναυτικής Μηχανολογίας. Με την παροχή των γνώσεων και της εμπειρίας του με βοήθησε πολύ να κατανοήσω και να εμπεδώσω τις απαιτήσεις του θέματος.

Εν συνεχεία θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Θεοδωρή Κουρμπέλη για την εξαιρετική και αποδοτική συνεργασία που είχαμε. Ο κ. Κουρμπέλης από την στιγμή που αρχίσαμε να συνεργαζόμαστε μέχρι και την παρουσίαση της διπλωματικής ήταν πάντα διαθέσιμος και με πολύ όρεξη. Ήταν ο άνθρωπος που είχε μια απάντηση σε κάθε ερώτημα μου και μια οδηγία για κάθε δισταγμό μου. Επίσης πολλά από αυτά που παρουσιάζονται και αναφέρονται στην εργασία αποτελούν δικές του ιδέες. Εύχομαι το καλύτερο για την πορεία του από εδώ και πέρα.

Επιπλέον είναι ανάγκη να αναφέρω πως τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στο πειραματικό μέρος είναι καθόλα αληθινά, γι' αυτό το λόγο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ναυπηγό κύριο Ανδρέα Σπέρτο για την άμεση και αμέριστη βοήθεια που μας παρείχε. Χωρίς αυτή η διπλωματική εργασία θα έχανε πολύ από την αξία της.

Τέλος, ευχαριστώ πολύ την οικογένεια μου για την στήριξη που μου προσέφερε ολόκληρη την διάρκεια των σπουδών μου στο ΕΜΠ.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εφαρμογή προηγμένων συστημάτων ισχύος σε πλοία. Αρχικά, παρουσιάζονται διάφορες προηγμένες τεχνολογίες παραγωγής ισχύος, εξελιγμένες διαμορφώσεις μετασχηματιστών καθώς και μοντέρνα συστήματα αποθήκευσης της παραγόμενης ισχύος και βελτίωσης της ποιότητάς της. Γίνεται αναφορά επίσης σε ορισμένα συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας, ενώ στη συνέχεια δίνονται συγκεκριμένα παραδείγματα εφαρμογών συνεχούς ρεύματος (DC). Το επόμενο κεφάλαιο της εργασίας έχει ως θέμα τη μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ισχύος, δίνοντας ιδιαίτερη σημασία στα συστήματα συνεχούς ρεύματος, καθώς και στα DC μικροδίκτυα. Γίνεται αναφορά στην ευστάθεια και την προστασία των συστημάτων, ενώ πραγματοποιείται και μια σύγκριση μεταξύ των συστημάτων συνεχούς (DC) και εναλλασσόμενου (AC) ρεύματος. Το θεωρητικό μέρος ολοκληρώνεται με την παρουσίαση των βασικών χαρακτηριστικών, των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων 4 διαφορετικών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και πρόωσης πλοίων, τα οποία θα εξεταστούν στη συνέχεια της διπλωματικής εργασίας.

Τα υπόλοιπα κεφάλαια της διπλωματικής εργασίας αποτελούν το υπολογιστικό μέρος, όπου διεξάγονται προσομοιώσεις στο υπολογιστικό πακέτο Matlab/SIMULINK R2015b της εταιρίας Mathworks, με σκοπό τη σύγκριση των δικτύων AC και DC στο περιβάλλον ενός πλοίου μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG). Τα συστήματα μελετήθηκαν σε δυο καταστάσεις λειτουργίας, τη φόρτωση και την εκφόρτωσή του (CARGO_UNLOAD_LOAD) και την πορεία στην θάλασσα με τους αντίστοιχους ελιγμούς (PORTOUT_SEAGOING). Τα εξεταζόμενα δίκτυα για την παραγωγή της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα AC και ένα DC. Επίσης σε κάθε κατάσταση λειτουργίας με το αντίστοιχο εξεταζόμενο δίκτυο χρησιμοποιήθηκαν 1, 2 και 3 γεννήτριες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Στη συνέχεια επιχειρείται η οικονομοτεχνική αξιολόγηση 4 συστημάτων πρόωσης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για το πλοίο, το έχει τη δυνατότητα ανάκτησης των ατμών φυσικού αερίου που διαρρέουν από τις δεξαμενές μεταφοράς του (GAS MODE). Στη συνέχεια προτάθηκαν τέσσερα διαφορετικά συστήματα, τα οποία θα συγκριθούν σε οικονομική βάση, ώστε να αξιολογηθεί η βιωσιμότητα της κάθε επένδυσης. Τα κύρια συστήματα που εξετάστηκαν είναι: DIESEL ELECTRIC PROPULSION, FULL POWER CONVERTER AC SYSTEM, DC SYSTEM και VARIABLE FREQUENCY AC SYSTEM. Τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι μελλοντικές προοπτικές σχετικά με την εφαρμογή προηγμένων DC συστημάτων ισχύος σε πλοία.

Λέξεις κλειδιά: Συστήματα πρόωσης, Συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, Δίκτυο AC, Δίκτυο DC.

Abstract

The subject of this thesis is the application of advanced power systems on ships. Various advanced propulsion technologies, advanced configurations of transformers and state-of-the-art power storage systems are presented. Energy saving systems are also described, as well as specific examples of DC applications. The next chapter of this thesis is the transmission and distribution of electrical power, giving special attention to DC systems, as well as to the DC microgrids. The stability and security of the systems are of particular interest. A comparison between DC and AC systems is attempted. The theoretical part is completed with the presentation of the main characteristics, advantages and disadvantages of four different power and propulsion systems, which will be examined in this particular thesis.

The remaining chapters are the computational part of this thesis, where simulations are carried out with the computational software Matlab / SIMULINK R2015b of Mathworks company, for the comparison of AC and DC systems in the environment of an LNG tanker (LNG). The systems were studied in two modes, loading and unloading (CARGO_UNLOAD_LOAD) and the seagoing (PORTOUT_SEAGOING). The systems studied for the production of the required electric power are AC re DC systems. Also in each mode 1, 2 and 3 power generators were tested.

Then, a feasibility evaluation of the four power generation and propulsion systems is attempted. The ship has the potential recovery of gas vapors leaking from transportation tanks (GAS MODE). The four different systems studied are compared on an economic basis, to assess the viability of each investment. The main systems examined are: DIESEL ELECTRIC PROPULSION, FULL POWER CONVERTER AC SYSTEM, DC SYSTEM and VARIABLE FREQUENCY AC SYSTEM. Finally the conclusions and future perspectives on the application of advanced DC Power Systems on Ships are presented.

Keywords: *Propulsion systems, Electric generation systems, AC power grid, DC power grid.*

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	5
Περίληψη	6
Abstract.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Προηγμένα συστήματα ισχύος.....	17
1.1 Εισαγωγή.....	17
1.2 Συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος	17
1.2.1 Προηγμένες τεχνολογίες φυσικού αερίου.....	18
1.2.2 Προηγμένες τεχνολογίες άνθρακα	19
1.2.3 Πυρηνική τεχνολογία.....	20
1.3 Μετασχηματιστές.....	21
1.3.1 Εξέλιξη τεχνολογίας μετασχηματιστών.....	21
1.3.2 Μετασχηματιστές ισχύος	22
1.3.3 Μετασχηματιστές προηγμένης τεχνολογίας.....	23
1.4 Προηγμένα συστήματα αποθήκευσης και βελτίωσης της ποιότητας ισχύος	27
1.4.1 Υπεραγώγιμη μαγνητική αποθήκευσης ενέργειας (SMES).....	27
1.4.2 Σφόνδυλος αποθήκευσης ενέργειας (Flywheel)	29
1.5 Προηγμένο σύστημα εξοικονόμησης καυσίμου με χρήση ηλεκτρονικών ισχύος.....	31
1.5.1 Εισαγωγή.....	31
1.5.2 Μελέτη συστήματος εξοικονόμησης καυσίμου.....	32
1.6 Εφαρμογές συνεχούς ρεύματος (DC)	37
1.6.1 Δίκτυο διανομής ισχύος εμπορικού πλοίου	37
1.6.2 Αυτοκίνηση.....	39
1.6.3 Σιδηροδρομικές εφαρμογές.....	45
1.6.4 Αεροδιαστημικές εφαρμογές	47
1.6.5 Συστήματα ενέργειας	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Συστήματα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας...49	49
2.1 Εισαγωγή.....	49

2.2	Συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας	50
2.2.1	Το ελληνικό σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (AC)	50
2.2.2	DC συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής τάσης	52
2.2.3	Διαδικασία μετατροπής	52
2.2.4	Τοπολογίες HVDC CSC	54
2.2.5	Βασικές αρχές των συστημάτων HVDC με μετατροπέα πηγή τάσης (VSC)	56
2.3	Συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας	60
2.3.1	Φορτία DC	61
2.3.2	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	62
2.3.3	Αποθήκευση	63
2.4	DC μικροδίκτυα	63
2.4.1	Πλεονεκτήματα των DC Μικροδικτύων σε σχέση με τα AC	66
2.4.2	Σχεδιασμός DC συστημάτων διανομής	68
2.5	Ευστάθεια και προστασία των DC συστημάτων διανομής	73
2.6	Τεχνολογίες υποστήριξης των DC συστημάτων διανομής	74
2.7	Συγκριτική αξιολόγηση AC και DC συστημάτων διανομής	76
2.8	Το μέλλον των συστημάτων διανομής ισχύος	78
2.8.1	Έξυπνα δίκτυα (Smart Grids)	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:	Περιγραφή των συστημάτων πρόωσης	81
3.1	Diesel - Electric	81
3.2	Σύστημα πρόωσης AC	86
3.3	Σύστημα πρόωσης DC	89
3.4	Σύστημα πρόωσης AC μεταβλητής συχνότητας	92
3.5	Συμπερασματικά	94
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:	Παρουσίαση αποτελεσμάτων πειραματικού μέρους	95
4.1	Γενικά στοιχεία	95
4.2	Συλλογιστική πορεία προσομοιώσεων	96
4.3	Περιγραφή διαδικασίας προσομοίωσης	98
4.4	Αντιμετώπιση δυσκολιών	101
4.5	Αποτελέσματα προσομοιώσεων	101
4.5.1	PORTOUT_SEAGOING - ΔΙΚΤΥΟ AC	102
4.5.2	PORT OUT_SEAGOING – ΔΙΚΤΥΟ DC	111

4.5.3	CARGO_UNLOAD_LOAD – ΔΙΚΤΥΟ AC	122
4.5.4	CARGO_UNLOAD_LOAD – ΔΙΚΤΥΟ DC	127
4.5.5	Προσομοιώσεις λειτουργίας Bow Thrusters.....	134
4.6	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	136
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Οικονομοτεχνική αξιολόγηση.....		140
5.1	Γενικά στοιχεία.....	140
5.2	Ανάλυση κόστους των κύριων συστημάτων	141
5.3	Διαγράμματα οικονομικής αξιολόγησης επενδύσεων	146
Ανασκόπηση - Συμπεράσματα		148
Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη		149
Βιβλιογραφία		150
Παραρτήματα		156
Παράρτημα Α΄		156
Παράρτημα Β΄		184

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1.1: Διβάθμια διαδοχική καύση στον αεριοστρόβιλο της Alstrom [3]	19
Εικόνα 1.2: Μονάδα συνδυασμένου κύκλου με αεριοποίηση 253 MW στην Ολλανδία [3].....	20
Εικόνα 1.3: Το σύστημα IRIS [5]	20
Εικόνα 1.4: Εξέλιξη της ονομαστικής τάσης και ισχύος των μετασχηματιστών [7].....	22
Εικόνα 1.5: Μετασχηματιστής μόνωσης αερίου [9].....	24
Εικόνα 1.6: Μετασχηματιστής μόνωσης αερίου 400 MVA σε υπόγειο υποσταθμό [9].	24
Εικόνα 1.7: Σύγκριση μεταξύ συμβατικού και HTS μετασχηματιστή [10]	26
Εικόνα 1.8: Μετασχηματιστής ξηρού τύπου της εταιρίας EngineeringcompanyB&S [11]	26
Εικόνα 1.9: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος αποθήκευσης SMES συζευγμένο με μοντέλο ανεμογεννήτριας [15]	29
Εικόνα 1.10: Αρχή λειτουργίας του συστήματος Flywheel [16].....	30
Εικόνα 1.11: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος αποθήκευσης FESS συζευγμένο με μοντέλο ανεμογεννήτριας [17]	30
Εικόνα 1.12: Μονογραμμικό διάγραμμα συστημάτων ισχύος πλοίου (a) δίκτυο AC (b) δίκτυο DC [22].....	32
Εικόνα 1.13: Λεπτομερής αρχιτεκτονική του DC συστήματος ισχύος που μελετήθηκε [22].....	33
Εικόνα 1.14: Ειδική κατανάλωση καυσίμου μιας μηχανής εσωτερικής καύσης [22].....	34
Εικόνα 1.15: Εποπτική απεικόνιση του ελέγχου μεταβλητής ταχύτητας μονάδας diesel- γεννήτριας [22]	36
Εικόνα 1.16: Απώλειες ισχύος συστήματος γεννήτριας- ανορθωτή υπό σταθερή (αριστερά) και υπό μεταβλητή (δεξιά) ταχύτητα λειτουργίας [22]	36
Εικόνα 1.17: Τοπολογία αμφίδρομου μετατροπέα DC-DC πλήρους γέφυρας [22].....	37
Εικόνα 1.18: Επιλογές λειτουργίας του συστήματος προώθησης [27]	38
Εικόνα 1.19: Καινοτόμο δίκτυο διανομής ισχύος πλοίου [27].....	39
Εικόνα 1.20: Μπαταρία NI-MH υβριδικού οχήματος Toyota [29]	40
Εικόνα 1.21: Ηλεκτροκινητήρας (αριστερά)και γεννήτρια (δεξιά) του υβριδικού οχήματος Toyota [29]	41
Εικόνα 1.22:Μονάδα ελέγχου ισχύος [29]	42
Εικόνα 1.23: Σειριακό υβριδικόσύστημα [29].....	42

Εικόνα 1.24: Παράλληλο υβριδικό σύστημα [29]	43
Εικόνα 1.25: Σειριακό/ Παράλληλο υβριδικό σύστημα [29].....	44
Εικόνα 1.26: Απεικόνιση μερών μιας κυψέλης καυσίμου [29]	45
Εικόνα 1.27: Όχημα κυψελών καυσίμου της Toyota [29].....	45
Εικόνα 1.28: Σύστημα 750 V με εναέρια καλώδια στο Ηνωμένο Βασίλειο (NottinghamExpressTransit) [30]	46
Εικόνα 1.29: Σύγκριση μεταξύ των συστημάτων ενός συμβατικού αεροσκάφους και ενός MEA [32].....	47
Εικόνα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση της βασικής δομής του κλασικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας [36]	50
Εικόνα 2.2: Σύστημα HVDC με μετατροπέα πηγής ρεύματος με χρήση θυρίστορ [41].	53
Εικόνα 2.3: Σύστημα HVDC με μετατροπέα πηγής τάσης με χρήση IGBTs [41]	53
Εικόνα 2.4: Σύστημα HVDC Back-to-Back με μετατροπείς 12 παλμών [41]	54
Εικόνα 2.5: Μονοπολικό σύστημα HVDC με μετατροπείς 12 παλμών [41]	55
Εικόνα 2.6: Διπολικό σύστημα HVDC με μετατροπέα 12 παλμών ανά πόλο [41].....	55
Εικόνα 2.7: Πολυτερματικό σύστημα HVDC σε παράλληλη σύνδεση [41].....	56
Εικόνα 2.8: Τοπολογία συμβατικού συστήματος VSC δύο επιπέδων τριών φάσεων [41]	57
Εικόνα 2.9: Μετάβαση από μετατροπείς δύο και τριών επιπέδων σε μετατροπείς πολλών επιπέδων [44]	58
Εικόνα 2.10: Αντιστροφείς πολλαπλών επιπέδων με διόδους περιορισμού [45].....	58
Εικόνα 2.11: Αντιστροφείς πολλαπλών επιπέδων με πυκνωτές περιορισμού [41].....	59
Εικόνα 2.12: Σχεδιάγραμμα ενός συνήθους smartphone [38].....	62
Εικόνα 2.13: Σχηματική αναπαράσταση της βασικής δομής και των μερών ενός μικροδικτύου [38]	64
Εικόνα 2.14: Σχηματική αναπαράσταση της αρχιτεκτονικής ενός DC μικροδικτύου [60]	65
Εικόνα 2.15: Συνδυασμένη χρήση AC και DC τοπολογιών [56]	67
Εικόνα 2.16: Αρχιτεκτονική συνήθους συστήματος διανομής AC (τα διακεκομμένα τμήματα είναι προαιρετικά) [66]	69
Εικόνα 2.17: Αρχιτεκτονική συνήθους συστήματος διανομής DC (τα διακεκομμένα τμήματα είναι προαιρετικά) [66]	70
Εικόνα 2.18: Αρχιτεκτονική συστήματος διανομής DC με ενδιάμεσο ζυγό (τα διακεκομμένα τμήματα είναι προαιρετικά) [66].....	71
Εικόνα 2.19: Διατάξεις συστημάτων ισχύος κέντρου δεδομένων [67]	72

Εικόνα 2.20: Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας για διεσπαρμένη παραγωγή (a) υπερ- πυκνωτής, (b) σφόνδυλος μεγάλης ταχύτητας και (c) συστοιχία μπαταριών όσμωσης [66].....	75
Εικόνα 2.21: Αρχιτεκτονική DC συστήματος διανομής με αποθήκευση και παραγωγή DC ισχύος (τα διακεκομμένα τμήμα είναι προαιρετικά) [66]	76
Εικόνα 2.22: Σχηματική απεικόνιση των κυρίων μερών και των διασυνδέσεων ενός έξυπνου δικτύου [81]	80
Εικόνα 3.1: Diesel-electric propulsion plant [86].....	82
Εικόνα 3.2: Διάταξη Diesel – Electric για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την πρόωση του πλοίου LNG [85]	83
Εικόνα 3.3: Απώλειες μετατροπής ενέργειας σε ένα σύστημα Diesel – Electric [86]	84
Εικόνα 3.4: Σχηματική απεικόνιση συστήματος πρόωσης AC [82].....	86
Εικόνα 3.5: Σχηματική απεικόνιση ενός DC συστήματος [82]	89
Εικόνα 3.6: DC δίκτυο επί του πλοίου (Προσέγγιση πολλαπλής οδήγησης) [90]	90
Εικόνα 3.7: DC δίκτυο επί του πλοίου (Διεσπαρμένη προσέγγιση) [90]	90
Εικόνα 3.8: Σχηματική απεικόνιση ενός τυπικού συστήματος AC μεταβλητής συχνότητας [82]	93
Εικόνα 4.1: Το κύκλωμα του ανορθωτή με τα αντίστοιχα κύρια μέρη του που χρησιμοποιήθηκε στο δίκτυο DC.....	99
Εικόνα 4.2: Σχηματική απεικόνιση των 2 bow thrusters (2 MW) που χρησιμοποιήθηκαν στο SIMULINK	100

Ευρετήριο Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 4.1: Κατανομή ρευμάτων και τάσης στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για δυο γεννήτριες 5MVA DIESEL και μία 30MVA GAS αντίστοιχα	102
Διάγραμμα 4.2: Απορρόφηση ρεύματος από κινητήρα κύριας πρόωσης.....	103
Διάγραμμα 4.3: Απορρόφηση ισχύος από κινητήρα κύριας πρόωσης	103
Διάγραμμα 4.4: Η ανά μονάδα παραγωγή φαινόμενης ισχύος για τις γεννήτριες (με μαύρο εμφανίζεται η γεννήτρια των 30MVA ενώ με θαλασσί και μοβ οι γεννήτριες των 5MVA).....	104
Διάγραμμα 4.5: Κατανομή ρευμάτων και τάσης στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για μια γεννήτρια 5MVA DIESEL και μία 30MVA GAS αντίστοιχα	105
Διάγραμμα 4.6: Απορρόφηση ρεύματος από κινητήρα κύριας πρόωσης.....	106
Διάγραμμα 4.7: Απορρόφηση ισχύος από κινητήρα κύριας πρόωσης	106
Διάγραμμα 4.8: Η ανά μονάδα παραγωγή φαινόμενης ισχύος για τις γεννήτριες (με μαύρο εμφανίζεται η γεννήτρια των 30MVA ενώ με μοβ η γεννήτρια των 5MVA)....	107
Διάγραμμα 4.9: Κατανομή ρευμάτων και τάσης στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για μια γεννήτρια 30MVA GAS	108
Διάγραμμα 4.10: Απορρόφηση ρεύματος από κινητήρα κύριας πρόωσης.....	108
Διάγραμμα 4.11: Απορρόφηση ισχύος από κινητήρα κύριας πρόωσης	109
Διάγραμμα 4.12: Η ανά μονάδα παραγωγή φαινόμενης ισχύος για τη γεννήτρια (με μαύρο εμφανίζεται η γεννήτρια των 30MVA)	110
Διάγραμμα 4.13: Κατανομή ρευμάτων και τάσης στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για δυο γεννήτριες 5MVA DIESEL και μία 30MVA GAS αντίστοιχα	111
Διάγραμμα 4.14: Απορρόφηση ρεύματος από κινητήρα κύριας πρόωσης.....	112
Διάγραμμα 4.15: Τάση στον DC ζυγό	112
Διάγραμμα 4.16: Απορρόφηση ισχύος από κινητήρα κύριας πρόωσης	113
Διάγραμμα 4.17: Η ανά μονάδα παραγωγή φαινόμενης ισχύος για τις γεννήτριες (με μαύρο εμφανίζεται η γεννήτρια των 30MVA ενώ με θαλασσί και μοβ οι γεννήτριες των 5MVA).....	114
Διάγραμμα 4.18: Κατανομή ρευμάτων και τάσης στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για μια γεννήτρια 5MVA DIESEL και μία 30MVA GAS αντίστοιχα	115
Διάγραμμα 4.19: Απορρόφηση ρεύματος από κινητήρα κύριας πρόωσης.....	116
Διάγραμμα 4.20: Τάση στον DC ζυγό	116
Διάγραμμα 4.21: Απορρόφηση ισχύος από κινητήρα κύριας πρόωσης	117

Διάγραμμα 4.22: Η ανά μονάδα παραγωγή φαινόμενης ισχύος για τις γεννήτριες (με μαύρο εμφανίζεται η γεννήτρια των 30MVA ενώ με μοβ η γεννήτρια των 5MVA)...	118
Διάγραμμα 4.23: Κατανομή ρευμάτων και τάσης στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για μια γεννήτρια 30MVA GAS	119
Διάγραμμα 4.24: Απορρόφηση ρεύματος από κινητήρα κύριας πρόωσης.....	119
Διάγραμμα 4.25: Τάση στον DC ζυγό	120
Διάγραμμα 4.26: Απορρόφηση ισχύος από κινητήρα κύριας πρόωσης	120
Διάγραμμα 4.27: Η ανά μονάδα παραγωγή ισχύος για τη γεννήτρια (με μαύρο εμφανίζεται η γεννήτρια των 30MVA).....	121
Διάγραμμα 4.28: Η ανά μονάδα παραγωγή φαινόμενης ισχύος για τις γεννήτριες (με μαύρο εμφανίζεται η γεννήτρια των 30MVA ενώ με θαλασσί και μοβ οι γεννήτριες των 5MVA).....	122
Διάγραμμα 4.29: Κατανομή ρευμάτων και τάσης στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για δύο γεννήτριες 5MVA DIESEL.....	123
Διάγραμμα 4.30: Παραγωγή τάσης στο ζυγό των καταναλωτών	124
Διάγραμμα 4.31: Η ανά μονάδα παραγωγή φαινόμενης ισχύος για τις γεννήτριες (για δύο γεννήτριες 5MVA DIESEL)	125
Διάγραμμα 4.32: Η ανά μονάδα παραγωγή φαινόμενης ισχύος για τη γεννήτριες (για μια γεννήτρια 5MVA DIESEL).....	126
Διάγραμμα 4.33: Η ανά μονάδα παραγωγή φαινόμενης ισχύος για τις γεννήτριες (με μαύρο εμφανίζεται η γεννήτρια των 30MVA ενώ με θαλασσί και μοβ οι γεννήτριες των 5MVA).....	127
Διάγραμμα 4.34: Κατανομή ρευμάτων και τάσης στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για δύο γεννήτριες 5MVA DIESEL.....	128
Διάγραμμα 4.35: Απορρόφηση ρεύματος από καταναλωτές.....	129
Διάγραμμα 4.36: Τάση στον DC ζυγό	129
Διάγραμμα 4.37: Η ανά μονάδα παραγωγή ισχύος για τις γεννήτριες (για δύο γεννήτριες 5MVA DIESEL).	130
Διάγραμμα 4.38: Κατανομή ρευμάτων και τάσης στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για μία γεννήτρια 5MVA DIESEL	131
Διάγραμμα 4.39: Απορρόφηση ρεύματος από καταναλωτές.....	131
Διάγραμμα 4.40: Τάση στον DC ζυγό	132
Διάγραμμα 4.41: Η ανά μονάδα παραγωγή ισχύος για τη γεννήτριες (για μια γεννήτρια 5MVA DIESEL)	133
Διάγραμμα 4.42: Κατανομή έντασης ρεύματος κατά την απορρόφηση ηλεκτρικής ενέργειας από τους κινητήρες Bow thruster ισχύος 1 MW	134
Διάγραμμα 4.43: Τάση στους ακροδέκτες του Bow thruster ισχύος 1 MW	135

Διάγραμμα 4.44: Τάση στους ακροδέκτες του Bow thruster ισχύος 1 MW	135
Διάγραμμα 4.45: Κατανομή έντασης ρεύματος κατά την απορρόφηση ηλεκτρικής ενέργειας από τους κινητήρες Bow thruster ισχύος 1 MW	136
Διάγραμμα 5.1: Σύγκριση καθαρής παρούσας αξίας των τεσσάρων διαφορετικών συστημάτων	1466
Διάγραμμα 5.2: Σύγκριση εσωτερικού βαθμού απόδοσης των τεσσάρων διαφορετικών συστημάτων	14747

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Προηγμένα συστήματα ισχύος

1.1 Εισαγωγή

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι απαραίτητη για τη βιομηχανία και για όλες τις παραγωγικές μονάδες, για τα μέσα μεταφοράς, για τις οικιακές συσκευές, για το φωτισμό κ.λπ. Ο ηλεκτρισμός βασίζεται όλο και περισσότερο σε νέες μορφές ενέργειας και βρίσκει εφαρμογή σε νέα συστήματα όπως τα ηλεκτροκίνητα οχήματα. Με εξαίρεση το φωτισμό, το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας καταναλώνεται από τους ηλεκτρικούς κινητήρες που ανέρχονται σε ένα τεράστιο αριθμό επάνω στο πλανήτη. Η ισχύς των ηλεκτρικών κινητήρων αρχίζει από μερικά mW και εκτείνεται στην περιοχή των MW. Ειδικά στη βιομηχανία, οι ηλεκτρικές μηχανές τροφοδοτούνται μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος. [4]

Η πορεία της ηλεκτρικής ενέργειας συμπορεύεται με την πορεία των μετασχηματισμών. Οι μετασχηματιστές αποτελούν μια τεχνολογία με πολλαπλές εφαρμογές, από ηλεκτρικούς υποσταθμούς ως πολύ μικρές οικιακές ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές. Καθοριστική είναι επίσης η ύπαρξη των μετασχηματιστών στην ανύψωση και στον υποβιβασμό της τάσης για τα συστήματα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Πέρα από τις αυξανόμενες ενεργειακές απαιτήσεις, η ανάγκη για μείωση των εκπομπών CO₂ με σκοπό την αποφυγή της κλιματικής αλλαγής, υπαγορεύουν την ανάγκη για τη χρήση προηγμένων και αποδοτικών τεχνολογιών παραγωγής και διαχείρισης της ηλεκτρικής ενέργειας, αποθήκευσης με χαμηλές απώλειες και χρήση μετασχηματιστών χαμηλών απωλειών. Για τους λόγους αυτούς, τα θέματα βέλτιστου σχεδιασμού των προηγμένων συστημάτων και η οικονομική αξιολόγησή τους αποτελούν αντικείμενα συνεχούς μελέτης από διάφορους ερευνητές. [4]

1.2 Συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος

Τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία και διαφοροποίηση ανάλογα με την εφαρμογή και από χώρα σε χώρα. Ο τρόπος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας, ανάλογα με την τεχνολογία, μπορεί να βασίζεται σε συμβατικές πηγές, όπως τα ορυκτά στερεά, το πετρέλαιο, ο λιθάνθρακας και ο λιγνίτης, αλλά και σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η υδροηλεκτρική, η αιολική και η ηλιακή ενέργεια. Είναι αναμφισβήτητο ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παρέχουν πολλές δυνατότητες ανάπτυξης σε τοπικό και εθνικό επίπεδο. Μειώνουν την εξάρτηση από το πετρέλαιο και βοηθούν στην προστασία του περιβάλλοντος. [2]

Οι αραβικές χώρες, λόγω των αποθεμάτων τους σε πετρέλαιο, βασίζουν την παραγωγή τους στο συγκεκριμένο καύσιμο, κατά πολύ μεγάλο ποσοστό. Για παράδειγμα, στην

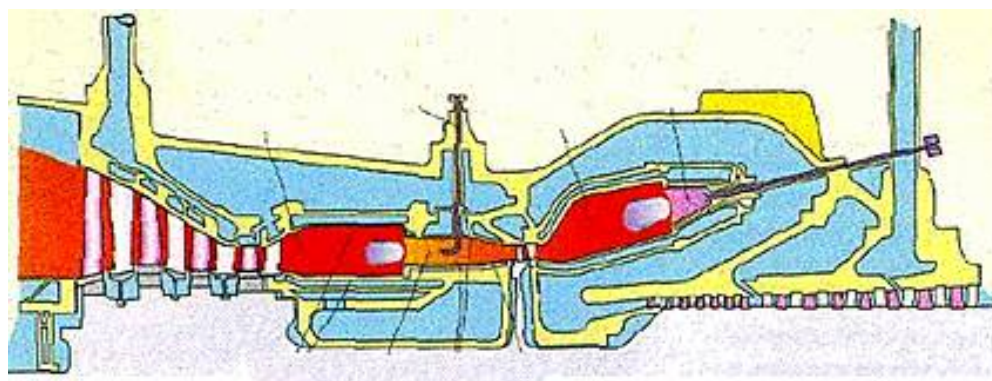
Υεμένη η συμμετοχή του πετρελαίου στην ηλεκτροπαραγωγή είναι 100%, σε άλλες όμως χώρες γίνεται σημαντική προσπάθεια εφαρμογής προηγμένων συστημάτων, με σκοπό την ελαχιστοποίηση της ηλεκτροπαραγωγής από πετρέλαιο. Συγκεκριμένα, στην Ολλανδία και την Ιρλανδία η συμμετοχή του φυσικού αερίου στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι 60% και 50%, αντίστοιχα.

Ανά τον κόσμο, η χρήση του λιθάνθρακα κυριαρχεί στη Νότια Αφρική (93%) και στην Πολωνία (92%), ενώ διατηρεί υψηλό ποσοστό στη Δανία (54%), στη Μ. Βρετανία (37,5%), στην Κορέα (38%) και στις Η.Π.Α. (σχεδόν 50%). Ο λιγνίτης παίζει σημαντικό ρόλο στην Ελλάδα (55%) και στη Γερμανία (42%). Στη Γαλλία πολύ μεγάλο είναι το ποσοστό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνική (78%), όπως και στο Βέλγιο (54,5%). Χαμηλότερη είναι η συμμετοχή της πυρηνικής ενέργειας στη Σουηδία (47%), στην Ουγγαρία (37,5%), στη Νότια Κορέα (37%) και στην Ελβετία (43%). Τέλος, το ποσοστό της υδροηλεκτρικής ενέργειας εμφανίζει υψηλές τιμές στη Νορβηγία (98,5%), στην Αυστρία (64%), στον Καναδά (58%), στην Ελβετία (51%), καθώς και σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες, με χαρακτηριστικότερα παραδείγματα την Κένυα (51%), την Γκάνα (67%), τη Βενεζουέλα (72%) και τη Βραζιλία (83%). [2]

Ως το 2030, η παγκόσμια συμμετοχή του φυσικού αερίου στην παραγωγή ενέργειας σχεδιάζεται να αυξηθεί από 17% σε 31%. Αναμένεται επίσης μέχρι το 2030 να παράγονται περίπου 100 GW από κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιώντας υδρογόνο από αναμορφωμένο φυσικό αέριο. Ο άνθρακας παραμένει η μεγαλύτερη πηγή παραγωγής ενέργειας. Η παραγωγή από πυρηνική ενέργεια αναμένεται να αυξηθεί ελαφρώς και πάνω από 4% της παγκόσμιας παραγωγής ενέργειας αναμένεται να παράγεται από Α.Π.Ε., πέραν των μεγάλων υδροηλεκτρικών. [3]

1.2.1 Προηγμένες τεχνολογίες φυσικού αερίου

Οι πιο εξελιγμένοι αεριοστρόβιλοι έχουν θερμοκρασίες μεταξύ 1260-1327°C και βαθμούς απόδοσης 55-57%, σε μονάδες συνδυασμένου κύκλου. Η Alstom έχει δημιουργήσει τον αεριοστρόβιλο GT26, με διβάθμια διαδοχική καύση και λόγο συμπίεσης 30:1. Στη βαθμίδα αναθέρμανσης, η θερμοκρασία εισόδου αυξάνεται από τους 980 στους 1230°C. Η διπλή έγχυση καυσίμου κατά τη διαδικασία καύσης αυξάνει την παραγωγή ισχύος, χωρίς δραστική αύξηση της θερμοκρασίας καύσης. Περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας καύσης παράγει πρόσθετα κέρδη. [3]



Εικόνα 1.1: Διβάθμια διαδοχική καύση στον αεριοστρόβιλο της Alstrom [3]

Η αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο και η αύξηση στις βαθμίδες πίεσης του αερολέβητα ανάκτησης θερμότητας (HRSG) οδηγούν σε αύξηση της απόδοσης σε έναν αεριοστρόβιλο συνδυασμένου κύκλου (GTCC). Η απόδοση των προηγμένων συνδυασμένων κύκλων μπορεί να βελτιωθεί μέσω της προσθήκης κύκλων ανάκτησης της θερμότητας των καυσαερίων, όπως ο κύκλος Kalina. Παράλληλα αρχίζουν να γίνονται εφικτοί διάφοροι υβριδικοί κύκλοι, όπως ο συνδυασμός του αεριοστρόβιλου με κυψέλες καυσίμου (SOFC-GT) με πιθανούς βαθμούς απόδοσης 70-80%. [4]

1.2.2 Προηγμένες τεχνολογίες άνθρακα

Λόγω των μεγάλων αποθεμάτων άνθρακα σε παγκόσμιο επίπεδο, ο λιγνίτης και ο λιθάνθρακας θα συνεχίσουν να παίζουν ένα σημαντικό ρόλο στην παραγωγή ενέργειας. Οι μονάδες άνθρακα χαρακτηρίζονται από μεγάλη διαθεσιμότητα και αξιοπιστία, ενώ έχουν δυναμικότητα ως 1000 MWe. Η χρήση προηγμένων υλικών οδηγεί σε υψηλότερες αποδόσεις. [3]

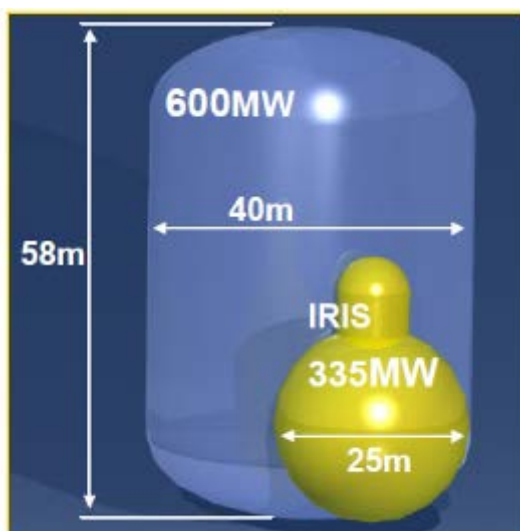
Σε ένα σύστημα αεριοποίησης συνδυασμένου κύκλου (IGCC), οι αεριοποιητές με οξυγόνο ή με αέρα λειτουργούν σε υψηλή πίεσης, οδηγώντας στην παραγωγή αερίου που απαιτεί καθαρισμό, το οποίο στη συνέχεια καίγεται σε αεριοστρόβιλο. Η αισθητή θερμότητα από το παραγόμενο αέριο καθώς και από το καυσαέριο του αεριοστρόβιλου χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ατμού. Οι τεχνολογίες αεριοποίησης βρίσκονται πλέον σε εμπορικό στάδιο. Η παραγωγή ισχύος μέσω των τεχνολογιών αυτών παρουσιάζει αναμενόμενη απόδοση πάνω από 50%, ενώ είναι εφικτή και η δέσμευση του CO₂. [3]



Εικόνα 1.2: Μονάδα συνδυασμένου κύκλου με αεριοποίηση 253 MW στην Ολλανδία [3]

1.2.3 Πυρηνική τεχνολογία

Μέχρι το 2030 ο ρόλος της πυρηνικής τεχνολογίας αναμένεται να αυξηθεί, σε περιορισμένο όμως βαθμό, τόσο για οικονομικούς όσο και λόγω των ενεργειακών πολιτικών. Ο IRIS (International Reactor Innovative and Secure) είναι ένας αντιδραστήρας ελαφρού νερού, με περίβλημα που περικλείει τόσο τον πυρήνα του αντιδραστήρα όσο και το σύστημα ψύξης, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.3. [5]



Εικόνα 1.3: Το σύστημα IRIS [5]

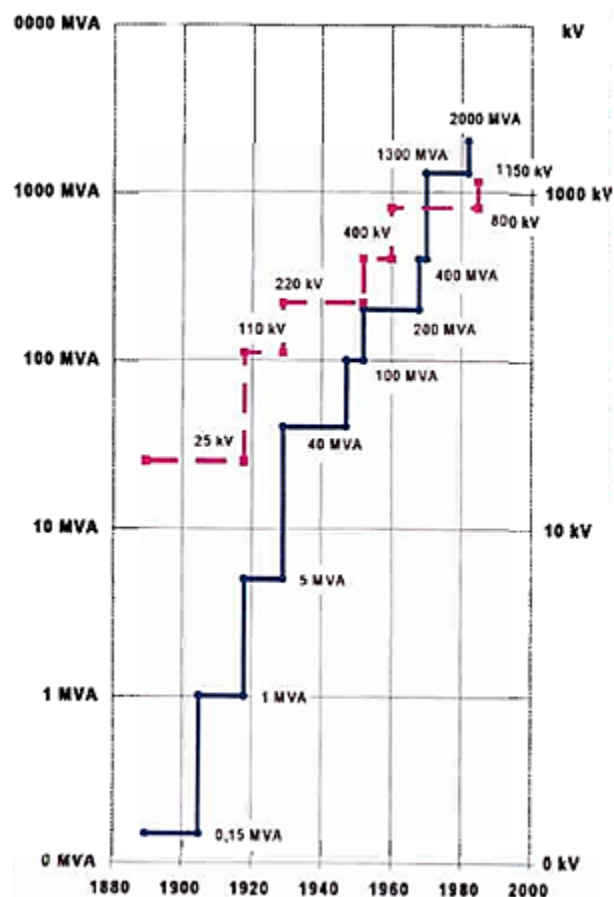
Καθώς πολλά θέματα ασφάλειας εγείρονται αναφορικά με τη πυρηνική τεχνολογία αξίζει να αναφερθεί το σύστημα Pebble Bed Nuclear Reactor (ίσως το ασφαλέστερο σύστημα τη δεδομένη χρονική στιγμή). Αντί του νερού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αδρανές ή ημι-αδρανές αέριο όπως ήλιο, άζωτο ή διοξείδιο του άνθρακα ως ψυκτικό, σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η απόδοση περίπου στο 50%.

Ο αντιδραστήρας αυτός είναι επίσης σχεδιασμένος με τέτοιο τρόπο, ώστε όταν η θερμοκρασία του αντιδραστήρα αυξάνεται, οι πυρηνικές αντιδράσεις μειώνονται, μέχρι να σταματήσουν τελείως στους 1600 °C, πράγμα το οποίο επιτρέπει στον αντιδραστήρα να ψυχθεί μόνος του, πολύ κάτω από τους 2000°C, το οποίο είναι το σημείο τήξης των σφαιρών γραφίτη που περιέχουν το ουράνιο. Τα συστήματα αυτά είναι πολύ πιο ασφαλή σε σχέση με τους αντιδραστήρες ύδατος, που μπορούν να οδηγηθούν σε τήξη αν αστοχήσει το σύστημα ψύξης. [6]

1.3 Μετασχηματιστές

1.3.1 Εξέλιξη τεχνολογίας μετασχηματιστών

Ο μετασχηματιστής είναι ένα τεχνικά ώριμο προϊόν που χρησιμοποιείται από το 19^ο αιώνα. Τα βασικά του χαρακτηριστικά δεν άλλαξαν ποτέ, παρόλο που δεν υπάρχει άλλη διάταξη με τόσο μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Οι μετασχηματιστές είναι απαραίτητοι για να τροφοδοτήσουν συσκευές καθημερινής χρήσης καθώς και βιομηχανικό εξοπλισμό. Η ισχύς και η τάση τους κυμαίνεται από ορισμένα VA ως GVA και από mV σε MV. Λόγω της ευελιξίας τους, οι μετασχηματιστές είναι το σημαντικότερο τμήμα μεταξύ παραγωγής και μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας από τον παραγωγό προς τον καταναλωτή. Στην Εικόνα 1.4 παρουσιάζεται η εξέλιξη των μετασχηματιστών αναφορικά με την ονομαστική ισχύ και την ονομαστική τάση τους. Παράλληλα, οι διαστάσεις και το βάρος τους μειώθηκαν δραστικά, χάρη στην ανάπτυξη προηγμένων υλικών και εξελιγμένων εργαλείων σχεδιασμού. Τις τελευταίες δεκαετίες, το βάρος στην εξέλιξη των μετασχηματιστών δόθηκε στην υψηλότερη απόδοση, στην υψηλότερη αξιοπιστία και στην εύρεση πιο οικονομικών λύσεων. [7]



Εικόνα 1.4: Εξέλιξη της ονομαστικής τάσης και ισχύος των μετασχηματιστών [7]

1.3.2 Μετασχηματιστές ισχύος

Ο Πίνακας 1.1 παρουσιάζει την κατάταξη των μετασχηματιστών ισχύος σε μεγάλους, μικρούς και μεσαίους, ανάλογα με την τάση στην οποία εφαρμόζονται.

Πίνακας 1.1: Κατάταξη μετασχηματιστών [8]

Κατάταξη

Χαρακτηριστικά

Εικόνα

Ανύψωσης τάσης από την τάση της γεννήτριας στην τάση μεταφοράς (μέχρι 1200 kV)

Μεγάλοι

Υποβιβασμού τάσης από το επίπεδο μεταφοράς στο επίπεδο της τάσης διανομής



Μεσαίοι

Μετασχηματιστές ανύψωσης
τάσης

Εύρος ισχύος 30 ως 250 MVA
και σε τάση μεγαλύτερη από
72,5 kV



Μικροί

Μετασχηματιστές διανομής
τάσης από 5 ως 30 MVA με
μέγιστη τάση 145 kV

Φυσική ψύξη με έλαιο ή αέρα ή
εξαναγκασμένη ψύξη με αέρα

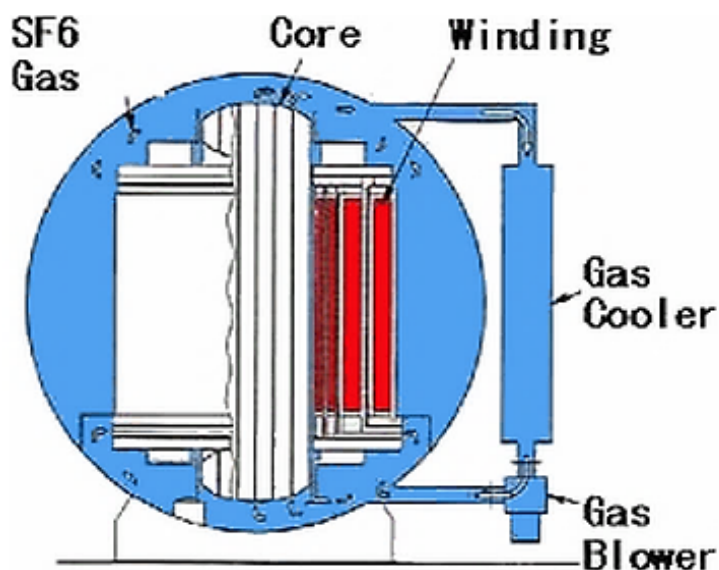


1.3.3 Μετασχηματιστές προηγμένης τεχνολογίας

1.3.3.1 Μετασχηματιστές με μόνωση αερίου

Κατά τα τέλη της δεκαετίας του '50 δημιουργήθηκε για πρώτη φορά η ιδέα της χρήσης αερίου ως μόνωση και ψυκτικό στο σχεδιασμό του μετασχηματιστή, αφού το SF₆ είχε αποδείξει τις εξαιρετικές διηλεκτρικές ιδιότητές του σε διατάξεις υψηλής τάσης. Οι πρώτες εφαρμογές μετασχηματιστών ήταν για μετασχηματιστές διανομής εσωτερικού χώρου σε δημόσια κτίρια λόγω των μικρότερων διαστάσεων, της μη αναφλεξιμότητας και της αντικρηκτικής συμπεριφοράς τους. Η τάση και η ισχύς των μετασχηματιστών με μόνωση αερίου αυξήθηκε σταδιακά. Το 1991 τέθηκε σε λειτουργία ο πρώτος μετασχηματιστής με μόνωση αερίου χαρακτηριστικών 300 MVA/275 kV. Με περαιτέρω έρευνα, δημιουργήθηκε ένα πρωτότυπο μετασχηματιστή 500 kV που πέρασε με επιτυχία όλες τις δοκιμές. Ο τελικός στόχος ήταν η δημιουργία μετασχηματιστών μόνωσης αερίου 1000 MVA για υπόγειους υποσταθμούς σε αστικές περιοχές. [7]

Για μετασχηματιστές διανομής με χαμηλή ονομαστική τάση το SF₆ χρησιμοποιείται τόσο για ψύξη όσο και για μόνωση. Η σχηματική απεικόνιση ενός τέτοιου μετασχηματιστή παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.5.



Εικόνα 1.5: Μετασχηματιστής μόνωσης αερίου [9]

Η θερμική αγωγιμότητα και η θερμοχωρητικότητα των αερίων δεν επαρκούν για την ψύξη των μεγάλων μετασχηματιστών. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται υγρό, όπως η ουσία C₈F₁₅O, η οποία είναι τέλειο ψυκτικό λόγω της ηλεκτρικής συμβατότητάς της με το SF₆ και των εξαιρετικών φυσικών και χημικών ιδιοτήτων της. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για στερεή μόνωση είναι ταινίες PPS, PEN και PET. [7]



Εικόνα 1.6: Μετασχηματιστής μόνωσης αερίου 400 MVA σε υπόγειο υποσταθμό [9]

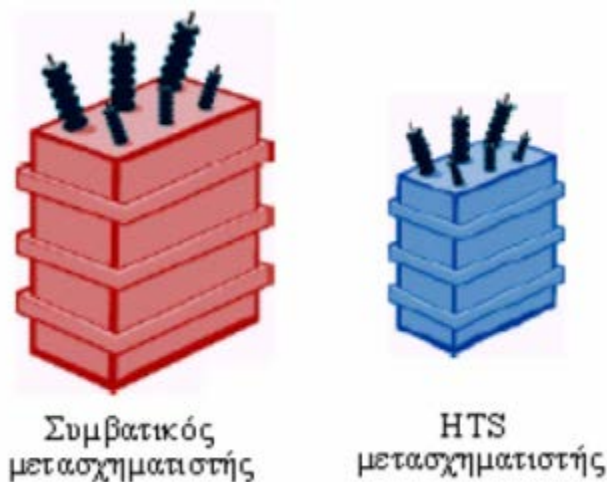
1.3.3.2 Υπεραγώγιμοι μετασχηματιστές

Παρά το ότι η απόδοση των μετασχηματιστών ισχύος είναι εξαιρετικά υψηλή-υψηλότερη από 99,5% για μεγάλες μοντέρνες μονάδες-υπήρχε πάντα η τάση για μείωση των απωλειών υπό φορτίο, οι οποίες είναι συνήθως τρεις ως τέσσερις φορές περισσότερες από τις απώλειες χωρίς φορτίο. Μια πρώτη προσέγγιση ήταν η λειτουργία του μετασχηματιστή με συμβατικά τυλίγματα χαλκού σε θερμοκρασία - 150°C. Σε αυτές τις συνθήκες η ωμική αντίσταση του χαλκού είναι μόνο 30% σε σχέση με την αντίσταση στους 75°C. Αργότερα έγιναν μελέτες σχετικά με τη χρήση υπεραγώγιμων τυλιγμάτων σε μετασχηματιστές ισχύος και τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν αρκετά καλά. Αυτό που δε μπορούσε να λυθεί αποτελεσματικά ήταν η ανάκτηση της υπεραγωγιμότητας ύστερα από σφάλμα. [7]

Παράλληλα ξεκίνησε η κατασκευή πρωτοτύπων μετασχηματιστών με τυλίγματα κατασκευασμένα από υπεραγωγούς χαμηλής θερμοκρασίας (LTSC) με ονομαστική ισχύ μέχρι 1000 kVA. Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι 4,2 K. Τα περισσότερα τεχνικά προβλήματα αντιμετωπίστηκαν, αλλά το κόστος ψύξης και θερμικής μόνωσης ήταν αρκετά υψηλό και απαγορευτικό. Η ανακάλυψη της υπεραγωγιμότητας υψηλής θερμοκρασίας (HTSC) ορισμένων κεραμικών κραμάτων και η ανάπτυξη κατάλληλων πολυνηματοειδών τυλιγμάτων επαρκούς μήκους οδήγησαν σε νέες μελέτες σχετικά με τη χρήση υπεραγώγιμων τυλιγμάτων σε θερμοκρασία λειτουργίας 77 K, τη θερμοκρασία του υγρού N₂. Σε αυτό το επίπεδο θερμοκρασίας, οι απαιτήσεις ψύξης μειώνονται κατά μία τάξη μεγέθους. [7]

Δύο κατευθύνσεις εξέλιξης ακολουθούνται: είτε ο σχεδιασμός ενός δακτυλιοειδούς μετασχηματιστή χωρίς πυρήνα είτε ο πιο συμβατικός σχεδιασμός όπου μόνο τα τυλίγματα είναι κατασκευασμένα από υπεραγώγιμο υλικό και περιβάλλονται από ξεχωριστό κρυστάτη, ο οποίος διατηρεί την απαιτούμενη θερμοκρασία για την υπεραγωγιμότητα. Ο πυρήνας ψύχεται με συμβατικό τρόπο. Έχουν κατασκευαστεί πρωτότυπα μέχρι 10 MVA. Πρόσφατες μελέτες σχετικά με το συνολικό κόστος των μεγάλων μετασχηματιστών HSTC σε σύγκριση με το κόστος των συμβατικών μονάδων είναι αρκετά ευοίωνα.

Οι HTS μετασχηματιστές έχουν περίπου το 25%-50% των απωλειών ενέργειας που έχει ένας συμβατικός μετασχηματιστής. Επιπλέον το μέγεθος και το βάρος τους είναι μικρότερο από εκείνο των συμβατικών κατά 40%-60%, για μετασχηματιστές ίδιας ισχύος, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.7. Επιπλέον είναι πιο αθόρυβοι και η υπερφόρτισή τους μπορεί να φτάσει το διπλάσιο της ονομαστικής τάσης τους χωρίς καταστροφή των μονώσεων ή μείωση της διάρκειας ζωής τους. Η σύνθετη αντίστασή τους είναι μικρότερη από των συμβατικών και η ρύθμιση τάσης που επιτυγχάνουν είναι καλύτερη. Λειτουργούν επίσης και ως περιοριστές σφάλματος ρεύματος και άρα δεν απαιτείται να συνοδεύονται από διακόπτες ισχύος όπως οι συμβατικοί μετασχηματιστές. [10]



Εικόνα 1.7: Σύγκριση μεταξύ συμβατικού και HTS μετασχηματιστή [10]

1.3.3.3 Άλλες τεχνολογίες μετασχηματιστών

Η εφαρμογή της καλωδιακής τεχνολογίας δημιουργεί νέες δυνατότητες για την αύξηση της λειτουργικότητας των μετασχηματιστών. Η χρήση των συμβατικών καλωδίων ως τυλίγματα του στάτορα επιτρέπει το συνδυασμό της παραγωγής ενέργειας και του πρώτου βήματος μετασχηματισμού σε μία μόνο μονάδα, αντί για τη χρήση μιας συμβατικής γεννήτριας συνδεδεμένη σε έναν μετασχηματιστή GSU. Το επίπεδο τάσης που μπορεί να επιτευχθεί είναι 220 kV. Επίσης, η καλωδιακή τεχνολογία χρησιμοποιείται για μετασχηματιστές ισχύος ξηρού τύπου, σε εφαρμογές που απαιτούνται μετασχηματιστές χωρίς λίπανση, μη εύφλεκτοι και μη εκρηκτικοί. [11]



Εικόνα 1.8: Μετασχηματιστής ξηρού τύπου της εταιρίας EngineeringcompanyB&S [11]

Έχει αναπτυχθεί επίσης μια ειδική τεχνολογία για την επί τόπου κατασκευή μεγάλων μετασχηματιστών ισχύος για εφαρμογές όπου διάφοροι περιορισμοί χώρου ή βάρους δεν επιτρέπουν την συμβατική μεταφορά στο χώρο εγκατάστασης.

1.3.3.4 Η ιδέα του DC μετασχηματιστή

Τα τελευταία χρόνια έχουν εμφανιστεί πάρα πολλές συσκευές που χρησιμοποιούν DC τροφοδοσία. Μεταξύ αυτών είναι ο υπολογιστής και το τηλέφωνο. Οι μετατροπείς AC/DC που χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία των συσκευών αυτών έχουν συνήθως χαμηλή απόδοση, ενώ τουλάχιστον το 50% της ενέργειας χάνεται με τη μορφή θερμότητας. Για το λόγο αυτό η κατασκευή μετασχηματιστών DC είναι ιδιαίτερα επιθυμητή. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η μεταφορά του συνεχούς ρεύματος (DC) σε μεγάλες αποστάσεις και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές που είναι πιο αποδοτικές με DC τροφοδοσία, αντί για AC. [12]

Πρέπει να εξεταστεί αν μπορεί να δημιουργηθεί μετασχηματιστής DC, ο οποίος δηλαδή δε λειτουργεί βάσει της μετατροπής DC/AC και AC/DC. Το ερώτημα αυτό ανάγεται στο αν υπάρχει φυσικός μηχανισμός που να επάγει συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα σύρμα από άλλο απομονωμένο σύρμα το οποίο διαρρέεται από DC ηλεκτρικό ρεύμα. Ένας τέτοιος μηχανισμός σύζευξης μεταξύ δύο ηλεκτρικά μονωμένων υπεραγωγίων καλωδίων παρουσιάστηκε αρχικά από τον Giaver και εν συνεχεία μελετήθηκε και από άλλους ερευνητές. [12]

1.4 Προηγμένα συστήματα αποθήκευσης και βελτίωσης της ποιότητας ισχύος

1.4.1 Υπεραγώγιμη μαγνητική αποθήκευση ενέργειας (SMES)

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να αποθηκεύεται η περίσσεια ενέργειας κατά τις ώρες όπου δεν υπάρχει αιχμή ζήτησης. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, παρουσιάζεται περίσσεια ενέργειας η οποία μπορεί να αποθηκευτεί σε μπαταρίες. Η ενέργεια αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή υδρογόνου, μέσω ηλεκτρόλυσης, ενώ υπό άλλες συνθήκες, απλώς καταστρέφεται. Το υδρογόνο μπορεί να συμπιεστεί και να διανεμηθεί με δεξαμενές, είτε να χρησιμοποιηθεί σε κυψέλες καυσίμου. [6]

Μια άλλη δυνατότητα είναι η υπεραγώγιμη μαγνητική αποθήκευση ενέργειας (SMES), η οποία αποθηκεύει ενέργεια σε μορφή μαγνητικού πεδίου, το οποίο δημιουργείται από τη ροή συνεχούς ρεύματος σε ένα υπεραγώγιμο πηνίο. Το πηνίο αυτό βυθίζεται σε υγρό ήλιο και η θερμοκρασία του μειώνεται με κρυογονικές μεθόδους κάτω από την κρίσιμη θερμοκρασία υπεραγωγής. Η λειτουργία αυτή μπορεί να εφαρμοσθεί για να βελτιώσει την ποιότητα ισχύος σε κρίσιμα φορτία, παρέχοντας ενέργεια κατά τη διάρκεια των βυθίσεων τάσης και των στιγμιαίων διακοπών ισχύος στο σύστημα. Έτσι

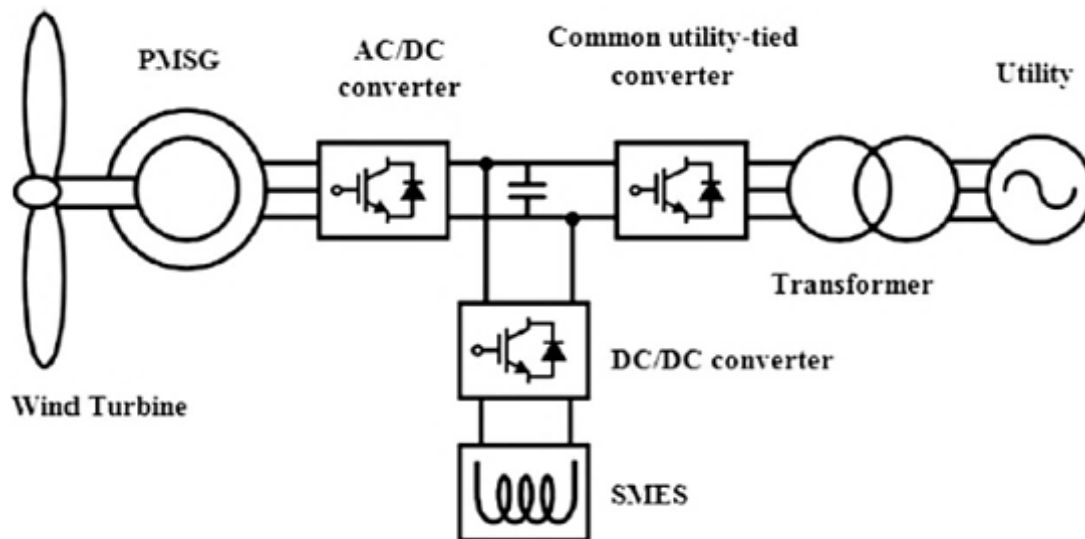
σταθεροποιείται η ισχύς του δικτύου και άρα αποφεύγονται οι διακυμάνσεις φορτίου. Η απόκρισή του στις μεταβολές της ισχύος είναι ακαριαία και έχει απεριόριστους κύκλους επαναφόρτισης. Τέτοια εγκατάσταση υπάρχει στις Η.Π.Α. και έχει δυνατότητα αποθήκευσης 30 MJ, με σκοπό να παρέχει έλεγχο συχνότητας κατά μήκος των γραμμών μεταφοράς στη δυτική ακτή. Τέτοια εγκατάσταση υπάρχει επίσης στην Ιαπωνία, η οποία μετρά τη σταθερότητα της γραμμής μεταφοράς. [13]

Το σύστημα SMES μπορεί να φορτίσει και να εκφορτίσει ισχύ έχοντας γρήγορη απόκριση ώστε να αποθηκεύσει ενεργό ισχύ, αλλά και να παρέχει άεργο ισχύ, με στόχο τη μείωση της διακύμανσης τάσης που βασίζεται στη μεταβολή του φορτίου στο σύστημα. Αυτό το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας αποτελείται από ένα υπεραγωγικό πηνίο, το κρουγονικό σύστημα και ένα σύστημα ρύθμισης της ισχύος. Ένα από τα μειονεκτήματα του είναι το μικρό μέγεθός του λόγω του μεγάλου κόστους εγκατάστασης.

Το πηνίο είναι το κύριο μέρος ενός συστήματος SMES το οποίο μπορεί να απορροφά και να απελευθερώνει ισχύ με βάση τη ζήτηση ισχύος. Οι δύο τύποι πηνίου που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι το τοροειδές και το σωληνοειδές. Συγκεκριμένα, τα τοροειδή πηνία χρησιμοποιούνται σε αποθήκευση μικρής και μεσαίας κλίμακας, ενώ τα σωληνοειδή σε μεγάλης κλίμακας. Το πηνίο συνδέεται σε ένα σύστημα μετατροπής ισχύος. Στην Εικόνα 1.9 παρουσιάζεται ένα σύστημα ελέγχου το οποίο ελέγχει τη ροή ρεύματος από και προς τη DC γραμμή. Το πηνίο αρχίζει τη φόρτιση κάθε φορά που η ισχύς εξόδου του ανορθωτή υπερβαίνει την ισχύ αναφοράς και το πηνίο θα εκφορτίζεται όταν η ισχύς εξόδου του ανορθωτή είναι μικρότερη από την ισχύ αναφοράς. Το ρεύμα που απαιτείται για τη φόρτιση και την εκφόρτιση του πηνίου είναι αντιστρόφως ανάλογο της τάσης κατά μήκος του πηνίου κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης. Αυτό φαίνεται στη σχέση (1), όπου το I_s είναι το κρίσιμο ρεύμα και P_o είναι η σταθερή παραγόμενη ενέργεια όταν το συνεχές ρεύμα πλησιάζει την κρίσιμη τιμή. Το ρεύμα θα εκφορτίζεται έως ότου φτάσει σε μια κρίσιμη τιμή. Τότε, το σύστημα δε θα εκφορτιστεί περαιτέρω και η παραγόμενη ισχύς είναι σε απόκριση σταθερής κατάστασης. Το ποσό της ενέργειας που αποθηκεύεται στο πηνίο, E_{SMES} , είναι ευθέως ανάλογο του ρεύματος DC, όπου L είναι η ανάδραση του πηνίου. [14]

$$I_s = \frac{P_o}{V} \quad (1)$$

$$E_{SMES} = L \frac{I_{SMES}^2}{2} \quad (2)$$



Εικόνα 1.9: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος αποθήκευσης SMES συζευγμένο με μοντέλο ανεμογεννήτριας [15]

Καθώς η περίσσεια συνεχούς ρεύματος περνά από το υπεραγωγίμο πηνίο, η θερμοκρασία του πηνίου αυξάνεται, αλλά η θερμοκρασία μπορεί να διατηρηθεί χαμηλή χρησιμοποιώντας ένα θερμικό περίβλημα ή υγρό ήλιο. Ένα κρυογονικό σύστημα διατηρεί την απαιτούμενη θερμοκρασία και βελτιώνει την απόδοση της υπεραγωγής.

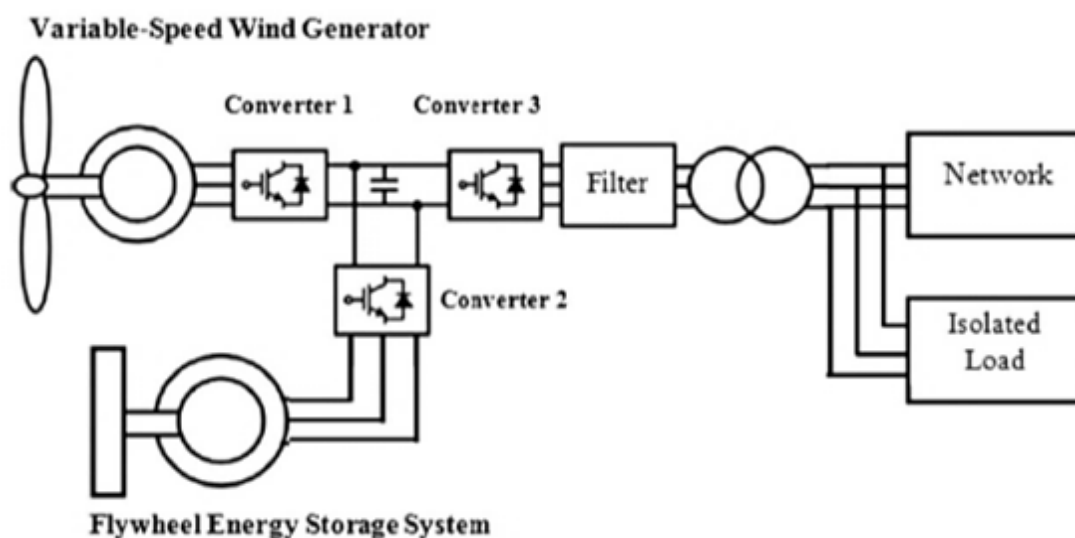
Το σύστημα ρύθμισης ισχύος αποτελείται από 12 γέφυρες διαδοχικών παλμών μετατροπών DC/AC ή μετατροπών DC/AC. Ο αντιστροφέας θα προκαλέσει απώλειες προς κάθε κατεύθυνση, αλλά οι απώλειες αυτές μπορεί να μειωθούν συνδέοντας το σύστημα SMES απευθείας στη γραμμή DC. Άρα, ελέγχοντας το μετατροπέα DC/DC η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να μεταφερθεί απευθείας στο σύστημα του δικτύου. [15]

1.4.2 Σφόνδυλος αποθήκευσης ενέργειας (Flywheel)

Το Flywheel λειτουργεί ως σύστημα αύξησης της απόδοσης του ηλεκτρικού δικτύου, καθώς μέσω ενός κινητήρα μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε κινητική. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της περιστροφής ενός σφονδύλου, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με γεννήτρια και η οποία μετατρέπει ξανά την κινητική ενέργεια σε ηλεκτρική, όποτε απαιτείται. Το σύστημα αυτό, σε συνδυασμό με σύγχρονα ηλεκτρονικά ισχύος, παρέχει αποτελεσματική ρύθμιση τάσης και συχνότητας της ισχύος εξόδου. [16]



Εικόνα 1.10: Αρχή λειτουργίας του συστήματος Flywheel [16]



Εικόνα 1.11: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος αποθήκευσης FESS συζευγμένο με μοντέλο ανεμογεννήτριας [17]

Με βάση την Εικόνα 1.11 κατά τη διάρκεια της φάσης φόρτισης, ο μετατροπέας 3 λειτουργεί ως ανορθωτής ενώ ο μετατροπέας 2 λειτουργεί ως αντιστροφέας. Κατά τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε ηλεκτρική, η ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας που απορροφά ηλεκτρική ενέργεια επιταχύνοντας τον άξονα. Ο ρότορας χρησιμοποιείται για να επιταχύνει τον άξονα έως ότου φτάσει σε επαρκή ταχύτητα περιστροφής [17]. Όταν ο ρότορας είναι κατασκευασμένος από ανθρακονήματα η ταχύτητα περιστροφής του μπορεί να φτάσει τα 100000 rpm, ενώ όταν είναι κατασκευασμένος από χάλυβα φτάνει στα 10000 rpm.

Όταν επιτευχθεί η επιθυμητή ταχύτητα, ο άξονας αποσυνδέεται αλλά συνεχίζει να περιστρέφεται λόγω της αδράνειας του σφονδύλου. Η περιστροφή αυτή δείχνει ότι η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται πλήρως σε κινητική, η οποία αποθηκεύεται στην περιστρεφόμενη μάζα. Το σύστημα πρέπει να τοποθετείται σε περίβλημα κενού ώστε να ελαχιστοποιούνται οι τριβές λόγω του αέρα. Κατά την αποφόρτιση της ενέργειας της περιστρεφόμενης μάζας, ο κινούμενος άξονας θα παράξει ροπή για να κινήσει την ηλεκτρική μηχανή, η οποία τώρα λειτουργεί ως γεννήτρια. Στη λειτουργία αυτή, ο μετατροπέας 2 λειτουργεί ως ανορθωτής και ο μετατροπέας 3 ως αντιστροφέας. Η ροή της ενέργειας είναι συνεχής, διότι έχει αποθηκευτεί σε μηχανική και όχι σε χημική μορφή. [17]

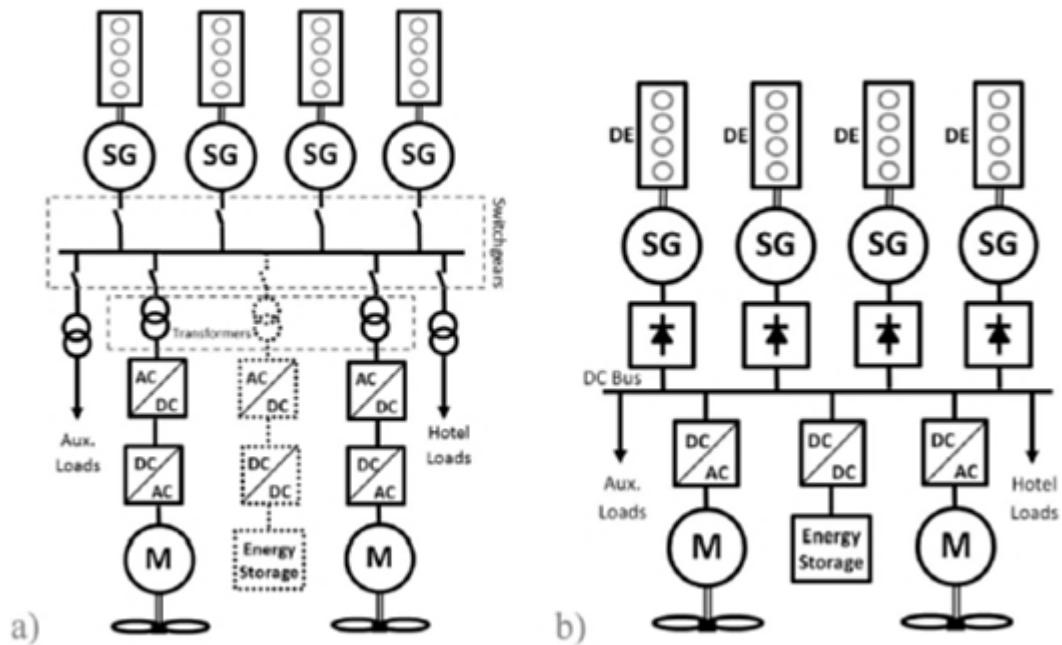
1.5 Προηγμένο σύστημα εξοικονόμησης καυσίμου με χρήση ηλεκτρονικών ισχύος

1.5.1 Εισαγωγή

Η αυξανόμενη ανησυχία σχετικά με τα περιβαλλοντικά ζητήματα και την οικονομία καυσίμου έχουν οδηγήσει στην αναζήτηση νέων λύσεων χαμηλών εκπομπών και χαμηλής κατανάλωσης καυσίμου. Τα ηλεκτρονικά ισχύος έχουν σημαντικό ρόλο στη βελτιστοποίηση των συμβατικών συστημάτων κίνησης. Στα πλοία, οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος αποτέλεσαν σημαντική εξέλιξη ως προς την εξοικονόμηση καυσίμου, καθώς τη δεκαετία του '90 έκαναν δυνατό τον εξηλεκτρισμό των συστημάτων προώθησης μέσω των Κινητήρων Μεταβλητών Στροφών (VSD) [20]. Τα πλεονεκτήματα που προέκυψαν από τα ηλεκτρικά συστήματα προώθησης έχουν ενισχύσει την ιδέα του πλήρους ηλεκτρικού πλοίου, το οποίο παρέχει μια κοινή ηλεκτρική πλατφόρμα για την υποστήριξη της ισχύος προώθησης και των απαιτήσεων φορτίων του πλοίου [20]. Παρόλο που η πλειοψηφία των πλήρως ηλεκτρικών πλοίων χρησιμοποιούν συστήματα διανομής εναλλασσόμενου ρεύματος, η εισαγωγή των μετατροπέων ισχύος στα συστήματα προκαλεί μια αύξηση στην τάση προς τα συστήματα διανομής συνεχούς τάσης. [18, 19]

Το κίνητρο για τη μετάβαση αυτή είναι από τη μια οι προκλήσεις σχετικά με τα συμβατικά συστήματα ισχύος AC και από την άλλη το αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ενσωμάτωση των πηγών ενέργειας και των διατάξεων αποθήκευσης με έξοδο DC [19]. Οι απαιτήσεις που έχουν τα συμβατικά συστήματα AC, κυρίως στα πλοία, είναι η ανάγκη για συγχρονισμό των μονάδων παραγωγής, η άεργη ροή ισχύος, το ρεύμα εκκίνησης των μετασχηματιστών, οι αρμονικές του ρεύματος και οι αστάθειες του τριφασικού συστήματος.

Στην Εικόνα 1.12 παρουσιάζεται το μονογραμμικό διάγραμμα ενός συστήματος ισχύος πλοίου AC σε σύγκριση με ένα σύστημα DC. Στο δίκτυο DC έχουν αφαιρεθεί οι πίνακες ελέγχου και οι μετασχηματιστές, και άρα τα συστήματα DC έχουν το πλεονέκτημα της εξοικονόμησης χώρου και βάρους καθώς και ευελιξία στη διαμόρφωση του εξοπλισμού [21]. Επειδή δεν απαιτείται συγχρονισμός των γεννητριών, ένα DC σύστημα ισχύος δίνει τη δυνατότητα στους κινητήρες να λειτουργήσουν στη βέλτιστη ταχύτητά τους, οδηγώντας σε σημαντική εξοικονόμηση καυσίμου. Φαίνεται επίσης ότι το σύστημα περιορίζει την ανάγκη ύπαρξης πολλών βαθμίδων μετατροπής και μετασχηματισμού και απαιτεί συνήθως ένα σύστημα AC όταν συνδέεται σε μια διάταξη με DC έξοδο, όπως μια συσκευή αποθήκευσης ενέργειας.



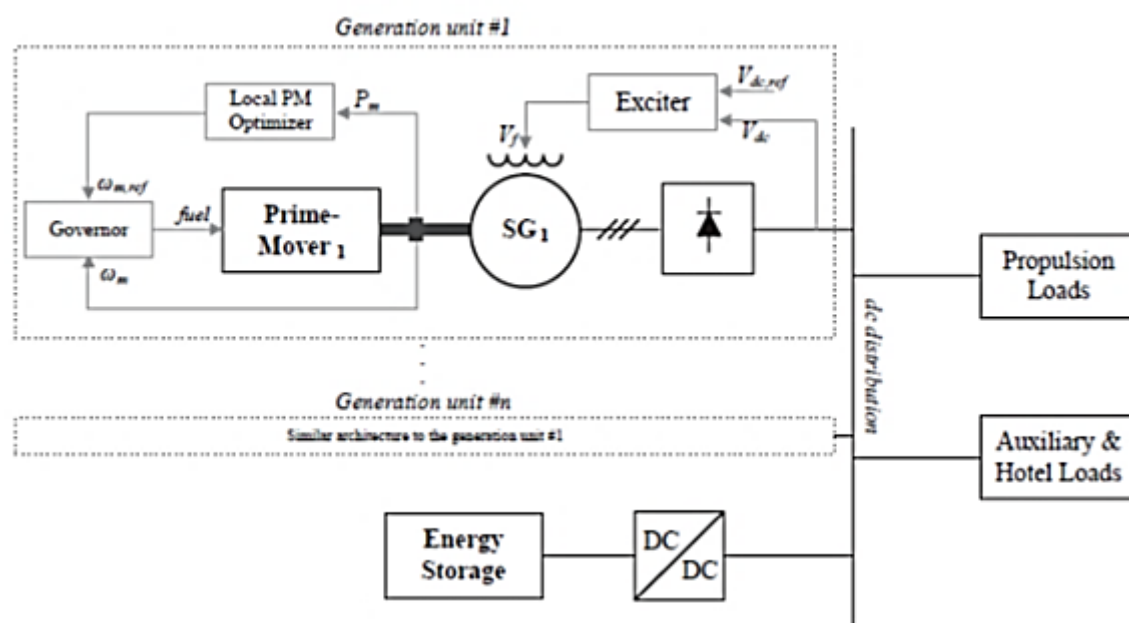
Εικόνα 1.12: Μονογραμμικό διάγραμμα συστημάτων ισχύος πλοίου (a) δίκτυο AC (b) δίκτυο DC [22]

Παρά τη μακρόχρονη ιστορία της χρήσης υβριδικών συστημάτων για την εξοικονόμηση καυσίμου σε επίγεια οχήματα, η χρήση των υβριδικών-ηλεκτρικών συστημάτων σε πλοία είναι ακόμη στην αρχή, συγκεκριμένα όσον αφορά την αποθήκευση ενέργειας [23]. Προς το παρόν, τα υβριδικά συστήματα ισχύος συνεχούς ρεύματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συγκεκριμένες κατηγορίες πλοίων με συχνές διακυμάνσεις φορτίου και/ή μακρά διάρκεια χρήσης σε συνθήκες μακριά από τις ονομαστικές. Μια κατηγορία με μεγάλο ενδιαφέρον είναι τα υπεράκτια βοηθητικά πλοία (OSVs) [21]. Το πρώτο τέτοιο πλοίο με DC σύστημα ισχύος παρουσιάστηκε το 2012. Οι εταιρίες ABB και Siemens παρουσίασαν επίσης τα δικά τους υβριδικά συστήματα ισχύος, τα οποία εκμεταλλεύονται τους κινητήρες diesel μεταβλητής ταχύτητας και τις μπαταρίες και εξασφαλίζουν σημαντική εξοικονόμηση καυσίμου σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα [22]. Όσον αφορά την απόδοση των συστημάτων αυτών, οι περισσότερες μελέτες αφορούν συστήματα που βρίσκουν εφαρμογή σε υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα [24,35]. Σχετικά με τα συστήματα για πλοία παραμένει ακόμη πολύς χώρος για έρευνα.

1.5.2 Μελέτη συστήματος εξοικονόμησης καυσίμου

Οι Zahedi et al (2014) [22] μελέτησαν και συνέκριναν διάφορα συστήματα ως προς την απόδοσή τους και την εξοικονόμηση καυσίμου που επιτυγχάνουν. Το σύστημα το οποίο μελέτησαν παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.13. Αποτελείται από 4 γεννήτριες, ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας που βασίζεται σε μπαταρίες ιόντων λιθίου, τα φορτία προώθησης, τα φορτία του πλοία και των βοηθητικών. Σε κάθε σύστημα, ο πρωτεύων κινητήρας είναι συζευγμένος με μια σύγχρονη γεννήτρια. Η AC ισχύς της γεννήτριας

μετατρέπεται σε DC μέσω μιας τριφασικής διόδου ανόρθωσης. Η ταχύτητα περιστροφής του πρωτεύοντος κινητήρα ρυθμίζεται μέσω ενός τοπικού ελεγκτή ώστε να ελαχιστοποιείται η κατανάλωση καυσίμου. Αυτό δεν είναι εφικτό στα συμβατικά AC συστήματα ισχύος, όπου η ταχύτητα αναφοράς είναι σταθερή ώστε να διατηρείται ο συγχρονισμός μεταξύ των γεννητριών. Για να είναι εφικτός ο διαχωρισμός ισχύος μεταξύ των γεννητριών κατά τη ρύθμιση του επιπέδου της DC τάσης, οι διεγέρτες διαφορετικών μονάδων γεννήτριας μπορούν να προσαρμοστούν μέσω της μείωσης τάσης στο δευτερεύον επίπεδο ελέγχου. Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας αποτελείται από μια συστοιχία μπαταριών ιόντων λιθίου και έναν αμφίδρομο DC-DC μετατροπέα που επιτρέπει τη φόρτιση και την εκφόρτιση της μπαταρίας με ελεγχόμενο τρόπο. [22]



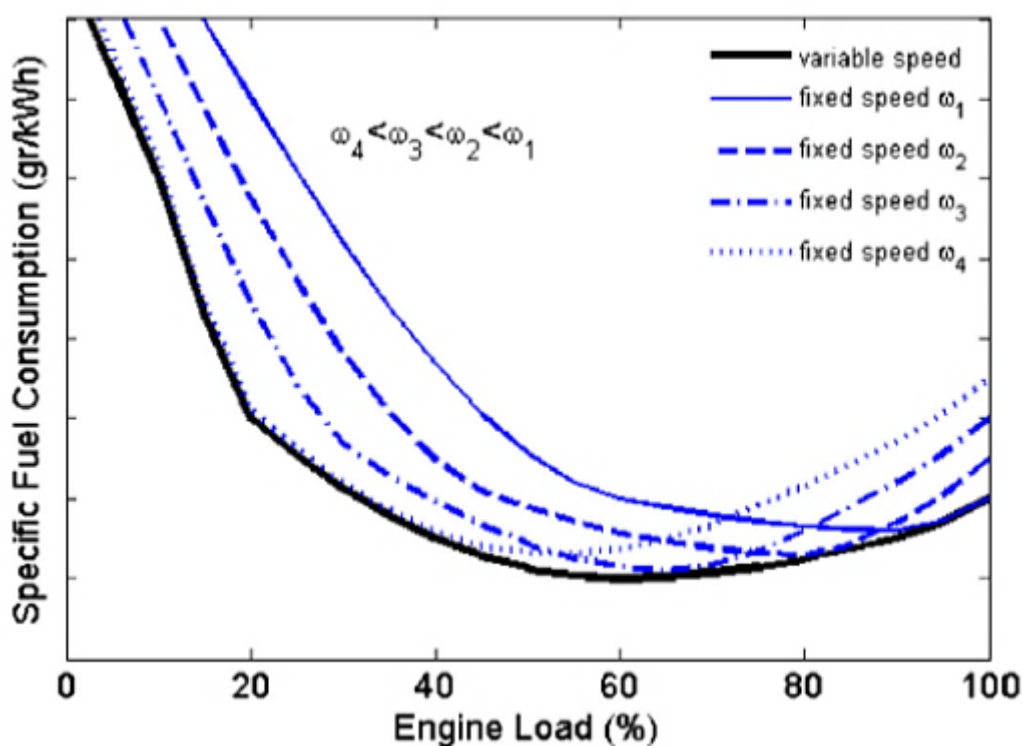
Εικόνα 1.13: Λεπτομερής αρχιτεκτονική του DC συστήματος ισχύος που μελετήθηκε [22]

1.5.2.1 Κινητήρια πηγή ενέργειας

Η κινητήρια πηγή ενέργειας επί του πλοίου σε ένα πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο είναι συνήθως μια σύγχρονη γεννήτρια, που κινείται από μια μηχανή εσωτερικής καύσης με καύσιμο diesel ή βαρέα κλάσματα του πετρελαίου [20]. Οι μηχανές εσωτερικής καύσης βελτιώνονται συνεχώς ως προς την απόδοση και τις εκπομπές τους. Όμως ο παράγοντας βέλτιστης χρήσης καυσίμου είναι περίπου 40%, ενώ το υπόλοιπο της αποθηκευμένης στο καύσιμο ενέργειας αποβάλλεται μέσω θερμότητας ή μέσω των καυσαερίων.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.14, η χρήση του καυσίμου σε μια μηχανή εσωτερικής καύσης μπορεί να βελτιωθεί ρυθμίζοντας την ταχύτητα της μηχανής βάσει του φορτίου της μηχανής. Αυτό θέτει ένα μειονέκτημα για τα συμβατικά AC συστήματα ισχύος σε ένα πλοίο, όπου όλες οι γεννήτριες πρέπει να συγχρονιστούν σε μια σταθερή συχνότητα,

εμποδίζοντας το βέλτιστο έλεγχο ταχύτητας. Ένα DC σύστημα ισχύος, όμως, επιτρέπει στους κινητήρες να περιστρέφονται ανεξάρτητα, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα βέλτιστης ρύθμισης ταχύτητας. Στα AC συστήματα ισχύος, η ανεξάρτητη περιστροφή των κινητήρων μπορεί να προκύψει μέσω της χρήσης back-to-back μετατροπέων σε κάθε γεννήτρια. Όμως, αυτό θέτει επιπλέον κόστος και πολυπλοκότητα σε σχέση με τη μετάβαση σε DC σύστημα. Επιπλέον, σημαντική ηλεκτρική ισχύς μετατρέπεται σε DC για να χρησιμοποιηθεί από το σύστημα προώθησης του πλοίου, τα οποία είναι τα κύρια φορτία σε πολλές εφαρμογές. Η χρήση των back-to-back μετατροπέων προστίθεται στα στάδια μετατροπής μεταξύ AC και DC, πράγμα το οποίο μειώνει την απόδοση του συστήματος οδήγησης. Συνεπώς, το DC σύστημα είναι πιο ελκυστικό στον τομέα της ναυτιλίας ως προς την κατανάλωση καυσίμου.



Εικόνα 1.14: Ειδική κατανάλωση καυσίμου μιας μηχανής εσωτερικής καύσης [22]

Η καμπύλη της ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου σε μια ΜΕΚ μπορεί να προσεγγισθεί μέσω μιας τετραγωνικής συνάρτησης του φορτίου. Η εξίσωση αυτή ισχύει είτε για σταθερή είτε για μεταβλητή ταχύτητα, χρησιμοποιώντας διαφορετικούς πολυωνμικούς συντελεστές. [25]

$$C_1 = C_o + aP_m + bP_m^2 \quad (3)$$

όπου οι C_o , a και b είναι οι συντελεστές της πολυωνμικής συνάρτησης δεύτερης τάξης, και P_m είναι η μηχανική ισχύς του κινητήρα. Η ειδική κατανάλωση καυσίμου είναι η ωριαία κατανάλωση ανά μονάδα ισχύος και προκύπτει από τη σχέση:

$$SFC = C_o / P_m + a + bP_m \quad (4)$$

Οι παραπάνω σχέσεις για την κατανάλωση καυσίμου ισχύουν και σε δυναμικές συνθήκες. [25]

1.5.2.2 Σύστημα σύγχρονης γεννήτριας-ανορθωτή

Σε ένα σύστημα παραγωγής ενέργειας, η κύρια μηχανή ισχύος είναι συζευγμένη με μια ηλεκτρική μηχανή, συνήθως μια σύγχρονη γεννήτρια, ώστε να μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Όταν η διανομή γίνεται υπό συνεχή τάση, η τριφασική AC ισχύς, πρέπει να μετατραπεί σε DC, μέσω των τριφασικών ανορθωτών. Όταν δεν απαιτείται αμφίδρομη ροή ισχύος, οι τριφασικές διόδους ανόρθωσης αποτελούν προτιμητέα επιλογή λόγω της κατασκευαστικής τους απλότητας, της υψηλής ενεργειακής τους απόδοσης και του χαμηλού κόστους. Μπορούν ήδη να χρησιμοποιηθούν με σύγχρονες γεννήτριες. [22]

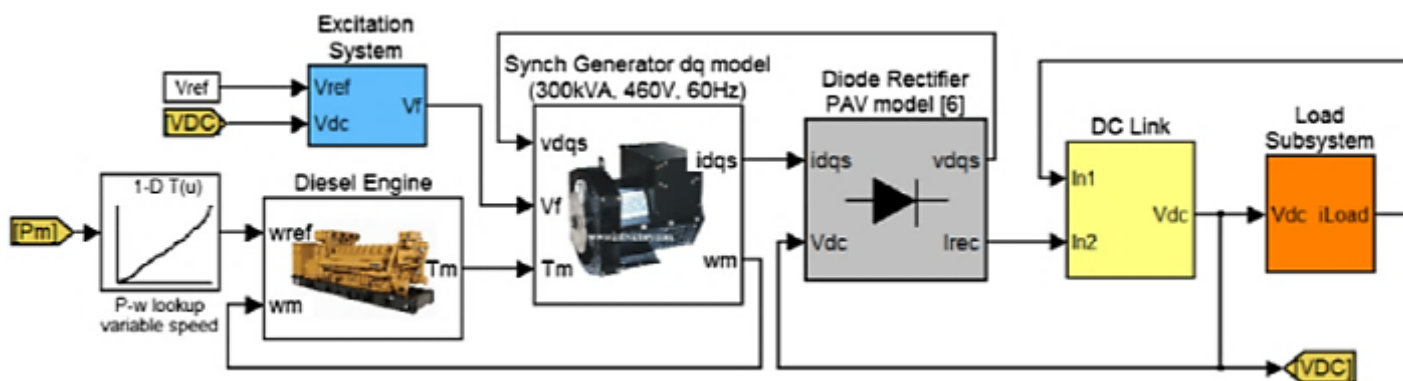
Οι τριφασικοί ανορθωτές χρησιμοποιούνται ήδη σε συμβατικά συστήματα ηλεκτρικής προώθησης για να παρέχουν τις DC συνδέσεις των ηλεκτρικών κινητήρων προώθησης. Η μετάβαση από AC σε DC οδηγεί σε εξάλειψη των ογκωδών πινάκων ελέγχου, των AC μετασχηματιστών και των σχετικών απωλειών ισχύος. Επιπλέον, η απόδοση της γεννήτριας βελτιώνεται, όταν η κινητήρια μηχανή λειτουργεί στη βέλτιστη ταχύτητά της.

Οι κύριες απώλειες μιας σύγχρονης γεννήτριας είναι οι απώλειες χαλκού, οι απώλειες σιδήρου και οι μηχανικές απώλειες. Οι απώλειες χαλκού οφείλονται στο ρεύμα που διέρχεται από τα ελίσματα του στάτορα και του ρότορα. Οι απώλειες σιδήρου οφείλονται στα δινορεύματα και στις απώλειες υστέρησης. Οι μηχανικές απώλειες οφείλονται στην τριβή και στην οπισθέλκουσα του αέρα, οι οποίες είναι ανάλογες του τετραγώνου της ταχύτητας περιστροφής. Οι απώλειες ισχύος στις διόδους ανόρθωσης είναι κυρίως απώλειες αγωγής. [22]

Για να υπολογιστούν οι απώλειες του συστήματος γεννήτριας-ανορθωτή και να προκύψει η καμπύλη απόδοσης, πρέπει να μελετηθεί το σύστημα σε ένα μεγάλο εύρος φορτίου για δύο περιπτώσεις: [22]

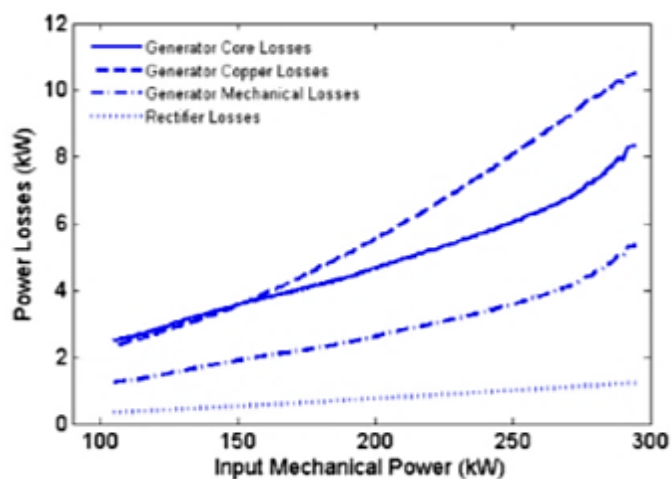
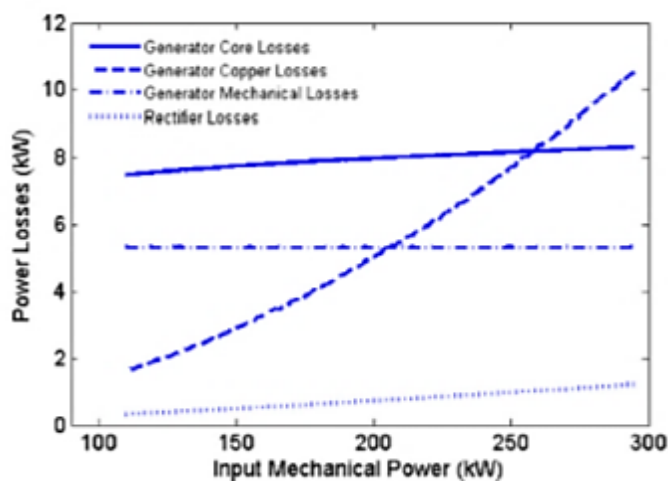
- 1) όταν η ταχύτητα του κινητήρα είναι σταθερή στην ονομαστική τιμή
- 2) όταν η ταχύτητα του κινητήρα ρυθμίζεται βέλτιστα ώστε να καταναλώνεται η ελάχιστη ποσότητα καυσίμου.

Ένα τέτοιο σύστημα παρουσιάζεται εποπτικά στην Εικόνα 1.15. Η βέλτιστη ταχύτητα ως προς το φορτίο της μηχανής προκύπτει από τα δεδομένα του κατασκευαστή. Για λειτουργία σε σταθερή ταχύτητα, η ταχύτητα αναφοράς είναι ίση με την ονομαστική τιμή.



Εικόνα 1.15: Εποπτική απεικόνιση του ελέγχου μεταβλητής ταχύτητας μονάδας diesel-γεννήτριας [22]

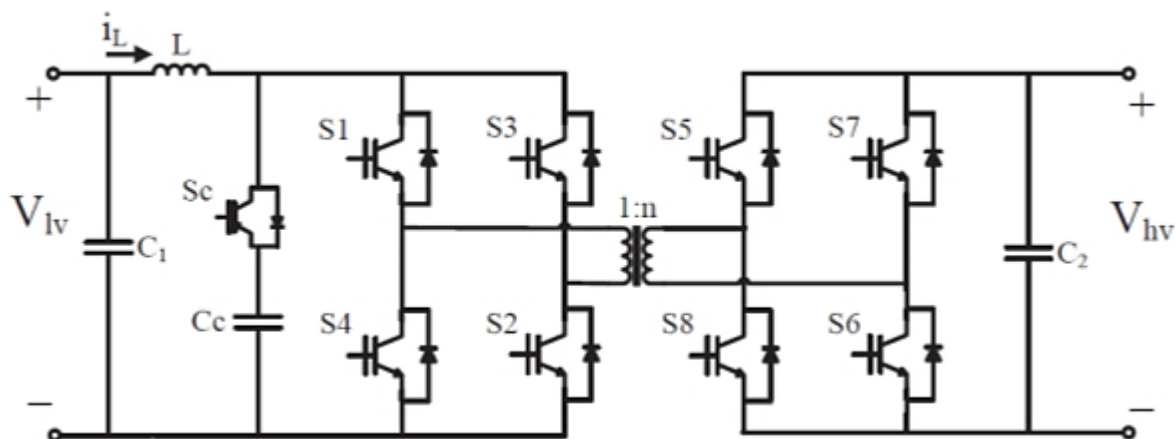
Οι απώλειες πυρήνα της γεννήτριας και οι μηχανικές απώλειες μειώνονται κατά τη λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας, ενώ οι απώλειες χαλκού αυξάνονται ελαφρώς. Παρόλα αυτά, η συνολική μείωση υπερβαίνει την αύξηση των απωλειών χαλκού, πράγμα το οποίο οδηγεί σε μεγαλύτερη απόδοση κατά τη λειτουργία σε μεταβλητή ταχύτητα (Εικόνα 1.16).



Εικόνα 1.16: Απώλειες ισχύος συστήματος γεννήτριας- ανορθωτή υπό σταθερή (αριστερά) και υπό μεταβλητή (δεξιά) ταχύτητα λειτουργίας [22]

1.5.2.3 Αμφίδρομος μετατροπέας DC-DC

Σε ένα υβριδικό DCσύστημα ισχύος, η προσθήκη διάταξης αποθήκευσης ενέργειας βελτιώνει την απόδοση του συστήματος κατά τη μεταβατική λειτουργία και επιτρέπει το βέλτιστο καταμερισμό του φορτίου μεταξύ των πηγών. Συνήθως χρησιμοποιείται ένας αμφίδρομος μετατροπέας για να ενσωματώσει την αποθήκευση ενέργειας στο σύστημα ισχύος. Υπάρχουν διάφορες τοπολογίες μετατροπέων ισχύος DC-DC [22]. Μία τοπολογία που χρησιμοποιήθηκε από τους Zahedi et al. (2014) παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.17.



Εικόνα 1.17: Τοπολογία αμφίδρομου μετατροπέα DC-DC πλήρους γέφυρας [22]

Ο μετασχηματιστής υψηλής συχνότητας χρησιμοποιείται για να παρέχει λόγο μετασχηματισμού τάσης και να συνδέει μια μπαταρία χαμηλής τάσης στο DC δίαυλο. Το επιπρόσθετο κόστος και οι απώλειες που εισάγονται από το λόγο μετασχηματισμού μεταξύ χαμηλής και υψηλής τάσης είναι τέτοια που δεν είναι πλέον οικονομικό να ελέγχεται ταυτόχρονα και η τάση και το ρεύμα. Το πλεονέκτημα της πλήρους γέφυρας είναι οι χαμηλότερες απώλειες σε σχέση με άλλες τοπολογίες. [26]

1.6 Εφαρμογές συνεχούς ρεύματος (DC)

1.6.1 Δίκτυο διανομής ισχύος εμπορικού πλοίου

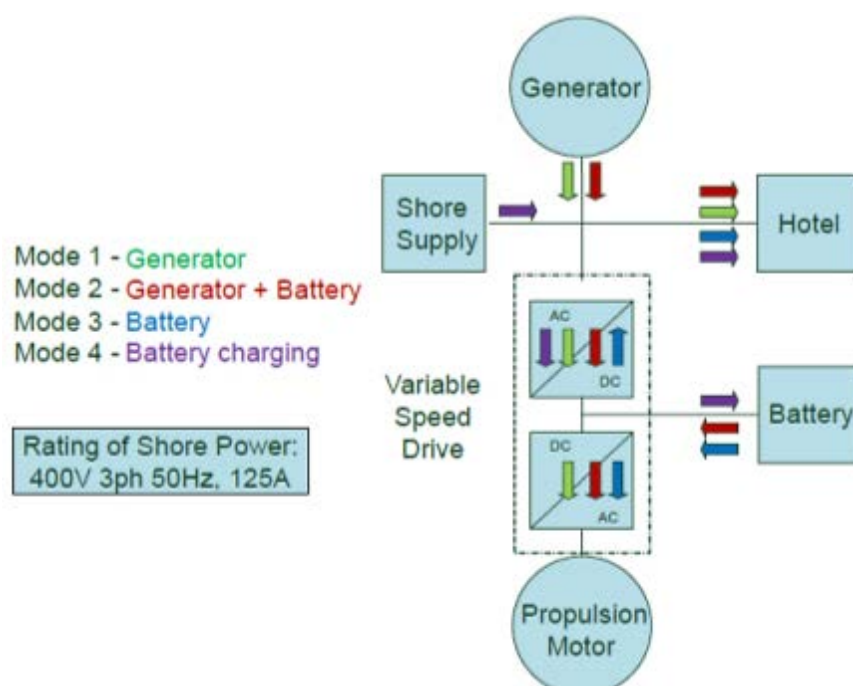
➤ Υβριδικό ferry CalMac

Τα υβριδικά ferry συνδυάζουν τους συμβατικούς κινητήρες diesel με την ηλεκτρική ισχύ των μπαταριών, με σκοπό τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών CO₂ και άλλων ρυπαντών. Το Φεβρουάριο του 2011 η Κυβέρνηση της Σκωτίας χρηματοδότησε το πρόγραμμα εργασιών της Εταιρίας Caledonian Maritime Assets Limited (CMAL) για υβριδικά ferry χαμηλών εκπομπών. Τουλάχιστον το 20% της ενέργειας που καταναλώνεται πάνω στο πλοίο προέρχεται από συστοιχία μπαταριών. Το πλοίο θα τροφοδοτείται από νηζελογεννήτρια 400 V που θα παρέχει ισχύ στους ηλεκτρικούς κινητήρες προώθησης που κινούν τις μονάδες προώθησης Voith Sneider. Οι μπαταρίες των ferry θα φορτίζονται κατά τη διάρκεια της νύχτας όταν το πλοίο θα είναι αγκυροβολημένο, ενώ μελετάται η φόρτιση των μπαταριών από τοπικές ανεμογεννήτριες και ηλιακά συστήματα. [27]

Το πλοίο τέθηκε σε λειτουργία και εκτελεί μια διαδρομή 6 km μεταξύ Lavik και Oppedal. Έχει χωρητικότητα 360 επιβατών και 120 οχημάτων και εκτελεί 34 δρομολόγια την ημέρα, καθένα από τα οποία διαρκεί περίπου 20 λεπτά. Διαθέτει δύο ηλεκτρικούς κινητήρες ισχύος 450 kW και το ηλεκτρικό σύστημα προώθησης

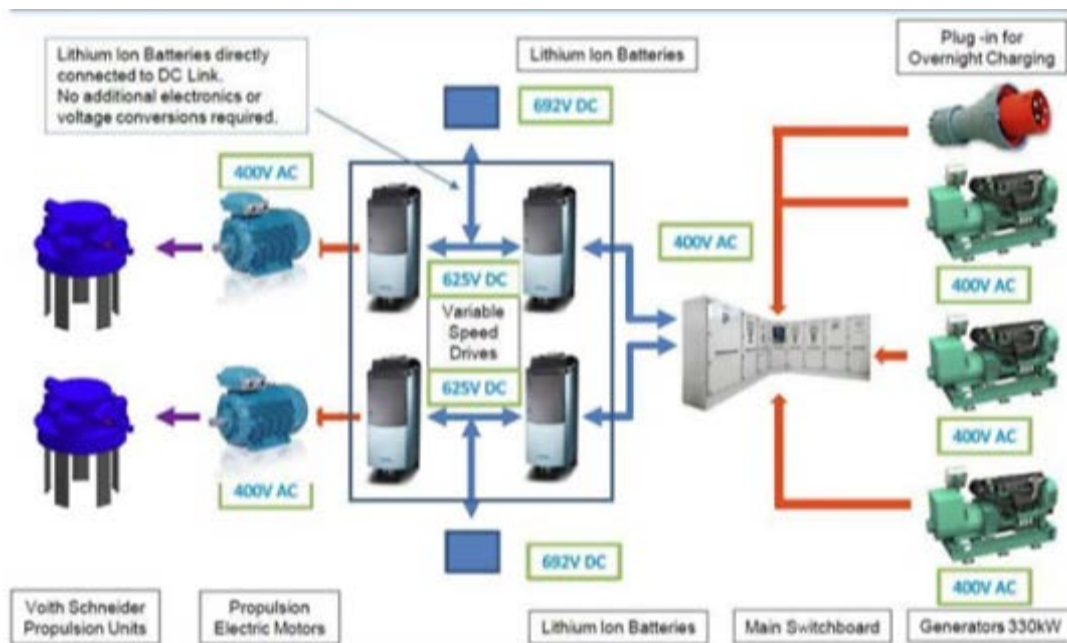
BlueDrive PlusC της εταιρίας Siemens. Περιλαμβάνει μια μπαταρία ιόντων λιθίου και ένα σύστημα οδήγησης, έλεγχο της ώσης για τις προπέλες, σύστημα ενεργειακής διαχείρισης και ενσωματωμένο σύστημα συναγερμού. Τα ολοκληρωμένα συστήματα αυτομάτου ελέγχου παρακολουθούν τα μηχανήματα και τα βοηθητικά συστήματα του ferry και συνδέονται μέσω του συστήματος Profibus με όλα τα άλλα υποσυστήματα. [27]

Έχει επίσης εγκατεστημένες μπαταρίες ιόντων λιθίου των 269 kWh στους τερματικούς σταθμούς για να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια στο πλοίο όταν είναι αγκυροβολημένο στο λιμάνι. Στη συνέχεια η μπαταρία θα ανακτήσει την ενέργεια από το δίκτυο, έως ότου επιστρέψει το πλοίο. Το πλοίο καταναλώνει μόνο 150 kWh ανά διαδρομή και οι μπαταρίες του πλοίου φορτίζονται κατά τη διάρκεια της νύχτας απευθείας από το δίκτυο, όταν το πλοίο δεν εκτελεί δρομολόγια. [27]



Εικόνα 1.18: Επιλογές λειτουργίας του συστήματος προώθησης [27]

Ένα συμβατικό πλοίο που λειτουργεί με diesel καταναλώνει τουλάχιστον 10⁶ litres πετρέλαιο το χρόνο και εκπέμπει 570 tnCO₂, ενώ το υβριδικό ferry καταναλώνει περίπου 2·10⁶ kWh ενέργειας το χρόνο. Το ηλεκτρικό σύστημα προώθησης έχει καταστήσει δυνατή τη μείωση του κόστους καυσίμου κατά 60%. [27]



Εικόνα 1.19: Καινοτόμο δίκτυο διανομής ισχύος πλοίου [27]

➤ Δίκτυο συνεχούς ρεύματος της εταιρίας ABB επί του πλοίου

Το δίκτυο DC επί του πλοίου είναι ένα βήμα παραπέρα προς ένα βελτιστοποιημένο σύστημα πρόωσης και είναι η επέκταση των συστήματος των πολλαπλών συνδέσεων DC που ήδη υπάρχουν. Το σύστημα αυτό επιτρέπει το συνδυασμό των πλεονεκτημάτων των συνιστωσών AC με ένα νέο σύστημα διανομής DC. Όπως η μεταβλητή ταχύτητα επιτρέπει στους κινητήρες ηλεκτρικής προώθησης να λειτουργούν στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας, το δίκτυο DC επί του πλοίου επιτρέπει στους κινητήρες diesel να λειτουργούν με μεταβλητή ταχύτητα για μέγιστη εξοικονόμηση καυσίμου σε κάθε επίπεδο φορτίου. Επιτρέπει επίσης μεγάλη ευελιξία ως προς το συνδυασμό των πηγών ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων και των Α.Π.Ε. [28]

Στα συμβατικά πλοία ηλεκτρικής προώθησης, πραγματοποιούνται πολλαπλές συνδέσεις DC μεταξύ του συστήματος πρόωσης και του συστήματος προώθησης από ένα σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος (AC), λαμβάνοντας υπόψη περισσότερο από το 80% της ηλεκτρικής κατανάλωσης ισχύος. Αυτό το σύστημα αποτελεί καινοτομία στη διανομή ισχύος, διότι γίνεται από ένα μόνο κύκλωμα DC παρέχοντας σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Προς το παρόν, το σύστημα αυτό είναι διαθέσιμο σε χαμηλή τάση με εγκατεστημένη ισχύ ως 20 MW. Μέσω της διανομής υπό συνεχή τάση, το σύστημα επιτρέπει τη λειτουργία των γεννητριών σε μεταβλητή ταχύτητα και κατά συνέπεια επιτυγχάνεται η βέλτιστη ειδική κατανάλωση καυσίμου. [28]

1.6.2 Αυτοκίνηση

Η εταιρία Toyota έχει φέρει εδώ και δέκα χρόνια στην αγορά τα υβριδικά μοντέλα της. Με τη βελτίωση των μπαταριών, και κυρίως των μπαταριών ιόντων λιθίου, η

δυνατότητα αυτονομίας των ηλεκτρικών οχημάτων χωρίς επαναφόρτιση έχει ξεπεράσει τα 150 km, ενώ παράλληλα αρχίζουν να εμφανίζονται σταθμοί φόρτισης σε αρκετές πόλεις. Τα συστήματα των ηλεκτρικών οχημάτων είναι συνήθως διαθέσιμα στα 150 kW, ενώ ορισμένοι κατασκευαστές προσφέρουν μέγιστη ισχύ στα 250 kW. Ο κινητήρας λειτουργεί με ταχύτητα περιστροφής 5.500 rpm και η τάση του κυμαίνεται από 450 V ως 750 V. Η μέγιστη ροπή έχει βρεθεί ίση με 900 N·m. Υβριδικό ηλεκτρικό αγωνιστικό όχημα της Φόρμουλα 1 παράγει 550 kW στα 19.000 rpm και έχει μέγιστη ισχύ 300 N·m. Οι προμηθευτές εξετάζουν τη δυνατότητα υποστήριξης ή αντικατάστασης των μπαταριών με πυκνωτές. Υπάρχουν επίσης προστατευτικές διατάξεις που απομονώνουν τις μπαταρίες σε μικρό κύκλωμα και περιορίζουν το ρεύμα.

Περισσότερο διαδεδομένα από τα ηλεκτρικά οχήματα είναι τα υβριδικά οχήματα, τα οποία συνδυάζουν έναν ηλεκτρικό κινητήρα με ένα βενζινοκινητήρα. Οι βασικές συνιστώσες του συστήματος είναι ο ηλεκτρικός κινητήρας, ο βενζινοκινητήρας, η γεννήτρια, η διάταξη διαχωρισμού ισχύος και η μονάδα ελέγχου ισχύος (αντιστροφείας / μετατροπέας). Η διάταξη διαχωρισμού ισχύος μεταφέρει μέρος της ισχύος που παράγεται από το βενζινοκινητήρα για την κίνηση των τροχών, και το υπόλοιπο στη γεννήτρια είτε για να παραχθεί ηλεκτρική ισχύς για την κίνηση του ηλεκτροκινητήρα είτε για τη φόρτιση της μπαταρίας. Το σύστημα εκμεταλλεύεται τους ηλεκτροκινητήρες υψηλής απόδοσης όταν το όχημα κινείται στο εύρος χαμηλών ταχυτήτων και χρησιμοποιεί τον βενζινοκινητήρα όταν το όχημα κινείται σε εύρος υψηλότερων ταχυτήτων. Με άλλα λόγια, το σύστημα μπορεί να χειριστεί τις δύο πηγές ισχύος για να επιτευχθεί η πιο αποδοτική λειτουργία υπό οποιεσδήποτε συνθήκες οδήγησης. [29]

- **Μπαταρία**

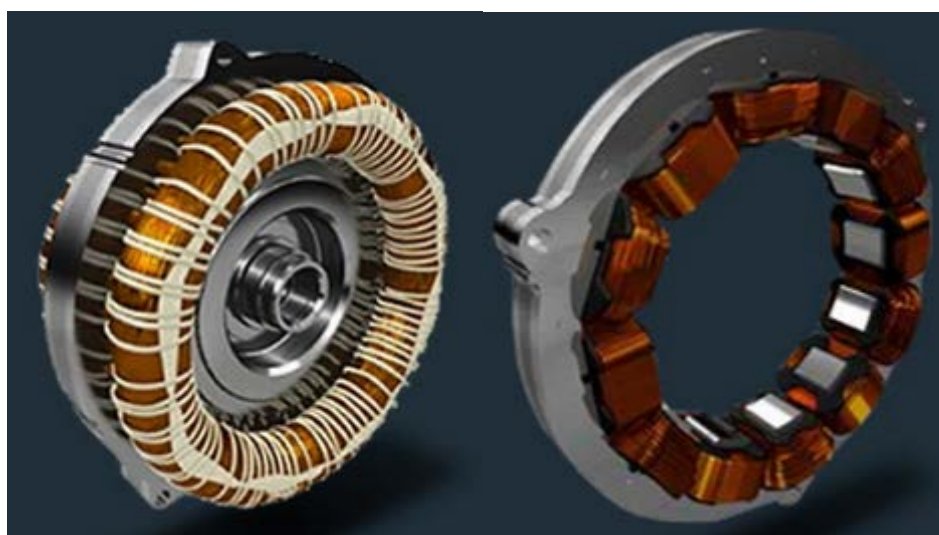
Η έξοδος υψηλής ισχύος της μπαταρίας νικελίου-μετάλλου υδριδίου (Ni-MH) παρέχει εξαιρετικά ανταγωνιστικό λόγο εισόδου-εξόδου προς το λόγο του βάρους. Το ψυκτικό σύστημα του κελύφους της μπαταρίας συμπεριλαμβανομένου και των αγωγών ψύξης είναι βελτιστοποιημένο. Επιπλέον το σύστημα διατηρεί το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας σταθερό, παρακολουθώντας και υπολογίζοντας το αθροιστικό ποσό αποφόρτισης κατά την επιτάχυνση και φορτίζοντας μέσω της αναγεννητικής πέδησης ή με την πρόσθετη ισχύ υπό κανονικές συνθήκες οδήγησης.



Εικόνα 1.20: Μπαταρία NI-MH υβριδικού οχήματος Toyota [29]

- **Ηλεκτροκινητήρας και γεννήτρια**

Η υβριδική τεχνολογία της Toyota χρησιμοποιεί σύγχρονο κινητήρα AC, ο οποίος μπορεί να παράγει υψηλή ροπή με καλή απόδοση στις υψηλές στροφές και δίνει τη δυνατότητα ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής και της ροπής του κινητήρα. Είναι πιο συμπαγής, ελαφρύτερη και αποδοτικότερη. Είναι τριφασικός, παρέχει βέλτιστο έλεγχο στη γωνία μεταξύ του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου και των μαγνητών του ρότορα, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε διάταξη V. Η μέγιστη ισχύς του είναι 60 kW και η μέγιστη ροπή του 207 N·m. Χρησιμοποιείται σύγχρονη γεννήτρια AC που μπορεί να περιστραφεί με υψηλή ταχύτητα, παράγοντας σημαντική ηλεκτρική ισχύ ενώ το όχημα κινείται σε μέσο εύρος ταχυτήτων. [29]



Εικόνα 1.21: Ηλεκτροκινητήρας (αριστερά) και γεννήτρια (δεξιά) του υβριδικού οχήματος Toyota [29]

- **Μονάδα ελέγχου ισχύος με αντιστροφέα σε DC**

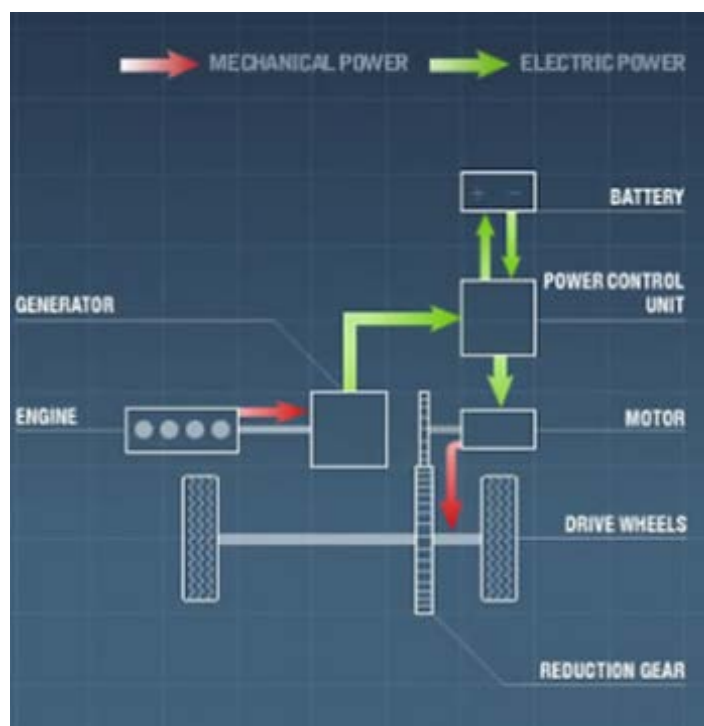
Η υβριδική τεχνολογία της Toyota είναι εξοπλισμένη με μια μονάδα ελέγχου ισχύος η οποία αποτελείται από έναν αντιστροφέα, έναν μετατροπέα τάσης και έναν μετατροπέα AC/DC, ώστε να κινείται το όχημα με τον ηλεκτροκινητήρα. Ο αντιστροφέας μετατρέπει το DC ρεύμα που παρέχεται από τη μπαταρία σε AC ώστε να κινήσει τον ηλεκτροκινητήρα και να χρησιμοποιηθεί στη γεννήτρια. Αντίστροφα, μετατρέπει το AC που παράγεται από τον ηλεκτροκινητήρα και τη γεννήτρια σε DC για να φορτίσει ξανά τη μπαταρία.

Ο μετατροπέας τάσης μετατρέπει την κανονική παροχή τάσης 201,6 VDC σε μέγιστη 650 V για να τροφοδοτηθεί ο ηλεκτροκινητήρας και η γεννήτρια, όπως απαιτείται. Αυτό σημαίνει ότι με μικρότερο ρεύμα μπορεί να παραχθεί περισσότερη ισχύς και να αυξηθεί η επίδοση του ηλεκτροκινητήρα, βελτιώνοντας τη συνολική επίδοση του συστήματος. Ο μετατροπέας DC/DC μειώνει την τάση των 201,6 V από τη μπαταρία σε 12 V, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τα βοηθητικά συστήματα και τις ηλεκτρονικές διατάξεις. [29]



Εικόνα 1.22: Μονάδα ελέγχου ισχύος [29]

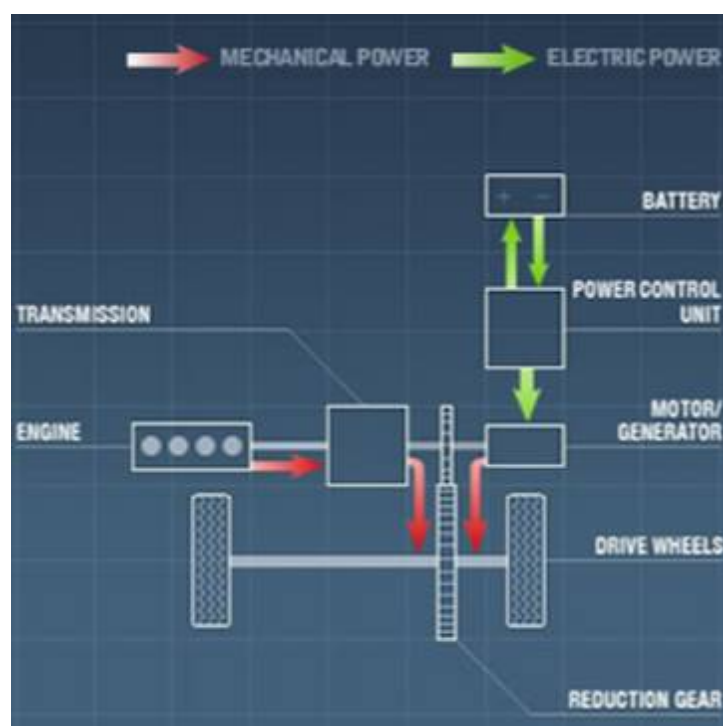
Στην Εικόνα 1.23 παρουσιάζεται ένα σειριακό υβριδικό σύστημα στο οποίο ο βενζινοκινητήρας κινεί τη γεννήτρια. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται τροφοδοτείται στον ηλεκτροκινητήρα που κινεί τους τροχούς.



Εικόνα 1.23: Σειριακό υβριδικό σύστημα [29]

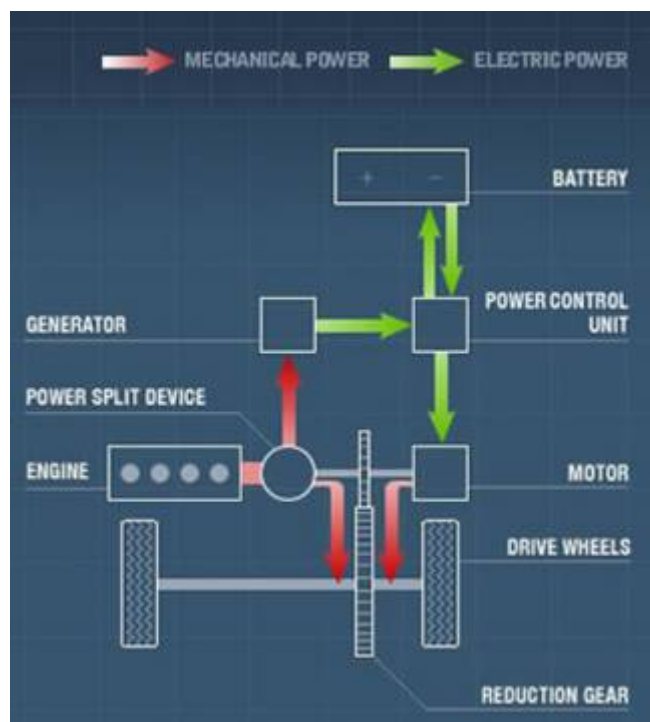
Στην Εικόνα 1.24 παρουσιάζεται ένα παράλληλο υβριδικό σύστημα, στο οποίο οι τροχοί μπορούν να κινηθούν και από τον βενζινοκινητήρα και τον ηλεκτρικό κινητήρα. Η πηγή ισχύος επιλέγεται ανάλογα με τις συνθήκες οδήγησης. Πρωτεύουσα πηγή ισχύος είναι ο

βενζινοκινητήρας. Ο ηλεκτροκινητήρας χρησιμοποιείται για να παρέχει πρόσθετη ισχύ κατά τη διάρκεια της επιτάχυνσης. Όμως, ο ηλεκτροκινητήρας δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ισχύος του οχήματος κατά τη φάση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. [29]



Εικόνα 1.24: Παράλληλο υβριδικό σύστημα [29]

Με τη διάταξη που παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.25, είναι δυνατή η κίνηση των τροχών χρησιμοποιώντας διπλή πηγή ισχύος (ηλεκτροκινητήρας και/ ή βενζινοκινητήρας), καθώς και να παράγεται ηλεκτρική ενέργεια καθώς χρησιμοποιείται ο ηλεκτροκινητήρας. Το όχημα κινείται χρησιμοποιώντας ενέργεια μόνο από τον ηλεκτροκινητήρα, ή χρησιμοποιώντας και το βενζινοκινητήρα, ανάλογα με τις απαιτήσεις της οδήγησης. Από τη στιγμή που η γεννήτρια είναι ενσωματωμένη στο όχημα, η μπαταρία μπορεί να φορτίζεται ενώ το όχημα κινείται. [29]

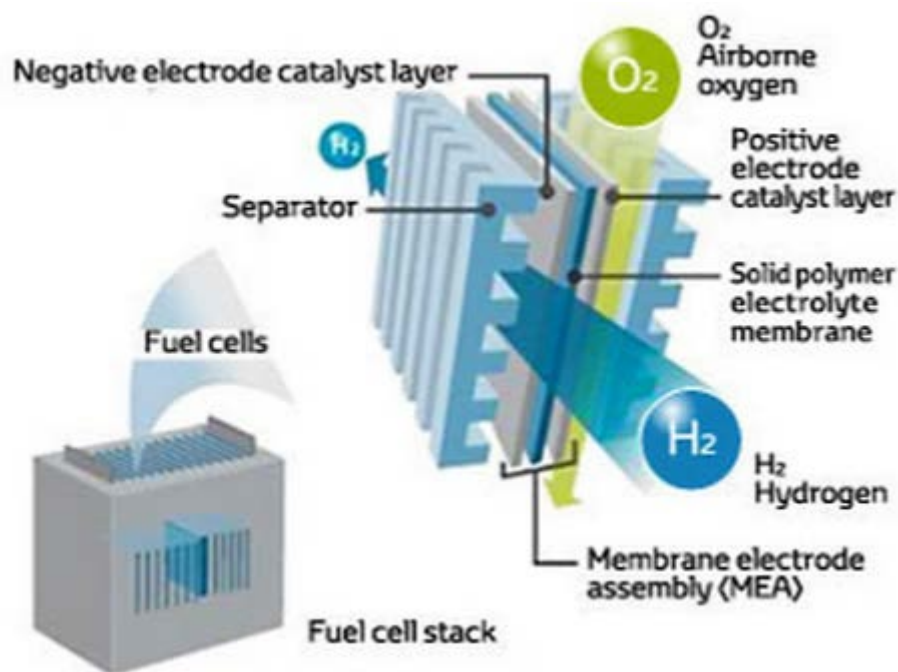


Εικόνα 1.25: Σειριακό/ Παράλληλο υβριδικό σύστημα [29]

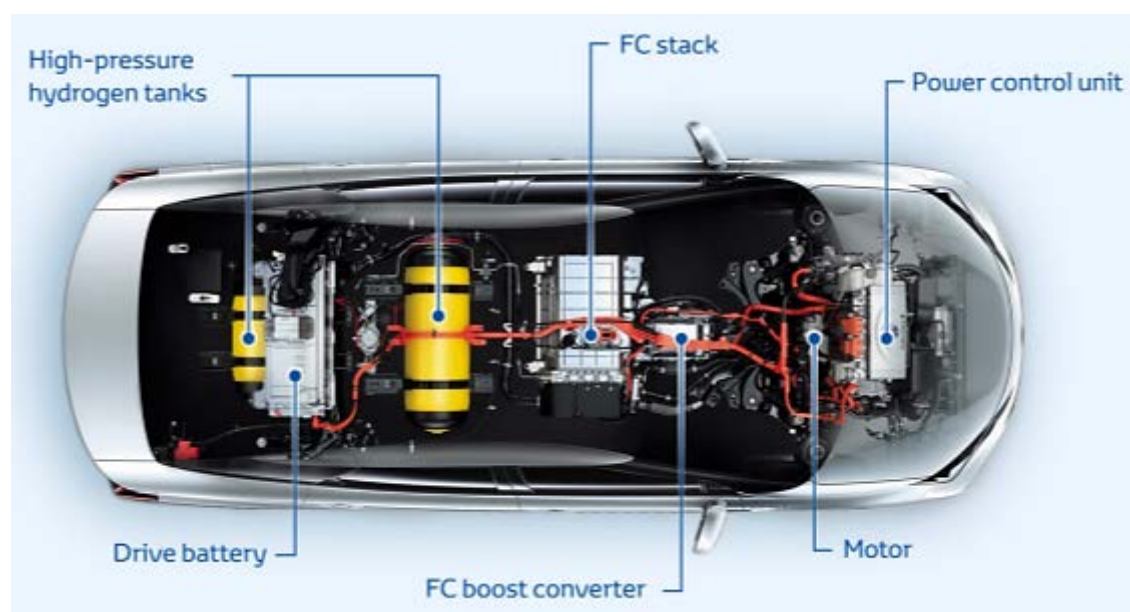
1.6.2.1 Όχημα κυψελών καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω της χημικής αντίδρασης μεταξύ υδρογόνου και οξυγόνου. Το υδρογόνο και ο αέρας περιβάλλοντος τροφοδοτούνται στην άνοδο (αρνητικό ηλεκτρόδιο) και την κάθοδο (θετικό ηλεκτρόδιο) της κυψέλης καυσίμου ώστε να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια .

Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούνται από διάταξη ηλεκτροδίων σε μορφή μεμβράνης μεταξύ των διαχωριστών. Πρόκειται για μια μεμβράνη στερεού πολυμερούς ηλεκτρολύτη με στρώματα καταλύτη. Λόγω του ότι η μία κυψέλη μπορεί να παράγει τάση μικρότερη από 1 V, συνδέονται αρκετές εκατοντάδες κυψέλες σε σειρά ώστε να αυξηθεί η τάση. Το σώμα που προκύπτει από το συνδυασμό τους αποτελεί μια συστοιχία κυψελών καυσίμου. Η συστοιχία που χρησιμοποιείται από την Toyota αποτελείται από 370 κυψέλες και έχει μέγιστη ισχύ 114 kW και πυκνότητα ισχύος 3,1 kW/L. [29]



Εικόνα 1.26: Απεικόνιση μερών μιας κυψέλης καυσίμου [29]



Εικόνα 1.27: Όχημα κυψελών καυσίμου της Toyota [29]

1.6.3 Σιδηροδρομικές εφαρμογές

Τα ηλεκτροκίνητα σιδηροδρομικά συστήματα παρέχουν ηλεκτρική ισχύ στις σιδηροδρομικές γραμμές και στις γραμμές των τραμ, χωρίς την ύπαρξη άλλης κινητήρας μηχανής ή παροχής καυσίμου. Ορισμένες ηλεκτρικές μηχανές τρένων

μπορούν να λειτουργήσουν σε διαφορετικές παροχές τάσης, παρέχοντας ευελιξία. Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται σε μεγάλους σταθμούς παραγωγής, μεταφέρεται στο σιδηροδρομικό δίκτυο και διανέμεται στα τρένα. Η ισχύς παρέχεται στο τρένο είτε μέσω εναέριου καλωδίου, που αναρτάται από πόλους κατά μήκος της σιδηροδρομικής γραμμής, είτε μέσω μιας τρίτης σιδηροδρομικής τροχιάς στο επίπεδο των σιδηροδρομικών γραμμών. Σε σύγκριση με τις μηχανές diesel, οι ηλεκτρικοί κινητήρες παρέχουν καλύτερη ενεργειακή απόδοση, χαμηλότερες εκπομπές και χαμηλότερο λειτουργικό κόστος. Οι ηλεκτρικές μηχανές τρένων έχουν χαμηλότερο θόρυβο, μεγαλύτερη ισχύ και μεγαλύτερη αξιοπιστία. Η πηγή ενέργειας που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του ρεύματος μπορεί να είναι ανανεώσιμη, όπως υδροηλεκτρική, γεωθερμία, αιολική και ηλιακή. [30]

Στις περισσότερες αστικές συγκοινωνίες χρησιμοποιείται παροχή συνεχούς ρεύματος. Υπάρχουν παγκοσμίως 41 τραμ που χρησιμοποιούν τα 600 VDC με εναέρια καλώδια, 17 παλαιότερα τρένα με σιδηροτροχιά των 600 VDC. Στα πιο καινούργια τραμ χρησιμοποιούνται 750 VDC με εναέρια καλώδια και 750 VDC με σιδηροτροχιά. Σε 51 συστήματα παγκοσμίως χρησιμοποιείται συνεχές ρεύμα 1500 V με εναέρια καλώδια και σε 16 συστήματα συνεχές ρεύμα 3000 V με εναέρια καλώδια. Υπάρχουν επίσης 22 συστήματα παγκοσμίως, στα οποία η τάση κυμαίνεται από 120 V ως 6000 V. [31]



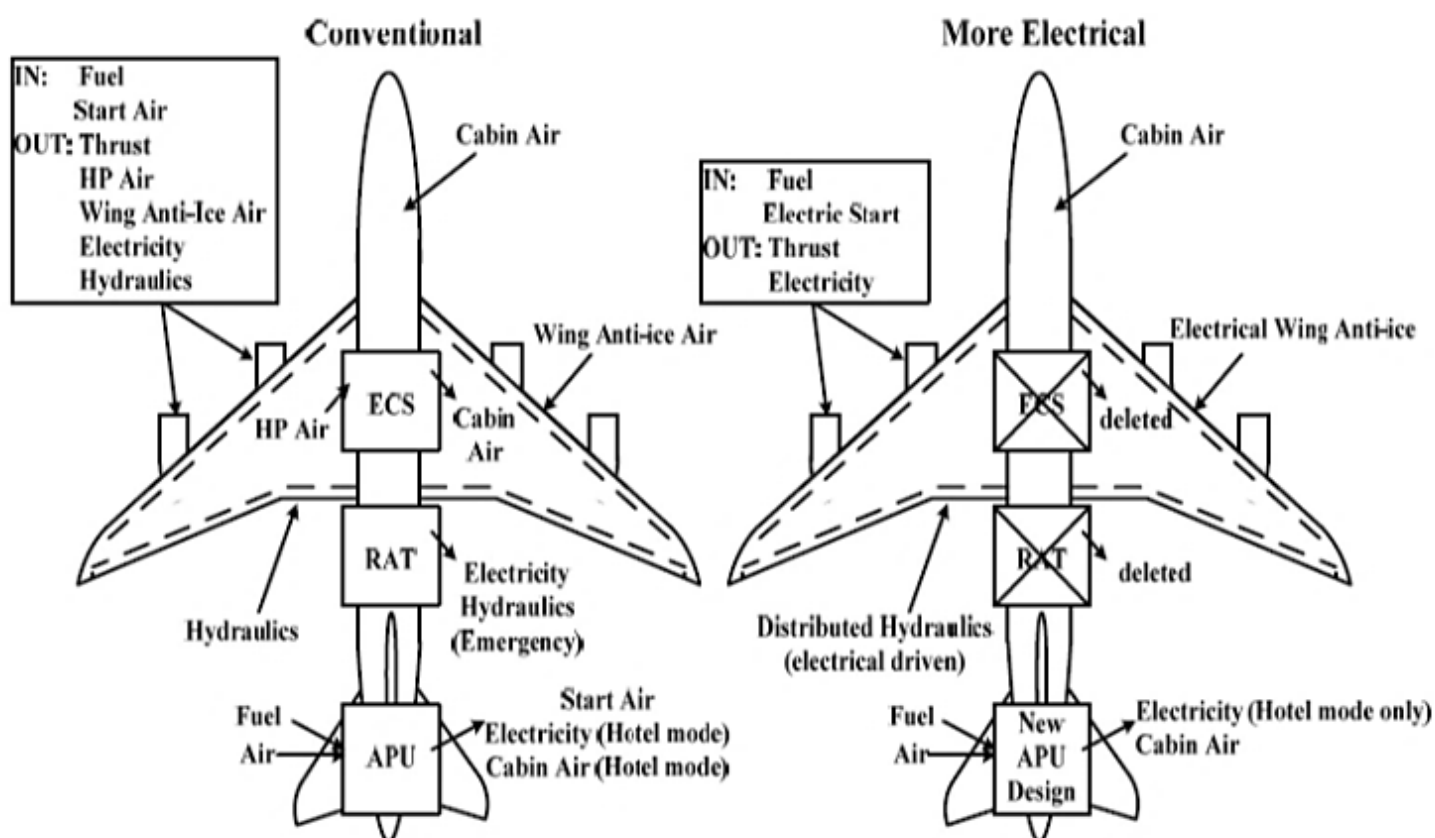
Εικόνα 1.28: Σύστημα 750 V με εναέρια καλώδια στο Ηνωμένο Βασίλειο (NottinghamExpressTransit) [30]

Τα συστήματα τρίτης σιδηροτροχιάς περιορίζονται σε χαμηλές τάσεις, πράγμα το οποίο περιορίζει και τις ταχύτητές τους στα 160 km/h.

1.6.4 Αεροδιαστημικές εφαρμογές

Τα ηλεκτρικά συστήματα συνεχούς ρεύματος που χρησιμοποιούνται σήμερα στην αεροδιαστημική είναι 28 V με μπαταρία. Σε αεροσκάφη με περισσότερα ηλεκτρικά μέρη, όπως ηλεκτρικοί υδροστατικοί επενεργητές για τις επιφάνειες ελέγχου, ηλεκτρικό σύστημα κλιματισμού και ηλεκτρικό σύστημα απομάκρυνσης πάγου χρησιμοποιείται επίσης σύστημα 270 V ή ± 270 VDC ως κύριος δίαυλος. Αν όλα τα δίκτυα τροφοδοτούνται από ηλεκτρική ισχύ, ο κινητήρας πρέπει να παράγει περίπου 1 MW ηλεκτρικής ισχύος.

Στο αεροσκάφος Boeing B787 υπάρχουν πολύ περισσότερα ηλεκτρικά μέρη σε σχέση με το αεροσκάφος A380. Ένα πιο ηλεκτρικό αεροσκάφος (More-Electric Aircraft -MEA) χρησιμοποιεί την ηλεκτρική ισχύ για την κίνηση των μη προωθητικών συστημάτων του αεροσκάφους. Η ισχύς που απαιτεί ένα τέτοιο σύστημα είναι πολύ μεγαλύτερη. Οι πρόσφατες καινοτομίες στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος, όπως οι ηλεκτρουδροστατικοί επενεργητές και οι ηλεκτρομηχανολογικοί επενεργητές έχουν προκαλέσει ξανά το ενδιαφέρον για τα MEA [34]. Μια σύγκριση μεταξύ των υποσυστημάτων των συμβατικών αεροσκαφών και των υποσυστημάτων των MEA παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.29. [32]



Εικόνα 1.29: Σύγκριση μεταξύ των συστημάτων ενός συμβατικού αεροσκάφους και ενός MEA [32]

Η στροφή προς τα ΜΕΑ στα πολιτικά και στρατιωτικά αεροσκάφη οδηγεί σε σημαντικά πλεονεκτήματα όπως η αύξηση της αξιοπιστίας του αεροσκάφους και η μείωση του βάρους, της κατανάλωσης καυσίμου και του κόστους λειτουργίας. Στα ΜΕΑ απαιτούνται καινοτομίες στην περιοχή των ηλεκτρονικών ισχύος. Τα ηλεκτρονικά Υψηλής Θερμοκρασίας (ΗΤΕ) είναι ένα τέτοιο παράδειγμα. Η χρήση των ηλεκτρονικών ισχύος απαιτεί τη μετατροπή όλων εξόδων των γεννητριών και των κινητήρων σε ένα σύστημα διανομής συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης. Η τιμή της τάσης του συστήματος είναι είτε 270 V, 350 V και 540 V [34]. Η χρήση υψηλής τάσης στο σύστημα διανομής έχει το πλεονέκτημα της μείωσης του βάρους, του μεγέθους και των απωλειών, ενώ αυξάνονται παράλληλα τα επίπεδα της μεταφερόμενης ισχύος. Η ακριβής τιμή όμως της τάσης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως, οι δυνατότητες χειρισμού υψηλής τάσης DC, η διαθεσιμότητα των συνιστωσών και η εκκένωση θυσάνου σε υψηλό υψόμετρο και μειωμένη πίεση. [33]

1.6.5 Συστήματα ενέργειας

Τα πλεονεκτήματα της διανομής ενέργειας σε υψηλή συνεχή τάση περιλαμβάνουν τη διασύνδεση των ασύγχρονων συστημάτων, τη διανομή ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις, δηλ. εναέρια καλώδια περίπου 25 km και 100 km. Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι ο έλεγχος της ροής ισχύος, καθώς υπάρχουν ηλεκτρονικά ισχύος σε κάθε άκρο, καθώς και η βελτίωση της σταθερότητας του εναλλασσόμενου ρεύματος καθώς δεν υπάρχει τετραγωνική συνιστώσα. Όταν η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από ηλιακή ενέργεια, η παραγωγή γίνεται σε νότιες περιοχές, ενώ όταν παράγεται από υπεράκτιες και αιολικές μονάδες πρέπει να μεταφερθεί στους κύριους καταναλωτές μέσω μεγάλων γραμμών μετάδοσης. [31]

Υπάρχουν περίπου 90 διαφορετικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας συνδεδεμένα στο δίκτυο παγκοσμίως που υπερβαίνουν τα 2 MW. Οι μεγαλύτερες είναι οι μονάδες συσσώρευσης ενέργειας με άντληση που κυμαίνονται από 300 MW ως 3 GW. Άλλες μεγάλες τεχνολογίες είναι οι μονάδες συμπιεσμένου αέρα των 290 MW και οι μονάδες τήξης άλμης των 280 MW. Οι υπόλοιπες τεχνολογίες είναι μικρότερες των 36 MW και περιλαμβάνουν μπαταρίες μολύβδου οξέος ως 36 MW, ιόντων λιθίου ως 32 MW, νικελίου καδμίου ως 27 MW, μπαταρίες οξειδοαναγωγής μέχρι 25 MW, σφόνδυλοι μέχρι 20 MW και υπερπυκνωτές ως 2 MW. [31]

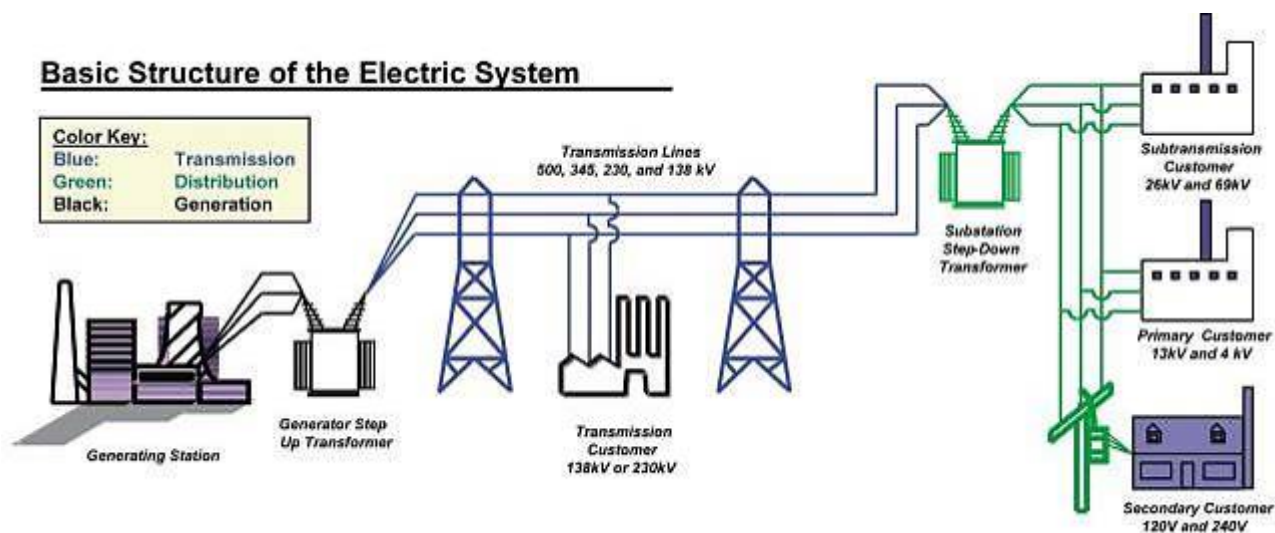
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Συστήματα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

2.1 Εισαγωγή

Τα κύρια στοιχεία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η παραγωγή, η μετάδοση, η διανομή και τα φορτία. Η ενέργεια παράγεται από μεγάλους κεντρικούς σταθμούς παραγωγής και τροφοδοτείται σε ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο μεταφοράς υψηλής τάσης. Η μεταφερόμενη σε μεγάλες αποστάσεις ισχύς μεταβιβάζεται, μέσω μιας σειράς μετασχηματιστών διανομής, στα τελικά κυκλώματα για τη διανομή στους καταναλωτές [36]. Το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας προοδευτικά αναπτύχθηκε εδώ και έναν αιώνα, από το αρχικό σχέδιο των τοπικών DC δικτύων χαμηλής τάσης, στα τριφασικά AC δίκτυα υψηλής τάσης και τελικά στα μοντέρνα ογκώδη διασυνδεδεμένα δίκτυα με διάφορα επίπεδα τάσης και πολλαπλά, πολύπλοκα ηλεκτρικά συστατικά στοιχεία. [37]

Τα σημερινά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, που μας εξυπηρετούν για δεκαετίες, στηρίζονται κατά βάση στα ορυκτά καύσιμα, συμπεριλαμβανομένου του πετρελαίου, του άνθρακα και του φυσικού αερίου ως πηγές ενέργειας. Αυτά τα ορυκτά καύσιμα είναι μη ανανεώσιμα και τα αποθέματά τους στη γη καταναλώνονται ταχύτατα. Η αναδυόμενη ενεργειακή κρίση καλεί την παγκόσμια προσοχή να στραφεί στην ανεύρεση εναλλακτικών πηγών ενέργειας που μπορούν να στηρίξουν μια μακροπρόθεσμη ανάπτυξη της βιομηχανίας. Οι εναλλακτικές πηγές ενέργειας που έχουν προσδιοριστεί περιλαμβάνουν την αιολική, την ηλιακή, την παλιρροιακή, τη γεωθερμική, την υδροηλεκτρική ενέργεια και τη βιομάζα, οι οποίες ονομάζονται επίσης «πράσινη ενέργεια» γιατί δεν απελευθερώνουν διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα κατά τη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν σημαντικά συμπληρώματα και αντικαταστάτες των ορυκτών καυσίμων λόγω της διάρκειας εκμετάλλευσής τους και της φιλικότητας προς το περιβάλλον.[37,38]

Η αυξανόμενη ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια, μαζί με την πολύπλοκη φύση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, έχουν προκαλέσει σοβαρά προβλήματα στο ήδη καταπονημένο δίκτυο, όπως διακοπές ρεύματος, βυθίσεις τάσης και υπερφορτίσεις, τα οποία μειώνουν σημαντικά την ποιότητα ρεύματος και την αξιοπιστία. Το υπάρχον δίκτυο (Εικόνα 2.1), λοιπόν, βρίσκεται υπό μεγάλη πίεση από τις διάφορες προκλήσεις και ανάγκες που προκύπτουν από το περιβάλλον, τους καταναλωτές, την αγορά αλλά και από θέματα της υπάρχουσας υποδομής. Αυτές οι προκλήσεις και ανάγκες είναι περισσότερο σημαντικές και επείγουσες από ποτέ και θα οδηγήσουν το δίκτυο σε επέκταση αλλά και σε ενίσχυση των λειτουργιών του προς εξυπνότερα χαρακτηριστικά, με τη βοήθεια ταχύτατα αναπτυσσόμενων τεχνολογιών. [36]



Εικόνα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση της βασικής δομής του κλασικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας [36]

2.2 Συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

2.2.1 Το ελληνικό σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (AC)

Η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται σε υψηλή τάση, με σκοπό τη μείωση των απωλειών ενέργειας στην αντίσταση των καλωδίων. Για μια δεδομένη ποσότητα μεταφερόμενης ενέργειας, ο διπλασιασμός της τάσης οδηγεί στη μεταφορά της ίδιας ισχύος με υποδιπλασιασμό του ρεύματος. Καθώς όμως η απώλεια ισχύος ως θερμότητα είναι ανάλογη του τετραγώνου του ρεύματος, αλλά δεν εξαρτάται από την τάση, ο διπλασιασμός της τάσης μειώνει τις απώλειες της γραμμής κατά τέσσερις φορές. Βέβαια, η υψηλή τάση δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα για το φωτισμό ή τους κινητήρες, άρα οι τάσεις που χρησιμοποιούνται στη μεταφορά πρέπει στη συνέχεια να μειωθούν για να φτάσουν στον τελικό χρήστη. Σε συστήματα μετάδοσης εναλλασσόμενου ρεύματος, η μετατροπή της τάσης αυτής γίνεται με μετασχηματιστές. Λόγω του ότι αυτή η μετατροπή της τάσης ήταν πρακτικά εύκολη με το μετασχηματιστή και παράλληλα οι γεννήτριες AC ήταν πιο αποδοτικές σε σχέση με τις DC, το εναλλασσόμενο ρεύμα κυριάρχησε. [39]

Οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι συγκεντρωμένοι στη Βόρεια Ελλάδα (Δυτική Μακεδονία), ενώ η κατανάλωση βρίσκεται κυρίως στο νότο (Αττική-Πελοπόννησος), και άρα υπάρχει μεγάλη ανισορροπία μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης, αν λάβει κάποιος υπόψη και το γεγονός ότι και οι διεθνείς διασυνδέσεις (Βουλγαρία, ΠΓΔΜ, Αλβανία) βρίσκονται στο Βορρά. Η αναγκαία μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται μέσω ενός κεντρικού κορμού με τρεις γραμμές μεταφοράς 400 kV διπλού κυκλώματος, οι οποίες συνδέουν τα κέντρα παραγωγής με τα Κέντρα Υψηλής Τάσης (Κ.Υ.Τ.) γύρω από την Αττική. Η Πελοπόννησος συνδέεται με

την Αττική μέσω τριών γραμμών μεταφοράς 150 kV, δύο από τις οποίες είναι διπλού κυκλώματος, και με τη Δυτική Ελλάδα μέσω δύο υποβρυχίων καλωδίων στο στενό Ρίου-Αντιρρίου. Μεγαλύτερη αξιοπιστία έχουν οι γραμμές απλού κυκλώματος, αφού οι ζώνες διέλευσης των γραμμών χωρίζονται μεταξύ τους με σημαντική απόσταση. [40]

Η ηλεκτρική ισχύς που μεταφέρεται από μια γραμμή είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσης της γραμμής, συνεπώς σε γραμμές υψηλής τάσης είναι εφικτή η μεταφορά μεγαλύτερων ποσοτήτων ισχύος με χαμηλότερες απώλειες. Η αυξημένη τάση οδηγεί όμως σε αύξηση των διηλεκτρικών απωλειών και σε αυξημένο κόστος μονωτήρων, μετασχηματιστών κ.λπ. Επομένως, υπάρχει μέγιστη τιμή τάσης η οποία αν υπερβληθεί, οδηγούμαστε σε αντιοικονομική μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας. Η χρήση υψηλών και υπερυψηλών τάσεων κατά τη μεταφορά οδηγεί σε μειωμένες απώλειες. [40]

Τα Κ.Υ.Τ. συνδέουν το σύστημα των 400 kV με το σύστημα των 150 kV. Το μήκος του δικτύου μεταφοράς από τους σταθμούς παραγωγής στα αστικά κέντρα και σε ηλεκτροβόρες βιομηχανίες, αποτελείται από γραμμές υψηλής (150 kV και 66 kV) και υπερυψηλής τάσης (400 kV) και παρουσιάζεται ακολούθως (Πίνακας 2.1). Τα νησιά που υπάγονται στο διασυνδεδεμένο σύστημα είναι πολύ λίγα και συνδέονται κυρίως με γραμμή μεταφοράς απλού κυκλώματος 150 kV. Η διασύνδεση γειτονικών νήσων μεταξύ τους γίνεται με υποβρύχια καλώδια 150 kV. [40]

Πίνακας 2.1: Μήκος γραμμών μεταφοράς σε κάθε επίπεδο τάσης [40]

Γραμμές μεταφοράς (km)	400kV	150kV	66kV	Σύνολο
Εναέρσιες	4005	10765	40	14810
Υπόγειες/ Υποβρύχιες	-	177	13,5	190,5
Υπόγειες	-	190	-	190
Σύνολο	4005	11132	53,5	15190,5

Από τον Οκτώβριο του 2004 το Ελληνικό Σύστημα λειτουργεί σύγχρονα και παράλληλα με το σύστημα της UCTE (Union pour la Coordination du Transport de l' Electricité). Υπάρχουν τρεις κύριες διασυνδετικές γραμμές μεταφοράς 400kV που συνδέουν το Ελληνικό Σύστημα με το σύστημα της Αλβανίας, της Βουλγαρίας και της ΠΓΔΜ. Επιπλέον, το Ελληνικό Σύστημα συνδέεται ασύγχρονα (μέσω υποβρυχίου συνδέσμου συνεχούς ρεύματος 400kV και ασύγχρονης σύνδεσης AC-DC-AC) με την Ιταλία. Οι εισαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας γίνονται κυρίως για οικονομικούς λόγους, αφού κοστίζουν φθηνότερα από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από πετρελαϊκές μονάδες, παρά από αδυναμία κάλυψης της ζήτησης από το σύστημα παραγωγής. Εισαγωγές και εξαγωγές προς κάποια ή κάποιες γειτονικές διασυνδέσεις γίνονται τις χρονικές στιγμές που ο διαχειριστής του συστήματος κρίνει ότι είναι οικονομικά

συμφέρον να γίνουν και σύμφωνα πάντα με τα συμφωνηθέντα συμβόλαια και το προκαθορισμένο πρόγραμμα μεταξύ των συμβαλλομένων χωρών. [40]

2.2.2 DC συστήματα μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής τάσης

Η μετατροπή μεταξύ AC και DC έγινε πρακτικά εφικτή με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος, όπως οι ανορθωτές τόξου υδραργύρου και οι ημιαγωγίμες συσκευές όπως τα θυρίστορ, τα IGCTs και τα διπολικά τρανζίστορ με απομονωμένη πύλη (IGBT). Η αυξανόμενη πρόοδος της τεχνολογίας ημιαγωγών υψηλής τάσης πλήρους ελέγχου έχει σημαντική επίδραση στην ανάπτυξη προηγμένων ηλεκτρονικών ισχύος που χρησιμοποιούνται για τη βέλτιστη λειτουργία και την αποτελεσματική διαχείριση των ηλεκτρικών δικτύων, τα οποία σε πολλές περιπτώσεις είναι πλήρως ή μερικώς απελευθερωμένα. Τα HVDC επιτρέπουν τη μεταφορά ισχύος μεταξύ ασύγχρονων AC συστημάτων μεταφοράς. Καθώς η ροή ισχύος μέσω ενός συνδέσμου HVDC μπορεί να ελεγχθεί ανεξάρτητα από τη γωνία φάσης μεταξύ της πηγής και φορτίου, μπορεί να σταθεροποιήσει το δίκτυο έναντι διαταραχών λόγω των ταχέων μεταβολών στην ισχύ. Τα συστήματα υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος επιτρέπουν επίσης τη μεταφορά ισχύος μεταξύ συστημάτων διαφορετικών συχνοτήτων, π.χ. 50 Hz και 60 Hz. Με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται η σταθερότητα κάθε συστήματος, επιτρέποντας την ανταλλαγή ισχύος μεταξύ ασύμβατων δικτύων. [41]

Τα θυρίστορ απαιτούν σύνδεση με ένα εξωτερικό AC σύστημα στις εφαρμογές HVDC ώστε να τα ενεργοποιούν και να τα απενεργοποιούν. Τα συστήματα αυτά είναι γνωστά και ως συστήματα φυσικής μεταγωγής (line-commutated converter LCC). Οι μετατροπείς φυσικής μεταγωγής έχουν ορισμένους περιορισμούς, λόγω της απαίτησης για κύκλωμα AC που ενεργοποιεί το θυρίστορ. Η ανάπτυξη των IGBTs και των GTOs έκανε τα μικρά HVDC συστήματα πιο οικονομικά. Υπάρχουν αρκετές διαφορετικές εκδοχές της τεχνολογίας VSC. Υπάρχουν εγκαταστάσεις που λειτουργούν με διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM), αλλά οι πιο πρόσφατες εγκαταστάσεις περιλαμβάνουν μετατροπέα πολλών επιπέδων (MMC). Οι μετατροπείς αυτοί έχουν το πλεονέκτημα της μείωσης ή εξάλειψης των φίλτρων αρμονικών. Αυτό είναι σημαντικό αν αναλογιστεί κανείς ότι σε συμβατικά συστήματα AC, τα φίλτρα αρμονικών ενός συνήθους σταθμού φυσικής μεταγωγής καλύπτουν σχεδόν τη μισή έκταση του σταθμού. [42]

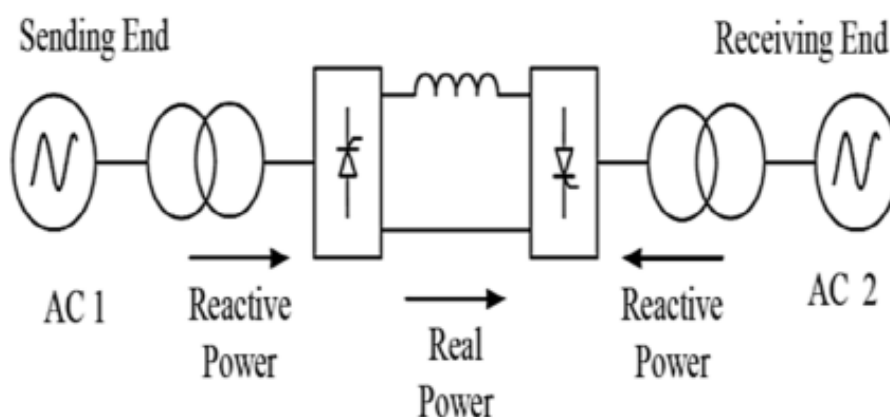
2.2.3 Διαδικασία μετατροπής

Οι εξελίξεις αυτές ευνοούν τόσο τη μεταφορά ισχύος υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος (HVDC) όσο και την τεχνολογία ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς (FACTS). Οι συσκευές ημιαγωγών πλήρους ελέγχου που είναι διαθέσιμες για μετατροπείς υψηλής τάσης υψηλής ισχύος μπορούν να είναι είτε θυρίστορ είτε τρανζίστορ. Μπορούν να

χρησιμοποιηθούν σε μετατροπέα πηγής τάσης (VSC) με διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM), λειτουργώντας σε συχνότητες υψηλότερες από τη συχνότητα της γραμμής. [41]

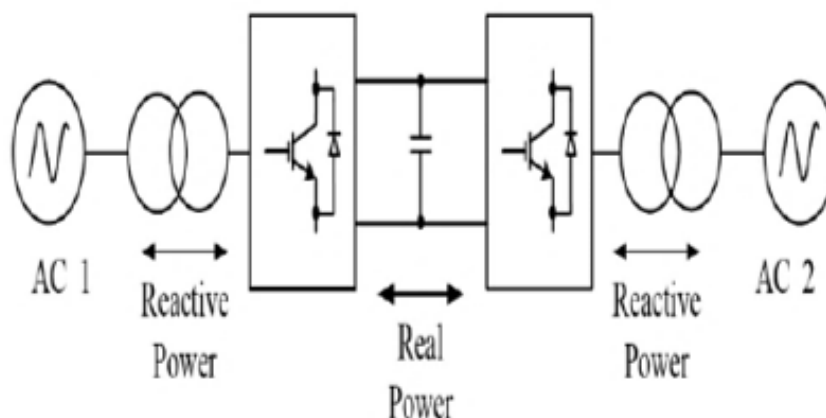
Τα συστήματα HVDC και FACTS είναι σημαντικές τεχνολογίες που υποστηρίζουν τα μοντέρνα συστήματα ισχύος. Σήμερα υπάρχουν περισσότερα από 92 συστήματα HVDC παγκοσμίως, τα οποία μεταφέρουν περισσότερα από 75 GW ισχύος χρησιμοποιώντας δύο διακριτά συστήματα:

- μετατροπείς φυσικής μεταγωγής ή μεταγόμενοι σε γραμμή (LCCs) ή μετατροπείς πηγής ρεύματος (CSCs), τα οποία χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ισχύος σε μακρινές αποστάσεις, όπου δεν είναι εφικτή η χρήση συμβατικών γραμμών AC. Το μεγαλύτερο έργο είναι το σύστημα Itaipu στη Βραζιλία σε επίπεδο ισχύος 6300 MW. [41]



Εικόνα 2.2: Σύστημα HVDC με μετατροπέα πηγής ρεύματος με χρήση θυρίστορ [41]

- μετατροπείς πηγής τάσης (VSCs), τα οποία προς το παρόν αφορούν σε ισχύ της τάξης των 50-2500 MW, καθώς πρόκειται για αρκετά πρόσφατη τεχνολογία. Το μεγαλύτερο έργο είναι το Estlink στα 350 MW.



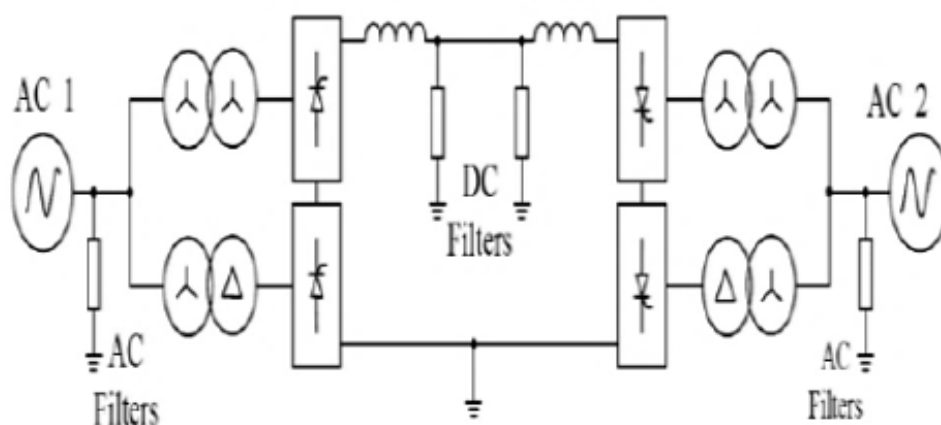
Εικόνα 2.3: Σύστημα HVDC με μετατροπέα πηγής τάσης με χρήση IGBTs [41]

2.2.4 Τοπολογίες HVDC CSC

Ανάλογα με τη λειτουργία και τη θέση των σταθμών μετατροπής, υπάρχουν διάφορες τοπολογίες HVDC.

▪ Σύστημα HVDC Back-to-Back

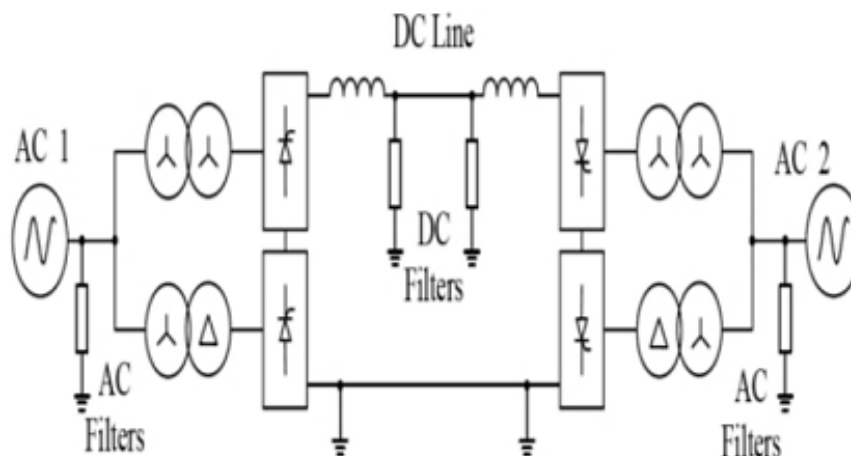
Στην περίπτωση αυτή, δύο μετατροπείς βρίσκονται στην ίδια τοποθεσία και συνήθως στον ίδιο υποσταθμό. Το μήκος της γραμμής DC διατηρείται όσο το δυνατόν μικρότερο και δεν πραγματοποιείται μεταφορά ισχύος με DC γραμμή σε μεγάλη απόσταση. Το σύστημα Back-to-back χρησιμοποιείται για τη σύζευξη ηλεκτρικών δικτύων διαφορετικών συχνοτήτων ή για τη σύζευξη δύο δικτύων με την ίδια ονομαστική συχνότητα, αλλά χωρίς σταθερή σχέση φάσης. Η DC τάση στο ενδιάμεσο σύστημα μπορεί να επιλεγεί ελεύθερα στα συστήματα αυτά λόγω του μικρού μήκους καλωδίου. Συνήθως επιλέγεται όσο το δυνατόν χαμηλότερη ώστε να μειώνεται το πλήθος των θυρίστωρ που συνδέονται σε σειρά σε κάθε ανορθωτή. Για το λόγο αυτό, τα συστήματα Back-to-back λειτουργούν με τις υψηλότερες τιμές ρεύματος, οι οποίες σε ορισμένες περιπτώσεις φτάνουν στα 4500 A. [41, 43]



Εικόνα 2.4: Σύστημα HVDC Back-to-Back με μετατροπείς 12 παλμών [41]

▪ Μονοπολικό σύστημα HVDC

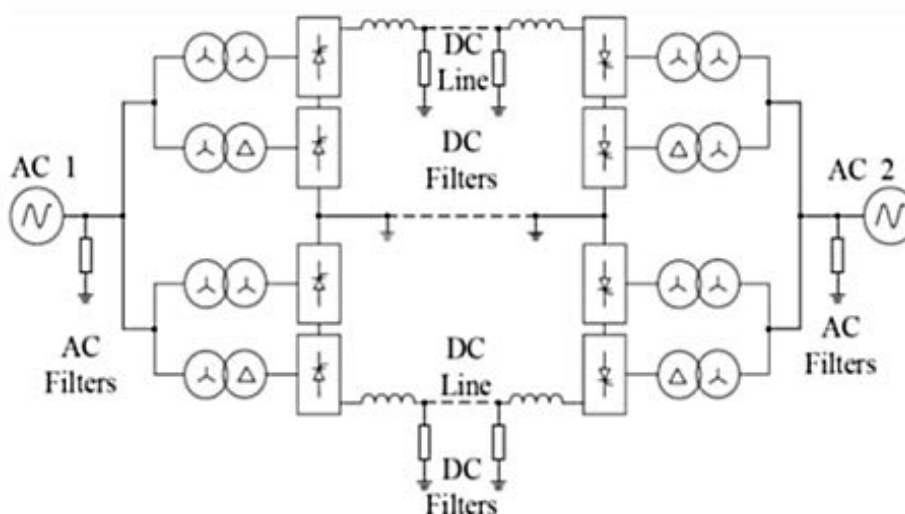
Στη διάταξη αυτή, χρησιμοποιείται μια μόνο γραμμή, η οποία αντιστοιχεί είτε σε θετικό είτε σε αρνητικό δυναμικό. Δύο μετατροπείς που διαχωρίζονται μέσω μιας γραμμής και μια θετική ή αρνητική τάση. Πολλά συστήματα υποθαλάσσιας μεταφοράς είναι μονοπολικά, στα οποία η επιστροφή γίνεται μέσω της γης. [41,43]



Εικόνα 2.5: Μονοπολικό σύστημα HVDC με μετατροπείς 12 παλμών [41]

▪ **Διπολικό σύστημα HVDC**

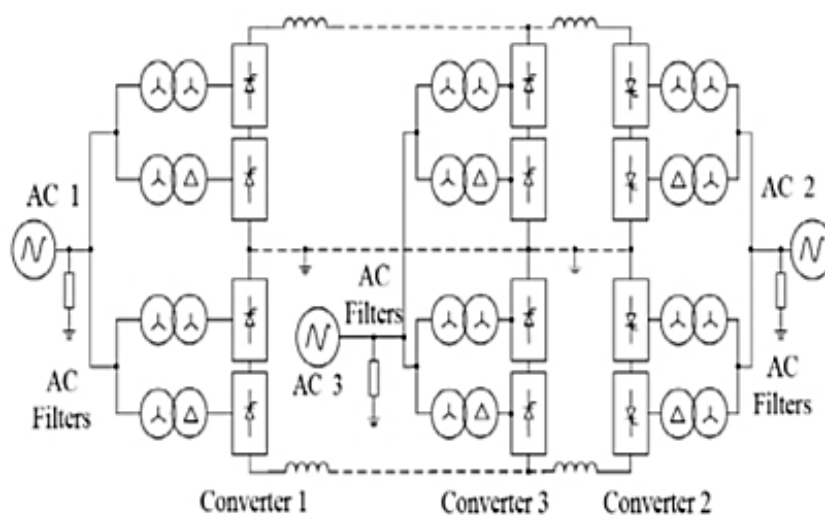
Αυτή είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη διάταξη ενός συστήματος HVDC πηγής ρεύματος σε συστήματα εναέριων γραμμών μεταφοράς ισχύος. Αποτελείται από δύο ιδανικά συμμετρικές γραμμές, μια θετική και μια αρνητική. Στην πραγματικότητα, το διπολικό σύστημα είναι δύο μονοπολικά συστήματα, αλλά με το πλεονέκτημα ότι ο ένας πόλος μπορεί να συνεχίσει να μεταφέρει ισχύ σε περίπτωση που ο άλλος δεν είναι σε λειτουργία για οποιοδήποτε λόγο. Η ισχύς όμως που μπορεί να μεταφερθεί στην περίπτωση αυτή είναι η μισή, όπως θα συμπεριφερόταν και ένα μονοπολικό σύστημα με επιστροφή τη γη. Κάθε σύστημα μπορεί να λειτουργεί ανεξάρτητα με επιστροφή γείωσης. [41,43]



Εικόνα 2.6: Διπολικό σύστημα HVDC με μετατροπέα 12 παλμών ανά πόλο [41]

▪ Πολυτεματικό σύστημα HVDC

Στην τοπολογία αυτή υπάρχουν περισσότερα από δύο σύνολα μετατροπέων και συνεπώς χρησιμοποιείται για τη διασύνδεση περισσότερων από δύο δικτύων. Τέτοιες τοπολογίες προκύπτουν συνήθως από επεκτάσεις υφιστάμενων έργων και οδηγούν σε αρκετά περίπλοκα συστήματα. Στην Εικόνα 2.7 παρουσιάζεται ένα πολυτεματικό σύστημα παράλληλης σύνδεσης, καθώς όλοι οι μετατροπείς είναι συνδεδεμένοι στην ίδια DC τάση, αν αμεληθούν οι πτώσεις τάσεις. [41,43]



Εικόνα 2.7: Πολυτεματικό σύστημα HVDC σε παράλληλη σύνδεση [41]

2.2.5 Βασικές αρχές των συστημάτων HVDC με μετατροπέα πηγής τάσης (VSC)

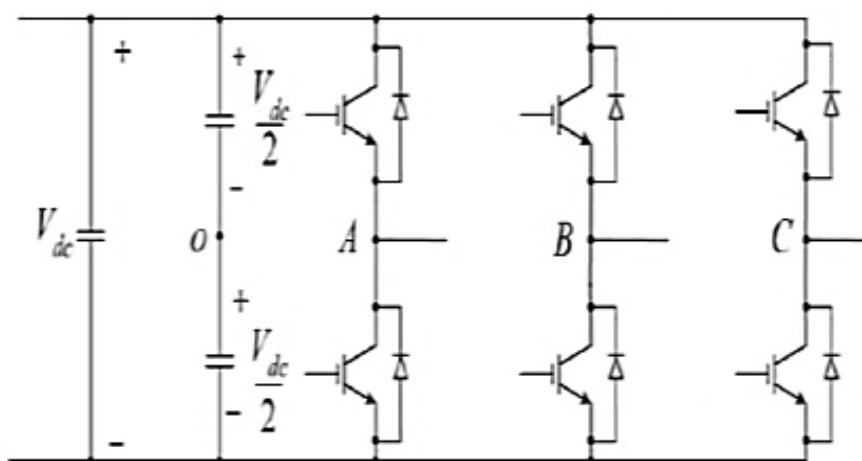
Οι τοπολογίες των συστημάτων αυτών είναι αντίστοιχες με όσες παρουσιάστηκαν παραπάνω, με τη διαφορά ότι χρησιμοποιείται μετατροπέας τάσης σε κάθε πλευρά της γραμμής αντί για δωδεκαπαλμική ανόρθωση. Συνήθως, σε κάθε ημιαγωγό χρησιμοποιούνται πολλές σειρές συνδεδεμένων IGBT, για να είναι εφικτή η υψηλότερη τάση εμπόδισης και συνεπώς η αύξηση του επιπέδου τάσης του διαύλου DC του μετατροπέα και του συστήματος. Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η τεχνολογία αυτή σε σχέση με την τεχνολογία CSC είναι: [41]

- Είναι εφικτός ο ανεξάρτητος έλεγχος ενεργού και άεργου ισχύος και στις δύο πλευρές.
- Είναι δυνατή η λειτουργία των μετατροπέων ακόμη και για πολύ μικρές τιμές μεταφερόμενης ενεργού ισχύος.
- Η αντιστροφή ισχύος μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση του ίδιου συστήματος ελέγχου.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δίκτυα με χαμηλή τάση βραχυκύκλωσης ή σε δίκτυο ευαίσθητο σε μεταβολές συχνότητας, γιατί η αγωγή των IGBTs εξαρτάται από έναν παλμό ελέγχου και όχι από το δίκτυο στο οποίο συνδέεται, όπως το thyristor.

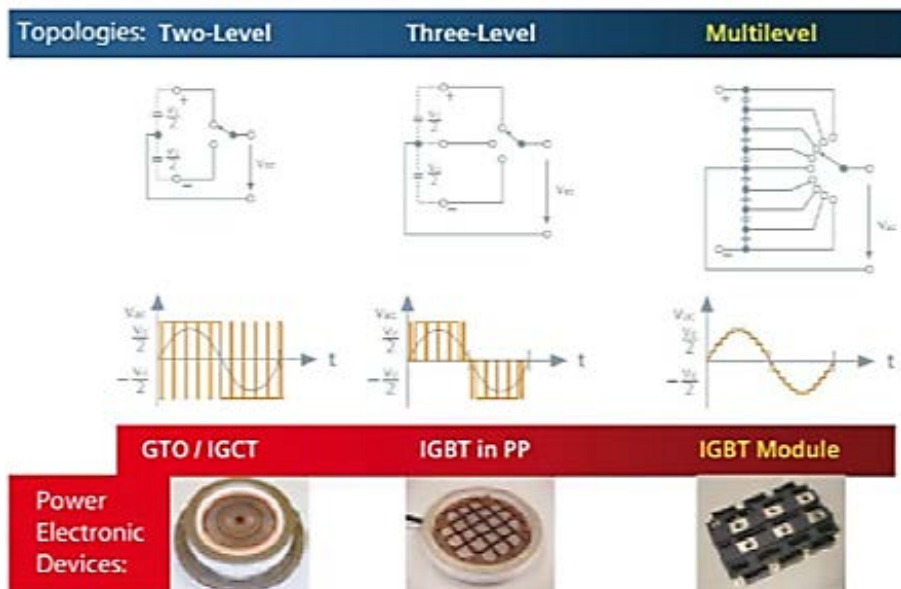
- Ελαχιστοποιούνται οι απώλειες στο AC δίκτυο, καθώς υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου της AC τάσης του δικτύου
- Το δίκτυο μπορεί να λειτουργεί στα ανώτατα όρια τάσης του, λόγω του ταχύτατου και ακριβούς ελέγχου της ενεργού ισχύος που εγχέεται στο δίκτυο.
- Επιτυγχάνει απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων.
- Είναι ταχύτερη η επαναφορά του δικτύου μετά από black-out, μέσω στήριξης της τάσης και της συχνότητας.
- Τα μαγνητικά πεδία που παράγονται είναι στατικά σε σχέση με τα μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία που παράγονται γύρω από έναν αγωγό AC.
- Δεν απαιτείται μετασχηματιστής για τη διαδικασία μετατροπής. [41]

Υπάρχουν πολλές διαφορετικές τοπολογίες VSC κατάλληλες για τη χρήση σε συστήματα HVDC. Οι μετατροπείς πολλών επιπέδων επεκτείνουν το πλεονέκτημα της τεχνολογίας PWM σε χαμηλή και μέτρια ισχύ σε εφαρμογές υψηλής ισχύος. Ο μετατροπέας ελέγχεται συνήθως μέσω ημιτονικής διαμόρφωσης εύρους παλμών (SPWM) και οι αρμονικές συσχετίζονται απευθείας με την ταχύτητα εναλλαγής κάθε μετατροπέα. Περιλαμβάνονται επίσης φίλτρα στην πλευρά AC για να μειωθεί περαιτέρω το αρμονικό περιεχόμενο που εισέρχεται στο σύστημα. [44]

Η πλειοψηφία των εγκατεστημένων γραμμών VSC -HVDC στηρίζεται σε μετατροπείς δύο ή τριών επιπέδων (Εικόνα 2.8). Για να υλοποιηθεί η τοπολογία αυτή χρησιμοποιούνται εκατοντάδες ημιαγωγοί αντοχής κάποιων kV συνδεδεμένοι σε σειρά, οι οποίοι πρέπει να αλλάζουν ταυτόχρονα διακοπτική κατάσταση. Επίσης επειδή τα επίπεδα είναι λίγα, η τάση εξόδου είναι πλούσια σε αρμονικό περιεχόμενο, με αποτέλεσμα να απαιτούνται AC φίλτρα. Για τους λόγους αυτούς υπάρχει η τάση προς τοπολογίες πολλαπλών επιπέδων (Εικόνα 2.9). [44]

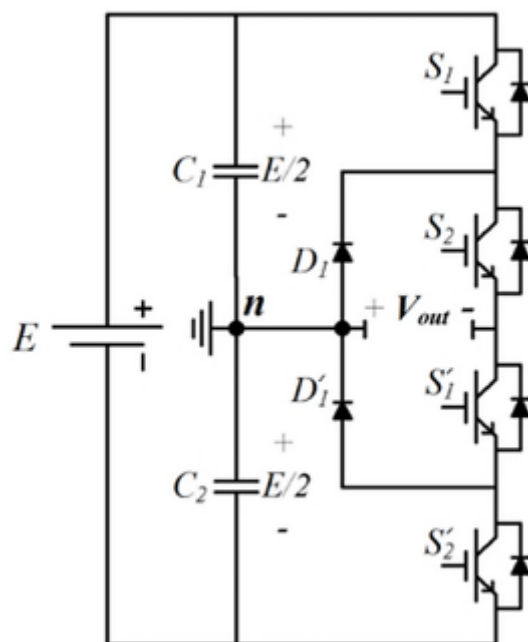


Εικόνα 2.8: Τοπολογία συμβατικού συστήματος VSC δύο επιπέδων τριών φάσεων [41]

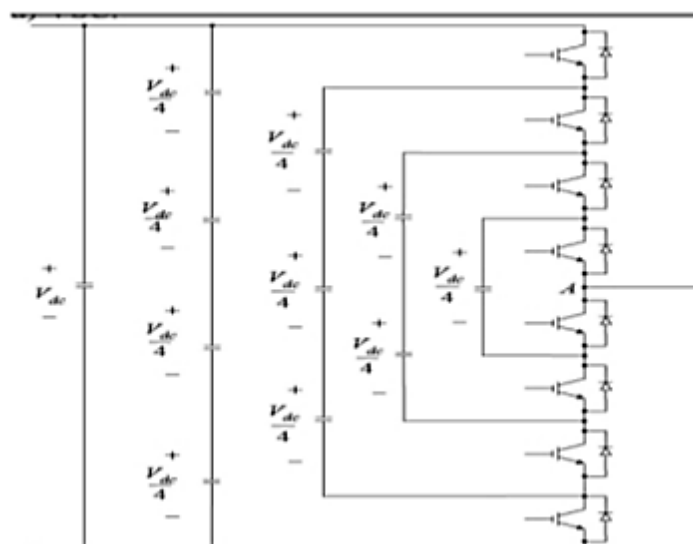


Εικόνα 2.9: Μετάβαση από μετατροπείς δύο και τριών επιπέδων σε μετατροπείς πολλών επιπέδων [44]

Έχουν μελετηθεί διάφορες τοπολογίες πολλαπλών επιπέδων, δύο εκ των οποίων παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.10 και στην Εικόνα 2.11.



Εικόνα 2.10: Αντιστροφείς πολλαπλών επιπέδων με διόδους περιορισμού [45]



Εικόνα 2.11: Αντιστροφείς πολλαπλών επιπέδων με πυκνωτές περιορισμού [41]

Η τεχνολογία VSC-HVDC μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά σε διάφορους τομείς όπως:

- ✓ παροχή ισχύος σε νησιά
- ✓ απομακρυσμένη παραγωγή ισχύος μικρής κλίμακας
- ✓ υπεράκτια παραγωγή ισχύος
- ✓ πολυτεματικά συστήματα

Από άποψη τεχνολογίας, τα αιολικά πάρκα, ακόμη και τα υπεράκτια, είναι κατάλληλα για την εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής. Η τάση DC έχει φτάσει στα 150 kV και το μεγαλύτερο σύστημα είναι 350 MW.

Πίνακας 2.2: Υπάρχοντα συστήματα VSCHVDC [41]

Σύστημα Back-to-back	Eagle pass, Η.Π.Α.
Εφαρμογή αιολικής ενέργειας	Gotland, Σουηδία
Βελτίωση ισχύος	Crosssound link, Η.Π.Α.

Πίνακας 2.3: Σύγκριση των συστημάτων HVAC, CSC HVDC και VSC HVDC ως προς τα χαρακτηριστικά μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [46]

	HVAC	CSC HVDC	VSC HVDC
Μέγιστο επίπεδο τάσης	150 kV εγκατεστημένα Δυνατότητα ως 245 kV	π.χ. NorNed: ±450 kV	±150 kV εγκατεστημένη Δυνατότητα ως ±300 kV
Εγκατάσταση καλωδίων	Πολύπλοκη	Απλή	Απλή
Κόστος εγκατάστασης υποσταθμού	Χαμηλό	Υψηλό	Υψηλότατο

Κόστος εγκατάστασης καλωδίων	Υψηλό	Χαμηλό	Χαμηλό
Ανάγκη αντιστάθμισης	Ναι	Ναι	Όχι
Απώλειες καλωδίων	Υψηλές	Χαμηλές	Χαμηλές
Υπεράκτιες εφαρμογές	Πολλές μικρές	Όχι	1 έργο σε πλατφόρμα εξόρυξης πετρελαίου
Έλεγχος ενεργού ισχύος	Όχι	Ναι	Ναι
Έλεγχος άεργου ισχύος	Όχι	Όχι	Ναι
Διασυνδέσεις Δικτύων	Σύγχρονων	Οποιαδήποτε	Οποιαδήποτε
Αντιστροφή ροής ισχύος	Ταχεία	Αργή	Ταχεία
Δυνατότητα εκκίνησης μετά από blackout	Ναι	Όχι	Ναι, περίπλοκη

2.3 Συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

Οι πρόσφατες εξελίξεις δείχνουν ότι τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αρχίζουν να οδηγούνται σε δίκτυα συνεχούς ρεύματος (DC). Η τάση αυτή ευνοείται από την ταχεία αύξηση των ηλεκτρικών φορτίων και ταυτόχρονα, λόγω της ανάγκης επίτευξης των στόχων για τη διανομή της ενέργειας από Α.Π.Ε. καλύπτοντας τη συνολική ζήτηση. Οι Α.Π.Ε. είτε λειτουργούν με DC είτε έχουν κάποιο DC στοιχείο στην καρδιά της διεπιφάνειας των ηλεκτρονικών ισχύος, ώστε η σύνδεση του τελικού σημείου των ηλεκτρονικών φορτίων, των μπαταριών και των κυψελών καυσίμου να είναι αποκλειστικά DC. Συνεπώς, η ενσωμάτωση των συσκευών αυτών σε DC αρχιτεκτονικές διανομής μέσω των αντίστοιχων μετατροπέων DC-DC αποτελεί ελκυστική επιλογή, όχι μόνο για τη βελτίωση της απόδοσης χάρη στη μείωση των βημάτων μετατροπής, αλλά επίσης και για την ανεξαρτησία της ποιότητας ισχύος από το δίκτυο. Τα συστήματα αυτά συνήθως έχουν καλύτερη αξιοπιστία σε σχέση με τα συστήματα AC καθώς το πλήθος των ενεργών στοιχείων στις ηλεκτρονικές συσκευές ισχύος DC-DC είναι μικρότερο σε σχέση με τους μετατροπείς DC-AC. Πέραν αυτού, ο σχεδιασμός ελέγχου στα DC συστήματα είναι σημαντικά απλούστερος, καθώς δεν υπάρχει άεργος ισχύς και αρμονικές ή προβλήματα συγχρονισμού. [38]

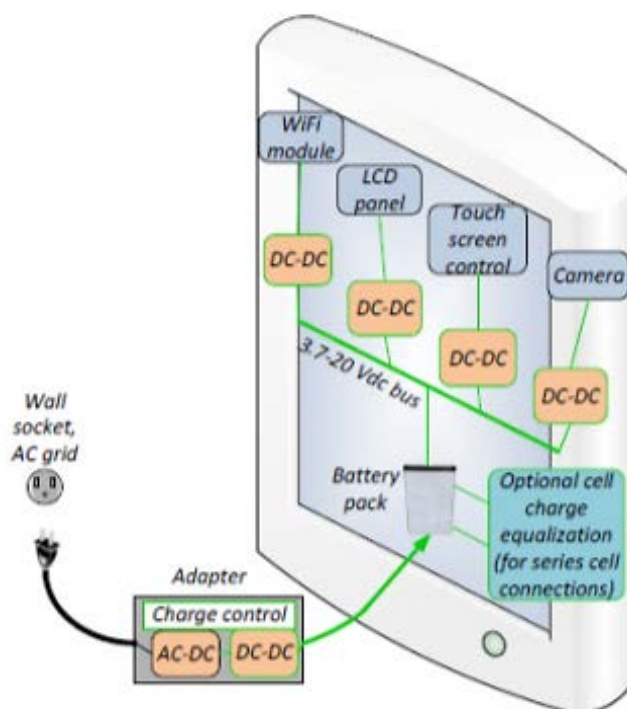
Τα σημερινά ηλεκτρικά συστήματα παροχής ισχύος είναι το αποτέλεσμα της μακρόχρονης τεχνολογικής ανάπτυξης η οποία κατά βάση ξεκίνησε στα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Η κατασκευή του μετασχηματιστή πυροδότησε την ανάπτυξη αυτή διότι έδινε τη δυνατότητα να μετασχηματίζει την AC τάση σε άλλη τιμή και να διατηρεί τις απώλειες σε χαμηλά επίπεδα, ακόμα και όταν η ηλεκτρική ισχύς μεταφερόταν σε μεγάλες αποστάσεις. Ο δρόμος προς τη χρήση του εναλλασσόμενου ρεύματος έναντι του

συνεχούς ευνοήθηκε από τις ανακαλύψεις ορισμένων καινοτόμων συσκευών που βασίζονταν στο εναλλασσόμενο ρεύμα. Το αποτέλεσμα ήταν η ολική αποδοχή του εναλλασσόμενου ρεύματος για τις αρχιτεκτονικές της παραγωγής, της μεταφοράς και της διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Η γρήγορη ανάπτυξη οδήγησε στην εφεύρεση ενός ακόμη τεχνολογικού ορόσημου, του τρανζίστορ, το οποίο έθεσε τις βάσεις για την ανάπτυξη της επιστήμης των υπολογιστών και των τηλεπικοινωνιών. Το τρανζίστορ ευνόησε όμως επίσης το μετασχηματισμό των DC τάσεων, οδηγώντας στην επανάσταση των ηλεκτρονικών ισχύος. Σήμερα, πενήντα χρόνια ύστερα από την εμφάνισή τους, τα ηλεκτρονικά ισχύος αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα των μοντέρνων εφαρμογών, οι οποίες πλέον βοηθούν στην άνθηση των DC εφαρμογών. [38, 49]

Πλέον τα DC συστήματα ισχύος είναι σημαντικά ευκολότερο να αναπτυχθούν χάρη στην τεχνολογία ημιαγωγών και τη συνεχή ανάπτυξη των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος. Επιπλέον, υπάρχουν αρκετοί ακόμη λόγοι που ευνοούν την ανάπτυξη των DC συστημάτων, οι οποίοι μπορούν να ενταχθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες: λόγοι που σχετίζονται με τα φορτία, με τις πηγές και με τα στοιχεία αποθήκευσης. [49]

2.3.1 Φορτία DC

Πολλά από τα σημερινά φορτία κατανάλωσης απαιτούν DC παροχή. Οι περισσότερες οικιακές και επαγγελματικές συσκευές, όπως οι σταθεροί υπολογιστές, τα laptops, οι συσκευές tablet, το τηλέφωνο, ο φούρνος μικροκυμάτων και οι συσκευές φωτισμού καταναλώνουν ηλεκτρισμό σε DC μορφή [47]. Οι νέες αποδοτικότερες τεχνολογίες όπως οι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού και οι λάμπες στερεάς κατάστασης περιλαμβάνουν ένα DC στάδιο και συνεπώς είναι αποτελεσματικότερο να χρησιμοποιούνται σε DC συστήματα διανομής [48]. Τα DC συστήματα ισχύος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τους κινητήρες μεταβλητής ταχύτητας αντλιών, συστημάτων HVAC, ανελκυστήρων και συστημάτων έλξης.



Εικόνα 2.12: Σχεδιάγραμμα ενός συνήθους smartphone [38]

Επιπλέον, σε βιομηχανικές εφαρμογές όπως στη βιομηχανία χάλυβα χρησιμοποιούνται περισσότεροι DC ηλεκτρικοί κάμινοι τήξης, διότι καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια από τους αντίστοιχους AC και προκαλούν μικρότερη διακύμανση τάσης [50]. Στην ηλεκτροχημική βιομηχανία οι περισσότερες εφαρμογές είναι καθαρά εφαρμογές συνεχούς ρεύματος [51]. Η κάλυψη των φορτίων αυτών μέσω των κυρίαρχων AC συστημάτων διανομής προσθέτει επιπλέον βαθμίδες μετατροπής, πράγμα το οποίο είναι μη αποδοτικό. Σύμφωνα με τον Reed (2012) [52], περίπου το 30% της AC ενέργειας που παράγεται διέρχεται μέσω ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος προτού χρησιμοποιηθεί. Το ποσό της ενέργειας που χάνεται είναι συνήθως 10-25%. Σε άλλη μελέτη [53] αναφέρεται ότι η απόδοση της μετατροπής ισχύος μπορεί να αυξηθεί ως 8% αν χρησιμοποιηθεί DC ζυγός και μπορεί να προκύψει εξοικονόμηση γύρω στο 25% αν εξαλειφθεί μια βαθμίδα ανόρθωσης.

2.3.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Η χρήση Α.Π.Ε. ευνοείται παγκοσμίως λόγω των περιβαλλοντικών και των οικονομικών συνθηκών. Ορισμένες από αυτές, όπως τα φωτοβολταϊκά και οι κυψέλες καυσίμου είναι εγγενώς DC. Στην περίπτωση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών, οι οποίες συνδέονται στο δίκτυο AC μέσω ενός DCστοιχείου [54], η μετατροπή του συστήματος διανομής σε DC μπορεί να εξαλείψει μια βαθμίδα μετατροπής και συνεπώς να οδηγήσει σε αύξηση της απόδοσης.

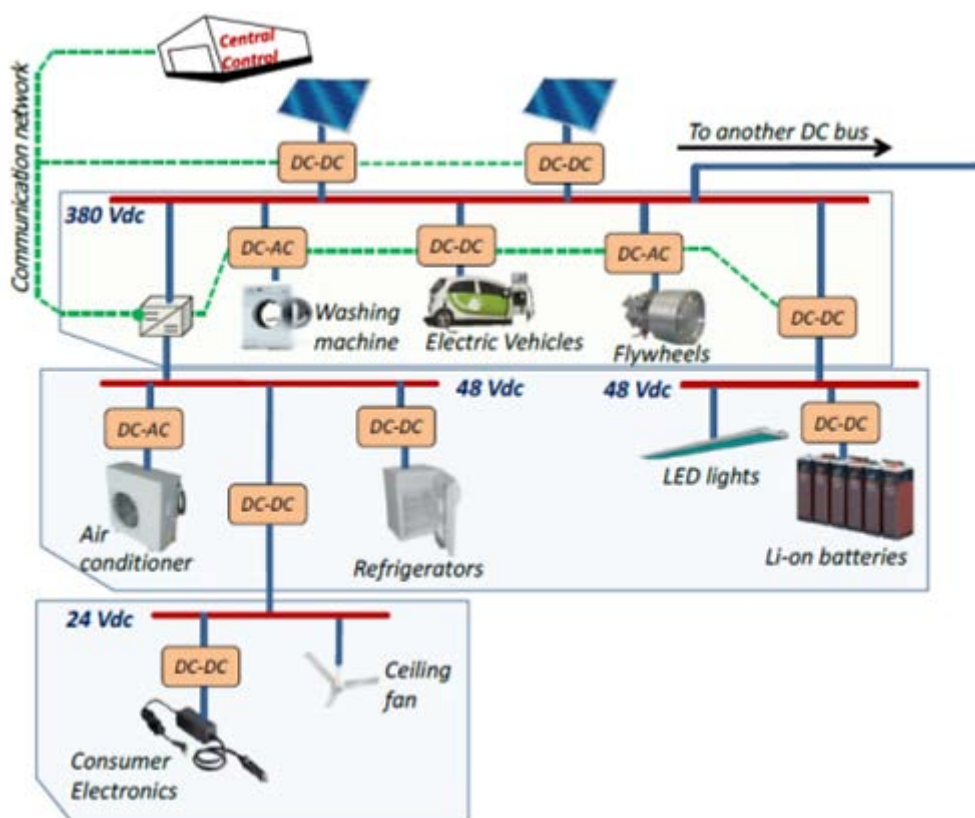
2.3.3 Αποθήκευση

Ένας ακόμη παράγοντας που δίνει ώθηση στα DC δίκτυα είναι τα μικροδίκτυα. Τα μικροδίκτυα είναι τοπικά ενεργειακά δίκτυα που περιλαμβάνουν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και συστήματα αποθήκευσης. Έχουν τη δυνατότητα τοπικού ελέγχου και συνεπώς μπορούν να αποσυνδέονται από το δίκτυο όταν υπάρχει black-out ή σφάλμα στο κύριο δίκτυο και να συνεχίσουν να υποστηρίζουν ένα μέρος των τοπικών φορτίων. Στις Η.Π.Α. έχουν επενδυθεί εκατομμύρια δολάρια για τη διεύθυνση των μικροδικτύων, ως τρόπος προσαρμογής έναντι φυσικών καταστροφών, ειδικά μετά τον τυφώνα Sandy. Επειδή τα συστήματα αυτά περιλαμβάνουν συνήθως Α.Π.Ε. και μπαταρίες, τα DC μικροδίκτυα μπορούν να αυξήσουν τη συνολική απόδοση του συστήματος [55]. Πολλοί ερευνητές έχουν αποδείξει ότι τα DC μικροδίκτυα παίζουν σημαντικό ρόλο στην επίλυση λειτουργικών προβλημάτων του βασικού δικτύου [56].

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των DC μικροδικτύων είναι η δυνατότητά τους να ενσωματώνουν στατική αποθήκευση. Τα περισσότερα στοιχεία αποθήκευσης είναι αμιγώς DC, όπως οι μπαταρίες και οι πυκνωτές. Επιπλέον, οι σφόνδυλοι, παρόλο που αποθηκεύουν μηχανική ενέργεια, είναι συνήθως συζευγμένοι με μια σύγχρονη μηχανή μόνιμων μαγνητών που ενσωματώνεται στο σύστημα διανομής μέσω ενός DC συνδέσμου [57]. Σύμφωνα με μελέτη που διεξήχθη από την ιαπωνική εταιρία τηλεπικοινωνιών NTT σχετικά με την αξιοπιστία ενός AC συστήματος αδιάλειπτης παροχής (UPS) και ενός DC ως προς τη διαθεσιμότητά τους, προέκυψε ότι η αξιοπιστία της DC παροχής ήταν υψηλότερη. [58]

2.4 DC μικροδίκτυα

Ως μικροδίκτυο (microgrid) ορίζεται ένα υποσύστημα του κυρίως δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο είναι συνδεδεμένο με το δίκτυο διανομής και περιλαμβάνει μικρές μονάδες παραγωγής, στοιχεία αποθήκευσης ενέργειας και φορτία. Τα μικροδίκτυα μπορούν να λειτουργήσουν είτε σε σύνδεση με το δημόσιο δίκτυο, είτε αυτόνομα, όπως τα συστήματα ισχύος των νησιωτικών μονάδων. [36]



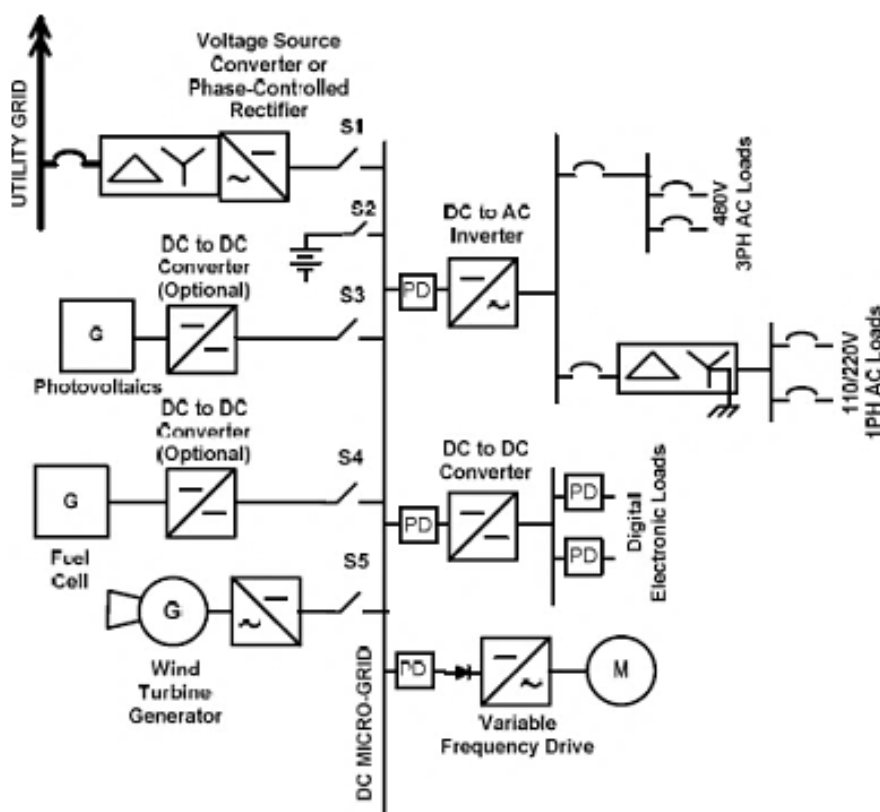
Εικόνα 2.13: Σχηματική αναπαράσταση της βασικής δομής και των μερών ενός μικροδικτύου [38]

Οι εγκαταστάσεις μικροδικτύων αυξάνονται συνεχώς σε παγκόσμια κλίμακα, αποτελώντας μία αποδοτική λύση σε προβλήματα όπως το φαινόμενο του θερμοκηπίου, η αύξηση της ενεργειακής ζήτησης και η εξάντληση των ενεργειακών αποθεμάτων, καθώς προωθούν τη χρήση ανανεώσιμων πηγών και συστημάτων διεσπαρμένης παραγωγής. Πρακτικά, οι εφαρμογές μικροδικτύων αυτή τη στιγμή αφορούν συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Ωστόσο, τα μικροδίκτυα συνεχούς ρεύματος (DC) παρέχουν τη δυνατότητα διανομής ισχύος υψηλής ποιότητας με περισσότερο αποτελεσματικό τρόπο τόσο σε οικιστικές περιοχές (αστικές ή αγροτικές), όσο και σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις. [38]

Με την υιοθέτηση των DC μικροδικτύων είναι εφικτή η χρήση διεσπαρμένων πηγών ενέργειας σε παγκόσμια κλίμακα και σε πολλαπλά επίπεδα διανομής ισχύος, ενώ παράλληλα θα αυξηθεί η αποτελεσματικότητα με την οποία οι ΑΠΕ όπως τα φωτοβολταϊκά συστήματα, οι κυψέλες καυσίμου και η αιολική ενέργεια θα μπορούν να παρέχουν συσσωρευμένη ισχύ σε μια ομάδα φορτίων. Η δυνατότητα σύνδεσης φορτίων και πηγών σε έναν κοινό DC ζυγό συνεπάγεται την αποφυγή περιττών σταδίων μετατροπής ενέργειας, με αποτέλεσμα μικρότερες απώλειες θερμότητας και δυνητικά χαμηλότερο κόστος, σε σύγκριση με AC εφαρμογές διεσπαρμένων πηγών ενέργειας. Είναι σημαντική η έρευνα γύρω από το ζήτημα της προστασίας τέτοιων μικροδικτύων, οι οποίες τα τελευταία χρόνια παρουσιάζουν έντονη δραστηριότητα. [56, 59]

Στην ακόλουθη Εικόνα 2.14 παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική της δομής ενός DC μικροδικτύου, όπου όλες οι πηγές και τα φορτία είναι συνδεδεμένα σε έναν DC ζυγό ή

ένα DC μικροδίκτυο. Τα μέσα προστασίας του συστήματος αναπαρίστανται παρόμοια με τα αντίστοιχα ενός AC δικτύου, με μοναδική εξαίρεση το τμήμα “PD”, που αφορά τις συσκευές προστασίας (*Protective Devices*), μιας και στο σημείο αυτό δεν υπάρχουν απλοί διακόπτες ισχύος, όπως στο AC δίκτυο. [60]



Εικόνα 2.14: Σχηματική αναπαράσταση της αρχιτεκτονικής ενός DC μικροδικτύου [60]

Τα DC μικροδίκτυα μπορούν να θεωρηθούν μετεξέλιξη της ιδέας των πολυτερματικών DC (multiterminal - MTDC) συστημάτων που προτάθηκαν αρχικά ως υποσταθμίοι διεσπαρμένης παραγωγής για μεταφορά ισχύος υψηλής τάσης και συνεχούς ρεύματος (HVDC) [59]. Το πρωταρχικό σκέλος της έρευνας ήταν απόρροια του έντονου ενδιαφέροντος που εκδηλώθηκε στις αρχές της δεκαετίας του '90 γύρω από την εκμετάλλευση της υπεραγωγιμότητας υψηλής θερμοκρασίας για την HVDC μεταφορά, αλλά και για τη λεγόμενη υπεραγωγίμη μαγνητική αποθήκευση ενέργειας (SMES) στα δίκτυα χαμηλής τάσης και συνεχούς ρεύματος (LVDC). [61]

Η ιδέα ότι τα LVDC μικροδίκτυα θα μπορούσαν να αποτελέσουν ελκυστική επιλογή για κατοικίες, επιχειρήσεις, νοσοκομειακές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις, συνέπεσε με την τάση για στροφή στα DC τροφοδοτούμενα φορτία στις αρχές της δεκαετίας του '90, αλλά και με την εμφάνιση της ανάγκης για ανεύρεση αποτελεσματικών μεθόδων παροχής επιπρόσθετης υποστήριξης των ευαίσθητων φορτίων με μπαταρίες [59]. Επίσης η δημοτικότητα των εν λόγω μικροδικτύων οδήγησε σε τάση για εκτεταμένη χρήση κυψελών καυσίμου και φωτοβολταϊκών σε κτήρια και εγκαταστάσεις περί τα τέλη της ίδιας δεκαετίας. [61]

Εξάλλου, τα τέλη της δεκαετίας του '90 σηματοδότησαν μια επανέναρξη των ερευνών σχετικά με τα MTDC συστήματα —όπου η ισχύς προέρχεται από περισσότερες από μία ανεξάρτητες πηγές και διανέμεται σε πληθώρα φορτίων από έναν DC ζυγό— συμπεριλαμβάνοντας εφαρμογές σε αστικές περιοχές μεγαλουπόλεων, πάρκα, ανεμογεννήτριες σε νησιωτικές περιοχές, βιομηχανικά συστήματα και συγκροτήματα γραφείων. [61]

2.4.1 Πλεονεκτήματα των DC Μικροδικτύων σε σχέση με τα AC

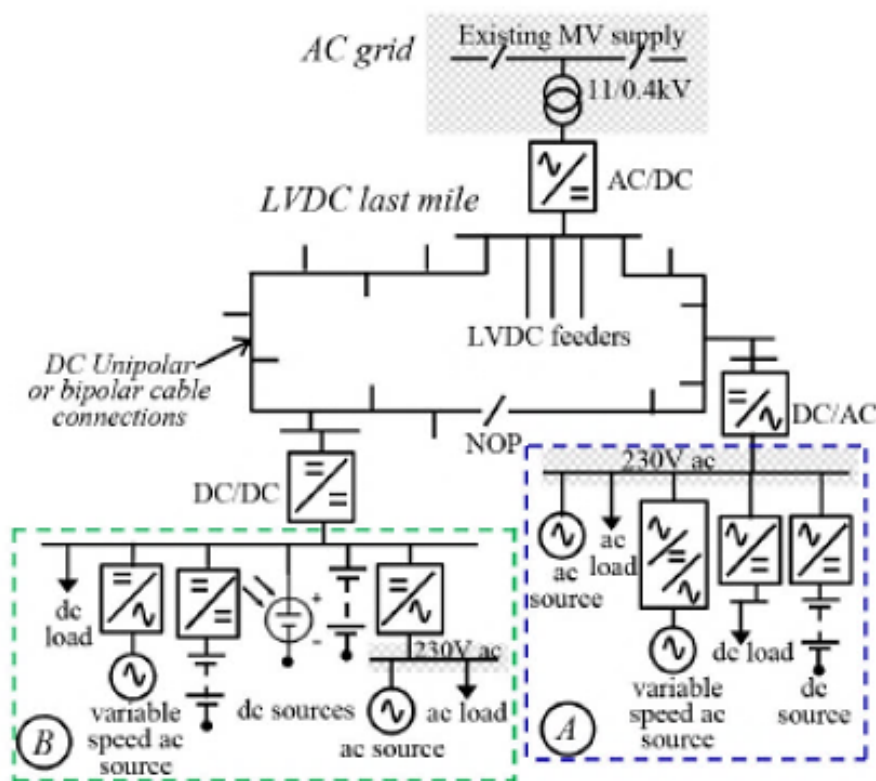
Στην παρούσα ενότητα θα αναφερθούν τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα που θα έχει η υιοθέτηση των DC μικροδικτύων και γενικότερα των DC συστημάτων διανομής χαμηλής τάσης (LVDC networks).

Αρχικά πρέπει να αναφερθεί ότι το πρότυπο 2006/95/EC της Ευρωπαϊκής Ένωσης επιτρέπει τη χρήση υψηλότερων τάσεων στα DC συστήματα διανομής, σε σχέση με τα AC. Συγκεκριμένα, το όριο για τα DC δίκτυα είναι το 1,5kV, ενώ για τα AC το όριο είναι στο 1kV, γεγονός που επιτρέπει την παροχή μεγαλύτερης ισχύος. (Directive 2006/95/EC) Σχετικές μελέτες στο αντικείμενο έχουν δείξει ότι με την ίδια πτώση τάσης και τα ίδια καλώδια όπως σε ένα τριφασικό AC σύστημα, ένα LVDC δίκτυο του 1,5kV είναι σε θέση να μεταφέρει έως και 16 φορές περισσότερη ισχύ σε σχέση με ένα AC σύστημα των 0,4kV. Επίσης, στα DC συστήματα οι αυτεπαγωγές έχουν περιορισμένη επίδραση στις τάσεις υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας και επομένως η άεργος συνιστώσα που εισάγει απώλειες είναι αμελητέα. Επιπλέον, το λεγόμενο *skin effect* που αυξάνει την αντίσταση των καλωδίων στα AC δίκτυα δεν επηρεάζει τα DC καλώδια. [62] Πιο αναλυτικά λοιπόν έχουμε:

✓ Παροχή μεγαλύτερης ισχύος και βελτίωση της συνολικής απόδοσης

Με τη χρήση των LVDC δικτύων και με τις υψηλότερες τάσεις που υιοθετούν είναι δυνατό να μειωθούν οι θερμικές απώλειες και οι πτώσεις τάσης στα καλώδια χαμηλής, επιτρέποντας έτσι τη διανομή μεγαλύτερης ισχύος, με υψηλότερη αποδοτικότητα. Αυτό με τη σειρά του αυξάνει την πιθανότητα επέκτασης ενός υπάρχοντος συστήματος ώστε να τροφοδοτείται ένα μεγαλύτερο φορτίο, χωρίς να επιβληθούν μετατροπές στον μετασχηματιστή MT/XT ή να προστεθούν νέα καλώδια. Σημειώνεται ότι το παραπάνω είναι ιδιαίτερα σημαντικό στην περίπτωση των αγροτικών δικτύων, όπου απαιτούνται καλώδια μεγαλύτερου μήκους για την τροφοδοσία των φορτίων και η αποδοτικότητα αποτελεί σημαντικό παράγοντα. Πρόσφατες έρευνες, σε υπό δοκιμή δίκτυα στην Φινλανδία, έδειξαν ότι σε καλώδια με μήκος μεγαλύτερο του ενός χιλιομέτρου, η διαφορά των DC δικτύων στην αποδοτικότητα είναι αξιοσημείωτη [56]. Τα LVDC δίκτυα έχουν επίσης τη δυναμική να παράσχουν μεγαλύτερη ισχύ σε αστικά δίκτυα, προκειμένου να ανταποκριθούν καλύτερα στη ζήτηση σε περιοχές με υψηλή πυκνότητα

φορτίων. Παράλληλα, σε αστικό επίπεδο τα επίπεδα σφαλμάτων των μετασχηματιστών είναι χαμηλότερα σε σχέση με τα AC δίκτυα. [56]



Εικόνα 2.15: Συνδυασμένη χρήση AC και DC τοπολογιών [56]

✓ Δυνατότητα σύνδεσης ΑΠΕ και φορτίων συνεχούς ρεύματος

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των DC μικροδικτύων σχετίζεται με την μείωση του συνολικού αριθμού των απαιτούμενων μετασχηματιστών. Η πλειονότητα των αποκεντρωμένων διατάξεων παράγει/καταναλώνει DC τάση, ή απαιτεί την παρεμβολή ενός ενδιάμεσου DC σταδίου. Οι διατάξεις αυτές μπορούν να συνδεθούν είτε απευθείας, είτε με μετασχηματιστές DC/DC στα LVDC δίκτυα, με αποτέλεσμα οι απώλειες ενέργειας, που για έναν μετασχηματιστή DC/AC κυμαίνονται στο 7%-15%, να έχουν αισθητή μείωση. Η διασύνδεση πολλαπλών παράλληλων πηγών καθίσταται επίσης ευκολότερη στα DC δίκτυα σε σχέση με τα AC, καθώς δεν απαιτείται συγχρονισμός συχνοτήτων. Ο παραλληλισμός των πηγών επιτρέπει μια ισχυρότερη και περισσότερο αποκεντρωμένη προσέγγιση στη διαχείριση, καθώς επίσης και βελτιωμένη ικανότητα λειτουργίας σε χαμηλότερη τάση, σε περιπτώσεις αποσυνδέσεων πηγών ενέργειας. Επιπλέον, ένα DC δίκτυο χαμηλής τάσης προτείνεται και στην περίπτωση διασύνδεσης μεγάλου αριθμού DC φορτίων, αφού αποφεύγεται η χρήση μετασχηματιστών από τα 230V AC σε DC με επακόλουθο τη μείωση του κόστους αλλά και τις χαμηλότερες απώλειες. [60,62]

Οι μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται στους υποδοχείς ηλεκτρονικού εξοπλισμού μπορεί να συνεπάγονται σημαντικές απώλειες σε λειτουργία αναμονής (stand-by). Ενδεικτικό είναι ότι, σύμφωνα με την IEA (International Energy Agency), η συνολική εσωτερική κατανάλωση του ηλεκτρονικού εξοπλισμού σε λειτουργία αναμονής στην Ευρώπη εκτιμάται ότι υπερβαίνει τις 36 TWh κάθε χρόνο. [36]

✓ Χαμηλότερο κόστος συστήματος

Το κόστος αυτών των συστημάτων είναι εξίσου σημαντικός παράγοντας με το τεχνικό σκέλος, έτσι ώστε να υπάρχει και η κατάλληλη βάση για επένδυση και υιοθέτησή τους. Έτσι με τη μείωση του απαραίτητου αριθμού των μετατροπέων, μειώνεται αναλογικά και το κόστος του συστήματος. Επίσης, σημαντική βελτίωση υπάρχει και στις απώλειες και στη δυνατότητα χρήσης υψηλότερων τάσεων στις εφαρμογές LVDC, οπότε είναι δυνατή και η χρήση μικρότερων καλωδίων έως και 20%, με τα ανάλογα οικονομικά οφέλη. Σε γενικές γραμμές βέβαια, ο χρόνος ζωής των ηλεκτρονικών συσκευών μετατροπής είναι βραχύτερος σε σχέση με τους παραδοσιακούς μετασχηματιστές. Παρόλα αυτά, τα LVDC συστήματα έχουν ήδη αποδείξει τα πλεονεκτήματά τους σε σχέση με άλλες υπάρχουσες εφαρμογές. [63]

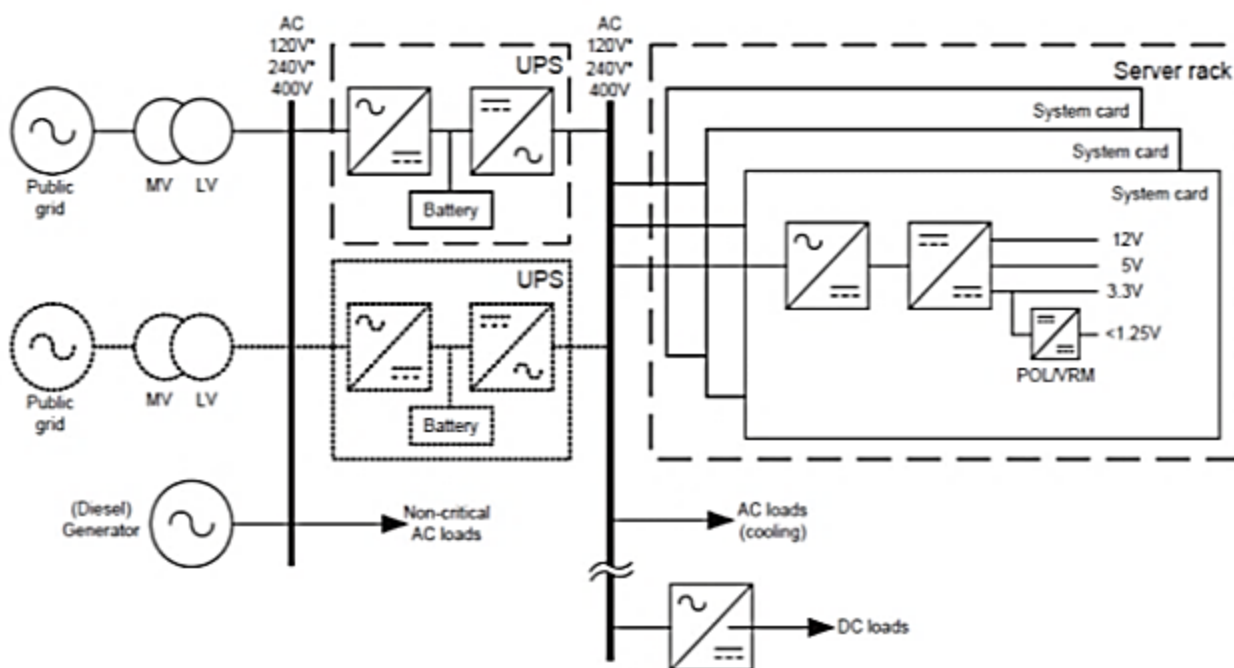
Από στοιχεία πρόσφατων ερευνών (EPRI - Electric Power Research Institute) διαπιστώθηκε ότι η χρησιμοποίηση LVDC των 380V για τη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας σε κέντρα δεδομένων μικρού ή μεσαίου μεγέθους αύξησε την αποδοτικότητα έως και 15%, με 36% χαμηλότερο κόστος. Επίσης, σύμφωνα με την γνωστή εταιρία ABB, το DC δίκτυο (1MW, 380V) που δημιουργήθηκε το 2012 για την τροφοδότηση ενός κέντρου δεδομένων μεσαίου μεγέθους είχε 10% λιγότερο κόστος σε σχέση με το προηγούμενο AC δίκτυο. [36]

2.4.2 Σχεδιασμός DC συστημάτων διανομής

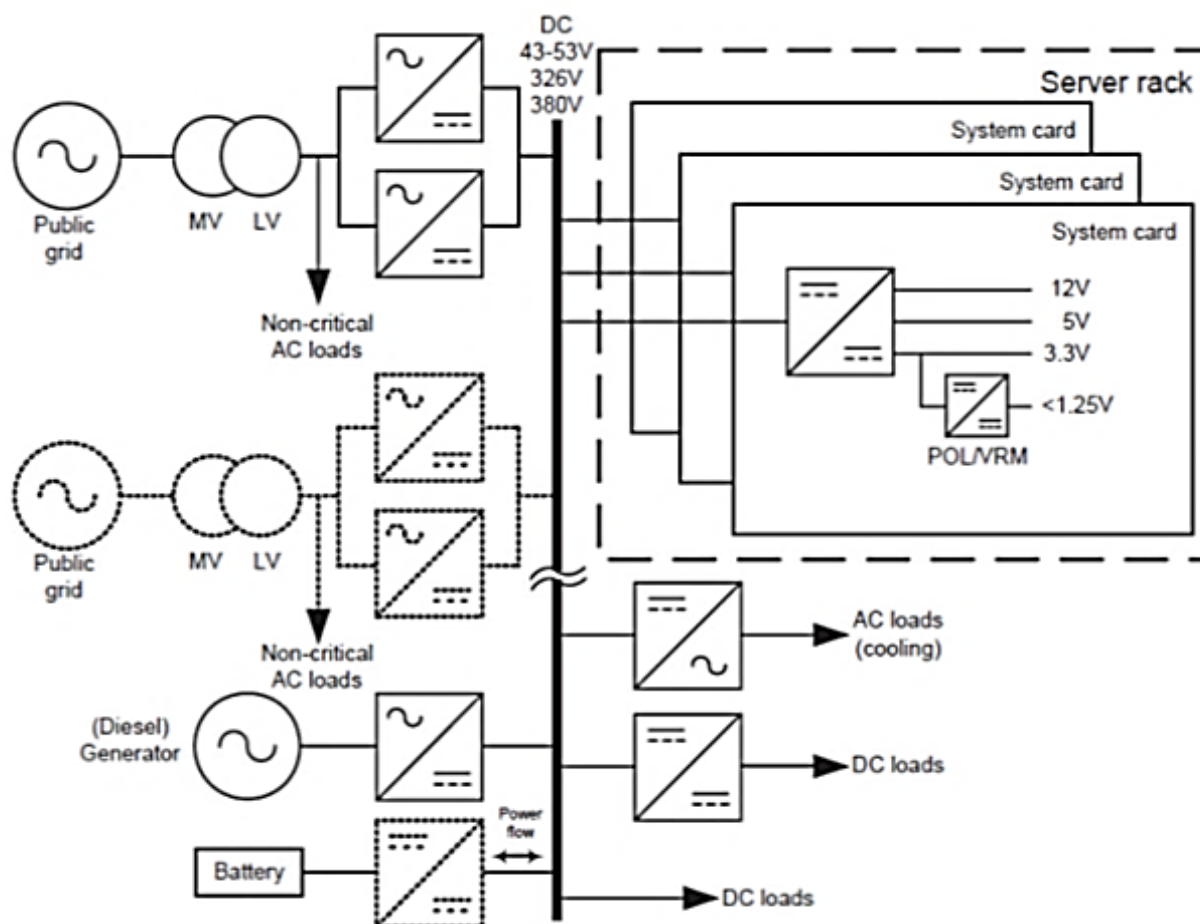
Η εφαρμογή των DC αρχιτεκτονικών διανομής έχουν προταθεί ως μια αποτελεσματική μέθοδος διανομής ισχύος σε ένα κέντρο δεδομένων. Η ιδέα αυτή προέκυψε λόγω της απουσίας έργου ισχύος, της δυνατότητας αποδοτικής ενσωμάτωσης μικρών, διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής, π.χ. φωτοβολταϊκών συστοιχιών και κυψελών καυσίμου και του γεγονότος ότι όλα τα φορτία λειτουργούν στην ίδια χαμηλή DC τάση. Στα AC συστήματα, οι μετασχηματιστές μπορούν εύκολα να αυξήσουν την τάση AC, επιτρέποντας τη μεταφορά ισχύος μέσω των καλωδίων σε μεγάλες αποστάσεις με πολύ μικρές απώλειες. Με μια DC τάση, αυτό δεν είναι εύκολο να επιτευχθεί και υπάρχουν σημαντικές απώλειες κατά τη διάρκεια της μεταφοράς [64]. Όμως, η τεχνολογία DC έχει αναπτυχθεί σημαντικά, ειδικά στις χαμηλές τάσεις (<50 V) και στο εύρος των βιομηχανικών τάσεων (μέχρι 1000 V). Οι τάσεις μπορούν να ρυθμιστούν με ολοκληρωμένα ηλεκτρονικά κυκλώματα και τα ηλεκτρονικά ισχύος για συνεχές ρεύμα κάνουν δυνατό τον αποτελεσματικό και ακριβή έλεγχο της ηλεκτρικής ισχύος. [64]

Κατά το σχεδιασμό ενός DC συστήματος διανομής πρέπει να λαμβάνονται υπόψη διάφοροι παράγοντες, ιδίως αν ο εξοπλισμός που θα χρησιμοποιηθεί έχει αρχικά σχεδιαστεί για εναλλασσόμενο ρεύμα. Μια βασική απαίτηση είναι να ληφθούν απλοποιημένα μοντέλα που εκφράζουν τη συμπεριφορά του φορτίου σε DC λειτουργία. Σχετικά με τη διάταξη των καλωδίων, διάφοροι ερευνητές [67] συνέκριναν διαφορετικές διατάξεις καλωδίων, και συμπέραναν ότι μια εγκατάσταση πέντε DC καλωδίων είναι ελαφρώς καλύτερη από μια AC, ενώ μια διάταξη τριών DC καλωδίων είναι ανώτερη μιας AC ως προς τη δυνατότητα μεταφοράς ισχύος. Έλεγξαν επίσης ορισμένα συνήθη φορτία με DC παροχή και συμπέραναν ότι κατά την τροφοδοσία τους με DC τάση το φορτίο δεν επηρεαζόταν από τις διακυμάνσεις της τάσης. Οι συνολικές απώλειες του συστήματος μειώνονται όταν χρησιμοποιείται DC σύστημα και ότι το DC σύστημα οδηγεί σε καλύτερη χρησιμοποίηση των μετασχηματιστών υψηλής/ μέσης τάσης, επιτρέποντας μια αύξηση ζήτησης χωρίς αλλαγή του μετασχηματιστή. [48]

Η αλλαγή από την αρχιτεκτονική διανομής του AC συστήματος (Εικόνα 2.16) σε DC (Εικόνα 2.17), γίνεται μέσω της αντικατάστασης του AC ζυγού διανομής με ισοδύναμο DC ζυγό διανομής, αφαιρώντας δύο από τις τρεις διαδοχικές βαθμίδες μετατροπής ισχύος AC-DC/DC-AC. Η εφεδρεία παρέχεται μέσω μιας δευτερεύουσας AC τροφοδοσίας, αλλά τώρα περιλαμβάνει επίσης ένα παράλληλο μετατροπέα AC-DC για την τροφοδοσία του DC ζυγού διανομής καθώς και έναν μετατροπέα AC-DC για τη σύνδεση της επιτόπιας παροχής ισχύος (ντιζελογεννήτρια) στο DC σύστημα. Τώρα απαιτείται μια μόνο βαθμίδα μετατροπής από AC σε DC ή αντιστρόφως για την τροφοδοσία του συστήματος. Για AC φορτία, όπως η ψύξη, απαιτείται ένας πρόσθετος αντιστροφέας DC-AC, ο οποίος αυξάνει το πλήθος των βαθμίδων μετατροπής σε δύο, για το φορτίο αυτό. [66]



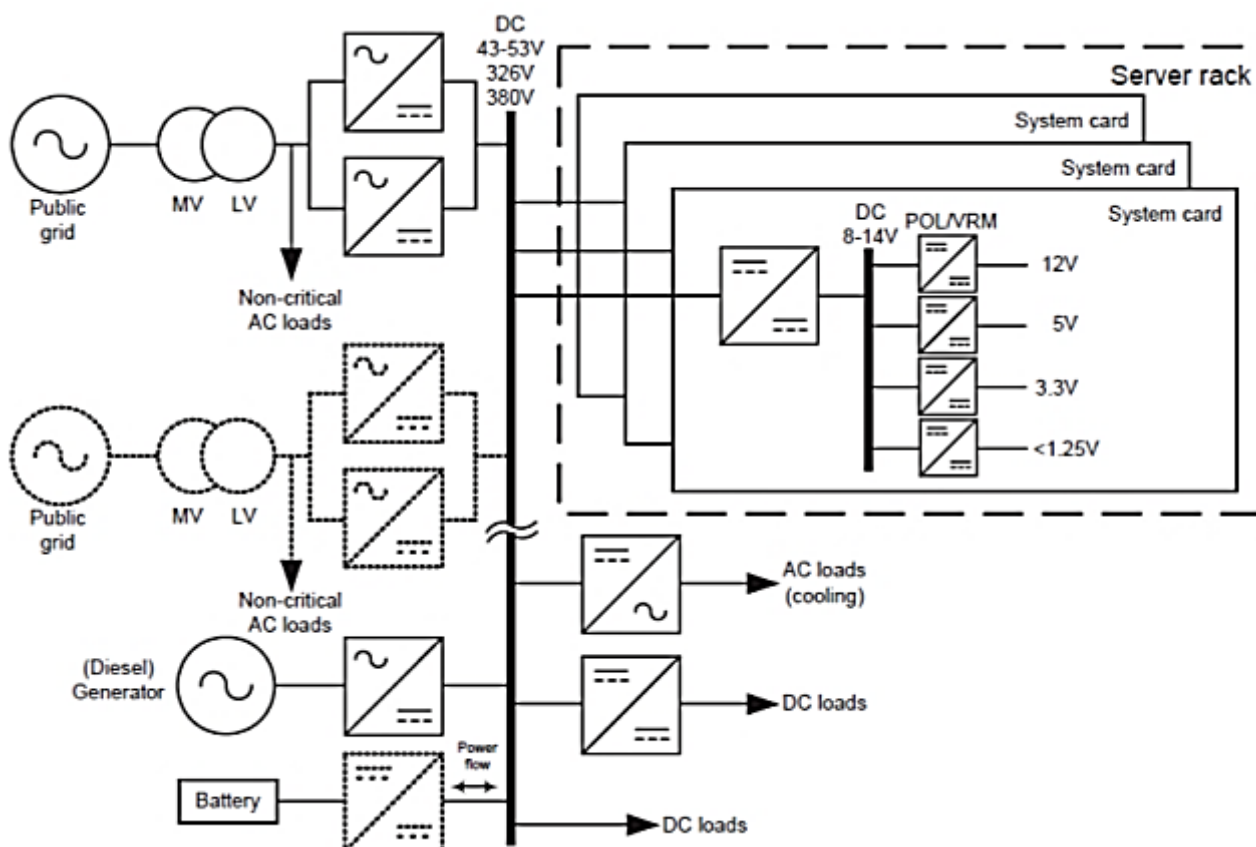
Εικόνα 2.16: Αρχιτεκτονική συνήθους συστήματος διανομής AC (τα διακεκομμένα τμήματα είναι προαιρετικά) [66]



Εικόνα 2.17: Αρχιτεκτονική συνήθους συστήματος διανομής DC (τα διακεκομμένα τμήματα είναι προαιρετικά) [66]

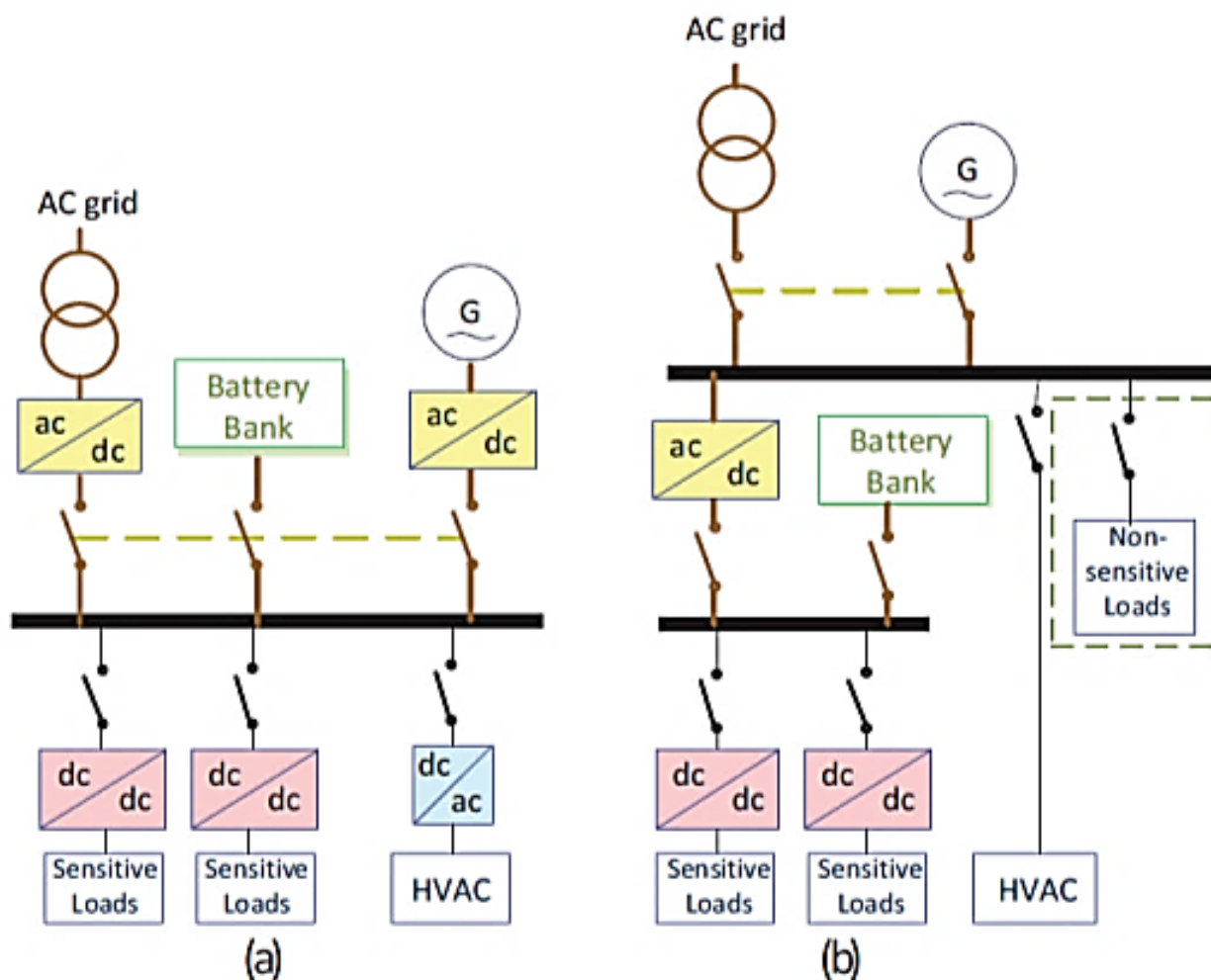
Το επίπεδο τάσης του DC ζυγού μεταβάλλεται ανάλογα με το ποσό ενέργειας που απαιτείται από το κέντρο δεδομένων. Για ένα δεδομένο ποσό τροφοδοτούμενης ισχύος, το ρεύμα πρέπει να αυξάνεται όταν η τάση μειώνεται. Συνεπώς η τροφοδοτούμενη ισχύς σε χαμηλές τάσεις οδηγεί σε μεγαλύτερη παραγωγή θερμότητας, η οποία καταναλώνει ορισμένη από την ισχύ που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί από τους διακομιστές. Για μεγαλύτερα κέντρα δεδομένων, επιλέγεται μεγαλύτερη τάση διανομής ώστε να μειώνονται οι απώλειες χαλκού κατά τη μεταφορά, συνήθως στην τιμή του ανορθωμένου AC συστήματος (περίπου 326 V, που είναι το μέγιστο για τα Ευρωπαϊκά δίκτυα). Η χρήση ενός DC ζυγού 48 V, όπως εκείνων που χρησιμοποιούνται σε τηλεπικοινωνίες, απαιτεί ογκώδη καλώδια. Κατά συνέπεια δεν είναι πρακτικό να διανέμεται η DC ισχύς σε μεγάλα φορτία στα 48 V, όμως το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί αυξάνοντας την τάση διανομής στα 480 V και υποβιβάζοντάς την σε χαμηλότερες τιμές (43-53 V) σε έναν ενδιάμεσο DCζυγό [66]. Ο ενδιάμεσος DC ζυγός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση του λόγου μετασχηματισμού μεταξύ του DC ζυγού τάσης και της τελικής τάσης που απαιτείται από το φορτίο του μικροεπεξεργαστή. Η υψηλότερη DC τάση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά ενέργειας σε μεγαλύτερες αποστάσεις και για την τροφοδότηση μεγαλύτερων φορτίων. Μια DC

αρχιτεκτονική διανομής που περιλαμβάνει ενδιάμεσο ζυγό DC παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.18. [66]



Εικόνα 2.18: Αρχιτεκτονική συστήματος διανομής DC με ενδιάμεσο ζυγό (τα διακεκομμένα τμήματα είναι προαιρετικά) [66]

Οι Salomonsson et al. (2008) [67] πρότειναν επίσης ένα προσαρμόσιμο σύστημα ελέγχου για DC μικροδίκτυα που εγκαθίσταται σε κέντρα δεδομένων. Συνέκριναν δύο διατάξεις για το σύστημα ισχύος του κέντρου, οι οποίες παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.19. Συμπέραναν ότι η διάταξη (a) είναι καλύτερη από τη (b) για να αποφεύγεται ο συγχρονισμός της γεννήτριας και να επιτυγχάνεται καλύτερος έλεγχος της ροής ισχύος, ενώ η (b) είναι καλύτερη αναφορικά με τις απώλειες ισχύος και το μέγεθος του μετατροπέα. Ορισμένα ακόμη πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η διάταξη (b) έναντι της (a) είναι ότι η σύνδεση του φορτίου του συστήματος κλιματισμού στον ίδιο DC ζυγό δεν αυξάνει μόνο το μέγεθος του μετατροπέα, αλλά και την αποθήκευση ενέργειας και συνεπώς το κόστος. Επιπλέον, αυξάνει την πολυπλοκότητα της προστασίας, της λειτουργίας και της μεταβατικής φάσης. Πρακτικά δεν προτιμάται για τη σύνδεση φορτίων μηχανών υψηλής ισχύος στον ίδιο ζυγό όπου συνδέονται ευαίσθητα φορτία, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι διακυμάνσεις της τάσης. [67]



Εικόνα 2.19: Διατάξεις συστημάτων ισχύος κέντρου δεδομένων [67]

Οι Sannino et al. (2003) [68] πρότειναν μια απλοποιημένη αρχιτεκτονική για το DC σύστημα διανομής, στο οποίο απαιτείται μικρότερο πλήθος μετατροπών ώστε να αυξηθεί η συνολική απόδοση. Μελέτησαν το συγκεκριμένο σύστημα για τέσσερα διαφορετικά επίπεδα DC τάσης: 48 V, 120 V, 230 V και 326 V. Οι πτώσεις τάσης και οι απώλειες ισχύος υπολογίστηκαν και συγκρίνονται σε σχέση με ένα AC σύστημα. Επιπροσθέτως, το σύστημα αξιολογήθηκε ως προς το κόστος εγκατάστασης και τα λειτουργικά κόστη. Συμπέραναν ότι η DC τροφοδοσία αν είναι στο κατάλληλο επίπεδο τάσης μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά πλεονεκτήματα. Προσθέτοντας μια συστοιχία μπαταριών εξασφαλίστηκε η άμεση παροχή ισχύος για τα κρίσιμα φορτία για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, σε σύγκριση με ένα εμπορικό UPS, με χαμηλότερο κόστος.

Οι Amin et al. (2011) [69] συνέκριναν διάφορα συστήματα διανομής χαμηλής τάσης (24 V και 48 V) με σύστημα διανομής 230 VAC, για την τροφοδοσία διαφόρων οικιακών συσκευών. Για κάθε σύστημα υπολογίστηκαν οι απώλειες αγωγής και οι απώλειες των συσκευών. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι το DC σύστημα των 48 V με βελτιστοποιημένη διατομή καλωδίου παρουσίασε τη χαμηλότερη συνολική κατανάλωση ενέργειας, ενώ το σύστημα DC 24 V είχε υψηλές απώλειες. Το

αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο, διότι η ισχύς που διανεμήθηκε συνολικά ήταν περίπου 8 kW, άρα ήταν αρκετά υψηλή για τόσο χαμηλή τάση.

Οι Techakittiroj et al. (2009) [47] εκτέλεσαν πειράματα για να διερευνήσουν τη δυνατότητα χρήσης των συσκευών που είναι διαθέσιμες στην αγορά σε DC δίκτυο διανομής, χωρίς καμιά τροποποίηση. Τροφοδότησαν συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού, λαμπτήρες LED, τηλεοράσεις, υπολογιστές και μικρούς κινητήρες με DC ισχύ. Τα αποτελέσματα ήταν επιτυχή και η ποιότητα ισχύος ήταν βελτιωμένη, πράγμα το οποίο επιβεβαίωσε ότι η τροφοδοσία συσκευών απευθείας με DC τάση είναι εφικτή. Οι ερευνητές τόνισαν ότι το αποτέλεσμα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό διότι καθιστά εφικτή τη συνύπαρξη των DC και των AC συστημάτων διανομής, ώστε να είναι ευκολότερη η μετάβαση προς τα δίκτυα DC.

Οι Kakigano et al. (2010) [63] παρουσίασαν ένα DC μικροδίκτυο για οικιακές εφαρμογές. Το σύστημα αποτελείται από συστήματα συμπαράγωγής συνδεδεμένα σε μια DC γραμμή διανομής (3 καλώδια, ± 170 V). Ως κύρια αποθήκευση ενέργειας χρησιμοποιήθηκαν υπερπυκνωτές. Μελετήθηκε η λειτουργία του συστήματος σε διασυνδεδεμένη λειτουργία και σε σκόπιμη λειτουργία νησιδοποίησης. Κατασκεύασαν ένα σύστημα εργαστηριακής κλίμακας, το οποίο διερευνήθηκε υπό βύθιση τάσης στο σημείο κοινής σύζευξης, αποσύνδεσης και επανασύνδεσης στο δίκτυο. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι το σύστημα μπορεί να τροφοδοτήσει ισχύ υψηλής ποιότητας συνεχώς προς τα φορτία.

Το κέντρο Διανομής και Διαχείρισης Ηλεκτρικής Ενέργειας από Α.Π.Ε. (FREEDM) των Η.Π.Α. κατασκεύασε έναν μετασχηματιστή στερεάς κατάστασης με βάση τα SiC MOSFET με σκοπό την αντικατάσταση των παραδοσιακών ηλεκτρομαγνητικών μετασχηματιστών [71]. Οι μετασχηματιστές στερεάς κατάστασης εγγενώς περιλαμβάνουν μια ενδιάμεση DC βαθμίδα, η οποία αυξάνει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης ορισμένων DC φορτίων στο DC ζυγό, ώστε να αποφεύγονται οι απώλειες μετατροπής [70]. Το κόστος των μετασχηματιστών αυτών είναι ακόμη αρκετά υψηλό σε σχέση με το συμβατικό εξοπλισμό, όμως μειώνεται δραστικά όσο αναπτύσσεται η τεχνολογία ημιαγωγών.

2.5 Ευστάθεια και προστασία των DC συστημάτων διανομής

Η ευστάθεια των συστημάτων ισχύος αποτελεί σημαντικό μέλημα για τους μηχανικούς. Τα κριτήρια ευστάθειας όσον αφορά τα AC συστήματα έχουν οριστεί και έχουν διερευνηθεί. Αντιθέτως, η ευστάθεια των DC συστημάτων ισχύος είναι ακόμη υπό διερεύνηση. Μια κύρια πηγή αστάθειας στα DC συστήματα ισχύος επισημάνθηκε από τους Sokal και Middlebrook στις αρχές του 1970. Αποδείχτηκε ότι οι DC μετατροπείς μπορούν να προκαλέσουν αρνητική αντίσταση εισόδου και σε περίπτωση που αυτή η αρνητική αντίσταση υπερβαίνει τη θετική αντίσταση στην είσοδο του φίλτρου LC του μετατροπέα, ολόκληρο το σύστημα μπορεί να ταλαντωθεί και να οδηγηθεί σε αστάθεια. Οι Middlebrook et al. [] μελέτησαν το πρόβλημα της αρνητικής αντίστασης εισόδου σε χαμηλές συχνότητες. Για να εξαλειφθούν οι ταλαντώσεις, δημιουργήθηκε ένας

μετατροπέας στον οποίο η εμπέδηση του φίλτρου εισόδου διατηρούνταν μικρότερη από την εμπέδηση εισόδου του μετατροπέα, ώστε να παραμένει το σύστημα ευσταθές.

Βάσει της ίδιας ανάλυσης, οι Feng et al. (2002) [74] προσδιόρισαν μια απαγορευμένη περιοχή για το λόγο εμπέδησης. Αν ο λόγος της εμπέδησης εξόδου προς την εμπέδηση εισόδου διατηρείται εκτός της περιοχής αυτής, το σύστημα παραμένει ευσταθές. Αυτές οι απαιτήσεις για την εμπέδηση αφορούν συστήματα πηγής τάσης. Μια εκτενής μελέτη για τα συστήματα πηγής ρεύματος απέδειξε ότι τα κριτήρια ευστάθειας είναι τα αντίθετα [75]. Έχουν πραγματοποιηθεί επίσης μελέτες σε υβριδικά AC/DC συστήματα και σε DC μικροδίκτυα, από τις οποίες προέκυψε ότι ακόμη και αν ο κάθε μετατροπέας είναι από μόνος του ευσταθής, αυτό δεν αποτελεί εγγύηση για τη σταθερότητα του συνολικού συστήματος.

Η ευρεία χρήση των DC συστημάτων έχει ορισμένες αρνητικές επιπτώσεις στο δίκτυο ισχύος και μπορεί να οδηγήσει το σύστημα σε αστάθεια, λόγω της απουσίας μηχανικής αδράνειας ή της πολύ μικρής δυναμικής αδράνειας [76]. Μια λύση για το πρόβλημα αυτό προτάθηκε από τους Zhong et al. (2011) [77], οι οποίοι πρότειναν τη χρήση τροποποιημένων αντιστροφών, οι οποίοι μιμούνται τα χαρακτηριστικά της παραδοσιακής σύγχρονης γεννήτριας.

Η προστασία των DC συστημάτων αποτελεί απαιτητική διαδικασία και έχουν γίνει αρκετές μελέτες σχετικές με το πρόβλημα του υπολογισμού του ρεύματος βραχυκύκλωσης σε DC σύστημα [78]. Οι Salomonsson et al. (2009) [73] πρότειναν ένα προστατευτικό σχήμα για DC μικροδίκτυο χαμηλής τάσης, το οποίο μελετήθηκε κατά τη διάρκεια διαφορετικών σφαλμάτων σε διαφορετικά σημεία του δικτύου. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι είναι εφικτή η χρήση εμπορικών προστατευτικών διατάξεων AC για την προστασία των μπαταριών και των φορτίων. Όμως οι μετατροπείς που χρησιμοποιούν IGBTs είναι πολύ ευαίσθητοι σε υπερ-ρεύματα. και συνεπώς απαιτούν ταχύτερες προστατευτικές διατάξεις.

2.6 Τεχνολογίες υποστήριξης των DC συστημάτων διανομής

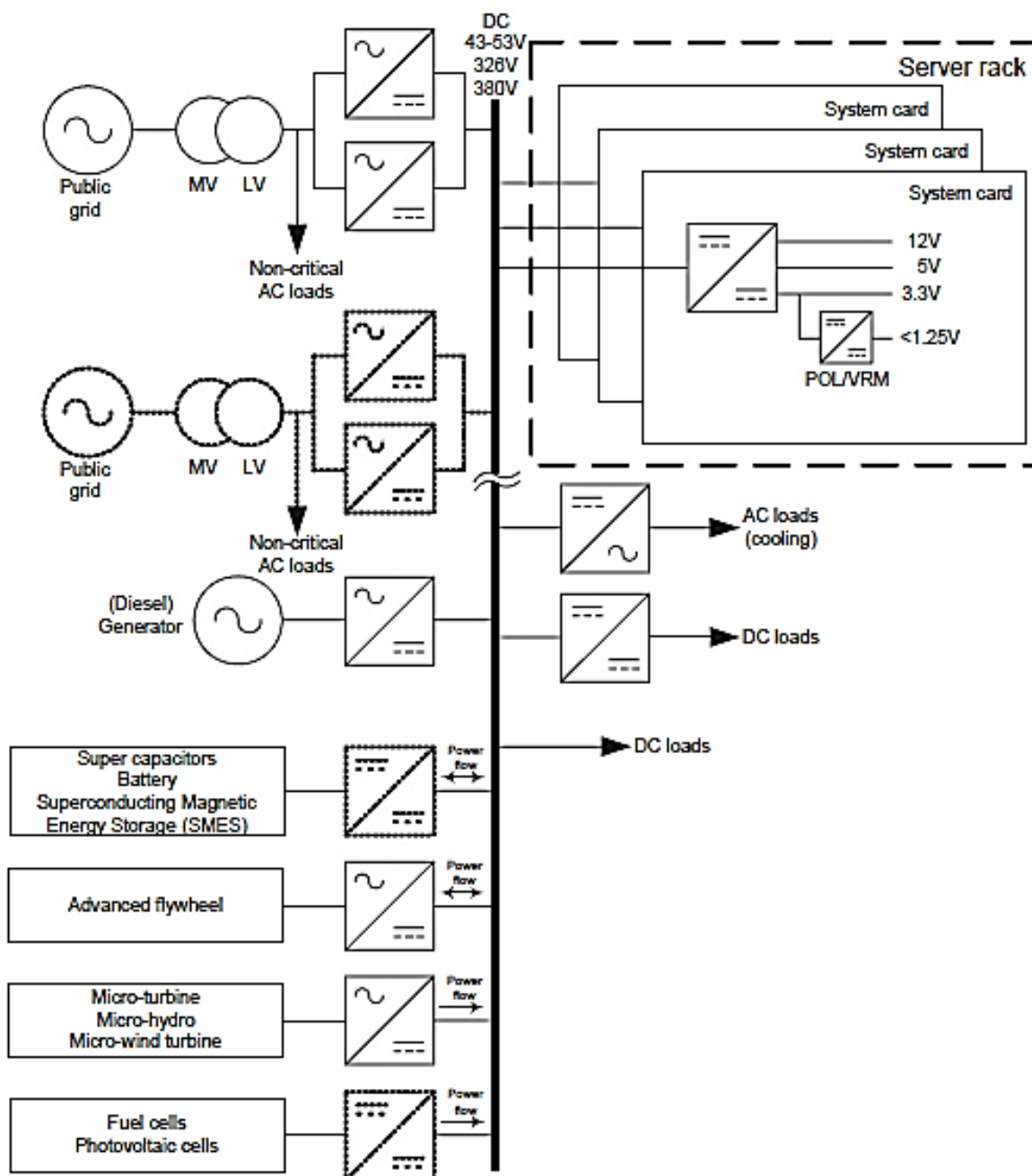
Έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επιτόπια παραγωγή ενέργειας και οι οποίες μπορούν να μειώσουν την εξάρτηση από την ισχύ του δικτύου ή να χρησιμοποιηθούν ως εφεδρική ισχύς όταν η ισχύς του δικτύου είναι χαμηλής αξιοπιστίας ή ακριβή. Στις περιπτώσεις αυτές, η παραγωγή ενέργειας γίνεται μέσω νηζελογεννητριών, οι εναλλακτικών μορφών ενέργειας, οι οποίες οδηγούν σε πολύ χαμηλότερες εκπομπές, μειωμένα επίπεδα θορύβου και χαμηλότερη εξάρτηση από καύσιμα. Οι σύγχρονες τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής παρέχουν διάφορες τοπολογίες γεννητριών μικρού μεγέθους, της τάξης των 10 kW, οι οποίες παράγουν απευθείας DC ηλεκτρική ενέργεια ή απαιτούν μια ενδιάμεση DC βαθμίδα μετατροπής για το μετασχηματισμό της ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής συχνότητας σε κατάλληλη ενέργεια AC. Τα περισσότερα από τα ηλεκτρικά συστήματα αποθήκευσης, όπως οι μπαταρίες όσμωσης, οι υπερ-πυκνωτές και η υπεραγωγίμη αποθήκευση μαγνητικής ενέργειας, παρέχουν DC ηλεκτρική ενέργεια.

Άλλες πηγές όπως οι σφόνδυλοι, παράγουν ρεύμα υψηλής συχνότητας που πρέπει να μετατραπεί σε DC. [66]



Εικόνα 2.20: Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας για διεσπαρμένη παραγωγή (a) υπερ-πυκνωτής, (b) σφόνδυλος μεγάλης ταχύτητας και (c) συστοιχία μπαταριών όσμωσης [66]

Η σύνδεση αυτών των πηγών παραγωγής ισχύος και των συσκευών αποθήκευσης στο DC δίκτυο διανομής, απαιτεί μόνο δύο βαθμίδες μετατροπής ισχύος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.21. Κατ' επιλογή, για να επωφεληθεί κανείς από την καλύτερη απόδοση και τον έλεγχο ισχύος των πηγών DC και των στοιχείων αποθήκευσης, μπορούν να συνδεθούν στο DC ζυγό μέσω ενός μετατροπέα DC-DC. Η σύνδεση αυτή δεν απαιτεί συγχρονισμό μεταξύ των πηγών ισχύος. [66]



Εικόνα 2.21: Αρχιτεκτονική DC συστήματος διανομής με αποθήκευση και παραγωγή DC ισχύος (τα διακεκομμένα τμήμα είναι προαιρετικά) [66]

2.7 Συγκριτική αξιολόγηση AC και DC συστημάτων διανομής

Με βάση την παρουσίαση των κύριων μερών που απαρτίζουν ένα DC σύστημα διανομής, αλλά και τις εφαρμογές και τις εγκαταστάσεις ανά τον κόσμο, ο ακόλουθος Πίνακας 2.4 παρουσιάζει μια συγκριτική αξιολόγηση των AC και DC συστημάτων διανομής αναφορικά με την αξιοπιστία και την απόδοσή τους. [66]

Πίνακας 2.4: Συγκριτική αξιολόγηση των AC και DC συστημάτων διανομής [66]

Παράμετρος	AC διανομή	DC διανομή	Επίδραση στην αξιοπιστία	Επίδραση στην απόδοση
<i>Ελάχιστος απαιτούμενος αριθμός μετατροπέων ισχύος</i>	Τέσσερις	Δύο	Η αξιοπιστία αυξάνεται με μείωση του αριθμού των μετατροπέων	Η απόδοση αυξάνεται με μείωση του αριθμού των μετατροπέων
<i>Αριθμός απαιτούμενων μετατροπέων ισχύος για λειτουργία UPS (κέντρα δεδομένων)</i>	Δυο	Ένας	Η αξιοπιστία αυξάνεται με μείωση του αριθμού των μετατροπέων	Η απόδοση αυξάνεται με μείωση του αριθμού των μετατροπέων
<i>Μετατροπή ισχύος διεξάγεται από</i>	AC μετασχηματιστής και ηλεκτρονικοί μετατροπέες ισχύος	Ηλεκτρονικά ισχύος μετατροπέων	Οι AC μετασχηματιστές είναι πιο αξιόπιστοι από τους ηλεκτρονικούς μετατροπέες ισχύος	Παρόμοια απόδοση των 2 επιλογών
<i>Συχνότητα στην οποία συμβαίνει η μετατροπή ισχύος</i>	Συχνότητα δικτύου (50/60 Hz)	Υψηλές συχνότητες εναλλαγής (> 100 kHz)	Οι μετατροπέες με υψηλότερες συχνότητες εναλλαγής είναι πιο ευάλωτες σε αστοχία, μειώνοντας έτσι την αξιοπιστία τους	Οι υψηλότερες συχνότητες εναλλαγής αυξάνουν την απόδοση των μετατροπέων ισχύος (και της πυκνότητας ισχύος)
<i>Απαιτήση συγχρονισμού κατά τη σύνδεση με onsite παραγωγή η αποθήκευση</i>	Ναι, για όλα τα φορτία	Όχι, όλα τα φορτία συνδέονται στον DC ζυγό	Η αξιοπιστία αυξάνεται αν δεν απαιτείται συγχρονισμός (μικρότερος κίνδυνος απρόβλεπτης αστοχίας)	Η απόδοση δεν επηρεάζεται από τον συγχρονισμό
<i>Απαιτήση μετατροπής κατά τη σύνδεση με onsite παραγωγή η αποθήκευση</i>	Πάντα	Μόνο για εξοπλισμό AC υψηλής συχνότητας	Η αξιοπιστία αυξάνεται με μείωση του αριθμού των μετατροπέων	Η απόδοση αυξάνεται με μείωση του αριθμού των μετατροπέων
<i>Πιθανή εφεδρεία</i>	Ναι	Ναι	Η εφεδρεία αυξάνει σημαντικά την αξιοπιστία	Η εφεδρεία δεν επηρεάζει την απόδοση

Είναι εμφανές ότι με βάση και τις διαφορές των δυο συστημάτων, οι αρχιτεκτονικές DC συστημάτων διανομής είναι πιο αξιόπιστες και αποδοτικές σε σχέση με τις αντίστοιχες AC. Έτσι από τη μια έχουμε καλύτερη απόδοση και αξιοπιστία με την υιοθέτηση 2 μετατροπέων ισχύος, ενώ επίσης μειώνονται σημαντικά οι σχετικές απώλειες και πιθανότητες αστοχίας. Από την άλλη, έχουν αναφερθεί περιπτώσεις αύξησης της απόδοσης 10 – 20% με την αντικατάσταση ενός AC συστήματος διανομής από ένα DC. [66]

2.8 Το μέλλον των συστημάτων διανομής ισχύος

Είναι κοινή πεποίθηση όλων ότι οι τεχνολογίες ενέργειας, διαχείρισης, ελέγχου και επικοινωνίας έχουν φτάσει σε ένα επίπεδο ωριμότητας, το οποίο είναι επαρκές για να γίνει ένα βήμα προς μια νέα εποχή εφαρμογών ενέργειας, τα «Έξυπνα Δίκτυα». Η ιδέα των Έξυπνων Δικτύων υιοθετήθηκε και μελετήθηκε με γνώμονα την επίτευξη συγκεκριμένων στόχων όπως: [38]

- *Η παροχή ποιότητας ισχύος για την κάλυψη των αναγκών του 21^{ου} αιώνα*
- *Η προσαρμοστική και απρόσκοπτη λειτουργία έναντι φυσικών ή ηλεκτρονικών παρεμβάσεων*
- *Η υιοθέτηση πολλαπλών επιλογών παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας*
- *Η ενεργοποίηση χρήσης νέων προϊόντων, υπηρεσιών και αγορών ενέργειας*
- *Η βελτιστοποίηση της αποδοτικής λειτουργίας: [38]*

Το ηλεκτρικό δίκτυο αναμένεται να εξελιχθεί σε ένα νέο πρότυπο - *έξυπνο δίκτυο*. Ουσιαστικά τα παραδοσιακά ηλεκτρικά συστήματα, που χρησιμοποιούνται γενικά για τη μεταφορά ρεύματος, διανέμουν από λίγες κεντρικές γεννήτριες σε μεγάλο αριθμό χρηστών ή πελατών. Αντιθέτως, το νέο αναδυόμενο έξυπνο δίκτυο χρησιμοποιεί αμφίδρομη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος και πληροφορίες για να δημιουργήσει ένα αυτοματοποιημένο και κατανομημένο προηγμένο δίκτυο παροχής ενέργειας. [38]

Πολλές έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί για τη διερεύνηση της έννοιας του έξυπνου δικτύου. Σύμφωνα με μια νεότερη έρευνα για έξυπνο δίκτυο, η έρευνα επικεντρώνεται κυρίως σε τρία συστήματα, το σύστημα των υποδομών, το σύστημα διαχείρισης και το σύστημα προστασίας. (MassoudAmin) Κατά τη μετάβαση από το συμβατικό δίκτυο ισχύος σε έξυπνο δίκτυο, θα αντικατασταθεί μια φυσική υποδομή με μια ψηφιακή. Οι ανάγκες και οι αλλαγές που παρουσιάζει ο κλάδος ενέργειας είναι μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που έχει αντιμετωπίσει ποτέ. [79]

Το σύστημα διαχείρισης είναι το υποσύστημα που παρέχει προηγμένες υπηρεσίες διαχείρισης και ελέγχου. Τα περισσότερα από τα υπάρχοντα έργα στοχεύουν στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, το προφίλ της ζήτησης, τη χρησιμότητα, το κόστος και τις εκπομπές, με βάση την υποδομή μέσω της βελτιστοποίησης, μηχανικής μάθησης, και τη θεωρία των παιγνίων. Στο πλαίσιο της προηγμένης υποδομής του έξυπνου δικτύου, όλο και περισσότερες νέες υπηρεσίες και εφαρμογές διαχείρισης αναμένεται να προκύψουν.

Το σύστημα προστασίας είναι το υποσύστημα που παρέχει προηγμένη ανάλυση της αξιοπιστίας του δικτύου, την προστασία αποτυχιών, την ασφάλεια των υπηρεσιών και προστασίας της ιδιωτικής ζωής. Πρέπει να σημειωθεί ότι η προηγμένη υποδομή που χρησιμοποιείται στο έξυπνο δίκτυο αφενός δίνει μεν τη δυνατότητα να αναπτυχθούν πιο ισχυροί μηχανισμοί για την υπεράσπιση ενάντια στις επιθέσεις και τις αποτυχίες, αλλά από την άλλη πλευρά, ανοίγει πολλά νέα μέτωπα. [79]

2.8.1 Έξυπνα δίκτυα (Smart Grids)

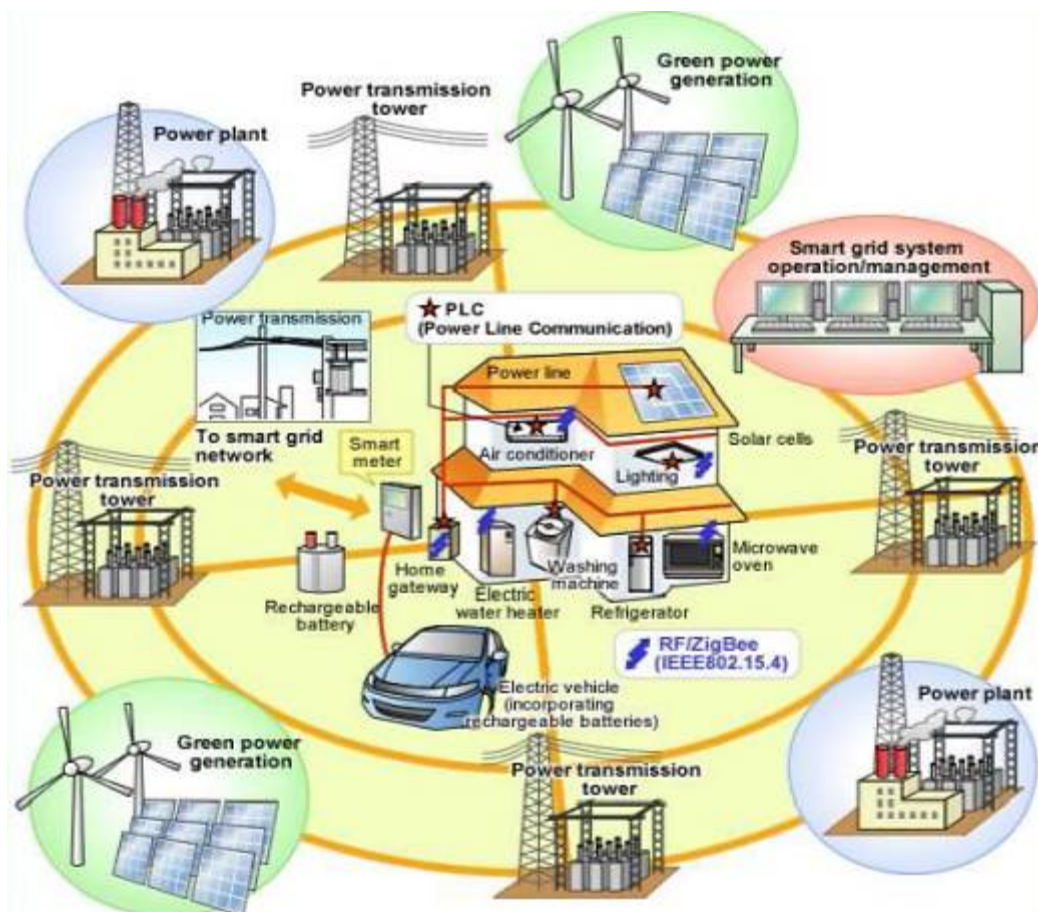
Στη σημερινή εποχή επιβάλλεται η μετάβαση σε ένα ταχύτερο, πιο έξυπνο ηλεκτρικό δίκτυο, που θα μπορεί να παρέχει καλύτερη ποιότητα ρεύματος με επικοινωνία διπλής κατεύθυνσης, που θα εξισορροπεί την προσφορά και τη ζήτηση σε πραγματικό χρόνο, εξομαλύνοντας τις αιχμές της ζήτησης, και που θα καθιστά τους πελάτες ενεργούς συμμετόχους στην παραγωγή και την κατανάλωση ηλεκτρισμού. [80]

Το έξυπνο δίκτυο επιτρέπει την αποδοτικότερη χρήση της υπάρχουσας εγκατεστημένης ισχύος και της υποδομής μεταφοράς και διανομής ενέργειας, με μείωση των απωλειών στις ηλεκτρικές γραμμές μέσω της χρήσης τοπικής, αποκεντρωμένης ηλεκτροπαραγωγής σε μεγαλύτερο βαθμό. Καθώς αυξάνεται το μερίδιο παραγωγής από ποικίλες ανανεώσιμες πηγές, ένα έξυπνο δίκτυο μπορεί να χειριστεί καλύτερα τις αυξομειώσεις του ρεύματος, όταν ο άνεμος καταλαγιάζει ή τα σύννεφα κρύβουν τον ήλιο. Θα επιτρέψει επίσης στα ηλεκτρικά οχήματα να αποθηκεύουν ρεύμα για τις μετακινήσεις τους ή να το πωλούν πίσω στο δίκτυο όταν αυτό απαιτείται.

Οι έξυπνες τεχνολογίες –συμπεριλαμβανομένων των έξυπνων μετρητών, των αυτόματων συστημάτων ελέγχου και των ψηφιακών αισθητήρων– θα δείχνουν στους καταναλωτές την τιμολόγηση σε πραγματικό χρόνο και θα τους επιτρέπουν να εξοικονομούν χρήματα και ενέργεια κλείνοντας ηλεκτρικές συσκευές, συστήματα θέρμανσης και ψύξης ολόκληρων κτιρίων, ή βιομηχανικά φορτία σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές ή όταν η τιμή του ρεύματος ξεπερνά ένα προκαθορισμένο ποσό ή όταν υπάρχει πτώση παραγωγής στις μεγάλες μονάδες παραγωγής ενέργειας. [80,81]

Μπορούν να βοηθήσουν στη μεταφορά φορτίων σε περιόδους χαμηλής ζήτησης, όταν οι απώλειες των ηλεκτρικών γραμμών είναι μικρότερες και δεν λειτουργούν τα περισσότερο ρυπογόνα και λιγότερο αποδοτικά εργοστάσια. Επίσης, επιτρέπουν στους ελεγκτές του δικτύου να προβλέπουν και να αντιμετωπίζουν άμεσα τα προβλήματα στο δίκτυο. Πιλοτικά προγράμματα έχουν αποδείξει σημαντική εξοικονόμηση για τους καταναλωτές και μειώσεις στη ζήτηση. [81]

Στην Εικόνα 2.22 παρουσιάζεται η δομή, τα κύρια μέρη και οι διασυνδέσεις που απαρτίζουν ένα σύγχρονο Έξυπνο Δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 2.22: Σχηματική απεικόνιση των κυρίων μερών και των διασυνδέσεων ενός έξυπνου δικτύου [81]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Περιγραφή των συστημάτων πρόωσης

Στις ακόλουθες ενότητες θα γίνει παρουσίαση 4 διαφορετικών συστημάτων πρόωσης. Γενικότερα, κάθε ένα από τα προτεινόμενα συστήματα ισχύος έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και είναι σχεδιασμένο για προκαθορισμένες συνθήκες για συγκεκριμένο τύπο πλοίου. Εξάλλου οι απαιτήσεις για ένα σύστημα εξαρτώνται άμεσα από τον τύπο του πλοίου, αν πρόκειται δηλαδή για μικρό γιότ είτε για μεταφορικό πλοίο μεγάλου όγκου. Οι παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την επιλογή του κατάλληλου συστήματος είναι η απόδοση (κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα μηχανικής ενέργειας), η δυνατότητα ελιγμών, η ταχύτητα του σκάφους και οι εν γένει καταναλώσεις ενέργειας του πλοίου. [82]

3.1 Diesel - Electric

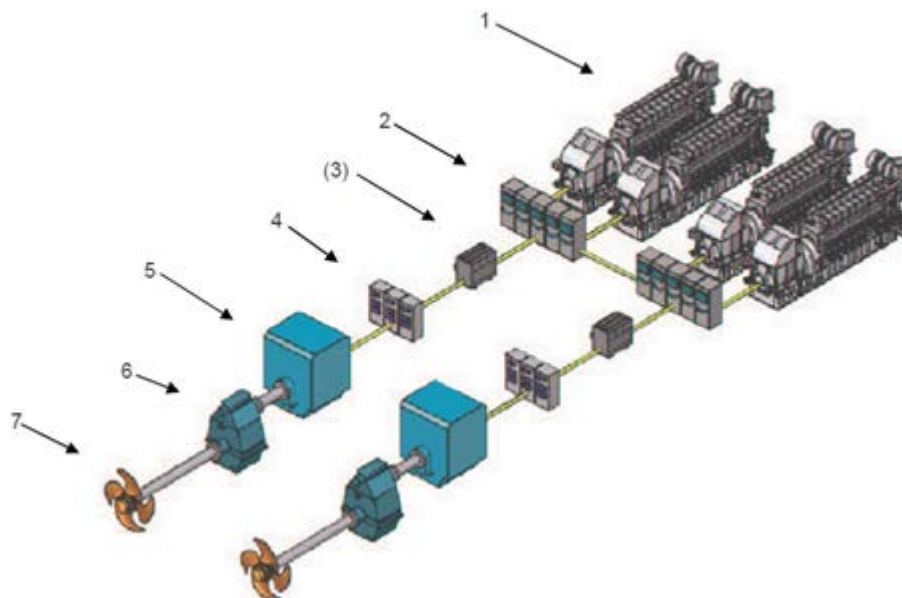
Γενικά στοιχεία

Η ηλεκτροπρόωση ενός πλοίου ορίζεται το είδος εκείνο της πρόωσης στο οποίο οι άξονες του πλοίου κινούνται απ' ευθείας (ή σπανιότερα μέσω μειωτήρων) από ηλεκτρικούς κινητήρες και όχι από άλλες μηχανές όπως diesel, αεριοστρόβιλους και ατμοστρόβιλους (MEK). Φυσικά οι MEK εξακολουθούν να υπάρχουν στις εγκαταστάσεις ηλεκτροπρόωσης, αλλά αντί να κινούν απ' ευθείας το αξονικό σύστημα με την έλικα κινούν ηλεκτρικές γεννήτριες, που με τη σειρά τους τροφοδοτούν τους ηλεκτρικούς κινητήρες πρόωσης, γνωστές και ως "prime movers" ('κινητήριες μηχανές'). Η προωστήρια εγκατάσταση συμπληρώνεται από κάποιο σύστημα ελέγχου για τον χειρισμό της, δηλαδή την κράτηση-εκκίνηση, την αυξομείωση στροφών και την αλλαγή φοράς περιστροφής των ηλεκτρικών κινητήρων. [83,84]

Η ηλεκτροπρόωση αρχικά εφαρμόστηκε με ηλεκτρικούς κινητήρες (συνεχούς ρεύματος), οι οποίοι είχαν και έχουν ακόμα ευρεία χρήση. Πλέον η ηλεκτροπρόωση εφαρμόζεται με σύγχρονους κινητήρες οι οποίοι λειτουργούν με μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης σε σχέση με τους ασύγχρονους (96 – 98% έναντι 92 – 95%). Ακόμα μεγαλύτερη απόδοση έχουν οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (πάνω από 98%) οι οποίοι αποτελούν μία καινούρια κατηγορία σύγχρονων κινητήρων. Η ευρεία ανάπτυξη και υιοθέτηση χρήσης των συστημάτων diesel – electric σε πλοία έγινε από τα μέσα της δεκαετίας του 1980 με την έρευνα και αύξηση της διαθεσιμότητας προηγμένων ηλεκτρονικών ισχύος. Εξάλλου, σε αντίθεση με τα στατικά συστήματα παραγωγής ισχύος, τα συγκεκριμένα περιλαμβάνουν μεταβλητό φορτίο λόγω και της μεταβαλλόμενης ταχύτητας του πλοίου, αλλά και μεταβλητή συχνότητα λόγω της μεταβαλλόμενης ταχύτητας της προπέλας. Με τη χρήση των ηλεκτρονικών ισχύος έγινε

εφικτή η εγκατάσταση μετατροπέων συχνότητας, καθιστώντας πιο αποδοτική την παραγωγή ισχύος. [83,84]

Συστήματα



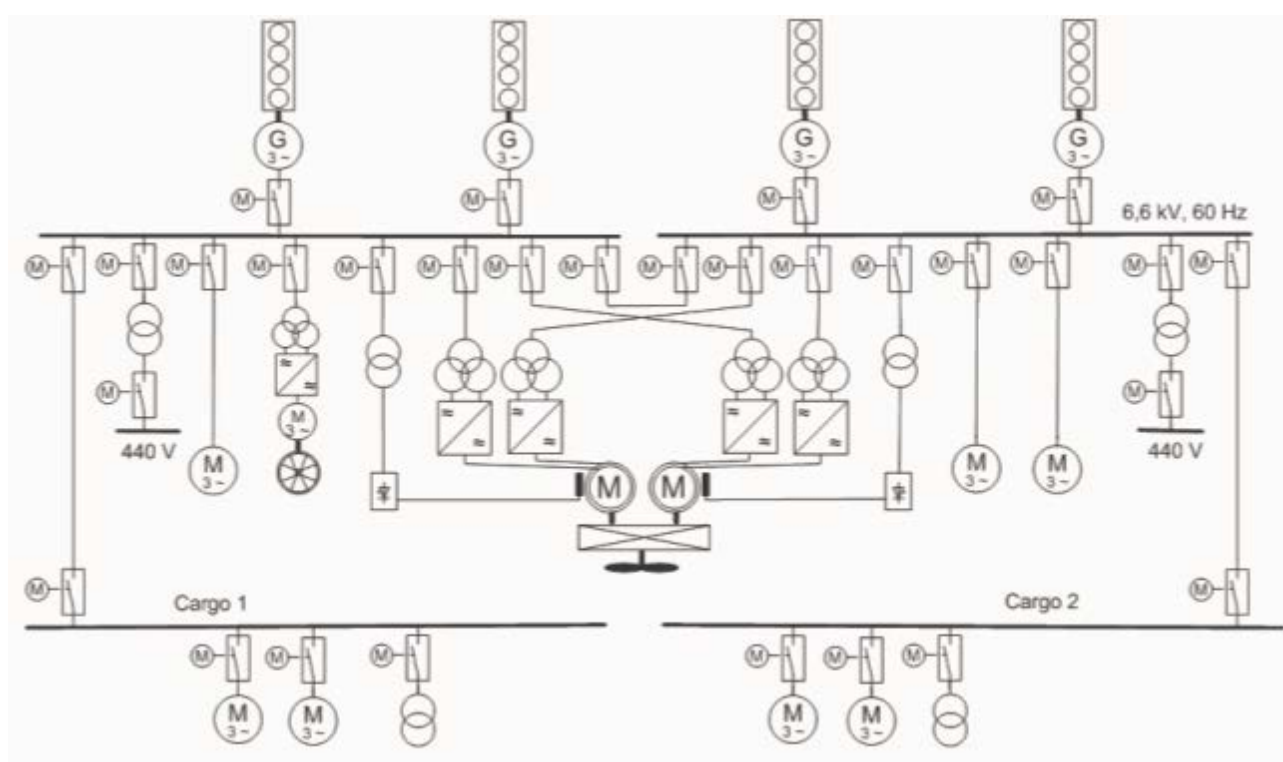
Εικόνα 3.1: Diesel-electric propulsion plant [86]

1	Κινητήρας Diesel - Εναλλακτήρας
2	Κύριος πίνακας διανομής
3	Μετατροπείς τροφοδοσίας (προαιρετικά): εξαρτάται από τον τύπο του μετασχηματιστή
4	Μετατροπείς συχνότητας / γρανάζια μεταβλητής ταχύτητας
5	Κινητήρες ηλεκτροπρόωσης
6	Μειωτήρας (προαιρετικά): εξαρτάται από την ταχύτητα των ηλεκτροκινητήρων πρόωσης
7	Σύστημα πρόωσης / Προπέλες

Στους σύγχρονους κινητήρες μονίμου μαγνήτη το τύλιγμα διέγερσης του δρομέα το οποίο διαρρέεται από συνεχές ρεύμα αντικαθίσταται από μόνιμους μαγνήτες οι οποίο παράγουν το ίδιο μαγνητικό πεδίο που στρέφεται στο χώρο σύγχρονα με τον δρομέα. Για την ανάπτυξη αυτής της κατηγορίας κινητήρων σημαντικό ρόλο έπαιξε η

τεχνολογική πρόοδος τα τελευταία χρόνια είναι που κατέστησε δυνατή την κατασκευή κραμάτων “μόνιμων μαγνητών”. [83,85]

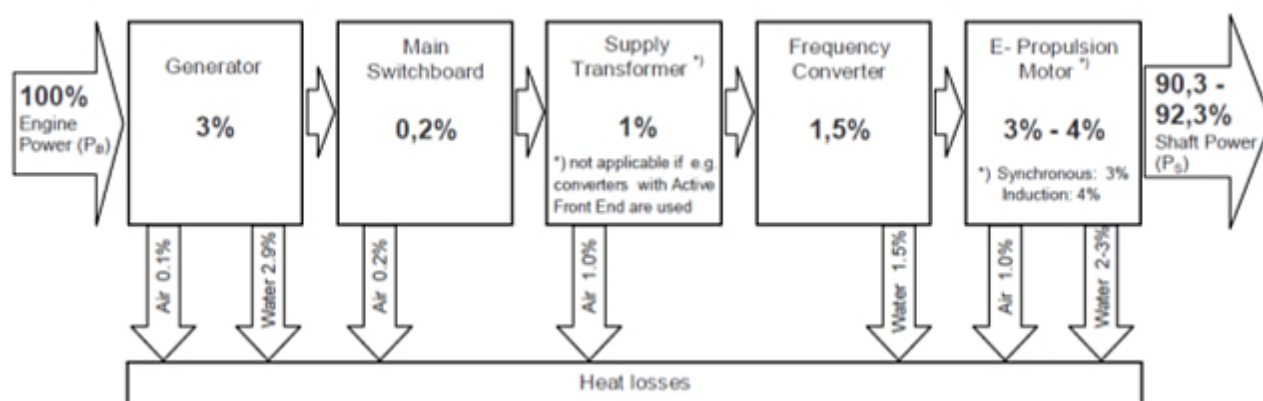
Άλλοι τύποι κινητήριων μηχανών είναι οι κινητήρες αξονικής ροής, στους οποίους η ωφέλιμη μαγνητική ροή είναι κατά την ακτινική διεύθυνση, δηλαδή όπως στις συνήθεις συμβατικές ηλεκτρικές μηχανές, οι πολυβάθμιοι κινητήρες εγκάρσιας ροής (transverse flux motors) και οι πολυβάθμιοι κινητήρες αξονικής ροής (axial flux motors). Οι πρώτοι έχουν μόνιμους μαγνήτες στο δρομέα, προσανατολισμένους κατά τέτοιο τρόπο ώστε η μαγνητική ροή να ρέει μέσα στο διάκενο σε διεύθυνση εν μέρει κατά την αξονική διεύθυνση και κυρίως εγκάρσια προς τον άξονα της μηχανής ενώ οι δεύτεροι έχουν μόνιμους μαγνήτες στον δρομέα, προσανατολισμένους κατά τρόπο ώστε η μαγνητική ροή να ρέει σε διεύθυνση παράλληλη προς τον άξονα της μηχανής (αξονική).



Εικόνα 3.2: Διάταξη Diesel – Electric για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την πρόωση του πλοίου LNG [85]

Όπως φαίνεται από την παραπάνω διάταξη εγκατάστασης, το σύστημα φέρει μετάδοση με μειωτήρα, μονής έλικας και η πρόωση πραγματοποιείται με προπέλα. [85]

Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζονται όλες οι απώλειες που υπάρχουν σε ένα σύστημα Diesel – Electric.



Εικόνα 3.3: Απώλειες μετατροπής ενέργειας σε ένα σύστημα Diesel – Electric [86]

Πλεονεκτήματα

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης, στα οποία οφείλεται και η διάδοσή της στις εφαρμογές που προαναφέρθηκαν, είναι τα ακόλουθα: [83,84]

- ✓ Συνεχής μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της έλικας και της ταχύτητας του πλοίου.
- ✓ Γρήγορη απόκριση κατά τη διάρκεια χειρισμών και δυναμικής τοποθέτησης του σκάφους.
- ✓ Χαμηλή στάθμη θορύβου και κραδασμών.
- ✓ Οικονομία καυσίμου, καθώς είναι δυνατή η επιλογή των μηχανών που θα λειτουργούν έτσι, ώστε η κάθε μια να λειτουργεί κοντά στο βέλτιστο σημείο.
- ✓ Ελευθερία στην τοποθέτηση των επιμέρους μηχανημάτων του ενεργειακού συστήματος, που προσφέρει ευελιξία στον σχεδιασμό του σκάφους και εξοικονόμηση ωφέλιμου χώρου.
- ✓ Πλήρης εκμετάλλευση της ροπής στρέψης σε όλο το φάσμα λειτουργίας.
- ✓ Ευκολία αυτοματισμού.
- ✓ Αυξημένη αξιοπιστία (πολλά συστήματα συνδεδεμένα παράλληλα) και, επομένως, αυξημένη ασφάλεια.
- ✓ Περιορισμός των εκπεμπόμενων ρύπων διότι:
 - α. η κατανάλωση καυσίμου είναι μικρότερη, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως,
 - β. ιδιαίτερα οι εκπομπές NOx είναι αισθητά χαμηλότερες όταν, π.χ., ένας μεσόστροφος κινητήρας Diesel λειτουργεί με σταθερές στροφές, όπως συμβαίνει στα νέα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης.
- ✓ Περιορισμός του κινδύνου ρύπανσης του περιβάλλοντος από ατυχήματα όπως αυτά των δεξαμενόπλοιων, χάρη στην ταχύτερη απόκριση του συστήματος κατά τους χειρισμούς και τη δυναμική τοποθέτηση του σκάφους.

Μειονεκτήματα

➤ Υψηλό κόστος επένδυσης

Αυτό γίνεται η προσπάθεια να μειωθεί κατά το δυνατόν, αξιοποιώντας την υπάρχουσα τεχνολογία των ηπειρωτικών ηλεκτρικών δικτύων (Commercial Off The Shelf – COTS), ωστόσο το υψηλό κόστος των κινητήρων και των διατάξεων ελέγχου τους δεν δείχνει να προσπερνιέται εύκολα. [84]

➤ Υψηλότερες απώλειες στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης

Αποτελεί πρόβλημα ειδικά σε σύγκριση με τα συμβατικά μηχανικά συστήματα. Π.χ., σε συμβατικό σύστημα κινητήρα Diesel με έλικα ρυθμιζόμενου βήματος, οι απώλειες του συστήματος μετάδοσης είναι περίπου 4%: 2% στην έλικα και 2% στον μειωτήρα, όταν η έλικα λειτουργεί στον βέλτιστο συνδυασμό ταχύτητας/βήματος. Σε εγκατάσταση πρόωσης Diesel - Electric, το σύστημα μετάδοσης προκαλεί απώλειες 7 - 8%: 3% στις γεννήτριες, 2% στους μετασχηματιστές και μετατροπείς συχνότητας και 2 - 3% στους προωστήριους ηλεκτροκινητήρες. Επομένως, ο ολικός βαθμός απόδοσης είναι υψηλότερος στο σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης μόνον όταν κάθε μηχανή λειτουργεί σε σταθερή ταχύτητα περιστροφής και επί μεγάλα χρονικά διαστήματα στη βέλτιστη περιοχή. [83,84]

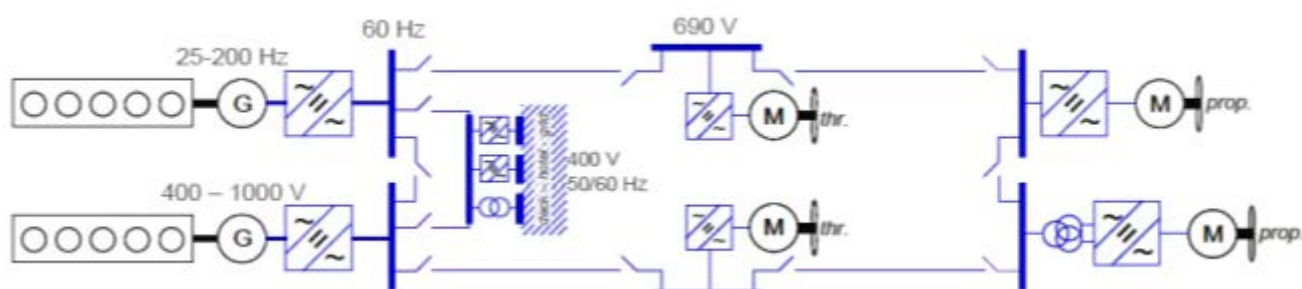
➤ Προβλήματα ποιότητας ηλεκτρικής ενέργειας

Ένα πρόβλημα που προκύπτει από την εκτεταμένη χρησιμοποίηση των διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος είναι ότι εμφανίζονται προβλήματα ποιότητας ηλεκτρικής ενέργειας καθώς πέραν των χρήσιμων συχνοτήτων αναπτύσσεται και μεγάλο πλήθος αρμονικών συνιστωσών ρεύματος και τάσεως. Οι αρμονικές αυτές αφενός προσαυξάνουν τη συνολική κυκλοφορούσα άεργο ισχύ στο ηλεκτρικό δίκτυο αλλά επιπλέον δημιουργούν προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Έτσι ο «ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος» που παράγεται επηρεάζει αρνητικά όλες τις ευαίσθητες ηλεκτρονικές διατάξεις –πρωτίστως τα κυκλώματα ελέγχου των ίδιων των ηλεκτρονικών ισχύος – ενώ σε περιπτώσεις στρατιωτικών εφαρμογών αυξάνει τα επίπεδα της ηλεκτρομαγνητικής υπογραφής των πλοίων. Τέλος, είναι δυνατόν οι αρμονικές παραμορφώσεις των ηλεκτρικών μεγεθών να διεγείρουν ιδιοσυχνότητες ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων, όπως είναι τα φαινόμενα σιδηροσυντονισμού στους δρομείς των σύγχρονων γεννητριών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η σειρά αυτή των προβλημάτων λόγω της πλήρους μετατροπής σε εξηλεκτρισμένα συστήματα πλοίου αντιμετωπίζεται με εξειδικευμένες αναλύσεις και μελέτες κυρίως κατά της φάση της σχεδίασης τους ηλεκτρολογικού συστήματος. [84]

3.2 Σύστημα πρόωσης AC

Στη σημερινή εποχή υπάρχει έντονη κουβέντα για την ανάγκη μείωσης των εκπομπών CO₂, προς αυτή την κατεύθυνση είναι και η εφαρμογή των ηλεκτροκινητήρων σε υβριδικά οχήματα αλλά και σε πλοία πιο πρόσφατα, μειώνοντας έτσι τις εκπομπές αυτές λόγω της χαμηλότερης χρήσης ορυκτών καυσίμων. Η τάση αυτή ειδικά στα μεγάλα πλοία αναμένεται να επεκταθεί ακόμη περισσότερο. Τα συγκεκριμένα συστήματα είναι συνήθη ειδικά σε παγοθραυστικά ή σε ερευνητικά ωκεανογραφικά πλοία, ενώ ακόμη έχουν υιοθετηθεί και για χρήση σε μεγάλα κρουαζιερόπλοια που δίνεται έμφαση στο κόστος αλλά και στην αθόρυβη λειτουργία. [87]

Οι πιο αποδοτικές εφαρμογές των συγκεκριμένων μηχανών είναι στην κλίμακα ισχύος 100 MW, οι πιο πρόσφατες έρευνες όμως στον τομέα εστιάζουν σε χαμηλότερα εύρη ισχύος της τάξεως των 10 MW. Ένα χαρακτηριστικό σύστημα πρόωσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.4. Το κύριο πλεονέκτημα της εν λόγω διάταξης είναι ότι δεν περιλαμβάνει επιπλέον μετατροπές ενέργειας, μειώνοντας έτσι τις απώλειες και μειώνοντας τον αριθμό των απαιτούμενων μετασχηματιστών σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα Diesel – Electric. Έτσι εξοικονομείται όγκος, μάζα και επιτυγχάνεται χαμηλότερο κόστος συστήματος, το οποίο συνδυάζεται με υψηλότερη απόδοση. [82]









Εικόνα 3.4: Σχηματική απεικόνιση συστήματος πρόωσης AC [82]

Γενικότερα από άποψης γεννήτριας τα δυο συστήματα είναι παρόμοια. Το συγκεκριμένο σύστημα προσφέρει καλύτερη κατανάλωση καυσίμου και ελευθερία κατά το σχεδιασμό του, μιας και δεν υπάρχει κάποια ιδιαίτερη απαίτηση για διατήρηση συγκεκριμένης συχνότητας ή για τη διατήρηση της ονομαστικής τάσης προς τα τερματικά των γεννητριών. Το συγκεκριμένο σύστημα περιλαμβάνει μετασχηματιστές AC-DC-AC, ενώ στους μετασχηματιστές πλήρους ισχύος υπάρχει δυνατότητα διατήρησης σταθερής της τάσης AC στα τερματικά. [82]

Ο ακόλουθος Πίνακας 3.1 παρουσιάζει ορισμένες από τις συνήθεις διατάξεις συστημάτων πρόωσης AC με τα κύρια μέρη που τις απαρτίζουν.

Πίνακας 3.1: AC συστήματα πρόωσης και τα κύρια μέρη τους [88]

Συστήματα	Κύρια μέρη
 <p data-bbox="566 705 758 739"><i>Δίδυμης έλικας</i></p>	<p data-bbox="1061 459 1316 593">3 γεννήτριες 1 ηλεκτροκινητήρας 1 κύριος πίνακας διανομής</p>
 <p data-bbox="574 1137 750 1171"><i>Μονής έλικας</i></p>	<p data-bbox="1061 873 1316 1041">4 γεννήτριες 2 ηλεκτροκινητήρες 2 κύριοι πίνακες διανομής 1 δίδυμος μειωτήρας</p>
 <p data-bbox="574 1574 750 1608"><i>Μονής έλικας</i></p>	<p data-bbox="1077 1310 1300 1478">3 γεννήτριες 2 διαδοχικούς ηλεκτροκινητήρες 1 κύριος πίνακας διανομής</p>
 <p data-bbox="574 2020 750 2054"><i>Διπλού άκρου</i></p>	<p data-bbox="1061 1765 1316 1904">4 γεννήτριες 2 ηλεκτροκινητήρες 2 κύριοι πίνακες διανομής</p>

 <p><i>Δίδυμης έλικας</i></p>	<p>4 γεννήτριες 2 ηλεκτροκινητήρες 2 κύριοι πίνακες διανομής</p>
 <p><i>Τριπλής έλικας</i></p>	<p>4 γεννήτριες 3 ηλεκτροκινητήρες + 1 βοηθητικός μικρότερης ισχύος 2 κύριοι πίνακες διανομής</p>

Πλεονεκτήματα

Υιοθετώντας ένα σύστημα πρόωσης DC έχει αρκετά πλεονεκτήματα, όπως: [87]
Απλοποίηση του συστήματος πρόωσης, συμπεριλαμβανομένου του πολύπλοκου μειωτήρα που χρησιμοποιείται για την κίνηση του πλοίου.

- (1) Για περιπτώσεις πλοίων που καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας, υπάρχει σημαντική μείωση στα οικονομικά κόστη συντήρησης και επισκευής κατά τη διάρκεια ζωής του μηχανών.
- (2) Ελαχιστοποίηση του θορύβου επί του πλοίου.
- (3) Βελτιωμένη απόδοσης καυσίμου κατά τη διάρκεια ταξιδιών, λόγω της δυνατότητας συνεχούς διατήρησης της περιστροφική ταχύτητας.

Μειονεκτήματα

Τα μειονεκτήματα των συγκεκριμένων περιλαμβάνουν: [87]

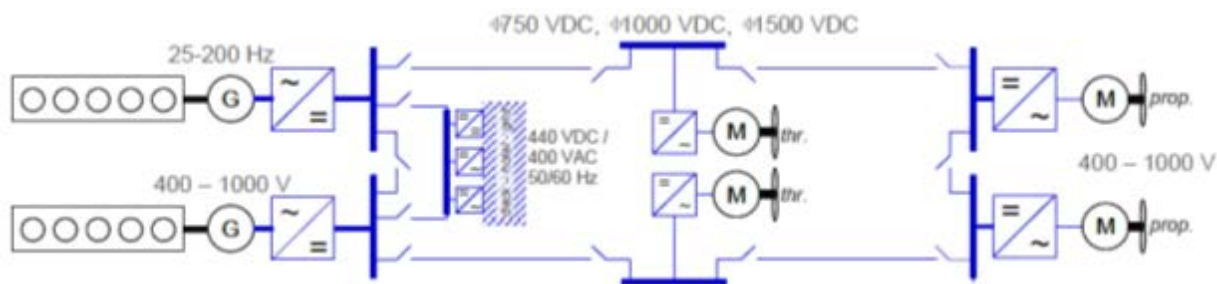
- ❖ Υψηλό αρχικό κόστος, ειδικά σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα πρόωσης που βασίζονται σε μηχανές εσωτερικής καύσης.
- ❖ Αυξημένες απώλειες μετατροπής ενέργειας
- ❖ Μεγαλύτερος όγκος συστήματος λόγω του μεγαλύτερου μεγέθους των κύριων μερών του.

3.3 Σύστημα πρόωσης DC

Στην απλή μορφή του το DC δίκτυο επί του πλοίου είναι μια επέκταση των ήδη υπάρχοντων πολλαπλών DC συνδέσεων σε όλα τα συστήματα πρόωσης και προώθησης, το οποίο ικανοποιεί περισσότερο από 80% της ηλεκτρικής κατανάλωσης ισχύος σε πλοία ηλεκτροπρόωσης. Η επέκταση αυτή σημαίνει ότι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε όλα τα εξαρτήματα των υπάρχοντων ηλεκτρικών πλοίων, όπως γεννήτριες AC, αντιστροφείς, κινητήρες κ.λπ. Δεν απαιτούνται πλέον μετασχηματιστές και άρα το σύστημα ισχύος και πρόωσης είναι πιο ευέλικτο. Οι βασικές καινοτομίες του DC δικτύου επί του πλοίου είναι ο σχεδιασμός και ο έλεγχος του συστήματος προστασίας και η βελτιστοποιημένη ενεργειακή ροή. [89]

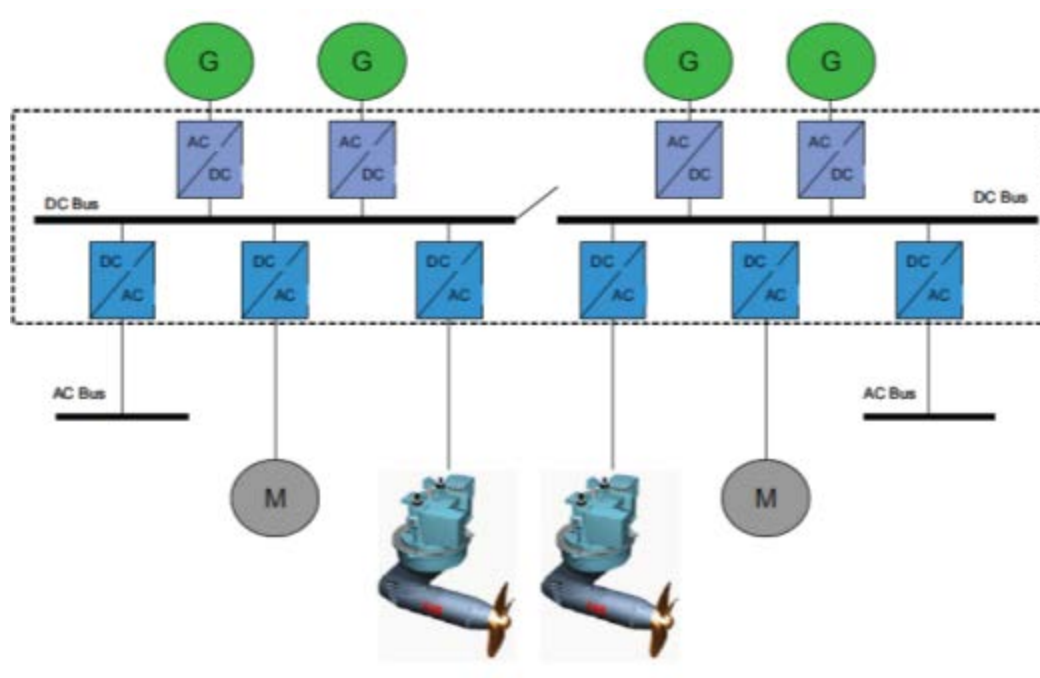
Ο κυρίαρχος τύπος πρωτεύουσας ενέργειας για τις εγκαταστάσεις πρόωσης είναι η ηλεκτρική οδήγηση. Πρακτικά κάθε συσκευή πρόωσης που εγκαθίσταται σε νέα πλοία οδηγείται από ηλεκτρικό κινητήρα. Οι συσκευές οδήγησης που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι:

- DC μετατροπείς (ή ελεγχόμενοι ανορθωτές πυριτίου) για κινητήρες DC
- Κυκλομετατροπείς για AC κινητήρες, συνήθως για σύγχρονους κινητήρες
- Αντιστροφείς πηγής ρεύματος για AC κινητήρες (σύγχρονοι κινητήρες)
- Αντιστροφείς πηγής τάσης για AC κινητήρες, δηλ. ασύγχρονους, σύγχρονους και κινητήρες μόνιμων μαγνητών. [89]

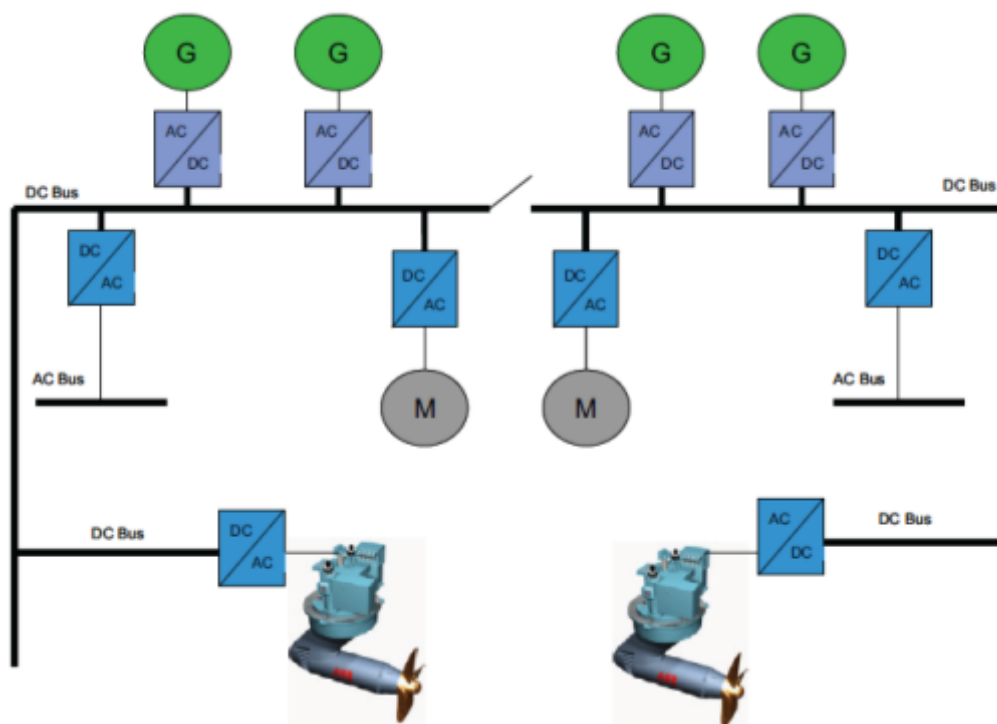


Εικόνα 3.5: Σχηματική απεικόνιση ενός DC συστήματος [82]

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι σχεδιασμού του DC δικτύου επί του πλοίου από μια προσέγγιση πολλαπλής οδήγησης (Εικόνα 3.6) σε ένα πλήρως διανεμημένο σύστημα (Εικόνα 3.7). Στην προσέγγιση πολλαπλής οδήγησης όλα τα στοιχεία μετατροπής είναι τοποθετημένα στην ίδια γραμμή, στην ίδια χωρική διάταξη όπως οι σημερινοί κύριοι πίνακες AC. Για το διανεμημένο σύστημα κάθε μετατροπέας είναι τοποθετημένος κοντά σε μια πηγή ισχύος ή σε φορτίο.



Εικόνα 3.6: DC δίκτυο επί του πλοίου (Προσέγγιση πολλαπλής οδήγησης) [90]



Εικόνα 3.7: DC δίκτυο επί του πλοίου (Διεσπαρμένη προσέγγιση) [90]

Σχεδιαστικές ελευθερίες

Καθώς δεν είναι απαραίτητο να ελέγχεται η συχνότητα στα τερματικά είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν διάφορες γεννήτριες: [82,89]

- ασύγχρονες (χαμηλού κόστους, αλλά ελαφρώς χαμηλότερης απόδοσης, βαριά κατασκευή)
- σύγχρονες (πιο ακριβές, χαμηλότερη απόδοση από γεννήτριες μόνιμων μαγνητών)
- σύγχρονες μόνιμων μαγνητών (υψηλή απόδοση (μέχρι 98%), ακριβές)

Η αύξηση της συχνότητας οδηγεί σε μείωση της μάζας και των διαστάσεων της γεννήτριας, για δεδομένη ισχύ. Αν υπάρχουν μετασχηματιστές στο κύκλωμα, οι διαστάσεις τους μειώνονται επίσης αν χρησιμοποιηθούν μεγαλύτερες συχνότητες από ό,τι συνήθως. Οι σύγχρονες γεννήτριες και οι σύγχρονες γεννήτριες μόνιμων μαγνητών, αν χρησιμοποιηθούν σε τέτοιες διατάξεις, δε χρειάζεται να περιέχουν τύλιγμα απόσβεσης στο ρότορα. Δεν παράγεται παλμός ροπής και συνεπώς δεν υπάρχει διασκορπισμός ενέργειας στο τύλιγμα απόσβεσης, εξοικονομώντας ενέργεια.

Τα βασικά πλεονεκτήματα της προσέγγισης αυτής είναι τα ακόλουθα:

- Έως 20% εξοικονόμηση καυσίμου αν αξιοποιηθούν πλήρως όλες οι δυνατότητες, συμπεριλαμβανομένης της ενεργειακής αποθήκευσης και των μηχανών μεταβλητής ταχύτητας.
- Μειωμένες ανάγκες συντήρησης για πιο αποδοτική λειτουργία
- Βελτιωμένη δυναμική απόκριση, κάνοντας χρήση της αποθήκευσης ενέργειας, πράγμα το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερη απόδοση του συστήματος με χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου.
- Πιο ευέλικτη τοποθέτηση των ηλεκτρικών συνιστωσών.
- Διαθέτει πλατφόρμα συστήματος που μπορεί να υποστηρίξει δυνατότητες αναδιάταξης για να προσαρμοστεί σε μελλοντικές πηγές ενέργειας.
- Προστασία και ασφάλεια. Η φιλοσοφία της προστασίας βασίζεται στο συνδυασμό ασφαλειών τήξης και ελεγχόμενων διακοπών. Εν συντομία, οι ασφαλείες τήξης χρησιμοποιούνται για την απομόνωση των αντιστροφών, σε περιπτώσεις σοβαρούς σφάλματος. [82,89]

Τα προβλήματα ποιότητας ισχύος σε συστήματα πλοίου μπορούν να ομαδοποιηθούν ως ακολούθως: [91]

- Πρόωση: Κύριος ή βοηθητικός κινητήρας πρόωσης στην εκκίνηση και στη λειτουργία σταθερής κατάστασης σε σύζευξη με τα ηλεκτρονικά μετατροπής ισχύος.
- Μεταβαλλόμενες υπερτάσεις και υπερρεύματα
- Αρμονικές διαταραχές που εισάγονται από τη χρήση συσκευών ηλεκτρονικών ισχύος.

Συνέπειες από τα προβλήματα ποιότητας ισχύος στα πλοία είναι: [91] η μη κατάλληλη λειτουργία ευαίσθητου ηλεκτρονικού εξοπλισμού λόγω της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής,

- αυξημένες απώλειες άεργου ισχύος
- αυξημένες τάσεις μόνωσης ή καταστροφή εξοπλισμού
- αυξημένα φαινόμενα συντονισμού
- αυξημένο ηλεκτρομαγνητικό ίχνος.

3.4 Συστήμα πρόωσης AC μεταβλητής συχνότητας

Γενικά στοιχεία

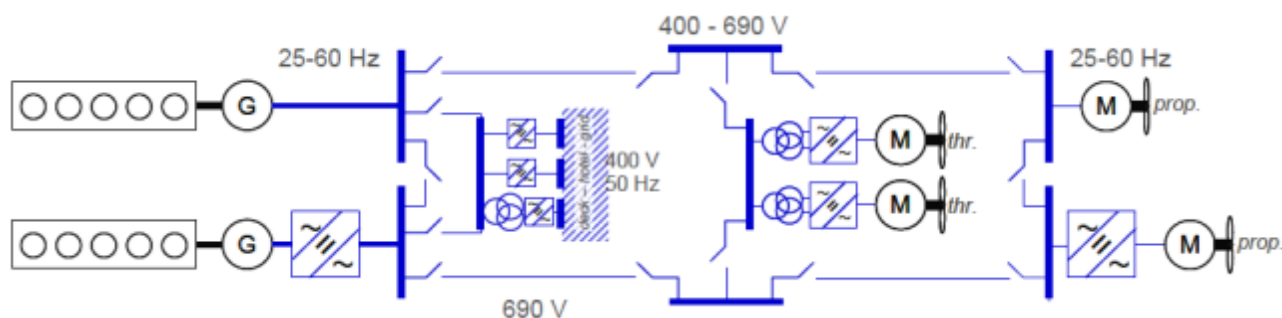
Η ιδέα αυτή είναι μια τροποποίηση του συστήματος AC. Η διάταξη αυτή βελτιώθηκε, εξαλείφοντας το τμήμα των μετατροπέων ισχύος, οδηγώντας σε υψηλότερη απόδοση σε σχέση με το σύστημα DC. Παρουσιάζει όμως και σημαντικά μειονεκτήματα. Η διαμόρφωση αυτή επιτρέπει τη μείωση των απωλειών πρόωσης στο μισό, αλλά απαιτείται πρόσθετος ειδικός ηλεκτρικός εξοπλισμός. [82, 87]

Ο έλεγχος μεταβλητής ισχύος αποτελεί μια μοντέρνα τάση, η οποία χρησιμοποιείται για να μεταβάλει την ταχύτητα και τη συχνότητα του κινητήρα για το σύστημα ηλεκτροπρόωσης στον τομέα της ναυτιλίας. Η εξέλιξη των ημιαγωγών ισχύος, όπως τα IGBT, έχει αυξήσει την ακρίβεια και την απόδοση της μετατροπής και του ελέγχου της παροχής ηλεκτρικής ισχύος. [87]

Συστήματα

Το σύστημα γεννήτριας μεταβλητής συχνότητας AC πρέπει να διαθέτει ένα τύλιγμα απόσβεσης, ώστε να εμποδίζεται η μετάδοση των παλμών ροπής στον άξονα. Το τύλιγμα απόσβεσης σε συνδυασμό με τους παλμούς ροπής προκαλούν πρόσθετες απώλειες, που δε μπορούν να ληφθούν υπόψη στην εκτίμηση της απόδοσης. Επίσης υπάρχει πρόβλημα στη μεταβολή της συχνότητας του συστήματος. [82]

Χρησιμοποιώντας τη γεννήτρια χωρίς μετατροπέα είναι εύκολο να μεταβληθεί η συχνότητα και κατά συνέπεια την ταχύτητα περιστροφής της οδήγησης πρόωσης. Αλλά όταν η άλλη γεννήτρια, που είναι συνδεδεμένη παράλληλα, τίθεται σε λειτουργία, μπορούν να δημιουργηθούν προβλήματα με τη συγχρονισμό συχνότητας της πρώτης γεννήτριας και τη συχνότητα των τερματικών του αντιστροφέα της δεύτερης γεννήτριας. Επίσης δεν πρέπει να προσαρμοστεί μόνο η συχνότητα, αλλά υπάρχει και η απαίτηση του ακριβούς συγχρονισμού της τάσης από διαφορετικές πηγές ισχύος. Είναι απαραίτητο για την αποφυγή της υπερφόρτωσης της μιας από τις γεννήτριες. Και βεβαίως η έξυπνη διαχείριση ισχύος είναι υποχρεωτική. [82]



Εικόνα 3.8: Σχηματική απεικόνιση ενός τυπικού συστήματος AC μεταβλητής συχνότητας [82]

Όλες αυτές οι απαιτήσεις οδηγούν σε σημαντική πολυπλοκότητα του συστήματος, και κατά συνέπεια επηρεάζεται η αξιοπιστία, η αποκατάσταση βλαβών, η περίοδος και η δυσκολία της συντήρησης. Η καταλληλότερη γεννήτρια για αυτό το σύστημα ισχύος είναι σύγχρονη γεννήτρια χαμηλής τάσης με τύλιγμα απόσβεσης. Ως παραλλαγή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και γεννήτρια αδρανούς αερίου, αλλά όλα τα πλεονεκτήματα που αφορούν την αυξημένη απόδοση θα αναιρεθούν και στην έξοδο θα υπάρχει ένα σύνθετο, μη αξιόπιστο σύστημα ισχύος με χαμηλή απόδοση. [82]

Πλεονεκτήματα

Υπάρχουν σημαντικά πλεονεκτήματα από τα συστήματα μεταβλητής συχνότητας σε σχέση με άλλα συστήματα. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των συστημάτων οδήγησης μεταβλητής συχνότητας (VFD) είναι η αμελητέα αρμονική διαταραχή που εμφανίζεται ειδικά όταν χρησιμοποιείται η τεχνολογία ενεργού μετωπικού άκρου (AFE). Η οδήγηση μεταβλητής συχνότητας μπορεί να λειτουργήσει και στα 4 τεταρτημόρια. Από οικονομικής σκοπιάς, το σύστημα ηλεκτροπρώωσης VFD βελτιστοποιεί επίσης την κατανάλωση καυσίμου της νηζελομηχανής, πράγμα το οποίο οδηγεί σε μείωση του λειτουργικού κόστους. [89]

➤ Πλεονεκτήματα συστημάτων AC Μεταβλητής Ισχύος

- Χαμηλή αρμονική διαταραχή (ειδικά με τη χρήση AFE)
- Υψηλός Συντελεστής Ισχύος
- Βαθμιαία κατασκευή μονάδων
- Μείωση μηχανικών τάσεων στον κινητήρα προωθητήρων
- Χαμηλότερο ρεύμα εκκίνησης από οποιοδήποτε τύπο εκκινητή
- Βέλτιστη κατανάλωση καυσίμου της νηζελομηχανής
- Διανυσματικός έλεγχος (διβάθμιοι ή πολυβάθμιοι ανορθωτές και αντιστροφείς) μέσω οπτικών ινών με χρήση IGBT

3.5 Συμπερασματικά

Η ηλεκτροπρόωση αποτελεί μία αρκετά δελεαστική επιλογή για τα πλοία έχοντας καταστεί αρκετά ικανοποιητική λύση τα τελευταία χρόνια. Αυτό συμβαίνει λόγω της εντατικής εξέλιξης όλων των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων και ειδικότερα του τομέα των διατάξεων ελέγχου των ηλεκτρικών κινητήρων και των ηλεκτρονικών ισχύος. Η έρευνα κατά την τρέχουσα περίοδο επικεντρώνεται στη μείωση του αρχικού κόστους επένδυσης αλλά και στην αύξηση των επιδόσεων του συνολικού συνδυασμού των διατάξεων που αξιοποιούνται από συστήματα ηλεκτροπρόωσης. [84]

Η σύγκριση και η τελική επιλογή των διαφόρων τύπων συστημάτων πρόωσης πρέπει να περιλαμβάνει τη σύγκριση διαφορετικών παραμέτρων όπως το βάρος, ο όγκος και η απόδοση του εκάστοτε συστήματος. Ακόμη η σύγκριση πρέπει να γίνεται σε επιλεγμένο εύρος ισχύος. Τα δύο πρώτα συστήματα που παρουσιάστηκαν (Diesel – Electric και Σύστημα πρόωσης AC) είναι καταλληλότερα για συστήματα υψηλής ισχύος, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε συστήματα μεσαίας και χαμηλής ισχύος, ενώ τα υπόλοιπα συστήματα (Σύστημα πρόωσης DC και Σύστημα πρόωσης AC μεταβλητής συχνότητας) σχεδιάζονται κυρίως για χαμηλή και μεσαία ισχύ. [82]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Παρουσίαση αποτελεσμάτων πειραματικού μέρους

4.1 Γενικά στοιχεία

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί το πειραματικό-ερευνητικό μέρος της διπλωματικής εργασίας. Όπως αναφέρεται και στην εισαγωγή, η εργασία περιλαμβάνει τη διεξαγωγή προσομοιώσεων με σκοπό τη σύγκριση των δικτύων AC και DC στο περιβάλλον ενός πλοίου μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG).

Για να επιτευχθεί η μελέτη και η σύγκριση των ηλεκτρικών δικτύων έπρεπε πρώτα να είναι διαθέσιμη η προσομοίωση αυτών. Έχοντας λοιπόν, διαθέσιμα τον ηλεκτρολογικό ισολογισμό, καθώς και το ηλεκτρολογικό διάγραμμα ενός ήδη κατασκευασμένου πλοίου LNG, επόμενο βήμα ήταν η δημιουργία των δικτύων στο περιβάλλον του Matlab/SIMULINK R2015b της εταιρίας Mathworks.

Αρχικά, χρησιμοποιώντας όλα τα διαθέσιμα στοιχεία, δημιουργήθηκε το ολοκληρωμένο δίκτυο AC το οποίο περιλαμβάνει τις γεννήτριες, το δίκτυο μεταφοράς και διανομής καθώς και τους καταναλωτές. Ειδικότερα χρησιμοποιήθηκαν μια γεννήτρια αερίου 30 MVA, δύο γεννήτριες diesel 5MVA, καλώδια μήκους 100 έως 200 μέτρων, οι καταναλωτές όπως αναφέρονται στον ισολογισμό, 2 bow thrusters 2MW συνολικά, καθώς και η κύρια προωστήρια εγκατάσταση συνολικής ισχύος 28MW (βλέπε και παραρτήματα). Στη συνέχεια επιχειρήθηκε η δημιουργία ισοδύναμου δικτύου αυτή τη φορά με τη χρήση DC. Αυτό αποτελεί πρωτοτυπία καθώς μέχρι τώρα δεν υπάρχουν ανάλογες προσπάθειες για πλοία μεγάλων ενεργειακών απαιτήσεων όπως ένα LNG. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του δικτύου είναι ίδια με του AC, με τις προσθήκες όμως των ανορθωτών καθώς και την ποιοτική αλλαγή των καλωδίων μεταφοράς (βλέπε παράρτημα).

Έχοντας λοιπόν κατασκευάσει τα παραπάνω δίκτυα επόμενο βήμα είναι η χρησιμοποίησή τους σε προσομοιώσεις για τη διεξαγωγή μετρήσεων. Σκοπός των μετρήσεων είναι η σύγκρισή τους ώστε να έχουμε μια πρώιμη πλην όμως σαφή ένδειξη για την χρησιμότητα του DC δικτύου. Πιο συγκεκριμένα αναμένεται η καλύτερη απόδοση του συστήματος του ηλεκτρικού δικτύου καθώς επιτυγχάνεται καλύτερη και πιο ομαλή λειτουργία των γεννητριών, εξαιρείται η έννοια της άεργου ισχύος και τελικά οδηγούμαστε σε λιγότερη κατανάλωση καυσίμου. Τα προηγούμενα με ακρίβεια οδηγούν τελικά σε πολλαπλά οικονομικά οφέλη.

4.2 Συλλογιστική πορεία προσομοιώσεων

Ο κύκλος λειτουργίας του πλοίου περιλαμβάνει 5 βασικές καταστάσεις και δύο έκτακτες (emergency). Αυτές οι καταστάσεις, οι βασικοί καταναλωτές καθώς και οι απαιτήσεις τους σε ισχύ εμφανίζονται αναλυτικά στον ισολογισμό ηλεκτρικής ενέργειας. Στους ακόλουθους πίνακες φαίνονται συνοπτικά οι απαιτήσεις :

Πίνακας 4.1: Ενεργός ισχύς (KW) των βασικών συστημάτων για όλες τις διαδικασίες του πλοίου

	ΕΝΕΡΓΟΣ(P)						
	SEAGOING HFO LADEN	SEAGOING GAS LADEN	PORT IN/OUT	CARGO LOAD	CARGO UNLOAD	EMERGENCY	EMERGENCY FIRE
PROPULSION PLANT	27402.96	27402.96	5620.56	0.00	0.00	0.00	0.00
GENERATING PLANT	22.72	12.80	46.72	45.92	45.92	0.00	0.00
WATER HANDLING EQUIPMENT	407.42	441.95	423.39	358.19	358.19	0.00	0.00
OIL HANDLING EQUIPMENT	39.12	1.54	39.12	18.79	18.79	0.00	0.00
	62.33	42.63	39.61	25.89	25.89	0.00	0.00
BOILER PLANT	30.72	30.72	50.96	66.72	66.72	0.00	0.00
OTHER EQUIPMENT IN MACHINERY SPACE	222.73	222.73	222.73	122.47	122.47	0.00	0.00
	119.17	119.17	133.45	94.29	94.29	0.00	0.00
CARGO HANDLING EQUIPMENT	81.00	804.63	822.28	1992.24	4401.72	0.00	0.00
	0.00	30.24	0.00	30.24	30.24	0.00	0.00
SHIP SYSTEM	0.00	0.00	0.00	635.29	635.29	0.00	0.00
	111.53	95.28	95.28	95.28	95.28	0.00	113.52
MANOEUVRING EQUIPMENT	26.88	26.88	1911.97	4.74	4.74	26.88	26.88
DECK MACHINERY	0.00	0.00	333.36	0.00	0.00	0.00	0.00
AIR COND. & VENTILATION EQUIPMENT	406.55	406.55	406.55	402.20	402.20	0.00	0.00
MISCELLANEOUS EQUIPMENT	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.00	0.00
	101.34	101.34	101.34	101.34	101.34	4.30	0.00
LIGHTING, NAV & CONTROL EQUIPMENT	141.50	141.50	149.00	134.50	134.50	60.00	60.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.50	5.50

Πίνακας 4.2: Φαινόμενη ισχύς(KVA) των βασικών συστημάτων για όλες τις διαδικασίες του πλοίου

	ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ(S)						
	SEAGOING HFO	SEAGOING GAS	PORT IN/OUT	CARGO LOAD	CARGO UNLOAD	EMERGENCY	EMERGENCY FIRE
PROPULSION PLANT	34253.70	34253.70	7025.70	0.00	0.00	0.00	0.00
GENERATING PLANT	28.40	16.00	58.40	57.40	57.40	0.00	0.00
WATER HANDLING EQUIPMENT	509.28	552.43	529.23	447.73	447.73	0.00	0.00
OIL HANDLING EQUIPMENT	48.91	1.92	48.91	23.49	23.49	0.00	0.00
	77.91	53.29	49.51	32.37	32.37	0.00	0.00
BOILER PLANT	38.40	38.40	63.70	83.40	83.40	0.00	0.00
OTHER EQUIPMENT IN MACHINERY SPACE	278.42	278.42	278.42	153.09	153.09	0.00	0.00
	148.96	148.96	166.82	117.86	117.86	0.00	0.00
CARGO HANDLING EQUIPMENT	101.25	1005.79	1027.85	2490.30	5502.15	0.00	0.00
	0.00	37.80	0.00	37.80	37.80	0.00	0.00
SHIP SYSTEM	0.00	0.00	0.00	794.11	794.11	0.00	0.00
	139.42	119.10	119.10	119.10	119.10	0.00	141.90
MANOEUVRING EQUIPMENT	33.59	33.59	2389.96	5.92	5.92	33.59	33.59
DECK MACHINERY	0.00	0.00	416.70	0.00	0.00	0.00	0.00
AIR COND. & VENTILATION EQUIPMENT	508.19	508.19	508.19	502.75	502.75	0.00	0.00
MISCELLANEOUS EQUIPMENT	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.00	0.00
	126.68	126.68	126.68	126.68	126.68	5.38	0.00
LIGHTING, NAV & CONTROL EQUIPMENT	176.88	176.88	186.25	168.13	168.13	75.00	75.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.88	6.88

Πίνακας 4.3: Άεργος ισχύς(KVAr) των βασικών συστημάτων για όλες τις διαδικασίες του πλοίου

	ΑΕΡΓΟΣ(Q)						
	SEAGOING HFO LADEN	SEAGOING GAS LADEN	PORT IN/OUT	CARGO LOAD	CARGO UNLOAD	EMERGENCY	EMERGENCY FIRE
PROPULSION PLANT	20552.22	20552.22	4215.42	0.00	0.00	0.00	0.00
GENERATING PLANT	17.04	9.60	35.04	34.44	34.44	0.00	0.00
WATER HANDLING EQUIPMENT	305.57	331.46	317.54	268.64	268.64	0.00	0.00
OIL HANDLING EQUIPMENT	29.34	1.15	29.34	14.10	14.10	0.00	0.00
	46.75	31.98	29.71	19.42	19.42	0.00	0.00
BOILER PLANT	23.04	23.04	38.22	50.04	50.04	0.00	0.00
OTHER EQUIPMENT IN MACHINERY SPACE	167.05	167.05	167.05	91.85	91.85	0.00	0.00
	89.37	89.37	100.09	70.71	70.71	0.00	0.00
CARGO HANDLING EQUIPMENT	60.75	603.47	616.71	1494.18	3301.29	0.00	0.00
	0.00	22.68	0.00	22.68	22.68	0.00	0.00
SHIP SYSTEM	0.00	0.00	0.00	476.47	476.47	0.00	0.00
	83.65	71.46	71.46	71.46	71.46	0.00	85.14
MANOEUVRING EQUIPMENT	20.16	20.16	1433.97	3.55	3.55	20.16	20.16
DECK MACHINERY	0.00	0.00	250.02	0.00	0.00	0.00	0.00
AIR COND. & VENTILATION EQUIPMENT	304.91	304.91	304.91	301.65	301.65	0.00	0.00
MISCELLANEOUS EQUIPMENT	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.00	0.00
	76.01	76.01	76.01	76.01	76.01	3.23	0.00
LIGHTING, NAV & CONTROL EQUIPMENT	106.13	106.13	111.75	100.88	100.88	45.00	45.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.13	4.13

Τα δεδομένα για την ενεργό ισχύ(P) πάρθηκαν από τον ισολογισμό του πλοίου. Τα ποσά φαινόμενης(S) και άεργου(Q) ισχύος που κυκλοφορούν στο δίκτυο υπολογίστηκαν στο MICROSOFT EXCEL. Γενικά ισχύει, $S=P/p_f$ και $Q=\sqrt{(S^2-P^2)}$. Συντελεστή ισχύος θεωρήσαμε $\cos\phi =0.8$.

Με βάση τα παραπάνω εφοδιάστηκαν με δεδομένα τα δομικά στοιχεία των δικτύων.

Για να έχει νόημα και αξία η προσομοίωση πρέπει να ανταποκρίνεται στις πραγματικές συνθήκες και απαιτήσεις, έτσι με βάση τα παραπάνω στηθήκαν δύο σενάρια προς μοντελοποίηση, το PORTOUT_SEAGOING και το CARGO_UNLOAD_LOAD. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό το πρώτο περιλαμβάνει την έξοδο του πλοίου από το λιμάνι (με τη χρήση bowthrusters) και εν συνεχεία το ταξίδι στην ανοιχτή θάλασσα. Αυτό το σενάριο είναι αρκετά αντιπροσωπευτικό καθώς περιλαμβάνει αρχικά χαμηλή απαίτηση ισχύος και στη συνέχεια αύξηση της σε πού υψηλές τιμές, διαδικασία που αποτελεί πολύ καλό έλεγχο για τις αντοχές των δικτύων. Το δεύτερο σενάριο ουσιαστικά αναφέρεται στην διαδικασία φορτοεκφόρτωσης του πλοίου. Εκεί οι απαιτήσεις είναι αρκετά πιο μικρές άρα αποτελεί πολύ καλή ένδειξη για τη συμπεριφορά του δικτύου σε χαμηλότερες τιμές ισχύος, ενώ πάλι εμφανίζονται ανάγκες αυξομείωσης της.

Με βάση το παραπάνω μοτίβο σχεδιάστηκαν τελικά τέσσερα αρχικά δίκτυα, δύο για κάθε ένα σενάριο ένα σε AC και ένα σε DC. Μια βασική ανάγκη που προέκυψε στη πορεία ήταν η χρήση λιγότερων γεννητριών από αυτές που διαθέτουν τα συστήματα, έτσι δημιουργήθηκαν επιπλέον μοντέλα με λιγότερες γεννήτριες ώστε να γίνει εφικτή η παρακολούθηση της συμπεριφοράς των συστημάτων σε διάφορες μορφές λειτουργίας τους.

Αυτά τα μοντέλα έτρεξαν και δώσανε τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε ακόλουθη ενότητα, σαφώς και τέτοιες διαδικασίες είναι δυναμικές επομένως όπου έχει γίνει διαφοροποίηση θα τονιστεί.

4.3 Περιγραφή διαδικασίας προσομοίωσης

Στην παρούσα ενότητα θα περιγραφεί συνοπτικά η διαδικασία προσομοιώσεων που ακολουθήθηκε στο SIMULINK του προγράμματος MATLAB. Οι καταστάσεις λειτουργίας του πλοίου είναι η εκφόρτωση και φόρτωσή του που θα την ονομάσουμε «CARGO_UNLOAD_LOAD» και η πορεία στην θάλασσα με τους αντίστοιχους ελιγμούς που απαιτούνται για την έξοδο από το εκάστοτε λιμάνι, την οποία θα την ονομάσουμε «PORTOUT_SEAGOING». Τα εξεταζόμενα δίκτυα για την παραγωγή της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα AC και ένα DC. Επίσης σε κάθε κατάσταση λειτουργίας με το αντίστοιχο εξεταζόμενο δίκτυο χρησιμοποιήθηκαν 1, 2 και 3 γεννήτριες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα προηγούμενα σενάρια προσομοιώσεων τα παρουσιάζει ο Πίνακας 4.4.

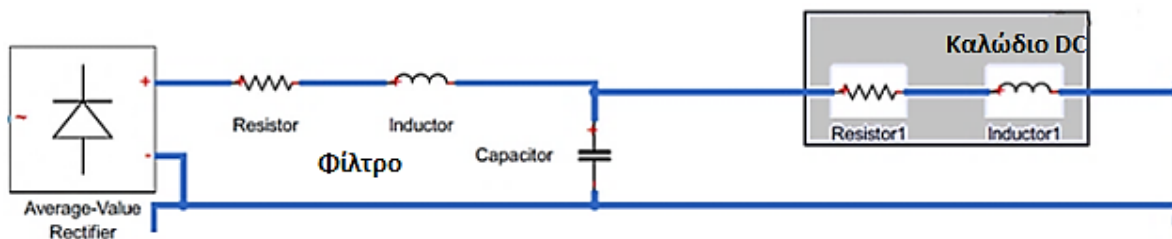
Πίνακας 4.4: Παρουσίαση των σεναρίων προσομοίωσης στο SIMULINK

A/A	Κατάσταση λειτουργίας	Δίκτυο	Αριθμός γεννητριών
1	CARGO_UNLOAD_LOAD	AC	3
2	CARGO_UNLOAD_LOAD	AC	2
3	CARGO_UNLOAD_LOAD	AC	1
4	CARGO_UNLOAD_LOAD	DC	3
5	CARGO_UNLOAD_LOAD	DC	2
6	CARGO_UNLOAD_LOAD	DC	1
7	PORTOUT_SEAGOING	AC	3
8	PORTOUT_SEAGOING	AC	2
9	PORTOUT_SEAGOING	AC	1
10	PORTOUT_SEAGOING	DC	3
11	PORTOUT_SEAGOING	DC	2
12	PORTOUT_SEAGOING	DC	1

Το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας AC περιλαμβάνει μια κύρια γεννήτρια αερίου φαινόμενης ισχύος 30MVA και δυο βοηθητικές γεννήτριες Diesel φαινόμενης ισχύος 5MVA. Το σύστημα διασυνδέεται με Port-Forward καλώδια, ενώ υπάρχει και ένας Υ-Δ μετασχηματιστής 6600/450V πριν τα φορτία της εκάστοτε κατάστασης λειτουργίας. Για την ενεργοποίηση ροής του κάθε διαφορετικού είδους φορτίου (LOAD – AVERAGE -

UNLOAD) υπάρχει ένας διακόπτης κυκλώματος. Στη λειτουργία SEAGOING τα φορτία (καταναλωτές) είναι οι διάφορες επιμέρους διαδικασίες που απαιτούνται για την ομαλή λειτουργία του πλοίου, όπως BOILER PLANT, OIL HANDLING, EQ DECK MACHINERY κ.α., οι οποίες ενεργοποιούνται με ξεχωριστό διακόπτη κυκλώματος πριν από κάθε ομάδα λειτουργιών. Ακόμη στις προσομοιώσεις που διεξήχθησαν αφαιρούνταν διαδοχικά από 1 γεννήτρια ξεκινώντας από την κύρια, ώστε να διαπιστωθεί η απόκριση των υπόλοιπων στο να τροφοδοτήσουν με επιτυχία και σταθερότητα το εκάστοτε απαιτούμενο φορτίο.

Το δίκτυο DC φέρει τις ίδιες γεννήτριες με το δίκτυο AC και το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας τροφοδοτεί αντίστοιχους καταναλωτές. Η διαφοροποίηση βρίσκεται στη χρησιμοποίηση ανορθωτή πριν το κύκλωμα του φορτίου των καταναλωτών. Στην έξοδο του κυκλώματος του ανορθωτή υπάρχει αντίσταση, επαγωγέας σε σειρά, πυκνωτής σε παράλληλη σύνδεση, τα οποία αποτελούν φίλτρο εξάλειψης αρμονικών, και το DC καλώδιο που τροφοδοτεί τα επιμέρους φορτία των καταναλωτών. Τα προηγούμενα παρουσιάζονται παραστατικά στην Εικόνα 4.1 που δείχνει τη συνδεσμολογία του δικτύου DC.



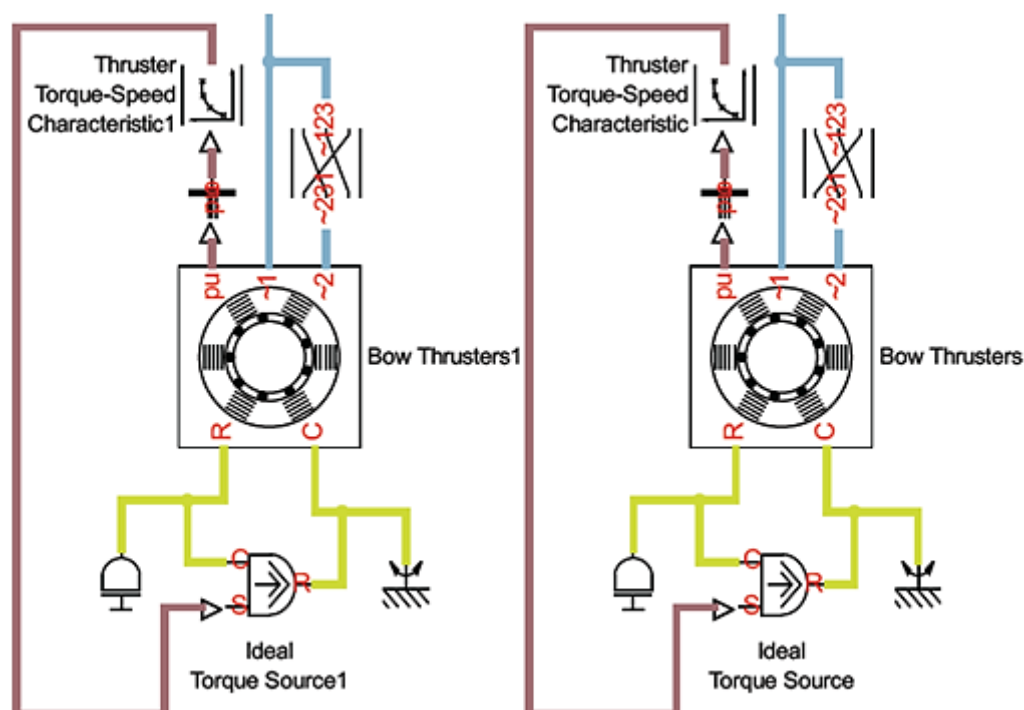
Εικόνα 4.1: Το κύκλωμα του ανορθωτή με τα αντίστοιχα κύρια μέρη του που χρησιμοποιήθηκε στο δίκτυο DC

Στον ακόλουθο πίνακα παρατίθενται τα χαρακτηριστικά μεγέθη λειτουργίας του δικτύου διανομής DC.

Πίνακας 4.5: Χαρακτηριστικά μεγέθη λειτουργίας του κυκλώματος του ανορθωτή DC

V dc (κύκλωμα)	5300V
R γ (αντίσταση 1)	0.01 Ohm
L γ (επαγωγέας 1)	0.226 mH
R φίλτρου (αντίσταση)	0.075 Ohm
L φίλτρου (επαγωγέας)	0.5 mH
C φίλτρου (πυκνωτής)	2.3 mF

Επίσης στην κατάσταση λειτουργίας PORTOUT ενεργοποιείται το κύκλωμα των Bow Thrusters με τον δικό του διακόπτη κυκλώματος ώστε να γίνουν οι απαραίτητοι ελιγμοί κατά την είσοδο ή την έξοδο του πλοίου από το εκάστοτε λιμάνι. Η Εικόνα 4.2 παρουσιάζει τη συνδεσμολογία και τη διάταξη του κυκλώματος των Bow Thrusters όπως σχεδιάστηκαν στο SIMULINK για τη διεξαγωγή προσομοιώσεων.



Εικόνα 4.2: Σχηματική απεικόνιση των 2 bow thrusters (2 MW) που χρησιμοποιήθηκαν στο SIMULINK

Τέλος θα παρουσιάσουμε την κατανομή ενεργού ισχύος για τις δυο καταστάσεις λειτουργίας που μελετήθηκαν. Έτσι έχουμε τα ακόλουθα χρονικά τμήματα που διεξήχθη η προσομοίωση, με την αντίστοιχη ενεργό ισχύ που τροφοδοτείται και το αντίστοιχο φορτίο ή λειτουργία.

- Στην κατάσταση λειτουργίας PORTOUT_SEAGOING έχουμε:

Διάστημα 0-5 s : BOW THRUSTER = 1911 kW + MOTOR = 5621 kW

5-20 s : MOTOR = 27403 kW

- Στην κατάσταση λειτουργίας CARGO_UNLOAD_LOAD έχουμε:

0-9 s : UNLOAD CARGO= 6191 kW

9-11 s : AVERAGE

11-20 s : LOAD CARGO= 3781 kW

4.4 Αντιμετώπιση δυσκολιών

Τα νεότευκτα LNG carriers στην πλειοψηφία τους διαθέτουν μοντέρνες γεννήτριες διπλού καυσίμου, πράγμα που πρέπει να διαθέτουν και τα υπό σχεδίαση μοντέλα ώστε να ακολουθούν τις επιταγές της τεχνολογίας. Πρώτη πρόκληση λοιπόν ήταν η ενσωμάτωση στα δίκτυα γεννητριών διπλού καυσίμου. Καθώς δεν υπάρχουν τέτοιες διαθέσιμες στις βιβλιοθήκες του SIMULINK.

Χρησιμοποιήθηκε η διάταξη με τρεις γεννήτριες, μία αερίου 30MVA και δύο diesel 5MVA έκαστη. Έτσι στο σύστημα εισήχθη η έννοια του διπλού καυσίμου.

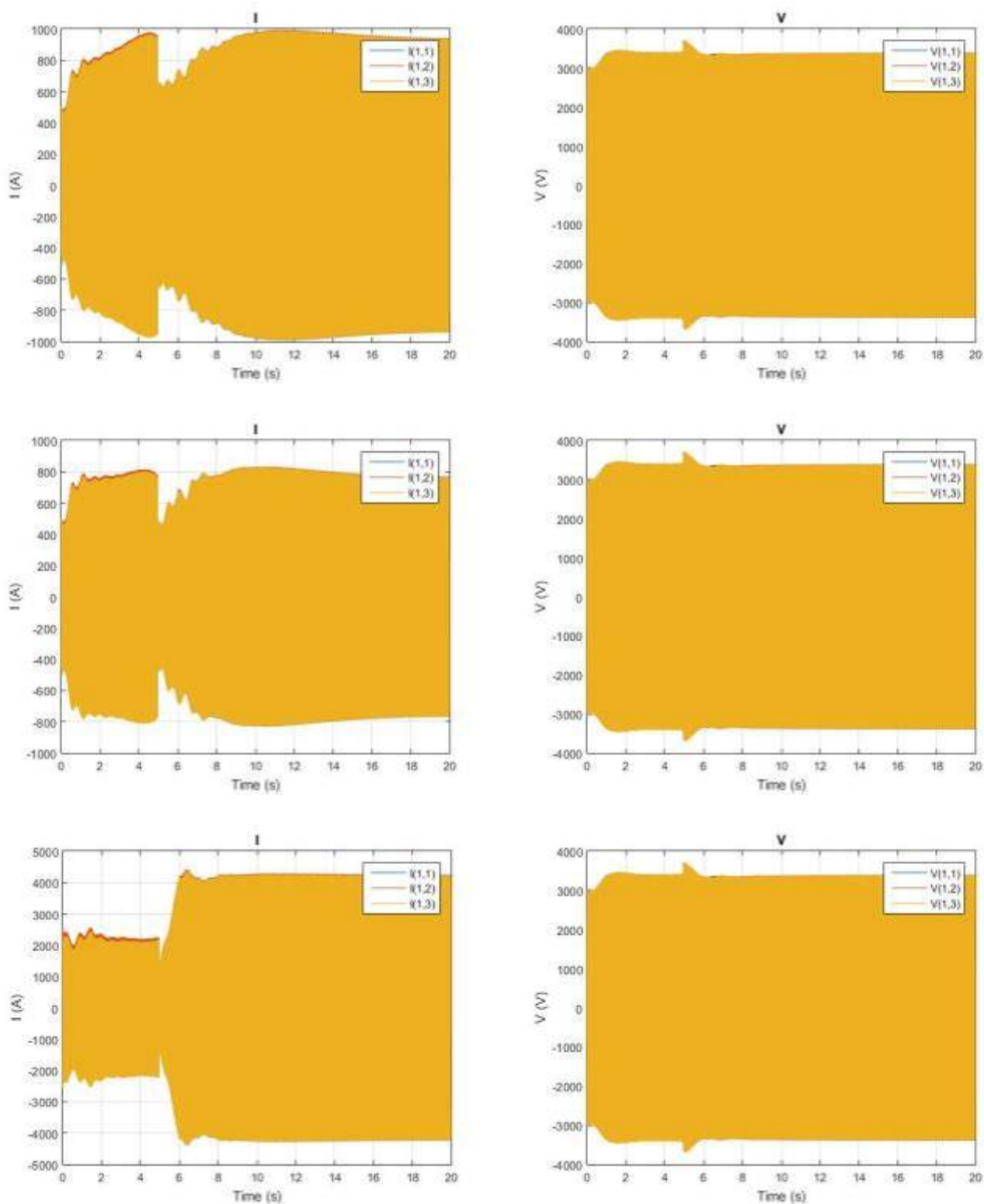
Μια ακόμα έλλειψη των βιβλιοθηκών του SIMULINK εμφανίστηκε στη συνέχεια αφού δεν υπήρχαν διαθέσιμα στοιχεία για ασύγχρονες μηχανές μεγάλης ισχύος (πάνω από 10MW) που θα χρησιμοποιούνταν ως μηχανές πρόωσης. Αντί αυτών στο δίκτυο χρησιμοποιήθηκαν καταναλωτές φορτιού και όχι μηχανικής ενέργειας. Πράγμα όμως που δεν επηρέασε καθόλου τα αποτελέσματα καθώς ήταν διαθέσιμα όλα τα στοιχεία των ηλεκτρικών ισολογισμών.

4.5 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

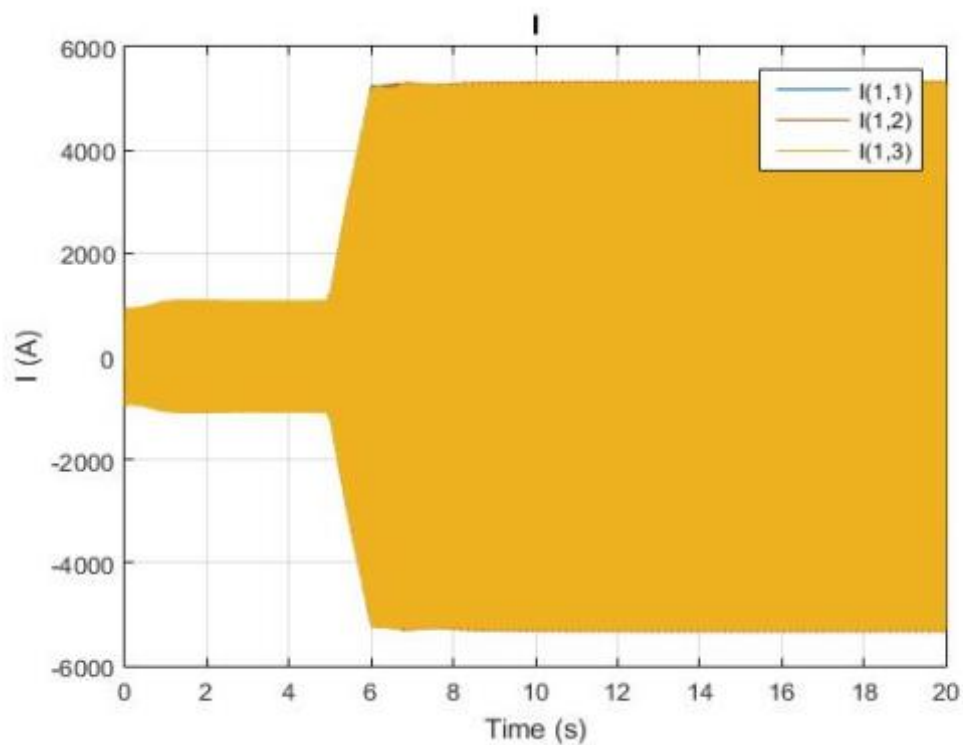
Στα ακόλουθα διαγράμματα παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα σενάρια που εξετάστηκαν και αφορούν 2 καταστάσεις λειτουργίας (PORTOUT_SEAGOING – CARGO_UNLOAD_LOAD) και τα 2 υπό εξέταση δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας (AC - DC). Κάθε κατάσταση λειτουργίας με το αντίστοιχο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είχε τρία υποσενάρια με τη χρήση 1, 2 και 3 γεννητριών ισχύος.

4.5.1 PORTOUT_SEAGOING - ΔΙΚΤΥΟ AC

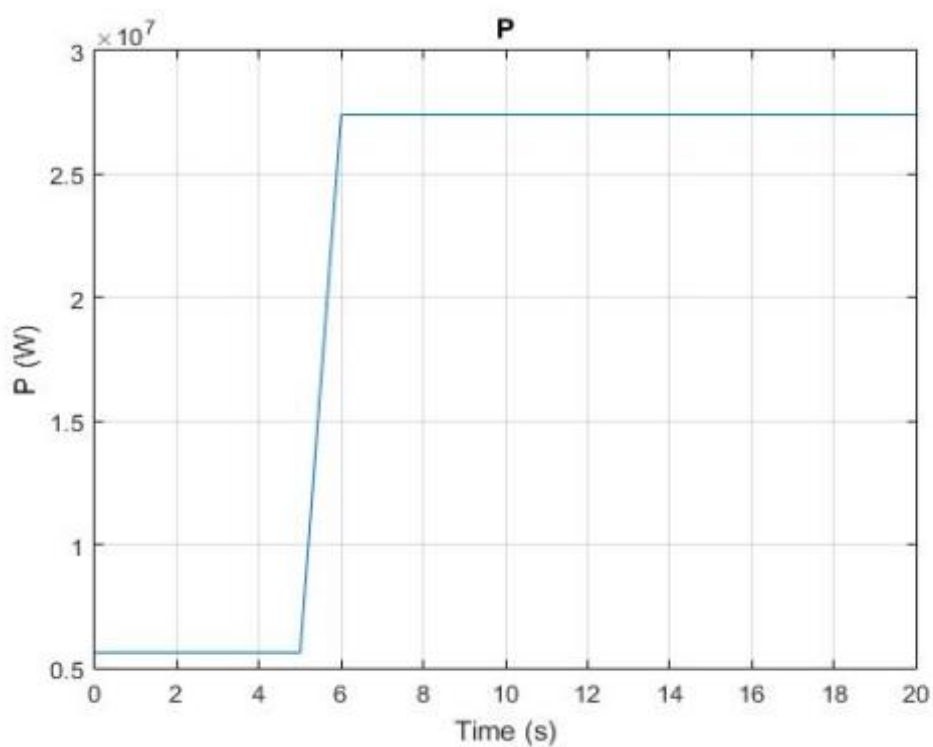
- 3 GENERATORS



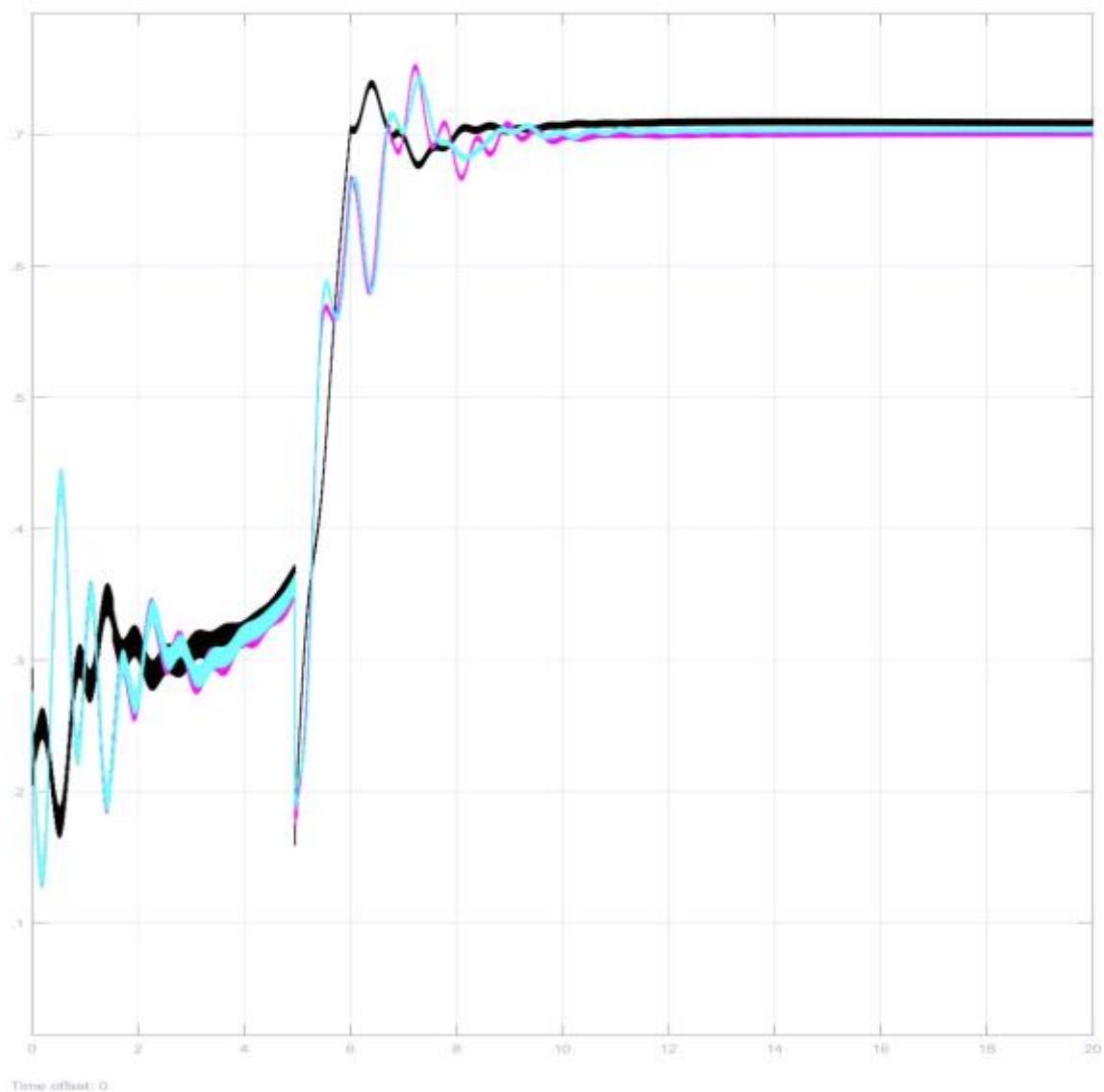
Διάγραμμα 4.1: Κατανομή ρευμάτων και τάσης στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για δυο γεννήτριες 5MVA DIESEL και μία 30MVA GAS αντίστοιχα



Διάγραμμα 4.2: Απορρόφηση ρεύματος από κινητήρα κύριας πρόωσης

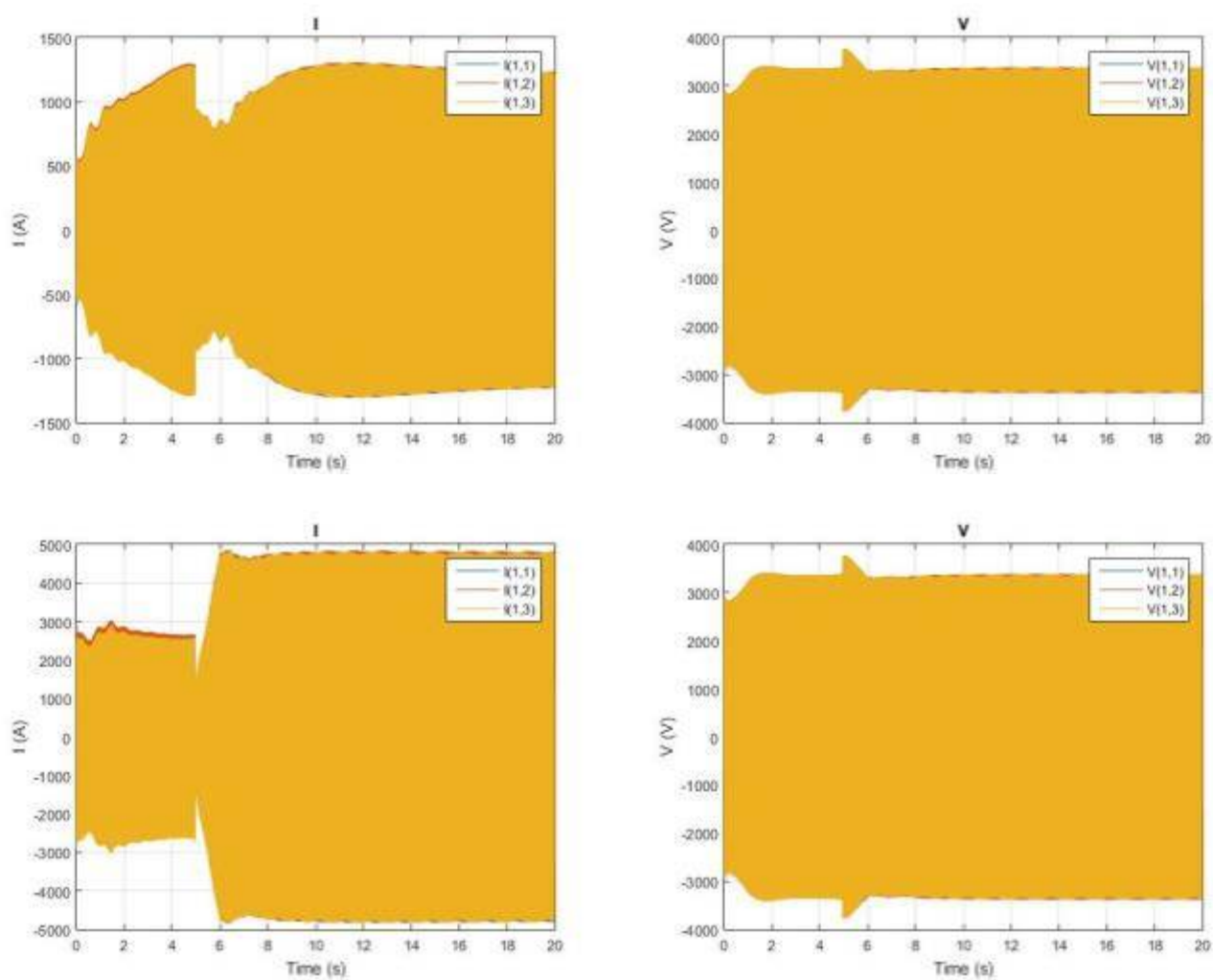


Διάγραμμα 4.3: Απορρόφηση ισχύος από κινητήρα κύριας πρόωσης

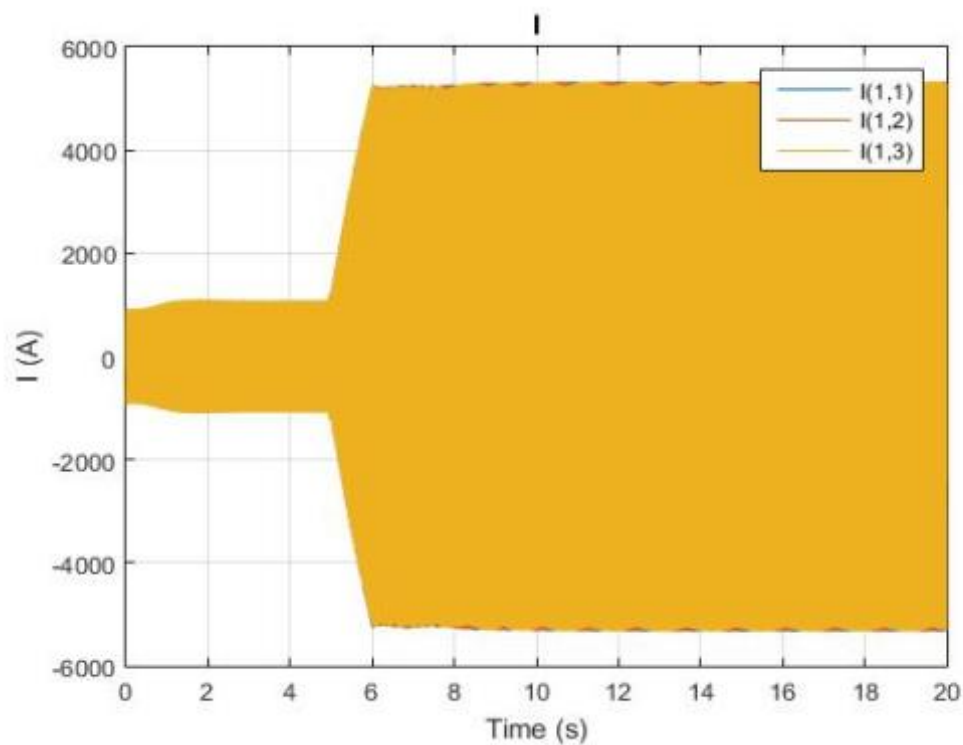


Διάγραμμα 4.4: Η ανά μονάδα παραγωγή φαινόμενης ισχύος για τις γεννήτριες (με μαύρο εμφανίζεται η γεννήτρια των 30MVA ενώ με θαλασσί και μοβ οι γεννήτριες των 5MVA)

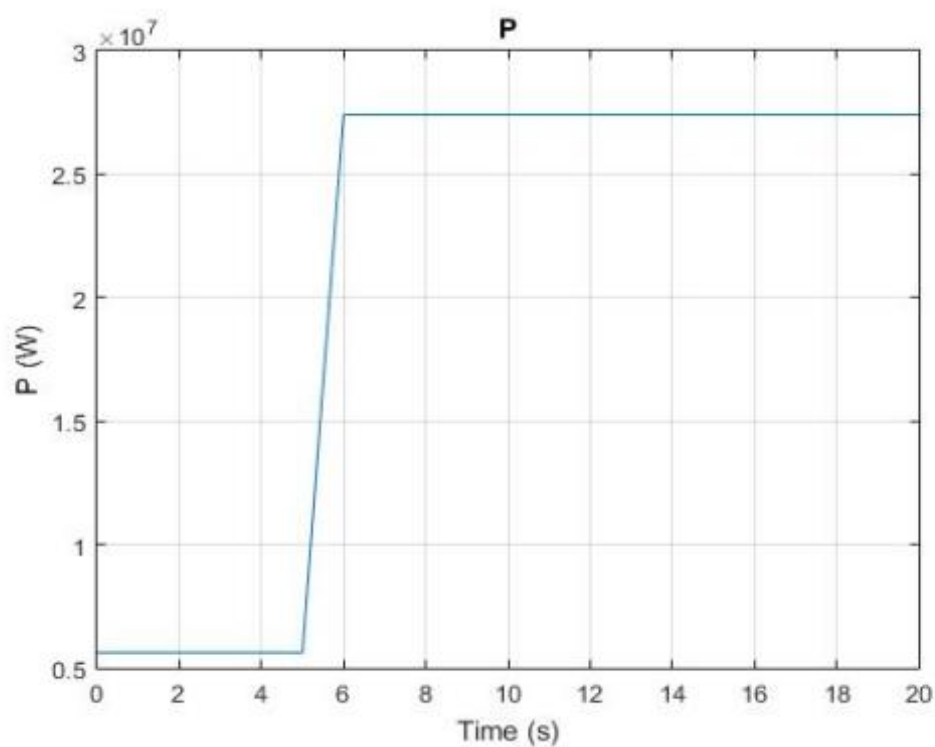
- 2 GENERATORS



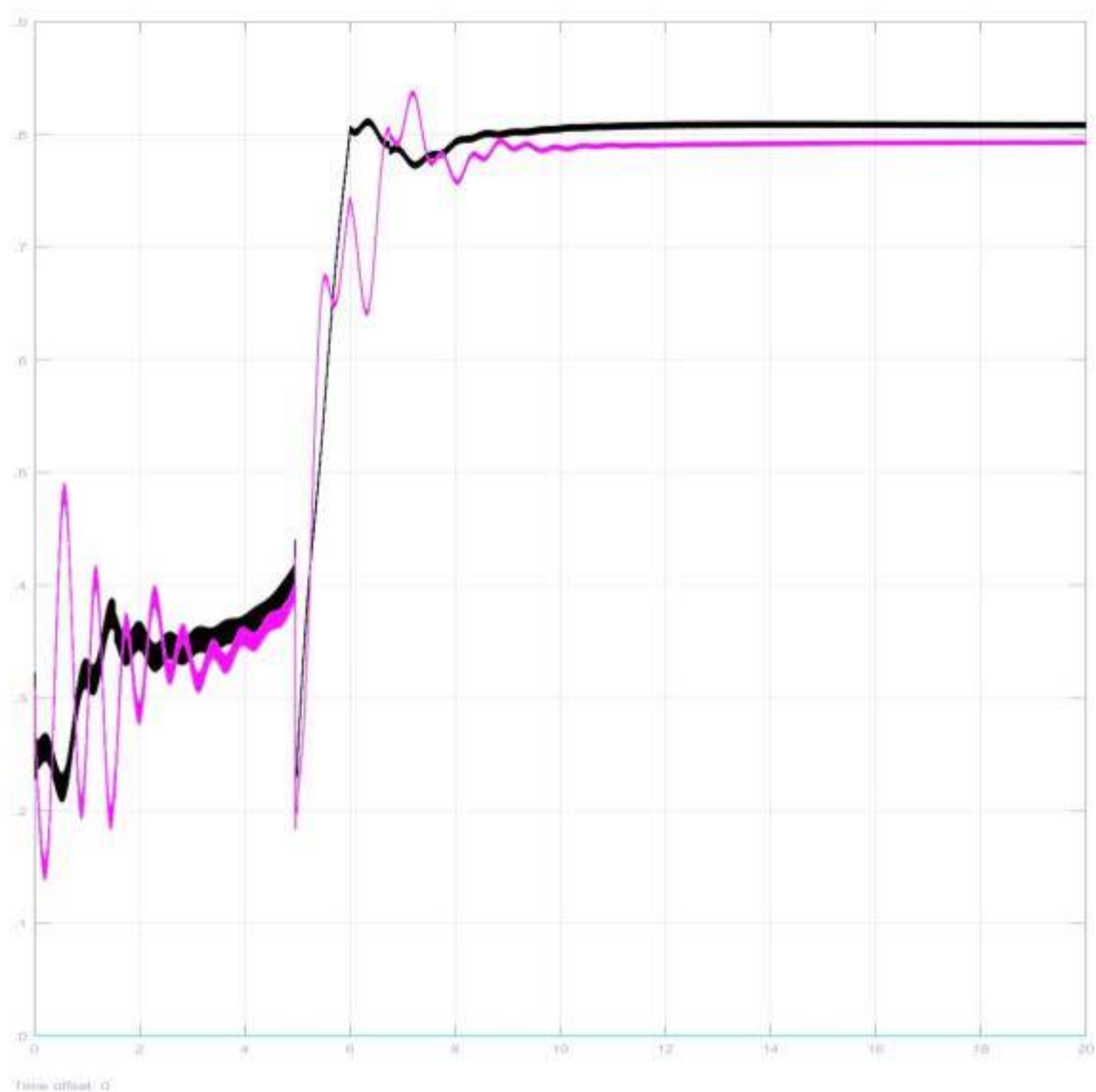
Διάγραμμα 4.5: Κατανομή ρευμάτων και τάσης στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για μια γεννήτρια 5MVA DIESEL και μία 30MVA GAS αντίστοιχα



Διάγραμμα 4.6: Απορρόφηση ρεύματος από κινητήρα κύριας πρόωσης

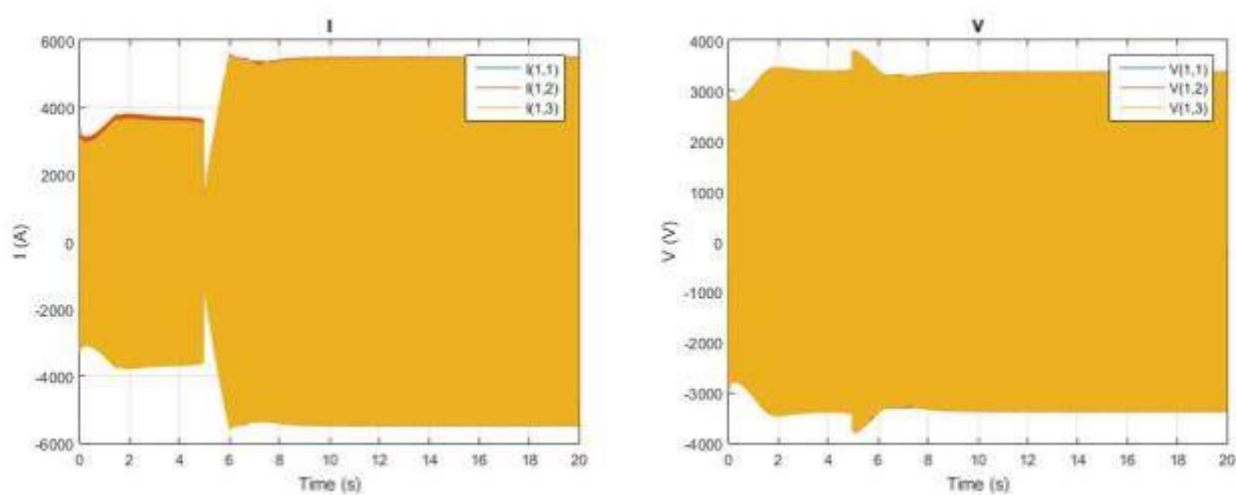


Διάγραμμα 4.7: Απορρόφηση ισχύος από κινητήρα κύριας πρόωσης

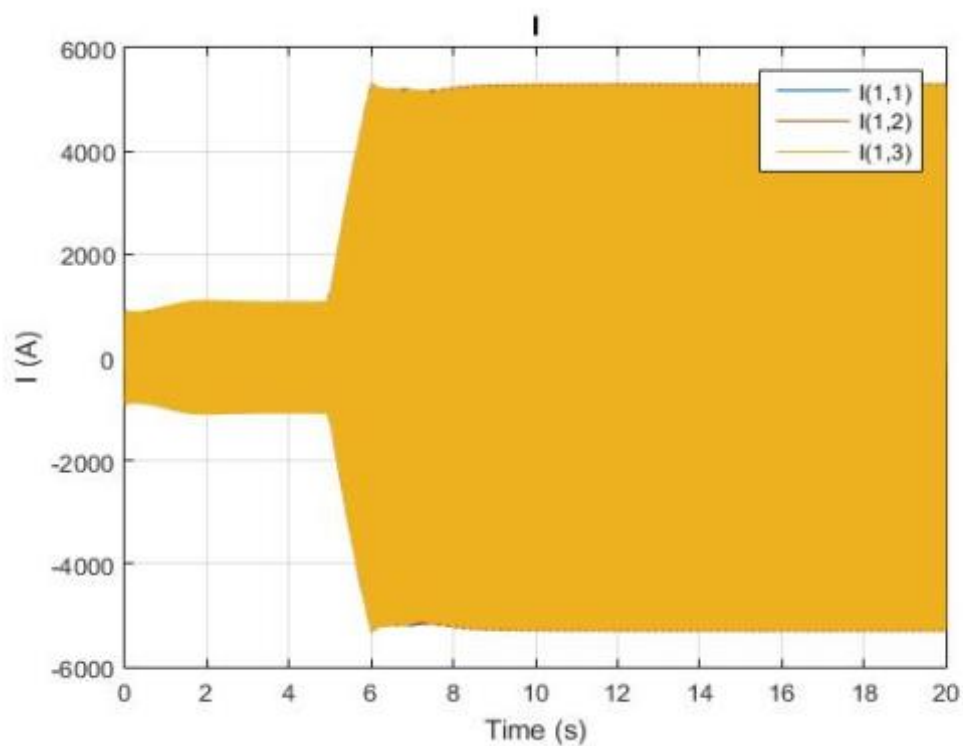


Διάγραμμα 4.8: Η ανά μονάδα παραγωγή φαινόμενης ισχύος για τις γεννήτριες (με μαύρο εμφανίζεται η γεννήτρια των 30MVA ενώ με μοβ η γεννήτρια των 5MVA)

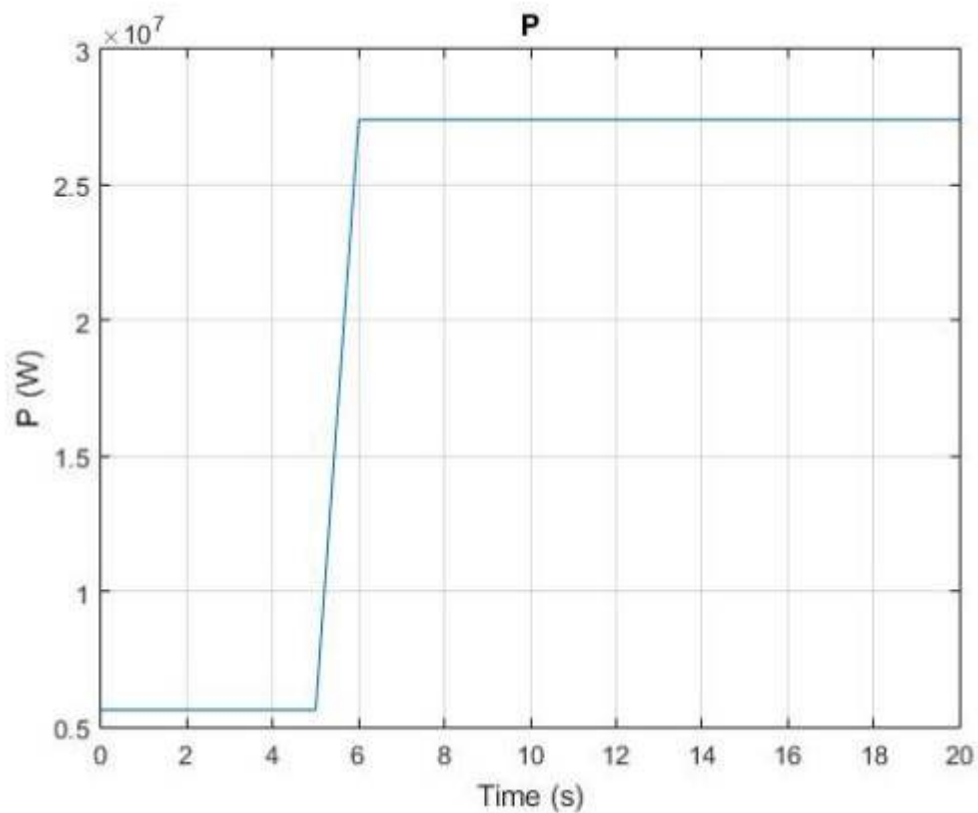
- 1 GENERATOR



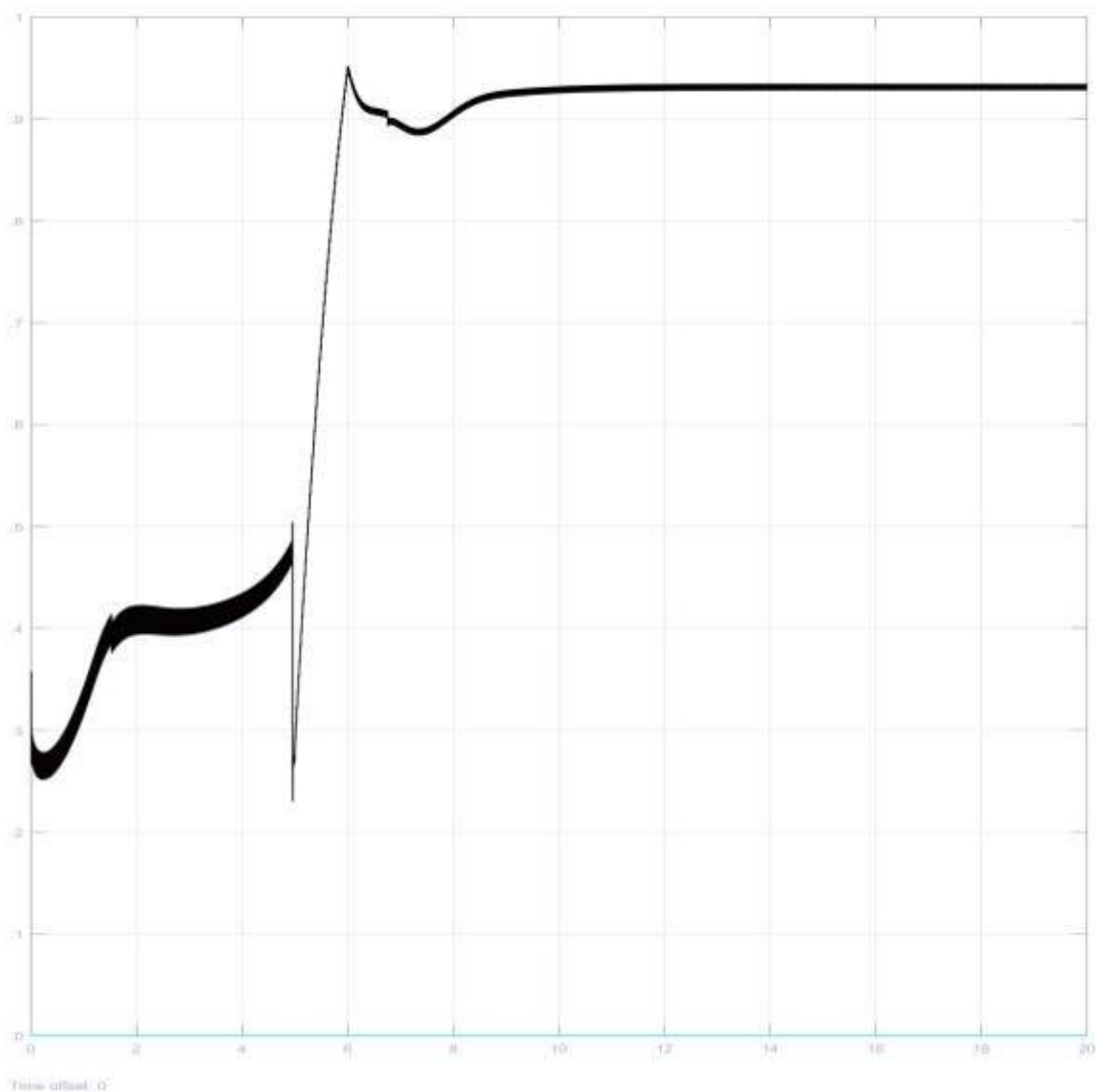
Διάγραμμα 4.9: Κατανομή ρευμάτων και τάσης στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για μια γεννήτρια 30MVA GAS



Διάγραμμα 4.10: Απορρόφηση ρεύματος από κινητήρα κύριας πρόωσης



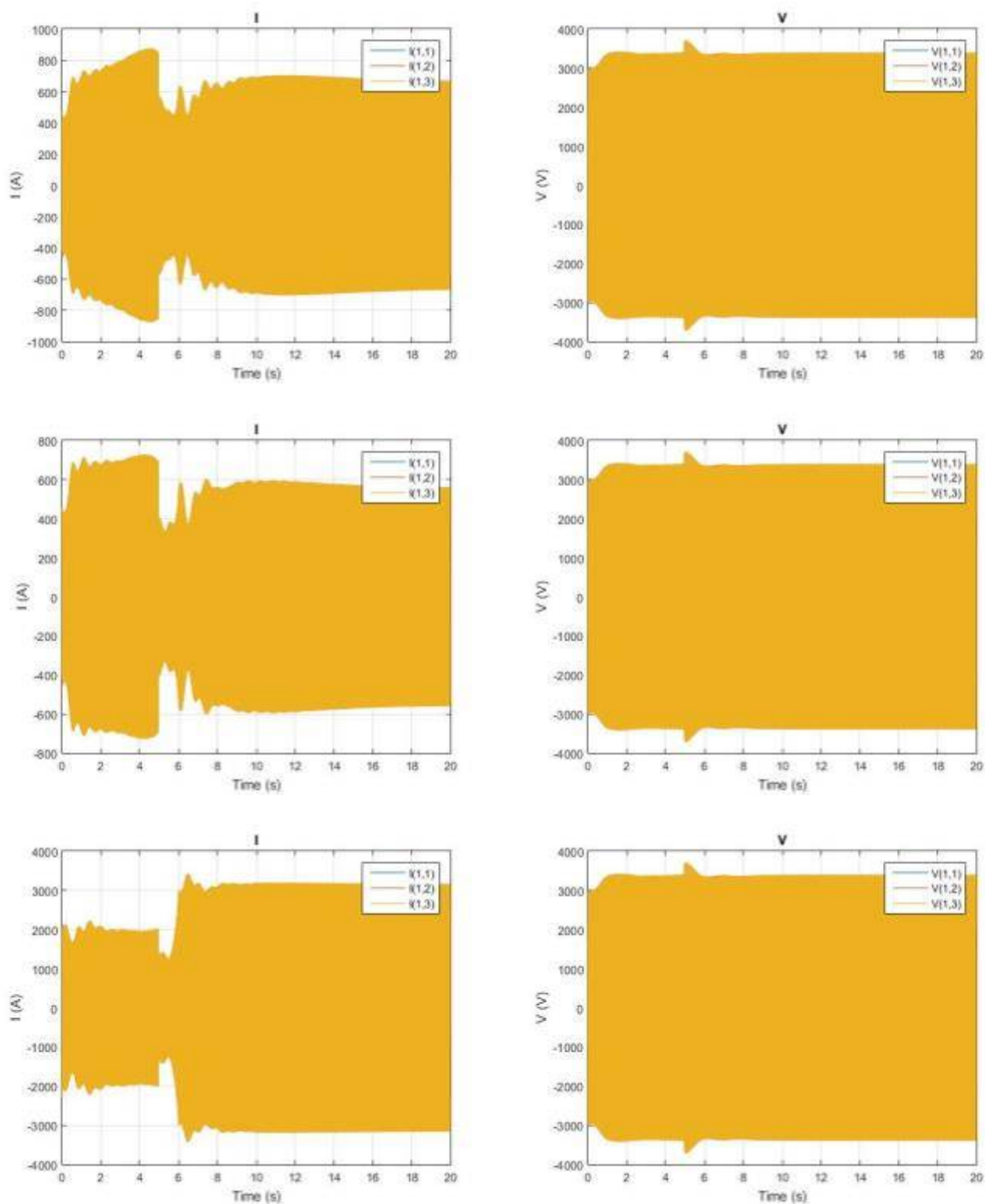
Διάγραμμα 4.11: Απορρόφηση ισχύος από κινητήρα κύριας πρόωσης



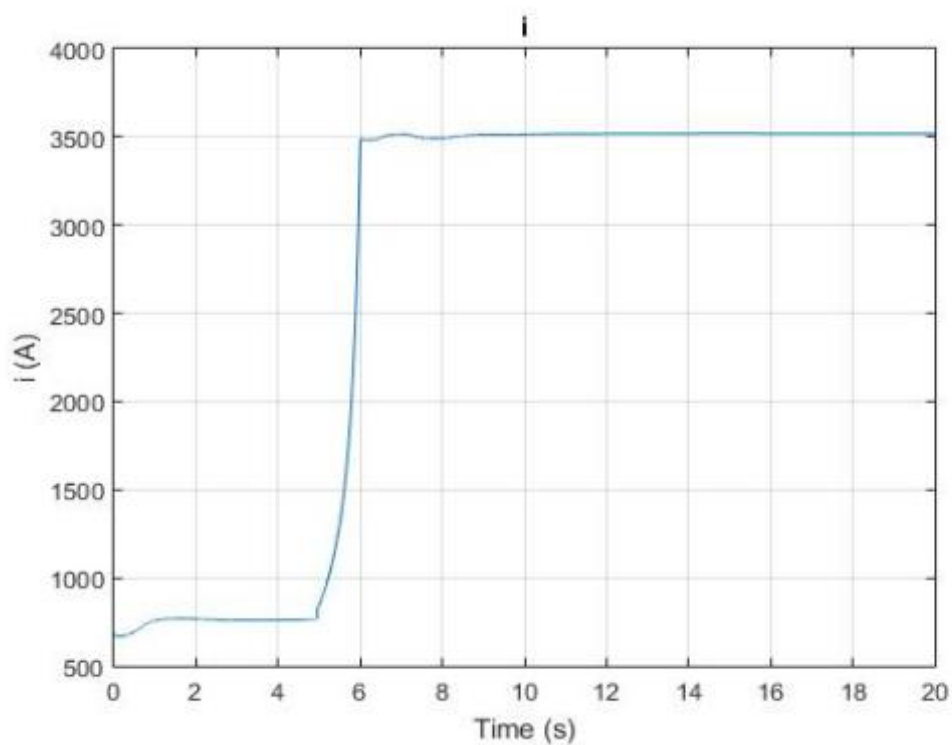
Διάγραμμα 4.12: Η ανά μονάδα παραγωγή φαινόμενης ισχύος για τη γεννήτρια (με μαύρο εμφανίζεται η γεννήτρια των 30MVA)

4.5.2 PORT OUT_SEAGOING - ΔΙΚΤΥΟ DC

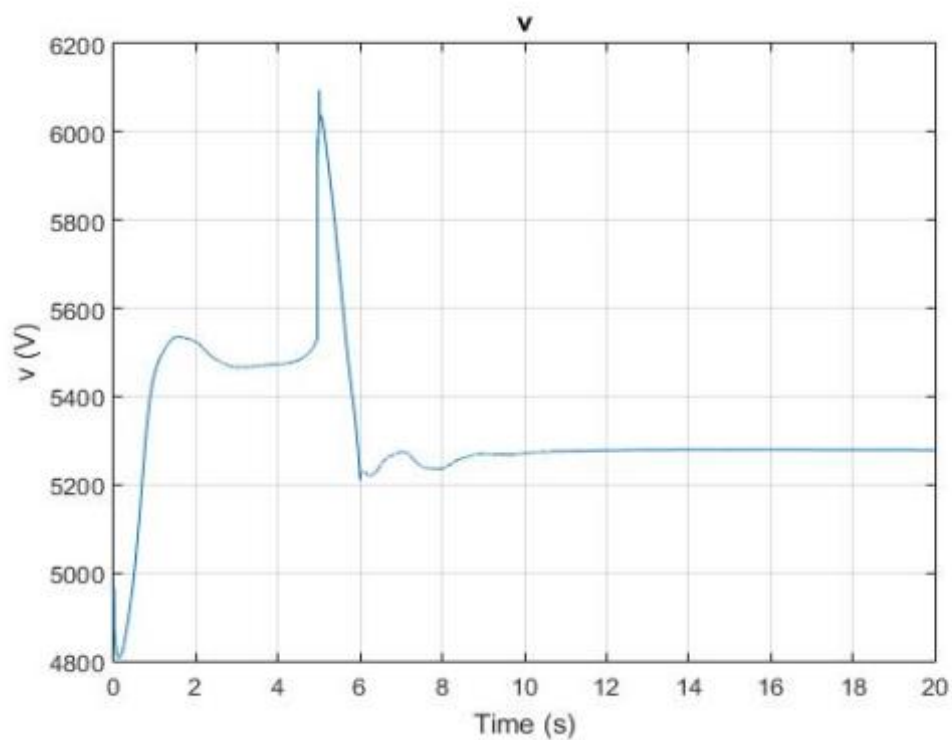
- 3 GENERATORS



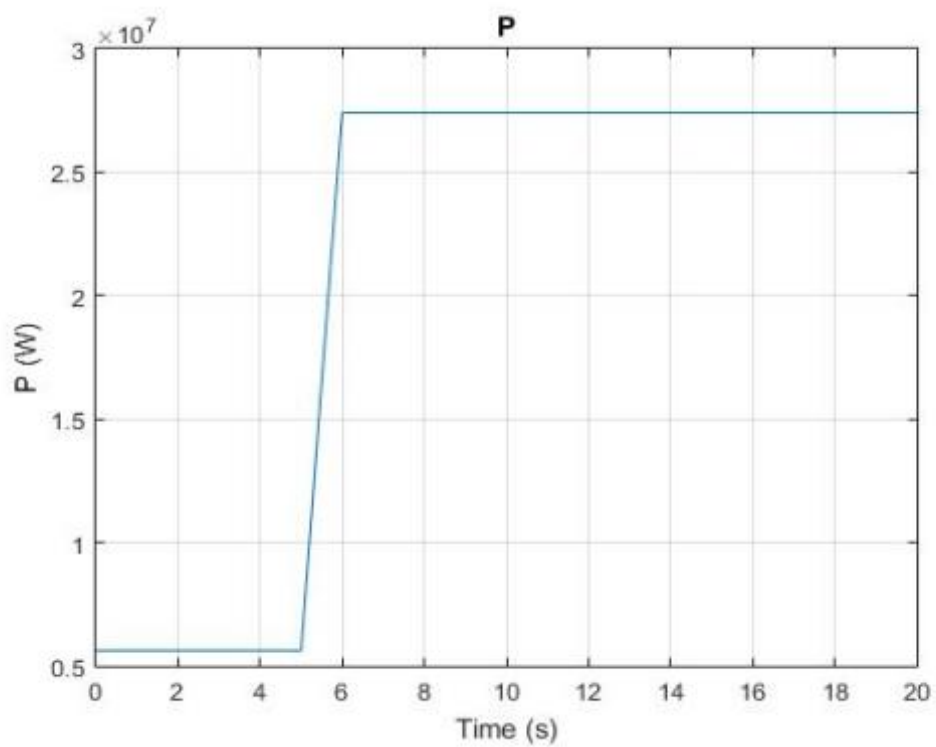
Διάγραμμα 4.13: Κατανομή ρευμάτων και τάσης στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για δυο γεννήτριες 5MVA DIESEL και μία 30MVA GAS αντίστοιχα



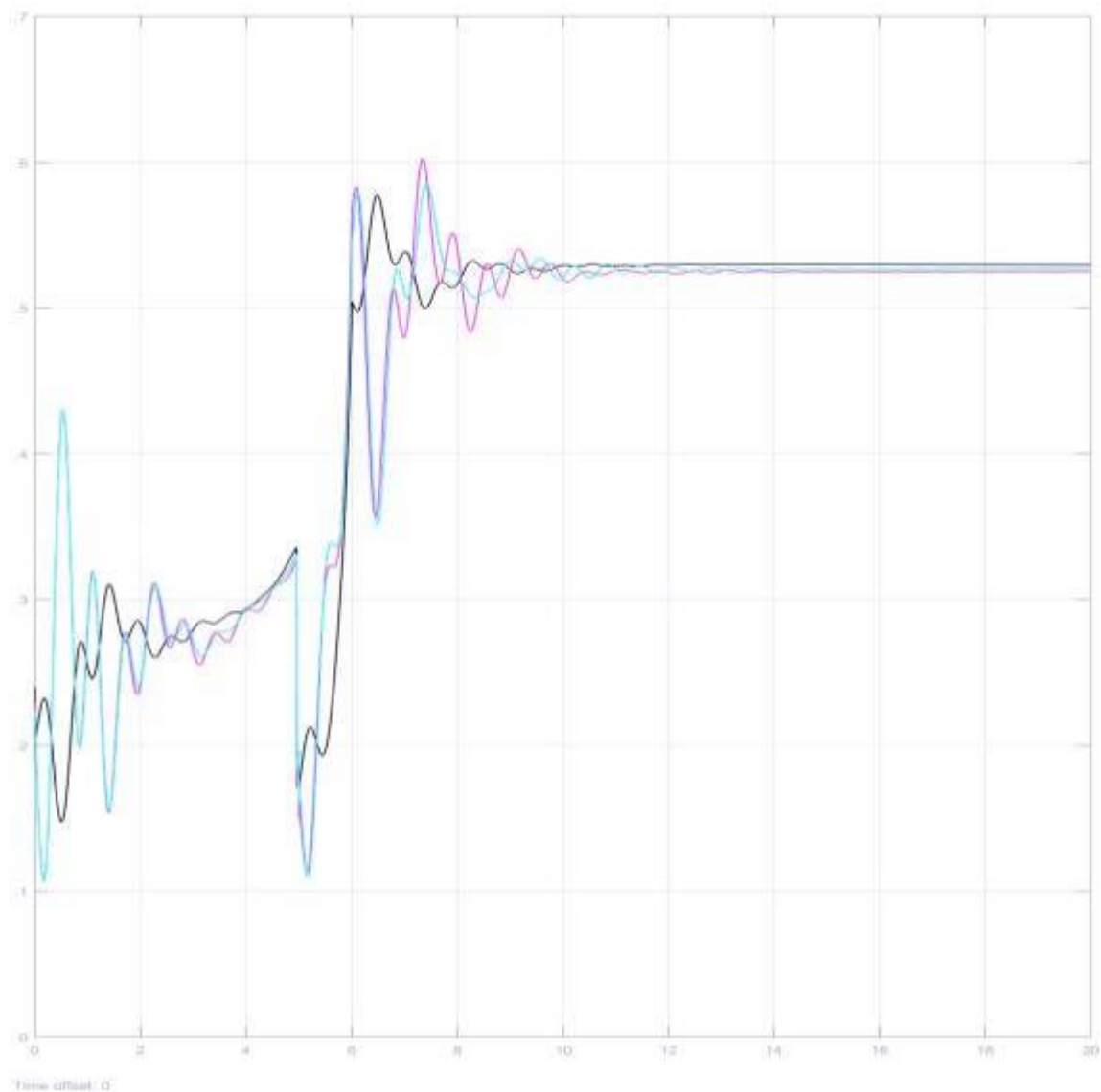
Διάγραμμα 4.14: Απορρόφηση ρεύματος από κινητήρα κύριας πρόωσης



Διάγραμμα 4.15: Τάση στον DC ζυγό

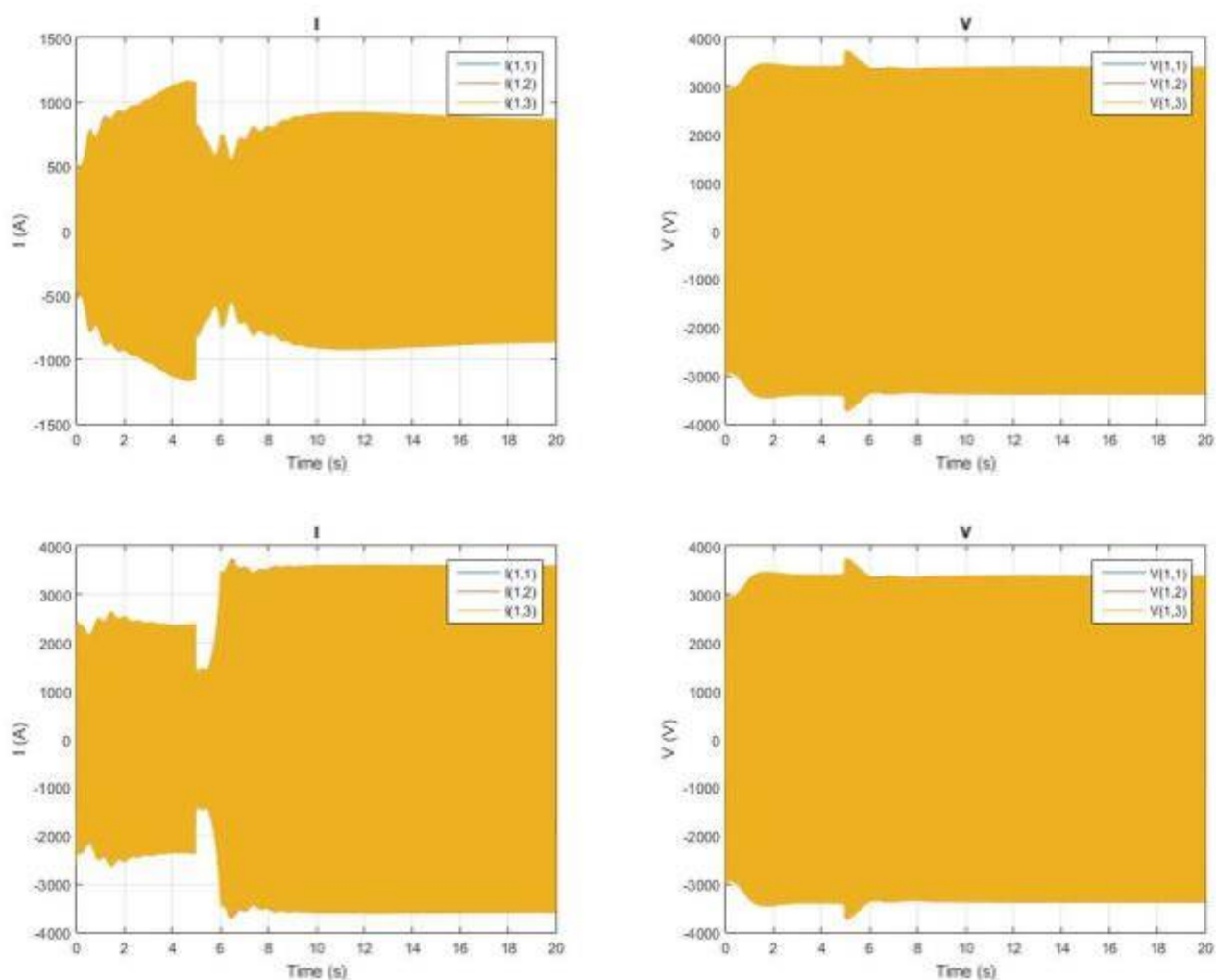


Διάγραμμα 4.16: Απορρόφηση ισχύος από κινητήρα κύριας πρόωσης

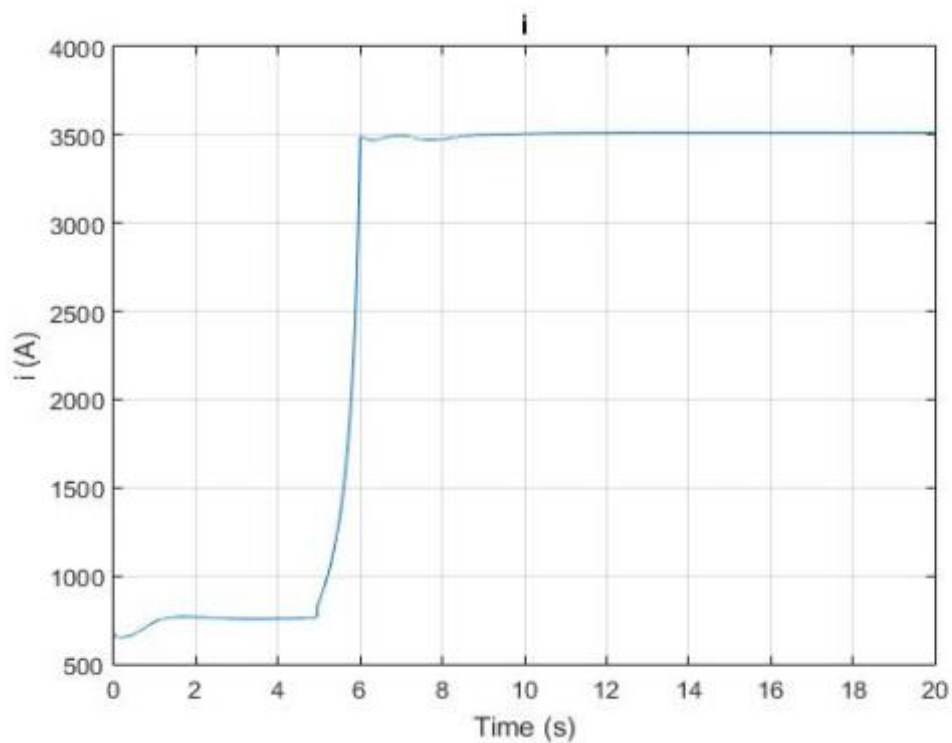


Διάγραμμα 4.17: Η ανά μονάδα παραγωγή φαινόμενης ισχύος για τις γεννήτριες (με μαύρο εμφανίζεται η γεννήτρια των 30MVA ενώ με θαλασσί και μοβ οι γεννήτριες των 5MVA)

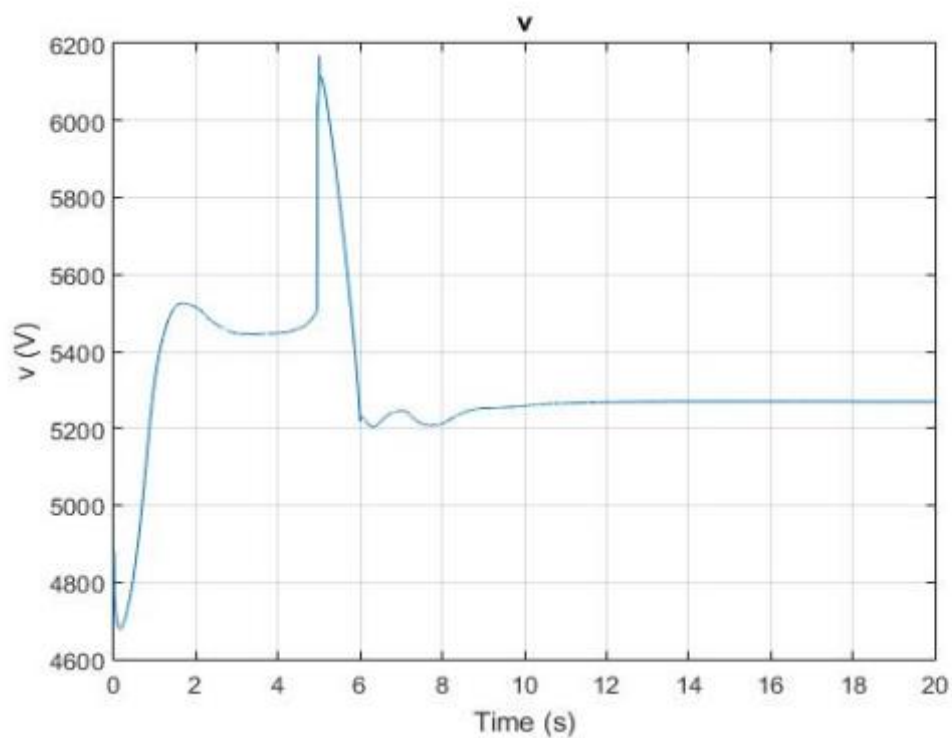
- 2 GENERATORS



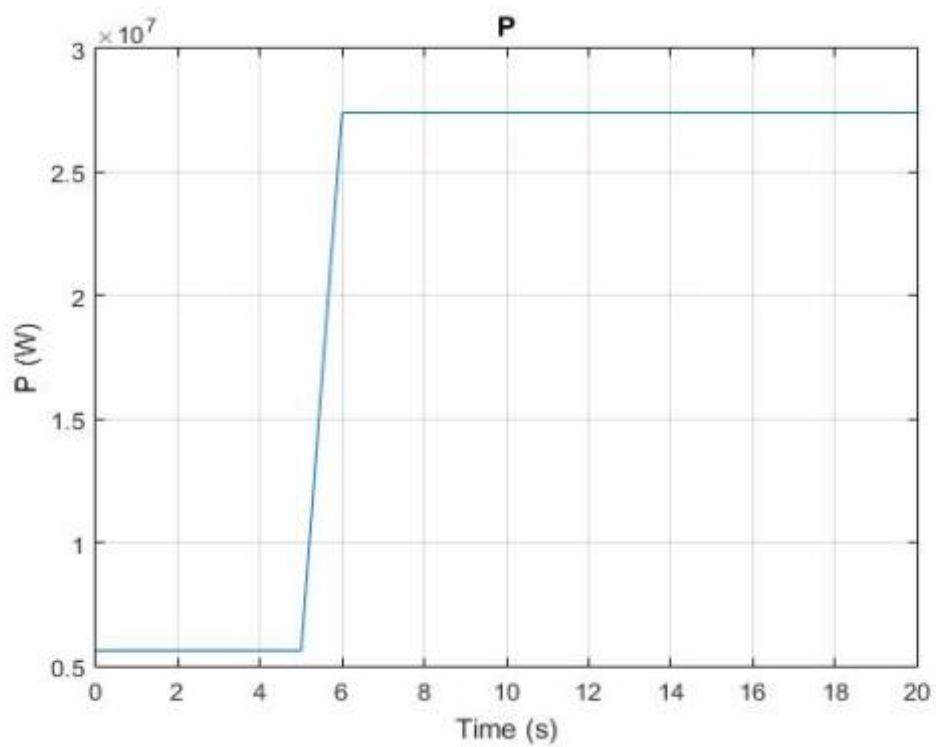
Διάγραμμα 4.18: Κατανομή ρευμάτων και τάσης στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για μια γεννήτρια 5MVA DIESEL και μία 30MVA GAS αντίστοιχα



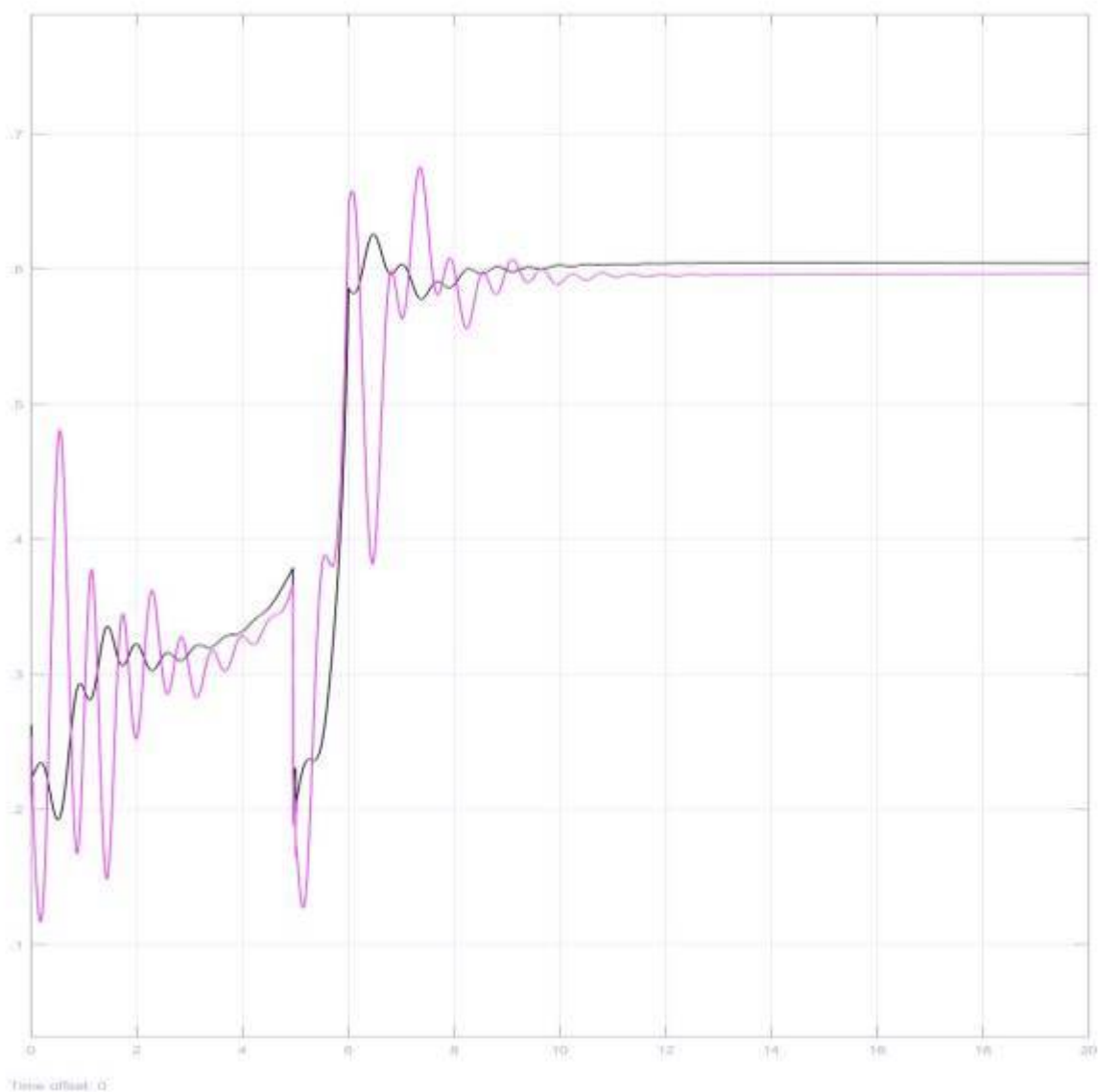
Διάγραμμα 4.19: Απορρόφηση ρεύματος από κινητήρα κύριας πρόωσης



Διάγραμμα 4.20: Τάση στον DC ζυγό

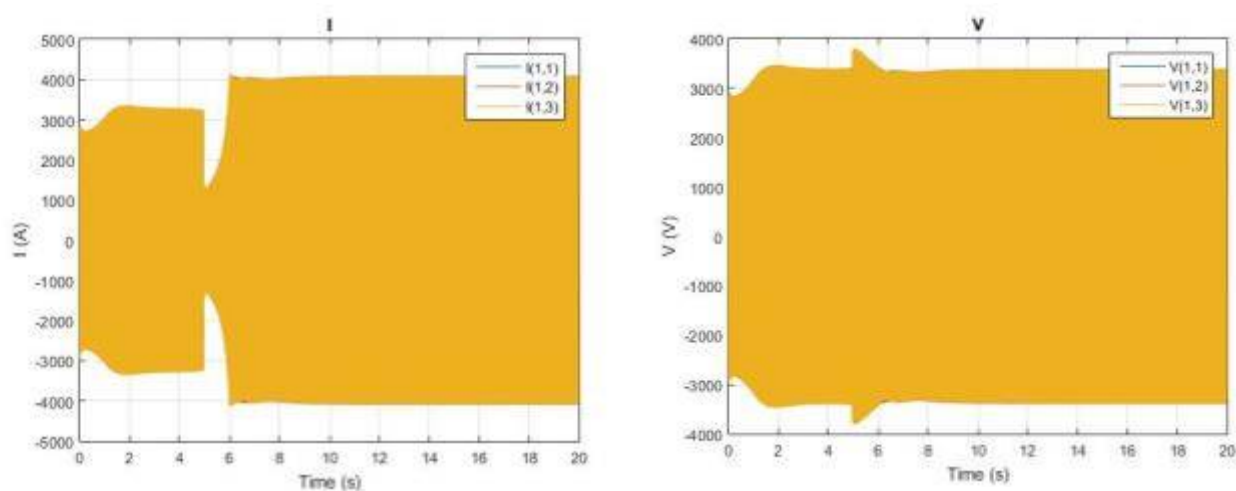


Διάγραμμα 4.21: Απορρόφηση ισχύος από κινητήρα κύριας πρόωσης

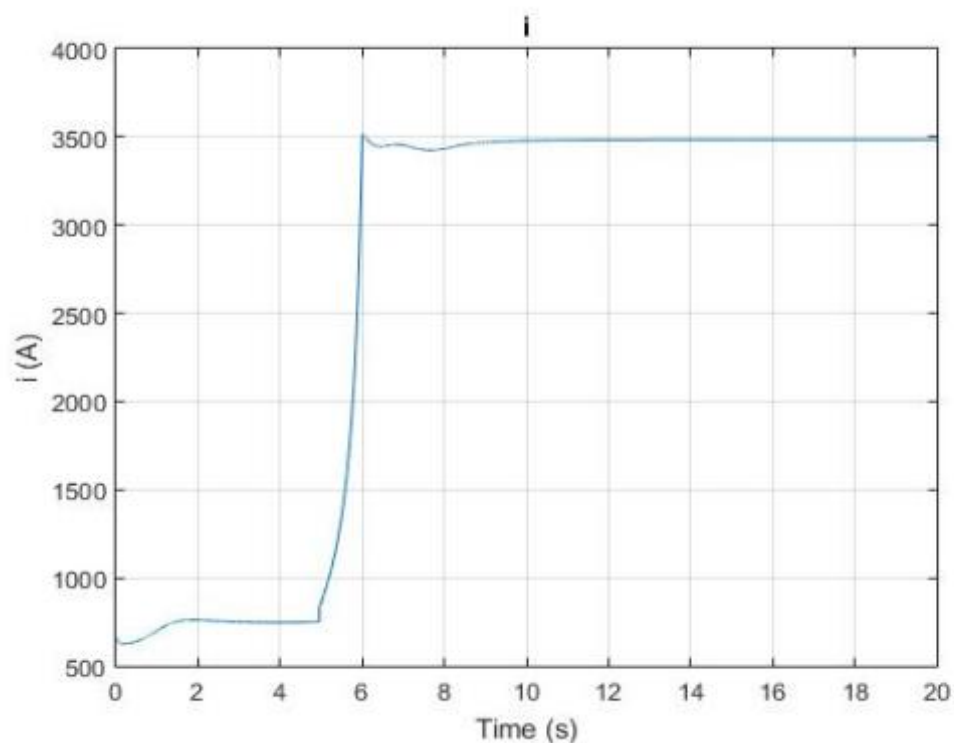


Διάγραμμα 4.22: Η ανά μονάδα παραγωγή φαινόμενης ισχύος για τις γεννήτριες (με μαύρο εμφανίζεται η γεννήτρια των 30MVA ενώ με μοβ η γεννήτρια των 5MVA).

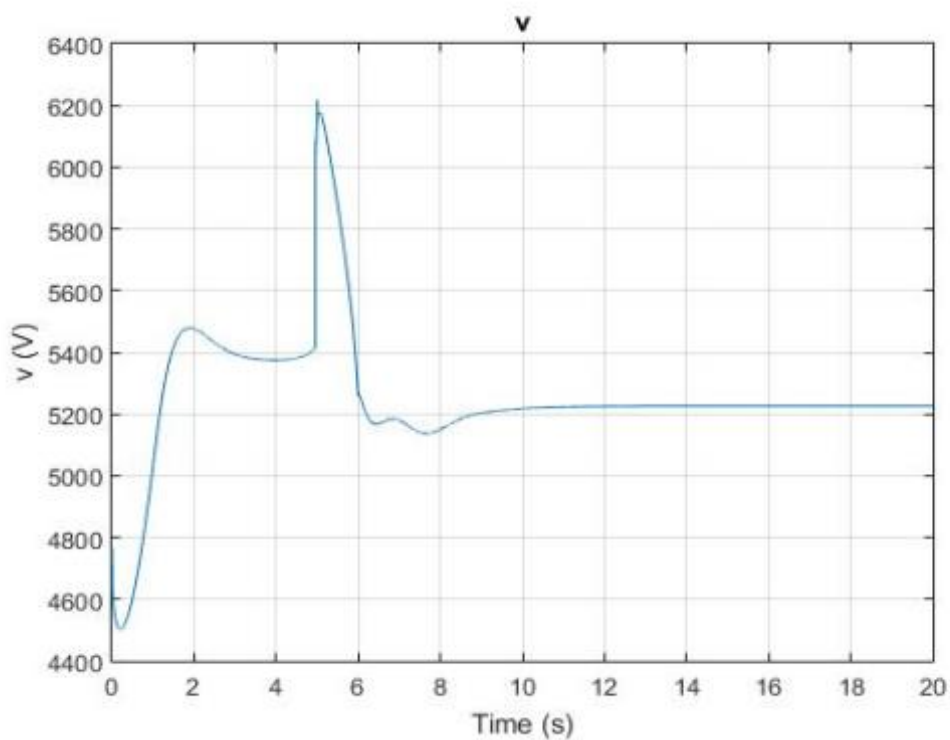
- 1 GENERATOR



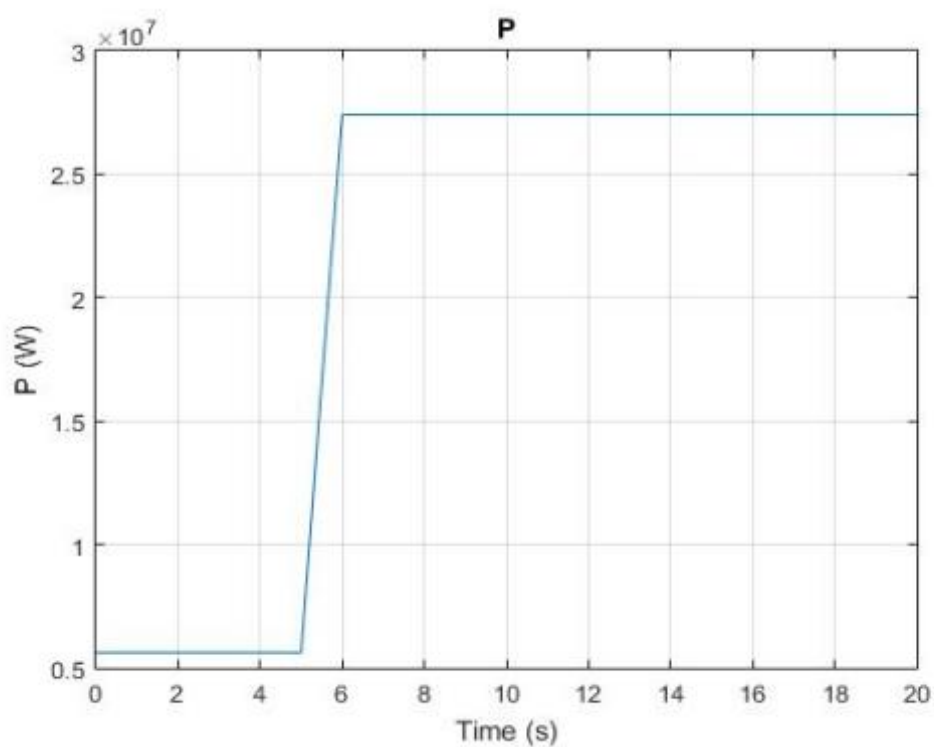
Διάγραμμα 4.23: Κατανομή ρευμάτων και τάσης στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για μια γεννήτρια 30MVA GAS



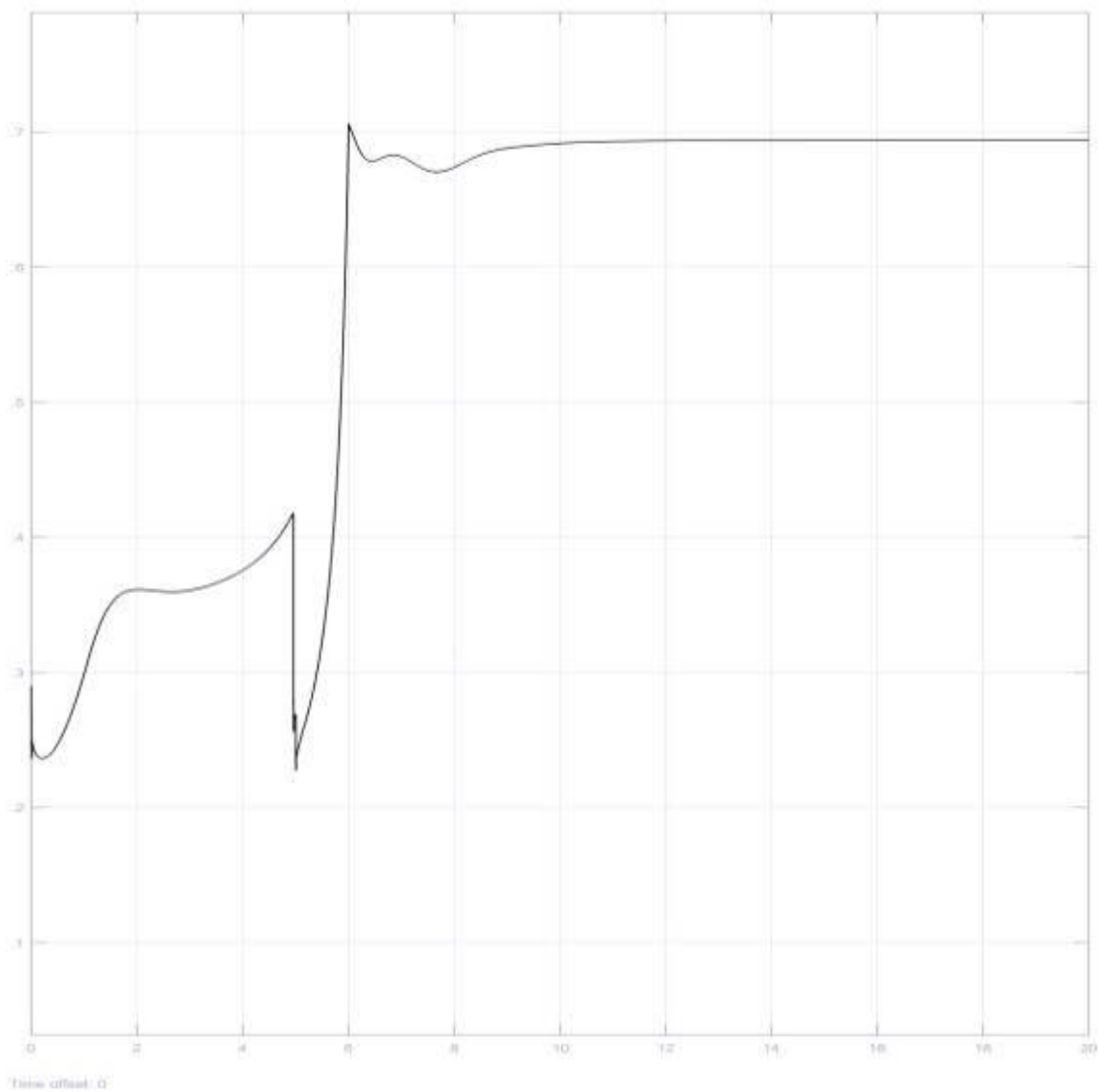
Διάγραμμα 4.24: Απορρόφηση ρεύματος από κινητήρα κύριας πρόωσης



Διάγραμμα 4.25: Τάση στον DC ζυγό



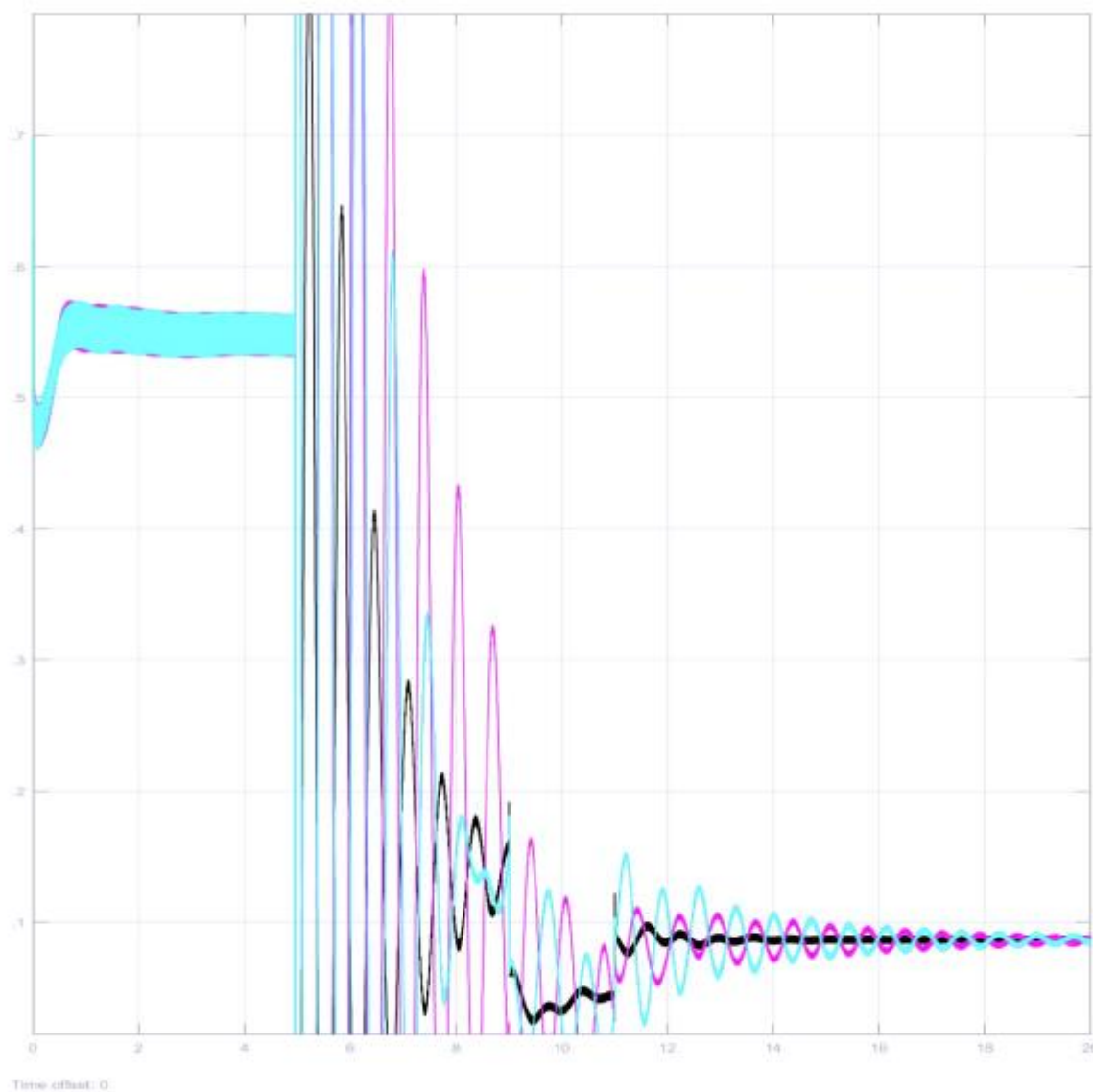
Διάγραμμα 4.26: Απορρόφηση ισχύος από κινητήρα κύριας πρόωσης



Διάγραμμα 4.27: Η ανά μονάδα παραγωγή ισχύος για τη γεννήτρια (με μαύρο εμφανίζεται η γεννήτρια των 30MVA)

4.5.3 CARGO_UNLOAD_LOAD - ΔΙΚΤΥΟ AC

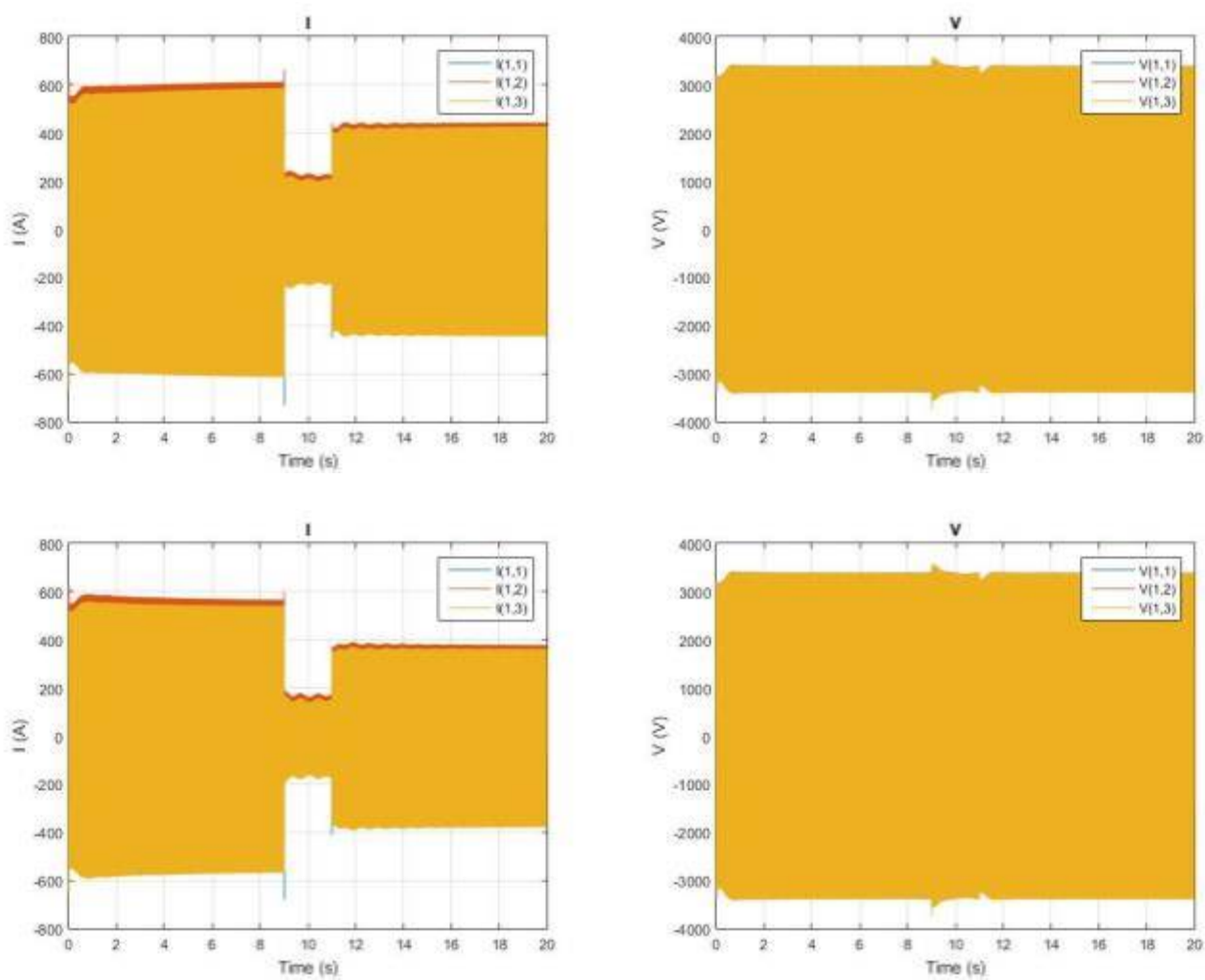
- 3 GENERATORS



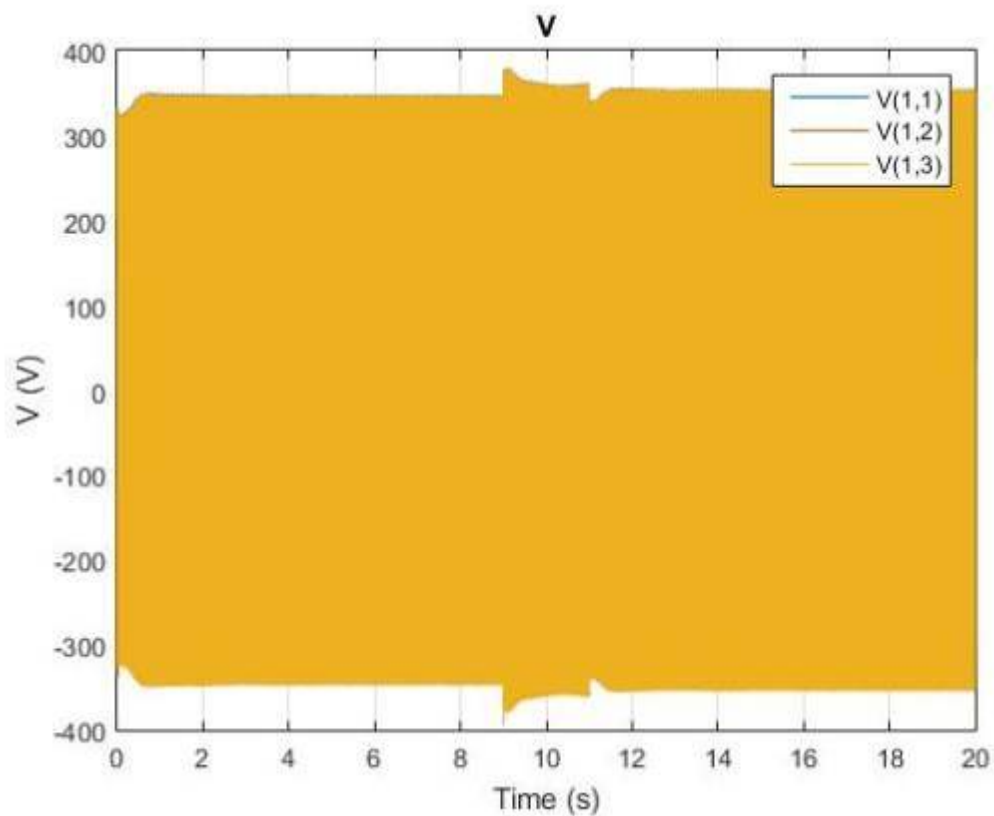
Διάγραμμα 4.28: Η ανά μονάδα παραγωγή φαινόμενης ισχύος για τις γεννήτριες (με μαύρο εμφανίζεται η γεννήτρια των 30MVA ενώ με θαλασσί και μοβ οι γεννήτριες των 5MVA)

Όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα η ανά μονάδα παραγωγή ισχύος από τις γεννήτριες δείχνουν σημαντική αστάθεια και διακύμανση στη λειτουργία CARGO_UNLOAD_LOAD. Κατά συνέπεια απορρίπτεται το συγκεκριμένο σενάριο λειτουργίας για το δίκτυο AC.

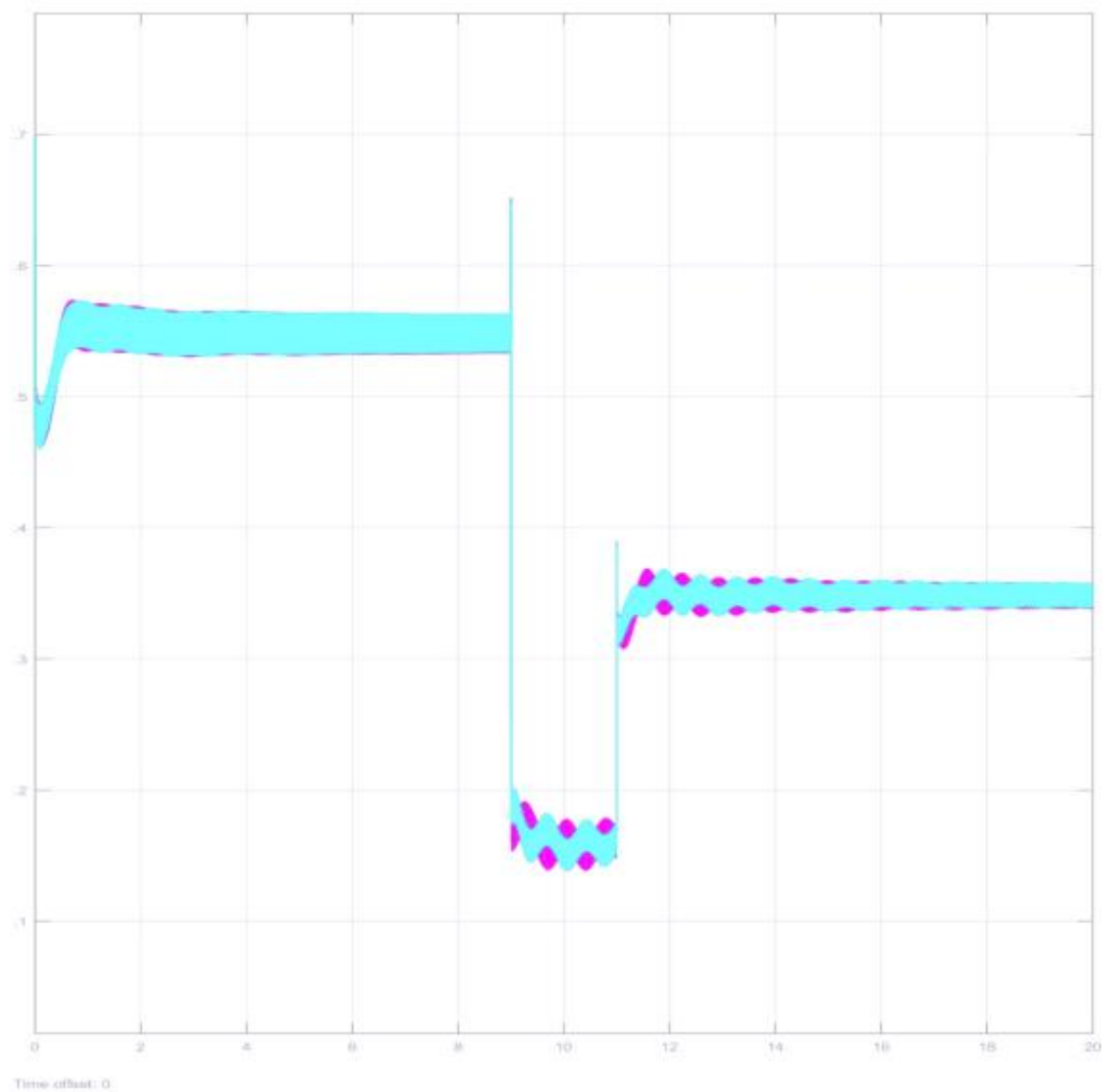
- 2 GENERATORS



Διάγραμμα 4.29: Κατανομή ρευμάτων και τάσης στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για δύο γεννήτριες 5MVA DIESEL

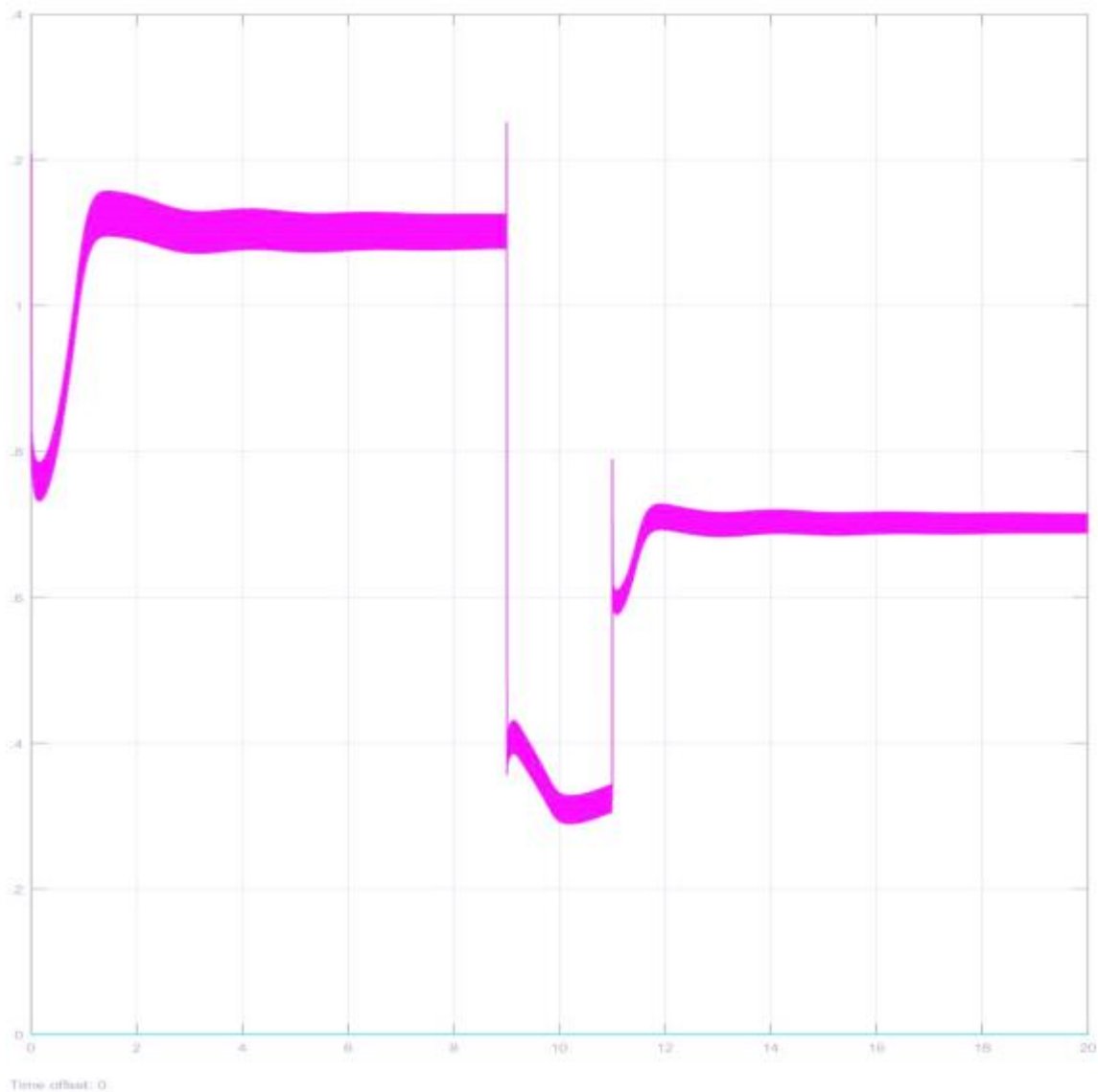


Διάγραμμα 4.30: Παραγωγή τάσης στο ζυγό των καταναλωτών



Διάγραμμα 4.31: Η ανά μονάδα παραγωγή φαινόμενης ισχύος για τις γεννήτριες (για δύο γεννήτριες 5MVA DIESEL)

- 1 GENERATOR

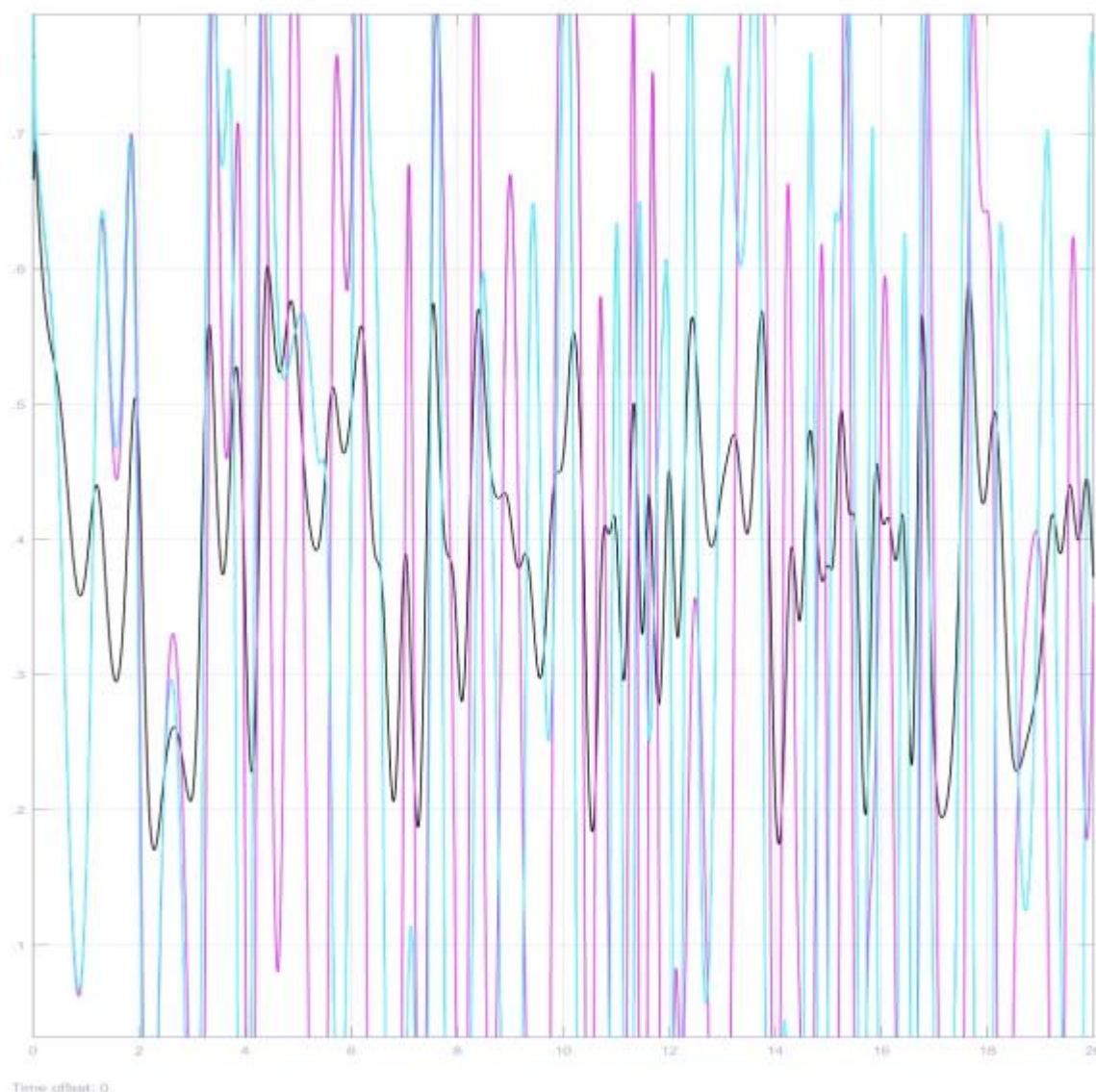


Διάγραμμα 4.32: Η ανά μονάδα παραγωγή φαινόμενης ισχύος για τη γεννήτριας (για μια γεννήτρια 5MVA DIESEL)

Όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα, η γεννήτρια ηλεκτρικής ισχύος δείχνει ότι υπερφορτίζεται στη λειτουργία UNLOAD, μιας και η παραγωγή της ξεπερνά τη μονάδα, με συνέπεια να απορρίπτεται.

4.5.4 CARGO_UNLOAD_LOAD - ΔΙΚΤΥΟ DC

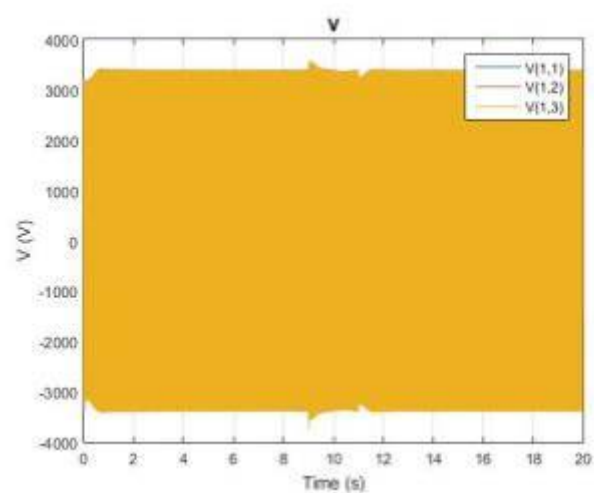
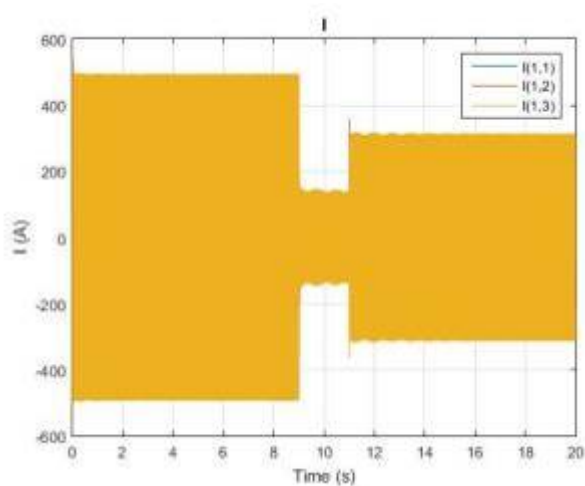
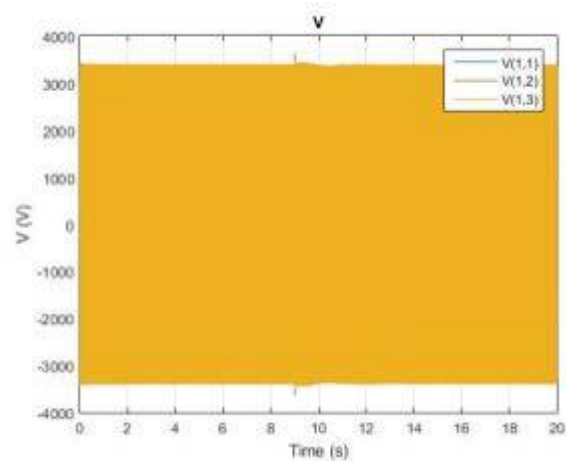
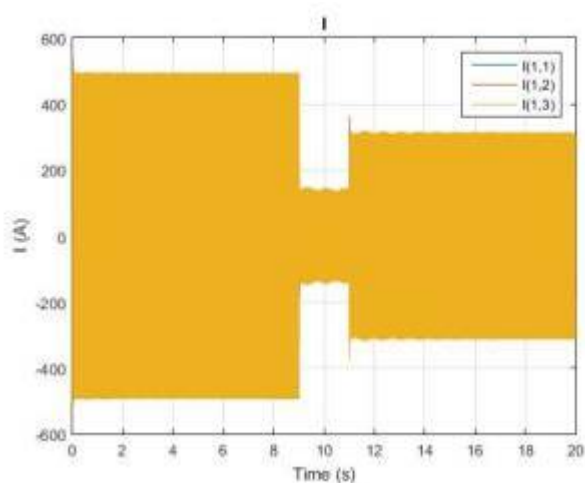
- 3 GENERATORS



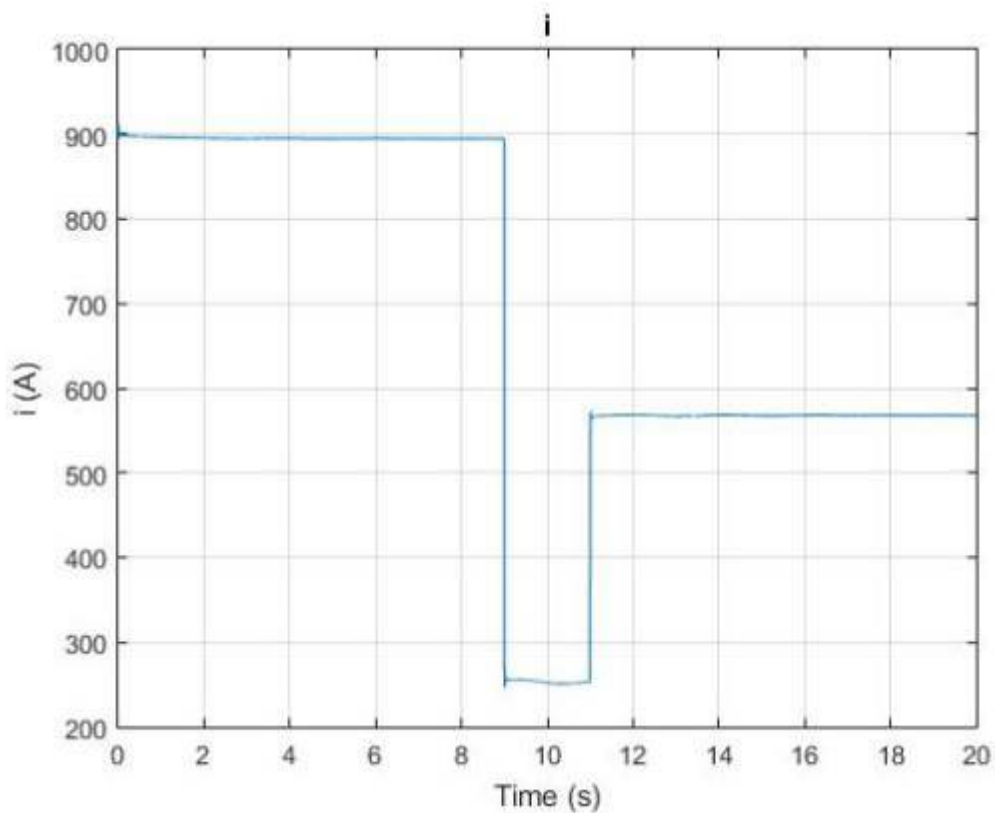
Διάγραμμα 4.33: Η ανά μονάδα παραγωγή φαινόμενης ισχύος για τις γεννήτριες (με μαύρο εμφανίζεται η γεννήτρια των 30MVA ενώ με θαλασσί και μοβ οι γεννήτριες των 5MVA)

Όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα η ανά μονάδα παραγωγή ισχύος από τις γεννήτριες δείχνουν σημαντική αστάθεια και διακύμανση στη λειτουργία CARGO_UNLOAD_LOAD. Η ταλάντωση των καμπυλών γίνεται πέρα από τα σημεία ευσταθούς ισορροπίας, κατά συνέπεια απορρίπτεται το συγκεκριμένο σενάριο λειτουργίας και για το δίκτυο DC.

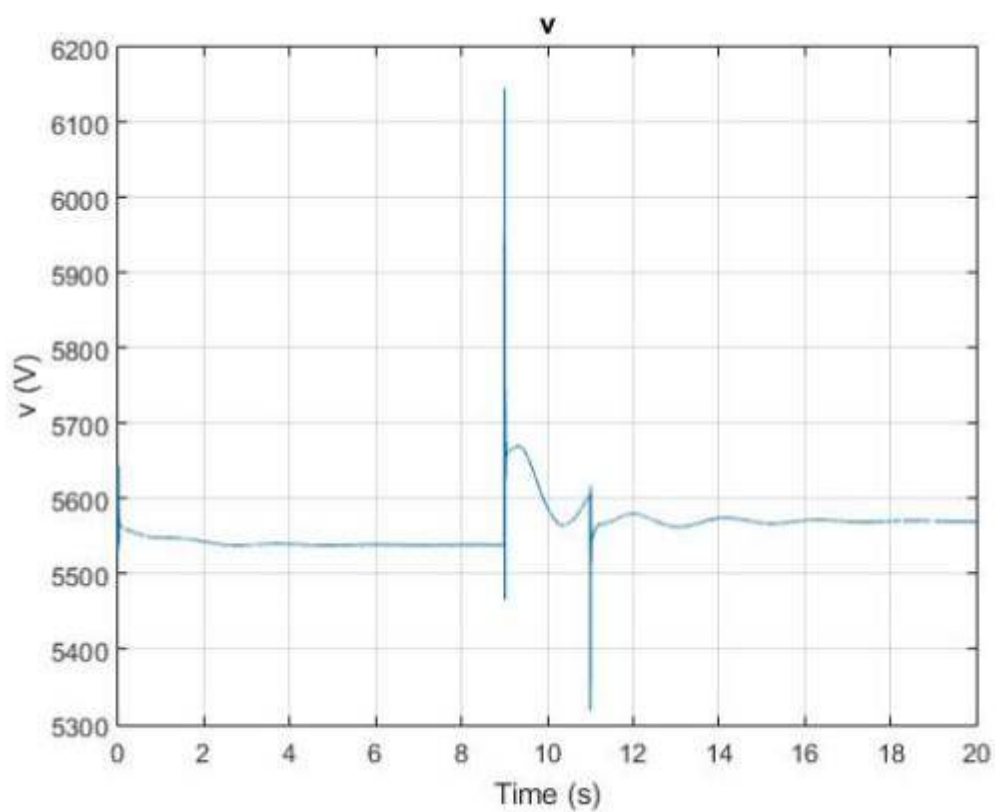
- 2 GENERATORS



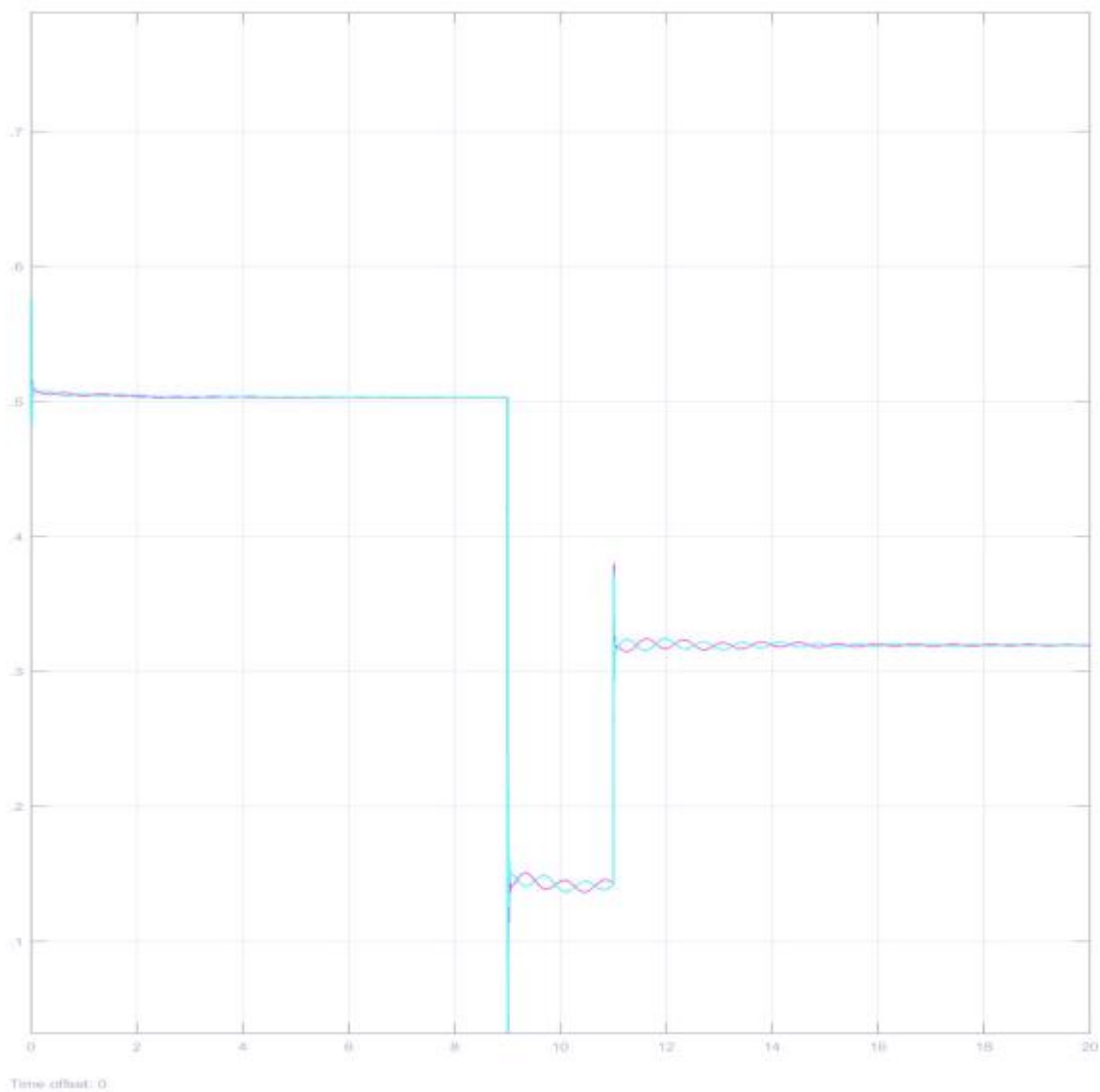
Διάγραμμα 4.34: Κατανομή ρευμάτων και τάσης στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για δύο γεννήτριες 5MVA DIESEL



Διάγραμμα 4.35: Απορρόφηση ρεύματος από καταναλωτές

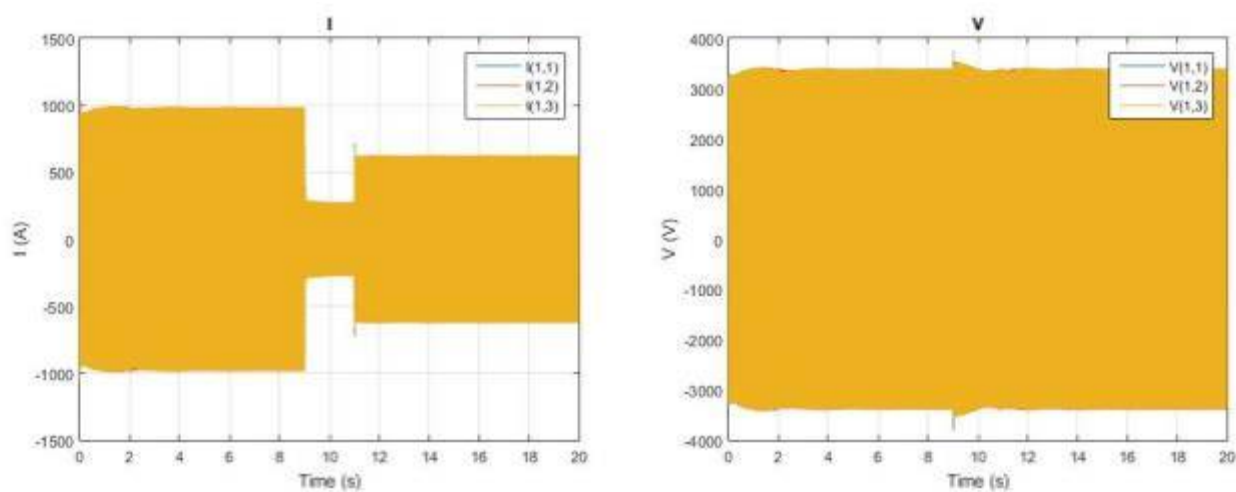


Διάγραμμα 4.36: Τάση στον DC ζυγό

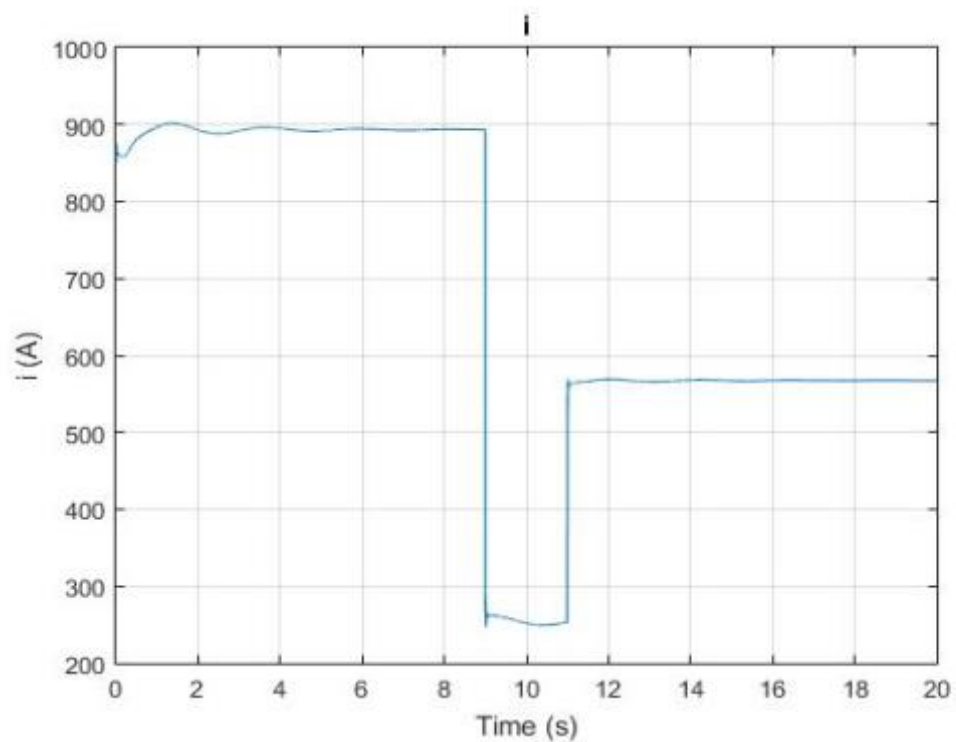


Διάγραμμα 4.37: Η ανά μονάδα παραγωγή ισχύος για τις γεννήτριες (για δύο γεννήτριες 5MVA DIESEL).

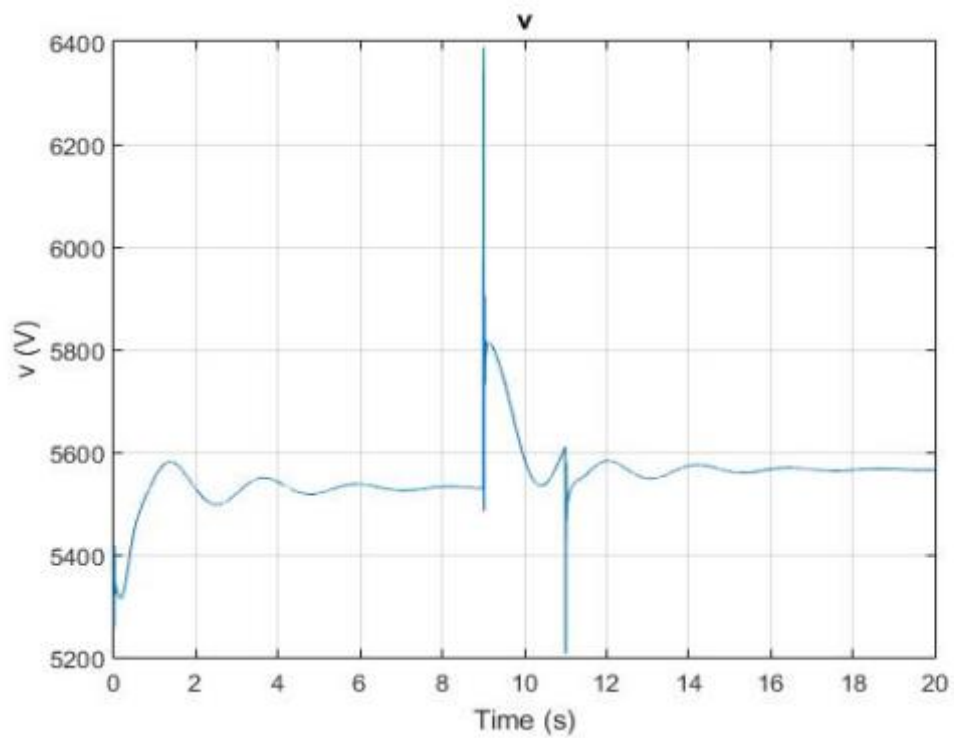
- 1 GENERATOR



Διάγραμμα 4.38: Κατανομή ρευμάτων και τάσης στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για μία γεννήτρια 5MVA DIESEL



Διάγραμμα 4.39: Απορρόφηση ρεύματος από καταναλωτές



Διάγραμμα 4.40: Τάση στον DC ζυγό



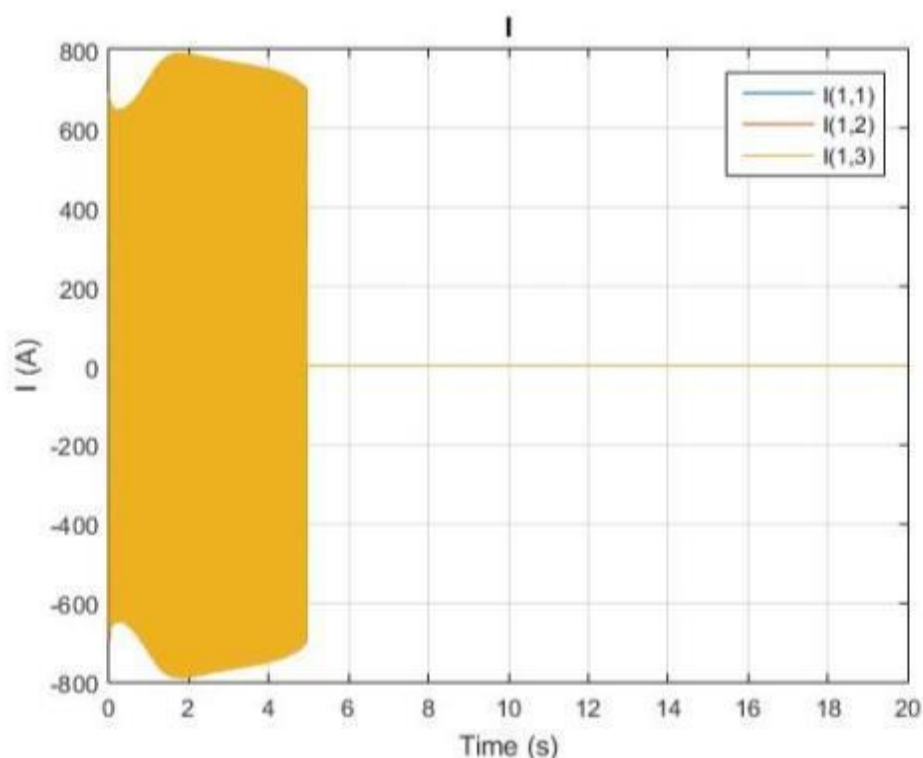
Διάγραμμα 4.41: Η ανά μονάδα παραγωγή ισχύος για τη γεννήτριες (για μια γεννήτρια 5MVA DIESEL)

4.5.5 Προσομοιώσεις λειτουργίας Bow Thrusters

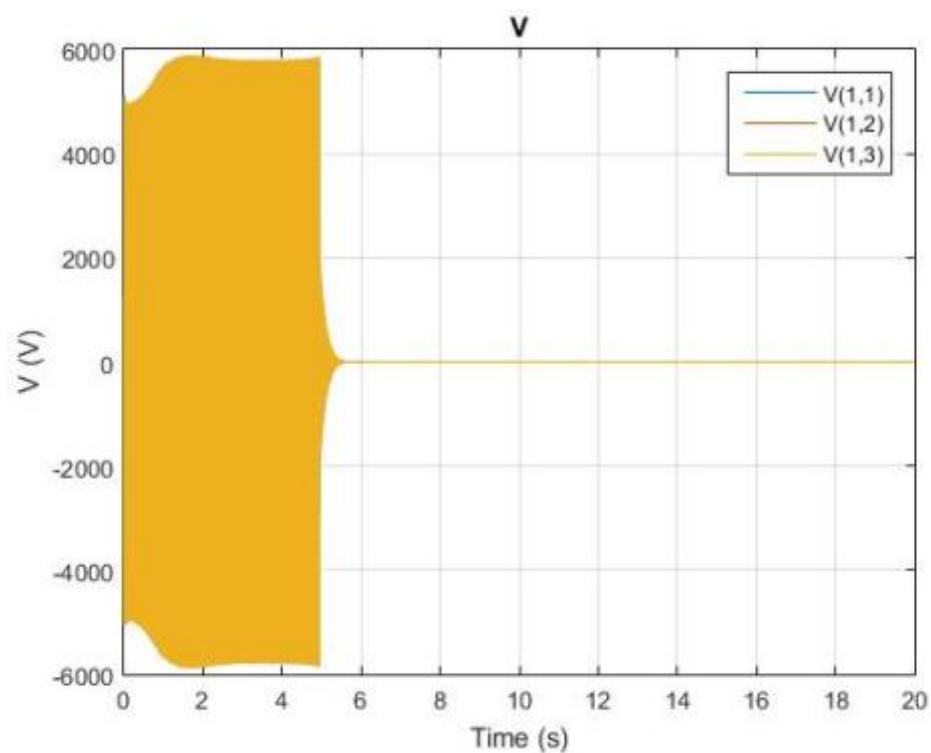
Στη συγκεκριμένη υποενότητα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σχετικά με τους κινητήρες bow thrusters. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αφορούν την κατανομή έντασης ρεύματος και τάσης για τη λειτουργία PORTOUT_SEAGOING και για τα δυο εξεταζόμενα δίκτυα (DC / AC).

Από τις διεξαχθείσες προσομοιώσεις διαπιστώθηκαν αμελητέες διαφοροποιήσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων. Για το λόγο αυτό θα παρουσιαστούν μόνο χαρακτηριστικά παραδείγματα διαγραμμάτων για τα δυο εξεταζόμενα δίκτυα.

4.5.5.1 DC Δίκτυο

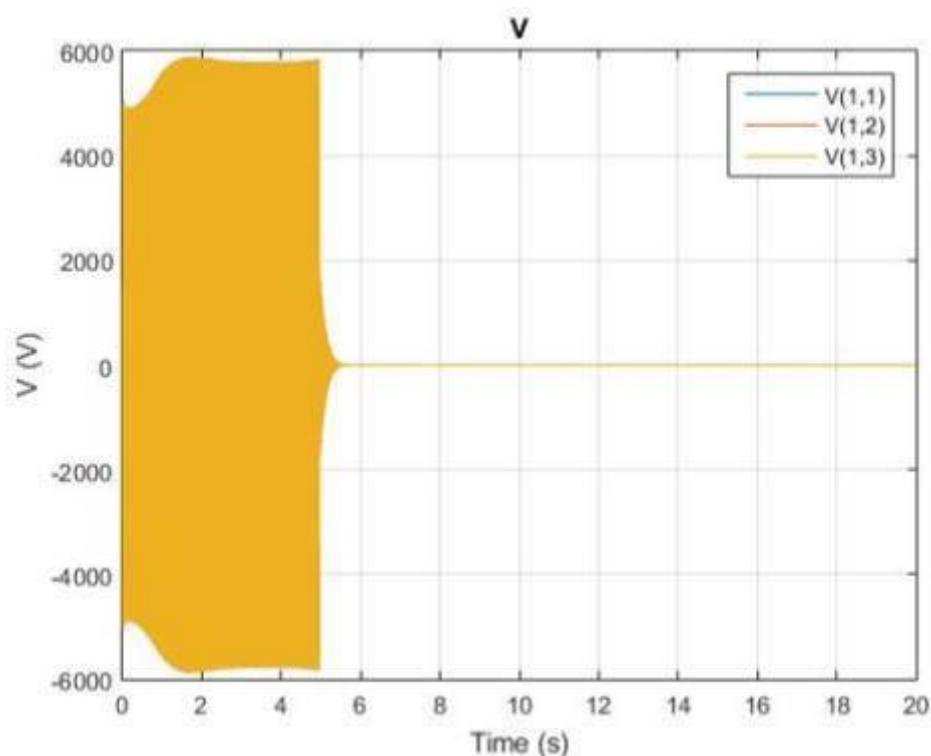


Διάγραμμα 4.42: Κατανομή έντασης ρεύματος κατά την απορρόφηση ηλεκτρικής ενέργειας από τους κινητήρες Bow thruster ισχύος 1 MW

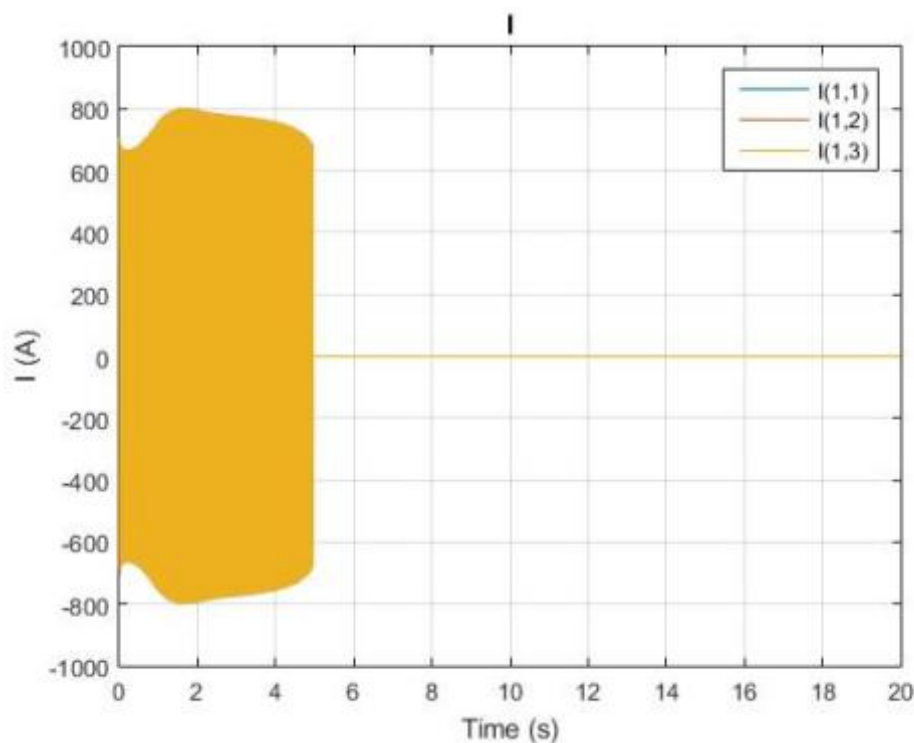


Διάγραμμα 4.43: Τάση στους ακροδέκτες του Bow thruster ισχύος 1 MW

4.5.5.2 AC Δίκτυο



Διάγραμμα 4.44: Τάση στους ακροδέκτες του Bow thruster ισχύος 1 MW



Διάγραμμα 4.45: Κατανομή έντασης ρεύματος κατά την απορρόφηση ηλεκτρικής ενέργειας από τους κινητήρες Bow thruster ισχύος 1 MW

4.6 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

1. Παρατηρούμε το LOAD SHARING σε διαφορετικές γεννήτριες που λειτουργούν παράλληλα. Το μεταβατικό σημείο για $t=5$ οφείλεται στο ότι τα Bow thrusters βγαίνουν από τη λειτουργία, ενώ η υπέρταση οφείλεται ακριβώς στο φαινόμενο του LOAD REJECTION (απόρριψη φορτίου). Η απόρριψη φορτίου σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι μια κατάσταση που εμφανίζεται όταν υπάρχει ξαφνική αποσύνδεση ενός φορτίου μεγάλης ισχύος, η οποία με τη σειρά της προκαλεί αύξηση της τάσης στην πλευρά της γεννήτριας. Υπάρχουν αρκετές δοκιμές απόρριψης φορτίου ενός συστήματος, οι οποίες στοχεύουν στον έλεγχο της απόκρισης του ηλεκτρικού συστήματος σε μια ξαφνική αφαίρεση φορτίου, ώστε να διαπιστωθεί η ευστάθειά του και η δυνατότητα επιστροφής του σε ευσταθή λειτουργία.
2. Αναφορικά με το ρεύμα των κινητήρων, φαίνεται πως το DC δίκτυο απαιτεί μικρότερη ένταση ρεύματος γιατί είναι απαλλαγμένο από την άεργο ισχύ που δημιουργείται στο αντίστοιχο AC. Όπως είναι γνωστό, η άεργος ισχύς εμφανίζεται σε κυκλώματα που διαρρέονται από εναλλασσόμενο ρεύμα, λόγω της διαφοράς φάσης που εμφανίζεται μεταξύ της τάσης και της έντασης του ρεύματος. Τα επαγωγικά και τα χωρητικά στοιχεία του κυκλώματος αποθηκεύουν ενέργεια, η οποία στη συνέχεια αποδίδεται στο κύκλωμα και παλινδρομεί στα καλώδια. Σε ένα κύκλωμα που

διαρρέεται από συνεχές ρεύμα, δεν υφίσταται η έννοια της άεργου ισχύος, γιατί δεν υπάρχει διαφορά φάσης μεταξύ τάσης και έντασης.

Οι ηλεκτρομαγνητικές μηχανές επαγωγής που λειτουργούν σε ένα δίκτυο ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τις γεννήτριες σε μηχανικό έργο και θερμότητα. Προκειμένου να επιτελεστεί η μετατροπή αυτή, μαγνητικά πεδία πρέπει να αναπτυχθούν στις μηχανές αυτές και αυτά τα πεδία σχετίζονται με την άεργο ισχύ. Παρόμοιο φαινόμενο λαμβάνει χώρα και με τα χωρητικής συμπεριφοράς φορτία του συστήματος, όπως είναι οι χωρητικότητες των καλωδίων και οι πυκνωτές. Στην περίπτωση αυτή έχουμε αποθήκευση ενέργειας υπό ηλεκτροστατική μορφή. Η κυκλική φόρτιση και εκφόρτωση των χωρητικών κυκλωμάτων γίνεται με παρόμοιο τρόπο με αυτό των επαγωγικών κυκλωμάτων αλλά με ρεύματα αντιθέτου φάσεως.

Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας απαιτείται η παραγωγή και μεταφορά ενέργειας να συμβαίνει με τον οικονομικότερο τρόπο. Αν και τα άεργα ρεύματα δεν καταναλώνουν ενέργεια από το σύστημα ισχύος, προκαλούν εντούτοις απώλειες ισχύος κατά την κυκλοφορία τους στα συστήματα διανομής ενέργειας μέσω της θέρμανσης των ηλεκτρικών καλωδίων. Στα συνήθη συστήματα ενέργειας κυκλοφορούν επαγωγικά ρεύματα (λόγω της φύσης των φορτίων) διαμέσου επαγωγικών στοιχείων του συστήματος διανομής (λόγω των καλωδίων). Ο παραπάνω συνδυασμός δημιουργεί προβλήματα, όπως πτώσεις τάσης και απώλειες ισχύος και συνεπώς η κυκλοφορία άεργων επαγωγικών ρευμάτων απαιτείται να περιορίζεται στο μέγιστο δυνατό.

3. Από τα στοιχεία που αναλύθηκαν προηγουμένως, πέρα από τα στοιχεία σταθερότητας και απόδοσης του δικτύου, υπάρχει και οικονομική πλευρά στα πλεονέκτημα των DC δικτύων έναντι των AC. Μιας και μικρότερη ένταση ρεύματος στο κύκλωμα συνεπάγεται καλώδια μικρότερης διατομής για τη διασύνδεση του κυκλώματος και τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό το σημείο καθιστά και οικονομικότερη την επιλογή των απαιτούμενων καλωδίων με πολλαπλό τρόπο, αφού τα καλώδια μικρότερης διατομής θα είναι φθηνότερα, ελαφρύτερα και θα καλύπτουν μικρότερο χώρο. Ο Πίνακας 4.6 παρουσιάζει τις διατομές των βασικότερων καλωδίων, την αντίστοιχη επιτρεπόμενη ένταση αλλά και την ασφάλεια που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για την προστασία του αγωγού. Όπως φαίνεται πέρα από τους αγωγούς σημαντικό οικονομικό όφελος αποκομίζεται και από τις μικρότερες ασφάλειες που απαιτεί ένα δίκτυο DC, λόγω των μικρότερων ρευμάτων που το διαρρέουν.

Πίνακας 4.6: Επιλογή διατομής αγωγών και ασφάλειας από την επιτρεπόμενη ένταση αγωγού

Ονομαστική διατομή καλωδίων (mm ²)	Μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση αγωγού / Ένταση ασφάλειας για την προστασία του αγωγού					
	<u>ΟΜΑΔΑ I</u>		<u>ΟΜΑΔΑ II</u>		<u>ΟΜΑΔΑ III</u>	
	Ένας ή περισσότεροι αγωγοί στο ίδιο καλώδιο ή σωλήνα π.χ. H05V-U (NYA)		Πολυπολικά, πεπλατυσμένα εύκαμπτα καλώδια		Μονοπολικά καλώδια στον αέρα, με ελάχιστη απόσταση τη διάμετρο τους	
	Επιτρεπόμενη ένταση αγωγού [A]	Ασφάλεια [A]	Επιτρεπόμενη ένταση αγωγού [A]	Ασφάλεια [A]	Επιτρεπόμενη ένταση αγωγού [A]	Ασφάλεια [A]
0,75	-	-	13	-	16	
1	12	-	16	15	20	20
1,5	16	10	20	20	25	25
2,5	21	16	27	25	34	35
4	27	20	36	35	45	50
6	35	25	47	50	57	60
10	48	35	65	60	78	90
16	65	63	87	80	104	100
25	88	80	115	100	137	125
35	110	100	143	125	168	160
50	140	125	178	160	210	200
70	175	160	220	225	260	260
95	210	200	265	260	310	300
120	250	300	310		365	

- Αναφορικά με την τάση των κινητήρων: Στα πλαίσια της διπλωματικής δημιουργήθηκε ένα δίκτυο διανομής DC μοναδικό και πρωτότυπο. Το συγκεκριμένο δίκτυο διαστασιολογήθηκε έτσι ώστε η παραγόμενη τάση να είναι σταθερή και απαλλαγμένη από κυμάτωση και η ολική συμπεριφορά του συστήματος να είναι ασύμπτωτα ευσταθής. Εξάλλου, τα δίκτυα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να φορτίζονται στη σωστή τάση ώστε να

καθίσταται δυνατή η μεταφορά της παραγωγικής ισχύος (πραγματικής ισχύος) από τα σημεία παραγωγής προς τους καταναλωτές, με τις ελάχιστες δυνατές πραγματικές (ωμικές) και άεργες (επαγωγικές) απώλειες. Η τάση των δικτύων αυτών, η οποία σχετίζεται άμεσα με τη ροή της άεργου ισχύος, πρέπει να διατηρείται εντός αυστηρά προκαθορισμένων ορίων διακύμανσης, και μάλιστα υπό συνθήκες διαρκούς μεταβολής των φορτίων, για λόγους καλής λειτουργίας του εξοπλισμού. Σε καταστάσεις, υψηλής κατανάλωσης πραγματικής και άεργου ισχύος, η λειτουργία των δικτύων γίνεται οριακή, καθώς τα περιθώρια ελέγχου της ροής άεργου ισχύος στενεύουν, με αποτέλεσμα να υφίσταται κίνδυνος black out.

Πρόκειται για ιδιαίτερα σημαντικά χαρακτηριστικά που πρέπει να πληροί το εν λόγω δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να διασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία σε όλες τις διαδικασίες που εκτελεί το πλοίο. Εξάλλου, η ευστάθεια του δικτύου DC αποτρέπει ενδεχόμενα black out και παρέχει προστασία έναντι σημαντικών βλαβών στον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό που φέρει το πλοίο. Όλα αυτά τα στοιχεία πληρούνται από το δίκτυο DC που σχεδιάστηκε σε αντίθεση με το αντίστοιχο AC, το οποίο φέρει τα μειονεκτήματα που δημιουργούνται από την άεργο ισχύ.

5. Τέλος, η ανά μονάδα παραγωγή ισχύος που χρησιμοποιείται στα περισσότερα διαγράμματα, ουσιαστικά δείχνει το πόσο τοις εκατό φαινόμενη ισχύ απορροφά το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη των φορτίων. Όπως φάνηκε από τα διαγράμματα της παραγόμενης ισχύος, μπορεί το δίκτυο AC να καλύπτει το απαιτούμενο φορτίο της εκάστοτε κατάστασης λειτουργίας, αλλά η ανά μονάδα παραγωγή ισχύος είναι φαινόμενη ισχύς. Όπως είναι γνωστό η φαινόμενη ισχύς αποτελείται από την πραγματική και την άεργο ισχύ σε ένα δίκτυο AC. Από την άλλη, ένα δίκτυο DC είναι απαλλαγμένο από την άεργο ισχύ. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι ένα δίκτυο AC για να καλύψει το φορτίο των καταναλωτών απαιτεί μεγαλύτερη φαινόμενη ισχύ (αφού η πραγματική ισχύς καλύπτει το φορτίο, ενώ η άεργος δεν συμμετέχει), εν αντιθέσει με την ισχύ από ένα δίκτυο DC. Αυτό είναι ένα ακόμη σημείο οικονομικότητας των δικτύων DC, μιας και γίνεται και μικρότερη κατανάλωση καυσίμου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Οικονομοτεχνική αξιολόγηση

5.1 Γενικά στοιχεία

Στο παρόν Κεφάλαιο επιχειρείται η οικονομοτεχνική αξιολόγηση 4 συστημάτων πρόωσης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για το πλοίο. Το συγκεκριμένο πλοίο μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) έχει τη δυνατότητα ανάκτησης των ατμών φυσικού αερίου που διαρρέουν από τις δεξαμενές μεταφοράς του. Το καύσιμο αυτό το καταναλώνει για την κάλυψη των αναγκών του πλοίου. Η συγκεκριμένη λειτουργία καλείται *GAS MODE*. Με αυτή τη δυνατότητα παροχής καυσίμου προτάθηκαν τέσσερα διαφορετικά συστήματα, τα οποία θα συγκριθούν σε οικονομική βάση, ώστε να αξιολογηθεί η βιωσιμότητα μιας τέτοιας επένδυσης.

Τα κύρια συστήματα που εξετάστηκαν είναι:

1. DIESEL ELECTRIC PROPULSION
2. FULL POWER CONVERTER AC SYSTEM
3. DC SYSTEM
4. VARIABLE FREQUENCY AC SYSTEM

Ο Πίνακας 5.1 παρουσιάζει τα κύρια στοιχεία που θεωρήθηκαν για την οικονομοτεχνική αξιολόγηση των 4 σεναρίων επένδυσης.

Πίνακας 5.1: Κύρια στοιχεία για την οικονομοτεχνική αξιολόγηση

ΔΕΙΚΤΗΣ ΠΛΗΘΩΡΙΣΜΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ	0,04
ΔΕΙΚΤΗΣ ΠΛΗΘΩΡΙΣΜΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	0,04
ΔΕΙΚΤΗΣ ΠΛΗΘΩΡΙΣΜΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΕΛΑΙΟΥ	0,04
ΗΜΕΡΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΕ ΕΤΗΣΙΑ ΒΑΣΗ	300
ΕΤΗΣΙΑ ΑΡΧΙΚΑ ΚΑΘΑΡΑ ΕΣΟΔΑ	12.000.000€
ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ	20
CRF (N_L, r_L)	0,09439
ΕΠΙΤΟΚΙΟ ΔΑΝΕΙΣΜΟΥ	0,07
ΧΡΟΝΟΣ ΑΠΟΠΛΗΡΩΜΗΣ ΔΑΝΕΙΟΥ	20

ΕΠΙΤΟΚΙΟ ΑΓΟΡΑΣ	0,12
ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΛΗΡΩΜΑΤΟΣ	20
ΜΕΣΟΣ ΜΙΣΘΟΣ ΠΛΗΡΩΜΑΤΟΣ	1.500
ΕΠΙΤΟΚΙΟ ΠΛΗΘΩΡΙΣΜΟΥ	0,04
ΙΔΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΑ	10.000.000€

5.2 Ανάλυση κόστους των κύριων συστημάτων

Στην παρούσα ενότητα θα γίνει η παρουσίαση του κόστους όλων των κύριων μερών και στοιχείων των 4 συστημάτων που προτάθηκαν. Η ανάλυση κόστους αφορά τόσο τα διάφορα μέρη του κάθε συστήματος όπως οι κινητήρες πρόωσης, τις κύριες γεννήτριες, τους μετατροπείς ισχύος και τους μετασχηματιστές, όσο και τον τύπο και την ποσότητα του καθενός. Με αυτά τα στοιχεία είναι δυνατό να υπολογιστεί το συνολικό κόστος επένδυσης για κάθε σενάριο. Ο ακόλουθος πίνακας παρουσιάζει το συνολικό ύψος επένδυσης για κάθε ένα σύστημα.

<i>DIESEL ELECTRIC PROPULSION</i>	<i>FULL POWER CONVERTER AC SYSTEM</i>	<i>DC SYSTEM</i>	<i>VARIABLE FREQUENCY AC SYSTEM</i>
27.494.325€	34.814.325€	34.814.325€	30.314.325€

Οι ακόλουθοι πίνακες παρουσιάζουν την ανάλυση κόστους κάθε συστήματος που προτάθηκε για το πλοίο LNG.

Πίνακας 5.2: Στοιχεία κόστους όλων των κύριων μερών του συστήματος DIESEL ELECTRIC PROPULSION

DIESEL ELECTRIC PROPULSION (GAS MODE)		Κόστος αγοράς			
Προωστήριοι κινητήρες		€			
TYPE	Ποσότητα				
PROPULSION MOTOR 2 x 13500 kW	2	5.500.000			
Σύνολο		5.500.000 €			
Κύριες γεννήτριες DIESEL		Κόστος αγοράς	Κόστος Συντήρησης	Λειτουργικό κόστος (Λειτουργία σε L.N.G) €/year	
Τύπος	Ποσότητα	€	€/year	Κόστος καυσίμου	L.O COST
WARTSILA 9L50DF 8775kW 6600V 60Hz	4	12.783.760	34.214	967.262	15.054
CAT GEN SET C9389 kVA 440V 60Hz	1	410.565	396	15.507	149
	Σύνολο	13.194.325 €	34.610 €	997.972 €	15.203 €
				Σύνολο	1.013.175 €
Μετατροπείς Ισχύος			Κόστος αγοράς		
Τύπος		Ποσότητα	€		
BOW THRUSTER CONVERTER 1 x 2000 Kw		1	400.000		
MAIN STREAM CONVERTERS 2 x 13500 kW		2	5.400.000		
Σύνολο			5.800.000 €		
Μετασχηματιστές			Κόστος αγοράς		
Τύπος		Ποσότητα	€		
MAIN: 6600/440 V DRY TYPE		2	40.000		
MAIN: 440/220 V DRY TYPE		2	10.000		
EMERGENCY: 440/220 V DRY TYPE		1	8.000		
Σύνολο			58.000 €		

Πίνακας 5.3: Στοιχεία κόστους όλων των κύριων μερών του FULL POWER CONVERTER AC SYSTEM

FULL POWER CONVERTER AC SYSTEM (GAS MODE)		Κόστος αγοράς			
Προωστήριοι κινητήρες		€			
TYPE	Ποσότητα				
PROPULSION MOTOR 2 x 13500 kW	2	5.500.000			
Σύνολο		5.500.000 €			
Κύριες γεννήτριες DIESEL		Κόστος αγοράς	Κόστος Συντήρησης	Λειτουργικό κόστος (Λειτουργία σε L.N.G) €/year	
Τύπος	Ποσότητα	€	€/year	Κόστος καυσίμου	L.O COST
WARTSILA 9L50DF 8775kW 6600V 60Hz	4	12.783.760	34.214	967.262	15.054
CAT GEN SET C9389 kVA 440V 60Hz	1	410.565	396	15.507	149
	Σύνολο	13.194.325 €	34.610 €	997.972 €	15.203 €
				Σύνολο	1.013.175 €
Μετατροπείς Ισχύος			Κόστος αγοράς		
Τύπος		Ποσότητα	€		
MAIN STREAM CONVERTERS (AC/DC/AC) 4 x 8775 kW		4	7.020.000		
MAIN STREAM CONVERTERS (AC/DC/AC) 1 x 1000kW		1	200.000		
MAIN STREAM CONVERTERS (AC/DC/AC) 2 x 13500 kW		2	5.400.000		
BOW THRUSTER CONVERTER 1 x 2000 Kw		1	400.000		
AUX. MACH.CONVERTERS (AC/DC/AC) 2 x 250kW		2	100.000		
Σύνολο			13.120.000 €		
Μετασχηματιστές			Κόστος αγοράς		
Τύπος		Ποσότητα	€		
MAIN: 440/220 V DRY TYPE		2	10.000		
Σύνολο			10.000€		

Πίνακας 5.4: Στοιχεία κόστους όλων των κύριων μερών του DC SYSTEM

DC SYSTEM (GAS MODE)		Κόστος αγοράς			
Προωστήριοι κινητήρες		€			
TYPE	Ποσότητα				
PROPULSION MOTOR 2 x 13500 kW	2	5.500.000			
Σύνολο		5.500.000 €			
Κύριες γεννήτριες DIESEL		Κόστος αγοράς	Κόστος Συντήρησης	Λειτουργικό κόστος (Λειτουργία σε L.N.G) €/year	
Τύπος	Ποσότητα	€	€/year	Κόστος καυσίμου	L.O COST
WARTSILA 9L50DF 8775kW 6600V 60Hz	4	12.783.760	30,793	822,172	12,796
CAT GEN SET C9389 kVA 440V 60Hz	1	410.565	356	13,181	127
	Σύνολο	13.194.325 €	31,149 €	848,276 €	12,923 €
				Σύνολο	861,199 €
Μετατροπείς Ισχύος			Κόστος αγοράς		
Τύπος		Ποσότητα	€		
MAIN STREAM CONVERTERS (AC/DC/AC) 4 x 8775 kW		4	7.020.000		
MAIN STREAM CONVERTERS (AC/DC/AC) 1 x 1000kW		1	200.000		
MAIN STREAM CONVERTERS (AC/DC/AC) 2 x 13500 kW		2	5.400.000		
BOW THRUSTER CONVERTER 1 x 2000 Kw		1	400.000		
AUX. MACH.CONVERTERS (AC/DC/AC) 2 x 250kW		2	100.000		
Σύνολο			13.120.000 €		
Μετασχηματιστές			Κόστος αγοράς		
Τύπος		Ποσότητα	€		
MAIN: 440/220 V DRY TYPE		2	10.000		
Σύνολο			10.000€		

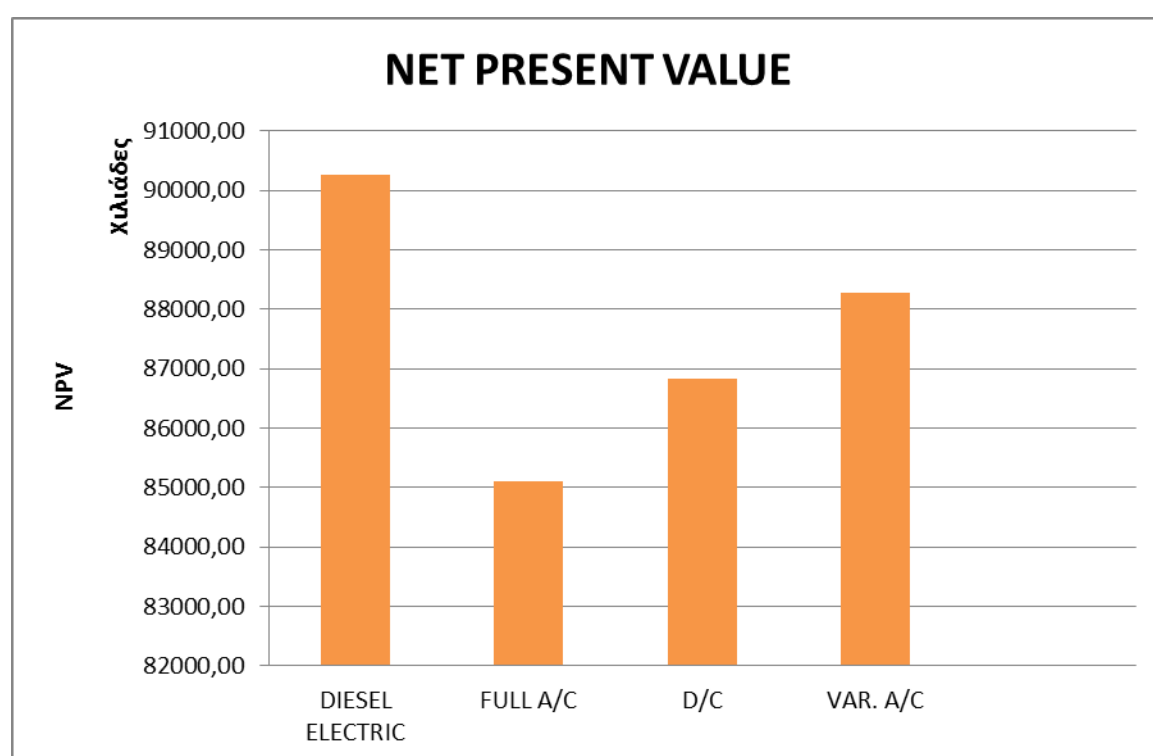
Πίνακας 5.5: Στοιχεία κόστους όλων των κύριων μερών του VARIABLE FREQUENCY AC SYSTEM

VARIABLE FREQUENCY AC SYSTEM (GAS MODE)		Κόστος αγοράς			
Προωστήριοι κινητήρες		€			
TYPE	Ποσότητα				
PROPULSION MOTOR 2 x 13500 kW	2	5.500.000			
Σύνολο		5.500.000 €			
Κύριες γεννήτριες DIESEL		Κόστος αγοράς	Κόστος Συντήρησης	Λειτουργικό κόστος (Λειτουργία σε L.N.G) €/year	
Τύπος	Ποσότητα	€	€/year	Κόστος καυσίμου	L.O COST
WARTSILA 9L50DF 8775kW 6600V 60Hz	4	12.783.760	34.214	967.262	15.054
CAT GEN SET C9389 kVA 440V 60Hz	1	410.565	396	15.507	149
	Σύνολο	13.194.325 €	34.610 €	997.972 €	15.203 €
				Σύνολο	1.013.175 €
Μετατροπείς Ισχύος			Κόστος αγοράς		
Τύπος	Ποσότητα	€			
MAIN STREAM CONVERTERS (AC/DC/AC) 4 x 8775 kW	4	7.020.000			
MAIN STREAM CONVERTERS (AC/DC/AC) 1 x 1000kW	1	200.000			
MAIN STREAM CONVERTERS (AC/DC/AC) 2 x 13500 kW	2	5.400.000			
BOW THRUSTER CONVERTER 1 x 2000 Kw	1	400.000			
AUX. MACH.CONVERTERS (AC/DC/AC) 2 x 250kW	2	100.000			
Σύνολο			13.120.000 €		
Μετασχηματιστές			Κόστος αγοράς		
Τύπος	Ποσότητα	€			
MAIN: 440/220 V DRY TYPE 32kVA	2	10.000			
Σύνολο			10.000€		

5.3 Διαγράμματα οικονομικής αξιολόγησης επενδύσεων

Ακολούθως παρουσιάζονται τα διαγράμματα βασικών δεικτών για την οικονομοτεχνική αξιολόγηση των τεσσάρων συστημάτων που προτάθηκαν. Η σύγκριση σε ετήσια βάση γίνεται για κάθε χρονική περίοδο και για όλες τις δαπάνες και κέρδη του έργου.

Η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV) μίας επένδυσης είναι η αξία αυτής ανηγμένη στη χρονική στιγμή έναρξης της εμπορικής της λειτουργίας. Με την μέθοδο της καθαρής παρούσας αξίας προσδιορίζεται η καθαρή ωφέλεια του έργου σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση. [92]



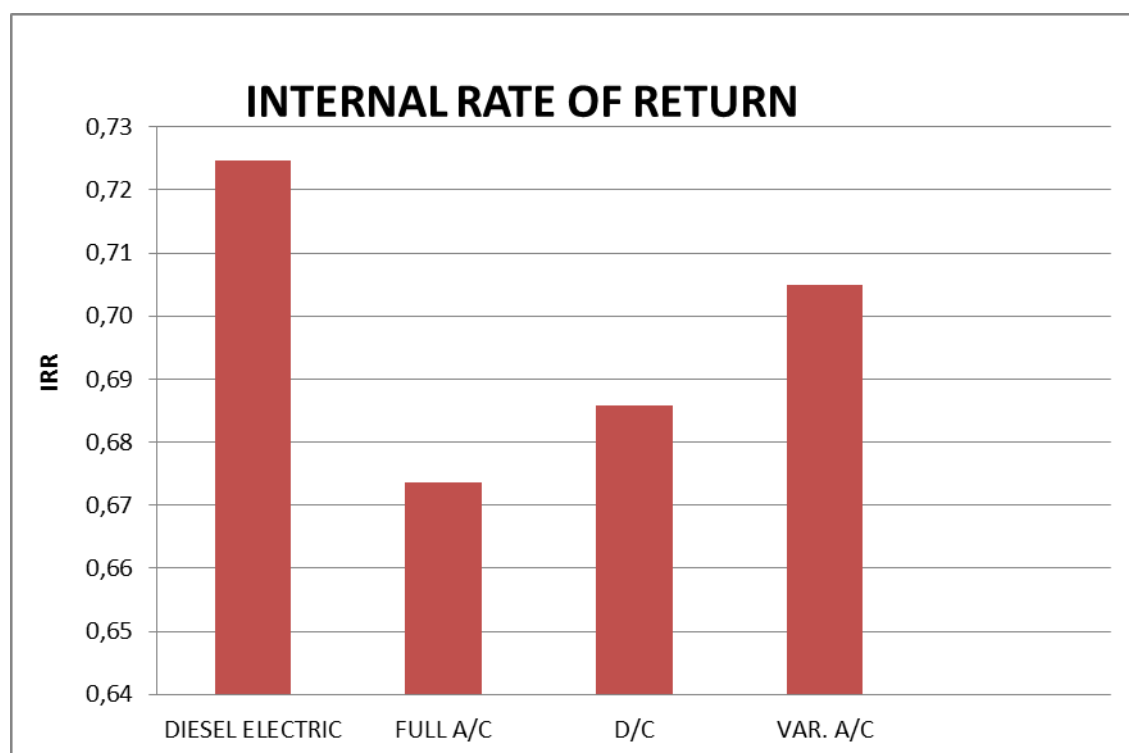
Διάγραμμα 5.1: Σύγκριση καθαρής παρούσας αξίας των τεσσάρων διαφορετικών συστημάτων

DIESEL ELECTRIC	FULL A/C	D/C	VAR. A/C
90.261.437€	85.100.379€	86.833.004€	88.273.161€

Όλες οι επενδύσεις είναι βιώσιμες, μιας και έχουν θετική ΚΠΑ. Πιο ειδικά την υψηλότερη ΚΠΑ έχει το κλασικό σύστημα DIESEL ELECTRIC και ακολουθεί σύστημα AC μεταβλητής συχνότητας. Η χαμηλότερη ΚΠΑ ήταν για το σύστημα FULL

AC, ακολουθούμενο από το σύστημα DC, το οποίο παρόλα τα πλεονεκτήματα του εν λόγω συστήματος, έχει αυξημένο κόστος επένδυσης.

Ο δείκτης IRR (Internal Rate of Return – Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης) είναι η τιμή του επιτοκίου αναγωγής, που κάνει την NPV της επένδυσης, για τη διάρκεια της οικονομικής αξιολόγησης, ίση με το μηδέν. Ειδικότερα, ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης εκφράζει την απόδοση κεφαλαίου της αρχικής επένδυσης κατά τη διάρκεια του οικονομικού κύκλου ζωής της. [92]



Διάγραμμα 5.2: Σύγκριση εσωτερικού βαθμού απόδοσης των τεσσάρων διαφορετικών συστημάτων

DIESEL ELECTRIC	FULL A/C	D/C	VAR. A/C
0,7246	0,6736	0,6857	0,7049

Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης των εξεταζόμενων επενδύσεων είχε ανάλογη πορεία με την ΚΠΑ, όπως ήταν αναμενόμενο αφού οι δείκτες συνδέονται άμεσα. Και σε αυτόν τον δείκτη το κλασικό σύστημα ήταν το πιο αποδοτικό (73%) ενώ το σύστημα DC είχε χαμηλότερο EBA (69%). Ο χαμηλότερος EBA σημειώθηκε από το σύστημα FULL AC ίσο με 67%.

Ανασκόπηση - Συμπεράσματα

Η παραπάνω εργασία έχει διττό στόχο, την καταγραφή και ενημέρωση στις τεχνολογικές εξελίξεις στα ηλεκτρονικά ισχύος και ειδικότερα στις DC εφαρμογές αλλά και την εξερεύνηση και αξιολόγηση των προοπτικών χρήσης τους σε πλοία υψηλών ενεργειακών και όχι μόνο απαιτήσεων όπως τα LNG carriers.

Στο πρώτο κεφάλαιο αυτός ο στόχος εκπληρώνεται με την παρουσίαση συστημάτων παραγωγής ενέργειας (από τεχνολογίες άνθρακα μέχρι πυρηνική τεχνολογία), τις εξελίξεις στην κατασκευή μετασχηματιστών και προωθημένων μεθόδων αποθήκευσης και εξοικονόμησης ηλεκτρικής ενέργειας και τέλος με παρουσίαση σύγχρονων εφαρμογών DC σε διάφορους κλάδους της βιομηχανίας. Στο κεφάλαιο 2 επιχειρείται η κατανόηση των συστημάτων μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας με την παρουσίαση τόσο AC όσο και DC συστημάτων αλλά και την σύγκρισή τους.

Στη συνέχεια γίνεται η μεταπήδηση στο περιβάλλον του πλοίου με την αναφορά στο κεφάλαιο 3 συγκεκριμένων συστημάτων ηλεκτροπρόωσης. Ίσως το σημαντικότερο κομμάτι της εργασίας είναι το κεφάλαιο 4 και η αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων - προσομοιώσεων της εφαρμογής DC στο σύστημα του πλοίου. Εδώ θα πρέπει να αναφέρουμε τα πολύ ενθαρρυντικά αποτελέσματα που έδωσε το DC από ηλεκτρολογική σκοπιά. Δεν υπήρχαν φαινόμενα αστάθειας ή αποτυχίας του συστήματος. Η γεννήτριες λειτουργούσαν αποτελεσματικότερα καθώς τροφοδοτούσαν το σύστημα με ωφέλιμη ισχύ εν αντιθέσει με το AC όπου η παρουσία της άεργου δυσκολεύει αρκετά το δίκτυο. Επιπλέον σε όλες τις καταστάσεις που μελετήθηκαν και αξιολογήθηκαν το DC δείχνει να έχει καλύτερη αντιμετώπιση, ειδικά όταν πρόκειται για φαινόμενα αυξομειώσεων των ενεργειακών απαιτήσεων.

Τελικό κεφάλαιο αποτελεί η τεχνοοικονομική μελέτη και σύγκριση των τεσσάρων συστημάτων ηλεκτροπρόωσης που αναφέρθηκαν νωρίτερα. Αναφορικά με την οπτική γωνία του οικονομολόγου, τα πράγματα είναι κάπως διαφορετικά καθώς το DC έχει πολύ υψηλό κόστος εγκατάστασης με βάσει τα στοιχεία που ήταν διαθέσιμα. Επιπλέον παρά την χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμων και λαδιών ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης του δεν είναι ο υψηλότερος.

Συμπερασματικά πρέπει να αναφερθεί πως η εφαρμογή DC συστημάτων επί των πλοίων χρήζει περισσότερης έρευνας στο μέλλον. Τα αποτελέσματα από πλευράς απόδοσης συστήματος είναι εξαιρετικά και επιβεβαιώνουν τις αρχικές εκτιμήσεις. Ακόμα υπάρχει πολύς δρόμος όμως στην ανάπτυξη των επιμέρους δομικών στοιχείων όπως καλώδια, ανορθωτές κλπ. Λόγω αυτού λοιπόν ανεβαίνει αρκετά το κόστος εγκατάστασης πράγμα που αποτελεί τροχοπέδη στην ευρύτερη χρήση του DC. Μελλοντικά δεν πρέπει να ανακαταληφθεί η προσπάθεια εισαγωγής του DC στην αγορά καθώς τα πλεονεκτήματά του είναι πλέον πιο ορατά και εύκολα εκμεταλλεύσιμα από ποτέ.

Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

Στο τέλος μιας εργασίας αποτελεί καθήκον του συγγραφέα να παρουσιάσει θέματα, σκέψεις και γενικότερα προτάσεις για μελλοντική μελέτη και έρευνα πάνω στο αντικείμενο που εξετάστηκε.

Η παραπάνω Διπλωματική Εργασία μπορεί να αποτελέσει αφορμή για μελλοντική σκέψη και έρευνα για πολλούς λόγους. Αρχικά γιατί το θέμα με το οποίο καταπιάνεται ίσως αποτελέσει το πιο δυνατό χαρτί της εμπορικής ναυτιλίας τα επόμενα χρόνια ειδικά από τη σκοπιά των κατασκευαστών ή των μηχανικών εν γένει. Επιπλέον δεν θα πρέπει να αγνοηθούν οι δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν στο πειραματικό κομμάτι (αναφέρονται στο κεφάλαιο 4) λόγω της έλλειψης διαθέσιμων στοιχείων για μελέτη και αξιολόγηση σε κρίσιμους τομείς της εργασίας. Έτσι προτείνονται τα εξής:

- Μελέτη των ηλεκτρολογικών και δομικών στοιχείων ασύγχρονων κινητήρων μεγάλης ισχύος.
- Έρευνα σε χαρακτηριστικά στοιχεία DC καλωδίων, ανορθωτών ή μετασχηματιστών.
- Προοπτικές χρήσης μπαταριών σε πλοία υψηλών ενεργειακών απαιτήσεων.
- Ανάλυση των πλεονεκτημάτων της χρήσης DC από καθαρά ναυπηγική σκοπιά (ευκολία σχεδίασης, διαθέσιμος χώρος μηχανοστασίου, αύξηση Payload κλπ)
- Έλεγχος του δείκτη EEDI για DC ηλεκτροπρόωση
- Δημιουργία προγραμμάτων μελέτης και ανάλυσης γεννητριών διπλού καυσίμου.
- Προοπτικές εφαρμογής ηλεκτροπρόωσης σε tanker ή bulk carriers.
- Προσανατολισμένη οικονομική μελέτη σε ειδικότερα θέματα.
- Μελέτη ρίσκου στις εφαρμογές DC επί των πλοίων.

Βιβλιογραφία

1. E. Amoiralis, M. Tsili, P. Georgilakis, The State of the Art in Engineering Methods for Transformer Design and Optimization: a Survey, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 2008, Vol. 10, No. 5, pp. 1149-1158.
2. ΛΑΓΗΕ: <http://www.lagie.gr/>
3. Nanno Bolt, Power Generation Technology by 2025 and the critical role of Water, 14th International Conference on the Properties of Water and Steam in Kyoto.
4. Review of the status of advanced materials for power generation. Cleaner Coal Technology Program Enquiry unit, Department of Trade and Industry, London, 2002.
5. R. Mayson. The outlook for Nuclear Energy. Proceedings PowerGen Europe, Barcelona, 2004.
6. www.peswiki.com/index.php/Directory:Advanced_Power_Generation
7. R. Baehr, Transformer Technology State of the art trends of future development, Electra, October, 2001, No 198, pp. 13-19.
8. Siemens Energy Sector, Transformers, Power Engineering Guide, Edition 7.0.
9. www.toshiba.co.jp
10. www.wtec.org
11. www.electrical-engineering-portal.com/dry-transformer-percent-impedance-definition
12. B. Laikhtman, P.M. Solomon, DC transformer: Dream or reality?, Solid State Communications 138 (2006) 143–146.
13. Baxter R, editor. Energy storage: a nontechnical guide; 2006.
14. Byung-Kwan K, et al. A study on optimal sizing of superconducting magnetic energy storage in distribution power system. IEEE Transactions on Applied Superconductivity 2012.
15. Kim GH, et al. A novel HTS SMES application in combination with a permanent magnet synchronous generator type wind power generation system. Physica C: Superconductivity 2011.
16. Samineni S. Modeling and analysis of a flywheel energy storage system for voltage sag correction; 2003.
17. Nor Shahida Hasan, Mohammad Yusri Hassan, Md Shah Majid, Hasimah Abdul Rahman, Review of storage schemes for wind energy systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews 21 (2013) 237–247.

18. M. Bash, R.R. Chan, J. Crider, C. Harianto, J. Lian, J. Neely, S.D. Pekarek, S.D. Sudhoff, N. Vaks, in: IEEE Electric Ship Technologies Symposium, IEEE, 2009, pp. 560-567.
19. R. Nilsen, I. Sorfonn, in: 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009.
20. A. Adnanes, Maritime Electrical Installations and Diesel Electric Propulsion, ABB AS Marine, Oslo, 2003.
21. J.F. Hansen, J.O. Lindtjorn, U.U. Odegaard, T.A. Myklebust, in: 4th International Conference on Technology and Operation of Offshore Support Vessels, 2011.
22. Bijan Zahedi, Lars E. Norum, Kristine B. Ludvigsen, Optimized efficiency of all-electric ships by dc hybrid power systems, Journal of Power Sources 255,2014, pp. 341-354.
23. S.D. Breucker, E. Peeters, J. Driesen, in: IEEE Electric Ship Technologies Symposium, 2009, pp. 310-317.
24. O. Laldin, M. Moshirvaziri, O. Trescases, IEEE Trans. Power Electron. 28 (2013) 3882-3895.
25. S. Barsali, C. Miulli, A. Possenti, IEEE Trans. Energy Convers. 19 (2004) 187-195.
26. M. Yilmaz, P.T. Krein, IEEE Trans. Power Electron. 28 (2013) 2151-2169.
27. CMAL Hybrid Ferries, Developing the World's first Sea Going Roll On Roll Off Vehicle and Passenger Diesel Electric Hybrid Ferries, May 2012.
28. www.abb.com, Product brochure, Power and Traction Transformers, Advanced technology for maximum reliability.
29. www.toyota-global.com
30. Gomez-Exposito A., Mauricio J.M., Maza-Ortega J.M. "VSC-based MVDC Railway Electrification System" IEEE transactions on power delivery, v.29, no.1, Feb.2014.
31. C G Hodge and D J Mattick, Modern Industrial and Commercial Applications of DC Power Transmission and Distribution, DC Power Systems Workshop.
32. M. J. Provost, "The More Electric Aero-engine: a general overview from an engine manufacturer," in International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, 2002
33. A. Brockschmidt, "Electrical environments in aerospace applications," Proceedings of the Electric Machines and Drives, 1999. International Conference IEMD '99, pp. 719-721.
34. I. Moir and A. Seabridge, Aircraft systems : mechanical, electrical, and avionics subsystems integration, London, 2011, 3rd edition, pp. 540-545.

35. R.J. Wai, S.J. Jhung, J.J. Liaw, Y.R. Chang, IEEE Trans. Power Electron. 28 (2013) 3231-3244.
36. IEEE Power & Energy Society: <http://www.ieee-pes.org/>
37. James A. Momoh Marcel Dekker, Inc. Electric power system applications of optimization, 2001.
38. Dragicevic, Tomislav, Quintero, Juan Carlos Vasquez, Guerrero, Josep M., Skrlec, Davor, Advanced LVDC Electrical Power Architectures and Microgrids, Aalborg Universitet, E E E Electrification Magazine, 2014, 2(1), pp. 54-65.
39. Β. Κ. Παπαδιάς, Γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, Εκδόσεις Συμμετρία 1999.
40. Μελέτη Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς (ΜΑΣΜ), περίοδος 2010-2014 – Έκθεση του Δ.Ε.Σ.Μ.Η.Ε. – 2010.
41. Pawani K., Recent Advances in High-Voltage Direct-Current Power Transmission System, International Journal of Advanced Technology & Engineering Research (IJATER), Volume 2, Issue 2, 2012, NO: 2250-3536, pp.1-4 .
42. J. Arrillaga, “High voltage direct current transmission “Institution of Electrical Engineers, ISBN: 0852969414, October 1998.
43. Michael P. Bahrman, Overview of HVDC transmission. Power Systems Conference and Exposition, 2006.
44. M. Davies, M. Dommaschk, J. Dorn, J. Lang, D. Retzmann και D. Soerangr. Hvdc plus- basics and principle of operation. Siemens Energy Sector, 2008.
45. <http://engineering-projecttopics.blogspot.gr/2015/03/diode-clamped-multi-level-inverter.html>)
46. Bram Van Eeckhout, The economic value of VSC HVDC compared to HVAC for offshore wind farms 2007-2008, Katholieke Universiteit Leuven.
47. K. Techakittiroj, V. Wongpaibool, Co-existence between AC- distribution and DC- distribution: in the view of appliances, International Conference on Computer and Electrical Engineering (ICCEE), 2009.
48. W. Yu, J.-S. Lai, H. Ma, C. Zheng, High-efficiency DC-DC converter with twin bus for dimmable LED lighting, IEEE Trans. Power Electron. 26, 2011, pp. 2095-2100.
49. Massoud Amin, Challenges in Reliability, Security, Efficiency, and Resilience of Energy Infrastructure: Toward Smart Self-healing Electric Power Grid, University of Minnesota, Minneapolis, USA.
50. G.C. Lazaroiu, D. Zaninelli, A control system for dc arc furnaces for power quality improvements, Electr. Power Syst. Res. 80, 2010, pp. 1498-1505.
51. P. Wang, L. Goel, F.H. Choo, Harmonizing AC and DC: a hybrid AC/DC future grid solution, IEEE Power Energy Mag. 11, 2013, pp. 76-83.

52. G.F. Reed, DC technologies: solutions to electric power system advancements, *IEEE Power Energy Mag.* 10, 2012, pp. 10-17.
53. T. Wu, C. Chang, L. Lin, G. Yu, Y. Chang, DC-bus voltage control with a three-phase bidirectional inverter for DC distribution systems, *IEEE Trans. Power Electron.* 28, 2013, pp. 1890-1899.
54. C. Dierckxsens, K. Srivastava, M. Reza, S. Cole, J. Beerten, R. Belmans, A distributed DC voltage control method for VSC MTDC systems, *Electr. PowerSyst. Res.* 82, 2012, pp.54-58.
55. D. Chen, L. Xu, L. Yao, DC voltage variation based autonomous control of DC microgrids, *IEEE Trans. Power Deliv.* 28, 2013, pp. 637-648.
56. J.J. Justo, F. Mwasilu, J. Lee, J. Jung, AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy sources: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 24, 2013, pp. 387-405.
57. B.H. Kenny, R. Jansen, P. Kascak, T. Dever, W. Santiago, Integrated power and attitude control with two flywheels, *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* 41, 2005, pp. 1431-1449.
58. B. Becker, B. Sonnenberg, DC microgrids in buildings and data centers, in: *IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, 2011, pp. 1-7.
59. Ahmed T. Elsayed, Ahmed A. Mohamed, Osama A. Mohammed, DC microgrids and distribution systems: An overview, *Electric Power Systems Research* 119, 2015, pp. 407-417.
60. Estefanía Planas, Jon Andreu, José Ignacio Gárate, Iñigo Martínez de Alegría, Edorta Ibarra, AC and DC technology in microgrids: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43 (2015), pp. 726-749.
61. B.T. Patterson, DC, come home: DC microgrids and the birth of the Enernet, *IEEE Power Energy Mag.* 10 (2012) 60-69.
62. S. Anand, B.G. Fernandes, M. Guerrero, Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low-voltage DC microgrids, *IEEE Trans. Power Electron.* 28, 2013, pp. 1900-1913.
63. H. Kakigano, Y. Miura, T. Ise, Low-voltage bipolar-type DC microgrid for super high quality distribution, *IEEE Trans. Power Electron.* 25, 2010, pp. 1-10.
64. P.T.M. Vaessen, Direct-Current Voltage (DC) in Households, July 13, 2005.
65. W. Yu, J-S Lai, H. Ma, C. Zheng, High-efficiency DC-DC converter with twin bus for dimmable LED lighting, *IEEE Trans. Power Electron.* 26, 2011, 2095-2100.
66. E.C.W. de Jong & P.T.M. Vaessen, DC power distribution for server farms, KEMA Consulting September 2007.

67. D. Salomonsson, L. Soder ,and A. Sannino: “An Adaptive Control System for a DC Microgrid for Data Centers”, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.44, No.6, 2008, pp.1910-1917.
68. A. Sannino, G. Postiglione, M. Bollen, Feasibility of a DC network for commercial facilities, IEEE Transactions on Industry Applications, September/October 2003, vol. 39, no. 5, pp. 1499-1507.
69. M. Amin, Y. Arafat, S. Lundberg, S. Mangold, Low voltage DC distribution system compared with 230 V_{AC}, in: IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2011, pp. 340-345.
70. X. She, A.Q. Huang, S. Lukic, M.E. Baran, On integration of solid-state transformer with zonal DC microgrid, IEEE Trans. Smart Grid 3, 2012, pp. 975-985.
71. X. She, X. Yu, F. Wang, A.Q. Huang, Design and demonstration of a 3.6 kV-120 V/10 kV. A solid-state transformer for smart grid application, IEEE Trans. Power Electron. 29, 2014, pp. 3982-3996.
72. D. Salomonsson, A. Sannino, Low voltage DC distribution systems for commercial power systems with sensitive electronic loads, IEEE Trans. Power Deliv. 22, 2007, pp. 1620-1627.
73. D. Salomonsson, L. Soder, A.Sannino, Protection of low-voltage DC microgrids, IEEE Trans, Power Deliv. 24, 2009.
74. X. Feng, J. Liu, F. C. Lee, “Impedance Specifications for Stable DC Distributed Power Systems,” IEEE Trans. Power Electronics, Mar. 2002, Vol. 17, No. 2, pp. 157-162.
75. J. Sun, Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters, IEEE Trans. Power Electron, 26, 2011, pp. 3075–3078.
76. M. Benidris, S. Elsaiah, S. Sulaeman, J. Mitra, Transient stability of distributed generators in the presence of energy storage devices, North America Power Symposium, 2012.
77. Q.-C. Zhong, G. Weiss, Synchroconverters: inverters that mimit synchronous generators, IEEE Trans, Ind. Electron. 58, 2011.
78. Berizzi, A. Silvestri, D. Zaninelli, M. Massucco, Short-circuit current calculations for DC systems, IEEE Trans, Smart Grid, 2012.
79. North American Electric Reliability Corporation, Reliability Considerations from the Integration of Smart Grid, December 2010.
80. Τσικόγιας Αθανάσιος, Δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας – Εξοικονόμηση ενέργειας μέσω έξυπνων δικτύων (smartgrids), Πανεπιστήμιο Πειραιώς, 2015, σ. 1-15.
81. Luigi Vanfretti, Dirk Van Hertem and Jan Ove Gjerde, Smart Transmission Grids Vision for Europe: Towards a Realistic Research Agenda, Smart Grid Applications and Developments, Green Energy and Technology, 2014., pp.185-220

82. Sergey Balashov, Design of marine generators for alternative diesel-electric power systems, Lappeenranta University Of Technology, Faculty of Technology, Department of Electrical Engineering, 2011, pp. 25-40.
83. Horst W. Koehler, Werner Oehlers, Diesel Electric Propulsion, Norwegian Society of Chartered Engineers Helsinki, Finland, 26-29 April 1998, pp. 1-24.
84. Ι. Μ. Προυσαλίδης, Ι. Κ. Χατζηλάου, Γ. Αντωνόπουλος, Ι. Κ. Γύπαρης, Π. Βαλλιανάτος, Εξελίξεις Στην Ηλεκτροπρόωση Πλοίων Και Ανασκόπηση Ζητημάτων Σχεδιασμού Στο Πλήρως Εξηλεκτρισμένο Πλοίο, Ηλεκτροκίνητα μέσα μεταφοράς στην Ελλάδα – Υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές, ΤΕΕ, Αθήνα, 12-13 Ιαν., 2006, σ. 1-19.
85. Bernd Friedrich, High Efficient Diesel-Electric Propulsion, Mari – Tech, 2014, pp. 1-16.
86. MAN, Diesel-electric Drives, A brief guideline how to engineer a diesel-electric propulsion system, pp. 1-20.
87. Yoshifumi Ajioka, Kiyoshi Ohno, Electric Propulsion Systems for Ships, Hitachi Review Vol. 62, 2013, No. 3, pp. 231-232.
88. Stadt – Power Technology, The guideline to electric propulsion. www.stadt.no
89. Damir Radan, Power Electronic Converters For Ship Propulsion Electric Motors, Marine Cybernetics-Energy Management Systems, Department of Marine Technology, NTNU, pp. 1-23.
90. ABB, Onboard DC Grid, The step forward in Power Generation and Propulsion, pp. 1-4.
91. Manitoba HVDC Research Centre Inc., Power Quality Studies, Power Quality on Electric Ships, Winnipeg, Manitoba, Canada, pp. 1-4.
92. Στ. Παπαθανασίου, Σημειώσεις Οικονομικής Αξιολόγησης Επενδύσεων Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, 9ο εξάμηνο, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, Ιανουάριος 2012, σ. 1-16.

Συγκριτική Μελέτη για τη Χρήση Συνεχούς Ρεύματος (DC) σε Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας Πλοίου Μεταφοράς Υγροποιημένου Αερίου (LNG)

Electric Propulsion Motor	c	2	13260	0,974	136 14	1	1	2	2722 8	2	2722 8		0							
-Ditto-	c	2	13260	0,974	136 14	0,2	1					2	5445 ,6							
Propulsion motor cooling fan	c	4	13,2	0,892	14,8	0,8	1	4	47,3 6	4	47,3 6	4	47,3 6							
Propulsion motor excitation power	c	2			59	1	1	2	118	2	118	2	118							
Propulsion transformer cooling fan	c	8	1,8	0,818	2,2	0,8	1	4	7,04	4	7,04	4	7,04							
Lub. Pump for motor lub unit	c	4	1,3	0,813	1,6	0,8	1	2	2,56	2	2,56	2	2,56							
CONTINUOUS LOAD SUBTOTAL (MODE=C)								27402,96		27402,96		5620,56								
INTERMITTENT LOAD SUB TOTAL (MODE=I)																				
GENERATING PLANT																				
Main GE JW preheating pump	c	2	1,1	0,786	1,4	0,8	1				0	1	1,12	2	2,24	2	2,24			
Main GE FO supply pump	c	8	1,5	0,789	1,9	0,8	1	4	6,08	2	3,04	4	6,08	2	3,04	2	3,04			

Συγκριτική Μελέτη για τη Χρήση Συνεχούς Ρεύματος (DC) σε Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας Πλοίου Μεταφοράς Υγροποιημένου Αερίου (LNG)

(for 9L)																					
Main GE FO circ. Pump (for 9L)	c	8	3,7	0,860	4,3	0,8	1	4	13,7 6	2	6,88	4	13,7 6	1	3,44	1	3,44				
Main GE pilot oil supply pump	c	4	2,5	0,833	3	0,48	1	2	2,88	2	2,88	2	2,88	2	2,88	2	2,88				
Main GE pre-LO pump (for 9L)	c	4	12,7	0,888	14,3	0,8	1				0	2	22,8 8	3	34,32	3	34,3 2				
CONTINUOUS LOAD SUBTOTAL (MODE=C)								22,72		12,8		46,72		45,92		45,92					
INTERMITTENT LOAD SUB TOTAL (MODE=I)																					
WATER HANDLING EQUIPMENT																					
Main cool. SW pump	c	3	75	0,920	81,5	0,8	1	2	130, 4	2	130, 4	2	130, 4	1	65,2	1	65,2				
Aux cool. SW pump	c	2	150	0,936	160, 3	0,85	1	1	136, 255	1	136, 255	1	136, 255	1	136,2 55	1	136, 255				
Aux cool. FW pump	c	2	132	0,929	142, 1	0,86	1	1	122, 206	1	122, 206	1	122, 206	1	122,2 06	1	122, 206				
Cargo machinery CFW booster pump	c	2	37	0,900	41,1	0,84	1			1	34,5 24	1	34,5 24	1	34,52 4	1	34,5 24				

Συγκριτική Μελέτη για τη Χρήση Συνεχούς Ρεύματος (DC) σε Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας Πλοίου Μεταφοράς Υγροποιημένου Αερίου (LNG)

FW generator distillate pump	c	2	1,3	0,813	1,6	0,8	1	2	2,56	2	2,56										
FW generator ejector pump	c	2	11	0,880	12,5	0,64	1	2	16	2	16										
CONTINUOUS LOAD SUBTOTAL (MODE=C)								407,421	441,945	423,385	358,19	358,19									
INTERMITTENT LOAD SUB TOTAL (MODE=I)																					
OIL HANDLING EQUIPMENT																					
HFO purifier	c	3	17,5	0,888	19,7	0,8	1	2	31,5 2			2	31,5 2	1	15,76	1	15,7 6				
HFO purifier feed pump	c	3	3,5	0,854	4,1	0,74	1	2	6,06 8			2	6,06 8	1	3,034	1	3,03 4				
HFO transfer pump	i	1	17	0,899	18,9	0,86	1	1	16,2 54			1	16,2 54	1	16,25 4	1	16,2 54				
MDO transfer pump	i	1	17	0,899	18,9	0,86	1		0				0								
Main GE LO purifier	i	4	8,6	0,878	9,8	0,8	1	4	31,3 6	4	31,3 6	2	15,6 8	1	7,84	1	7,84				
Main GE lo purifier feed pump	i	4	2,5	0,833	3	0,6	1	4	7,2	4	7,2	2	3,6	1	1,8	1	1,8				
Stern tube LC pump	c	2	1,3	0,813	1,6	0,96	1	1	1,53 6	1	1,53 6	1	1,53 6								

Συγκριτική Μελέτη για τη Χρήση Συνεχούς Ρεύματος (DC) σε Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας Πλοίου Μεταφοράς Υγροποιημένου Αερίου (LNG)

EQUIPMENT IN MACHINERY SPACE																				
Main air compressor	i	2	27,5	0,899	30,6	0,8	1					2	48,9 6							
-Ditto-	i	2	27,5	0,899	30,6	0,8	0,4	1	9,79 2	1	9,79 2		0	1	9,792	1	9,79 2			
Control/Service air compressor	i	4	42	0,909	46,2	0,8	1	2	73,9 2	2	73,9 2	2	73,9 2	2	73,92	2	73,9 2			
Engine room fan	c	4	55	0,911	60,4	0,83	1	4	200, 528	4	200, 528	4	200, 528	2	100,2 64	2	100, 264			
Purifier room exhaust fan	c	1	15	0,888	16,9	0,76	1	1	12,8 44	1	12,8 44	1	12,8 44	1	12,84 4	1	12,8 44			
Welding Area exhaust fan	i	1	0,8	0,727	1,1	0,27	1	1	0,29 7	1	0,29 7	1	0,29 7	1	0,297	1	0,29 7			
MGPS	c	1			0,4	0,8	1	1	0,32	1	0,32	1	0,32	1	0,32	1	0,32			
Sludge pump	i	1	6,3	0,887	7,1	0,76	1	1	5,39 6	1	5,39 6	1	5,39 6	1	5,396	1	5,39 6			
Bilge Water transfer pump	i	1	2,6	0,839	3,1	0,86	1	1	2,66 6	1	2,66 6	1	2,66 6	1	2,666	1	2,66 6			
Clean drain pump (E/R bilge pump)	i	1	2,2	0,815	2,7	0,82	1	1	2,21 4	1	2,21 4	1	2,21 4	1	2,214	1	2,21 4			

Συγκριτική Μελέτη για τη Χρήση Συνεχούς Ρεύματος (DC) σε Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας Πλοίου Μεταφοράς Υγροποιημένου Αερίου (LNG)

Incinerator FO fan etc	i	1	28	0,900	31,1	0,8	1	1	24,88	1	24,88									
Extraction fan for MG	c	4	3,7	0,860	4,3	0,8	1	2	6,88	2	6,88	2	6,88	2	6,88	2	6,88			
Extraction fan for GCU	c	2	2,2	0,815	2,7	0,8	1	1	2,16	1	2,16	1	2,16	1	2,16	1	2,16			
CONTINUOUS LOAD SUBTOTAL (MODE=C)									222,732	222,732	222,732	122,468	122,468							
INTERMITTENT LOAD SUB TOTAL (MODE=I)									119,165	119,165	133,453	94,285	94,285							
CARGO HANDLING EQUIPMENT																				
Electric cargo pump	c	8	610	0,960	635,4	0,85	1		0	0	0	0	0	8	4320,72					
Cargo stripping/spray pump	c	4	30	0,901	33,3	0,83	1		0	0	1	27,639	0	0						
Hydro power pack	i	2	34	0,899	37,8	0,8	1		0	1	30,24	0	1	30,24	1	30,24				
Em'cy cargo pump	c	1	200	0,940	212,8	0,78	1		0	0	0	0	0	0	0	0				
High duty compressor	c	2	1000	0,955	1047,1	0,91	1		0	0	0	0	2	1905,722	0	0				
High duty aux. LO pump	c	2	2,6	0,867	3	0,92	1		0	0	0	0	2	5,52	0	0				

Συγκριτική Μελέτη για τη Χρήση Συνεχούς Ρεύματος (DC) σε Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας Πλοίου Μεταφοράς Υγροποιημένου Αερίου (LNG)

Nitrogen generator	c	2	85	0,930	91,4	0,8	1	1	73,1 2	1	73,1 2	1	73,1 2	1	73,12	1	73,1 2						
Gas detection system	c	2		0,000	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1						
GCU combustor air fan	c	2	160	0,940	170, 2	0,91	1		0		0		0		0		0						
GCU dilution air fan	c	3	170	0,940	180, 9	0,94	1		0		0		0		0		0						
GCU cooling & ignitor fan	c	2	0,7	0,778	0,9	0,87	1		0		0		0		0		0						
CONTINUOUS LOAD SUBTOTAL (MODE=C)								81	804,63	822,279	1992,242	4401,72											
INTERMITTENT LOAD SUB TOTAL (MODE=I)								0	30,24	0	30,24	30,24											
SHIP SYSTEM																							
Ballast pump	c	3	355	0,950	373, 7	0,85	1		0		0		0	2	635,2 9	2	635, 29				0		
Valve control hydro p/pack pump	i	2	8,6	0,878	9,8	0,8	1	1	7,84	1	7,84	1	7,84	1	7,84	1	7,84				0		
FWD HFO transfer pump	i	2	17	0,899	18,9	0,86	1	1	16,2 54		0		0		0		0				0		
Bilge, fire & GS pump	i	2	90	0,930	96,8	0,8	1	1	77,4 4	1	77,4 4	1	77,4 4	1	77,44	1	77,4 4				0		

Συγκριτική Μελέτη για τη Χρήση Συνεχούς Ρεύματος (DC) σε Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας Πλοίου Μεταφοράς Υγροποιημένου Αερίου (LNG)

Fire Pump	i	1	75	0,920	81,5	0,8	1		0		0		0		0		0		1	65,2	
Em'cy fire pump	i	1	55	0,911	60,4	0,8	1		0		0		0		0		0		1	48,3 2	
Water spray pump	c	1	355	0,950	373,7	0,8	1		0		0		0		0		0			0	
Jockey pump	i	1	11	0,880	12,5	0,8	1	1	10	1	10	1	10	1	10	1	10			0	
CONTINUOUS LOAD SUBTOTAL (MODE=C)								0		0		0		635,29		635,29		0			
INTERMITTENT LOAD SUB TOTAL (MODE=I)								111,534		95,28		95,28		95,28		95,28		113,52			
MANOEUVRING EQUIPMENT																					
Steering gear motor	c	2	110	0,930	118,3	0,5	1		0		0	1	59,1 5		0		0		0	0	
-Ditto-	c	2	100	0,930	107,5	0,25	1	1	26,8 75	1	26,8 75		0		0		0	1	26,8 75	1	26,8 75
Bow thruster	c	1	2200	0,955	230 3,7	0,8	1		0		0	1	1842 ,96		0		0		0	0	
Thruster hydro oil pump	c	1	5,5	0,859	6,4	0,8	1		0		0	1	5,12		0		0		0	0	
Bow thruster/FWD pump room fan	c	1	5,5	0,859	6,4	0,74	1		0		0	1	4,73 6	1	4,736	1	4,73 6		0	0	
CONTINUOUS LOAD SUBTOTAL (MODE=C)								26,875		26,875		1911,966		4,736		4,736		26,875		26,875	

Συγκριτική Μελέτη για τη Χρήση Συνεχούς Ρεύματος (DC) σε Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας Πλοίου Μεταφοράς Υγροποιημένου Αερίου (LNG)

INTERMITTENT LOAD SUB TOTAL (MODE=I)																				
DECK MACHINERY																				
Deck machinery hydr. p/pack fore	d	4	132	0,950	138,9	0,8	0,5					4	222,24							
Deck machinery hydr. p/pack aft	d	2	132	0,950	138,9	0,8	0,5					2	111,12							
DECK MACHINERY SUBTOTAL (MODE=D)												333,36								
AIR COND. & VENTILATION EQUIPMENT																				
Steering gear room fan	c	1	5,5	0,859	6,4	0,68	1	1	4,352	1	4,352	1	4,352		0		0			
Bosun store fan	c	1	7,5	0,872	8,6	0,68	1	1	5,848	1	5,848	1	5,848	1	5,848	1	5,848			
Pipe duct fan	c	1	11	0,880	12,5	0,81	1	1	10,125	1	10,125	1	10,125	1	10,125	1	10,125			
Side passage fan	c	2	15	0,888	16,9	0,57	1	2	19,266	2	19,266	2	19,266	2	19,266	2	19,266			

Συγκριτική Μελέτη για τη Χρήση Συνεχούς Ρεύματος (DC) σε Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας Πλοίου Μεταφοράς Υγροποιημένου Αερίου (LNG)

heater																				
Galley pack. A/Cond. Heater	i	1		0,000	30	1	1		0		0		0		0		0			
Galley pack. A/Cond. Fan	c	1	1,5	0,789	1,9	1	1	1	1,9	1	1,9	1	1,9	1	1,9	1	1,9			
Galley pack. A/Cond. Unit	c	1	7,5	0,872	8,6	0,8	1	1	6,88	1	6,88	1	6,88	1	6,88	1	6,88			
Galley exh. Fan	c	1	1,5	0,789	1,9	0,65	1	1	1,23 5	1	1,23 5	1	1,23 5	1	1,235	1	1,23 5			
Sanitary space fan	c	1	3,7	0,860	4,3	0,53	1	1	2,27 9	1	2,27 9	1	2,27 9	1	2,279	1	2,27 9			
Sundry space exhaust fan	c	1	1,8	0,818	2,2	0,8	1	1	1,76	1	1,76	1	1,76	1	1,76	1	1,76			
Lift machine room fan	c	1	0,4	0,667	0,6	0,8	1	1	0,48	1	0,48	1	0,48	1	0,48	1	0,48			
CO2 bottle room exh. Fan	c	1	0,8	0,727	1,1	0,8	1	1	0,88	1	0,88	1	0,88	1	0,88	1	0,88			
CONTINUOUS LOAD SUBTOTAL (MODE=C)									406,548		406,548		406,548		402,196		402,196			
INTERMITTENT LOAD SUB TOTAL (MODE=I)																				
MISCELLAN EOUS EQUIPMENT																				
Galley &	i	1			100	0,8	1	1	80	1	80	1	80	1	80	1	80			

Συγκριτική Μελέτη για τη Χρήση Συνεχούς Ρεύματος (DC) σε Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας Πλοίου Μεταφοράς Υγροποιημένου Αερίου (LNG)

laundry equipment																					
Prov. Ref. plant compressor	i	2	7,6	0,884	8,6	0,5	1	1	4,3	1	4,3	1	4,3	1	4,3	1	4,3	1	4,3		
Elevator	i	1	7,5	0,872	8,6	0,8	1	1	6,88	1	6,88	1	6,88	1	6,88	1	6,88				
Hot water circ. Pump	c	2	0,4	0,667	0,6	0,58	1	1	0,348	1	0,348	1	0,348	1	0,348	1	0,348				
FW hydrophore pump	i	2	5,5	0,859	6,4	0,8	1	1	5,12	1	5,12	1	5,12	1	5,12	1	5,12				
Sewage treatment plant	i	1	2,8	0,848	3,3	0,8	1	1	2,64	1	2,64	1	2,64	1	2,64	1	2,64				
Sewage discharge pump for holding	i	2	2,6	0,867	3	0,8	1	1	2,4	1	2,4	1	2,4	1	2,4	1	2,4				
CONTINUOUS LOAD SUBTOTAL (MODE=C)									0,348	0,348	0,348	0,348	0,348	0							
INTERMITTENT LOAD SUB TOTAL (MODE=I)									101,34	101,34	101,34	101,34	101,34	4,3							
LIGHTING, NAV & CONTROL EQUIPMENT																					
ICCP System	c	1			30	0,25	1	1	7,5	1	7,5	1	7,5	1	7,5	1	7,5		0		0
Space heater &	c	1			5	0,8	1	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4		0		0

Συγκριτική Μελέτη για τη Χρήση Συνεχούς Ρεύματος (DC) σε Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας Πλοίου Μεταφοράς Υγροποιημένου Αερίου (LNG)

others																					
Control & navigation equip.	c	1			25	0,8	1	1	20	1	20	1	20		0		0	1	20	1	20
-Ditto-	c	1			25	0,8	0,8		0		0		0	1	16	1	16		0		0
Electric whistle	i	1			5,5	1	1		0		0		0		0		0	1	5,5	1	5,5
Em'cy & navigation lighting	c	1			40	1	1		0		0		0		0		0	1	40	1	40
Machinery space lighting	c	1			80	1	1	1	80	1	80	1	80	1	80	1	80		0		0
Accommodation lighting	c	1			30	1	1	1	30	1	30	1	30		0		0		0		0
-Ditto-	c	1			30	0,8	0,5		0		0		0	1	12	1	12		0		0
Deck lighting	c	1			15	1	1		0		0		0	1	15	1	15		0		0
-Ditto-	c	1			15	1	0,5		0		0	1	7,5		0		0		0		0
CONTINUOUS LOAD SUBTOTAL (MODE=C)								141,5	141,5	149	134,5	134,5	60	60							
INTERMITTENT LOAD SUB TOTAL (MODE=I)								0	0	0	0	0	5,5	5,5							

H2226 145.700 M3 LNG CARRIER WITH STEAM TURBINE PROPULSION (CORONIS)																			
ITEM	MODE	SET	OUTPUT [kW]	EFFICIENCY [%]	INPUT [kW]	LOAD FACTOR	DIV. FACTOR	SEAGOING		PORT IN/OUT WITH THRUSTER		CARGO LOAD		CARGO UNLOAD		EMERGENCY BLACKOUT		EMERGENCY FIRE	
								W	S	W	S	W	S	W	S	W	S	W	S
CONTINUOUS LOAD TOTAL (MODE=C)								2042,29		4124,73		4045,93		5750,76		107,55		70,99	
INTERMITTENT LOAD TOTAL (MODE=I)								414,92		366,04		501,39		501,39		13,98		191,90	
DIVERSITY FACTOR FOR INTERMITTENT LOAD								0,40		0,40		0,40		0,40		1,00		1,00	
ACTUAL INTERMITTENT LOAD								165,97		146,41		200,56		200,56		13,98		191,90	
DECK MACHINERY TOTAL (MODE=D)										332,88									
TOTAL								2208,26		4604,03		4246,49		5951,31		121,53		262,89	
PROPULSION PLANT																			
Main turbine turning gear	c	1	11	0,880	12,5	0,5	1		0,00		0	1	6,25	1	6,25		0,00		0,00
M/Turbine aux. L.O. pump	c	2	55	0,911	60,4	0,76	1		0,00	1	45,904	1	45,90	1	45,90		0,00		0,00

Συγκριτική Μελέτη για τη Χρήση Συνεχούς Ρεύματος (DC) σε Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας Πλοίου Μεταφοράς Υγροποιημένου Αερίου (LNG)

CONTINUOUS LOAD SUBTOTAL (MODE=C)									0	45,904	52,154	52,154	0	0				
INTERMITTENT LOAD SUB TOTAL (MODE=I)																		
GENERATING PLANT																		
D/G engine JW preheater	i	1			24	1	1	1	24,0 0	1	24	1	24,0 0	1	24,00		0,00	0,00
D/G engine JW preheating pump	c	1	1,5	0,789	1,9	0,8	1	1	1,52	1	1,52	1	1,52	1	1,52		0,00	0,00
D/G engine DO service pump	c	1	2,5	0,862	2,9	0,64	1		0,00		0		0,00		0,00		0,00	0,00
D/G engine LO priming pump	c	1	8,6	0,878	9,8	0,8	1	1	7,84	1	7,84	1	7,84	1	7,84	1	7,84	0,00
Turbo gen. aux. LO pump	c	1	3,7	0,860	4,3	0,54	1		0,00		0		0,00		0,00		0,00	0,00
Turbo gen. turning gear	c	1	0,8	0,727	1,1	0,4	1		0,00		0		0,00		0,00		0,00	0,00
CONTINUOUS LOAD SUBTOTAL (MODE=C)									9,36	9,36	9,36	9,36	7,84	0				
INTERMITTENT LOAD SUB TOTAL (MODE=I)									24	24	24	24	0	0				
WATER HANDLING EQUIPMENT																		
Main cool. SW pump	c	2	90	0,930	96,8	0,89	1	1	86,1 5	1	86,15 2	1	86,1 5	1	86,15			

Συγκριτική Μελέτη για τη Χρήση Συνεχούς Ρεύματος (DC) σε Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας Πλοίου Μεταφοράς Υγροποιημένου Αερίου (LNG)

OIL HANDLING EQUIPMENT																			
DO purifier	i	1	8,6	0,878	9,8	0,8	1	1	7,84		0		0,00		0,00				
DO purifier feed pump	i	1	1,8	0,818	2,2	0,8	1	1	1,76		0		0,00		0,00				
E/R HFO transfer pump	i	1	17,3	0,892	19,4	0,96	1	1	18,6 2	1	18,62 4	1	18,6 2	1	18,62				
MDO transfer pump	i	1	12,7	0,888	14,3	0,9	1		0,00		0		0,00		0,00				
LDO transfer pump	i	1	1,8	0,818	2,2	0,94			0,00		0		0,00		0,00				
LO purifier	c	2	8,6	0,878	9,8	0,8	1	1	7,84	1	7,84	1	7,84	1	7,84				
LO purifier feed pump	c	2	1,3	0,813	1,6	0,62	1	1	0,99	1	0,992	1	0,99	1	0,99				
Stern LO pump	c	2	1,8	0,818	2,2	0,67	1	1	1,47	1	1,474		0,00		0,00				
LO transfer pump	i	1	3,5	0,854	4,1	0,72	1	1	2,95	1	2,952		0,00		0,00		0,00		0,00
CONTINUOUS LOAD SUBTOTAL (MODE=C)									10,306		10,306		8,832		8,832		0		0
INTERMITTENT LOAD SUB TOTAL (MODE=I)									31,176		21,576		18,624		18,624		0		0
BOILER PLANT																			
Main Boiler FO fan	c	3	180	0,940	191, 5	0,8	1	2	306, 40		0		0,00		0,00				
-Ditto-	c	3	180	0,940	191, 5	0,8	0,9		0,00	2	275,7 6		0,00		0,00				

Συγκριτική Μελέτη για τη Χρήση Συνεχούς Ρεύματος (DC) σε Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας Πλοίου Μεταφοράς Υγροποιημένου Αερίου (LNG)

-Ditto-	c	3	180	0,940	191,5	0,8	0,68		0,00		0	2	208,35	2	208,35				
Main Boiler FO pump	c	2	22	0,891	24,7	0,8	1	1	19,76	1	19,76	1	19,76	1	19,76				
Aux feed W. pump	c	1	315	0,950	331,6	0,6	1		0,00		0		0,00		0,00				
Em'cy feed W. pump	c	1	18,5	0,889	20,8	0,6	1		0,00		0		0,00		0,00				
Boiler chemical lead pump	c	2	0,5	0,714	0,7	0,8	1	2	1,12	2	1,12	2	1,12	2	1,12				
M/B sealing air fan	c	2	2,2	0,815	2,7	0,8	1	1	2,16	1	2,16	1	2,16	1	2,16	1	2,16	1	2,16
CONTINUOUS LOAD SUBTOTAL (MODE=C)									329,44		298,8		231,392		231,392		2,16		2,16
INTERMITTENT LOAD SUB TOTAL (MODE=I)																			
OTHER EQUIPMENT IN MACHINERY SPACE																			
D/G engine starting air compressor	i	2	6,4	0,865	7,4	0,8	0,5	1	2,96	1	2,96	1	2,96	1	2,96	1	2,96		0,00
Service air compressor	i	1	55	0,911	60,4	0,83	0,5	1	25,07	1	25,066	1	25,07	1	25,07		0,00		0,00
Control air compressor	i	2	55	0,911	60,4	0,83	0,5	1	25,07	1	25,066	1	25,07	1	25,07		0,00		0,00
Engine room fan (i)	c	4	38	0,909	41,8	0,82	1	4	137,1	4	137,1	2	68,5	2	68,55		0,00		0,00

Συγκριτική Μελέτη για τη Χρήση Συνεχούς Ρεύματος (DC) σε Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας Πλοίου Μεταφοράς Υγροποιημένου Αερίου (LNG)

Cargo pump (Electric driven)	c	8	530	0,960	552,1	0,84	1		0,00		0		0,00	8	3710,11		0,00		0,00
Cargo stripping/spray pump	c	4	22	0,891	24,7	0,77	1	1	19,02	1	19,019		0,00		0,00		0,00		0,00
Em'cy cargo pump	c	1	200	0,940	212,8	0,81	1		0,00		0		0,00		0,00		0,00		0,00
High duty compressor	c	2	1000	0,960	1041,7	0,96	1		0,00		0	2	#### ##		0,00		0,00		0,00
High duty aux. LO pump	c	2	2,5	0,862	2,9	0,9	1		0,00		0	2	5,22		0,00		0,00		0,00
Low duty compressor	c	2	280	0,950	294,7	0,9	1	1	265,23	1	265,23		0,00		0,00		0,00		0,00
Low duty aux. LO pump	c	2	2,5	0,862	2,9	0,9	1	1	2,61	1	2,61		0,00		0,00		0,00		0,00
Glycol water circ. Pump	i	2	7,5	0,872	8,6	0,73	1	1	6,28	1	6,278	1	6,28	1	6,28		0,00		0,00
Glycol water heater	i	1		0,000	80	1	1	1	80,00	1	80	1	80,00	1	80,00		0,00		0,00
Vacuum pump	i	2	33	0,899	36,7	0,8	1		0,00		0	1	29,36	1	29,36		0,00		0,00
Aux CSW pump	c	2	18,5	0,889	20,8	0,86	1	1	17,89	1	17,888	1	17,89	1	17,89		0,00		0,00
Aux CFW pump	c	2	15	0,888	16,9	0,73	1	1	12,34	1	12,337	1	12,34	1	12,34		0,00		0,00

Συγκριτική Μελέτη για τη Χρήση Συνεχούς Ρεύματος (DC) σε Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας Πλοίου Μεταφοράς Υγροποιημένου Αερίου (LNG)

Inert gas generator	c	1	842,6	0,960	877, 7	0,9	1		0,00		0		0,00		0,00		0,00		0,00
Nitrogen generator	i	2	65	0,919	70,7	0,92	0,5	1	32,5 2	1	32,52 2	1	32,5 2	1	32,52		0,00		0,00
Gas detection system	i	2			1	1	1	1	1,00	1	1	1	1,00	1	1,00		0,00		0,00
CONTINUOUS LOAD SUBTOTAL (MODE=C)									317,084		317,084		2035,509		3740,337		0		0
INTERMITTENT LOAD SUB TOTAL (MODE=I)									119,8		119,8		149,16		149,16		0		0
SHIP SYSTEM																			
Ballast pump	c	3	330	0,950	347, 4	0,94	1		0,00	1	326,5 56	2	653, 11	2	653,1 1		0,00		0,00
SW pump for high exp. Foam sys	i	1	200	0,940	212, 8	0,85	1		0,00		0		0,00		0,00		0,00	1	180,8 8
Bilge pump	i	1	55	0,911	60,4	0,73	1		0,00		0	1	44,0 9	1	44,09		0,00		0,00
Valve control hydro p/pack pump	i	2	32,6	0,901	36,2	0,8	1	1	28,9 6	1	28,96	1	28,9 6	1	28,96		0,00		0,00
Forward HFO transfer pump	i	2	17,3	0,892	19,4	0,96	1	1	18,6 2		0		0,00		0,00		0,00		0,00
Bilge, fire & GS pump	i	1	90	0,930	96,8	0,67	1		0,00		0	1	64,8 6	1	64,86		0,00		0,00
Water spray pump	c	1	300	0,950	315, 8	0,87	1		0,00		0		0,00		0,00		0,00		0,00

Συγκριτική Μελέτη για τη Χρήση Συνεχούς Ρεύματος (DC) σε Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας Πλοίου Μεταφοράς Υγροποιημένου Αερίου (LNG)

Jockey pump	i	1	11	0,880	12,5	0,73	1	1	9,13	1	9,125	1	9,13	1	9,13		0,00		0,00
Fire pump	i	1	90	0,930	96,8	0,77	1		0,00		0		0,00		0,00		0,00		0,00
CONTINUOUS LOAD SUBTOTAL (MODE=C)									0	326,556	653,112	653,112	0	0					
INTERMITTENT LOAD SUB TOTAL (MODE=I)									56,709	38,085	147,033	147,033	0	180,88					
MANOEUVRING EQUIPMENT																			
Steering gear motor	c	2	104	0,930	111,8	0,5	1		0,00	1	55,9		0,00		0,00		0,00		0,00
-Ditto-	c	2	104	0,930	111,8	0,25	1	1	27,95		0		0,00		0,00	1	27,95	1	27,95
Bow thruster	c	1	1800	0,960	1875	1	1		0,00	1	1875		0,00		0,00		0,00		0,00
Thruster hydro oil pump	c	1	5,5	0,859	6,4	0,8	1		0,00	1	5,12		0,00		0,00		0,00		0,00
Thruster room fan	c	1	4,6	0,868	5,3	0,8	1		0,00	1	4,24		0,00		0,00		0,00		0,00
CONTINUOUS LOAD SUBTOTAL (MODE=C)									27,95	1940,26	0	0	27,95	27,95					
INTERMITTENT LOAD SUB TOTAL (MODE=I)																			
DECK MACHINERY																			
Deck machinery hyd. p/pack, fore	d	3	129	0,930	138,7	0,8	0,5		0,00	3	166,44		0,00		0,00		0,00		0,00
Deck machinery hyd.	d	3	129	0,930	138,	0,8	0,5		0,00	3	166,4		0,00		0,00		0,00		0,00

Συγκριτική Μελέτη για τη Χρήση Συνεχούς Ρεύματος (DC) σε Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας Πλοίου Μεταφοράς Υγροποιημένου Αερίου (LNG)

p/pack, aft					7					4									
DECK MACHINERY SUBTOTAL (MODE=D)									0	332,88	0	0	0	0	0				
AIR COND. & VENTILATION EQUIPMENT																			
Steering gear room fan	c	1	4,6	0,868	5,3	0,8	1	1	4,24	1	4,24		0,00		0,00		0,00	0,00	
Bosun store fan	c	2	4,6	0,868	5,3	0,92	1	1	4,88	1	4,876	1	4,88	1	4,88		0,00	0,00	
Pipe duct fan	c	1	15	0,888	16,9	0,61	1	1	10,3 1	1	10,30 9	1	10,3 1	1	10,31		0,00	0,00	
Side passage fan	c	2	11	0,880	12,5	0,83	1	2	20,7 5	2	20,75	2	20,7 5	2	20,75		0,00	0,00	
Cargo compressor room fan	c	2	22	0,891	24,7	0,81	1	1	20,0 1	1	20,00 7	1	20,0 1	1	20,01		0,00	0,00	
Cargo motor room fan	c	2	4,6	0,868	5,3	0,85	1	1	4,51	1	4,505	1	4,51	1	4,51		0,00	0,00	
Fwd pump room fan	c	1	4,6	0,868	5,3	0,8	1	1	4,24	1	4,24	1	4,24	1	4,24		0,00	0,00	
Em'cy fire pump room fan	c	1	0,8	0,727	1,1	0,8	1		0,00		0		0,00		0,00		0,00	1	0,88
Accom. A/Cond. Compressor	c	2	230	0,950	242, 1	0,87	1	1	210, 63	1	210,6 27	1	210, 63	1	210,6 3		0,00	0,00	
Accom. A/Cond. Fan	c	2	52	0,911	57,1	0,77	1	1	43,9 7	1	43,96 7	1	43,9 7	1	43,97		0,00	0,00	

Συγκριτική Μελέτη για τη Χρήση Συνεχούς Ρεύματος (DC) σε Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας Πλοίου Μεταφοράς Υγροποιημένου Αερίου (LNG)

Electric heater (i)	c	5			5	1	1		0,00		0		0,00		0,00		0,00		0,00
Electric heater (ii)	c	2			3	1	1		0,00		0		0,00		0,00		0,00		0,00
ECR pack. A/Cond. Unit	c	1	11,3	0,890	12,7	0,83	1	1	10,5 4	1	10,54 1	1	10,5 4	1	10,54		0,00		0,00
Pack A/C unit for no1 SWBD room	c	1	15	0,888	16,9	0,7	1	1	11,8 3	1	11,83	1	11,8 3	1	11,83		0,00		0,00
Pack A/C unit for no2 SWBD room	c	1	11,3	0,890	12,7	0,7	1	1	8,89	1	8,89	1	8,89	1	8,89		0,00		0,00
W/H pack A/Cond. Unit	c	1	10,6	0,883	12	0,7	1	1	8,40	1	8,4	1	8,40	1	8,40		0,00		0,00
CW Pack A/C unit boosting pump	c	1	5,5	0,859	6,4	0,76	1	1	4,86	1	4,864	1	4,86	1	4,86		0,00		0,00
Galley pack A/Cond. Unit	c	1	7,4	0,871	8,5	0,8	1	1	6,80	1	6,8	1	6,80	1	6,80		0,00		0,00
CW Galley pack A/C boosting pump	c	2	2,2	0,815	2,7	0,59	1	1	1,59	1	1,593	1	1,59	1	1,59		0,00		0,00
Workshop pack A/cond. Unit	i	1	15	0,888	16,9	0,8	1	1	13,5 2	1	13,52	1	13,5 2	1	13,52		0,00		0,00
Accom. Small fans	c	4	1,8	0,818	2,2	0,8	1	4	7,04	4	7,04	4	7,04	4	7,04		0,00		0,00
Galley exh. Fan	c	1	1,3	0,813	1,6	0,65	1	1	1,04	1	1,04	1	1,04	1	1,04		0,00		0,00
Galley supply fan	c	1	1,8	0,818	2,2	0,4	1	1	0,88	1	0,88	1	0,88	1	0,88		0,00		0,00
Sanitary space fan	c	1	1,8	0,818	2,2	0,63	1	1	1,39	1	1,386	1	1,39	1	1,39		0,00		0,00

Συγκριτική Μελέτη για τη Χρήση Συνεχούς Ρεύματος (DC) σε Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας Πλοίου Μεταφοράς Υγροποιημένου Αερίου (LNG)

CONTINUOUS LOAD SUBTOTAL (MODE=C)									386,785	386,785	382,545	382,545	0	0,88					
INTERMITTENT LOAD SUB TOTAL (MODE=I)									13,52	13,52	13,52	13,52	0	0					
MISCELLANEOUS EQUIPMENT																			
Galley & laundry equipment	i	1			80	0,8	1	1	64,0 0	1	64	1	64,0 0	1	64,00		0,00	0,00	
Prov. Ref. plant compressor	i	2	17,3	0,892	19,4	0,39	1	1	7,57	1	7,566	1	7,57	1	7,57		0,00	0,00	
Elevator	i	1	6	0,870	6,9	0,8	1	1	5,52	1	5,52	1	5,52	1	5,52	1	5,52	1	5,52
Food lift	i	1	1,8	0,818	2,2	0,8	1	1	1,76	1	1,76	1	1,76	1	1,76		0,00	0,00	
Hot water circ. Pump	c	2	0,4	0,667	0,6	0,6	1	1	0,36	1	0,36	1	0,36	1	0,36		0,00	0,00	
FW hydrophore pump	i	2	6,5	0,867	7,5	0,87	1	1	6,53	1	6,525	1	6,53	1	6,53		0,00	0,00	
Sewage treatment plant	i	1	2,8	0,848	3,3	0,8	1	1	2,64	1	2,64	1	2,64	1	2,64		0,00	0,00	
CONTINUOUS LOAD SUBTOTAL (MODE=C)									0,36	0,36	0,36	0,36	0	0					
INTERMITTENT LOAD SUB TOTAL (MODE=I)									88,011	88,011	88,011	88,011	5,52	5,52					
LIGHTING, NAV. & CONTROL EQUIPMENT																			
ICCP system	c	1			20	0,8	1	1	16,0 0	1	16	1	16,0 0	1	16,00		0,00	0,00	

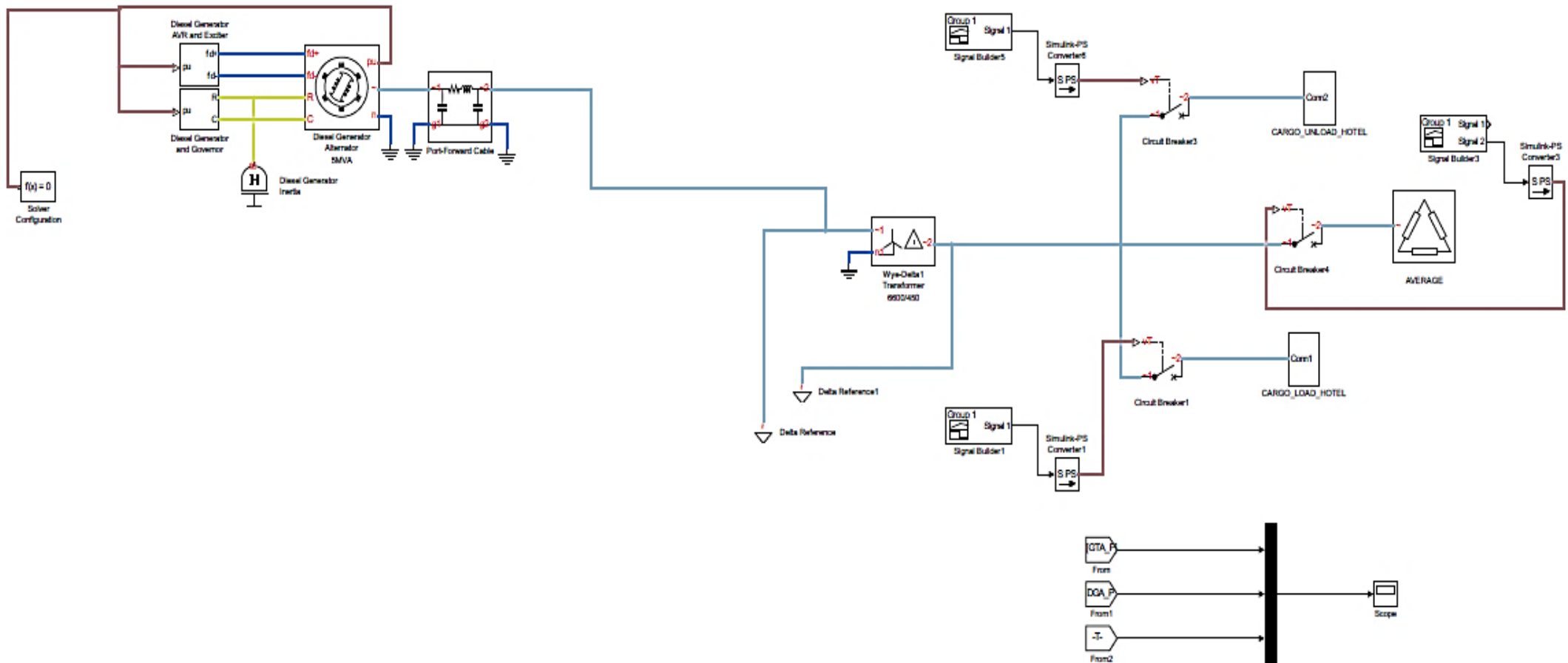
Συγκριτική Μελέτη για τη Χρήση Συνεχούς Ρεύματος (DC) σε Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας Πλοίου Μεταφοράς Υγροποιημένου Αερίου (LNG)

Space heater & others	c	1			5	0,8	1	1	4,00	1	4	1	4,00	1	4,00		0,00		0,00
Control & navigation equip.	c	1			25	0,8	1	1	20,0 0	1	20		0,00		0,00	1	20,0 0	1	20,00
-Ditto-	c	1			25	0,8	0,8		0,00		0	1	16,0 0	1	16,00		0,00		0,00
Electric whistle	i	1			5,5	1	1		0,00		0		0,00		0,00	1	5,50	1	5,50
Em'cy & navigation lighting	c	1			20	1	1		0,00		0		0,00		0,00	1	20,0 0	1	20,00
Machinery space lighting	c	1			80	1	1	1	80,0 0	1	80	1	80,0 0	1	80,00		0,00		0,00
Accommodation lighting	c	1			30	1	1	1	30,0 0	1	30		0,00		0,00		0,00		0,00
-Ditto-	c	1			20	0,8	0,5		0,00		0	1	8,00	1	8,00		0,00		0,00
Deck lighting	c	1			15	1	1		0,00		0	1	15,0 0	1	15,00		0,00		0,00
-Ditto-	c	1			15	1	0,5		0,00	1	7,5		0,00		0,00		0,00		0,00
CONTINUOUS LOAD SUBTOTAL (MODE=C)									150		157,5		139		139		40		40
INTERMITTENT LOAD SUB TOTAL (MODE=I)									0		0		0		0		5,5		5,5

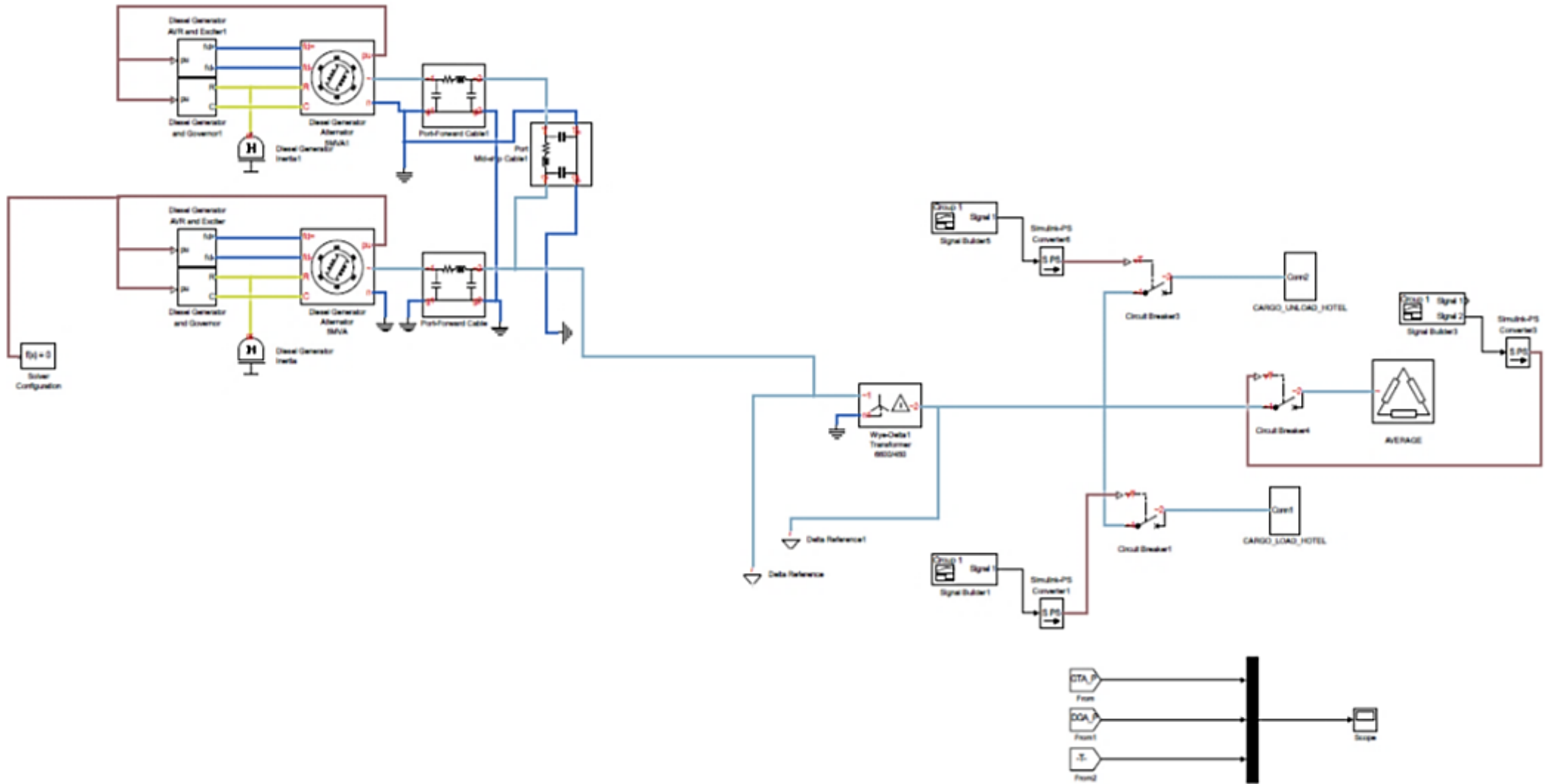
Παράρτημα Β'

Σενάρια προσομοιώσεων SIMULINK

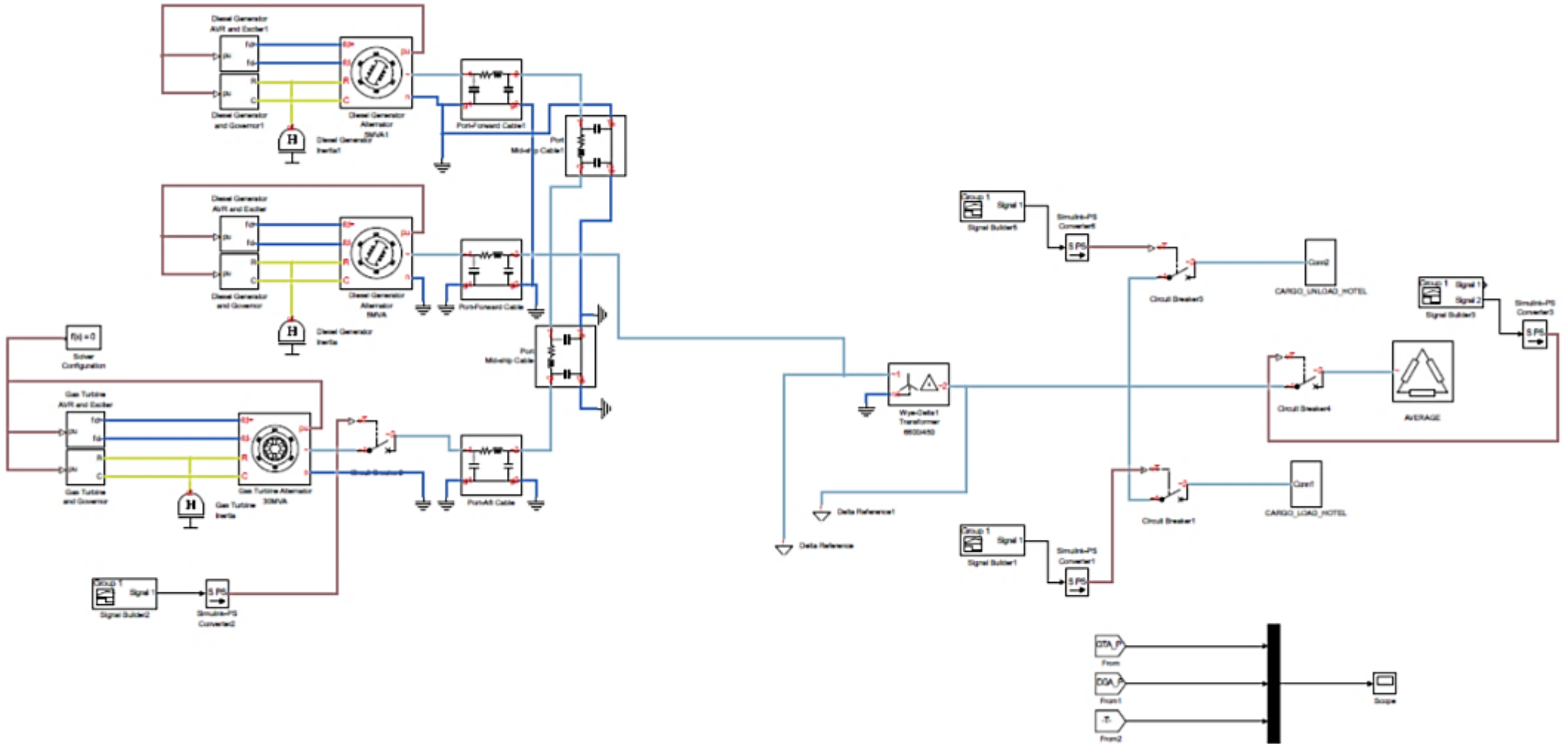
CARGO_UNLOAD_LOAD_AC_1GEN



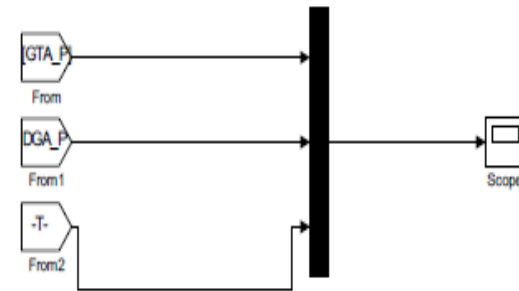
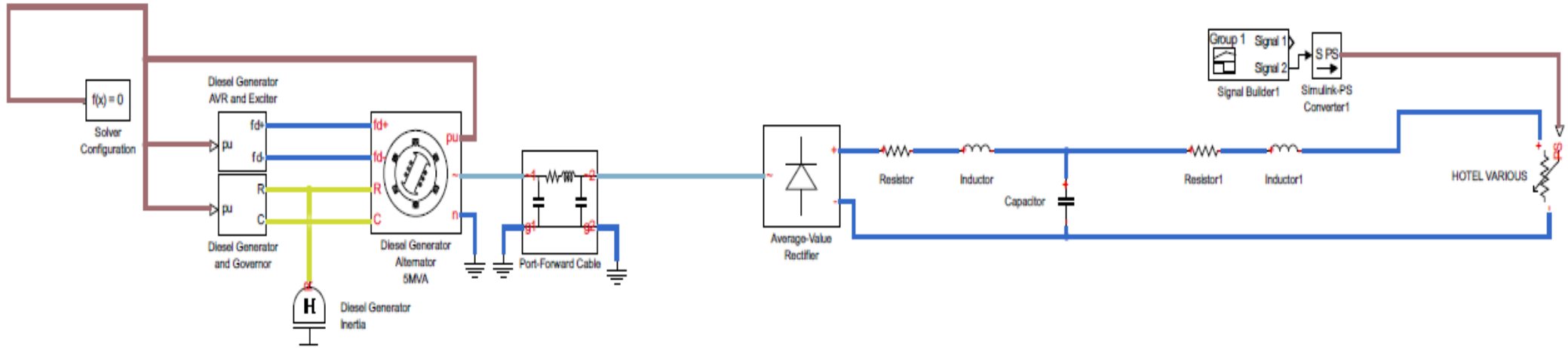
CARGO_UNLOAD_LOAD_AC_2GEN



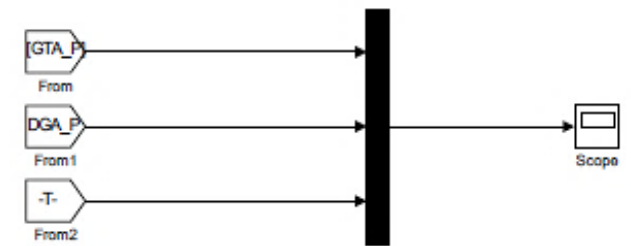
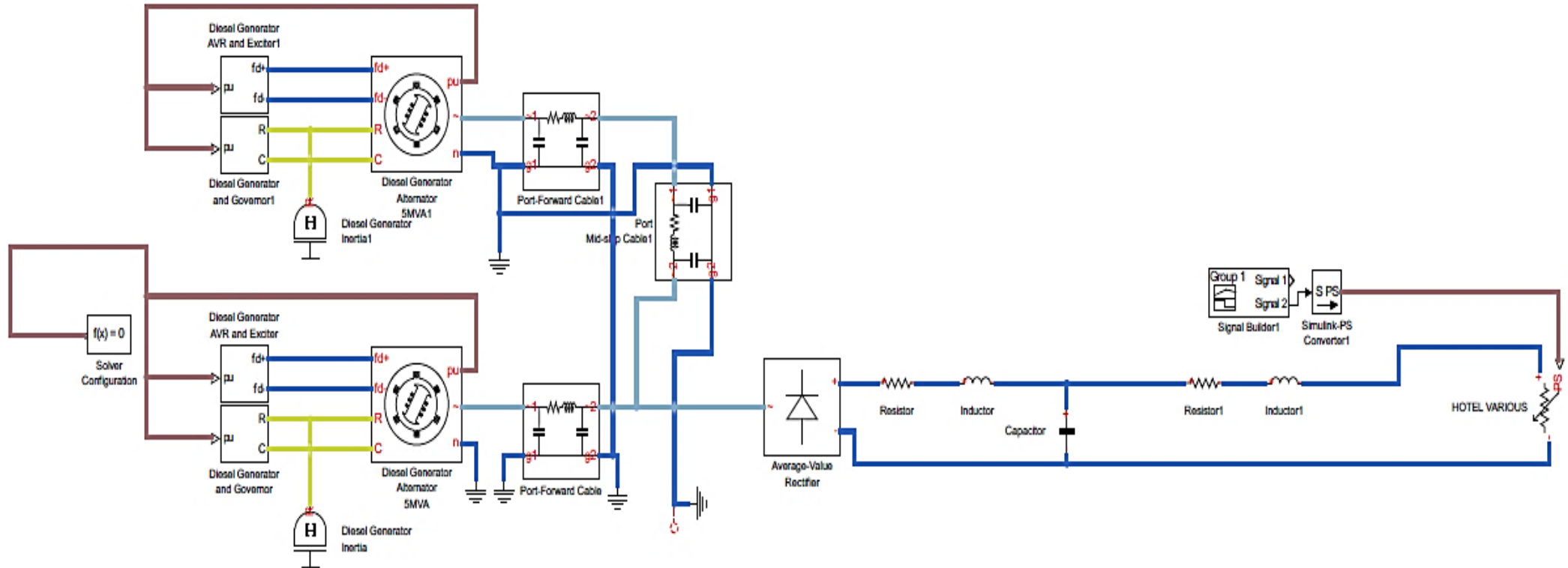
CARGO_UNLOAD_LOAD_AC_3GEN



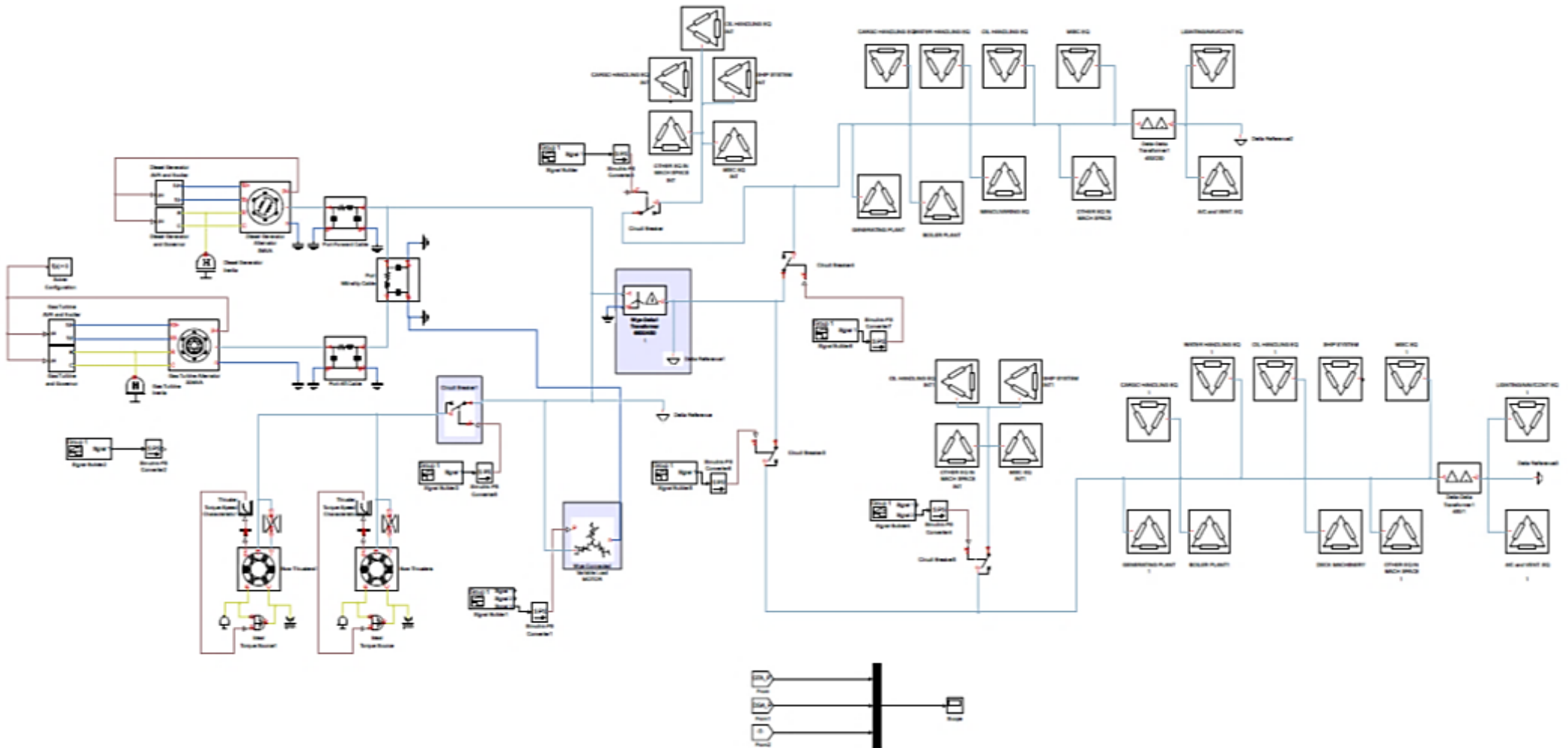
CARGO_UNLOAD_LOAD_DC_1GEN



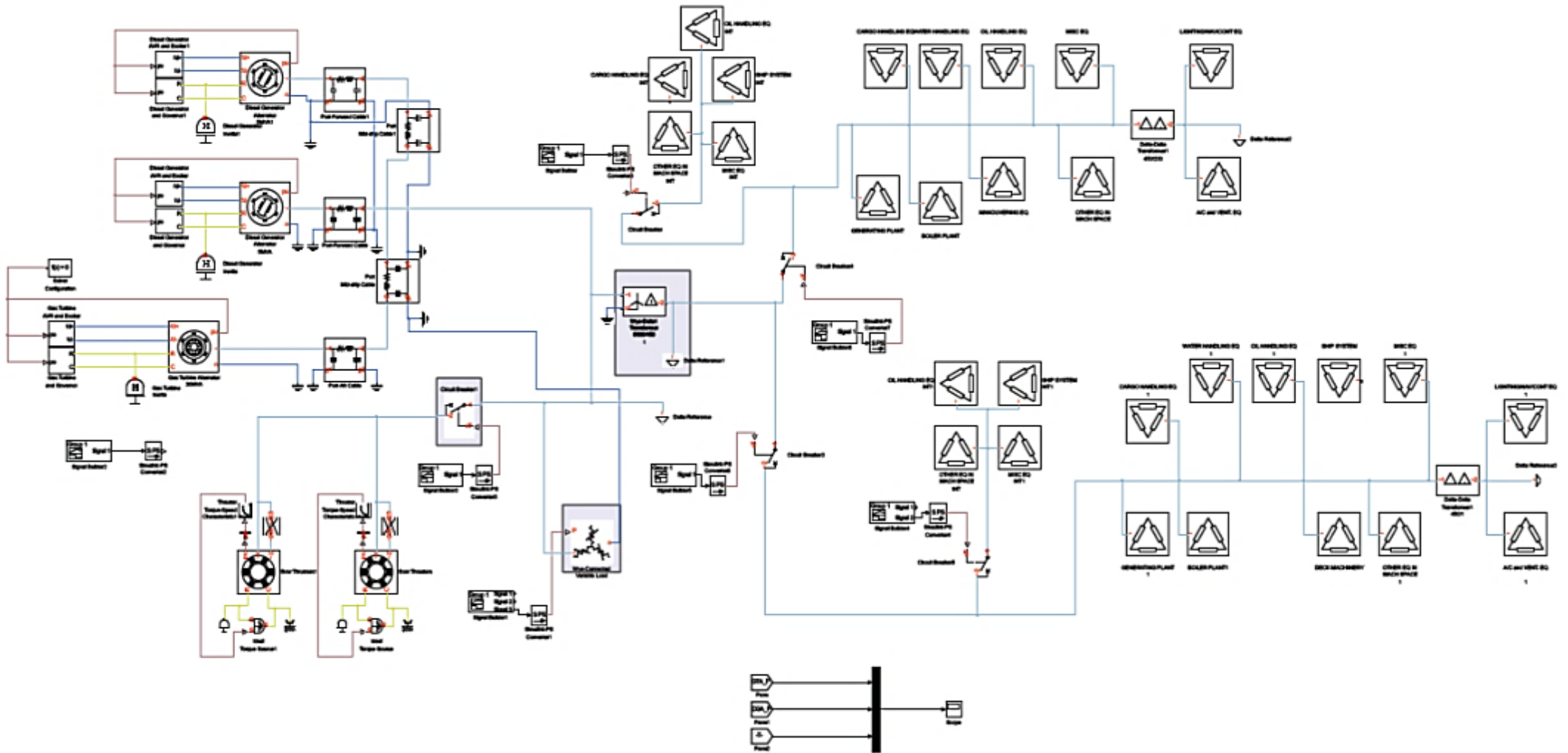
CARGO_UNLOAD_LOAD_DC_2GEN



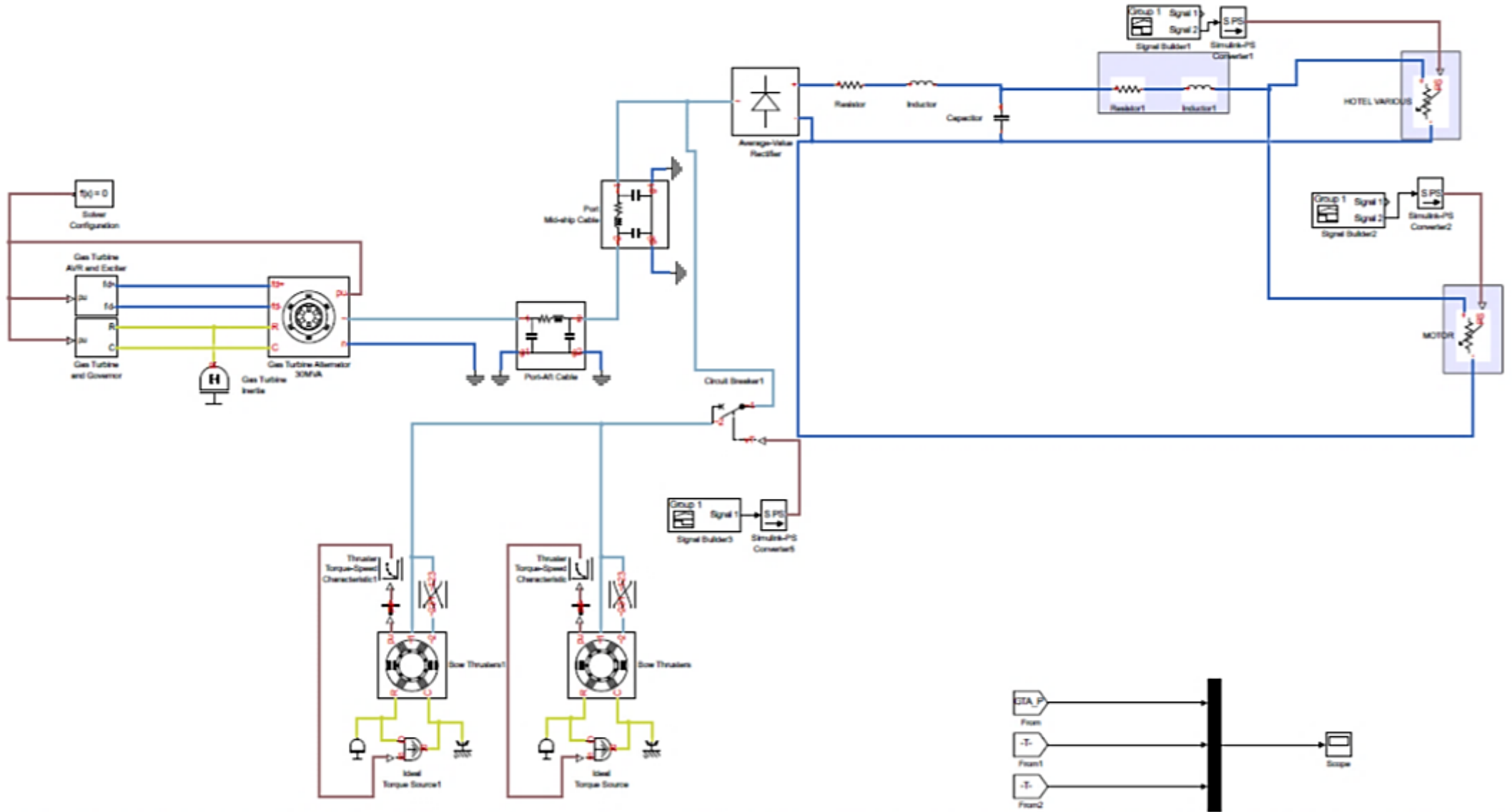
PORTOUT_SEAGOING_AC_2GEN



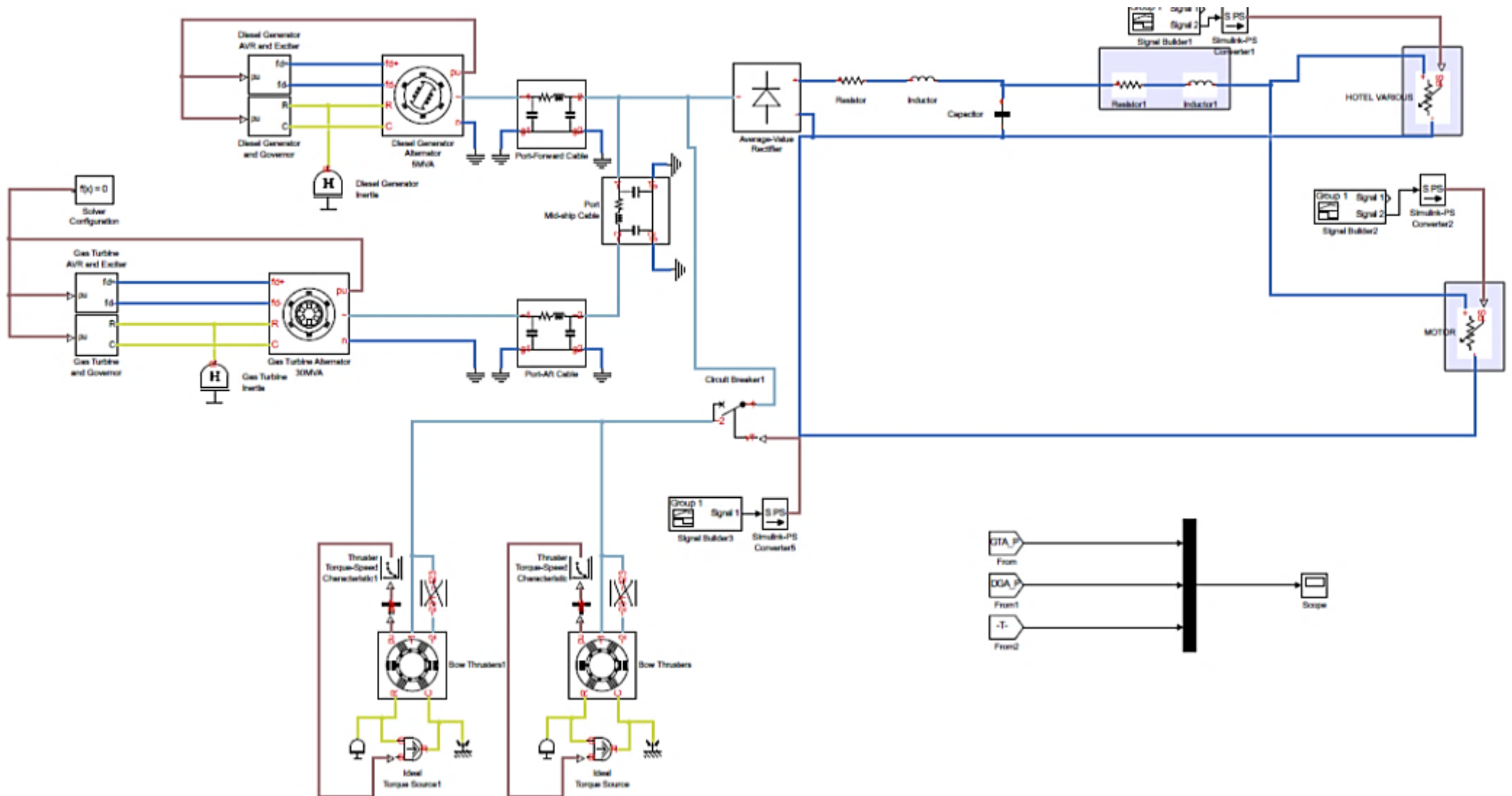
PORTOUT_SEAGOING_AC_3GEN



PORTOUT_SEAGOING_DC_1GEN



PORTOUT_SEAGOING_DC_2GEN



PORTOUT_SEAGOING_DC_3GEN

