

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



**ΤΙΤΛΟΣ: ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΠΡΟΩΣΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΜΕ  
ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ  
ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ DC/DC ΚΑΙ ΣΤΗΝ  
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΕΡΠΥΚΝΩΤΩΝ**

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ: ΚΟΥΖΩΝΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ  
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΙΩΑΝΝΗΣ ΠΡΟΥΣΑΛΙΔΗΣ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2022

## Πίνακας περιεχομένων

|   |    |
|---|----|
| 1. Κυψέλες καυσίμου.....  | 3  |
| 1.1 Εισαγωγή.....   | 3  |
| 1.2 Αρχή λειτουργίας .....  | 4  |
| 1.3 Τύποι κυψελών καυσίμου .....  | 6  |
| 2. Μετατροπέας Fuel Cell DC/DC Converter .....                          | 13 |
| 2.1 Εισαγωγή.....   | 13 |
| 2.2 Η διασύνδεση του μετατροπέα DC/DC.....                              | 14 |
| 2.3 Η μονάδα Control Module .....                                       | 15 |
| 2.4 Οι μονάδες Power Modules.....                                       | 16 |
| 2.5 Η μονάδα A1 GT027 .....   | 19 |
| 2.6 Η λειτουργία του μετατροπέα .....                                   | 20 |
| 3. Η λειτουργία του μετατροπέα .....                                    | 22 |
| 3.1 Λειτουργία με μηδενικό φορτίο (Normal Mode).....                    | 22 |
| 3.2 Λειτουργία φορτίσεως (Charging Mode) .....                          | 24 |
| 3.3 Μεμονωμένη λειτουργία (Island Mode).....                            | 26 |
| 4. Ο κινητήρας PERMASYN .....   | 27 |
| 4.1 Η σύγχρονη τριφασική μηχανή .....                                   | 28 |
| 4.2 Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.....                                  | 29 |
| 4.3 Ο σύγχρονος κινητήρας.....  | 29 |
| 4.3 Ο σύγχρονος κινητήρας μόνιμων μαγνητών .....                        | 31 |
| 4.4 Οι Αντιστροφείς (Inverters) .....                                   | 32 |
| 4.5 Γενικά για τον κινητήρα PERMASYN .....                              | 32 |
| 4.5 Οι αντιστροφείς του κινητήρα.....                                   | 35 |
| 4.6 Χαρακτηριστικές φορτίσεως του κινητήρα.....                         | 37 |
| 5. Το δίκτυο συνεχούς ρεύματος .....                                    | 37 |
| 5.1 Γενικά για το δίκτυο συνεχούς ρεύματος.....                         | 37 |
| 5.2 Οι δυνατότητες του δικτύου συνεχούς ρεύματος.....                   | 38 |
| 5.3 Σύνδεση των κυψελών καυσίμου με το δίκτυο συνεχούς ρεύματος.....    | 40 |
| 5.4 Σύνδεση του κινητήρα προώσεως με το δίκτυο συνεχούς ρεύματος.....   | 42 |
| 5.5 Κύκλωμα φορτίσεως - εκφορτίσεως αντιστροφέων κινητήρα.....          | 43 |
| 6. Υπερπυκνωτές .....   | 44 |
| 6.1 Περιγραφή.....  | 44 |
| 6.2 Εφαρμογή συστήματος υπερπυκνωτών στο δίκτυο συνεχούς ρεύματος ..... | 47 |
| 6.3 Βοηθητικά συστήματα υπερπυκνωτών .....                              | 49 |
| 6.4 Μετατροπέας DC/DC για συστοιχία υπερπυκνωτών.....                   | 51 |
| 6.5 Παράμετροι λειτουργίας διάταξης υπερπυκνωτών .....                  | 54 |

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 6.6 | Επιλογή υπερπυκνωτή για συστοιχία SuperCapacitors (SC)..... | 56 |
| 6.7 | Συμπεράσματα.....   | 57 |
|     | Βιβλιογραφία.....   | 59 |

## 1. Κυψέλες καυσίμου

### 1.1 Εισαγωγή

Η αυξανόμενη ανησυχία για την εξάντληση των ενεργειακών πόρων που βασίζονται στα καύσιμα όπως είναι το πετρέλαιο και η επίδραση της κλιματικής αλλαγής έχει οδηγήσει στην αυξανόμενη προσοχή των τεχνολογιών κυψελών καυσίμου, τα τελευταία χρόνια, χάρη στην υψηλή αποδοτικότητα και στις χαμηλές εκπομπές ρύπων. Οι κυψέλες καυσίμων, οι οποίες ταξινομούνται σύμφωνα με τον ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται, είναι ηλεκτροχημικές συσκευές που μετατρέπουν άμεσα τη χημική ενέργεια των καυσίμων όπως είναι το υδρογόνο σε ηλεκτρική ενέργεια. Η απόδοση τους μπορεί να φτάσει έως και το 60% στη μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας και συνολικά 80% μαζί με θερμική ενέργεια, παρέχοντας έως και 90% μείωση σε κύριους ρύπους. Πέντε κατηγορίες έχουν έως τώρα υποβληθεί σε σημαντικές προσπάθειες έρευνας: α) Κυψέλες καυσίμου μεμβράνης πολυμερούς ηλεκτρολύτη (PEMFC) β) κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC) γ) αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC) δ) κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC) και ε) κυψέλες καυσίμου τετηγμένου άνθρακα (MCFC).

Οι κυψέλες καυσίμου PEM κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας μεμβράνες πολυμερών ηλεκτρολυτών (κυρίως Nafion) ως αγωγό πρωτονίων και υλικά με βάση την πλατίνα (Pt) ως καταλύτη. Τα αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά τους περιλαμβάνουν χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας, υψηλή πυκνότητα ισχύος και εύκολη κλιμάκωση στην παραγωγή ισχύος, καθιστώντας τις κυψέλες καυσίμου PEM μία από τις πιο υποσχόμενες υποψήφιες πηγές ενέργειας επόμενης γενιάς για τις ναυτιλιακές εφαρμογές.

Η πρώτη κυψέλη καυσίμου εφευρέθηκε το 1839 από τον Sir William Robert Grove (Άγγλος δικηγόρος που έγινε επιστήμονας), αν και δεν βρέθηκε πρακτική χρήση για έναν περίπου αιώνα. Η General Electric Company (GE) άρχισε να αναπτύσσει κυψέλες καυσίμου τη δεκαετία του 1950 και της ανατέθηκε το συμβόλαιο για τη διαστημική αποστολή Gemini το 1962. Το σύστημα κυψελών καυσίμου Gemini 1 kW είχε πυκνότητα πλατίνας 35 mg Pt/cm<sup>2</sup> και απόδοση 37 mA/cm<sup>2</sup> στα 0,78 V.

Βελτιώσεις έγιναν την δεκαετία του 1960 με την ενσωμάτωση του Teflon στον καταλύτη, ακριβώς δίπλα στον ηλεκτρολύτη. Σημαντικές βελτιώσεις έγιναν από το 1970 και έπειτα με την υιοθέτηση της φθοριωμένης μεμβράνης Nafion. Το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ (DOE) καθώς και η ομοσπονδιακή κυβέρνηση δεν έδιναν ιδιαίτερη προσοχή, μέχρι πριν μερικές δεκαετίες, στην ανάπτυξη και την έρευνα των Fuel Cells, όταν καινοτόμες μέθοδοι για την μείωση της πλατίνας που απαιτούνταν για την κατασκευή των κυψελών καυσίμου τύπου PEMFC έλαβαν χώρα.

Η κύρια εφαρμογή των κυψελών καυσίμου είναι η χρήση στα μέσα μεταφοράς και κατ' επέκταση στη ναυτιλία, κυρίως λόγω του δυναμικού που προσφέρει στο περιβάλλον όπως η μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG – Green House Gases). Τέτοια αέρια είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), τα οξειδία του νατρίου (NO<sub>x</sub>) και τα οξειδία του θείου (SO<sub>x</sub>).

## 1.2 Αρχή λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου είναι η αντίστροφη της ηλεκτρόλυσης. Στην ηλεκτρόλυση το διερχόμενο ρεύμα προσφέρει την απαιτούμενη ενέργεια για να διασπαστεί το ύδωρ σε O<sub>2</sub> και H<sub>2</sub> ενώ στην κυψέλη καυσίμου παρέχονται τα αέρια O<sub>2</sub> και H<sub>2</sub> στα πορώδη ηλεκτρόδια συνεχώς, όπου συντίθενται σε ύδωρ αποδεσμεύοντας την ενέργεια συνδέσεώς τους υπό μορφή ηλεκτρικής ενέργειας. Για να εκκινήσει η αντίδραση απαιτείται διαχωρισμός των μορίων σε άτομα και ο ιονισμός τους, κάτι που

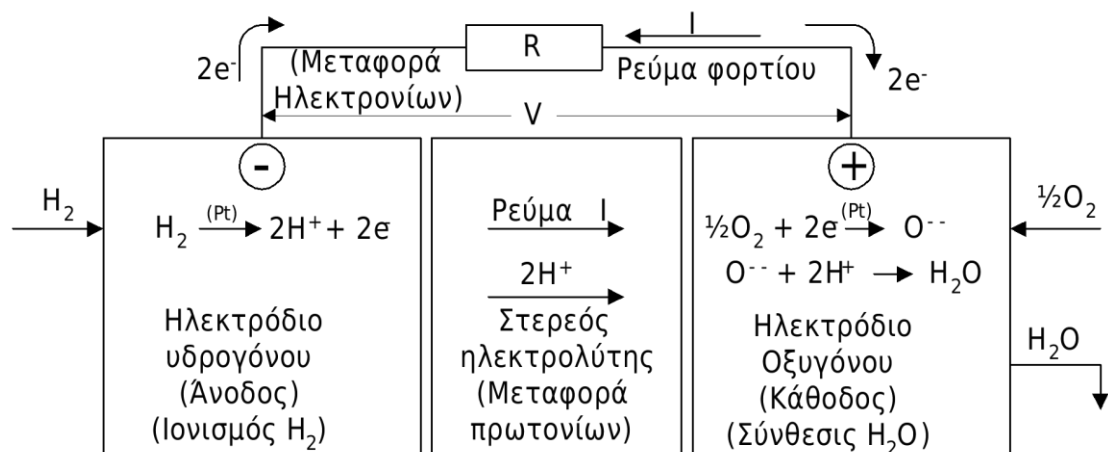
απαιτεί ενέργεια. Η διάσπαση των μορίων γίνεται με χημική μέθοδο επί των ηλεκτροδίων από το λευκόχρυσο (Pt) που αποτελεί μέρος των ηλεκτροδίων. Ο λευκόχρυσος του ηλεκτροδίου της ανόδου αντιδρά με το  $H_2$ , το οποίο μετατρέπεται σε ατομικό και του αφαιρείται το ηλεκτρόνιο που κινείται πλέον ελεύθερο. Το πρωτόνιο του  $H_2$  μπορεί να κινηθεί εντός του στερεού ηλεκτρολύτη.



Έτσι αναπτύσσεται αρνητικό δυναμικό στο ηλεκτρόδιο του  $H_2$  που αποτελεί την άνοδο του στοιχείου και προκαλεί ροή ηλεκτρονίων προς το θετικό ηλεκτρόδιο του  $O_2$  εάν συνδεθεί μεταξύ τους εξωτερικό κύκλωμα. Αντίστοιχη είναι η συμπεριφορά του λευκόχρυσου και με το  $O_2$  στην κάθοδο, που μετά τη μετατροπή του σε ατομικό, διευκολύνεται η πρόσληψη των ηλεκτρονίων από το εξωτερικό κύκλωμα και η αντίδρασή του με το πρωτόνιο που λαμβάνει μέσω του στερεού ηλεκτρολύτη.



Η σύνθεση του ύδατος γίνεται στο ηλεκτρόδιο του  $O_2$ . Ο καταλύτης μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων χωρίς να συμμετέχει στην αντίδραση, τη διευκολύνει. Έτσι το ηλεκτρόδιο του  $H_2$  φορτίζεται αρνητικά με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, σχηματίζοντας τον αρνητικό πόλο (άνοδο), ενώ το ηλεκτρόδιο του  $O_2$  θετικά, από τη συγκέντρωση των πρωτονίων και αποτελεί το θετικό πόλο (κάθοδο). Εάν συνδεθεί εξωτερικό φορτίο μεταξύ θετικού και αρνητικού πόλου, τα μόρια του  $H_2$  διαχωρίζονται. Τα ηλεκτρόνια τους μεταφέρονται στο θετικό πόλο μέσω του εξωτερικού κυκλώματος, ενώ τα πρωτόνια μέσω του ηλεκτρολύτη. Εκεί γίνεται η αντίδραση με το  $O_2$  και παράγεται ύδωρ.



Σχ. 1 Αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου

Το δυναμικό που αναπτύσσεται μεταξύ των ηλεκτροδίων μπορεί να προσδιορισθεί από την εκλυόμενη ενέργεια της οξειδοαναγωγικής αντίδρασης. Εάν θεωρηθεί ότι η εκλυόμενη ενέργεια  $E$  από τη χημική αντίδραση αποδίδεται υπό μορφή ηλεκτρικών φορτίων  $Ne$  και τάσεως  $V$ , τότε μπορεί να γραφεί υπό τη μορφή της εξίσωσης (4).

$$E = 2VNe \quad (4)$$

όπου  $N$  ο αριθμός μορίων ανά γραμμομόριο ( $N=6.023 \times 10^{23}/\text{mol}$ ),  $e$  το φορτίο του ηλεκτρονίου ( $e=1.602 \times 10^{-19}\text{Cb}$ ) και ο συντελεστής 2 αντιπροσωπεύει το δυατομικό μόριο του υδρογόνου. Η απόδοση της κυψέλης καυσίμου για κάθε τιμή φορτίσεως προκύπτει από το πηλίκο της παραγόμενης ενέργειας  $2VNe$  προς την προσφερόμενη  $2V_L Ne$  από την κυψέλη καυσίμου. Επειδή όμως το φορτίο  $2Ne$  είναι κοινό και για τους δύο όρους απλοποιείται. Έτσι η απόδοση εκφράζεται από το πηλίκον των τάσεων  $V$  προς την  $V_L$ .

$$\eta = V / V_L \quad (5)$$

### 1.3 Τύποι κυψελών καυσίμου

Οι Κυψέλες Καυσίμου ταξινομούνται με βάση το είδος του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν. Αυτή η ταξινόμηση προσδιορίζει το είδος των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στην κυψέλη καυσίμου, το είδος του καταλύτη, το εύρος θερμοκρασίας στο οποίο λειτουργεί η Κυψέλη Καυσίμου, το απαιτούμενο καύσιμο καθώς και άλλους παράγοντες. Τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά, με τη σειρά τους, επηρεάζουν τις εφαρμογές για τις οποίες οι κυψέλες καυσίμου είναι οι πλέον κατάλληλες. Ένας καθοριστικός παράγοντας για την επιλογή του τύπου της κυψέλης καυσίμου που θα χρησιμοποιηθεί είναι η καθαρότητα του υδρογόνου. Οι κυψέλες καυσίμου χαμηλών θερμοκρασιών απαιτούν καθαρό υδρογόνο, επειδή η απόδοση των αντίστοιχων καταλυτών/ηλεκτροδίων υποβαθμίζεται με την παρουσία ξένων προσμίξεων/ακαθαρσιών καθώς και του μονοξειδίου του άνθρακα. Αντίθετα, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας στις κυψέλες καυσίμου SOFCs και MCFCs, οι καταλύτες είναι περισσότερο ανθεκτικοί στην παρουσία ξένων προσμίξεων/ακαθαρσιών, ενώ επιπλέον το CO μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως καύσιμο. Οι κυψέλες καυσίμου PEFCs, SOFCs και MCFCs θεωρούνται ιδανικές για σταθερές εφαρμογές. Οι κυψέλες καυσίμου τύπου PEM παράγουν υψηλές πυκνότητες ισχύος σε πυκνότητες ρεύματος που προσεγγίζουν τα  $4 \text{ A/cm}^2$ , σε αντίθεση με τους άλλους τύπους κυψελών καυσίμου όπου με δυσκολία φθάνουν το  $1 \text{ A/cm}^2$ . Αυτό το χαρακτηριστικό, σε συνδυασμό με τα πλεονεκτήματα του βάρους, του όγκου και του κόστους, καθιστά αυτόν τον τύπο κυψελών καυσίμου τον ελκυστικότερο τόσο για κινητές όσο και για σταθερές εφαρμογές.

#### a) PEMFC (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)

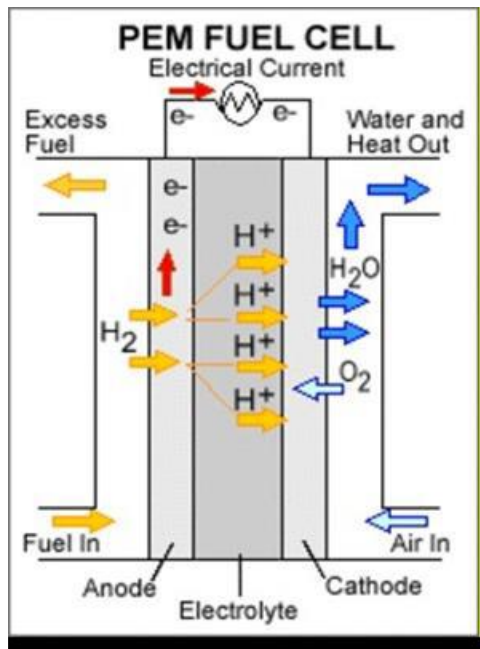
Οι κυψέλες καυσίμου μεμβράνης πολυμερούς ηλεκτρολύτη ή αλλιώς μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων, παρέχουν υψηλή πυκνότητα ισχύος (έως  $4 \text{ A/cm}^2$ ) και παρέχουν χαμηλό βάρος και όγκο σε σύγκριση με άλλους τύπους κυψελών καυσίμου. Στις εν λόγω κυψέλες χρησιμοποιούνται δύο πορώδη ηλεκτροκαταλυτικά στρώματα (ηλεκτρόδια) στα οποία τοποθετούνται αγωγιμοί και πορώδεις συλλέκτες ρεύματος σε επαφή με τους δίσκους οι οποίοι διαμορφώνουν τα κανάλια ροής των αντιδρώντων και των προϊόντων. Το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο υλικό ως στερεός

ηλεκτρολύτης στις κυψέλες καυσίμου PEM είναι η πολυμερική μεμβράνη Nafion, η οποία διακρίνεται για την υψηλή θερμική σταθερότητα και τη χημική αντοχή ως προς το  $H_2$  και το  $O_2$  σε θερμοκρασίες έως  $125\text{ }^\circ\text{C}$ . Το ηλεκτρόδιο/καταλύτης και στην πλευρά της ανόδου και της καθόδου βρίσκεται σε επαφή με την πολυμερική μεμβράνη.

Χρησιμοποιείται ένα στερεό πολυμερές ως ηλεκτρολύτης και ο καταλύτης που χρησιμοποιείται είναι συνήθως ο λευκόχρυσος, ευγενές μέταλλο το οποίο διαχωρίζει τα ηλεκτρόνια και πρωτόνια του υδρογόνου. Ο καταλύτης αυτός αυξάνει το κόστος του συστήματος και είναι επίσης ευαίσθητος στο μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το θείο (S) και την αμμωνία ( $NH_3$ ), και γι αυτό επιβάλλεται η χρήση υδρογόνου υψηλής καθαρότητας. Οι PEMFC παρέχουν επίσης μικρό χρόνο έναρξης λειτουργίας και υψηλή ηλεκτρική απόδοση (μεταξύ 40% και 50%), κάτι που τις καθιστά ιδανικές για τη χρήση στην πρόωση στις ναυτιλιακές εφαρμογές. Το ασφαλέστερο χρησιμοποιούμενο καύσιμο για αυτόν τον τύπο κυψελών καυσίμου είναι το υδρογόνο. Χάρη στην ύπαρξη του λευκόχρυσου επιταχύνεται η αντίδραση σχηματισμού μορίων νερού η οποία όμως είναι αρκετά αργή λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών λειτουργίας της κυψέλης. Γι' αυτό το λόγω είναι απαραίτητο να υπάρχει κύκλωμα ψύξης για την απαγωγή της θερμότητας. Για τη διατήρηση της υψηλής απόδοσης είναι απαραίτητη επίσης η διαχείριση του παραγόμενου νερού ώστε να αποφεύγεται η υπερβολική κατακράτηση (αποβολή σε κατάλληλες δεξαμενές αντιδρώντος ύδωρ) και επαρκής ενυδάτωση πολυμερούς μεμβράνης.

Οι PEMFC χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές μεταφορών υψηλής ισχύος, σε επιβατικά οχήματα (όπως αυτοκίνητα, λεωφορεία), σε υποβρύχια με δυνατότητα αναερόβιας πρόωσης (AIP) αλλά και σε διατάξεις φορητών ηλεκτρονικών συσκευών και σε ηλεκτρικές εγκαταστάσεις εργοστασίων.





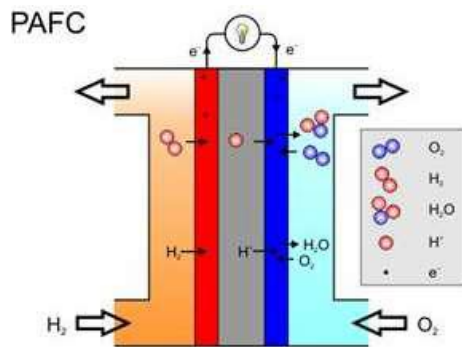
Σχ.2 Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης πολυμερούς ηλεκτρολύτη (PEMFC).

b) Κυψέλες Καυσίμου φωσφορικού οξέος (Phosphoric Acid Fuel Cell - PAFC)

Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC) χρησιμοποιούν υγρό φωσφορικό οξύ ως ηλεκτρολύτη και ως καταλύτης χρησιμοποιείται ο λευκόχρυσος (Pt) ο οποίος έχει υψηλό κόστος. Είναι η πρώτη τεχνολογία κυψελών καυσίμου που εμπορευματοποιήθηκε καθώς το 2004 αντιπροσώπευε το 40% των εγκατεστημένων μονάδων κυψελών καυσίμου. Ο ηλεκτρολύτης στις κυψέλες αυτές αποτελείται από ένα πυκνό διάλυμα H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> το οποίο τοποθετείται σε μήτρα από καρβίδιο πυριτίου. Ο συγκεκριμένος ηλεκτρολύτης είναι αγωγός πρωτονίων, ο οποίος παρέχει υψηλή σταθερότητα και θερμοκρασίες έως και 220 °C. Λειτουργούν με απόδοση (40%) και βασικός λόγος υποβάθμισης της απόδοσης τους είναι η πλημμύριση και ξήρανση των ηλεκτροδίων λόγω της μετακίνησης του H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> μεταξύ της μήτρας και των ηλεκτροδίων κατά τη διάρκεια του κύκλου πλήρωσης.

Η θερμοκρασία λειτουργίας επιτρέπει ικανοποιητικό ρυθμό διεξαγωγής των αντιδράσεων. Παρουσιάζει πλεονεκτήματα σε σύγκριση με άλλα είδη κυψελών καυσίμου, όπως αξιοπιστία και

ανοχή στο CO<sub>2</sub>, που μπορεί να υπάρχει στο καύσιμο ή στο οξειδωτικό μέσο. Λειτουργούν συνήθως σε πυκνότητες ρεύματος μεταξύ 100-450 mA/cm<sup>2</sup> και είναι λιγότερο ισχυρά σε απόδοση και πυκνότητα ισχύος από άλλα Fuel Cell, δεδομένου του ίδιου βάρους και όγκου. Μπορούν να αξιοποιηθούν σε συστήματα συνδυασμένου θερμικού κύκλου ισχύος 200kW για συμπαραγωγή σε κτιριακές εγκαταστάσεις με υψηλό βαθμό απόδοσης αλλά και αυτόνομα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

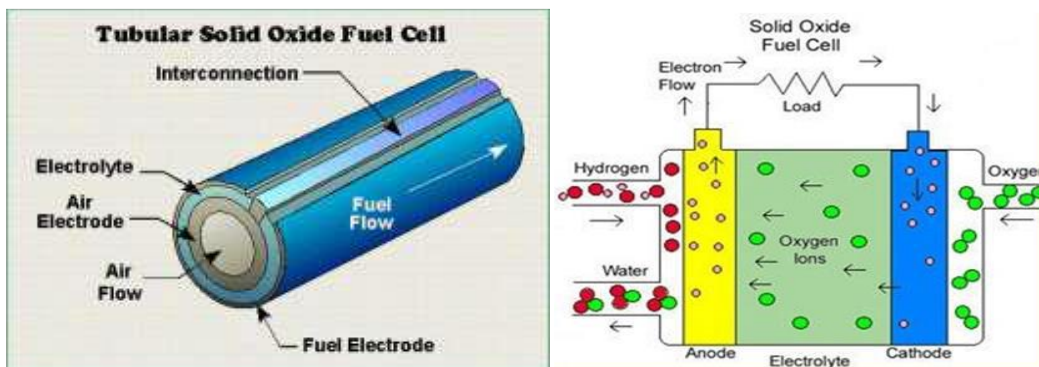


Σχ. 3 Κυψέλες Καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)

### c) Solid Oxide Fuel Cells (SOFC)

Οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων χρησιμοποιούν το οξείδιο του ζirkονίου με 9% οξείδιο του υτρίου (Yttria Stabilized Zirconia - YSZ) ως ηλεκτρολύτη επειδή παρουσιάζει υψηλή ιοντική αγωγιμότητα σε ένα ευρύ φάσμα πιέσεων οξυγόνου. Λειτουργεί σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (550 – 1000 °C) με αρκετά υψηλή απόδοση (50-60%) καθόσον αναπτύσσεται υψηλή κινητική ενέργεια ηλεκτροδίων ενώ χαρακτηρίζονται επίσης από αργό χρόνο εκκίνησης. Οι υψηλές θερμοκρασίες περιορίζουν το χρόνο ζωής της κυψέλης αλλά ταυτόχρονα επιτυγχάνουν υψηλή πυκνότητα ρεύματος. Τα κεραμικά κράματα που απαιτούνται για την κατασκευή τους αυξάνουν αισθητά το κόστος κατασκευής, για το λόγο αυτό ερευνάται η δυνατότητα μείωσης της θερμοκρασίας λειτουργίας στους 600-800 °C για να γίνεται χρήση λιγότερο ακριβών υλικών όπως ανοξείδωτος χάλυβας. Η χρήση στερεού ηλεκτρολύτη αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα των SOFC καθώς απλοποιείται η

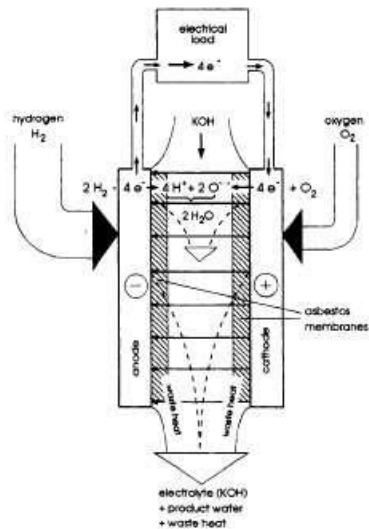
σχεδίαση του συστήματος και εξαλείφεται το πρόβλημα διάβρωσης και διαχείρισης που παρατηρείται στους υγρούς ηλεκτρολύτες. Έχουν συνήθως κυλινδρικό σχήμα και χρησιμοποιούνται για παραγωγή ενέργειας από σταθερές μονάδες και όχι τόσο για τις μεταφορές ενώ συντελείται παράλληλα έρευνα στη δυνατότητα ανάπτυξης κυψελών SOFC που να λειτουργούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες για να αξιοποιηθούν προς συμπαραγωγή ενέργειας και να είναι κατάλληλα για όλα τα μεγέθη συστημάτων συνδυασμένου θερμικού κύκλου ισχύος.



Σχ. 5 κυλινδρική κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου και κυλινδρική όψη αυτής (SOFC)

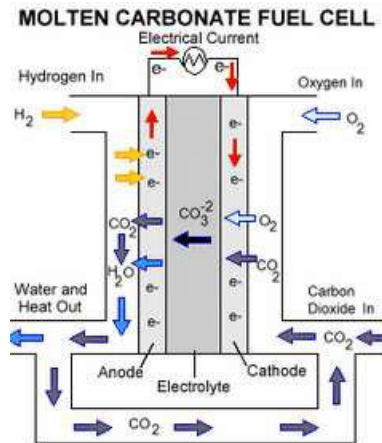
- d) Αλκαλικές Κυψέλες Καυσίμου (Alkaline Fuel Cell - AFC)
- Οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου έχουν ηλεκτρολύτη από αλκαλικό διάλυμα όπως είναι το υδροξείδιο του νατρίου (NaOH) ή το υδροξείδιο του καλίου (KOH). Είναι ένα από τα πρώτα είδη κυψελών καυσίμου και χρησιμοποιήθηκαν στο διαστημικό πρόγραμμα των ΗΠΑ για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε διαστημικό όχημα της NASA στις αρχές της δεκαετίας του '60. Η διαφορά τους με τις PEMFC είναι ότι χρησιμοποιούν αλκαλική μεμβράνη αντί για όξινη. Χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό απόδοσης (60%) χάρη στην ταχύτητα της εκτέλεσης χημικής αντίδρασης και οι θερμοκρασίες λειτουργίας τους δεν ξεπερνούν τους 100°C. Αν και η χρήση ηλεκτρολυτών χαμηλού κόστους ευνοεί τη χρήση αυτών των κυψελών παρουσιάζεται ευαισθησία στην ύπαρξη CO<sub>2</sub> στο παρεχόμενο καύσιμο (υδρογόνο) γεγονός που υποβαθμίζει τη διάρκεια ζωής και την απόδοση λόγω διαβρώσεων στη μεμβράνη. Οι κυψέλες AFC

χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας και σε διαστημικές εφαρμογές.



Σχ. 6 Αλκαλική Κυψέλη Καυσίμου (AFC)

- e) Κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων (Molten Carbonate Fuel Cells - MCFC)
- Οι κυψέλες MCFC χρησιμοποιούν τήγματα ανθρακικών αλάτων από ανθρακικά μέταλλα ως ηλεκτρολύτη και καταλύτη χαμηλού κόστους από νικέλιο (Ni). Απαιτούν ανθεκτικά υλικά για την κατασκευή τους ώστε να μην παρατηρείται διάβρωση από τον ηλεκτρολύτη. Λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες (άνω των 600°C) με υψηλό βαθμό απόδοσης (50-60%) αλλά έχουν μειωμένο χρόνο εκκίνησης και εμφανίζουν προβλήματα μηχανικής σταθερότητας που περιορίζουν τη διάρκεια ζωής τους. Η μικρή διάρκεια ζωής τους είναι το κύριο μειονέκτημα τους και διερευνάται επί του παρόντος η χρήση ανθεκτικών υλικών απέναντι στη διάβρωση για την κατασκευή τους. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές συμπαραγωγής ενέργειας σε στατικές εφαρμογές μέσης και μεγάλης ισχύος.



Σχ. 7 Κυψέλη καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων (MCFC)

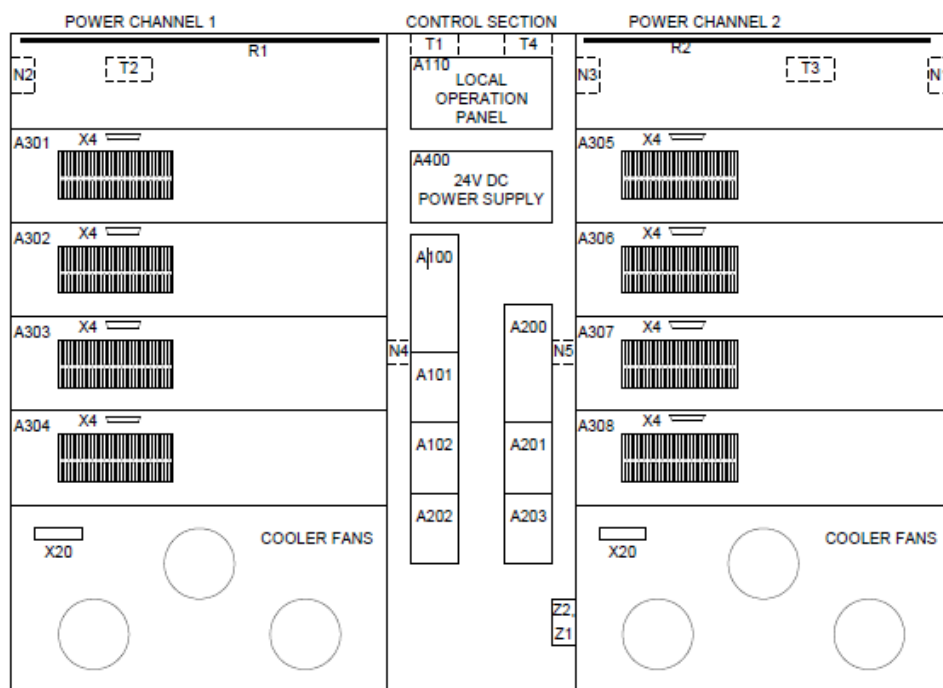
## 2. Μετατροπέας Fuel Cell DC/DC Converter

### 2.1 Εισαγωγή

Ο σκοπός ενός μετατροπέα συνεχούς ρεύματος (DC/DC) είναι να προσαρμόζει τη μεταβαλλόμενη τάση των κυψελών καυσίμου (Fuel Cells) με τη μεταβαλλόμενη τάση των συσσωρευτών τροφοδοτώντας το δίκτυο συνεχούς ρεύματος του πλοίου. Για το σκοπό αυτό, θα πρέπει να είναι συνδεδεμένος στην έξοδο των μονάδων κυψελών καυσίμου και να καλύπτει την περιοχή ισχύος των κυψελών (τουλάχιστον 100-120 kW). Η έξοδος του θα συνδέεται μέσω διόδων αποζεύξεως στο δίκτυο συνεχούς ρεύματος του πλοίου.

Ο μετατροπέας είναι δομημένος όπως φαίνεται στο σχ.8. Αποτελείται από τρία τμήματα. Τα δύο ακραία τμήματα περιλαμβάνουν τις μονάδες ισχύος και τα ψυγεία τους (Channel 1 και Channel 2). Το κεντρικό τμήμα (Control Section) περιλαμβάνει τις μονάδες ελέγχου, τα κυκλώματα εξόδου και τις τροφοδοτήσεις. Σε κάθε μονάδα ισχύος υπάρχουν τέσσερα Power Modules τα οποία συμπεριφέρονται ως πηγές ρεύματος και λειτουργούν παράλληλα ανά κανάλι. Τέλος η μονάδα Cooler Fans, στο κάτω τμήμα του κάθε channel, ψύχει μέσω θαλασσίου ύδατος τα αντίστοιχα power modules του τμήματος, κυκλοφορώντας τον αέρα με τρεις ανεμιστήρες δύο ταχυτήτων.

Η μονάδα Control Module βρίσκεται στο μεσαίο τμήμα (Control Section) και είναι η μονάδα επικοινωνίας του μετατροπέα με το FCCB (Fuel Cell Control Board) καθορίζοντας επίσης τη συνεργασία του μετατροπέα με τις κυψέλες καυσίμου καθώς και με το δίκτυο συνεχούς του πλοίου. Στο μεσαίο τμήμα υπάρχουν τα φίλτρα παροχής και εξόδου του μετατροπέα, οι αισθητήρες τάσεως και ρεύματος εισόδου, το τροφοδοτικό 24V DC, το Local Operation Panel (LOP) και οι ηλεκτρονόμοι για τις αντιστάσεις εκφορτίσεως και για τη σύνδεση του FCDD με τις κυψέλες καυσίμου.



Σχ. 8 Σχέδιο μονάδων του μετατροπέα FCDD

## 2.2 Η διασύνδεση του μετατροπέα DC/DC

Η τάση της κάθε κυψέλης καυσίμου παρέχεται αρχικά στο Control Section και από εκεί μέσω δύο EMI φίλτρων μεταδίδεται στα δύο τμήματα Channel 1 και Channel 2 αντίστοιχα, για τη μετατροπή της στο δίκτυο του πλοίου (όπως 450-750VDC). Στο Control Section βρίσκονται αισθητήρες ρεύματος εισόδου καθώς και αισθητήρες τάσεως του δικτύου του πλοίου (τουλάχιστον δύο για σύγκριση τιμής και εναλλαξιμότητα). Στο άνω τμήμα του

Control Section η παρεχόμενη τάση από τις κυψέλες καυσίμου μετράται από δύο αισθητήρες τάσεως για τα Channel 1 και 2 αντίστοιχα.

Από την ισχύ της κάθε κυψέλης καυσίμου τροφοδοτούνται μέσω δύο ζυγών τα τέσσερα Power Module του κάθε Channel. Οι έξοδοι των τεσσάρων Power Module στο κάθε Channel εν συνεχεία παραλληλίζονται, και σχηματίζουν τους ζυγούς της τάσεως εξόδου. Το ολικό ρεύμα, αφού μετρηθεί από αισθητήρες ρεύματος, οδηγείται ως έξοδος στο Control Section και παρέχεται στους ακροδέκτες εξόδου μέσω EMI φίλτρου. Η κοινή παραγόμενη τάση στη συνέχεια μετράται από έναν αισθητήρα στο άνω τμήμα του Channel 2.

Η επικοινωνία των μονάδων και των εξωτερικών περιφερειακών γίνεται μέσω της μονάδας Control Module με χρήση διακριτών (ψηφιακών ή αναλογικών) σημάτων. Μία κάρτα είναι υπεύθυνη για την μέτρηση των τάσεων και των ρευμάτων των δύο καναλιών και τα οκτώ power modules ελέγχονται επίσης από δύο κάρτες. Από μία κάρτα ελέγχου εξωτερικών σημάτων παράγονται τα σήματα καταστάσεως του μετατροπέα για απεικόνιση και άλλες δύο κάρτες ελέγχου επικοινωνούν με ψηφιακά σήματα εισόδου και εξόδου με τον πίνακα ελέγχου κυψελών καυσίμου. Υφίστανται τέλος, σήματα από αισθητήρες ροής ύδατος (water inrush) από τα τμήματα cooling units και αναλογικά σήματα μετρήσεως ρεύματος των συστοιχιών για την Normal Operation των Fuel Cells.

### 2.3 Η μονάδα Control Module

Η μονάδα Control Module αποτελεί το κέντρο ελέγχου και πληροφοριών του μετατροπέα. Η επικοινωνία με τον πίνακα ελέγχου του συστήματος αναερόβιας πρόωσης γίνεται μέσω αυτής της μονάδας, καθώς και η επικοινωνία με τα Power Modules και των δύο συστημάτων. Η μονάδα περιλαμβάνει δύο PLC με τα περιφερειακά τους, οι οποίοι διαχειρίζονται την επικοινωνία και τον έλεγχο των μονάδων του μετατροπέα. Η λειτουργία της μονάδας βασίζεται αποκλειστικά στους δύο PLCs που αποτελούνται από κάρτες ελέγχου σημάτων. Δύο κάρτες αποτελούν τους

επεξεργαστές των PLCs οι οποίοι επικοινωνούν μεταξύ τους με σειριακό κανάλι τύπου CAN Bus. Η πρώτη ομάδα καρτών ελέγχει τη λειτουργία των τεσσάρων Power Modules του Channel 1 και του Channel 2 και η δεύτερη ομάδα λαμβάνει ψηφιακά διακριτά σήματα από τον πίνακα ελέγχου (FCCB) και ανιχνεύει τυχόν διαρροή ύδατος από τα ψυγεία των δύο Power Channels.

Ο κάθε PLC τροφοδοτείται ανεξάρτητα με τάση 24VDC από την παροχή των 115 V 60 Hz. Ο πρώτος PLC χρησιμοποιείται για τη συλλογή των μετρήσεως τάσεως και ρευμάτων από την είσοδο και την έξοδο του συστήματος των Fuel Cells καθώς και τον έλεγχο της λειτουργίας των Power Modules. Επιπλέον ο πρώτος PLC συνδέεται με το Local Operating Panel για χειροκίνητη λειτουργία και έλεγχο του μετατροπέα.

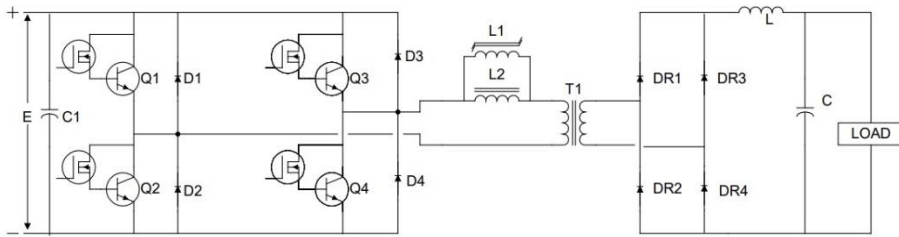
Ο δεύτερος PLC χρησιμοποιείται για την επικοινωνία με το Fuel Cell Control Board.

## 2.4 Οι μονάδες Power Modules

Οι μονάδες Power Modules είναι οκτώ πανομοιότυπες μονάδες που αποτελούν τα Channels 1 και 2 του κυρίως μετατροπέα και λειτουργούν παράλληλα για να προσαρμόσουν την τάση των κυψελών καυσίμου 210-290 VDC σε γαλβανικά αποζευγμένη τάση 450-750 VDC για την τροφοδότηση του δικτύου Συνεχούς Ρεύματος του πλοίου. Για την επίτευξη υψηλής απόδοσης του μετατροπέα DC/DC (>93%) έχουν επιλεγεί ειδικά IGBTs, μετασχηματιστές και δίοδοι σε κατάλληλο σχεδιασμό των κυκλωμάτων ώστε να διατηρηθούν οι απώλειες χαμηλές.

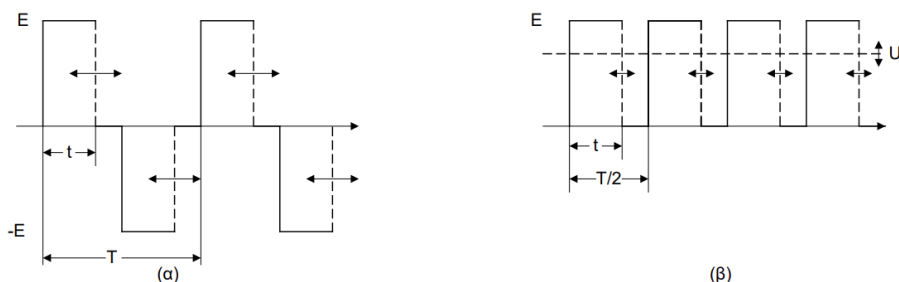
Ο μετατροπέας βασίζεται στη μετατροπή της τάσεως με αντιστροφή σε εναλλασόμενη υψηλής συχνότητας, 16kHz ελεγχόμενης διάρκειας παλμών με μέθοδο PWM (Pulse Width Modulation), εν συνεχεία μετασχηματισμό, ανόρθωση της τάσης και τέλος εξομάλυνση αυτής.





Σχ. 9 Δομή του μετατροπέα FCDD με τον αντιστροφέα και την διάταξη ανόρθωσης

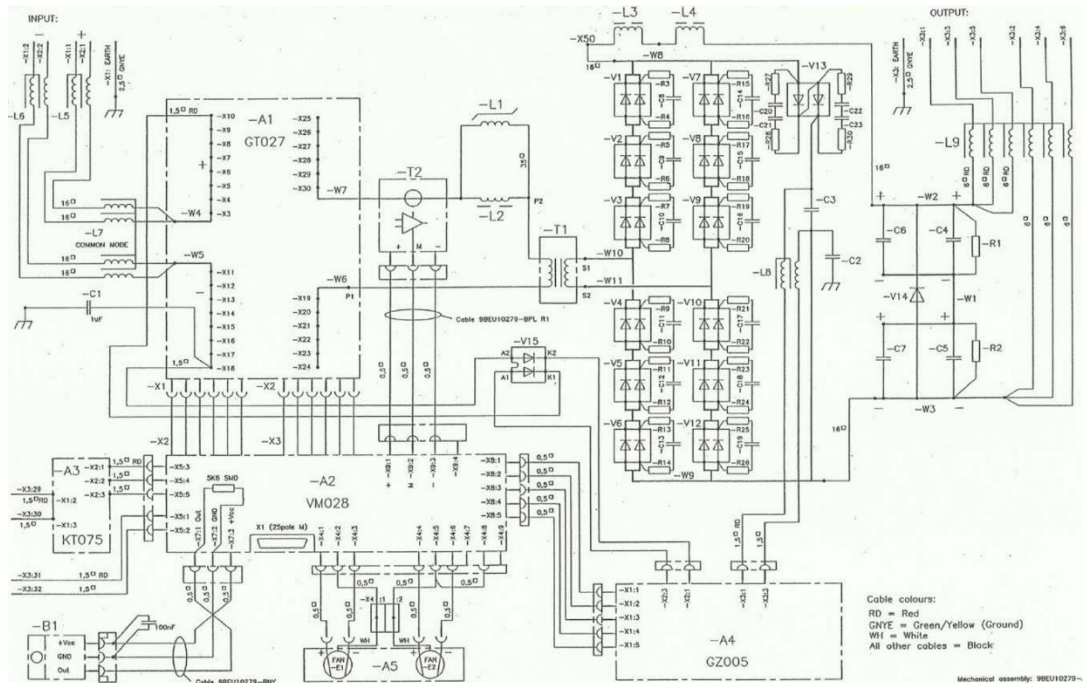
Όπως φαίνεται στο Σχ. 9 στο τμήμα του αντιστροφέα χρησιμοποιούνται τέσσερα IGBTs τα Q1, Q2, Q3, Q4 ως διακόπτες σε διάταξη γέφυρας. Λειτουργούν διαγώνια Q1-Q4 ή Q2-Q3, ώστε να συνδέουν το μετασχηματιστή κατά την ορθή και την ανάστροφο φορά στην τάση των κυψελών καυσίμου 210-290 VDC. Έτσι εκτελείται μια περιοδική τροφοδότηση του μετασχηματιστή με τάση αντίθετης πολικότητας και προκύπτει μια σειρά παλμών, ελεγχόμενης διάρκειας και συγκεκριμένης περιόδου.



Σχ. 10 Οι κυματομορφές του αντιστροφέα (α) του εναλλασσόμενου στον μετασχηματιστή και (β) του ανορθωμένου πριν από το φίλτρο

Η παραγόμενη εναλλασσόμενη παλμοσειρά που διακρίνουμε στο Σχ. 10 εφαρμόζεται στο πρωτεύον τύλιγμα T1 του μετασχηματιστή, για να παραχθεί από το δευτερεύον η επιθυμητή τάση. Η παραγόμενη εναλλασσόμενη τάση έχει πλάτος E. Μετά την ανόρθωση η οποία συντελείται με τη χρήση των διόδων DR1-DR4 παράγεται η παλμοσειρά του σχ. 10β. Η ρύθμιση της παραγόμενης τάσης γίνεται με τη μέθοδο PWM. Αυτό σημαίνει ότι

η διάρκεια του παλμού  $t$  ρυθμίζεται ώστε η τάση  $U$  να έχει την επιθυμητή τιμή. Για παράδειγμα, εάν η τάση του δικτύου  $E$  μειώνεται, η διάρκεια του παλμού  $t$ , αυξάνεται για να διατηρηθεί η τιμή  $U$  σταθερή. Αντίστοιχα, εάν θέλουμε μικρότερη τιμή τάσεως  $U$ , τότε η διάρκεια των παλμών θα μειωθεί.



Σχ. 11 Ηλεκτρολογική δομή Power Module

Στο σχ. 11 φαίνεται η δομή ενός Power Module. Το κύριο τμήμα του Power Module αποτελείται από τον αντιστροφέα με τη γέφυρα των τεσσάρων διακοπών A1 GT027. Μέσω των πηνίων L5, L6, L7 τα Fuel Cell τροφοδοτούν με τάση τον αντιστροφέα για να εξομαλύνεται το παραγόμενο διακοπτόμενο ρεύμα. Για την κάλυψη της απαιτούμενης τιμής συνδέονται τρία IGBT παράλληλα στο κύκλωμα. Το παραγόμενο ρεύμα μετράται από τον αισθητήρα T1. Η εναλασσόμενη παλμοσειρά εφαρμόζεται στο μετασχηματιστή T2 μέσω των πηνίων L3 και L4. Ο λόγος μετασχηματισμού πρωτεύοντος προς δευτερεύον είναι περίπου  $\frac{1}{4}$  ώστε με τη μικρότερη τάση των 200V DC των Fuel Cells να είναι δυνατή η ανάπτυξη 750VDC για το δίκτυο του πλοίου. Στην έξοδο του μετασχηματιστή παρατηρείται η ύπαρξη των διόδων ταχείας επανάταξης V1-V12 οι οποίες ανορθώνουν την τάση εξόδου. Ο λόγος που χρησιμοποιούνται διόδοι ταχείας επανάταξης είναι η απόδοση τους στην υψηλή διακοπτική συχνότητα, καθόσον χρησιμοποιούν δύο διόδους μικρότερου ρεύματος αντί για μία δίοδο μεγαλύτερου ρεύματος. Έτσι οι διόδοι είναι διπλές για

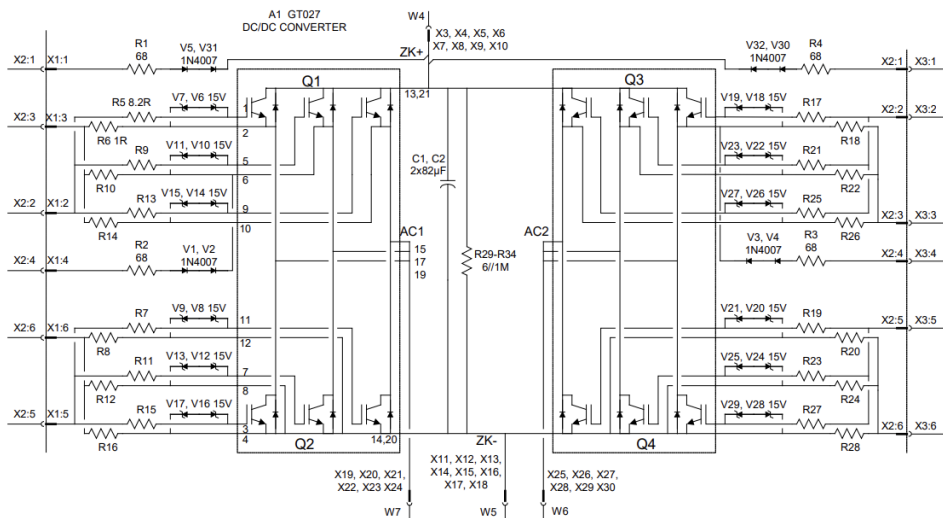
καταμερισμό ρεύματος και συνδέονται ανά τρεις σε σειρά για την κατανομή της τάσεως.

Το κύκλωμα εξόδου προστατεύεται από υπερτάσεις προερχόμενες από την ενέργεια των μαγνητικών πεδίων κατά τη διακοπτική λειτουργία του μετατροπέα από τη διάοδο V13 και τον πυκνωτή C3. Η ενέργεια των παλμών υψηλότερης τάσης αποθηκεύεται στον πυκνωτή C3 και στη συνέχεια επανατροφοδοτείται στην είσοδο του αντιστροφέα GT027 μέσω του αντίστροφου μετατροπέα (Feedback Chopper) GZ005. Έτσι βελτιώνεται η απόδοση της διάταξης. Ο αντίστροφος μετατροπέας έχει εκατό φορές περίπου μικρότερη ισχύ και έχει ως σκοπό την επιστροφή της περίσσειας ενέργειας στην τροφοδότηση του αντιστροφέα.

Επιπλέον μέσω της μονάδας A2 γίνεται η επικοινωνία με το Control Module και ταυτόχρονα ελέγχεται ο αντιστροφέας GT027, το Feedback Chopper και δύο ανεμιστήρες που χρησιμοποιούνται για την ψύξη. Μέσω του αισθητήρα θερμοκρασίας B1 ελέγχεται η αξιόπιστη λειτουργία της μονάδας του Power Module. Μέχρι τη θερμοκρασία των 60°C η λειτουργία της μονάδας συντελείται χωρίς περιορισμό. Από 60°C έως 95°C το επιτρεπόμενο ρεύμα μειώνεται γραμμικά, ενώ για θερμοκρασία άνω των 95°C διακόπτεται η λειτουργία της μονάδας.

## 2.5 Η μονάδα A1 GT027

Πρόκειται για το τμήμα ισχύος του μετατροπέα που εκτελεί τη μετατροπή από το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο υψηλής συχνότητας. Αποτελείται από το μονοφασικό αντιστροφέα με τους τέσσερις ηλεκτρονικούς διακόπτες στερεάς κατάστασης τύπου IGBT. Κάθε διακόπτης Q1, Q2, Q3, Q4 αποτελείται από τρία IGBTs συνδεδεμένα παράλληλα. Η τάση που έρχεται από τα Fuel Cell 200-350 VDC εφαρμόζεται στους ακροδέκτες W4(+) και W5(-). Οι πύλες των IGBT προστατεύονται από υπερτάσεις με διόδους Zener των 15V. Τα IGBTs ελέγχονται για υπερένταση από κυκλώματα ελέγχου όπου εφαρμόζεται σταθερό ρεύμα (πχ X1:1- Collector, X1:2- Emitter).



Σχ. 12 Η συνδεσμολογία της κάρτας GT027

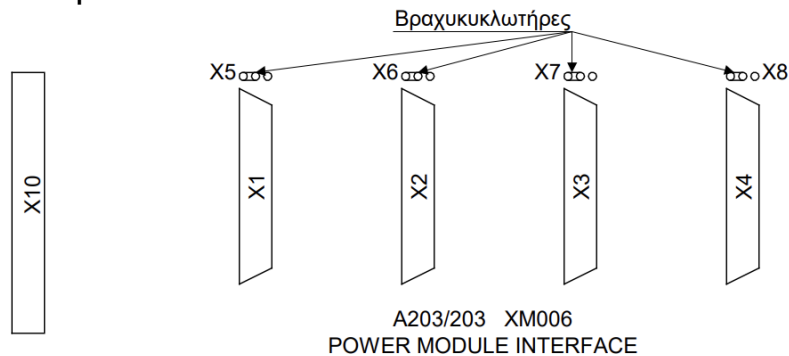
## 2.6 Η λειτουργία του μετατροπέα

Από πλευράς ελέγχου, το κάθε Power Module λειτουργεί ως μία αυτόνομη πηγή ρεύματος με ονομαστική τιμή εισόδου 140A και ανώτατη επιτρεπόμενη τιμή τα 300A. Τα οκτώ Power Modules των δύο καναλιών ομαδοποιούνται σε δύο τμήματα. Από τα δύο τμήματα σχηματίζεται ένα σήμα PWM με το οποίο συγχρονίζεται η διαμόρφωση εύρους ρεύματος για κάθε τμήμα, το οποίο είναι μετατοπισμένο κατά  $22.5^\circ$  για το τμήμα 2 ως προς το τμήμα 1, ως προς τη βασική συχνότητα των 16kHz. Έτσι η κυμάτωση που αναπτύσσεται από την υπέρθεση του ρεύματος των δύο τμημάτων του μετατροπέα, μειώνεται.

Η κοινή τάση που αναπτύσσεται, καθορίζεται από τη μονάδα Control Module που ελέγχει και τα οκτώ Power Modules μαζί, από την ανατροφοδότηση της τάσεως εξόδου.

Ο μετατροπέας λειτουργεί στην πλήρη ισχύ των 240kW με τις οκτώ μονάδες παράλληλα. Σε περίπτωση βλάβης μίας εκ των μονάδων, ο μετατροπέας αδυνατεί να λειτουργήσει ακόμα και αν η απαίτηση ισχύος είναι μικρότερη. Για το λόγο αυτό υπάρχουν βραχυκυκλωτήρες απενεργοποίησης της βεβλαμμένης μονάδας των οποίων απαιτείται χειρισμός απενεργοποίησης. Ενδεχομένως να απαιτηθεί επίσης και αποσύνδεση της βεβλαμμένης μονάδας Power Module από την τροφοδότηση και την τάση εξόδου του

## μετατροπέα DC/DC.

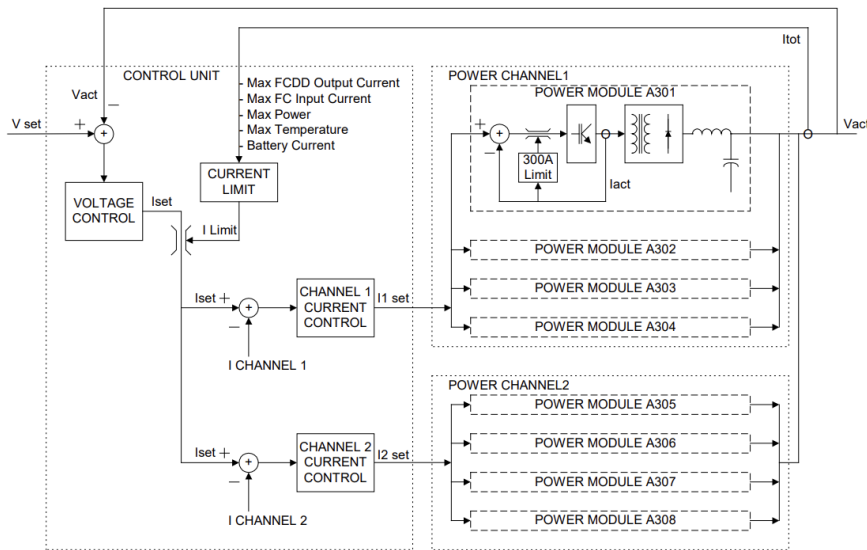


Σχ. 13 Οι βραχυκυκλωτήρες στην κάρτα A202/203 για την απενεργοποίηση των μονάδων Power Module

Η μονάδα FCDD (DC/DC Converter) συμπεριφέρεται ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας ως:

- Πηγή ρεύματος, όταν η τάση εξόδου είναι κάτω από 570VDC
- Πηγή τάσεως όταν η τάση εξόδου φτάσει την τιμή των 750VDC ή την τιμή που έχει επιλεγεί
- Γεννήτρια σταθερής ισχύος 2x120kW, όταν η τάση εξόδου είναι μεταξύ των 570-750VDC ή της τάσης που έχει επιλεγεί

Η επιλογή του τρόπου λειτουργίας γίνεται αυτόματα από το λογισμικό της μονάδας Control Module. Σε κάθε περίπτωση, από πλευράς ελέγχου, το κάθε Power Module λειτουργεί ως αυτόνομη πηγή ρεύματος με ανώτατη τιμή 300A (συνολικά 2400A). Ο μετατροπέας από πλευράς ελέγχου λειτουργεί ως πηγή τάσης. Η κοινή τάση που αναπτύσσεται καθορίζεται από τη μονάδα Control Module, που ελέγχει τα οκτώ Power Module και των δύο ομάδων μαζί μέσω προκαθορισμένης τιμής ρεύματος Iset. Η τιμή του ρεύματος Iset περιορίζεται από τη μέγιστη παραγόμενη ισχύ, το μέγιστο ρεύμα εισόδου ή εξόδου και τη μέγιστη θερμοκρασία των Power Modules ανάλογα με τον επιλεγέντα τρόπο λειτουργίας από το ρεύμα των συστοιχιών.



Σχ. 14 Διάγραμμα αυτομάτου ελέγχου του μετατροπέα

Οι κυψέλες καυσίμου υπό κανονικές συνθήκες λειτουργούν συνδεδεμένες παράλληλα με τους συσσωρευτές του πλοίου. Τότε διαθέτουν δύο τρόπους λειτουργίας:

- Μηδενικό ρεύμα συστοιχιών
- Φόρτιση συστοιχιών

Η λειτουργία των κυψελών καυσίμου είναι δυνατή και χωρίς τη σύνδεση τους με τις συστοιχίες του πλοίου. Η κατάσταση αυτή θεωρείται λειτουργία ανάγκης διότι δεν διατίθεται δυνατότητα εξομαλύνσεως των μεταβολών ζήτησης ισχύος και η τάση του δικτύου μεταβάλλεται σημαντικά.

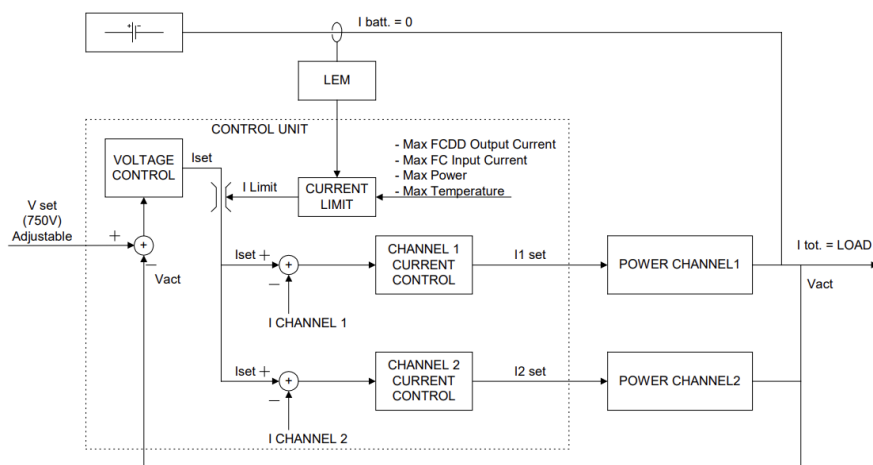
### 3. Η λειτουργία του μετατροπέα

#### 3.1 Λειτουργία με μηδενικό φορτίο (Normal Mode)

Κατά τη λειτουργία με μηδενικό ρεύμα συστοιχιών, ο μετατροπέας DC/DC λειτουργεί ως ελεγχόμενη πηγή ρεύματος. Η αναπτυσσόμενη τάση είναι ίδια με αυτή που έχουν οι συστοιχίες. Η επιθυμητή τάση έχει περιοριστικό χαρακτήρα και μπορεί να είναι 750V DC ή κάποια μικρότερη τιμή που οι συστοιχίες δεν πρέπει να υπερβούν. Ο έλεγχος του μετατροπέα γίνεται από την τιμή του

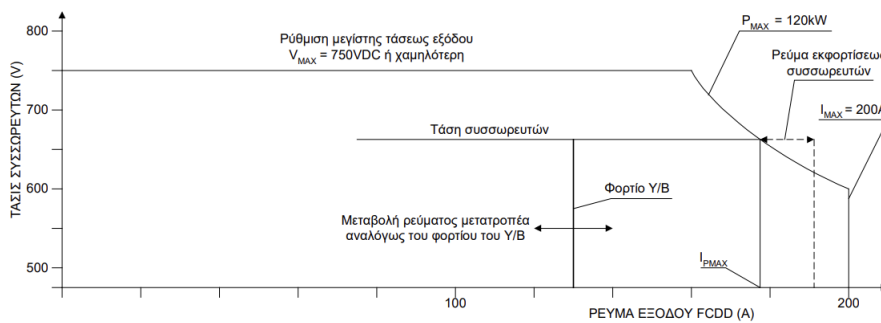
ρεύματος των συστοιχιών που ανιχνεύεται από αισθητήρα τύπου Hall στο κάθε τμήμα των συστοιχιών. Το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα εισόδου και εξόδου, η θερμοκρασία και η μέγιστη ισχύς, έχουν περιοριστικό χαρακτήρα στην περίπτωση που γίνεται υπέρβαση των τιμών τους.

Το παραγόμενο ρεύμα από το μετατροπέα ρυθμίζεται έτσι ώστε το ολικό ρεύμα προς τις δύο συστοιχίες να είναι μηδενικό. Αυτό έχει ως συνέπεια, όλο το ρεύμα που παράγεται από τις κυψέλες καυσίμου (Fuel Cells) να παρέχεται στο φορτίο των καταναλώσεων του πλοίου. Με αυτό τον τρόπο, οι κυψέλες καυσίμου λειτουργούν με μεταβλητή ισχύ, όπως αυτή υπαγορεύεται από το φορτίο του πλοίου.



Σχ.15 Λειτουργία με μηδενικό ρεύμα συστοιχιών (Normal Mode)

Όπως φαίνεται και από το σχ.15 εάν το συνολικό φορτίο του πλοίου αυξηθεί, αυξάνεται και το ρεύμα που παρέχει ο μετατροπέας. Η τάση των συστοιχιών παραμένει πρακτικά σταθερή. Εάν το φορτίο του πλοίου αυξηθεί, το ρεύμα που παρέχει ο μετατροπέας DC/DC αυξάνεται μέχρι η παραγόμενη ισχύς να αποκτήσει τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή. Η τιμή του ρεύματος  $I_{PMAX}$ , σε αυτή την περίπτωση καθορίζεται από την τομή της τάσεως των συστοιχιών και της χαρακτηριστικής της μέγιστης ισχύος. Η περαιτέρω αύξηση του ρεύματος φορτίου προκαλεί εκφόρτιση των συστοιχιών με το υπολειπόμενο ρεύμα από την τιμή  $I_{PMAX}$ . Στην περίπτωση που οι συσσωρευτές έχουν τάση χαμηλότερη από 570VDC, τότε το ρεύμα μπορεί να φτάσει την τιμή των 200A ( $I_{MAX}$ ).



Σχ.16 Λειτουργία ενός στοιχείου της κυψέλης καυσίμου με μηδενικό ρεύμα συσσωρευτών.

Όταν οι κυψέλες καυσίμου λειτουργούν με μεταβαλλόμενα φορτία άνω των 50A/sec υπάρχει δυσχέρεια στην αύξηση του ρυθμού απομάκρυνσης του παραγόμενου αντιδρώντος ύδωρ. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος πτώσης τάσης κάτω των 200V στους ακροδέκτες της κυψέλης καυσίμου, που αποτελεί κριτήριο διακοπής λειτουργίας. Κατά τη λειτουργία αυτή ο μετατροπέας επιβάλλει ένα μέγιστο ρυθμό μεταβολής (έως 20A/sec) ανά κανάλι, ώστε να γίνεται ομαλά η προσαρμογή στη νέα απαίτηση ισχύος. Κατά το διάστημα προσαρμογής, οι συστοιχίες συμπληρώνουν το έλλειμμα ρεύματος. Η ενέργεια που παραλαμβάνεται από τις συστοιχίες, επιστρέφεται αργότερα από τις κυψέλες καυσίμου κατά την αντίστροφη διαδικασία, όταν το φορτίο αφαιρείται.

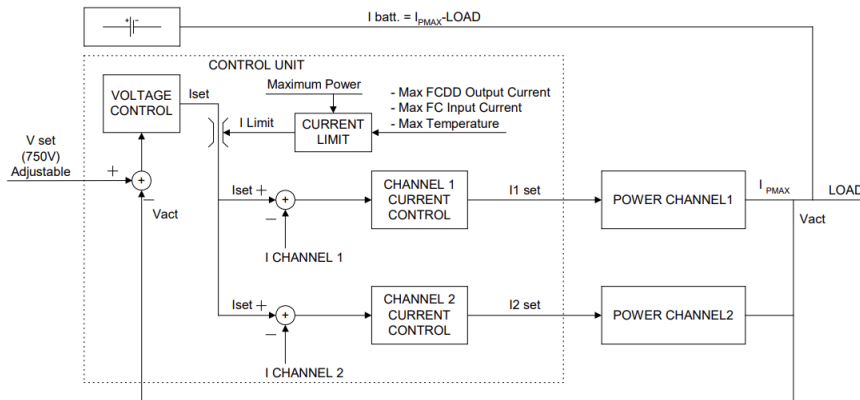
### 3.2 Λειτουργία φορτίσεως (Charging Mode)

Κατά τη λειτουργία φορτίσεως οι κυψέλες καυσίμου και ο μετατροπέας λειτουργούν στην πλήρη τους ισχύ. Η παραγόμενη ενέργεια παρέχεται στο πλοίο για χρήση και το περίσσευμα ενέργειας φορτίζει τις συστοιχίες.

Κατά τη λειτουργία αυτή, ο μετατροπέας DC/DC λειτουργεί ως πηγή σταθερού ρεύματος ή σταθερής ισχύος αντίστοιχα με την τάση των συστοιχιών. Η αναπτυσσόμενη τάση είναι ίδια με αυτή που έχουν οι συστοιχίες. Η επιθυμητή τάση έχει περιοριστικό χαρακτήρα και μπορεί να είναι από 750V έως μια μικρότερη τιμή που η συστοιχία δεν πρέπει να υπερβεί. Ο έλεγχος του



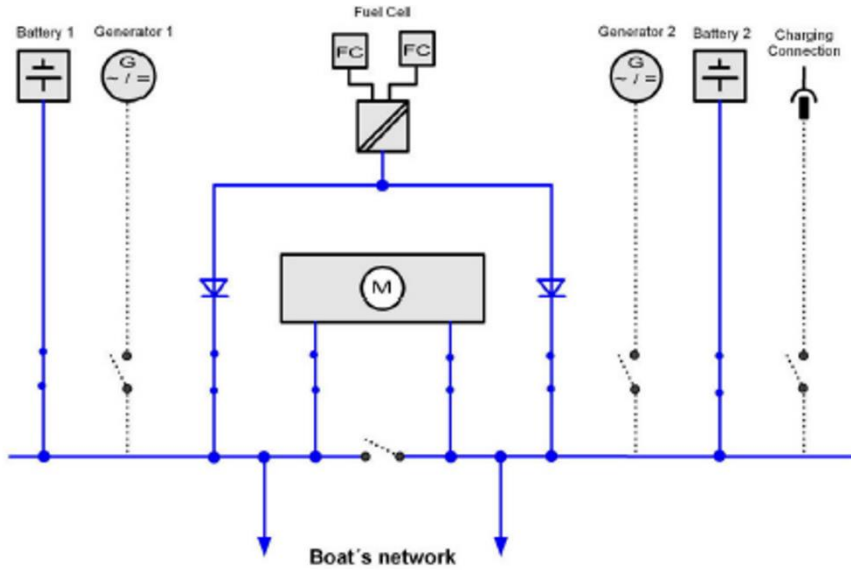
μετατροπέα γίνεται από τη χαρακτηριστική μέγιστης ισχύος. Όπως και στην κανονική λειτουργία, έτσι και στη λειτουργία φορτίσεως, το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα εισόδου και εξόδου και η θερμοκρασία έχουν περιοριστικό χαρακτήρα σε περίπτωση υπέρβασης των τιμών τους.



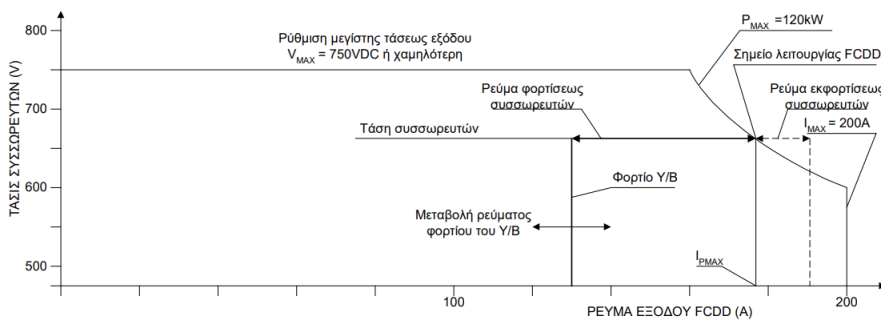
Σχ.17 Η λειτουργία φορτίσεως

Για τάση συστοιχιών μεγαλύτερη από 570VDC το παραγόμενο ρεύμα από το μετατροπέα ρυθμίζεται ώστε να μη γίνει υπέρβαση της μέγιστης τιμής ισχύος των 240kW (2x120kW). Η τιμή του παραγόμενου ρεύματος  $I_{PMAX}$  στην περίπτωση αυτή καθορίζεται από την τιμή της τάσεως των συστοιχιών και της χαρακτηριστικής των 120kW. Το ρεύμα προς τις δύο συστοιχίες προκύπτει εάν από το ολικό παραγόμενο ρεύμα αφαιρεθεί το φορτίο του δικτύου του πλοίου. Εάν η τάση των συστοιχιών είναι κάτω από 570 VDC τότε η μέγιστη τιμή του ρεύματος περιορίζεται στα 200A ανά κανάλι, χωρίς να επιτυγχάνεται η μέγιστη ισχύς. Εάν το φορτίο του πλοίου αυξηθεί, μειώνεται το ρεύμα φορτίσεως των συστοιχιών. Αύξηση του ρεύματος φορτίου πέραν του  $I_{PMAX}$  προκαλεί εκφόρτιση των συστοιχιών με το υπολειπόμενο ρεύμα που προκύπτει από τη διαφορά με το  $I_{PMAX}$ .

Η λειτουργία των κυψελών καυσίμου με παράλληλη φόρτιση των συστοιχιών προκαλεί μικρότερες διακυμάνσεις ρεύματος από αυτές κατά τη λειτουργία μηδενικού ρεύματος. Αυτό σημαίνει ότι ο μετατροπέας επιβάλλει το ρυθμό μεταβολής του ρεύματος εισόδου 20A/sec σε κάθε κανάλι, ώστε να εξομαλύνει τυχόν μεταβολή ισχύος προκαλούμενη από μεταβολή της τάσης των συστοιχιών.



Σχ.18 Λειτουργία φορτίσεως με κυψέλες καυσίμου



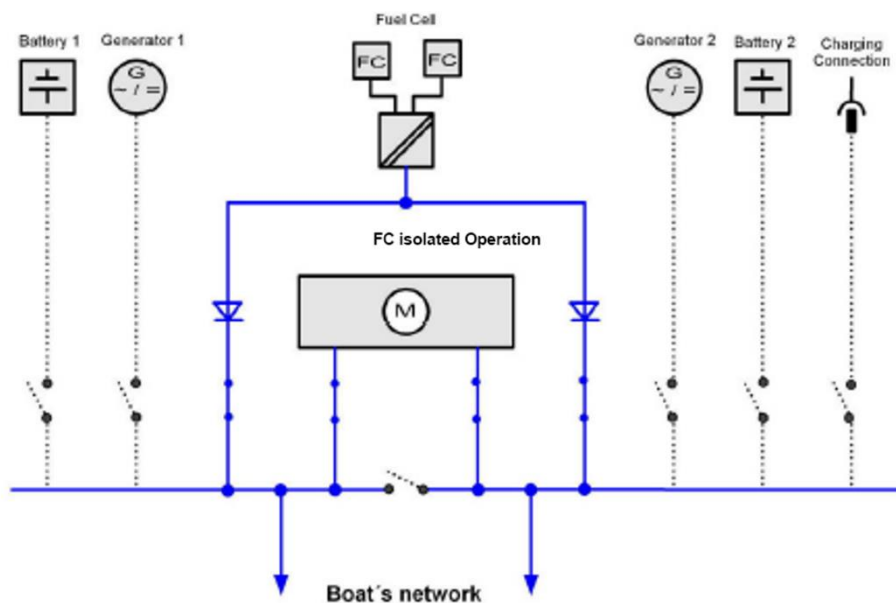
Σχ.19 Η λειτουργία ενός στοιχείου της κυψέλης καυσίμου σε φόρτιση συσσωρευτών (Charge Mode)

### 3.3 Μεμονωμένη λειτουργία (Island Mode)

Η λειτουργία των κυψελών καυσίμου είναι δυνατή και χωρίς τη σύνδεση τους με τις συστοιχίες του πλοίου. Ο τρόπος αυτός λειτουργίας θεωρείται λειτουργία ανάγκης. Κατά τη μεμονωμένη λειτουργία όπως ονομάζεται, ο μετατροπέας DC/DC λειτουργεί ως πηγή σταθερής τάσεως η τιμή της οποίας μπορεί να ρυθμιστεί από το Local Operating Panel.

Κατά τη μεμονωμένη λειτουργία δεν υπάρχει δυνατότητα παραλαβής ενέργειας κατά τα μεταβατικά στάδια επιβολής και αποσύνδεσης των φορτίων, από άλλη πηγή εκτός από τις κυψέλες

καυσίμου. Αυτό σημαίνει ότι το δίκτυο του πλοίου 450-830VDC, έχει σημαντικές μεταβολές τάσης. Για το λόγο αυτό δεν εφαρμόζεται η εξομάλυνση των 20A/sec από το μετατροπέα. Έτσι οι μεταβολές των φορτίων επιβάλλονται απευθείας στις κυψέλες καυσίμου. Η κάθε κυψέλη καυσίμου έχει τη δυνατότητα να ανταποκριθεί άμεσα σε επιβολή φορτίου 50A και σε αύξηση μέχρι 50A/sec μέχρι το μέγιστο ρεύμα των 560A. Η μείωση του φορτίου μπορεί να γίνει χωρίς κανέναν περιορισμό. Κατά τη μεμονωμένη λειτουργία πρέπει να λαμβάνεται φροντίδα οι μεταβολές του φορτίου να γίνονται με ρυθμό που δεν υπερβαίνει τις οριακές τιμές ρευμάτων των κυψελών καυσίμου και του μέγιστου επιτρεπόμενου ρυθμού μεταβολής τους.



Σχ. 20 Λειτουργία FC Isolated Operation

#### 4. Ο κινητήρας PERMASYN

Σε εγκαταστάσεις ηλεκτροπρόωσης απαιτείται μεγάλη περιοχή λειτουργίας κατά την ορθή και την ανάστροφη φορά του κινητήρα. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρικός κινητήρας συνεχούς ρεύματος (ΣΡ) ξένης διεγέρσεως, διότι ήταν ο μόνος που μπορούσε να καλύψει αυτή την απαίτηση σχετικά εύκολα. Με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος, επετεύχθη η κάλυψη των αναγκών ηλεκτρικής πρόωσης με κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (ΕΡ)

οι οποίοι προσφέρουν μικρότερο όγκο και βάρος εγκατάστασης και λιγότερες απαιτήσεις συντήρησης. Υπάρχει όμως η απαίτηση για ταυτόχρονη μεταβολή της συχνότητας και της τάσης τροφοδότησης του κινητήρα. Πρόσφατα, η ανάπτυξη της τεχνολογίας στην κατασκευή μόνιμων μαγνητών που δεν απομαγνητίζονται εύκολα, ενώ συγχρόνως αναπτύσσουν ισχυρό μαγνητικό πεδίο, επέτρεψε τη χρήση Σύγχρονων Κινητήρων ΕΡ με διέγερση μόνιμων μαγνητών. Οι κινητήρες αυτοί έχουν μεγαλύτερο συντελεστή απόδοσης και παρουσιάζουν μικρότερο όγκο και βάρος.

#### 4.1 Η σύγχρονη τριφασική μηχανή

Αποτελεί την απλούστερη μηχανή ΕΡ. Στη σύγχρονη μηχανή ο στάτης αποτελεί το επαγωγίμο. Στα τυλίγματα του στάτη αναπτύσσονται οι τάσεις. Ο δρομέας αναπτύσσει το μόνιμο μαγνητικό πεδίο και αποτελεί τη διέγερση της μηχανής. Αν θεωρήσουμε συμβατική φορά ρεύματος, οι τάσεις, τα ρεύματα και η ισχύς που εισέρχονται σε μία μονάδα είναι θετικά και αυτά που εξέρχονται αντίστοιχα αρνητικά. Σε μία γεννήτρια, συνεπώς, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς είναι αρνητική, ενώ σε έναν κινητήρα είναι θετική.

Η αρχή της σύγχρονης τριφασικής μηχανής ΕΡ (είτε ως γεννήτρια είτε ως κινητήρας) βασίζεται στην αλληλεπίδραση του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου που αναπτύσσεται στο διάκενο μεταξύ στάτη και δρομέα με το πεδίο του δρομέα. Σύγχρονη ονομάζεται διότι ο δρομέας στρέφει με την ίδια γωνιακή ταχύτητα με το μαγνητικό πεδίο του διακένου. Ανάλογα με τη φόρτιση της μηχανής, τα πεδία δρομέα και διακένου σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία  $\delta$ , που ονομάζεται γωνία ροπής.

Η ίδια μηχανή μπορεί να λειτουργεί ως γεννήτρια ή ως κινητήρας με ακριβώς την ίδια διάταξη, ανάλογα με τη γωνία ροπής  $\delta$ . Κατά τη λειτουργία της σύγχρονης μηχανής ως γεννήτρια, το πεδίο του δρομέα προηγείται του πεδίου του διακένου θεωρούμενη ως φορά περιστροφής την  $\omega$ , ενώ κατά τη λειτουργία ως κινητήρας, το πεδίο του διακένου προηγείται του πεδίου του δρομέα, όπως φαίνεται στο σχ. 19.



Σχ.21 Η διάταξη των πεδίων δρομέα και διακένου στη σύγχρονη μηχανή και η γωνία ροπής (α) σε γεννήτρια (β) σε κινητήρα

## 4.2 Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο

Το στρεφόμενο πεδίο θεωρείται ότι έχει σταθερό μέτρο και σταθερή γωνιακή ταχύτητα. Ένας μαγνήτης που περιστρέφεται με κέντρο επί της ουδέτερης γραμμής του ή από ένα τριφασικό τύλιγμα που τροφοδοτείται από τριφασικό δίκτυο με συμμετρικά ρεύματα μπορεί να παραγάγει στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Στα πολυφασικά συστήματα μπορεί να παραχθεί στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο από την τροφοδότηση n-φασικού τυλίγματος από n-φασικό δίκτυο. Τα τυλίγματα σχηματίζουν στο χώρο γωνία  $\varphi = 360/n$  ηλεκτρικές μοίρες μεταξύ τους και τα ρεύματα που τροφοδοτούν τα τυλίγματα πρέπει να έχουν διαφορά φάσης μεταξύ τους  $\theta = 360/n$  μοίρες, δηλαδή όση είναι και η ηλεκτρική γωνία που παρουσιάζουν οι διαδοχικές φάσεις του μαγνήτη.

Η γωνιακή ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου  $\omega_m$  του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου είναι ανάλογη της συχνότητας  $f$  της τάσεως ή των ρευμάτων και αντιστρόφως ανάλογο των ζευγών των πόλων  $p$  της μηχανής.

$$\omega_m = 2\pi f/p \text{ (rad/sec)} \quad \text{ή} \quad n = 60f/p \text{ (RPM)} \quad (6)$$

Έτσι οι κινητήρες υψηλής ταχύτητας κατασκευάζονται με ένα ζεύγος πόλων και τροφοδοτούνται με υψηλή συχνότητα. Αντίθετα κινητήρες χαμηλής ταχύτητας κατασκευάζονται με μεγάλο αριθμό πόλων.

## 4.3 Ο σύγχρονος κινητήρας

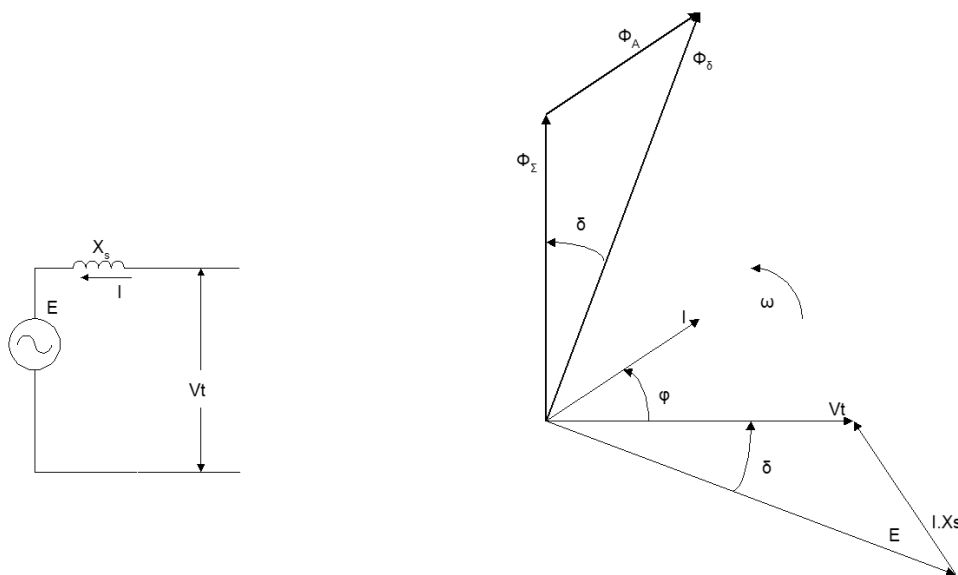
Όταν η σύγχρονη μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας, η τροφοδότηση της γίνεται από το δίκτυο και η τιμή της ισχύος που

λαμβάνει θεωρείται θετική. Στο διάκενο αναπτύσσεται στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο  $\Phi_s$  που παρασύρει σε περιστροφή το δρομέα. Επομένως, το πεδίο  $\Phi_s$  του διακένου της γεννήτριας προηγείται από το πεδίο  $\Phi_d$  του παρασυρόμενου δρομέα και η γωνία  $\delta$ , αποκτά θετική τιμή. Η ισχύς του κινητήρα μπορεί να εκφρασθεί από τα διανύσματα των τάσεων  $E$  και  $V_t$  καθώς και τη γωνία ροπής  $\delta$ , όπου  $E$  είναι η ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) που προέρχεται από τη διέγερση και  $V_t$  είναι η τάση στους ακροδέκτες του κινητήρα.

Η αναπτυσσόμενη ροπή  $T$  του κινητήρα προκύπτει ως εξής:

$$T = P/\omega_m = nE.V_t.\sin(\delta)/\omega_m X_s$$

Όπου  $P$  η ισχύς,  $\omega_m$  η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα,  $n$  ο αριθμός των φάσεων του κινητήρα και  $X_s$  η επαγωγική αντίσταση  $X_s$  των τυλιγμάτων του στάτη.



Σχ. 22 Ο σύγχρονος κινητήρας (α) ισοδύναμο κύκλωμα ανά φάση (β) διανυσματικό διάγραμμα

Όπως φαίνεται στο σχ. 20 το διάνυσμα  $I.X_s$  εκφράζει την τάση που αναπτύσσεται από ρεύμα που διαρρέει αυτεπαγωγή, επομένως είναι κάθετο στα διανύσματα του ρεύματος  $I$  και της ροής αντιδράσεως  $\Phi_a$  η οποία είναι συγγραμική με το ρεύμα του φορτίου  $I$  και αναπτύσσεται στα τυλίγματα του δρομέα ως στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο ίδιας γωνιακής ταχύτητας  $\omega_m$  με αυτό του δρομέα. Επιπρόσθετα, λόγω όμοιων τριγώνων η γωνία ροπής  $\delta$ , μεταξύ του πεδίου διεγέρσεως  $\Phi_d$  του δρομέα και του

πεδίου του διακένου ΦΣ, εμφανίζεται μεταξύ της ΗΕΔ (E) και της τάσεως της γεννήτριας  $V_t$ , λόγω όμοιων τριγώνων.

### 4.3 Ο σύγχρονος κινητήρας μόνιμων μαγνητών

Είναι δυνατό να παράγεται διέγερση σε ένα κινητήρα από μόνιμους μαγνήτες. Τα πλεονεκτήματα σε αυτή την περίπτωση σε σχέση με τη χρήση ηλεκτρομαγνήτη είναι:

- Μείωση του βάρους του δρομέα, διότι οι μόνιμοι μαγνήτες έχουν πολύ μικρό βάρος
- Εξοικονόμηση της ενέργειας που απαιτείται για την ανάπτυξη του μαγνητικού πεδίου
- Μείωση των απαιτήσεων συντήρησης του κινητήρα, καθώς δεν υπάρχουν ηλεκτρικές διασυνδέσεις με το δρομέα όπως ψήκτρες και τυλίγματα

Ο κινητήρας μόνιμων μαγνητών εμφανίζει και τα κάτωθι μειονεκτήματα:

- Αδυναμία μεταβολής της διεγέρσεως για περιπτώσεις ελέγχου
- Μικρότερη αναπτυσσόμενη ροπή, διότι η μαγνητική επαγωγή των μόνιμων μαγνητών (έως 1.2 Tesla) υπολείπεται αυτής των ηλεκτρομαγνητών (έως 1.8 Tesla)

Οι σύγχρονοι κινητήρες με διέγερση μόνιμων μαγνητών χρησιμοποιούνται σε συστήματα κίνησης κατά κύριο λόγο. Επειδή η διέγερση είναι σταθερή, ο έλεγχος του ρεύματος γίνεται από την τάση τροφοδοτήσεως. Η τροφοδότηση τους γίνεται από αντιστροφείς (inverters) που έχουν τη δυνατότητα να μεταβάλλουν την τάση και τη συχνότητα τους κατάλληλα.

Ο κινητήρας ελέγχεται από μονάδα ελέγχου μαζί με τους αισθητήρες θέσεως του δρομέα. Η συχνότητα με την οποία τροφοδοτείται αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα. Επίσης λόγω της ανάπτυξης ΑΗΕΔ στον περιστρεφόμενο κινητήρα, η τάση τροφοδότησης αυξάνεται και αυτή σχεδόν ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα.

Αναλόγως τη θέση του αισθητήρα, η μία από τις φάσεις διαρρέεται από ρεύμα ορθής φοράς και οι άλλες δύο από ρεύμα αντίθετης φοράς. Οι θέσεις των αισθητήρων και η τροφοδότηση των φάσεων εξασφαλίζουν ότι το μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσει ο στάτης σχηματίζει γωνία με το μαγνητικό πεδίο του δρομέα. Έτσι η ηλεκτρομαγνητική ροπή που αναπτύσσεται μεταξύ στάτη και δρομέα εξαναγκάζει το δρομέα σε περιστροφή. Μόλις περιστραφεί ο δρομέας, αλλάζει η ενεργοποίηση των αισθητήρων, άρα και η τροφοδότηση των φάσεων. Έτσι ο στάτης αναπτύσσει στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που εξαναγκάζει το δρομέα να τον ακολουθεί συνεχώς και η μεταξύ τους γωνία είναι η γωνία ροπής  $\delta$  όπως προαναφέρθηκε.

Καθώς επιταχύνει την κίνηση του ο δρομέας, ο χρόνος μεταξύ των αλλαγών τροφοδότησης των φάσεων μικραίνει. Επομένως, η πηγή που τροφοδοτεί τον κινητήρα, που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ένας αντιστροφέας (inverter) πρέπει να μεταβάλλει αντίστοιχα τη συχνότητα της. Με την αύξηση της ταχύτητας αυξάνεται και η ΑΗΕΔ του κινητήρα. Άμεση συνέπεια αυτού, είναι η αύξηση της τάσης τροφοδότησης του κινητήρα (παράλληλα με την αύξηση της συχνότητας) ώστε να εναρμονίζεται με την αύξηση της ΑΗΕΔ. Μόλις ο κινητήρας επιτύχει την επιθυμητή ταχύτητα διακόπτεται και η αύξηση της συχνότητας.

#### 4.4 Οι Αντιστροφείς (Inverters)

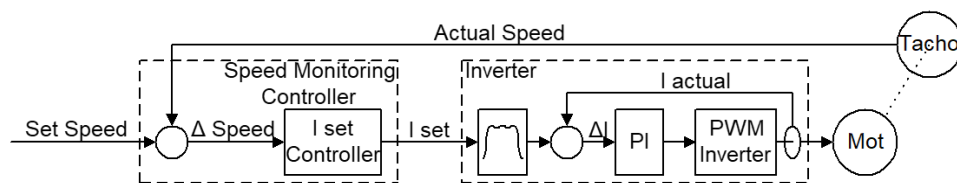
Με τον όρο αυτό εννοούμε ηλεκτρικό μηχανισμό που μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο διαφορετικής τάσεως. Με την αύξηση της τεχνολογίας των ημιαγωγών κατασκευάζονται αντιστροφείς οι οποίοι λειτουργούν σε δύο στάδια. Αρχικά μετατρέπουν το συνεχές σε εναλλασσόμενο της επιθυμητής συχνότητας και στη συνέχεια με χρήση μετασχηματιστή προσαρμόζουν στην επιθυμητή τάση. Ονομάζονται και στατοί αντιστροφείς διότι δεν διαθέτουν κινούμενα μέρη.

#### 4.5 Γενικά για τον κινητήρα PERMASYN



Πρόκειται για σύστημα κίνησης συνεχούς ρεύματος, αποτελούμενο από το σύγχρονο κινητήρα μόνιμων μαγνητών, τους μετατροπείς που τροφοδοτούν τον κινητήρα και το σύστημα ελέγχου του κινητήρα μαζί με τους αισθητήρες θέσεως του δρομέα. Η ονομασία προέρχεται από τα αρχικά που χαρακτηρίζουν τον τύπο του κινητήρα δηλαδή PERmanent MAgnet SYNchronous motor, και αναπτύσσεται ως επί το πλείστον από την εταιρία Siemens για κινητήρες υποβρυχίων.

Όπως φαίνεται από το σύστημα αυτομάτου ελέγχου αυτού, έχουμε έναν βρόχο που καθορίζει το ρεύμα που επιβάλλεται στον κινητήρα μέσω των αντιστροφών και ένα βρόχο που συγκρίνει την επιθυμητή ταχύτητα με την πραγματική του κινητήρα και καθορίζει το ρεύμα που θα επιβληθεί στον έτερο βρόχο.



Σχ. 23 Το σύστημα αυτομάτου ελέγχου του κινητήρα προώσεως

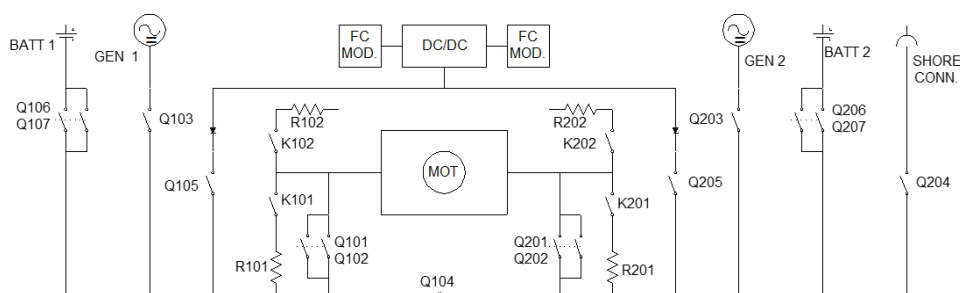
|                           |   |
|---------------------------|---|
| Αριθμός φάσεων            | 24  |
| Αριθμός πόλων             | 32  |
| Τάση λειτουργίας          | 520 έως 830 V DC<br>(450 έως 520 V DC P = 90%-100% P <sub>max</sub> ) |
| Ονομαστικό Ρεύμα ανά φάση | 600 A AC, 330A DC   |

Ο κινητήρα είναι υδρόψυκτος με γλυκό ύδωρ, το οποίο στη συνέχεια ψύχεται από δίκτυο θαλασσίου ύδατος. Η κανονική λειτουργία είναι είτε τηλεχειριζόμενη μέσω της μονάδας SMC (Speed Monitoring System) από το σύστημα αυτοματισμού του πλοίου είτε τοπική (manual) από τον πίνακα ελέγχου. Υπάρχει

επιπλέον δυνατότητα ηλεκτρικής στρέψης του κινητήρα με πολύ χαμηλή ταχύτητα περιστροφής για λόγους συντήρησης.

Ο κινητήρας αποτελείται από 24 φάσεις στο στάτη οι οποίες χωρίζονται σε δύο ανεξάρτητες ομάδες των 12 φάσεων. Αντίστοιχα οι μετατροπείς που τροφοδοτούν τις φάσεις χωρίζονται στις αντίστοιχες ομάδες, τροφοδοτούμενοι από το δίκτυο συνεχούς ρεύματος του πλοίου. Για λόγους εναλλαξιμότητας, η επικοινωνία της μονάδας SMC που ελέγχει τον κινητήρα είναι επίσης διπλή και αποτελείται από δύο προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές, ο ένας εκ των οποίων ελέγχει και τα δύο τμήματα του κινητήρα και ο άλλος είναι σε αναμονή.

Ο κινητήρας, όπως φαίνεται και στο σχ. 22 τροφοδοτείται ηλεκτρικά από δύο διπλούς διακόπτες (Q101/Q102 και Q201/Q202) από τα δύο τμήματα του δικτύου συνεχούς ρεύματος, ενώ δύο ξεχωριστοί διακόπτες (K101 και K201) φορτίζουν τις διάφορες χωρητικότητες των αντιστροφών του κινητήρα μέσω αντιστάσεων κατά την πρώτη εκκίνηση. Μετά το τέλος της λειτουργίας του, οι ηλεκτρονόμοι (K102 και K202) εκφορτίζουν τους πυκνωτές. Σε περίπτωση που το ένα τμήμα του κινητήρα λόγω βλάβης πρέπει να αποσυνδεθεί από το αντίστοιχο δίκτυο, ο διακόπτης (Q104) συνδέει τα δύο τμήματα του δικτύου συνεχούς εξασφαλίζοντας την τροφοδότηση του απομένοντος τμήματος του κινητήρα και από τους δύο συσσωρευτές για την ομοιόμορφη εκφόρτιση αυτών.



Σχ. 24 Η σύνδεση του κινητήρα με το δίκτυο συνεχούς ρεύματος (ΣΡ)

Στον άξονα περιστροφής του κινητήρα είναι τοποθετημένοι οι αισθητήρες θέσεως του δρομέα, καθώς και η ταχογεννήτρια.

Διατίθενται δύο αισθητήρες θέσεως, ο αδρός (Coarse) και ο μικρομετρικός (Fine).

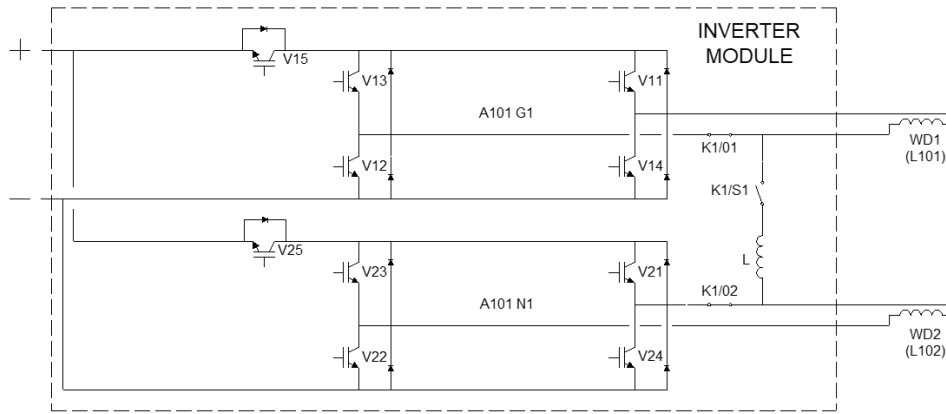
Ο αδρός, χρησιμοποιείται για την πρώτη περιστροφή κατά την εκκίνηση του κινητήρα σε όλους τους τρόπους λειτουργίας, αυτόματη, χειροκίνητη και στρέψη, καθώς και σε κατάσταση ανάγκης, όταν ο μικρομετρικός αισθητήρας δεν λειτουργεί.

Ο μικρομετρικός χρησιμοποιείται μετά την πρώτη περιστροφή, σε όλους τους τρόπους λειτουργίας και διαθέτει τρεις ανιχνευτές. Εξ αυτών οι δύο ελέγχουν τη λειτουργία των δύο τμημάτων του κινητήρα, ενώ και οι τρεις παράγουν την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα κατά την αυτόματη λειτουργία και την στρέψη.

Η ταχογεννήτρια χρησιμεύει μόνο για την ένδειξη της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα. Η μετάδοσή της γίνεται απ' ευθείας στη μονάδα χειροκίνητου ελέγχου του κινητήρα (Manual Propulsion Control - PMC), σε όλους τους τρόπους λειτουργίας.

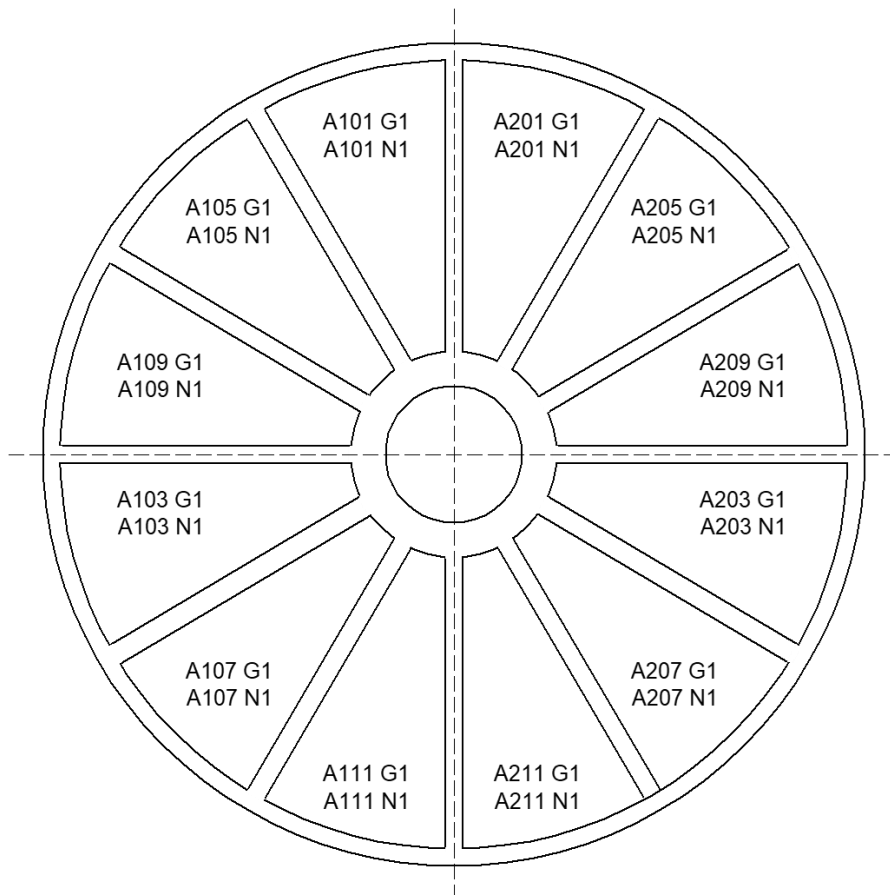
#### 4.5 Οι αντιστροφείς του κινητήρα

Ο κινητήρας αποτελείται από 24 αντιστροφείς οι οποίοι είναι ανά δύο διαδοχικά τοποθετημένοι σε κοινό κέλυφος σχηματίζοντας 12 ομάδες. Κάθε φάση επομένως του κινητήρα τροφοδοτείται από έναν αντιστροφέα. Η βαθμίδα ισχύος του αντιστροφέα φέρει πέντε ηλεκτρονικούς διακόπτες τύπου IGBT εκ των οποίων οι τέσσερις σχηματίζουν γέφυρα τύπου "H" και ο πέμπτος ελέγχει τη ροή του ρεύματος κατά αντίστροφη φορά. Όπως φαίνεται στο Σχ. 25 οι διακόπτες K1/S1, K1/01, K1/02 και το πηνίο L, επιτρέπουν τη σύνδεση ενός αντιστροφέα με την αντίστοιχη φάση, ή τη σύνδεση δύο διαδοχικών φάσεων εν σειρά με τμήματα των δύο αντιστροφέων, για εξοικονόμηση ενέργειας και μείωση του θορύβου στις χαμηλές ταχύτητες.



Σχ. 25 Διάγραμμα βαθμίδων ισχύος ομάδος δύο αντιστροφών.

Οι αντιστροφείς εντός του ίδιου κελύφους τροφοδοτούν διαδοχικές φάσεις του κινητήρα, δηλαδή οι φάσεις από 1 έως 12 τροφοδοτούνται από τους αντιστροφείς A101 έως A111 ενώ οι φάσεις 13 έως 24 τροφοδοτούνται από από τους A201 έως A211 αντίστοιχα.



Σχ. 26 Η χωροταξική διάταξη των αντιστροφών στον κινητήρα.

Για τη μείωση του ηλεκτρομαγνητικού θορύβου οι αντιστροφείς διαθέτουν πυκνωτές μεταξύ των πόλων και μεταξύ πόλων και γης. Κατά την πρώτη σύνδεση του κινητήρα με το δίκτυο συνεχούς ρεύματος πρέπει να φορτισθούν οι πυκνωτές των αντιστροφών. Για το λόγο αυτό υπάρχουν οι διακόπτες K101 και K201 για προφόρτιση των πυκνωτών μέσω των αντιστάσεων R101 και R201.

Τα IGBT (**Isolated Gate Bipolar Transistor**) της μονάδας ισχύος του κάθε Inverter αποτελούν συνδυασμό ενός transistor τύπου FET για πρώτη βαθμίδα που στη συνέχεια ελέγχει το transistor ισχύος.

#### 4.6 Χαρακτηριστικές φορτίσεως του κινητήρα

Το μηχανικό φορτίο που εφαρμόζεται στον κινητήρα εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής της έλικας, και την κατεύθυνση κίνησης. Για την ορθή φορά περιστροφής του κινητήρα (πρόσω), η σχέση είναι γραμμική για πρόωση σε βάθος άνω των 50m ενώ στην επιφάνεια επηρεάζεται από το δημιουργούμενο κύμα επιφανείας. Με ικανοποιητική προσέγγιση έχουμε τις κάτωθι σχέσεις για την ισχύ και τη ροπή του κινητήρα αντίστοιχα

$$P[\text{kW}] = 421.12(U)^3[\text{Kts}] \quad \text{ή} \quad P[\text{kW}] = 0.00116(n)^3[\text{RPM}] \quad (7)$$

$$T[\text{kNm}] = 0.562(U)^3[\text{Kts}] \quad \text{ή} \quad T[\text{kNm}] = 0.01102(n)^2[\text{RPM}] \quad (8)$$

### 5. Το δίκτυο συνεχούς ρεύματος

#### 5.1 Γενικά για το δίκτυο συνεχούς ρεύματος

Το δίκτυο συνεχούς ρεύματος (ΣΡ) του πλοίου διανέμει μέσω ενός κύριου πίνακα διακοπών (Main Switchboard) την απαραίτητη

ηλεκτρική ενέργεια που απαιτούνται στα επιμέρους φορτία (καταναλωτές) του πλοίου. Η ηλεκτρική ενέργεια αυτή βρίσκεται αποθηκευμένη στις δύο ημισυστοιχίες ή παράγεται από τις γεννήτριες και τις κυψέλες καυσίμου (Fuel Cells). Η τάση του δικτύου αυτού είναι μεταβλητή και κυμαίνεται από 450V DC έως 900V DC ανάλογα με την κατάσταση φορτίσεως των συστοιχιών.

Το δίκτυο ΣΡ αποτελείται από δύο τμήματα με δυνατότητα συνδεσιμότητας μεταξύ τους και ονομάζεται “δίκτυο δύο τμημάτων” (Two Parts System). Σε κάθε τμήμα δικτύου είναι συνδεδεμένη μία ημισυστοιχία συσσωρευτών, μία γεννήτρια και μία έξοδος παροχής με διακόπτη από τις κυψέλες καυσίμου. Από πλευράς καταναλώσεων σε κάθε τμήμα υπάρχει σύνδεση μίας πλευράς του κινητήρα προώσεως, ο αντιστροφέας μίας αεροθλιπτικής και ένας αντιστροφέας 400Hz. Τα υπόλοιπα μεγάλα φορτία δηλαδή οι τρεις μετατροπείς DC/DC των 220V, οι τρεις αντιστροφείς DC/AC 115V/60Hz συνδέονται μέσω διόδων ζεύξεως και στα δύο τμήματα του δικτύου. Έτσι το κάθε τμήμα του δικτύου, συμπεριφέρεται αυτόνομα πλην συγκεκριμένων περιπτώσεων καταστάσεων λειτουργίας.

Η λήψη φορτίσεως από την ξηρά συνδέεται μόνο στο τμήμα 2 του δικτύου. Το τμήμα 1 του δικτύου συνδέεται με τη λήψη φορτίσεως μέσω του διακόπτη Q104, όπου στην περίπτωση της φόρτισης συνδέει παράλληλα τα δύο τμήματα του δικτύου. Σε όλες τις συνδέσεις με φορτία και πηγές, υπάρχουν Shunts για τη μέτρηση των ρευμάτων.

## 5.2 Οι δυνατότητες του δικτύου συνεχούς ρεύματος

Τα δύο τμήματα του δικτύου συνδέονται μεταξύ τους με τον αρνητικό πόλο του καθενός μέσω δύο συνδετήρων Q110 και Q210. Για τη σύνδεση του θετικού πόλου των δικτύων υφίσταται ο διακόπτης Q104, ο οποίος υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας είναι ανοικτός. Κλείνει μόνο για τη φόρτιση δια ξηράς και σε καταστάσεις ανάγκης.

Οι ημισυστοιχίες συμπεριφέρονται ως πηγές σταθερής τάσεως και είναι ικανές να προσφέρουν ρεύμα κάθε τιμής στους καταναλωτές χωρίς σημαντικές μεταβολές της πολικής τάσεως τους. Εν

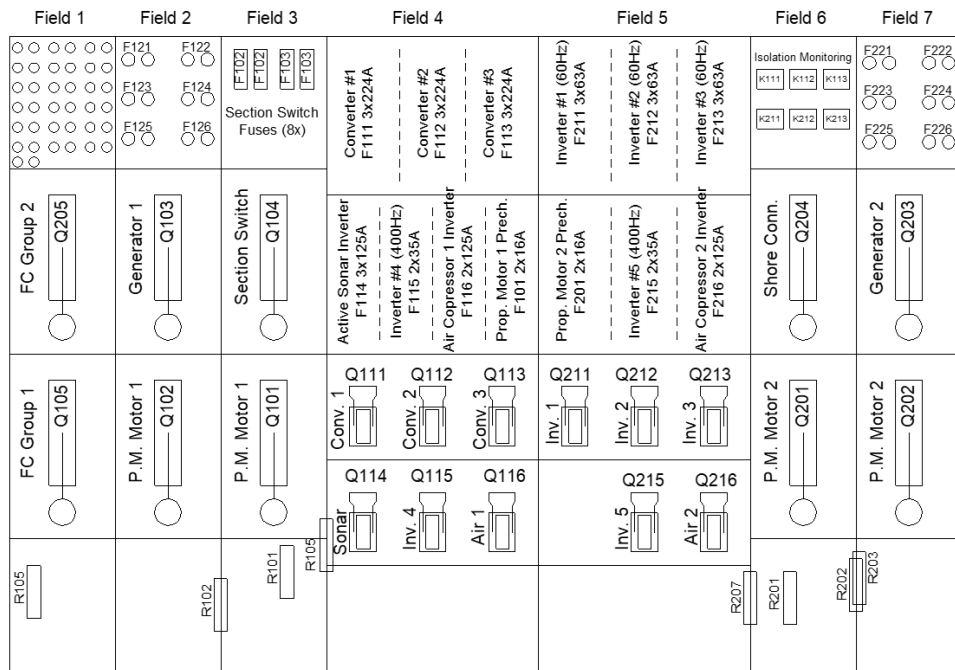
αντιθέσει, οι δύο ηλεκτρογεννήτριες και οι κυψέλες καυσίμου επειδή κατά κανόνα φορτίζουν τις ημισυστοιχίες, συμπεριφέρονται ως πηγές σταθερού ρεύματος και η τάση τους κυμαίνεται αντίστοιχα με την κατάσταση φόρτισης των ημισυστοιχιών. Στην περίπτωση που κάποιο τμήμα του δικτύου τροφοδοτείται αποκλειστικά από γεννήτρια ή κυψέλη καυσίμου χωρίς την ταυτόχρονη σύνδεση της αντίστοιχης ημισυστοιχίας, η τάση του εμφανίζει έντονες αυξομειώσεις κατά τη μεταβολή των φορτίων - καταναλώσεων. Για να αποφευχθούν ακραίες καταστάσεις στην τάση τροφοδοτήσεων στο δίκτυο υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, υφίσταται διάταξη αυτοματισμού που δεν επιτρέπει την αποσύνδεση της μίας ημισυστοιχίας από το αντίστοιχο τμήμα δικτύου αν δεν είναι κλειστός ο διακόπτης Q104.

Τα σημαντικά φορτία όπως αναφέρθηκε είναι τα κάτωθι:

- Ο κινητήρας προώσεως
- Οι τρεις DC-DC Converters των 220V DC
- Οι τρεις Inverters των 3x115V 60Hz

Αυτά συνδέονται και στα δύο τμήματα του δικτύου μέσω διόδων ζεύξεως. Για τους δύο Inverter των Αεροθλιπτικών αν και είναι μεγάλα φορτία δεν απαιτούνται δίοδοι διότι δεν λειτουργούν συνεχώς. Οι δύο Inverter DC/AC 115V 400Hz που χρησιμοποιούνται για την τροφοδότηση των όπλων, δεν θεωρούνται μεγάλα φορτία και ως εκ τούτου δεν απαιτούνται δίοδοι ζεύξεως. Οι τυχόν ανομοιόμορφες καταναλώσεις εξομαλύνονται από τον κινητήρα και τους ανωτέρω μετατροπείς των σημαντικών φορτίων.

Ο κύριος πίνακας αποτελείται από όλους τους διακόπτες των παροχών και των καταναλώσεων όπως φαίνεται στο σχήμα 27 εκτός από τους διακόπτες των ημισυστοιχιών οι οποίοι λόγω του περιορισμένου χώρου έχουν μετατεθεί σε χώρο πλησίον του κυρίου πίνακα που ονομάζεται Battery Switching Equipment.



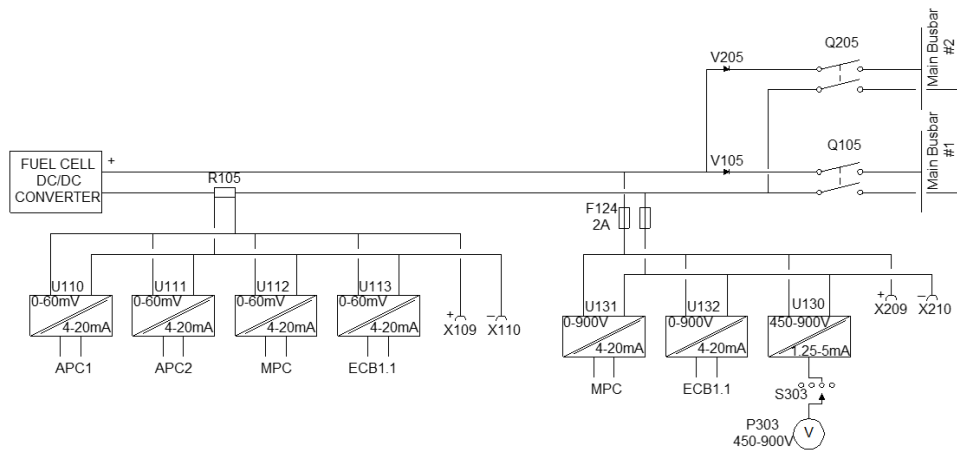
Σχ. 27 Η θέση των διακοπών στον κύριο πίνακα.

Άνωθεν των διακοπών των φορτίων και των πηγών του δικτύου υφίστανται επιπρόσθετα ακροδέκτες για τη μέτρηση των τάσεως και των ρευμάτων των παροχών του πίνακα (κινητήρας, γεννήτριες, Fuel Cell, δίκτυο ΣΡ, Hotel Load και Shore Supply), ασφάλειες των γραμμών των δύο τμημάτων του δικτύου και ακροδέκτες μέτρησης μόνωσης των δικτύων, των συστοιχιών, των γεννητριών και της λήψης φορτίσεως.

### 5.3 Σύνδεση των κυψελών καυσίμου με το δίκτυο συνεχούς ρεύματος

Οι κυψέλες καυσίμου τροφοδοτούν ταυτόχρονα και τα δύο τμήματα του δικτύου συνεχούς ρεύματος μέσω των διόδων αποζεύξεως V105 και V205. Το δίκτυο επιτηρήσεως των κυψελών καυσίμου αποτελείται από μετρητές τάσεως και ρεύματος.





Σχ. 28 Οι αισθητήρες επιτηρήσεως των κυψελών καυσίμου.

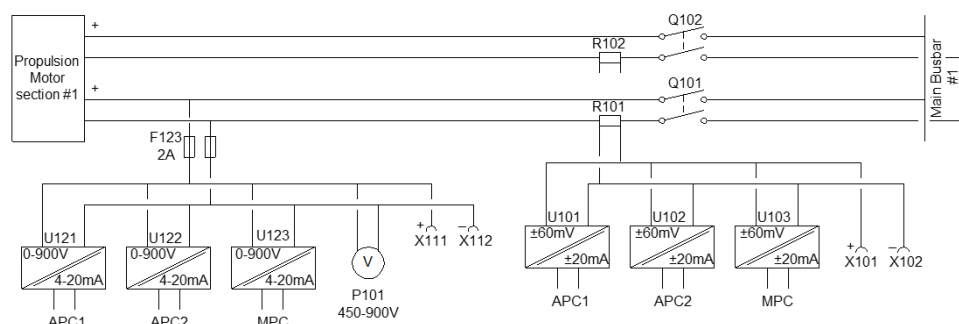
Η τάση από τον μετατροπέα κυψελών καυσίμου λαμβάνεται μέσω δύο ασφαλειών (F124) από τους ακροδέκτες του και οδηγείται στις διόδους αποζεύξεως και εν συνεχεία στους διακόπτες Q105 και Q205 που το συνδέουν με το δίκτυο ΣΡ (Main Busbar). Οι αισθητήρες U131 και U132 μετατρέπουν την τάση 0-900VDC σε γαλβανικά αποζευγμένο ρεύμα 4-20mA, για την ενημέρωση της μονάδος MPC (Manual Propulsion Control) και της μονάδος ECB1.1 (Σύστημα αυτοματισμού του πλοίου) αντίστοιχα. Η τιμή της τάσεως μετράται από το εγκατεστημένο αναλογικό βολτόμετρο P303 μέσω του γαλβανικά αποζευγμένου δικτύου προσαρμογής U130 και του επιλογικού διακόπτη S303 στον πίνακα TCC Distribution Board. Επιπλέον διατίθενται και οι ακροδέκτες X209 και X210 για τη μέτρηση της τάσεως με φορητό βολτόμετρο στο άνω τμήμα του δικτύου 1.

Το ρεύμα του μετατροπέα (500A) μετράται από το Shunt R105. Οι αισθητήρες U110 και U111 μετατρέπουν την τάση του Shunt R105 σε γαλβανικά αποζευγμένο ρεύμα 4-20mA, για την ενημέρωση των μονάδων APC1 και APC2 (Automatic Propulsion Control) της προώσεως αντίστοιχα. Η τιμή του ρεύματος μετράται και από τους αισθητήρες U112 και U113 για την ενημέρωση των μονάδων MPC και ECB1.1 αντίστοιχα. Επιπλέον διατίθενται και οι ακροδέκτες X109 και X110 στο άνω τμήμα του δικτύου 1, για τη μέτρηση της τάσεως του Shunt R105 με φορητό βολτόμετρο.

## 5.4 Σύνδεση του κινητήρα προώσεως με το δίκτυο συνεχούς ρεύματος

Ο κινητήρας προώσεως αποτελεί το σημαντικότερο φορτίο του δικτύου Συνεχούς ρεύματος. Υπό κανονικές συνθήκες τροφοδοτείται και από τα δύο τμήματα του δικτύου με διπλές γραμμές για επάρκεια απαιτούμενου ρεύματος.

Στη μία γραμμή (τμήμα 1 του δικτύου) διατίθενται μετρητές τάσεως και ρεύματος για το δίκτυο επιτηρήσεως τροφοδότησης ενώ η άλλη γραμμή θεωρείται ότι έχει την ίδια αντίσταση και διαρέεται από ρεύμα ίδιας τιμής.



Σχ. 29 Οι αισθητήρες επιτηρήσεως του κινητήρα προώσεως.

Η τάση του κινητήρα λαμβάνεται απευθείας από τους ακροδέκτες του πριν την παρεμβολή του διακόπτη Q101, μέσω των ασφαλειών (F123). Οι αισθητήρες U121, U122 και U123 μετατρέπουν την τάση 0-900VDC σε γαλβανικά αποζευγμένο ρεύμα 4-20mA, για την ενημέρωση των APC1, APC2 και MPC αντίστοιχα. Η τιμή της τάσεως μετράται από το εγκατεστημένο αναλογικό βολτόμετρο P101 στον πίνακα TCC, ενώ επιπλέον διατίθενται και οι ακροδέκτες X111 και X112 για τη μέτρηση της τάσεως με φορητό βολτόμετρο στο άνω τμήμα του δικτύου 1.

Το ρεύμα της ημισυστοιχίας ( $\pm 2000$  A) μετράται από το Shunt R101. Το ρεύμα μπορεί να έχει και αντίθετη πολικότητα, όταν ο κινητήρας επιβραδύνεται (αναγεννητική πέδηση) και λειτουργεί ως γεννήτρια. Οι αισθητήρες U101, U102 και U103 είναι διπλής πολικότητας και μετατρέπουν την τάση του Shunt R101 σε γαλβανικά αποζευγμένο ρεύμα  $\pm 20$ mA, για την ενημέρωση των μονάδων APC1, APC2 και MPC της προώσεως αντίστοιχα. Επιπλέον διατίθενται και οι ακροδέκτες X101 και X102 στο άνω

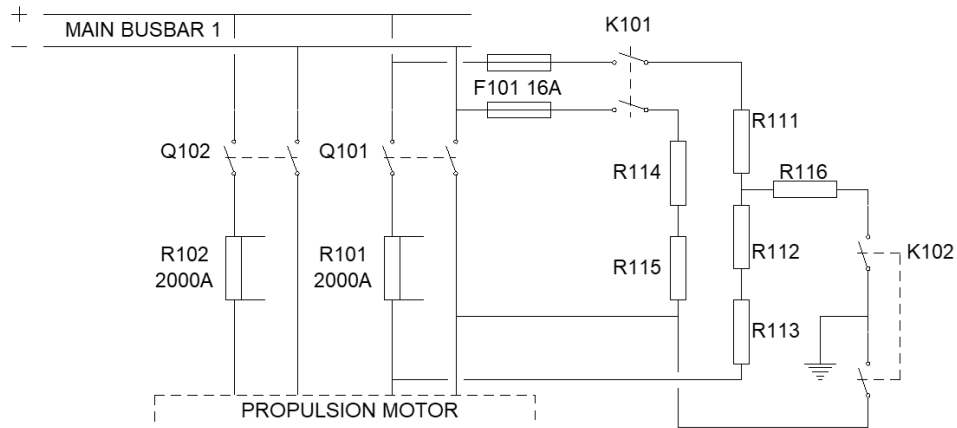
τμήμα του δικτύου 1, για τη μέτρηση της τάσεως του Shunt R101 με φορητό βολτόμετρο.

Το Shunt R102 στο τμήμα 1 του κινητήρα χρησιμεύει μόνο για αντιστάθμιση της ωμικής αντιστάσεως του δευτέρου κλάδου της γραμμής παροχής, ώστε τα ρεύματα των γραμμών να ισοκατανέμονται. Η ισοκατανομή των ρευμάτων εξασφαλίζεται από την ωμική αντίσταση των καλωδίων παροχής, που λόγω του μήκους τους είναι σημαντική. Αντίστοιχο δίκτυο επιτηρήσεως υφίσταται και στο τμήμα 2 του κινητήρα πρόωσης.

### 5.5 Κύκλωμα φορτίσεως - εκφορτίσεως αντιστροφών κινητήρα

Οι αντιστροφείς του κινητήρα πρόωσης χρησιμοποιούν πυκνωτές μεταξύ των πόλων και μεταξύ πόλων και γης, για την εξομάλυνση του ρεύματος κατά τη λειτουργία τους καθώς και για τη μείωση του ηλεκτρομαγνητικού θορύβου. Κατά την πρώτη σύνδεση του κινητήρα με το δίκτυο πρέπει να φορτισθούν οι πυκνωτές των αντιστροφών. Οι πυκνωτές αυτοί προκαλούν υπερβολικά μεγάλο ρεύμα εκκίνησης κατά την πρώτη σύνδεση του κινητήρα με το δίκτυο, κάτι που φθείρει τις επαφές των διακοπών του κινητήρα. Για τη μείωση του ρεύματος φορτίσεως των πυκνωτών, χρησιμοποιείται μία διάταξη προφορτίσεως αποτελούμενη από τις αντιστάσεις R111 έως R115 και τον ηλεκτρονόμο K101 όπως φαίνεται στο σχήμα 30 για το τμήμα 1 του κινητήρα. Αυτές οι αντιστάσεις και οι ηλεκτρονόμοι για τα δύο τμήματα βρίσκονται στο κάτω τμήμα των πεδίων 2 και 7 και στο άνω τμήμα των ίδιων πεδίων του Main Switchboard, αντιστοίχως (σχήμα 27).

Οι αντιστάσεις συνδέονται αρχικά στο δίκτυο για να φορτισθούν οι πυκνωτές των αντιστροφών ομαλά και στη συνέχεια παρακάμπτονται από τους διακόπτες Q101 και Q102. Αντίστροφα οι πυκνωτές πρέπει να εκφορτισθούν μετά το πέρας της λειτουργίας του κινητήρα. Η αντίσταση R116 και ο ηλεκτρονόμος K102 είναι υπεύθυνοι για την εκφόρτιση των πυκνωτών των κυκλωμάτων του κινητήρα.

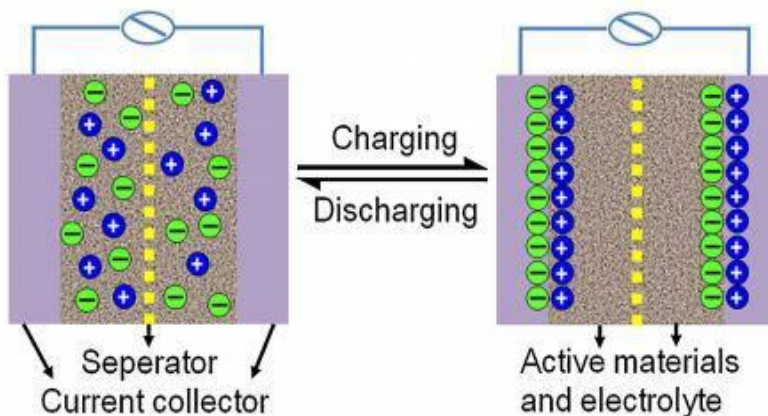


Σχ. 30 Το κύκλωμα φορτίσεως και εκφορτίσεως πυκνωτών του τμήματος #1 του κινητήρα προώσεως.

## 6. Υπερπυκνωτές

### 6.1 Περιγραφή

Οι υπερπυκνωτές (supercapacitors), οι οποίοι είναι επίσης γνωστοί ως ηλεκτρικοί πυκνωτές δύο στρωμάτων (EDLC – Electric Double-Layer Capacitors), μπορούν να αποθηκεύσουν ηλεκτρικό φορτίο αξιοποιώντας τη δυναμική ενέργεια μεταξύ ενός φορτισμένου ηλεκτροδίου άνθρακα και υγρού ηλεκτρολύτη με ιόντα. Οι υπερπυκνωτές απομονώνονται μεταξύ τους με έναν διαχωριστή και έτσι σχηματίζονται δύο πυκνωτές σε σειρά. Στο κάτωθι σχήμα φαίνεται η διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης ενός υπερπυκνωτή.



Σχ. 31 Φόρτιση και εκφόρτιση ενός υπερπυκνωτή

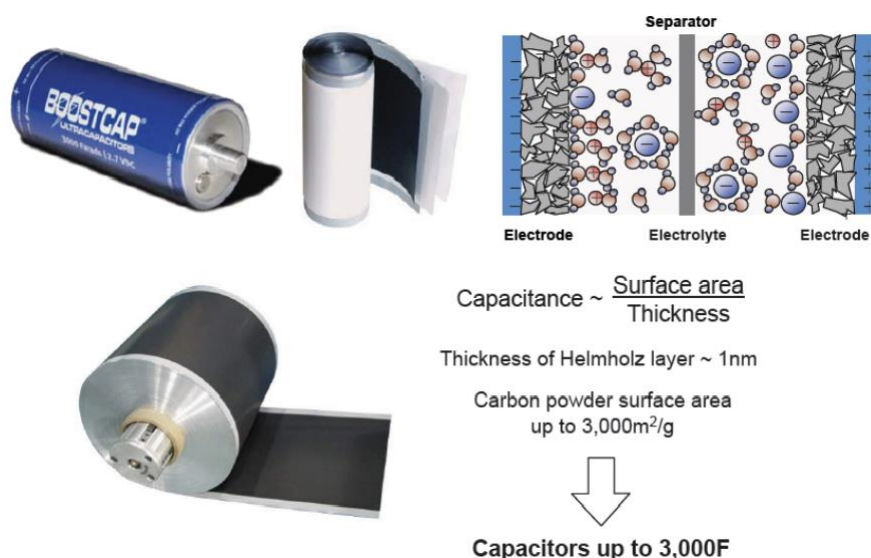
Η βασική διαφορά μεταξύ των υπερπυκνωτών και των κλασικών ηλεκτροστατικών πυκνωτών είναι η μεγάλη εκμεταλλεύσιμη επιφάνεια του υλικού του ηλεκτροδίου λόγω της πορώδους διαμόρφωσης του άνθρακα. Ακόμα, ενώ σε συμβατικούς πυκνωτές η απόσταση μεταξύ των πλακών μπορεί να κυμαίνεται σε πάχος μερικών μικρομέτρων ( $\mu\text{m}$ ) έως ένα χιλιοστό ( $\text{mm}$ ), στους υπερπυκνωτές το αντίθετο φορτίο που σχηματίζεται και στις δύο πλευρές ενός διαχωριστή μπορεί να κυμαίνεται από 0,03-0,08 νανόμετρα ( $\text{nm}$ ). Συνεπώς οι υπερπυκνωτές έχουν πολύ μεγαλύτερη χωρητικότητα ως αποτέλεσμα των ηλεκτροδίων με πολύ μεγαλύτερη επιφάνεια και σημαντικά μικρότερη απόσταση μεταξύ των φορτίων.

Δεδομένου ότι δεν επιτελείται κάποια χημική αντίδραση σε ένα σύστημα υπερπυκνωτών, η διαδικασία αποθήκευσης ενέργειας είναι μία εύκολα αναστρέψιμη διαδικασία και με μεγάλο κύκλο ζωής. Οι ιδιότητες των υπερπυκνωτών εξαρτώνται από τα εσωτερικά τους υλικά. Το υλικό που χρησιμοποιείται για το ηλεκτρόδιο και ο τύπος του ηλεκτρολύτη καθορίζουν τα θερμικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του υπερπυκνωτή.

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες υπερπυκνωτών, ανάλογα με τη σύνθεση του ηλεκτρολύτη:

- Η πρώτη κατηγορία είναι οι οργανικοί ηλεκτρολύτες. Οι πιο συνηθισμένοι οργανικοί διαλύτες που χρησιμοποιούνται σε κελιά υπερπυκνωτών (supercapacitor cells) είναι το ακετονιτρίλιο (ACN) και το ανθρακικό προπυλένιο (PC). Η ενέργεια που αποθηκεύεται σε έναν υπερπυκνωτή είναι ανάλογη με το τετράγωνο της τάσης, άρα έως την τιμή των 2,7 V, ένας οργανικός ηλεκτρολύτης προσφέρει ευρεία ηλεκτροχημική σταθερότητα. Ωστόσο, σε σύγκριση με υδατικούς ηλεκτρολύτες, οι οργανικοί είναι εύφλεκτοι, ακριβότεροι και σε κάποιες περιπτώσεις τοξικοί.
- Η δεύτερη κατηγορία είναι οι υδατικοί ηλεκτρολύτες. Οι υδατικοί ηλεκτρολύτες είναι συνήθως το υδροξείδιο του καλίου (KOH). Σε αντίθεση με τους οργανικούς ηλεκτρολύτες, επιτρέπουν σταθερότητα σε χαμηλότερες τάσεις έως και 0,9 V. Παρόλα αυτά είναι μη εύφλεκτοι, λιγότερο ακριβοί και

επιτρέπουν υψηλότερες τιμές χωρητικότητας υπερπυκνωτή λόγω μικρότερων ιόντων.

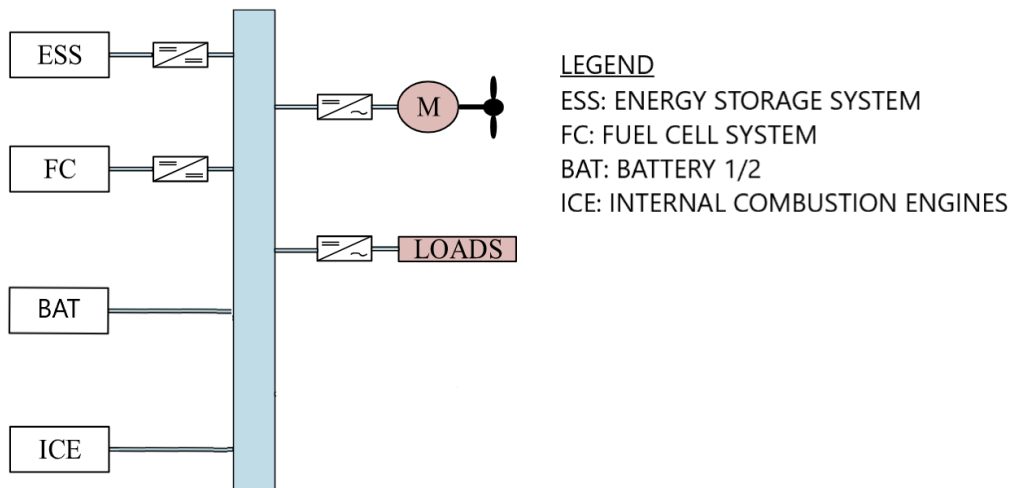


Σχ. 32 Όψη και σχεδιασμός υπερπυκνωτή εταιρίας Maxell

Σε σύγκριση με τις συστοιχίες, οι υπερπυκνωτές έχουν αρκετά πλεονεκτήματα, καθώς μπορούν να φορτισθούν σε μικρό χρονικό διάστημα, ενώ οι περισσότερες τεχνολογίες συστοιχιών έχουν αστοχίες σε καθεστώς γρήγορης φόρτισης. Οι υπερπυκνωτές έχουν επίσης πολλές εκατοντάδες χιλιάδες κύκλους φορτίσεων, ενώ οι συστοιχίες έχουν μερικές εκατοντάδες κύκλους. Μπορούν ακόμη να διανέμουν ενεργειακούς παλμούς με υψηλή συχνότητα χωρίς επιζήμια αποτελέσματα, ενώ οι συστοιχίες αντιμετωπίζουν μείωση χρόνου ζωής όταν εκτίθενται σε συχνούς τεράστιους παλμούς ισχύος. Οι υπερπυκνωτές έχουν τη δυνατότητα να φορτίζονται σε οποιαδήποτε τάση εντός του πεδίου της ονομαστικής τάσης τους ενώ οι συστοιχίες λειτουργούν σε πιο μικρό εύρος φορτίσεως. Παρόλα αυτά οι υπερπυκνωτές μειονεκτούν έναντι των συστοιχιών σε σχέση με την αποθήκευση ενέργειας όταν αναφερόμαστε στο ίδιο μέγεθος υπερπυκνωτή. Ως εκ τούτου οι υπερπυκνωτές πλεονεκτούν σε πυκνότητα ισχύος, διάρκεια ζωής, υψηλή απόδοση και χαμηλό κόστος αλλά με τη δεδομένη τεχνολογία, η ενεργειακή πυκνότητα τους εξακολουθεί να είναι περιορισμένη.

## 6.2 Εφαρμογή συστήματος υπερπυκνωτών στο δίκτυο συνεχούς ρεύματος

Σε γενικές γραμμές το υβριδικό σύστημα πρόωσης και διανομής ισχύος αποτελείται από ένα συνδυασμό πηγών ενέργειας και συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας όπως είναι το δίκτυο που έχει περιγραφεί στο κεφάλαιο 5. Η διαμόρφωση αυτού του δικτύου ονομάζεται σειριακή και είναι σχετικά πιο ώριμη ως τεχνολογία στα υβριδικά συστήματα πρόωσης. Σε αυτά τα συστήματα, όλες οι πηγές παραγωγής ενέργειας (κυψέλες καυσίμου, ηλεκτρομηχανές), οι πηγές αποθήκευσης ενέργειας (συστοιχίες, υπερπυκνωτές) και οι αντίστοιχοι μετατροπείς και αντιστροφείς τάσης συνδέονται με το κύριο ηλεκτρικό δίκτυο (Main Bus Bar) όπως φαίνεται στο σχ. 35. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της σύνδεσης είναι η ποικιλομορφία συνδεσμολογίας που διατίθεται για την τροφοδότηση των φορτίων. Εφόσον η συνολική ηλεκτρική ενέργεια του συστήματος συνδέεται με τη χρήση του κοινού δικτύου συνεχούς για τη διανομή ενέργειας στον κινητήρα προώσεως και στο hotel load (όπως air-conditioning, navigation, auxiliary machineries) υφίστανται πολλοί τρόποι λειτουργίας από τον πιο απλό όπως είναι η αποκλειστική τροφοδότηση από τις συστοιχίες έως συνδυασμό παροχής ενέργειας από κυψέλη καυσίμου, υπερπυκνωτή και συστοιχία. Για την περίπτωση όπου υπάρχει απαίτηση για μείωση θορύβου και αδυναμία χρήσης των ηλεκτρομηχανών κρίνεται απαραίτητη η χρήση υπερπυκνωτή ως επιπρόσθετο μέσο παροχής ενέργειας για υψηλότερες απαιτήσεις ισχύος.



Σχ. 33 Απλοποιημένη αρχιτεκτονική ηλεκτρικού δικτύου πλοίου με υβριδικό σύστημα πρόωσης και χρήση υπερπυκνωτή (ESS)

Για την εφαρμογή συστήματος υπερπυκνωτή στο ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου απαιτείται η τοποθέτηση μίας ηλεκτρικής συστοιχίας αποθήκευσης (supercapacitor rack/module) η οποία θα αποτελείται από ένα σύνολο υπερπυκνωτών (supercapacitor cells) ηλεκτρικά συνδεδεμένων μεταξύ τους. Στην εγκατάσταση θα περιλαμβάνεται επίσης ένα σύστημα ελέγχου πυκνωτών (capacitor management system), το οποίο θα είναι υπεύθυνο για την επιτήρηση του συστήματος μέσω χειρισμού, ελέγχου και προστασίας της λειτουργίας των υπερπυκνωτών. Θα δίνει τιμές και θα υπολογίζει την απόδοση του συστήματος (τάση συστήματος, φόρτιση/εκφόρτιση, ένταση ρεύματος τροφοδότησης, ισχύς) και θα επιτηρεί την ασφάλεια του συστήματος μέσω πυρανίχνευσης, μέτρησης επικίνδυνων τιμών αερίων και ελέγχου κύκλου συντήρησης. Ακόμη θα είναι υπεύθυνο μέσω προγραμματιζόμενου λογικού ελεγκτή για τον μηχανισμό cell balancing, δηλαδή θα είναι υπεύθυνο για την κοινή τάση όλων των πυκνωτών στη συσκευή αποθήκευσης. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός «κυκλώματος εξισορρόπησης» και είναι απαραίτητο για την ομοιόμορφη φόρτιση ή εκφόρτιση όλων των πυκνωτών γιατί τυχόν διαφοροποιήσεις θα προκαλέσουν σφάλμα του συστήματος.

Το σύστημα θα πρέπει να σχεδιαστεί ώστε να έχει επαρκή συνολική χωρητικότητα για να παρέχει την απαιτούμενη ισχύ στις καταναλώσεις του δικτύου. Η πτώση τάσης από την ένταση



φορτίσεως δεν θα δημιουργήσει κάποια ασταθή κατάσταση του υπόλοιπου ηλεκτρικού δικτύου ενώ μπορεί να ενισχυθεί το ρεύμα αυτό από την ισχύ των ηλεκτρομηχανών ή των κυψελών καυσίμου. Επιπρόσθετα η διαδικασία εκφόρτισης των υπερπυκνωτών με τις υπόλοιπες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας συνδεδεμένες παράλληλα στο δίκτυο δεν θα προκαλέσει κατάσταση υπερφόρτωσης ή υπέρτασης στο υπόλοιπο ηλεκτρικό δίκτυο. Θα πρέπει απλώς να προβλεφθεί η περίπτωση υπερτάχυνσης των γεννητριών κατά την εν παραλλήλω λειτουργία.

Η σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο θα πρέπει να γίνει με τη χρήση ενός DC/DC Converter ώστε να μετατρέπει την τάση των υπερπυκνωτών στην εκάστοτε τάση του δικτύου. Η λήψη φορτίσεως του πλοίου θα πρέπει να διαθέτει κατάλληλη διάταξη φορτίσεως της συστοιχίας υπερπυκνωτών.

### 6.3 Βοηθητικά συστήματα υπερπυκνωτών

Η συστοιχία υπερπυκνωτών θα πρέπει να είναι τοποθετημένη σε αστάλινο περίβλημα ενισχυμένο ώστε να έχει αντοχή σε μηχανικές, ηλεκτρομαγνητικές και θερμικές καταπονήσεις που μπορεί να προκύψουν σε περιπτώσεις βραχυκυκλώματος ή υπό κανονικές συνθήκες. Επίσης, το περίβλημα θα πρέπει να είναι κατασκευασμένο από πυρίμαχα υλικά και να περιλαμβάνουν μηχανισμό εκτόνωσης πίεσης σε περίπτωση ρήξης ή έκρηξης λόγω υπερφόρτισης, υπέρτασης ή υπερβολικής αύξησης της θερμοκρασίας. Σε τέτοιες περιπτώσεις θα πρέπει να υπάρχει αντιδιαβρωτικός μηχανισμός από την υπερχειλίση του ηλεκτρολύτη μετά την ενεργοποίηση του μηχανισμού εκτόνωσης πίεσης, για τη διατήρηση της ασφάλειας του προσωπικού και του υλικού του περιβλήματος.

Ένα ακόμα στοιχείο είναι η αποφυγή υγροποίησης στην εγκατάσταση των υπερπυκνωτών. Για το σκοπό αυτό θα χρησιμοποιηθεί υδρόψυξη μέσω κλειστού κυκλώματος ψύξης εντός της συστοιχίας, με μέθοδο περισυλλογής συμπυκνώματος υγροποιήσεων από την απαγωγή θερμότητας στο εσωτερικό του περιβλήματος. Θα πρέπει να αποφευχθεί επιπλέον η εισροή ύδατος εντός των κυψελών υπερπυκνωτών από διαρροή ή υγροποίηση του εναλλάκτη.

Το σύστημα ελέγχου των υπερπυκνωτών (CMS – Capacitor Management System) είναι το υπεύθυνο για τον έλεγχο των τιμών (monitoring) της τάσης των στοιχείων, της θερμοκρασίας, της έντασης του ρεύματος και της συνολικής τάσης της συστοιχίας υπερπυκνωτών. Θα πρέπει να δίνει σήμα σφάλματος σε μία από τις ακόλουθες περιπτώσεις:

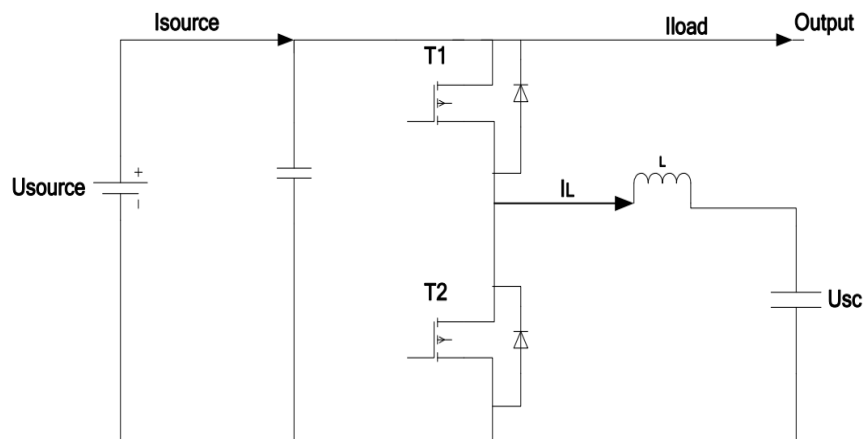
- Υπέρταση στοιχείου
- Υψηλή θερμοκρασία στο χώρο
- Ανισορροπία τάσεων στοιχείων
- Υψηλή θερμοκρασία στο στοιχείο
- Αδυναμία επικοινωνίας με το σύστημα αυτοματισμού του πλοίου
- Χαμηλή μόνωση
- Κατάσταση φόρτισης κάτω από το επιτρεπτό όριο τροφοδότησης
- Υψηλή θερμοκρασία συστήματος ψύξης
- Εσωτερικό βραχυκύκλωμα

Σε όλες τις ανωτέρω περιπτώσεις θα πρέπει να ενεργοποιείται η αντίστοιχη ασφαλιστική διάταξη (ύπαρξη safety system) για τη διακοπή λειτουργίας του συστήματος και προστασία των υπερπυκνωτών από βλάβη. Η παράκαμψη αυτού του συστήματος αυτοματισμού θα μπορεί να παρακάμπτεται μόνο με παρέμβαση του χρήστη.

Το σύστημα αυτοματισμού (CMS) θα επιτελεί τη βασική λειτουργία εξισορρόπησης της τάσης των στοιχείων. Ένα αυτοματοποιημένο σύστημα εξισορρόπησης θα πρέπει να παρέχεται σε κάθε συστοιχία υπερπυκνωτών χωρίς να τροφοδοτούνται από τα στοιχεία που ελέγχουν. Θα πρέπει να παρέχεται προστασία στα στοιχεία με διαφορά τάσης από ανάστροφη τάση κατά την εκφόρτιση του συστήματος. Λόγω της ανομοιομορφίας της χωρητικότητας και της συνολικής σε σειρά αντίστασης των νέων υπερπυκνωτών με παλαιότερους δεν θα πρέπει να γίνεται συνδυασμός αυτών γιατί θα επηρεάσει την απόδοση του συστήματος εξισορρόπησης της τάσης.

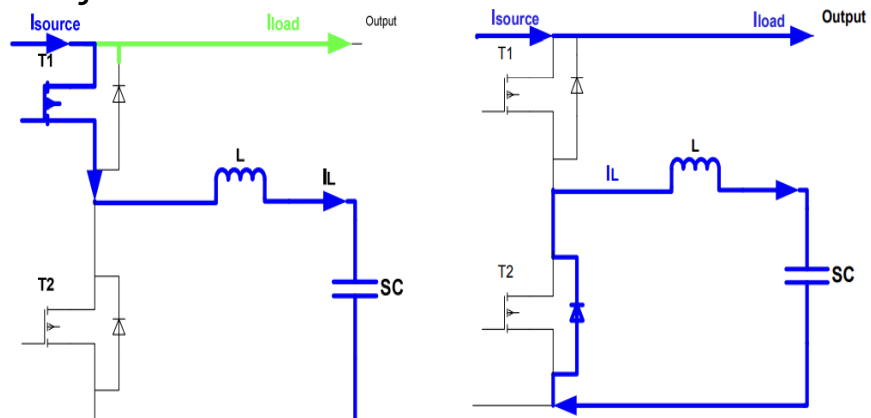
## 6.4 Μετατροπέας DC/DC για συστοιχία υπερπυκνωτών

Το DC/DC Converter που ελέγχει τη ροή ενέργειας προς τη συστοιχία υπερπυκνωτών συνδέεται απευθείας στο δίκτυο DC του πλοίου. Η σχεδίαση του θα πρέπει να επιτρέπει τη μεταφορά ισχύος προς αμφότερες κατευθύνσεις. Ο μετατροπέας θα πρέπει να είναι συνδυασμός ενός μετατροπέα πτώσης τάσης (buck converter) και ενός μετατροπέα ενίσχυσης της τάσης (boost converter). Λειτουργεί σε πτώση τάσης όσο φορτίζει τους υπερπυκνωτές και σε ενίσχυση της τάσης όσο αυτοί εκφορτίζουν για να τροφοδοτήσουν το δίκτυο. Η κατεύθυνση και η τιμή του ρεύματος των υπερπυκνωτών ελέγχεται από τον κύκλο λειτουργίας (duty cycle) της γέφυρας ημιαγωγών.



Σχ. 34 Κύκλωμα μετατροπέα υπερπυκνωτή

1. Στην κατάσταση φόρτισης (πτώση τάσης μετατροπέα) έχουμε ροή ενέργειας από το δίκτυο προς τους υπερπυκνωτές.



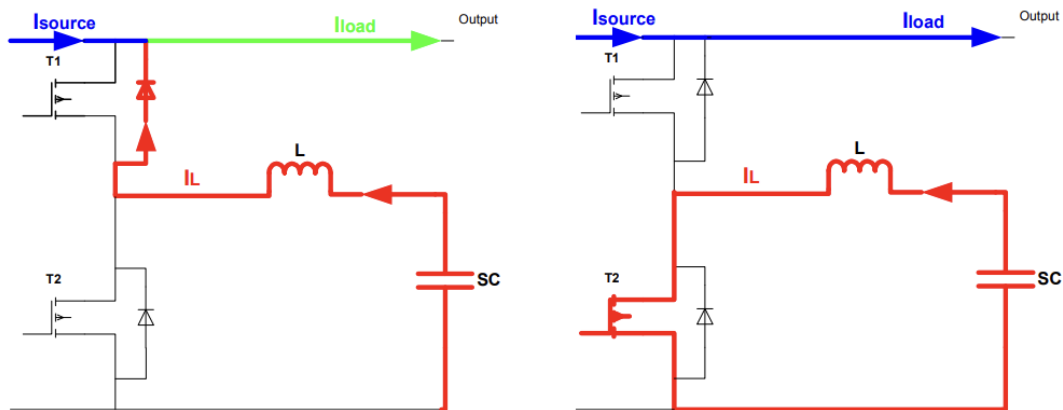
Σχ. 35 Buck mode μετατροπέα DC/DC – κατάσταση φόρτισης

Σε αυτήν την περίπτωση ο κύκλος λειτουργίας δίνεται από τη σχέση:

$$D_1 = \frac{U_{SC}}{U_{Source}}$$

Όπου  $D_1$  ο κύκλος λειτουργίας,  $U_{SC}$  η τάση της συστοιχίας υπερπυκνωτών και  $U_{Source}$  η τάση του δικτύου.

2. Στην κατάσταση εκφόρτισης, η ενέργεια ρέει από τους υπερπυκνωτές προς το δίκτυο. Συνέπεια αυτού είναι η εκφόρτιση της συστοιχίας υπερπυκνωτών.



Σχ. 36 Boost mode μετατροπέα DC/DC – κατάσταση εκφόρτισης

Σε αυτήν την περίπτωση ο κύκλος λειτουργίας δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{1 - D_2} = \frac{U_{Source}}{U_{SC}}$$

Όπου  $D_2$  ο κύκλος λειτουργίας,  $U_{SC}$  η τάση της συστοιχίας υπερπυκνωτών και  $U_{Source}$  η τάση του δικτύου.

Από τις ανωτέρω σχέσεις προκύπτει ότι  $D_1 = 1 - D_2$ . Το σήμα ενεργοποίησης των τρανζίστορ  $T_1$  και  $T_2$  θα είναι πάντα αντίθετα μεταξύ τους.

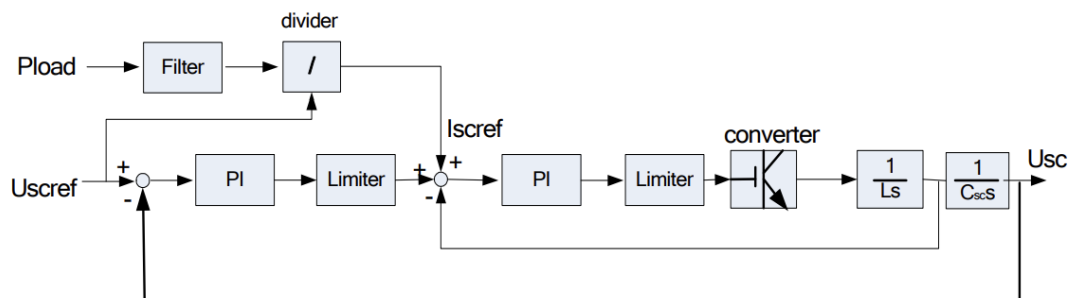
Για το σχεδιασμό του DC/DC Converter υπάρχουν πολλές μέθοδοι σχεδιασμού του προγράμματος ελέγχου. Για λόγους

πρακτικότητας και ευκολίας επιλέγουμε τη μέθοδο ελέγχου ροής ισχύος (Power Flow Control Method) η οποία ακολουθεί την αρχή διατήρησης της ενέργειας. Οι τιμές ισχύος της πηγής (μπαταρία), του φορτίου (καταναλώσεις δικτύου) και των υπερπυκνωτών συνδέονται με την ακόλουθη σχέση.

$$P_{Source} = P_{Load} + P_{SC}$$

Δηλαδή το άθροισμα της ισχύος του φορτίου και του φορτίου του υπερπυκνωτή θα πρέπει να ισούται με την ισχύ που αναρροφάται από την πηγή. Η ένταση ρεύματος των υπερπυκνωτών μπορεί να υπολογιστεί ως το λόγο της ισχύος προς την τάση της συστοιχίας κατά τα γνωστά.

Η τάση της συστοιχίας υπερπυκνωτών είναι σημαντική μεταβλητή για το σχεδιασμό του μετατροπέα και σχετίζεται άμεσα με την ενέργεια που αποθηκεύεται στα στοιχεία. Για να εξασφαλιστεί ο έλεγχος του συστήματος τροφοδότησης ισχύος και να περιοριστεί η τάση του συστήματος από μεγάλες αποκλίσεις προκαλώντας υπερφόρτιση ή υποφόρτιση, θα πρέπει να ρυθμιστεί η  $U_{SC}$ .



Σχ. 37 Κύκλωμα ελέγχου ισχύος

Όπως φαίνεται στο ανωτέρω κλειστό κύκλωμα ελέγχου, πρέπει να υπάρχει ένας εξωτερικός βρόχος εξισορρόπησης της τάσης. Όταν η τάση πέφτει κατά 50%, οι υπερπυκνωτές απελευθερώνουν το 75% της αποθηκευμένης ενέργειας. Η ενέργεια της συστοιχίας υπερπυκνωτών δίνεται από τη σχέση:

$Q = \frac{1}{2} * C_{SC} U_{SC}^2$ , όπου Q η ενέργεια, C η συνολική χωρητικότητα και U η τάση των υπερπυκνωτών. Σύμφωνα με το σχεδιάγραμμα, έχουμε μια μέθοδο διπλού κλειστού βρόχου. Ο εξωτερικός βρόχος ελέγχει τη μέση τάση ενώ ο εσωτερικός βρόχος ελέγχει το ρεύμα

της στιγμιαίας ροής ενέργειας. Συνεπώς πρέπει να ρυθμιστούν οι δύο ελεγκτές ισχύος ώστε ο εσωτερικός βρόχος να καλύπτει τις ανάγκες ισχύος του δικτύου και ο εξωτερικός να μην επιτρέπει τις αποκλίσεις που θα οδηγήσουν σε υπέρταση ή υπόταση.

## 6.5 Παράμετροι λειτουργίας διάταξης υπερπυκνωτών

Το εύρος τάσης λειτουργίας του υπερπυκνωτή μπορεί να καθοριστεί από την ακόλουθη σχέση:

$$C = \frac{2Q}{U_{max}^2 - U_{min}^2}$$

Όπου Q είναι η ενέργεια. Δηλαδή όσο μικρότερη είναι η ελάχιστη τάση τροφοδοσίας, τόσο μικρότερη είναι η χωρητικότητα. Παρόλα αυτά δεν είναι εφικτή η πλήρης φόρτιση ή εκφόρτιση του υπερπυκνωτή. Όταν η τάση της συστοιχίας υπερπυκνωτών γίνει μικρότερη από το 40% της μέγιστης τιμής, αυτό θα προκαλέσει τεράστιο ρεύμα στην ισχύ εξόδου. Αυτό θα οδηγήσει σε αύξηση της ισχύος του συστήματος αλλά ταυτόχρονα θα προκαλέσει θέρμανση των στοιχείων υπερπυκνωτών λόγω της εσωτερικής αντίστασης. Στην πραγματικότητα, η  $U_{max}$  είναι η τάση συνεχούς ρεύματος του δικτύου και η  $U_{min}$  επιλέγεται ως το 50% της  $U_{max}$ . Ο υπερπυκνωτής απελευθερώνει το 75% της συνολικής αποθηκευμένης ενέργειας καθώς η τάση μειώνεται στο 50%.

Ένα πηνίο επαγωγής συνδέεται μεταξύ της συστοιχίας υπερπυκνωτών και του DC/DC Converter. Η επαγωγή λειτουργεί ως ρυθμιστής ενέργειας για να εξομαλύνει τον κυματισμό του ρεύματος από τη διαδικασία της διαμόρφωσης. Η αυτεπαγωγή μπορεί να υπολογιστεί μέσω της ακόλουθης εξίσωσης:

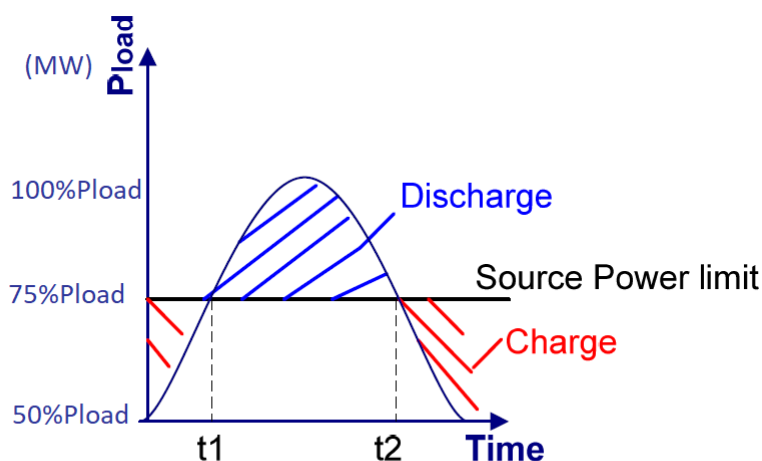
$$L = \frac{U_{SC}}{4 * n_{SC} * I_{L_{SAT}} * f}$$

Σε αυτή την σχέση, το  $n_{sc}$  είναι ο συντελεστής περιορισμού που παρέχει επαρκή ασφάλεια για το σύστημα και που υπό

κανονικές συνθήκες κυμαίνεται περί το 10%. Το  $I_{L\_SAT}$  είναι η τιμή κορεσμού του ρεύματος των υπερπυκνωτών και  $f$  είναι η πυκνότητα της διαμόρφωσης πλάτους παλμού (PWM - pulse width modulation).

Ανεξάρτητα από τον τρόπο επιλογής του υπερπυκνωτή, όλη η ενέργεια που καταναλώνεται από το σύστημα πρέπει να προέρχεται από την πηγή ενέργειας. Αυτό σημαίνει ότι ο υπερπυκνωτής δουλεύει ως ενεργειακός ρυθμιστής, ο οποίος μειώνει τις διακυμάνσεις ισχύος και συνεπώς επιτρέπει στην ηλεκτρική εγκατάσταση να λειτουργεί σε πιο σταθερά φορτία και με υψηλότερη αποδοτικότητα μέσω της μείωσης των στιγμιαίων διακυμάνσεων ισχύος.

Κατά τη λειτουργία του δικτύου προκύπτει η ακόλουθη χαρακτηριστική καμπύλη μεταβολής του φορτίου.



Σχ. 38 Χαρακτηριστική καμπύλη μεταβολής φορτίου καταναλώσεων ηλεκτρικού δικτύου.

Τα όρια της πηγής ενέργειας μπορούν να καθοριστούν από το σύστημα ελέγχου τροφοδότησης (Power Management System). Όταν οι απαιτήσεις ισχύος από τα φορτία είναι χαμηλότερα από αυτό το όριο (source power limit), η ισχύς από την πηγή (συστοιχίες) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να φορτίσει τους υπερπυκνωτές. Όταν οι απαιτήσεις των φορτίων είναι μεγαλύτερες από το όριο αυτό, οι υπερπυκνωτές εκφορτίζουν και

απελευθερώνουν ενέργεια προς το φορτίο παράλληλα με την παροχή των συστοιχιών. Συνεπώς, τα φορτία από την πλευρά της πηγής είναι σταθερά παρά τις διακυμάνσεις των φορτίων.

Κατά την κατάσταση όπου τα φορτία είναι χαμηλά, οι υπερπυκνωτές φορτίζουν, η τάση ανεβαίνει και το ρεύμα προς τους υπερπυκνωτές έχει θετικό πρόσημο. Καθόσον τα φορτία ανεβαίνουν σε τιμή, οι υπερπυκνωτές εκφορτίζουν, το πρόσημο του ρεύματος γίνεται αρνητικό και η τάση μειώνεται.

## 6.6 Επιλογή υπερπυκνωτή για συστοιχία SuperCapacitors (SC)

Για να καλύπτονται οι ανάγκες του δικτύου από μία συστοιχία υπερπυκνωτών ως προς την αποθήκευση ενέργειας θα πρέπει να έχουν τα κάτωθι χαρακτηριστικά:

- Υψηλή διάρκεια ζωής (της τάξης των δεκαετιών – έως και 20 έτη)
- Υψηλή πυκνότητα ισχύος
- Μεγάλο εύρος θερμοκρασιών κατά τη λειτουργία
- Χαμηλό λειτουργικό κόστος
- Υψηλή απόδοση (>98%) σε εύρος περιβαλλοντικών συνθηκών και ατμόσφαιρας
- Υψηλή αξιοπιστία

Όπως είναι γνωστό οι πυκνωτές μεγάλης χωρητικότητας έχουν μία πληθώρα εφαρμογών όπως είναι η εκκίνηση των μηχανών, η αποθήκευση και επαναχρησιμοποίηση της ενέργειας σε υβριδικά οχήματα και ο τηλεχειρισμός σε αισθητήρες και διακόπτες.

Για την εφαρμογή που εξετάζουμε, η οποία είναι η αποθήκευση ενέργειας και η εκφόρτιση για τροφοδότηση ηλεκτρικού δικτύου πλοίου θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο XL60-2R7308W-R εταιρείας Eaton κυλινδρικού τύπου με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Χωρητικότητα 3000-3400 F
- Τάση ανά στοιχείο 2,7 V
- Ανοχή 0 έως 20% (πτώση επί του ποσοστού της μέγιστης χωρητικότητας)



- Θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας -40°C έως 65°C
- Διάρκεια ζωής 1.500 ώρες σε μέγιστη τάση και θερμοκρασία λειτουργίας
- Κύκλοι φορτίσεως/εκφορτίσεως 1.000.000 σε θερμοκρασία 25 °C
- Μήκος: 138mm / Διάμετρος: 60,7mm
- Βάρος: 525g
- Τιμή ~ 80-100 €

Μπορεί να εξαχθεί, συνεπώς, το συμπέρασμα ότι ανάλογα με το μέγεθος του πλοίου και τις ηλεκτρικές απαιτήσεις θα χρησιμοποιηθεί συστοιχία υπερπυκνωτών τέτοια ώστε να καλύπτει τις ανάγκες υψηλής ισχύος.



Σχ. 39 Ο υπερπυκνωτής XL60-2R7308W-R, 3000F, 2.7V, Eaton και συστοιχία υπερπυκνωτών εταιρείας Eaton αποτελούμενη από πυκνωτές XL 3000F

## 6.7 Συμπεράσματα

Οι υπερπυκνωτές είναι μια σχετικά νέα μέθοδος αποθήκευσης ενέργειας σε ηλεκτρικές εγκαταστάσεις ενός πλοίου. Τα χαρακτηριστικά τους, δίνουν το πλεονέκτημα της αποτελεσματικής ρύθμισης ενέργειας τροφοδότησης για την βελτιστοποίηση της συνολικής εγκατάστασης. Δίνουν τη δυνατότητα της αυξήσεως του συνολικού μέσου φορτίου, αυξάνοντας το βαθμό απόδοσης που παρέχουν οι πηγές (συστοιχία, αναερόβια πρόωση) ενώ την ίδια στιγμή μειώνουν τις διακυμάνσεις στα φορτία δημιουργώντας σταθερότητα στο

συνολικό δίκτυο και ως εκ τούτου προστατεύουν τα επιμέρους κυκλώματα τροφοδότησης και τα χρησιμοποιούμενα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά εξαρτήματα των αντιστροφών και των μετατροπών ισχύος.

Από αυτή την ανάλυση προκύπτει το συμπέρασμα ότι η συνεργασία του συστήματος αναερόβιας πρόωσης με τη συστοιχία υπερπυκνωτών θα προσέφερε σημαντικά πλεονεκτήματα στην εγκατάσταση. Για περαιτέρω ανάλυση θα πρέπει να μελετηθούν πολλές διαφορετικές καταστάσεις ηλεκτρικής φόρτωσης στο συνολικό δίκτυο προτού αυτή η τεχνολογία τεθεί σε εφαρμογή, ενώ ακόμα θα πρέπει να εξεταστεί η τεχνική σκοπιά όπως η διάρκεια ζωής και οι συνολικοί κύκλοι φόρτισης των χρησιμοποιούμενων υπερπυκνωτών. Με αυτόν τον τρόπο θα αξιοποιηθούν τα πλεονεκτήματα αυτού του μέσου ενέργειας και θα μπορέσει να εφαρμοστεί σε νεότερης γενιάς πλοία με υβριδική ή απολύτως ηλεκτρική πρόωση.

## Βιβλιογραφία

- [1] Bei Gou, Woon Ki Na, Bill Diong, “Fuel Cells: Modeling, Control, and Applications, Power Electronics and Applications Series”, CRC Press, 2010
- [2] Θεοδόσιος Λέανδρος, “Σχεδιασμός Συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου από κυψέλες καυσίμου”, διπλωματική εργασία, 2021
- [3] Hui Xing, Charles Stuart, Stephen Spence, Hua Chen, “Fuel Cell Power Systems for Maritime Applications: Progress and Perspectives”, Sustainability, 2021
- [4] Daniel Akinyele, Elijah Olabode, Abraham Amole, “Review of Fuel Cell Technologies and Applications for Sustainable Microgrid Systems”, Inventions, 2021
- [5] Δρ. Μιχαήλ Βικάτος “Κινητήρες Permasyn” , σπουδή, 2005
- [6] American Bureau of Shipping, «Use of Supercapacitors in the Marine and offshore Industries». Houston, Texas USA: ABS, 2017
- [7] Orestis Charalambopoulos, Development of a model for an all-electric ship with supercapacitors – theoretical investigation of its performance, NTUA Thesis, 2018
- [8] Wenjie Chen , Alf Kåre Ådnanes, Jan Fredrik Hansen , John Olav Lindtjørn and Tianhao Tang, Super-Capacitors Based Hybrid Converter in Marine Electric Propulsion System, Paper XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010