

Η Εφαρμογή του Θερμοδυναμικά Συνδυασμένου Συστήματος Joule-Brayton / Rankine ως Προωστήριο Σύστημα σε Σύγχρονα Πλοία

Ιωάννης Σ. Κατσάνης^α, Ευθύμιος Γ. Παριώτης^α και Θεόδωρος Κ. Ζάννης^α

^αΤομέας Ναυπηγικής και Ναυτικής Μηχανολογίας, Σχολή Ναυτικών Δοκίμων, Τέρμα Λεωφ. Χατζηκυριακού 18539 Πειραιάς

Περίληψη. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η δυναμική που διαφαίνεται να έχει η εφαρμογή συνδυασμένων θερμοδυναμικά κύκλων Joule-Brayton / Rankine (με εργαζόμενο μέσο ατμό ως κύκλο βάσης) σε κύριες μηχανές πρόωσης, λαμβάνοντας υπόψη το νέο τοπίο που διαμορφώνεται στην ναυτιλία με την θέσπιση αυστηρής περιβαλλοντικής νομοθεσίας όσο αφορά τις εκπομπές ρύπων, αλλά και την περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο. Οι νέες αυτές συνθήκες επιβάλλουν την αλλαγή του φθηνού καυσίμου που χρησιμοποιείται έως τις ημέρες μας στις αργόστροφες μηχανές Ντήζελ και προέρχεται από τα κατάλοιπα της διύλισης του πετρελαίου, λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς του σε θείο. Αυτό το γεγονός επηρεάζει καθοριστικά το κόστος λειτουργίας, ενώ ταυτόχρονα για την πλεύση σε ορισμένες περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές, είναι υποχρεωτική η λήψη πρόσθετων μέτρων όσο αφορά τις εκπομπές ρύπων. Αποδεικνύεται ότι υπό τις παρούσες συνθήκες, και ειδικά για ορισμένους τύπους σκαφών / χρήσεις, οι μεγάλοι δίχρονοι κινητήρες Ντήζελ θα μπορούσαν να αντικατασταθούν από σύγχρονες αεριοστροβιλικές εγκαταστάσεις συνδυασμένου κύκλου, αποκομίζοντας ταυτόχρονα οικονομικά, περιβαλλοντικά και διαχειριστικά οφέλη.

Λέξεις - κλειδιά: Joule-Brayton, Rankine, συνδυασμένος κύκλος

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το παγκόσμιο εμπόριο μέσω των θαλασσιών οδών έχει αυξηθεί τις τελευταίες δεκαετίες αποτελώντας την κύρια οδό μεταφοράς εμπορευμάτων παγκοσμίως [1]. Η πλειονότητα των μηχανών πρόωσης καθώς και των βοηθητικών συστημάτων ποντοπόρων πλοίων σήμερα είναι μηχανές Diesel, με το ποσοστό τους στα εμπορικά πλοία άνω των 100 tons gross να φθάνει στο 96% της εγκατεστημένης ισχύος [2]. Ενδεικτική εικόνα της κατανομής του παγκόσμιου εμπορικού στόλου (σε ποσοστιαία βάση) ανάλογα με τον τύπο του πλοίου και το σύστημα πρόωσης που χρησιμοποιείται (τύπος κινητήρα και καύσιμο) προκύπτει από την εξέταση του Πίνακα 1, ο οποίος προέρχεται από επεξεργασία των στοιχείων της βάσης δεδομένων των Lloyd's για την περίοδο από το 1999 έως το 2010 [3].

Όπως φαίνεται, οι κινητήρες Ντήζελ χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής : Slow Speed Diesel (SSD), Medium Speed Diesel (MSD) και High Speed Diesel (HSD), ενώ παράλληλα εμφανίζονται τα ποσοστά που αντιστοιχούν σε πλοία με σύστημα πρόωσης ατμού (Steam Turbine) και αεριοστροβιλική εγκατάσταση (Gas Turbine).

Είναι φανερό ότι στον σύγχρονο στόλο τα ατμοκίνητα πλοία έχουν πλέον σχεδόν εξαληφθεί, ενώ οι αεροστροβιλικές εγκαταστάσεις συμμετέχουν με μικρό ποσοστό κυρίως σε πλοία μεταφοράς επιβατών (Passenger) και οχηματαγωγά (Ro Ro Cargo). Στα μεγάλα πλοία μεταφοράς φορτίου, οι αργόστροφοι δίχρονοι κινητήρες Diesel είναι κυρίαρχοι.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Κατανομή συστημάτων πρόωσης του παγκόσμιου στόλου σε κάθε τύπο σκάφους (στοιχεία 2010) [3]

Ship category	SSD	SSD	MSD	MSD	HSD	HSD	GT	GT	ST	ST
	MDO /MGO	BFO	MDO /MGO	BFO	MDO /MGO	BFO	MDO /MGO	BFO	MDO /MGO	BFO
Liquid bulk ships	0.87	74.08	3.17	20.47	0.52	0.75	0.00	0.14	0.00	0.00
Dry bulk carriers	0.37	91.63	0.63	7.29	0.06	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
Container	1.23	92.98	0.11	5.56	0.03	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00
General cargo	0.36	44.59	8.48	41.71	4.30	0.45	0.00	0.10	0.00	0.00
Ro Ro Cargo	0.17	20.09	9.86	59.82	5.57	2.23	2.27	0.00	0.00	0.00
Passenger	0.00	3.81	5.68	76.98	3.68	1.76	4.79	3.29	0.00	0.02
Fishing	0.00	0.00	84.42	3.82	11.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Others	0.48	30.14	29.54	19.63	16.67	2.96	0.38	0.20	0.00	0.00
Tugs	0.00	0.00	39.99	6.14	52.80	0.78	0.28	0.00	0.00	0.00

SSD - Slow Speed Diesel, MSD - Medium Speed Diesel, HSD - High Speed Diesel, GT - Gas Turbine, ST - Steam Turbine; MDO - Marine Diesel Oil, MGO - Marine Gas Oil, BFO - Bunker Fuel Oil

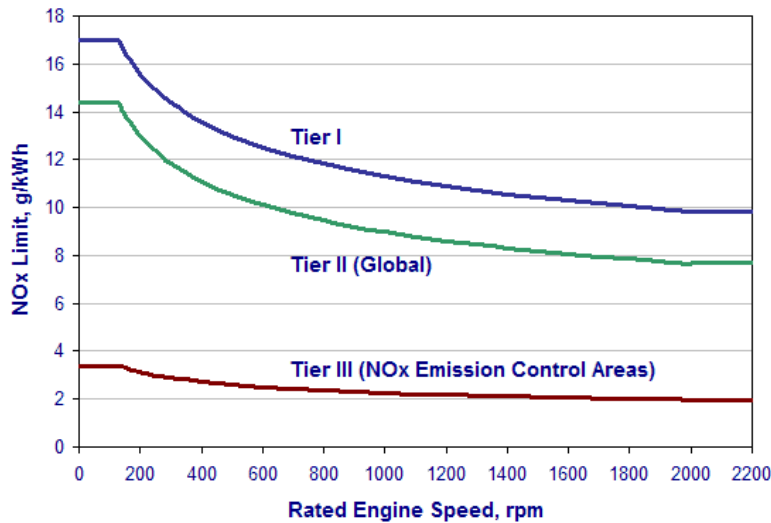
Η κυριαρχία των μηχανών Diesel οφείλεται στην αξιοπιστία τους, την υψηλή απόδοσή τους σε όλο το εύρος διακύμανσης της ισχύος τους καθώς και στο γεγονός ότι (ειδικά οι μεγάλοι αργόστροφοι κινητήρες) μπορούν να λειτουργήσουν με καύσιμο που προέρχεται από τα κατάλοιπα διύλισης του πετρελαίου (Residual Diesel Oil) ή με βαρύ πετρέλαιο (Heavy Fuel Oil), το οποίο έχει ιδιαίτερα ανταγωνιστική τιμή σε σχέση με τα κλάσματα πετρελαίου.

ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ

Παρά το γεγονός ότι το κόστος του καυσίμου αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στην επιλογή του συστήματος πρόωσης, στην σύγχρονη πραγματικότητα, όπως αυτή διαμορφώνεται από την διεθνή νομοθεσία για τον περιορισμό των εκπομπών ρύπων στην ναυτιλία, καθίσταται αναγκαστική η προσαρμογή των νέων αλλά και των υφιστάμενων πλοίων σε αυστηρούς περιορισμούς που σχετίζονται άμεσα με τον τύπο του καυσίμου (και συγκεκριμένα με την περιεκτικότητά του σε θείο) καθώς και με την λειτουργία του κινητήρα, την απόδοσή του και τις ανηγμένες εκπομπές ρύπων οξειδίου του Αζώτου (NOx).

Σύμφωνα με την νομοθεσία του Διεθνή Οργανισμού Ναυτιλίας (International Maritime Organization) και την Διεθνή Σύμβαση για την Πρόληψη της Ρύπανσης από τα πλοία (MARPOL 73/78), τα όρια εμπομπής οξειδίων του Αζώτου από κινητήρες πλοίων με ολική χωρητικότητα (gross tonnage) μεγαλύτερη των 400 τόνων παρουσιάζονται στο ακόλουθο Σχήμα 1 [4].

Για τα νέα πλοία (κατασκευής μετά την 1/1/2011) είναι υποχρεωτική η κάλυψη των απαιτήσεων Tier II ενώ για τα πλοία που δραστηριοποιούνται σε ευαίσθητες περιβαλλοντικά περιοχές (Emission Control Areas) τα μέγιστα όρια ανηγμένων εκπομπών ρύπων NOx θα πρέπει να είναι σύμφωνα με το Tier III. Επιπλέον τίθενται μέγιστα όρια όσο αφορά την συγκέντρωση του καυσίμου Νητζελ σε θείο (sulfur content), η οποία από το 2012 και μετά δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 3,5% m/m, ενώ για τις ευαίσθητα περιβαλλοντικά περιοχές (Sulfur Emission Control Areas) αυτή η συγκέντρωση περιορίζεται σε 1% m/m, όπως φαίνεται στον πίνακα 2 [5]. Τα όρια γίνονται πολύ πιο αυστηρά μετά το 2020 (διεθνώς) και μετά το 2015 για τις περιοχές SECA όπου πλέον η μέγιστη περιεκτικότητα είναι ίση με 0,50% και 0,1% m/m αντίστοιχα.



ΣΧΗΜΑ 1. Μέγιστα επιτρεπόμενα όρια εκπομπής Οξειδίων του Αζώτου (NO_x) από ναυτικούς κινητήρες

Με τα τρέχοντα και μελλοντικά όρια (ειδικά για τις SECA περιοχές) παύει να είναι εφικτή η χρήση καταλοίπων πετρελαίου ως καύσιμο (Residual Diesel Oil) ακυρώνοντας το πλεονέκτημα που προσέφερε η χαμηλή τιμή του στις μεγάλες αργόστροφες μηχανές Ντήζελ. Εναλλακτικά υπάρχουν τεχνικά εφικτές λύσεις με υψηλό όμως κόστος εγκατάστασης και ελλειπή (προς το παρόν) τεχνολογική ωρίμανση και αποδοχή από την ναυτιλία, όπου εγκαθίστανται συστήματα καθαρισμού των καυσαερίων (aftertreatment methods) για την αδρανοποίηση των επιβλαβών συστατικών που προέρχονται από το θείο που περιέχεται στο καύσιμο.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2. Μέγιστα επιτρεπόμενα όρια συγκέντρωση καυσίμου σε θείο, σύμφωνα με τον IMO [5]

Outside SECAs	Inside SECAs
4.5% prior to 1 st January 2012	1.5% prior to 1 st January 2010
3.5% on and after 1 st January 2012	1.0% on and after 1 st January 2010
0.5% on and after 1 st January 2020*	0.1% on and after 1 st January 2015

*depending on the outcome of a review by MEPC, to be concluded in 2018, as to the availability of the required fuel oil, this date could be deferred to 2025.

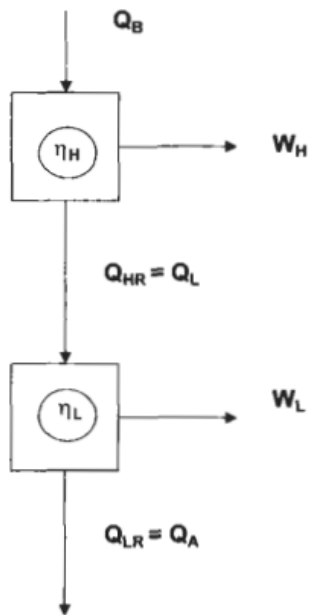
Σε κάθε περίπτωση, είναι φανερό ότι οι τρέχουσες και μελλοντικές απαιτήσεις όσο αφορά τα επιτρεπτά επίπεδα εκπομπής ρύπων καθώς και της περιεκτικότητας του καυσίμου σε θείο, επιβάλλουν την χρήση νέων τεχνολογιών και εναλλακτικών καυσίμων μεταβάλλοντας ουσιαστικά το κόστος χρήσης των κινητήρων Ντήζελ. Υπό αυτές τις συνθήκες και λαμβάνοντας υπόψη τις τεχνολογικές εξελίξεις στις εναλλακτικές επιλογές πρόωσης, υπάρχουν περιπτώσεις όπου, ανάλογα με το επιχειρησιακό προφίλ χρήσης του κινητήρα και την περιοχή όπου δραστηριοποιείται το σκάφος, η μέχρι σήμερα κυρίαρχη επιλογή ενός Ντήζελ κινητήρα παύει να είναι μονόδρομος.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΝΤΗΖΕΛ ΚΑΙ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΙΚΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΟΥ

Με αυτό το σκεπτικό, στην παρούσα εργασία εξετάζεται η δυνατότητα επίτευξης συγκρίσιμων βαθμών απόδοσης με αυτών των δίχρονων μεγάλων κινητήρων, χρησιμοποιώντας

συνδυασμένο θερμοδυναμικά κύκλο Joule-Brayton / Rankine, εξαλείφοντας το συγκριτικό μειονέκτημα που έχουν οι συμβατικές αεριοστροβιλικές εγκαταστάσεις σε σχέση με τους δίχρονους κινητήρες Ντήζελ, ενώ παράλληλα αξιοποιείται το εγγενές χαρακτηριστικό των αεριοστροβιλικών εγκαταστάσεων όσο αφορά τα επίπεδα εκπομπής ρύπων. Οι σύγχρονες αεριοστροβιλικές εγκαταστάσεις επιτυγχάνουν την κάλυψη των αυστηρότερων περιβαλλοντικών ορίων (Tier III) χωρίς την χρήση πρόσθετης τεχνολογίας επεξεργασίας καυσαερίων, ενώ παράλληλα διαθέτουν σημαντικά υψηλότερη συγκέντρωση ισχύος και αισθητά μειωμένους κραδασμούς σε σχέση με τους αντίστοιχους δίχρονους κινητήρες Ντήζελ, στοιχεία που ειδικά σε ορισμένους τύπους πλοίων (π.χ. επιβατηγά, κρουαζιερόπλοια, κ.λ.π.) αξιολογούνται ως ιδιαίτερα θετικά.

Μία εγκατάσταση συνδυασμένου θερμοδυναμικά κύκλου είναι αυτή κατά την οποία ένας θερμοδυναμικός κύκλος υψηλής θερμοκρασίας (κύκλος κορυφής) αποβάλλει θερμότητα Q_{HR} , που ανακτάται και χρησιμοποιείται από τον κύκλο χαμηλής θερμοκρασίας (κύκλος βάσης) για την παραγωγή πρόσθετης ενέργειας (μηχανικής ή ηλεκτρικής) W_L , αυξάνοντας έτσι τον συνολικό βαθμό απόδοσης [6], όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.



ΣΧΗΜΑ 2. Διαγραμματική αναπαράσταση ιδανικού συνδυασμένου κύκλου (χωρίς ενδιάμεσες απώλειες)[6]

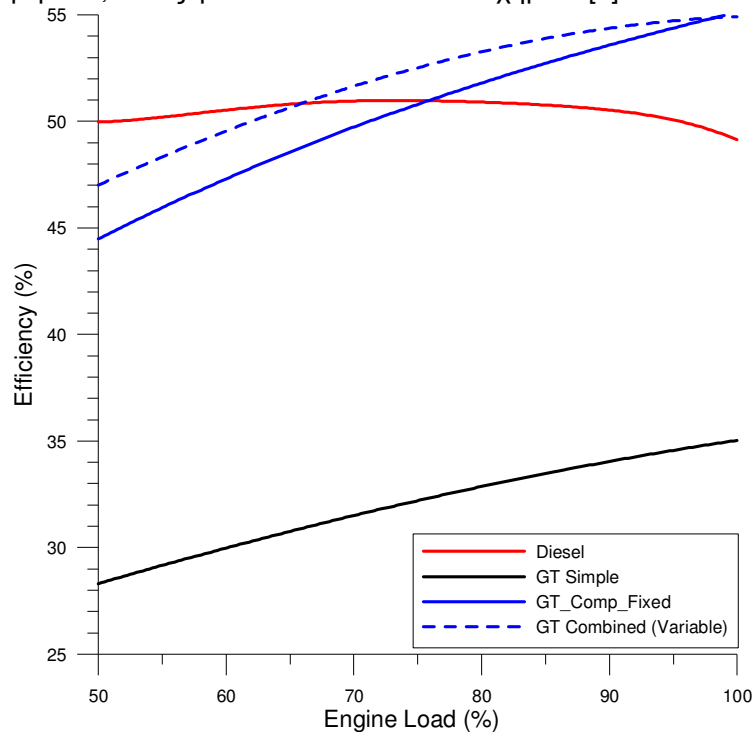
Στην περίπτωση των αεριοστροβιλικών εγκαταστάσεων με δεδομένο ότι ο κύκλος κορυφής Joule-Brayton έχει περιορισμένο άνω όριο θερμοκρασίας λόγω θεμάτων που σχετίζονται με την αντοχή των υλικών κατασκευής των πτερυγίων, η προσθήκη ενός κύκλου βάσης ουσιαστικά επιδιώκει να μειωθεί η μέση θερμοκρασία που αποβάλλεται η θερμότητα προς το περιβάλλον (χαμηλό θερμοδοχείο), ώστε να αυξηθεί ο συνολικός βαθμός απόδοσης. Στην ιδανική περίπτωση όπου μεταξύ των δύο κύκλων δεν υπάρχουν απώλειες, ο θεωρητικός βαθμός απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου θα δίνεται από την ακόλουθη εξ. 1 [6]:

$$n_{CP} = \frac{W}{Q_B} = n_H + n_L - n_H \cdot n_L \quad (9)$$

όπου n_H και n_L είναι οι επιμέρους βαθμοί απόδοσης του κύκλου Joule-Brayton και του κύκλου Rankine αντίστοιχα, ενώ n_{CP} είναι ο βαθμός απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου.

Θεωρώντας ως ενδεικτικό βαθμό απόδοσης μίας σύγχρονης μεγάλης ισχύος αεριοστροβιλικής εγκατάστασης $\eta_H=40\%$ και τον αντίστοιχο βαθμό απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου βάσης (Rankine) $\eta_L=30\%$, εφαρμόζοντας την ανωτέρω σχέση καταλήγουμε σε ένα συνολικό βαθμό απόδοσης $\eta_{CP}=40\%+30\%-40\%*30\%=58\%$. Είναι λοιπόν φανερό, ότι παρά το γεγονός ότι στην προαναφερθείσα περίπτωση δεν έχουν ληφθεί υπόψη οι απώλειες, είναι δυνατόν χρησιμοποιώντας συνδυασμένο κύκλο Joule-Brayton / Rankine να επιτευχθούν συγκρίσιμοι βαθμοί απόδοσης με αυτούς που διαθέτουν οι μεγάλοι δίχρονοι κινητήρες Ντήζελ.

Αυτή η διαπίστωση, αποτελεί αφετηρία για περαιτέρω και ενδελεχή μελέτη, καθώς πέρα από τον βαθμό απόδοσης στο πλήρες φορτίο, για την επιλογή ανάμεσα σε δίχρονο κινητήρα Ντήζελ και αεριοστροβιλική εγκατάσταση συνδυασμένου κύκλου, θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη ότι ο βαθμός απόδοσης των αεριοστροβιλικών εγκαταστάσεων μεταβάλλεται σημαντικά με την μεταβολή του φορτίου, όπως φαίνεται ενδεικτικά στο Σχήμα 3 [7].



ΣΧΗΜΑ 3. Ενδεικτική Μεταβολή του βαθμού απόδοσης συναρτήσει του φορτίου για Τυπικό Κινητήρα Diesel, συμβατική Αεριοστροβιλική Εγκατάσταση (GT Simple), Αεριοστροβιλική Εγκατάσταση Συνδυασμένου Κύκλου με σταθερά οδηγιά πτερύγια (GT_Comp_Fixed) και Αεριοστροβιλική Εγκατάσταση Συνδυασμένου Κύκλου με ρυθμιζόμενα οδηγιά πτερύγια (GT Combined Variable) [7]

Η καμπύλη της μεταβολής του βαθμού απόδοσης του κινητήρα Ντήζελ είναι σχεδόν οριζόντια σε όλο το εύρος μεταβολής του φορτίου (με μία διακύμανση της τάξης του $1\pm 2\%$), ενώ στην περίπτωση του αεριοστροβίλου η αντίστοιχη διακύμανση είναι της τάξης του $15\pm 20\%$. Αυτό το στοιχείο είναι ιδιαίτερα σημαντικό ειδικά στην περίπτωση της ναυτικής πρόωσης όπου σε ορισμένες κατηγορίες πλοίων οι μεταβολές του φορτίου είναι συχνές. Επιπλέον χρειάζεται να μελετηθεί η διάταξη του έλικος (που καθορίζει τον βαθμό απόδοσης μετάδοσης της κίνησης από την κύρια μηχανή στον έλικα), τα οποία είναι θέματα πέραν του σκοπού της παρούσας εργασίας.

ΤΥΠΟΛΟΓΙΑ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΩΝ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΑ ΚΥΚΛΩΝ

Γενικά ο αεριοστρόβιλος είναι ένας κινητήρας που μπορεί εύκολα να συνδυασθεί με άλλες μηχανές για την πρόωση πλοίων. Έχουν ήδη εφαρμοσθεί ποικίλοι συνδυασμοί με επιτυχία σε πλοία, ενώ άλλοι βρίσκονται στο στάδιο διερεύνησης. Παράδειγμα αποτελούν οι ακόλουθοι συνδυασμοί:

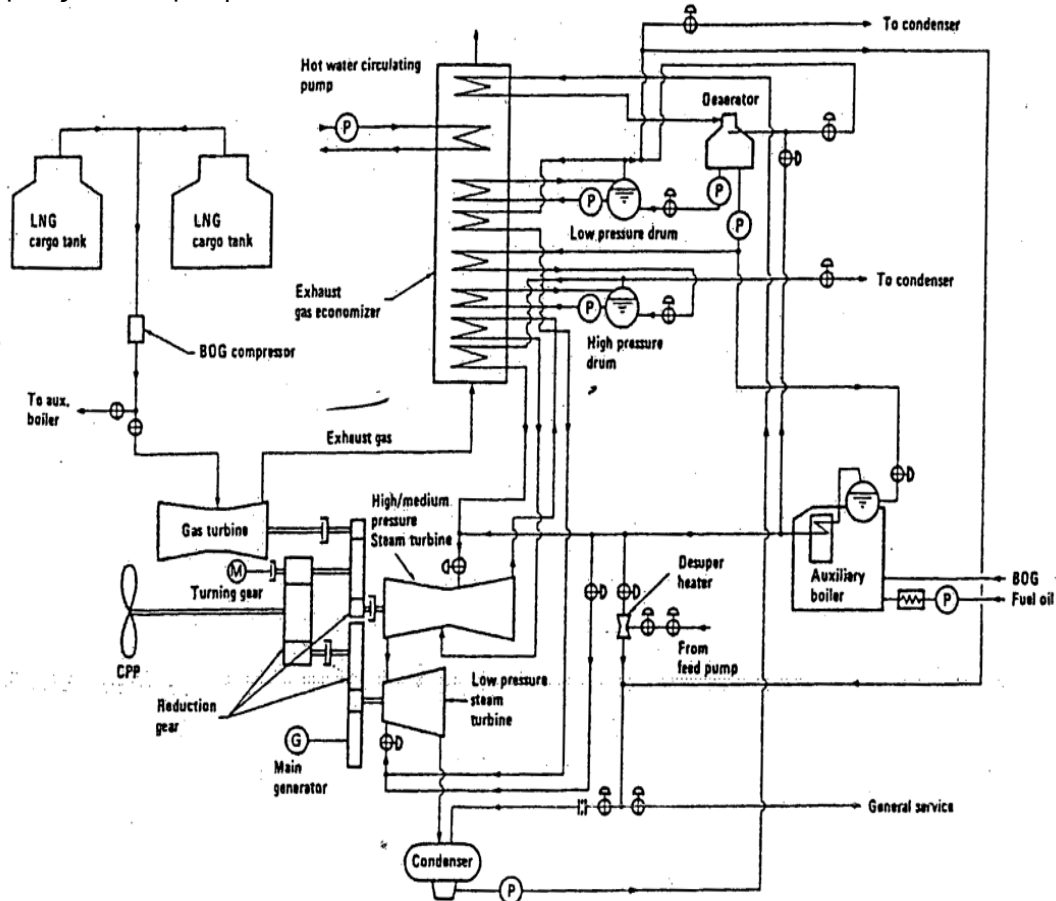
- COGAG: Combined Gas turbine And Gas turbine plant (συνδυασμένο σύστημα αεριοστροβίλου και αεριοστρόβιλου).
- COGOG: Combined Gas turbine Or Gas turbine plant (συνδυασμένο σύστημα αεριοστροβίλου ή αεριοστρόβιλου).
- CODAG: Combined Diesel And Gas turbine plant (συνδυασμένο σύστημα κινητήρα Diesel και αεριοστροβίλου).
- CODOG: Combined Diesel Or Gas turbine plant (συνδυασμένο σύστημα κινητήρα Diesel ή αεριοστροβίλου).
- COSAC: Combined Steam And Gas turbine plant (συνδυασμένο σύστημα ατμού και αεριοστροβίλου).
- COGAS: Combined Gas turbine and Steam plant (συνδυασμένο θερμοδυναμικά σύστημα αεριοστρόβιλου και ατμού).
- COGES: Combine Gas turbine Electric and Steam (συνδυασμένο θερμοδυναμικά σύστημα αεριοστροβίλου και ατμοστροβίλου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για την ηλεκτρική πρόωση του σκάφους).
- CONAG: Combined Nuclear And Gas turbine plant (συνδυασμένο σύστημα πυρηνικής ενέργειας και αεριοστρόβιλου).

Οι σημαντικότεροι λόγοι, για τους οποίους έχουν αναπτυχθεί οι συνδυασμοί αυτοί, είναι ότι [7,8] εξαιτίας του υψηλού κόστους ανάπτυξης, οι αεριοστρόβιλοι κατασκευάζονται σε λίγα διακεκριμένα μεγέθη με αισθητή διαφορά ισχύος από το ένα μέγεθος στο επόμενο. Προκειμένου να ικανοποιηθούν μεγαλύτερες ή ενδιάμεσες απαιτήσεις ισχύος, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί συνδυασμός δύο ή περισσοτέρων μηχανών, όχι αναγκαστικά της ίδιας ισχύος. Σε μικρές ταχύτητες μπορεί να λειτουργεί μόνον η μία μηχανή, ενώ σε μεγαλύτερες ταχύτητες τίθεται σε λειτουργία και η άλλη (ή οι άλλες). Στη λύση αυτή, συνηγορεί το γεγονός ότι ο βαθμός απόδοσης ενός αεριοστροβίλου μικραίνει σημαντικά σε μερικό φορτίο. Έχοντας περισσότερες μηχανές, τίθενται κάθε φορά σε λειτουργία τόσες όσες χρειάζονται, ώστε η κάθε μία να λειτουργεί κοντά στην ονομαστική της ισχύ και επομένως σε περιοχή υψηλού βαθμού απόδοσης.

Στις ονομασίες των συνδυασμών, η λέξη Or (ή) σημαίνει ότι σε μικρές ταχύτητες χρησιμοποιείται μόνον η πρώτη μηχανή (σχετικά μικρής ισχύος) ενώ σε υψηλές ταχύτητες μόνο η δεύτερη, η οποία είναι μεγαλύτερης ισχύος. Η λέξη And (και) σημαίνει ότι για ταχύτητες μεγαλύτερες από αυτές που επιτυγχάνονται με την πρώτη μηχανή, λειτουργεί παράλληλα και η δεύτερη. Ο συνδυασμός COSAG δεν είχε επιτυχή εφαρμογή μέχρι τώρα, κυρίως λόγω του ότι η εγκατάσταση ατμού δεν είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για μικρή ισχύ. Εξάλλου, συστήματα CONAG έχουν μελετηθεί, αλλά δεν έχουν εφαρμοσθεί ακόμη.

Καλύτερες φαίνονται οι προοπτικές για το σύστημα COGAS (θερμοδυναμικός συνδυασμός κύκλου Joule-Brayton με κύκλο Rankine), στον οποίο το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας των καυσαερίων αεριοστροβίλου ανακτάται και παράγεται ατμός που κινεί ατμοστρόβιλο με αποτέλεσμα υψηλές τιμές βαθμού απόδοσης (55-60%). Εάν μάλιστα ο λέβητας καυσαερίων είναι εφοδιασμένος με καυστήρες, τότε το σύστημα διαθέτει πρόσθετη εφεδρεία, καθώς κάθε θερμοδυναμικός κύκλος μπορεί να λειτουργεί και ανεξάρτητα από τον άλλο. Το Σχήμα 4

προέρχεται από σχετική μελέτη και απεικονίζει ένα σύστημα συνδυασμένου θερμοδυναμικά κύκλου αεριοστροβίλου-ατμοστροβίλου, για πρόωση πλοίου μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου, χρησιμοποιώντας δύο βαθμίδες πίεσης για την καλύτερη εκμετάλλευση της ενέργειας των καυσαερίων του αεριοστροβίλου. Το φυσικό αέριο που αναπτόφευκτα εξατμίζεται από τις δεξαμενές μεταφοράς του πλοίου, χρησιμοποιείται ως καύσιμο για την πρόωση. Ενώ σε εγκαταστάσεις στη στεριά τα συστήματα συνδυασμένου θερμοδυναμικά κύκλου αεριοστροβίλου-ατμοστροβίλου είναι πλέον ο κανόνας για μεγάλες τιμές ισχύος (και ιδιαίτερα όταν υπάρχει φυσικό αέριο ως καύσιμο εξαιτίας της θερμογόνου δύναμης του καυσίμου αλλά και της μη σημαντικής παρουσίας ή πλήρους έλλειψης θείου σε αυτό), η εφαρμογή τους στην ναυτιλία δεν είναι ευρέως διαδεδομένη.

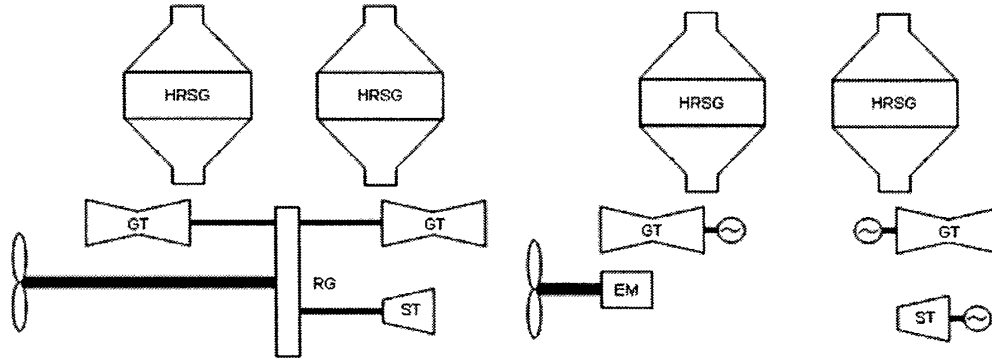


ΣΧΗΜΑ 4. Σύστημα συνδυασμένου κύκλου αεριοστροβίλου –ατμοστροβίλου για πρόωση πλοίου [9]

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΕΠΙΚΡΑΤΕΣΤΕΡΩΝ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΩΝ ΚΥΚΛΩΝ ΣΤΗΝ ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ ΣΗΜΕΡΑ

Η χρήση συνδυασμένων κύκλων σε πλοία συνεπάγεται είτε την απευθείας μετάδοσης της κίνησης από τους αεριοστροβίλους / ατμοστροβίλους στους ελικοφόρους άξονες (COGAS) ή την ηλεκτροπρόωση (COGES) μέσω ηλεκτροκινητήρων των οποίων η ηλεκτρική ισχύς

παράγεται από γεννήτριες που συνδέονται με έναν ή περισσότερους αεριοστρόβιλους και έναν ατμοστρόβιλο. Είναι σαφές ότι στο σύστημα αυτό η μηχανική ενέργεια των στρόβιλων κινεί ηλεκτρικές γεννήτριες που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, που παρέχεται σε ηλεκτροκινητήρα/ες και αυτός/οι με την σειρά του/ς κινούν τον/τους έλικα/κες (Σχήμα 5)



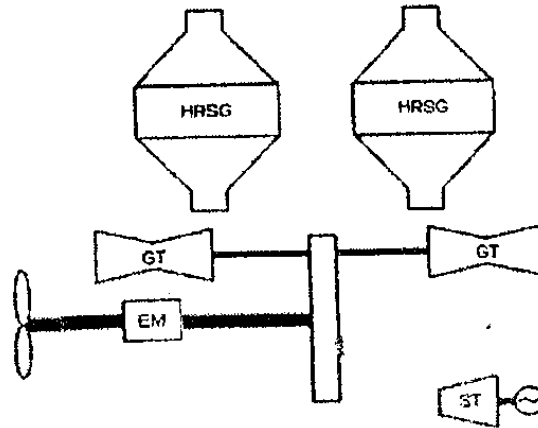
ΣΧΗΜΑ 5. Συνδυασμένος θερμοδυναμικός κύκλος Joule-Brayton / Rankine Σύστημα COGAS (αριστερά) και COGES (δεξιά) [6]

Τα συμβατικά μηχανικά συστήματα πρόωσης έχουν υψηλούς βαθμούς απόδοσης μετάδοσης της κίνησης περίπου 98-99% [10]. Όμως εξαιτίας της υπάρχουσας μηχανικής σύνδεσης συνήθως στερούνται της ευελιξίας να επανακατευθύνουν ή να διανείμουν την ισχύ μεταξύ των αξόνων σε πλοία με πολλούς άξονες. Ακόμη στο σύστημα αυτό η μηχανή πρόωσης δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί εύκολα για την παροχή ενέργειας όταν το πλοίο βρίσκεται σε λιμάνι, αλλά ένα ιδιαίτερο ενεργειακό σύστημα με γεννήτριες πρέπει να εφοδιάσει το πλοίο με ηλεκτρική ενέργεια. Όταν το πλοίο βρίσκεται εν πλώ με την προϋπόθεση ότι η ταχύτητα περιστροφής του άξονα είναι αρκετά σταθερή, η ηλεκτρική ενέργεια για τις διάφορες απαιτήσεις του πλοίου, μπορεί να παραχθεί χρησιμοποιώντας μια εξαρτημένη γεννήτρια ή μία γεννήτρια μεταβλητών στροφών.

Εναλλακτικά η επιλογή της ηλεκτροπρόωσης προσφέρει το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτείται η χρήση ενός ογκώδη και με μεγάλο βάρος μειωτήρα στροφών για την μηχανική σύνδεση των αεριοστρόβιλων που κινούνται με υψηλές ταχύτητες περιστροφής και της αργά στρεφόμενης έλικας. Επιπρόσθετα εφόσον όλες οι γεννήτριες παρέχουν ενέργεια προς ένα κοινό σύστημα διανομής, ένας κινητήρας μπορεί εύκολα να παρέχει ενέργεια σε δύο ή περισσότερους άξονες καθώς επίσης να καλύπτει και άλλες ανάγκες του πλοίου, ενώ παράλληλα προσφέρεται ευελιξία στην επιλογή της θέσης του μηχανοστασίου συγκρινόμενη με σχεδιασμούς, που προβλέπουν απευθείας μετάδοση της κίνησης μεταξύ της κύριας μηχανής και της έλικας. Το μειονέκτημα του συστήματος αυτού είναι ότι η διπλή μετατροπή της ενέργειας (αρχικά η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική στην γεννήτρια και εν συνεχεία, η ηλεκτρική μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια στην έλικα) επιφέρει μειωμένο βαθμό απόδοσης. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία [8], όταν χρησιμοποιείται ηλεκτροπρόωση περίπου 91% της ισχύος της μηχανής φθάνει στην έλικα.

Εναλλακτική έκδοση του προαναφερθέντος συστήματος, είναι να συνδεθούν οι αεριοστρόβιλοι με ένα μειωτήρα για την κίνηση του σκάφους και ο ατμοστρόβιλος με μια γεννήτρια, οπότε προκύπτει ένα υβριδικό σχήμα συνδυασμού COGAS και COGES όπως φαίνεται στο Σχήμα 6. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τον ατμοστρόβιλο χρησιμοποιείται για τις διάφορες ανάγκες του σκάφους καθώς και για την πρόωση μέσω ενός ηλεκτροκινητήρα τοποθετημένου στον ελικοφόρο άξονα. Μία τέτοια διάταξη θα απαιτούσε ένα λιγότερο σύνθετο μειωτήρα, επιφέροντας μείωση του κόστους και πιθανόν, υψηλότερη απόδοση του μειωτήρα.

Η επιλογή ενός από τα συστήματα αυτά καθορίζεται από τις απαιτήσεις του σκάφους. Με το συνδυασμένο κύκλο που οδηγεί το σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης είναι ευκολότερο να επιτευχθούν αποδεκτοί βαθμοί απόδοσης σε μερικό φορτίο, διότι μία ή περισσότερες μονάδες παραγωγής ενέργειας μπορούν να σταματήσουν να λειτουργούν, εφόσον επέρχεται μείωση της ζητούμενης ενέργειας ενώ οι παραμένουσες σε λειτουργία μονάδες, λειτουργούν σε συνθήκες όπου αυτές είναι αποδοτικές (στο πλήρες φορτίο ή κοντά σε αυτό). Γενικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι για πλοία τα οποία απαιτείται να λειτουργούν για μικρό χρονικό διάστημα σε χαμηλή ισχύ και έχουν υψηλές απαιτήσεις ισχύος, το σύστημα άμεσης μετάδοσης είναι η προτιμητέα επιλογή, ενώ το σύστημα της ηλεκτροπρόωσης είναι η προτιμητέα επιλογή για τα πλοία που λειτουργούν τον περισσότερο χρόνο σε μερικό φορτίο [10].



ΣΧΗΜΑ 6. Συνδυασμένος θερμοδυναμικά κύκλος Joule-Brayton/Rankine. Συνδυασμός COGAS και COGES [10]

ΟΙ ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΣΑΝ ΠΡΩΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΕ ΠΛΟΙΑ

Η εισαγωγή συνδυασμένων θερμοδυναμικά κύκλων ως προωστήριων μηχανών επηρεάζει ένα σύνολο από διάφορα ζητήματα. Στην συνέχεια αναπτύσσονται τα θέματα αυτά και υπογραμμίζονται οι διαφορές σε σύγκριση με τις μηχανές Diesel.

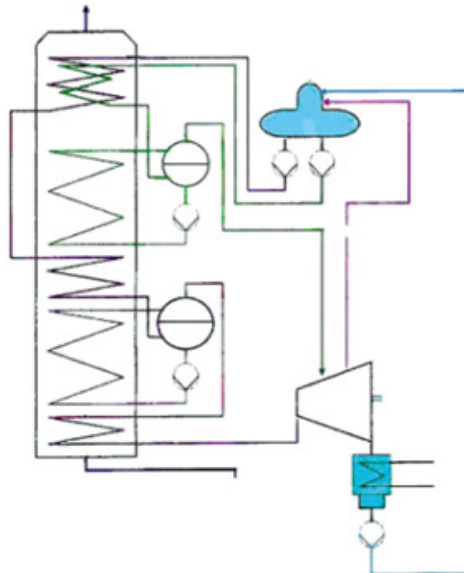
Η απόδοση της εγκατάστασης

Σε προηγούμενη παράγραφο παρουσιάστηκε η θεωρητική αύξηση του βαθμού απόδοσης μίας απλής αεριοστροβιλικής εγκατάστασης συνδυάζοντάς την με ένα κύκλο βάσης (Rankine). Για να υπάρχει μία εκτίμηση της ρεαλιστικά εφικτής αύξησης του βαθμού απόδοσης χρησιμοποιώντας δεδομένα από υφιστάμενες εγκαταστάσεις πρόωσης, στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα θεωρητικού μοντέλου [7], όπου συγκρίνονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή συνδυασμένου κύκλου σε υφιστάμενη μεγάλη δίχρονη μηχανή Diesel και σε αεριοστροβιλική εγκατάσταση. Τέσσερις διαφορετικοί τύποι αεριοστροβίλων εξετάζονται: CYCLON, GTX100, GT10B, LM2500 και GT35 με αποδόσεις ισχύος ανά μονάδα από 12.9 MW έως 43 MW.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3. Σύγκριση βαθμού απόδοσης διάφορων συνδυασμένων κύκλων (Rankine bottom cycle) αεριοστροβιλικών και αργόστροφων δίχρονων κινητήρων Ντήζελ, στο πλήρες φορτίο [7].

Type of Gas Turbine or Diesel Engine	N_{GT} or N_D	m_{GT} or m_D	No. of Units	Total Power	t_4 or $t_{exhaust}$	n_{GT} or n_D	be_{GT} or be_D	n_{CC}	be_{CC}	$t_{exhaust}$
	kW	kg/s			°C	-	g/kWh			
Gas Turbine								Gas Turbine		
CYCLON	12900	39.7	4	51600	570	0.340	248.0	0.5067	166.4	139
GTX100	43000	122.0	1	43000	546	0.370	227.9	0.5208	161.9	139
GT10B	24400	80.4	2	48800	538	0.347	243.0	0.5051	166.9	135
LM2500	22400	68.0	1	44800	528	0.365	230.9	0.5123	164.6	135
GT35	17000	92.3	3	51000	378	0.320	263.5	0.4311	195.6	131
Diesel Engine								Diesel Engine		
9K98MC	48762	134.25	1	48762	232.8	0.482	174.9	0.5089	165.7	131
9RTA96C	46332	104.50	1	46332	271.0	0.506	166.8	0.5398	156.2	131

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 3, επιλέγεται ικανό πλήθος από κάθε ένα από τους υπό εξέταση τύπους αεριοστροβίλων, ώστε η συνολική ισχύς να είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την ισχύ ενός μεγάλου δίχρονου κινητήρα Diesel που αποτελεί την κυρίαρχη επιλογή πρόωσης για μεγάλου μεγέθους πλοία. Όσο αφορά τον κινητήρα Diesel, δύο τύποι εξετάζονται (9K98MC και 9RTA96C) με παραπλήσια ισχύ της τάξης των 46÷48 MW. Ο βαθμός απόδοσης των αεριοστροβιλικών εγκαταστάσεων είναι της τάξης του 32%÷37%, ενώ ο αντίστοιχος των κινητήρων Diesel είναι 48%÷50%, δηλ. 35%÷50% υψηλότερος. Για την θεωρητική διερεύνηση της δυνατότητας μείωσης αυτής της διαφοράς που παρατηρείται ανάμεσα στους βαθμούς απόδοσης των αεριοστροβίλων και των κινητήρων Diesel, στην μελέτη [7] εξετάστηκε θεωρητικά η προσθήκη διβάθμιου κύκλου βάσης Rankine και στους δύο τύπους κινητήρων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.



ΣΧΗΜΑ 7. Διβάθμιος κύκλος βάση Rankine ατμού που προστίθεται σε αεριοστροβιλικό ή Diesel κινητήρα [7]

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 3. Σημειώνεται ότι στις αεριοστροβιλικές εγκαταστάσεις λόγω των σημαντικά υψηλότερων θερμοκρασιών που παρατηρούνται στην έξοδο του στροβίλου (370÷570 οC στην συγκεκριμένη ομάδα που εξετάστηκε) ενδείκνυται η ανάκτηση της θερμότητας των καυσαερίων σε δύο βαθμίδες πίεσης. Αντιθέτως, στην περίπτωση των Diesel κινητήρων, παρά το γεγονός ότι στον πίνακα 3 παρουσιάζονται αποτελέσματα από την εφαρμογή διβάθμιου κύκλου βάσης Rankine, στην πραγματικότητα η βελτίωση του συνολικού συντελεστή απόδοσης δεν δικαιολογεί την χρήση περισσότερων της μίας βαθμίδων.

Με την προσθήκη του κύκλου βάσης, ο συνολικός βαθμός απόδοσης των αεριοστροβιλικών εγκαταστάσεων κυμαίνεται μεταξύ 43%÷52%, ο οποίος είναι απόλυτα συγκρίσιμος με τον αντίστοιχο βαθμό απόδοσης των αντίστοιχων κινητήρων Diesel ενώ υπολείπεται λίγο από τον βαθμό απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου Diesel (50%÷54%). Αυτό σημαίνει ότι με τον συνδυασμένο κύκλο οι βαθμοί απόδοσης των αεριοστροβίλων που εξετάστηκαν αυξάνονται κατά 34%÷49%, ενώ των κινητήρων Diesel κατά 5,5%÷6,6%. Εναλλακτικά, θεωρώντας δεδομένη την μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ, παρατηρείται ότι χρησιμοποιώντας συνδυασμένο κύκλο, ένας κινητήρας Diesel θα πρέπει να είναι 1,3÷1,4 φορές μεγαλύτερης ισχύος από τον αντίστοιχο αεριοστροβιλικό κινητήρα (λόγω της σημαντικά υψηλότερης συνεισφοράς του κύκλου βάσης στην συνολικά αποδιδόμενη ισχύ). Αυτά τα στοιχεία είναι σημαντικά, και καταδεικνύουν ότι με την υφιστάμενη περιβαλλοντική νομοθεσία, ο συνδυασμένος κύκλος Joule-Brayton / Rankine αποτελεί μία ενδιαφέρουσα εναλλακτική, ειδικά συνεκτιμώντας και τα εγγενή πλεονεκτήματα που διαθέτει μία αεριοστροβιλική εγκατάσταση σε σχέση με ένα κινητήρα Diesel τα οποία αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

Θεώρηση του βάρους και του όγκου

Η συγκέντρωση ισχύος των αεριοστροβίλων είναι πολύ υψηλή, ειδικά σε σύγκριση με τις μηχανές Diesel καθιστώντας κατ' αυτόν τον τρόπο τις απαιτήσεις για χώρο μίας αεριοστροβιλικής εγκατάστασης χαμηλές. Ο εξοικονομούμενος χώρος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αυξήσει την χωρητικότητα του πλοίου σε φορτίο ή σε αριθμό επιβατών. Επιπρόσθετα για ένα δεδομένο επίπεδο ισχύος, το βάρος της εγκατάστασης που αποτελείται από αεριοστροβίλους είναι μικρότερο από το αντίστοιχο των μηχανών Diesel. Το μειωμένο βάρος της κύριας μηχανής είναι πλεονέκτημα, καθ' όσον μειώνει το εκτόπισμα του πλοίου, με αποτέλεσμα να μειώνονται αντίστοιχα και οι απαιτήσεις ισχύος πρόωσης, με άμεσο οικονομικό πλεονέκτημα. Βέβαια θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι στην περίπτωση του συνδυασμένου κύκλου (με προσθήκη κύκλου Rankine) οι απαιτήσεις σε χώρο και βάρος αυξάνονται σε σχέση με τις συμβατικές διατάξεις των αεριοστροβίλων. Για την όσο το δυνατό μεγαλύτερη εκμετάλλευση του διαθέσιμου χώρου, το σύστημα ανάκτησης θερμότητας μπορεί να τοποθετηθεί μέσα στη καπνοδόχο και όχι εντός του μηχανοστασίου όπως συμβαίνει με τα συμβατικά σκάφη, που ανακτούν την θερμότητα από τις εξαγωγές των μηχανών Diesel.

Τα πλεονεκτήματα ως προς τις απαιτήσεις βάρους και όγκου της εγκατάστασης COGES σε σχέση με το σύστημα Diesel-electric, που είναι η παραδοσιακή επιλογή για τα περισσότερα κρουαζιερόπλοια, φαίνονται στο πλοίο Millennium [12]. Σαν συνέπεια των μικρότερων απαιτήσεων σε χώρο του συστήματος COGES που εγκαταστάθηκε στο συγκεκριμένο κρουαζιερόπλοιο, ελευθερώθηκε χώρος για 50 επιπρόσθετες καμπίνες. Σε σχέση με τις απαιτήσεις ισχύος του ίδιου του συστήματος, το σύστημα COGES απαιτεί μικρότερο βοηθητικό εξοπλισμό μεγέθους περίπου 500 KW. Επιπρόσθετα εξαιτίας του μειωμένου βάρους της εγκατάστασης COGES, το εκτόπισμα του πλοίου μειώθηκε κατά 1000 tons, επιφέροντας μία μείωση της ισχύος πρόωσης κατά 1,6%. Συνολικά οι απαιτήσεις ισχύος του πλοίου μειώθηκαν κατά 1150 KW.

Το κόστος

Βασιζόμενοι σε προηγούμενες μελέτες είναι δύσκολο να παρουσιασθούν αξιόπιστα οικονομικά στοιχεία, που αφορούν το κόστος των εγκαταστάσεων συνδυασμένου κύκλου. Σε σχέση με το αρχικό κόστος τους, όταν συγκρίνονται μηχανές για κρουαζιερόπλοια ο Koehler [13] ισχυρίζεται ότι αυτό είναι χαμηλότερο για μηχανές Diesel, ενώ ο Ahlqvist [14] συμπέρανε ότι αυτό είναι παρόμοιο μεταξύ Diesel και συνδυασμένου κύκλου. Οι μηχανές Diesel καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες λαδιού λίπανσης, ενώ οι αεριοστρόβιλοι καταναλώνουν μόνο πολύ μικρές ποσότητες, τυπικά 1% της κατανάλωσης των μηχανών Diesel [13].

Αυτό είναι πλεονέκτημα για το λειτουργικό κόστος των αεριοστροβίλων, αλλά το πλεονέκτημα αυτό είναι αρκετά μικρό εξαιτίας του γεγονότος ότι το κόστος του λαδιού λίπανσης είναι μόνο μικρό τμήμα του συνολικού λειτουργικού κόστους. Όταν συγκριθούν οι μεσόστροφες μηχανές Diesel, με τον συνδυασμένο κύκλο αεριοστροβίλου με ηλεκτρική μετάδοση (COGES) οι Domachowski και Dzida [15] υπολογίζουν ότι το ειδικό κόστος ισχύος είναι 12% μικρότερο για τον συνδυασμένο κύκλο. Οι τιμές αυτές προήλθαν υποθέτοντας ότι οι δύο μηχανές λειτουργούν με καύσιμο MDO (Marine Diesel Oil), κάτι το οποίο υπό της παρούσες συνθήκες όσο αφορά την νομοθεσία για τις εκπομπές ρύπων αποτελεί ρεαλιστικό σενάριο. Ο Koehler [13] δεν ποσοτικοποιεί την διαφορά, αλλά ισχυρίζεται ότι το λειτουργικό κόστος είναι υψηλότερο για τους συνδυασμένους κύκλους. Η εμπειρία δείχνει ότι η απαιτούμενη συντήρηση από το πλήρωμα για τον συνδυασμένο κύκλο είναι σημαντικά μικρότερη από ένα τυπικά ντιζελοκίνητο σκάφος [11]. Επιπρόσθετα η modular κατασκευή των συστημάτων με αεριοστροβίλους κάνει γρήγορη την αντικατάσταση των μερών που έχουν υποστεί βλάβη.

Θέματα λειτουργίας και εκκίνησης

Το γεγονός ότι οι αεριοστρόβιλοι γενικά δεν είναι αναστρέψιμες μηχανές ενώ οι μηχανές Diesel μπορεί να είναι, σε ορισμένες περιπτώσεις, έχει επίδραση στη δυνατότητα κινήσεων του σκάφους. Όμως σε ένα αεριοστρόβιλο με συνδυασμένο θερμοδυναμικά κύκλο και ηλεκτρική μετάδοση δεν υπάρχει μειονέκτημα, επειδή η ηλεκτρική μηχανή που παρέχει ενέργεια στον έλικα είναι αναστρέψιμη. Δεν υπάρχει επίσης μειονέκτημα στον συνδυασμένο κύκλο με απευθείας μετάδοση στον έλικα γιατί για τέτοιες διατάξεις υπάρχουν διατάξεις οδοντωτών τροχών ανάστροφης μετάδοσης (reversible transmission gears) ή μπορούν να χρησιμοποιηθούν έλικες μεταβαλλόμενου βήματος [15]. Και οι δύο τύποι μηχανών έχουν δείξει ότι έχουν αξιόπιστη λειτουργία και δεν υπάρχει προφανές πλεονέκτημα για κάποιον από τους δύο τρόπους πρόωσης ως προς το θέμα αυτό.

Εξαιτίας των υψηλών συχνοτήτων των αεριοστροβίλων (οι οποίες αποσβένονται πιο εύκολα από ότι οι χαμηλές συχνότητες), οι δονήσεις των αεριοστροβίλων είναι χαμηλότερες από αυτές των μηχανών Diesel. Επιπρόσθετα το επίπεδο θορύβου είναι μικρότερο στους αεριοστροβίλους. Από την άλλη πλευρά, οι μηχανές Diesel ανταποκρίνονται γρηγορότερα σε μία μεταβολή του φορτίου σε σχέση με τους αεριοστρόβιλους με συνδυασμένο κύκλο [13]. Οι μεγάλες αργόστροφες μηχανές ντίζελ μπορούν να επιταχύνουν από 0% σε 30÷40% φορτίο σε μερικά δευτερόλεπτα, όμως η εναπομένουσα επιτάχυνση μέχρι το πλήρες φορτίο απαιτεί σημαντικά περισσότερο χρόνο. Τυπικά όταν τέτοιες μηχανές χρησιμοποιούνται για πρόωση επιταχύνουν από μηδενικό μέχρι το πλήρες φορτίο σε περίπου 0,5÷1 h. Στη θεωρία, αυτό μπορεί να γίνει πολύ γρηγορότερα, αλλά αποφεύγεται γιατί θα προκαλέσει υψηλές θερμικές τάσεις.

Ένας αεριοστρόβιλος τυπικά χρειάζεται περίπου πέντε δευτερόλεπτα για να επιταχύνει από μηδενικό σε πλήρες φορτίο [16]. Επομένως περίπου τα δύο τρίτα της ισχύος ενός συνδυασμένου κύκλου μπορεί να ληφθεί εντός αυτού του χρονικού διαστήματος. Η ισχύς που απομένει και που έρχεται από τον ατμοστρόβιλο χρειάζεται περισσότερο χρόνο. Όμως εξαιτίας

της αδράνειας που παρουσιάζουν τα μεγάλα πλοία, ο χρόνος επιτάχυνσης της μηχανής γενικά δεν είναι κρίσιμος [16].

Ο χρόνος εκκίνησης εξαρτάται πολύ από το εάν τα μέρη της μηχανής είναι κρύα ή ζεστά πριν την εκκίνηση ειδικά για τους συνδυασμένους κύκλους. Πρακτικά οι μηχανές Diesel που χρησιμοποιούνται για την πρόωση των πλοίων δεν επιτρέπεται να κρυώσουν (δηλαδή να αποκτήσουν θερμοκρασία περιβάλλοντος). Όταν το πλοίο δεν βρίσκεται σε υπηρεσία, οι μηχανές διατηρούνται στη πρόωσα θερμοκρασία χρησιμοποιώντας το νερό ψύξης. Η θερμοκρασία του νερού ψύξης είναι αυτή που χρησιμοποιείται φυσιολογικά κατά την διάρκεια της λειτουργίας των μηχανών. Το νερό ψύξης θερμαίνεται από τα καυσαέρια των βοηθητικών μηχανών (συνήθως τετράχρονοι μηχανές Diesel) που χρησιμοποιούνται ως ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη. Από την κατάσταση αυτή, το πλήρες φορτίο μπορεί να επιτευχθεί εντός 1h χωρίς να υπάρξει υπέρβαση των θερμικών τάσεων των υλικών.

Ο χρόνος εκκίνησης των αεριοστροβίλων εξαρτάται από τον χρόνο αδράνειας του στροβίλου (ανενεργός), ενώ ο χρόνος εκκίνησης του κύκλου ατμού εξαρτάται από τον χρόνο που απαιτείται για να θερμανθούν τα μέρη της μηχανής χωρίς να γίνει υπέρβαση των θερμοκρασιών που επιβάλλονται από το υλικό. Ο Kehlofer [17] αναφέρει ότι για αεριοστροβίλους που χρησιμοποιούνται σε μεγάλους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη ξηρά σε συνδυασμένους θερμοδυναμικά κύκλους, χρειάζονται λιγότερο από 30min από την στιγμή που έχει ενεργοποιηθεί η διαδικασία εκκίνησης μέχρις ότου ο στροβίλος φθάσει στο πλήρες φορτίο. Για ναυτικούς αεριοστροβίλους ένας χρόνος εκκίνησης μικρότερος των 90s είναι καθοριστικός [16]. Μια γρήγορη εκκίνηση των αεριοστροβίλων της εγκατάστασης COGES που παρέχει ισχύ στο κρουαζιερόπλοιο Millennium απαιτεί τυπικά 3min ή λιγότερο για να επιτευχθεί η επιθυμητή ταχύτητα περιστροφής σε άφορτη λειτουργία (synchronous idle), μετά το οποίο, το φορτίο μπορεί να παραληφθεί εντός μερικών δευτερολέπτων [11]. Με βάση τα στοιχεία αυτά χρόνοι εκκίνησης κάτω από 10min για στροβίλους που προορίζονται για ναυτικούς συνδυασμένους θερμοδυναμικά κύκλους θεωρούνται ρεαλιστικοί.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι ισχύοντες και μελλοντικοί κανονισμοί που αφορούν τις εκπομπές ρύπων καθώς και τα όρια που έχουν τεθεί όσο αφορά την περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο, τείνουν να ανατρέψουν την κυριαρχία των μεγάλων δίχρονων κινητήρων Diesel σε ορισμένους τύπους πλοίων και αναδεικνύεται ως τεχνικοοικονομικά δελεαστική η εγκατάσταση σύγχρονων αεριοστροβιλικών εγκαταστάσεων συνδυασμένων με κύκλο βάσης Rankine. Όταν χρησιμοποιείται συνδυασμένος θερμοδυναμικά κύκλος ως πρωωστήρια μηχανή σε πλοία, αυτός μπορεί να κινήσει τους ελικοφόρους άξονες μέσω των αεριοστροβίλων (COGAS) ή μπορεί να χρησιμοποιηθεί στροβιλοηλεκτρική πρόωση (COGES). Σε πλήρες φορτίο το σύστημα COGAS παρέχει υψηλότερο ολικό βαθμό απόδοσης αφού ο βαθμός απόδοσης του συστήματος μετάδοσης κίνησης είναι υψηλότερος σε σχέση με το σύστημα COGES. Όμως με το σύστημα COGES είναι ευκολότερο να ληφθεί ικανοποιητική απόδοση σε μερικό φορτίο, επειδή μία ή περισσότερες από τις μονάδες παραγωγής ενέργειας μπορεί να απενεργοποιηθεί επιτρέποντας να λειτουργούν οι εναπομένουσες μονάδες σε υψηλό φορτίο. Τέλος, είναι δυνατό οι δύο αυτές τεχνικές να συνδυασθούν συνδέοντας τους αεριοστροβίλους με τον μειωτήρα στροφών και τον ατμοστροβίλο με μία γεννήτρια.

Σε κάθε περίπτωση είναι φανερό ότι τα αεριοστροβιλικά συστήματα συνδυασμένου κύκλου, προσφέρουν μία σειρά από πλεονεκτήματα για πολλούς τύπους σκαφών, χωρίς να υπολείπονται όσο αφορά τον ολικό βαθμό απόδοσης σε σύγκριση με τους συμβατικούς κινητήρες Diesel. Η τελική επιλογή θα πρέπει να λάβει υπόψη τις ειδικές ανάγκες κάθε σκάφους, το επιχειρησιακό του προφίλ αλλά και την περιοχή στην οποία προβλέπεται να δραστηριοποιηθεί.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. United Nations International Maritime Organization. IMO and the Environment 2011.
2. Eyringer V, Kohler HW, Lauer A, Lemper B. Emissions from international shipping: 2 impact of future technologies on scenarios until 2050. *J. Geophys Res* 2005; 110:D17306.
3. Trozzi C. (2010). Update of Emission Estimate Methodology for Maritime Navigation , Techne Consulting report ETC.EF.10 DD, May 2010
4. Entec (2005), European Commission, Directorate General Environment Service Contract on Ship Emissions: Assignment, Abatement and Market-based Instruments, Task 1 - Preliminary Assignment of Ship Emissions to European Countries , Final Report, August 2005
5. IMO. MARPOL, Consolidated Edition 2006, MARPOL Annex VI: Regulations for the prevention of air pollution from ships. London: International Maritime Organization, 2006.
6. Horlock j. H., Eng. F. R. and F.S.R (2003). *Advance Gas Turbine Cycles*. ELSEVIER SCIENCE Ltd, British, ISBN: 0-08-044273-0.
7. Dzida M., Olszewski W., Comparing combined gas turbine/steam turbine and marine low speed piston engine/steam turbine systems in naval applications. *Polish Maritime Research* 4(71) 2011 Vol. 18
8. Haglind Fredrik. A review on the use of gas and steam turbine combine cycle as prime movers for large ships. Part I: Background and design. *Energy Conversion and Management* 49 (2008), 3458-3467.
9. Χ. Αθ. Φραγκόπουλος. Ενεργειακά συστήματα πλοίων. Εκδόσεις ΕΜΠ. Αθήνα 2009.
10. Shipping World and Shipbuilder. Gas turbine system integration. *Shipping World and Shipbuilder* 2002, 203:21-23.
11. Sannemann BN. Pioneering gas turbine-electric system in cruise ships: a performance update. *Marine Technology* 2004, 41:161-6.
12. Tinsley D. Seminal gas turbine application arrives in Millennium cruise class COGES plant. *Marine Propulsion Int* 2000: 14-5.
13. Koehler H. Diesel engines and gas turbines for cruise vessels. *Ship World Shipbuild* 2001;205:14-7.
14. Ahlqvist I. Increasing availability through introduction of redundancy. In: *Papers and programme: electric propulsion, the effective solution*. The institute of Marine Engineers; 5-6 October 1995.
15. Domachowski Z. Dzida M. An analysis of characteristics of ship gas turbine propulsion system in the light of the requirements for ship operation in the Baltic Sea). *Pol Marit Res* 2004: 73-78 [special issue].
16. Walsh PP, Fletcher P. *Gas turbine performance*. London: Blackwell Science Ltd; 1998.
17. Kehlhofer RH. Warner J. Nielsen H, Bachmann R. *Combined-cycle gas and steam turbine power plants: 2nd ed*. Tulsa, Oklahoma: PennWell; 1999.