



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧ. & ΜΗΧ.
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚ. ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ ΓΙΑ ΜΕΛΕΤΕΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΣΗΕ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χαράλαμπος Γ. Ζήρας

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2009



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧ. & ΜΗΧ.
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚ. ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ ΓΙΑ ΜΕΛΕΤΕΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΣΗΕ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χαράλαμπος Γ. Ζήρας

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 9^η Οκτωβρίου 2009

.....
Κ. Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γ. Κορρές
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Π. Γεωργιάκης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2009

.....
Χαράλαμπος Γ. Ζήρας

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

Copyright © Χαράλαμπος Γ. Ζήρας 2009

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μοντέλων αεριοστροβίλων στο Simulink του Matlab κατάλληλων για μελέτες ευστάθειας συχνότητας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα αναπτύχθηκε η αρχή λειτουργίας και ελέγχου ενός αεροφυλακίου που αποθηκεύει συμπιεσμένο αέρα. Στη συνέχεια σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένα μοντέλο αεριοστροβίλου με χρήση ενός τέτοιου αεροφυλακίου – αφού επελέχθησαν οι κατάλληλες τιμές των παραμέτρων λειτουργίας – και μελετήθηκε η συμπεριφορά της μονάδας σε απομονωμένη λειτουργία. Διαπιστώθηκε ότι το μοντέλο λειτουργεί ικανοποιητικά ενώ έγιναν φανερά τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής. Το πρώτο είναι η δυνατότητα μεταβατικής αύξησης της ισχύος του αεριοστροβίλου ανάλογα με το μέγεθος του αεροφυλακίου. Το δεύτερο είναι η δυνατότητα περιορισμού των μεταβατικών υποσυχνοτήτων και η βελτίωση της απόκρισης συχνότητας.

Υλοποιήθηκε επίσης ένα μοντέλο αεριοστροβίλου διπλού άξονα, όπου πλέον τα καυσάερια παράγονται από μια αεριογόνο μηχανή και εκτονώνονται σε ένα στρόβιλο ισχύος – που περιστρέφεται με διαφορετική ταχύτητα από την αεριογόνο – παράγοντας την ωφέλιμη ισχύ. Αναπτύχθηκαν λεπτομερείς θερμοδυναμικές σχέσεις που περιγράφουν τη λειτουργία του και σχεδιάστηκε το σύστημα ελέγχου του. Επίσης υλοποιήθηκε η λειτουργία της αεριογόνου του αεριοστροβίλου διπλού άξονα και ο έλεγχος της ταχύτητάς της. Αφού επελέχθησαν οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου, εξετάστηκε η επίδραση της αδράνειας του άξονα της γεννήτριας και δείχτηκε ότι η αύξηση της τιμής της – σε απομονωμένη λειτουργία – βελτιώνει την απόκριση συχνότητας σε απότομη μεταβολή του φορτίου. Επίσης επανασχεδιάστηκε ο ρυθμιστής στροφών του μοντέλου και το σύστημα καυσίμου ώστε να βελτιωθεί περαιτέρω η απόκριση συχνότητας. Μετά τις απαραίτητες βελτιώσεις διαπιστώθηκε ότι το μοντέλο λειτουργεί ικανοποιητικά και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μελέτες ευστάθειας συχνότητας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Λέξεις κλειδιά

Μοντέλα αεριοστροβίλων, προσομοίωση συστήματος, ευστάθεια συχνότητας, ρύθμιση συχνότητας, αεριοστρόβιλος διπλού άξονα, αεροφυλάκιο

Abstract

The subject of this diploma thesis is the development of dynamic models for gas turbines in the Simulink environment of Matlab which can be used for frequency stability power systems studies. In particular, the concept and control system of a compressed air chamber is introduced. A gas turbine model which incorporates such an air chamber was designed and implemented and – after the proper values of its parameters were chosen – its behavior was examined considering autonomous operation. The model was found to function satisfactorily and the advantages of this method were shown. The first is the capability of transient increase of the gas turbine mechanical power depending on the size of the air chamber. The second is the capability of reducing the transient frequency drops and the improvement of the frequency response.

The model of an aeroderivative gas turbine was also developed. The difference from a gas turbine is that a gas generator produces the necessary exhaust gases which are expanded on a power turbine (which rotates at a different speed) to produce the useful power. Detailed thermodynamic relations, which describe the operation of the unit, were developed and its control system was designed. Additionally, the operation of the gas turbine was implemented as well as the control of its speed. After the proper values of the model's parameters were chosen, the effect of the inertia of the generator-power turbine shaft was examined and it was shown that its increase (in autonomous operation) improves the frequency response in a rapid change of the load. The governor and fuel system were also redesigned in order to further improve the frequency response. After the necessary improvements it was shown that the model functions satisfactorily and it can be used for frequency stability power systems studies.

Key words

gas turbine models, system simulation, frequency stability, frequency control, aeroderivative gas turbine, gas chamber

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Κωνσταντίνου Δ. Βουρνά, καθηγητή της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ, τον οποίο ευχαριστώ θερμά για τις πολύτιμες υποδείξεις του, την καθοδήγησή του και τις πολλές ώρες που αφιέρωσε κατά τη διάρκεια της εργασίας αυτής. Η άρτια επιστημονική του κατάρτιση και η απαιτητικότητά του συνέβαλλαν καθοριστικά στο αποτέλεσμα.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα ΕΜΠ και διπλωματούχο ηλεκτρολόγο μηχανικό Ι. Μάντζαρη για τις συμβουλές και τη βοήθειά του, όπως και τη ΔΕΗ ΑΕ και συγκεκριμένα τους μηχανικούς της Διεύθυνσης Εκμετάλλευσης Παραγωγής ΑΗΣ Χανίων για την άψογη συνεργασία τους και ξενάγηση κατά την επίσκεψή μας στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος “Ανάπτυξη μοντέλων για τη δυναμική προσομοίωση αυτόνομων νησιωτικών συστημάτων με παρουσία μονάδων ΑΠΕ και την εκτίμηση του ορίου ασφαλούς αιολικής διείσδυσης”.

Τέλος ευχαριστώ την οικογένειά μου που πάντα βρίσκεται στο πλευρό μου στηρίζοντάς με.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1 ^ο : Εισαγωγή	13
1.1 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας	13
1.2 Οι θερμικές μονάδες παραγωγής στα ΣΗΕ	14
1.3 Ευστάθεια ΣΗΕ.....	16
1.4 Περιγραφή δυναμικών συστημάτων	16
1.4.1 Γραμμικοποίηση δυναμικών συστημάτων	18
1.4.2 Ιδιοτιμές δυναμικού συστήματος	19
1.4.3 Ιδιοδιανύσματα	20
1.4.4 Μετασχηματισμός ομοιότητας.....	21
1.4.5 Ρυθμοί απόκρισης	21
1.4.6 Η ευαισθησία των ιδιοτιμών και η έννοια του συντελεστή συμμετοχής	23
1.5 Ρύθμιση φορτίου συχνότητας.....	25
1.5.1 Γενικά περί ρύθμισης φορτίου συχνότητας.....	25
1.5.2 Πρωτεύουσα ρύθμιση και στατισμός	26
1.5.3 Δευτερεύουσα ρύθμιση	28
1.6 Ανασκόπηση βιβλιογραφίας.....	29
1.7 Σκοπός και δομή της εργασίας	30
Κεφάλαιο 2 ^ο : Αρχές Θερμοδυναμικής.....	33
2.1 Εισαγωγή	33
2.2 Ορισμός τέλει αερίου	33
2.3 Πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα.....	34
2.3.1 Κλειστό θερμοδυναμικό σύστημα.....	34
2.3.2 Ανοικτό θερμοδυναμικό σύστημα.....	35
2.4 Δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα	38
2.5 Μερικές συνήθεις μεταβολές.....	39
2.5.1 Ισόθερμη μεταβολή	40
2.5.2 Ισοβαρής μεταβολή	41
2.5.3 Ισόχωρη μεταβολή	42
2.5.4 Αδιαβατική μεταβολή.....	43
2.6 Σχέσεις ολικών και στατικών μεγεθών	44
2.7 Υπολογισμός μεταβολών κατάστασης για μεταβλητό c_p	45
Κεφάλαιο 3 ^ο : Θερμικές στροβιλομηχανές	47

3.1 Εισαγωγικά	47
3.2 Κατηγορίες στροβιλομηχανών	47
3.3 Αρχές ρευστομηχανικής.....	50
3.3.1 Θεώρημα του Euler στις στροβιλομηχανές	50
3.3.2 Σχετικό σύστημα αναφοράς.....	53
3.3.3 Τρίγωνα ταχυτήτων	56
3.3.4 Μονοδιάστατη ανάλυση στροβιλομηχανών	57
3.4 Συμπίεστες.....	58
3.4.1 Γενικά	58
3.4.2 Μεταβολές κατάστασης σε βαθμίδα συμπίεστή και βαθμοί απόδοσης	59
3.4.3 Λειτουργική συμπεριφορά πολυβάθμιου αξονικού συμπίεστή	62
3.5 Στρόβιλοι	63
3.5.1 Γενικά	63
3.5.2 Μεταβολές κατάστασης σε βαθμίδα συμπίεστή και βαθμοί απόδοσης	64
3.6 Θάλαμος Καύσης	67
3.6.1 Γενικά	67
3.6.2 Βαθμός απόδοσης της καύσης	69
3.6.3 Απώλειες πίεσης.....	69
3.7 Θερμοδυναμικός κύκλος αεριοστροβίλου.....	70
3.7.1 Ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος αεριοστροβίλου.....	70
3.7.2 Πραγματικός θερμοδυναμικός κύκλος αεριοστροβίλου	71
Κεφάλαιο 4 ^ο : Παράσταση μοντέλων αεριοστροβίλων για μελέτη ευστάθειας ΣΗΕ	73
4.1 Μοντέλο αεριοστροβίλου απλού άξονα.....	73
4.1.1 Συμπίεστής.....	74
4.1.2 Θάλαμος καύσης	75
4.1.3 Στρόβιλος.....	76
4.1.4 Αλγεβρικές εξισώσεις θερμοδυναμικού συστήματος	77
4.2 Διατάξεις ελέγχου και συναρτήσεις μεταφοράς.....	80
4.2.1 Εξισώσεις ενεργειακής μετατροπής	82
4.2.2 Δυναμική αεριοστροβίλου	82
4.2.3 Μηχανικό μοντέλο γεννήτριας.....	83
4.2.4 Ρυθμιστής στροφών.....	84
4.2.5 Έλεγχος καυσίμου	86

4.2.6 Μετρητής θερμοκρασίας (μορφοτροπέας)	87
4.2.7 Έλεγχος υπερθέρμανσης.....	88
4.2.8 Έλεγχος της ροής του αέρα (οδηγά πτερύγια εισόδου).....	89
4.2.9 Έλεγχος επιτάχυνσης.....	90
4.3 Ανάπτυξη μοντέλου αεριοστροβίλου απλού άξονα με αεροφυλάκιο	91
4.3.1 Αναγκαιότητα και μέθοδοι μεταβατικής αύξησης ισχύος αεριοστροβίλου	91
4.3.2 Περιγραφή της μεθόδου μεταβατικής αύξησης της ισχύος με χρήση αεροφυλακίου	92
4.4 Μοντέλο αεριοστροβίλου διπλού άξονα	95
4.4.1 Εισαγωγή στους αεριοστροβίλους διπλού άξονα	95
4.4.2 Θερμοδυναμικές σχέσεις του μοντέλου διπλού άξονα	97
4.4.3 Λειτουργία και διατάξεις ελέγχου του μοντέλου διπλού άξονα	102
4.4.4 Λεπτομερείς θερμοδυναμικές σχέσεις του μοντέλου διπλού άξονα	104
Κεφάλαιο 5 ^ο : Προσομοίωση λειτουργίας αεριοστροβίλου απλού άξονα με αεροφυλάκιο	107
5.1 Υλοποίηση μοντέλου αεριοστροβίλου απλού άξονα στο Simulink	107
5.1.1 Παράσταση μοντέλου αεριοστροβίλου απλού άξονα στο Simulink.....	107
5.1.2 Δεδομένα	114
5.1.3 Αρχικοποίηση μοντέλου	116
5.2 Υλοποίηση του αεροφυλακίου στο Simulink.....	118
5.2.1 Περιγραφή και παρουσίαση του αεροφυλακίου στο Simulink.....	118
5.2.2 Επιλογή παραμέτρων και σχολιασμός.....	121
5.3 Προσομοίωση με χρήση αεροφυλακίου και σχολιασμός.....	122
Κεφάλαιο 6 ^ο : Προσομοίωση λειτουργίας αεριοστροβίλου διπλού άξονα.....	133
6.1 Υλοποίηση μοντέλου αεριοστροβίλου διπλού άξονα στο Simulink	133
6.1.1 Παράσταση μοντέλου αεριοστροβίλου διπλού άξονα στο Simulink.....	133
6.1.2 Δεδομένα και επιλογή παραμέτρων	140
6.1.3 Αρχικοποίηση του μοντέλου διπλού άξονα.....	144
6.2 Προσαρμογή παραμέτρων και σχεδίαση ρυθμιστή στροφών	146
6.3 Προσομοίωση και σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	154
Κεφάλαιο 7 ^ο : Συμπεράσματα και προοπτικές.....	159
7.1 Συμπεράσματα και συμβολή	159
7.1.1 Αεριοστροβίλος απλού άξονα με αεροφυλάκιο.....	159
7.1.2 Αεριοστροβίλος διπλού άξονα.....	161

7.2 Προοπτικές για περαιτέρω έρευνα.....	162
Βιβλιογραφία.....	165
Παράρτημα Α: Αρχεία για την αρχικοποίηση του μοντέλου αεροστροβίλου με αεροφυλάκιο.....	167
beginch.m	167
initch.m.....	168
funch.m.....	169
funch1.m.....	169
funch2.m.....	169
Παράρτημα Β: Αρχεία για την αρχικοποίηση μοντέλου αεροστροβίλου διπλού άξονα..	170
beginc.m	170
initc.m	171
func.m	172
fun1c.m.....	173

Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή

1.1 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Το μεγάλο πλεονέκτημα του ηλεκτρισμού, το οποίο οδήγησε τόσο γρήγορα στην ευρεία χρήση του, είναι ότι αποτελεί μια καθαρή στη χρήση της μορφή ενέργειας, της οποίας η μεταφορά και η διανομή είναι εύκολη και με μικρές απώλειες. Ταυτόχρονα το γεγονός της ταχείας ανάπτυξης ηλεκτρικών συσκευών και ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού που καλύπτει το σύνολο σχεδόν των παραγωγικών αναγκών είχαν σαν αποτέλεσμα τη συνεχή αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.

Η παροχή της ηλεκτρικής ενέργειας στους εκάστοτε καταναλωτές επιτυγχάνεται μέσω του **Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας** (ΣΗΕ). Ως σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ορίζεται το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Σκοπός ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι να μπορεί να παρέχει κάθε χρονική στιγμή την ποσότητα της ενέργειας η οποία ζητείται, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα σταθερή συχνότητα και τάση καθώς επίσης και αξιοπιστία τροφοδότησης. Επιπλέον, όλα αυτά θα πρέπει να τα επιτυγχάνει με το μικρότερο δυνατό οικονομικό κόστος ελαχιστοποιώντας παράλληλα τις όποιες δυσμενείς για το περιβάλλον επιπτώσεις.

Η τροφοδότηση των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια προϋποθέτει τρεις ξεχωριστές λειτουργίες του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας: την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή. Η ηλεκτρική ενέργεια από το σημείο που θα παραχθεί μέχρι το σημείο που θα καταναλωθεί βρίσκεται σε μία συνεχή ροή κι επειδή δεν μπορεί να αποθηκευτεί, πρέπει να παράγεται τη στιγμή ακριβώς που χρειάζεται η κατανάλωσή της [1].

Το τμήμα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από τους σταθμούς παραγωγής καθώς και τους υποσταθμούς ανύψωσης τάσης για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ισχύος υπό υψηλή τάση. Το σύστημα μεταφοράς περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσης, τους υποσταθμούς ζεύξεως των δικτύων αυτών, τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ διαφορετικών τάσεων του δικτύου, καθώς και τους υποσταθμούς υποβιβασμού σε μέση τάση προς τροφοδότηση των δικτύων διανομής. Στη μεταφορά ανήκουν και οι εξωτερικές διασυνδέσεις του συστήματος με γειτονικά Σ.Η.Ε. Το τμήμα της διανομής περιλαμβάνει τα δίκτυα διανομής μέσης και χαμηλής τάσης. Με τα δίκτυα διανομής η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στους καταναλωτές.

Ένα ΣΗΕ από άποψη έκτασης, μπορεί να είναι Εθνικό, Περιφερειακό ή Ιδιωτικό και αναλόγως αν υπάρχει δυνατότητα διασύνδεσής του με μεγαλύτερο δίκτυο, το σύστημα αυτό μπορεί να είναι είτε διασυνδεδεμένο ή αυτόνομο. Ο λόγος που επιδιώκουμε να υπάρχει διασύνδεση είναι γιατί αυτό εξασφαλίζει σταθερότητα στην τάση και τη συχνότητα του δικτύου.

Σε περιπτώσεις όπου η διασύνδεση δεν είναι εφικτή, έχουμε τα αυτόνομα δίκτυα, τα οποία είναι πιο επιρρεπή σε απότομες μεταβολές του φορτίου. Τέτοια συστήματα συναντώνται ευρέως σε ελληνικά νησιά όπου δεν υπάρχει η δυνατότητα διασύνδεσης στο

Εθνικό δίκτυο. Για να υπάρχει αξιοπιστία στην απόκριση ενός τέτοιου δικτύου οι επιμέρους διατάξεις του πρέπει να ανταποκρίνονται αποτελεσματικά στις μεταβολές του φορτίου.

Στην παρούσα εργασία θα εξετάσουμε τη μοντελοποίηση μονάδων αεριοστροβίλων και την προσομοίωση μεταβολών φορτίου σε απομονωμένο σύστημα, όπου η μονάδα που εξετάζουμε είναι η μόνη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και κατά συνέπεια καθορίζει τη συχνότητα του συστήματος.

1.2 Οι θερμικές μονάδες παραγωγής στα ΣΗΕ

Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από τη μετατροπή κάποιας άλλης μορφής ενέργειας πρώτα σε μηχανική (κινητήριες μηχανές-στρόβιλοι) και στη συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω των γεννητριών. Το σύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται στον καταναλωτή σήμερα από τα ανά τον κόσμο ΣΗΕ, προέρχεται από την καύση ορυκτών καυσίμων (άνθρακες, πετρέλαιο, φυσικό αέριο), από τη ροή ή την πτώση των υδάτων, από την πυρηνική σχάση και τα τελευταία χρόνια από εναλλακτικές πηγές ενέργειας όπως είναι ο άνεμος (αιολική ενέργεια), η ηλιακή ενέργεια (φωτοβολταϊκά, ηλιοθερμικές μονάδες), τα θαλάσσια κύματα, η γεωθερμία κλπ.

Από τους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς οι ατμοηλεκτρικοί και οι πυρηνικοί χρησιμοποιούν τον ατμό ως μέσο (εξωτερική καύση) για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας μέσω ατμοστροβίλων. Αντίθετα, οι νηξελοηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής χρησιμοποιούν μηχανές εσωτερικής καύσης, οι οποίες μπορεί να είναι είτε εμβολοφόρες νηξελογεννήτριες ή αεριοστροβίλοι [2].

Στην παρούσα εργασία ασχολούμαστε με τη μελέτη της συμπεριφοράς και τη μοντελοποίηση αεριοστροβίλων. Σήμερα οι αποδόσεις των σύγχρονων αεριοστροβίλων ανοιχτού κύκλου είναι παρόμοιες με αυτές των ατμοστροβίλων αλλά το κόστος καυσίμου (ελαφρύ diesel ή φυσικό αέριο) καθιστά ασύμφορη τη λειτουργία τους ως μονάδων βάσης. Βασικό πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα εκκίνησης σε λίγα λεπτά με αρκετά υψηλούς ρυθμούς ανάληψης φορτίου. Για τους λόγους αυτούς οι αεριοστροβιλικές μονάδες δεν χρησιμοποιούνται ως μονάδες βάσης αλλά τροφοδοτούν τις αιχμές ζήτησης (λειτουργώντας και σαν εφεδρικές μονάδες που μπορούν να ενταχθούν γρήγορα στο σύστημα) ή χρησιμοποιούνται προκειμένου να ανταποκριθεί το σύστημα σε μεγάλες διακυμάνσεις του φορτίου.

Επίσης οι αεριοστροβίλοι χρησιμοποιούνται ως μέρος μονάδων συνδυασμένου κύκλου (μαζί με τους ατμοστροβίλους), οι οποίες παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη απόδοση σε σχέση με τις υπόλοιπες θερμικές μονάδες.

Οι αεριοστροβιλικές μονάδες απαιτούν μικρότερο χώρο, έχουν μικρότερο κόστος κατασκευής, μικρή εσωτερική κατανάλωση (μικρότερη του 1%) και δεν απαιτούν μεγάλα συστήματα ψύξης σε αντίθεση με τους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς [3]. Να σημειωθεί ότι οι αεριοστροβίλοι πέραν της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκουν εφαρμογή και σε πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου, σε σταθμούς άντλησης φυσικού αερίου, ως κινητήριες μηχανές σε αεροπλάνα και πλοία κλπ.

Στα σύγχρονα ΣΗΕ υπάρχει αύξηση της διείσδυσης των αεριοστροβίλων μέσω κυρίως των σταθμών συνδυασμένου κύκλου. Στις μονάδες συνδυασμένου κύκλου χρησιμοποιούνται ένας ή περισσότεροι αεριοστροβίλοι και τα καυσαέρια τους παράγουν ατμό μέσω εναλλακτών θερμότητας που στη συνέχεια εκτονώνεται και παράγει επιπλέον ισχύ μέσω ενός ατμοστροβίλου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση του βαθμού απόδοσης των μονάδων, φτάνοντας το 55%. Οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου έχουν σημαντικά χαμηλότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τις μονάδες που χρησιμοποιούν γαιάνθρακες. Έχουν επίσης ταχεία απόκριση σε διαταραχές λόγω του υψηλού ρυθμού ανάληψης φορτίου, απαιτούν μικρότερο χώρο εγκατάστασης από τις ατμοηλεκτρικές μονάδες και μπορούν να χρησιμοποιήσουν διάφορους τύπους καυσίμων.

Εκτός από τις μονάδες συνδυασμένου κύκλου τα τελευταία χρόνια οι αυξανόμενες αιχμές των ΣΗΕ και οι ανάγκες αύξησης της διείσδυσης ΑΠΕ απαιτούν την ύπαρξη μεγάλων μονάδων εφεδρείας. Δηλαδή μπορούμε να απορροφήσουμε μεγαλύτερη παραγωγή από ΑΠΕ (που εξαρτάται από ελεγχόμενα μετεωρολογικά δεδομένα) όταν έχουμε διαθέσιμη και ταχεία εφεδρεία για να αναλάβει το φορτίο τους σε περίπτωση μη διαθεσιμότητας. Οι αεριοστροβιλικές μονάδες, οι οποίες έχουν σημαντικά χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης, υψηλούς ρυθμούς ανάληψης φορτίου και μικρό χρόνο εκκίνησης είναι ιδανικές για το σκοπό αυτό.

Οι αεριοστροβίλοι αποτελούνται από ένα συμπιεστή (που αυξάνει την πίεση του αέρα που εισέρχεται), ένα θάλαμο καύσης (όπου καίγεται το καύσιμο αυξάνοντας τη θερμοκρασία του αέρα) και ένα στρόβιλο (όπου τα καυσαέρια εκτονώνονται παράγοντας την ωφέλιμη ισχύ). Στους αεριοστροβίλους απλού άξονα ο στρόβιλος και ο συμπιεστής βρίσκονται στην ίδια άτρακτο και κινούνται με την ίδια ταχύτητα με τη γεννήτρια. Εκτός από τους αεριοστροβίλους απλού άξονα είναι διαδεδομένη και η χρήση αεριοστροβίλων διπλού άξονα. Ένας αεριοστροβίλος διπλού άξονα αποτελείται από μια αεριογόνο μηχανή (συμπιεστής, θάλαμος καύσης, στρόβιλος υψηλής πίεσης) που βρίσκεται σε έναν άξονα και ένα στρόβιλο χαμηλής πίεσης (που ονομάζεται και στρόβιλος ισχύος) που παράγει την ωφέλιμη ισχύ από τα καυσαέρια της αεριογόνου περιστρεφόμενος μαζί με τη γεννήτρια σε άλλον άξονα με διαφορετική ταχύτητα από την αεριογόνο.

Έχουν προταθεί και υλοποιηθεί διάφορες μέθοδοι αύξησης της παραγόμενης ισχύος των αεριοστροβίλων. Μερικές από αυτές είναι η έγχυση νερού ή ατμού στο στρόβιλο, η ψύξη εισόδου, η χρήση ενός αεροφυλακίου συμπιεσμένου αέρα κλπ.

Οι αεριοστροβίλοι διπλού άξονα έχουν διάφορα πλεονεκτήματα που θα φανούν στη συνέχεια της εργασίας όπως το ότι η λειτουργία τους δεν επηρεάζεται από τις διαταραχές της συχνότητας του δικτύου (λόγω του ότι η αεριογόνο βρίσκεται σε ξεχωριστό άξονα), έχουν καλύτερους βαθμούς απόδοσης αλλά και υψηλότερη απόδοση στα μερικά φορτία. Πρέπει να αναφέρουμε ότι συχνά ως αεριογόνοι χρησιμοποιούνται μηχανές από αεροσκάφη, δηλαδή αεροπορικοί στροβιλοαντιδραστήρες. Αυτοί συνδέονται με ένα στρόβιλο ισχύος και έτσι παράγεται ηλεκτρική ισχύς μέσω μιας γεννήτριας. Έτσι είναι εφικτή η χρησιμοποίηση έτοιμων στροβιλοαντιδραστήρων, που ενδεχομένως έχουν σημαντικά χαμηλότερο κόστος κτήσης, στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ακόμα, λόγω και του μικρού όγκου των μηχανών αυτών, είναι εύκολη η μεταφορά τους ανάλογα με τις απαιτήσεις σε διαφορετικά σημεία για την κάλυψη έκτακτων ή εποχιακών αναγκών.

Ως αεριοστροβίλοι διπλού άξονα δεν χρησιμοποιούνται μόνο έτοιμοι στροβιλοαντιδραστήρες (πχ αεροσκαφών) αλλά και έτοιμες μονάδες που κατασκευάζονται με αποκλειστικό σκοπό την ηλεκτροπαραγωγή. Η δυνατότητα πολλαπλών χρήσεων καθιστά οικονομικότερη τη χρήση της ίδιας γραμμής παραγωγής για την κατασκευή τους. Επίσης η κατασκευή ανταλλακτικών, η τεχνική υποστήριξη, η τεχνογνωσία και η έρευνα έχουν πολλά κοινά χαρακτηριστικά. Αυτό σημαίνει ότι μια εταιρεία μπορεί να παράγει, να ερευνά και να υποστηρίζει τεχνικά τους δύο τύπους μηχανών για πολύ διαφορετικές εφαρμογές (κινητήρες αεροπλάνων και ηλεκτροπαραγωγή) με σημαντική οικονομία κλίμακας, μειώνοντας την τιμή του τελικού προϊόντος. Αυτοί οι λόγοι καθιστούν τους αεριοστροβίλους διπλού άξονα για ηλεκτροπαραγωγή μια ελκυστική και συμφέρουσα σε πολλές περιπτώσεις εναλλακτική επιλογή.

1.3 Ευστάθεια ΣΗΕ

Ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας αποτελείται από πολλές διασυνδεδεμένες σύγχρονες γεννήτριες. Οι γεννήτριες αυτές παράγουν την ηλεκτρική ενέργεια η οποία μέσω των γραμμών μεταφοράς καταλήγει στους καταναλωτές. Προκειμένου το σύστημα να λειτουργεί ομαλά οι γεννήτριες θα πρέπει να βρίσκονται μεταξύ τους σε συγχρονισμό, δηλαδή να περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα. Σε μια τέτοια περίπτωση η κατάσταση του συστήματος θεωρείται ευσταθής. Αντίθετα, αν έστω και μια γεννήτρια επιταχύνεται ή επιβραδύνεται πέρα από τη σύγχρονη ταχύτητα και οδηγείται σε αποσυγχρονισμό η κατάσταση του συστήματος θεωρείται ασταθής.

Η μελέτη της ευστάθειας ενός συστήματος έγκειται στον τρόπο με τον οποίο το σύστημα θα αντιδράσει σε μια διαταραχή. Ο τρόπος αυτός εξαρτάται από τον τύπο της διαταραχής. Διακρίνονται δύο κατηγορίες ευστάθειας: η ευστάθεια μονίμου καταστάσεως και η μεταβατική ευστάθεια.

- Η **ευστάθεια μονίμου καταστάσεως** αφορά τις μικρές διαταραχές. Καλείται να απαντήσει στο ερώτημα αν μετά από μια μικρή διαταραχή οι γεννήτριες θα επανέλθουν στο αρχικό σημείο λειτουργίας τους ή θα απομακρυνθούν οριστικά από αυτό.
- Η **μεταβατική ευστάθεια** αφορά τις σοβαρές διαταραχές (π.χ. βραχυκυκλώματα). Καλείται να απαντήσει στο ερώτημα αν μετά από μια σοβαρή διαταραχή στο δίκτυο θα μπορέσουν να ξαναβρεθούν οι γεννήτριες σε κατάσταση συγχρονισμού ή μία τουλάχιστον θα αποσυγχρονιστεί [4].

1.4 Περιγραφή δυναμικών συστημάτων

Θεωρούμε ένα δυναμικό σύστημα. Για την περιγραφή της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος απαιτείται ένας ελάχιστος αριθμός από ανεξάρτητες μεταξύ τους

μεταβλητές, έστω n τον αριθμό, οι οποίες το περιγράφουν πλήρως. Οι μεταβλητές αυτές ονομάζονται μεταβλητές κατάστασης και η δυναμική τους παριστάνεται μέσω διαφορικών εξισώσεων πρώτης τάξης. Ενδεχομένως για την περιγραφή του συστήματος να είναι αναγκαία η ύπαρξη και κάποιων επιπλέον μεταβλητών, έστω n_a τον αριθμό, οι οποίες ονομάζονται αλγεβρικές μεταβλητές. Η διέγερση του συστήματος περιγράφεται από ένα σύνολο μεταβλητών, έστω n_{in} τον αριθμό, οι οποίες ονομάζονται μεταβλητές εισόδου ενώ η απόκριση του συστήματος περιγράφεται από ένα σύνολο μεταβλητών, έστω n_{out} τον αριθμό, οι οποίες ονομάζονται μεταβλητές εξόδου [5].

Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι η επιλογή του συνόλου των μεταβλητών κατάστασης που περιγράφουν ένα σύστημα δεν είναι μοναδική. Η απόκριση βέβαια του συστήματος είναι συγκεκριμένη κάθε χρονική στιγμή και ανεξάρτητη από το ποιο σύνολο μεταβλητών κατάστασης έχει επιλεγεί.

Θεωρούμε τώρα ένα χρονικά αμετάβλητο δυναμικό σύστημα. Η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος αυτού σύμφωνα με τα παραπάνω καθορίζεται από n μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις πρώτης τάξης. Σε διανυσματική μορφή οι εξισώσεις αυτές γράφονται ως εξής:

$$\dot{\underline{x}} = \underline{f}(\underline{x}, \underline{d}, \underline{a}, \underline{p}) \quad (1.1)$$

όπου

$\underline{x}$: το $n \times 1$ διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης

$\underline{d}$: το $n_{in} \times 1$ διάνυσμα των μεταβλητών εισόδου

$\underline{a}$: το $n_a \times 1$ διάνυσμα των αλγεβρικών μεταβλητών

$\underline{p}$: το $n_p \times 1$ διάνυσμα των λοιπών παραμέτρων του συστήματος

$\underline{f}$: το $n \times 1$ σύνολο των μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων πρώτης τάξης

Η έξοδος του συστήματος καθορίζεται από n_{out} αλγεβρικές εξισώσεις, οι οποίες σε διανυσματική μορφή γράφονται ως εξής:

$$\underline{y} = \underline{g}(\underline{x}, \underline{d}, \underline{a}, \underline{p}) \quad (1.2)$$

όπου

$\underline{y}$: το $n_{out} \times 1$ διάνυσμα των μεταβλητών εξόδου

$\underline{g}$: το $n_{out} \times 1$ σύνολο των αλγεβρικών εξισώσεων εξόδου

Επιπλέον υφίστανται κάποιοι αλγεβρικοί περιορισμοί οι οποίοι καθορίζονται από n_a αλγεβρικές εξισώσεις, οι οποίες σε διανυσματική μορφή γράφονται ως εξής:

$$\underline{0} = \underline{h}(\underline{x}, \underline{d}, \underline{a}, \underline{p}) \quad (1.3)$$

όπου

$\underline{h}$: το $n_a \times 1$ σύνολο των αλγεβρικών εξισώσεων

Ένα σημείο ισορροπίας του δυναμικού συστήματος $(\underline{x}_0, \underline{d}_0, \underline{a}_0)$ ικανοποιεί ταυτόχρονα τις εξής σχέσεις:

$$\underline{f}(\underline{x}_0, \underline{d}_0, \underline{a}_0, \underline{p}) = \underline{0} \quad (1.4)$$

$$\underline{0} = \underline{h}(\underline{x}_0, \underline{d}_0, \underline{a}_0, \underline{p}) \quad (1.5)$$

και ονομάζεται θέση μονίμου καταστάσεως. Επειδή ένα σύστημα κατά την κανονική λειτουργία του βρίσκεται ουσιαστικά σε μια θέση μονίμου καταστάσεως, η θέση αυτή ονομάζεται επιπλέον σημείο λειτουργίας του συστήματος [4].

1.4.1 Γραμμικοποίηση δυναμικών συστημάτων

Θεωρούμε ένα σύστημα το οποίο βρίσκεται σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας. Η μελέτη της ευστάθειας μονίμου καταστάσεως έγκειται στο να απαντηθεί το εξής ερώτημα: Αν συμβεί μια μικρή διαταραχή των μεταβλητών κατάστασης γύρω από το σημείο λειτουργίας το σύστημα θα επανέλθει σε αυτό ή θα απομακρυνθεί οριστικά από αυτό; Στην πρώτη περίπτωση γίνεται λόγος για ευσταθές σημείο λειτουργίας ενώ στη δεύτερη για ασταθές. Για να απαντηθεί το παραπάνω ερώτημα θα πρέπει να εξεταστεί η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος μετά από μια μικρή διαταραχή.

Ο πιο ενδεδειγμένος τρόπος για να μελετηθεί η ευστάθεια μονίμου καταστάσεως βασίζεται στη γραμμικοποίηση του συστήματος γύρω από το σημείο λειτουργίας. Παρακάτω παρατίθεται τόσο η έννοια της γραμμικοποίησης όσο και οι απαραίτητες προϋποθέσεις για να είναι αυτή δυνατή. Τονίζεται εδώ ότι η ευστάθεια μικρών διαταραχών εξ ορισμού δεν επηρεάζεται από το μέγεθος της διαταραχής και συνεπώς μπορεί να θεωρηθεί ότι οι αποκλίσεις των μεταβλητών καταστάσεως από το σημείο λειτουργίας είναι αρκετά μικρές ώστε οι όροι που εκφράζουν γινόμενα αποκλίσεων να μπορούν να αμεληθούν χωρίς σοβαρό σφάλμα [4].

Θεωρούμε μια μη γραμμική συνάρτηση μιας μεταβλητής, έστω $f(x)$, η οποία είναι συνεχής και παραγωγίσιμη στο σημείο x_0 . Η γραμμικοποίηση της συνάρτησης αυτής γύρω από το σημείο x_0 στηρίζεται στο ανάπτυγμα κατά Taylor της συνάρτησης αυτής γύρω από το σημείο αυτό. Το ανάπτυγμα της συνάρτησης κατά Taylor γύρω από το σημείο x_0 είναι:

$$f(x) = f(x_0) + (x - x_0)f'(x_0) + \frac{1}{2}(x - x_0)^2 f''(x_0) + \dots \quad (1.6)$$

Παραλείποντας τους όρους δεύτερης και μεγαλύτερης τάξης παίρνουμε τη γραμμικοποιημένη μορφή της $f(x)$, ήτοι:

$$\Delta f = f'(x_0)\Delta x \quad (1.7)$$

όπου

$$\Delta f = f(x) - f(x_0) \quad (1.8)$$

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1.9)$$

Το πρόθεμα Δ δηλώνει την απόκλιση από την αντίστοιχη τιμή μονίμου καταστάσεως [4].

1.4.2 Ιδιοτιμές δυναμικού συστήματος

Θεωρούμε ότι οι συναρτήσεις $\underline{f}$, $\underline{g}$ και $\underline{h}$ που αναφέραμε στην εισαγωγή της ενότητας είναι συνεχείς και παραγωγίσιμες. Για μικρές αποκλίσεις από το σημείο ισορροπίας του συστήματος γενικεύεται η διαδικασία της γραμμικοποίησης και αναπτύσσονται κατά Taylor οι παραπάνω συναρτήσεις, οι οποίες τώρα είναι συναρτήσεις πολλών μεταβλητών. Παραλείποντας τους όρους ανωτέρας τάξεως και θεωρώντας ότι ο Ιακωβιανός πίνακας των αλγεβρικών περιορισμών αντιστρέφεται στο σημείο ισορροπίας ώστε να είναι δυνατή η απαλοιφή των αλγεβρικών μεταβλητών α μέσω των αλγεβρικών εξισώσεων (1.3), οι εξισώσεις (1.1) και (1.2) τελικά γραμμικοποιούνται στο παρακάτω σύστημα (που υπενθυμίζουμε πως θεωρούμε χρονικά αμετάβλητο) που υπό μορφή πινάκων γράφεται ως εξής [5]:

$$\Delta \dot{\underline{x}} = \underline{A}\Delta \underline{x} + \underline{B}\Delta \underline{d} \quad (1.10)$$

$$\Delta \underline{y} = \underline{C}\Delta \underline{x} + \underline{D}\Delta \underline{d} \quad (1.11)$$

όπου

$\underline{A}$: ο $n \times n$ πίνακας κατάστασης

$\underline{B}$: ο $n \times n_{in}$ πίνακας εισόδου

$\underline{C}$: ο $n_{out} \times n$ πίνακας εξόδου

$\underline{D}$: ο $n_{out} \times n_{in}$ απευθείας πίνακας

Με αυτόν τον τρόπο το πρόβλημα της ευστάθειας μονίμου καταστάσεως ενός χρονικά αμετάβλητου μη γραμμικού δυναμικού συστήματος που περιγράφεται από τις εξισώσεις (1.1) και (1.2) σε κάποιο σημείο λειτουργίας ανάγεται στο πρόβλημα της ευστάθειας του γραμμικού συστήματος όπως αυτό ορίζεται από τις εξισώσεις (1.10) και (1.11). Η ευστάθεια ενός γραμμικού συστήματος καθορίζεται πλήρως από τις ιδιοτιμές του πίνακα $\underline{A}$ του συστήματος. Το σημείο ισορροπίας είναι ευσταθές όταν όλες οι ιδιοτιμές του

πίνακα $\mathbf{A}$ έχουν αρνητικό πραγματικό μέρος [4]. Οι ιδιοτιμές του συστήματος υπολογίζονται από την επίλυση της αλγεβρικής εξίσωσης:

$$\det(\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}) = 0 \quad (1.12)$$

Η (1.12) αντιστοιχεί σε μια πολυωνυμική εξίσωση n βαθμού, οπότε έχει n μιγαδικές λύσεις.

Οι ιδιοτιμές που προκύπτουν από την παραπάνω εξίσωση αναφέρονται στο συγκεκριμένο σημείο ισορροπίας του συστήματος. Επιπλέον είναι μοναδικές και ανεξάρτητες από ποιο σύνολο μεταβλητών κατάστασης έχει επιλεγεί για την περιγραφή του συστήματος. Όπως προαναφέρθηκε, οι ιδιοτιμές είναι εν γένει μιγαδικοί αριθμοί και συμβολίζονται ως εξής:

$$\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i \quad i=1, 2, \dots, n$$

1.4.3 Ιδιοδιανύσματα

Επιστρέφουμε τώρα στις ιδιοτιμές του συστήματος οι οποίες για την περαιτέρω ανάλυσή μας θα θεωρούνται διακριτές μεταξύ τους. Σε κάθε ιδιοτιμή λ_i του συστήματος αντιστοιχίζεται ένα ιδιοδιάνυσμα $\underline{u}_i$ διαστάσεων $n \times 1$ τέτοιο ώστε:

$$\mathbf{A}\underline{u}_i = \lambda_i \underline{u}_i \quad (1.13)$$

Το ιδιοδιάνυσμα που ικανοποιεί την παραπάνω σχέση ονομάζεται δεξιό ιδιοδιάνυσμα της ιδιοτιμής [4]. Προφανώς το σύστημα θα έχει τόσα δεξιά ιδιοδιανύσματα όσες είναι και οι ιδιοτιμές του, δηλαδή n . Το σύνολο αυτό των ιδιοδιανυσμάτων αποτελεί τη βάση ενός διανυσματικού χώρου n διαστάσεων. Η ελεύθερη απόκριση του συστήματος είναι ουσιαστικά μια τροχιά μέσα σε αυτόν το διανυσματικό χώρο ο οποίος καλείται και χώρος κατάστασης. Αντίστοιχα με την έννοια του δεξιού ιδιοδιανύσματος, ως αριστερό ιδιοδιάνυσμα της ιδιοτιμής λ_i ορίζεται το $n \times 1$ ιδιοδιάνυσμα που ικανοποιεί τη σχέση [4]:

$$\underline{v}_i^T \mathbf{A} = \lambda_i \underline{v}_i^T \quad (1.14)$$

Επειδή οι πίνακες $\mathbf{A}$ και $\mathbf{A}^T$ έχουν τις ίδιες ιδιοτιμές, το αριστερό ιδιοδιάνυσμα $\underline{v}$ ισοδύναμα ορίζεται σαν το δεξιό ιδιοδιάνυσμα του $\mathbf{A}^T$, δηλαδή του ανάστροφου πίνακα του $\mathbf{A}$. Τα ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν σε διαφορετικές ιδιοτιμές είναι κάθετα μεταξύ τους. Δηλαδή ισχύει ότι:

$$\underline{v}_j^T \underline{u}_i = 0 \quad i \neq j \quad (1.15)$$

Αντίθετα, τα ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν στην ίδια ιδιοτιμή έχουν εσωτερικό γινόμενο διάφορο του μηδενός. Επιπλέον, τα στοιχεία των ιδιοδιανυσμάτων μπορούν να πολλαπλασιαστούν με οποιονδήποτε αριθμό χωρίς να μεταβληθεί η κατεύθυνση που αυτά εκφράζουν. Βάσει του γεγονότος αυτού τα ιδιοδιανύσματα $\underline{u}_i$, $\underline{v}_i$ που αντιστοιχούν στην ίδια ιδιοτιμή λ_i κανονικοποιούνται έτσι ώστε:

$$\underline{v}_i^T \underline{u}_i = 1 \quad (1.16)$$

1.4.4 Μετασχηματισμός ομοιότητας

Ορίζεται ως πίνακας $\mathbf{U}$ ο $n \times n$ πίνακας που έχει ως στήλες τα δεξιά ιδιοδιανύσματα του πίνακα $\mathbf{A}$, δηλαδή:

$$\mathbf{U} = [\underline{u}_1 \dots \underline{u}_n] \quad (1.17)$$

Επίσης ορίζεται ως πίνακας $\mathbf{V}$ ο $n \times n$ πίνακας που έχει ως γραμμές τα αριστερά ιδιοδιανύσματα του πίνακα $\mathbf{A}$, δηλαδή:

$$\mathbf{V} = [\underline{v}_1 \dots \underline{v}_n]^T \quad (1.18)$$

Βάσει των σχέσεων (1.15) και (1.16), για τους πίνακες $\mathbf{U}$ και $\mathbf{V}$, ισχύει ότι:

$$\mathbf{UV} = \mathbf{VU} = \mathbf{I} \quad (1.19)$$

Δηλαδή οι πίνακες $\mathbf{U}$ και $\mathbf{V}$ είναι αντίστροφοι. Επιπλέον ορίζεται ως πίνακας $\mathbf{\Lambda}$ ο διαγώνιος $n \times n$ πίνακας που έχει ως διαγώνια στοιχεία τις ιδιοτιμές του $\mathbf{A}$, δηλαδή:

$$\mathbf{\Lambda} = \text{diag}[\lambda_1 \dots \lambda_n] \quad (1.20)$$

Στην περίπτωση που ο $\mathbf{A}$ έχει διακριτές ιδιοτιμές ισχύει η εξής σχέση:

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V} \quad (1.21)$$

Από την παραπάνω σχέση είναι φανερό ότι ο πίνακας $\mathbf{A}$ με τη βοήθεια των πινάκων $\mathbf{U}$ και $\mathbf{V}$ μετασχηματίζεται και συγκεκριμένα διαγωνοποιείται στον πίνακα $\mathbf{\Lambda}$. Ο μετασχηματισμός αυτός καλείται μετασχηματισμός ομοιότητας [4].

1.4.5 Ρυθμοί απόκρισης

Επανερχόμαστε τώρα στη σχέση (1.10) η οποία θεωρώντας ότι $\Delta \underline{d} = 0$ γίνεται:

$$\Delta \dot{\underline{x}} = \mathbf{A} \Delta \underline{x} \quad (1.22)$$

Η σχέση αυτή μας δίνει την ελεύθερη απόκριση του συστήματος. Ορίζεται τώρα ένα νέο διάνυσμα, που καλείται διάνυσμα ρυθμών, μέσω του ακόλουθου μετασχηματισμού :

$$\underline{z}(t) = \mathbf{V} \Delta \underline{x}(t) \quad (1.23)$$

Η σχέση (1.23) ισοδύναμα μπορεί να γραφτεί ως εξής :

$$\Delta \underline{x}(t) = \mathbf{U} \underline{z}(t) \quad (1.24)$$

Η εξίσωση (1.22) μέσω της σχέσης (1.24) γίνεται:

$$\mathbf{U} \dot{\underline{z}}(t) = \mathbf{A} \mathbf{U} \underline{z}(t) \quad (1.25)$$

Μέσω της σχέσης που εκφράζει το μετασχηματισμό ομοιότητας και εφαρμόζοντας απλές ιδιότητες πινάκων η (1.25) γίνεται:

$$\dot{\underline{z}}(t) = \mathbf{\Lambda} \underline{z}(t) \quad (1.26)$$

Επειδή ο πίνακας $\mathbf{\Lambda}$ είναι διαγώνιος, οι n πρωτοβάθμιες διαφορικές εξισώσεις που εκφράζονται μέσω της σχέσης (1.26) μπορούν να λυθούν ανεξάρτητα μεταξύ τους. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει η αναλυτική έκφραση καθενός από του n ρυθμούς απόκρισης του συστήματος η οποία είναι η εξής:

$$z_i = z_{i0} e^{\lambda_i t} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1.27)$$

Όπου με z_{i0} συμβολίζεται η αρχική τιμή του ρυθμού z_i . Γενικά, όπως φαίνεται και από την (1.23), ο καθένας από τους n ρυθμούς απόκρισης προκύπτει μέσω του ακόλουθου μετασχηματισμού:

$$z_i(t) = \underline{v}_i^T \Delta \underline{x}(t) \quad (1.28)$$

Με βάση τα ανωτέρω προκύπτει ότι το διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης (σχέση (1.24)) μπορεί να γραφτεί σαν το άθροισμα των ρυθμών πολλαπλασιασμένο με τα αντίστοιχα δεξιά ιδιοδιανύσματα. Ισχύει δηλαδή η παρακάτω σχέση:

$$\Delta \underline{x}(t) = \sum_{i=1}^n \underline{u}_i z_i(t) \quad (1.29)$$

Με την αντικατάσταση στην παραπάνω σχέση των λύσεων, όπως αυτές εκφράζονται από την (1.27), προκύπτει η ελεύθερη απόκριση του συστήματος συναρτήσει των

ιδιοτιμών και των ιδιοδιανυσμάτων του πίνακα $\mathbf{A}$ καθώς επίσης και των αρχικών συνθηκών. Συγκεκριμένα προκύπτει ότι:

$$\Delta \underline{\mathbf{x}}(t) = \sum_{i=1}^n z_{i0} e^{\lambda_i t} \underline{\mathbf{u}}_i = \sum_{i=1}^n \underline{\mathbf{u}}_i \mathbf{v}_i^T \underline{\mathbf{x}}_0 e^{\lambda_i t} \quad (1.30)$$

Στην παραπάνω εξίσωση αντικαθίστώνται οι αρχικές τιμές των ρυθμών συναρτήσει των αρχικών τιμών των μεταβλητών κατάστασης. Από τις σχέσεις (1.28) και (1.29) γίνεται κατανοητή η φυσική σημασία των αριστερών και των δεξιών ιδιοδιανυσμάτων αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, από τη σχέση (1.28) φαίνεται ότι τα στοιχεία του αριστερού ιδιοδιανύσματος καθορίζουν την επίδραση που έχουν οι μεταβλητές κατάστασης στην εμφάνιση ενός ρυθμού [5]. Αντίστοιχα, από την (1.29) φαίνεται ότι τα στοιχεία του δεξιού ιδιοδιανύσματος καθορίζουν την επίδραση που έχει ένας ρυθμός στις μεταβλητές κατάστασης [5].

Βάσει των όσων μέχρι τώρα έχουν αναφερθεί προκύπτει το συμπέρασμα ότι η ελεύθερη απόκριση του συστήματος είναι ένας γραμμικός συνδυασμός n εκθετικών συναρτήσεων που περιγράφουν τους n ρυθμούς ελεύθερης απόκρισης του συστήματος. Όταν μια ιδιοτιμή είναι πραγματική ο αντίστοιχος ρυθμός είναι μια εκθετική συνάρτηση, αύξουσα ή φθίνουσα ανάλογα με το πρόσημο. Όταν όμως οι ιδιοτιμές εμφανίζονται σε μιγαδικά ζεύγη ο αντίστοιχος ρυθμός είναι μια αύξουσα ή φθίνουσα ταλάντωση και καλείται ρυθμός ταλάντωσης. Έστω δύο συζυγείς μιγαδικές ιδιοτιμές λ_i και λ_i^* όπου $\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i$. Το ζεύγος αυτό εισάγει στην απόκριση του συστήματος έναν όρο της μορφής:

$$e^{\sigma_i t} \sin(\omega_i t + \theta)$$

Για τη συχνότητα της ταλάντωσης ισχύει ότι:

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (1.31)$$

Για το λόγο απόσβεσης του ρυθμού, δηλαδή το μέγεθος που καθορίζει την εξασθένιση του πλάτους της ταλάντωσης, ισχύει ότι:

$$\zeta_i = \frac{-\sigma_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}} \quad (1.32)$$

1.4.6 Η ευαισθησία των ιδιοτιμών και η έννοια του συντελεστή συμμετοχής

Είναι συχνά πολύ σημαντικό και χρήσιμο να μπορεί να καθοριστεί το πως θα μεταβληθούν οι ιδιοτιμές ενός συστήματος καθώς αλλάζει κάποια παράμετρος του πίνακα κατάστασης. Ορίστηκε ως δεξιό ιδιοδιάνυσμα μιας ιδιοτιμής το $n \times 1$ διάνυσμα που

ικανοποιεί τη σχέση (1.13). Παραγωγίζοντας ως προς κάποια παράμετρο a_{rs} του πίνακα κατάστασης προκύπτει ότι:

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial a_{rs}} \underline{u}_i + \mathbf{A} \frac{\partial \underline{u}_i}{\partial a_{rs}} = \lambda_i \frac{\partial \underline{u}_i}{\partial a_{rs}} + \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{rs}} \underline{u}_i \quad (1.33)$$

Πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέρη της εξίσωσης με το ανάστροφο αριστερό ιδιοδιάνυσμα $\underline{v}_i^T$ η (1.33) γίνεται :

$$\underline{v}_i^T \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial a_{rs}} \underline{u}_i + \underline{v}_i^T (\mathbf{A} - \lambda_i \mathbf{I}) \frac{\partial \underline{u}_i}{\partial a_{rs}} = \underline{v}_i^T \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{rs}} \underline{u}_i \quad (1.34)$$

Από τον ορισμό του αριστερού ιδιοδιανύσματος προκύπτει ότι ο δεύτερος όρος του αριστερού μέρους της παραπάνω εξίσωσης είναι ίσος με το μηδέν. Συνεπώς η (1.34) μετά από στοιχειώδεις πράξεις γίνεται:

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{rs}} = \frac{\underline{v}_i^T \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial a_{rs}} \underline{u}_i}{\underline{v}_i^T \underline{u}_i} = \underline{v}_i^T \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial a_{rs}} \underline{u}_i \quad (1.35)$$

λαμβάνοντας υπόψη ότι $\underline{v}_i^T \underline{u}_i = 1$.

Στην παραπάνω σχέση αν θεωρηθεί ότι η παράμετρος ως προς την οποία έγινε η παραγωγή βρίσκεται στην r γραμμή και στην r στήλη του πίνακα κατάστασης, ανήκει δηλαδή στη διαγώνιο του, προκύπτει ότι:

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{rr}} = \underline{v}_i^T(r) \underline{u}_i(r) \quad (1.36)$$

Το γινόμενο που εκφράζεται από τη σχέση (1.36), δηλαδή το γινόμενο ανάμεσα στο r στοιχείο του αριστερού και στο r στοιχείο του δεξιού ιδιοδιανύσματος του ρυθμού i , ορίζει το συντελεστή συμμετοχής της μεταβλητής κατάστασης x_r στο ρυθμό i . Αξίζει να σημειωθεί ότι πρόκειται για ένα αδιάστατο μέγεθος [5]. Ο συντελεστής συμμετοχής μιας μεταβλητής x_r σε ένα ρυθμό i ουσιαστικά αποτελεί μια ένδειξη για το πόσο η συγκεκριμένη μεταβλητή κατάστασης επηρεάζει το ρυθμό αυτό. Συγκεκριμένα δείχνει αν η μεταβολή του διαγώνιου στοιχείου που αντιστοιχεί σε αυτή τη μεταβλητή μπορεί να επηρεάσει και αν ναι πως τη μετατόπιση της αντίστοιχης ιδιοτιμής λ_i .

Ο συντελεστής συμμετοχής είναι γενικά ένας μιγαδικός αριθμός το μέτρο του οποίου καθορίζει το μέγεθος της προαναφερθείσας επίδρασης. Συγκεκριμένα, μικρή τιμή του μέτρου συνεπάγεται και μικρή επίδραση ενώ μεγάλη τιμή του μέτρου σημαίνει και μεγάλη επίδραση. Το πρόσημο του πραγματικού μέρους του μιγαδικού αριθμού αποτελεί ένδειξη του προς τα που θα μετατοπιστεί η ιδιοτιμή σε περίπτωση που το διαγώνιο στοιχείο του πίνακα κατάστασης που αντιστοιχεί σε αυτήν τη μεταβλητή κατάστασης μεταβληθεί. Συγκεκριμένα, αν το πραγματικό μέρος είναι αρνητικό ενώ ταυτόχρονα η

απόλυτη τιμή του είναι μεγάλη τότε μια αύξηση του διαγώνιου στοιχείου $\alpha_{\pi\pi}$ θα σημαίνει και μετατόπιση της ιδιοτιμής λ_i προς τα αριστερά. Αν αντίθετα το πρόσημο του πραγματικού μέρους είναι θετικό το διαγώνιο στοιχείο $\alpha_{\pi\pi}$ θα πρέπει να μειωθεί προκειμένου να μετακινηθεί προς τα αριστερά η ιδιοτιμή λ_i . Τέλος, το φανταστικό μέρος είναι ενδεικτικό του πόσο θα επηρεαστεί η συχνότητα του ρυθμού. Συγκεκριμένα, μεγάλη τιμή του φανταστικού μέρους συνεπάγεται και μεγάλη επίδραση στη συχνότητα.

1.5 Ρύθμιση φορτίου συχνότητας

1.5.1 Γενικά περί ρύθμισης φορτίου συχνότητας

Η ρύθμιση συχνότητας σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας συνίσταται στη συνεχή προσαρμογή της παραγόμενης ισχύος στο φορτίο του συστήματος. Ως γνωστόν η ηλεκτρική ενέργεια δεν αποθηκεύεται (σε μεγάλη κλίμακα) οπότε διαρκώς θα πρέπει να ρυθμίζουμε την παραγωγή ισχύος ώστε να ανταποκριθεί στη ζήτηση. Η ανισορροπία μεταξύ παραγωγής και φορτίου προκαλεί διακυμάνσεις στη συχνότητα του δικτύου [6].

Κατά τη λειτουργία μιας γεννήτριας οι ροπές που ασκούνται στο δρομέα της είναι η ηλεκτρομαγνητική ροπή, οι τριβές καθώς και η ροπή που κινεί τη γεννήτρια. Η ηλεκτρομαγνητική ροπή οφείλεται στο ηλεκτρικό φορτίο, το οποίο τροφοδοτεί η γεννήτρια. Μια αύξηση της ζήτησης ισχύος αυξάνει την τιμή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής χωρίς να παρουσιαστεί κάποια μεταβολή στην ισχύ που αποδίδεται στο στρόβιλο μέσω του εργαζόμενου μέσου. Ο δρομέας επιβραδύνεται και με αυτόν τον τρόπο μεταβάλλεται και η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος. Αντίστροφα αν η αποδιδόμενη ισχύς στο στρόβιλο είναι μεγαλύτερη από το φορτίο ο δρομέας επιταχύνεται και η συχνότητα αυξάνεται. Χαρακτηριστικό παράδειγμα μιας τέτοιας μεταβολής είναι όταν για κάποιο λόγο μια γεννήτρια τίθεται εκτός λειτουργίας, οπότε όλες οι υπόλοιπες καλούνται να αυξήσουν την παραγωγή τους προκειμένου να καλύψουν το έλλειμμα ηλεκτρικής ισχύος που προκάλεσε η βλάβη.

Το γεγονός αυτό αποτελεί ένα από τα βασικά προβλήματα που παρουσιάζονται στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας καθώς η διατήρηση της συχνότητας στην ονομαστική τιμή με μικρές διακυμάνσεις αποτελεί έναν κρίσιμο παράγοντα σε σχέση με την καλή λειτουργία του συστήματος. Εκτός της αναγκαιότητας διατήρησης σταθερής συχνότητας προκειμένου οι συσκευές που είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο να λειτουργούν αξιόπιστα, οι μονάδες παραγωγής διαθέτουν μια σειρά από προστασίες σε πιθανές μεταβολές της συχνότητας. Οι προστασίες αυτές αφορούν για παράδειγμα την αυξημένη μηχανική καταπόνηση των τμημάτων της εγκατάστασης κατά τη διάρκεια διαταραχών συχνότητας, την εξασφάλιση της λειτουργίας όλων των τμημάτων της μονάδας καθώς και το συγχρονισμό της με το δίκτυο. Σε μια πιθανή διαταραχή της συχνότητας οι μονάδες παραγωγής είναι δυνατόν (ανάλογα και με τις προστασίες τους) να τεθούν εκτός δικτύου. Για παράδειγμα σε μια σημαντική βύθιση της συχνότητας είναι δυνατόν να ενεργοποιηθούν οι προστασίες υποσυχνότητας κάποιων γεννητριών και να μειωθεί περαιτέρω η τιμή της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος άρα και της συχνότητας με τελικό

αποτέλεσμα (αν δεν υπάρξει παρέμβαση στο φορτίο) καθώς συνεχώς θα βγαίνουν γεννήτριες εκτός δικτύου να έχουμε κατάρρευση της συχνότητας και να τεθεί το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας εκτός λειτουργίας. Για την αποφυγή τέτοιων καταστάσεων κάθε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας διαθέτει στρεφόμενη εφεδρεία, δηλαδή γεννήτριες οι οποίες λειτουργούν αλλά δεν παράγουν τη μέγιστη ισχύ, προκειμένου να είναι δυνατή, σε μικρό χρονικό διάστημα, η αύξηση της παραγωγής ισχύος και να καλυφθούν διαταραχές στη ζήτηση ή βλάβες σε άλλες γεννήτριες. Εκτός όμως της στρεφόμενης εφεδρείας η διατήρηση της συχνότητας στα επιθυμητά επίπεδα είναι δυνατή με επεμβάσεις στο φορτίο, όταν η στρεφόμενη εφεδρεία δεν αρκεί. Αυτό γίνεται με αποκοπές φορτίου οι οποίες περιορίζουν το συνολικό φορτίο του συστήματος και μειώνουν την απόκλιση μεταξύ φορτίου και παραγωγής.

Εκτός όμως από την καλή λειτουργία του συστήματος ο έλεγχος της συχνότητας αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε σχέση με την οικονομική λειτουργία του. Αυτό συμβαίνει διότι έχει ιδιαίτερη σημασία ποιες μονάδες θα αποτελούν τις μονάδες βάσης, μονάδες δηλαδή που παράγουν το μεγαλύτερο ποσοστό της ζήτησης και ποιες θα αποτελούν τις ρυθμίζουσες μονάδες, δηλαδή μονάδες που θα καλύπτουν τις αιχμές του φορτίου. Συνήθως ως μονάδες βάσης λειτουργούν μονάδες με υψηλούς βαθμούς απόδοσης, ενώ ως ρυθμίζουσες μονάδες λειτουργούν αυτές που έχουν υψηλό ρυθμό ανάληψης φορτίου – οι μονάδες δηλαδή που μπορούν με ένα σχετικά γρήγορο ρυθμό να μεταβάλουν την παραγωγή τους. Η ένταξη μονάδων σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα αρκετά σύνθετο πρόβλημα το οποίο όμως μπορεί να βελτιστοποιήσει οικονομικά τη λειτουργία του.

1.5.2 Πρωτεύουσα ρύθμιση και στατισμός

Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα η ρύθμιση της συχνότητας αποτελεί ένα θεμελιώδες πρόβλημα στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Βασίζεται σε ένα σύστημα ελέγχου το οποίο ανιχνεύει μεταβολές στην τιμή της συχνότητας και δίνει το κατάλληλο σήμα προκειμένου μεταβάλλοντας την τιμή της παραγόμενης ισχύος να αντισταθμίσει τις επιδράσεις της αρχικής μεταβολής.

Για το σκοπό αυτό εφαρμόζονται δυο τρόποι ελέγχου. Ο πρώτος ονομάζεται **πρωτεύουσα ρύθμιση** και αφορά διαδικασίες που προσαρμόζουν βραχυχρόνια την ισχύ της μονάδας στις μεταβολές ισχύος του δικτύου. Πρόκειται για έναν τοπικό, αποκεντρωμένο έλεγχο, έναν έλεγχο δηλαδή που δεν γίνεται κεντρικά στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αλλά σε κάθε μονάδα παραγωγής. Βασικό ρόλο στην πρωτεύουσα ρύθμιση έχει ο **ρυθμιστής στροφών**. Η διάταξη αυτή εξασφαλίζει την εξισορρόπηση παραγόμενης ισχύος και φορτίου σταθεροποιώντας με αυτόν τον τρόπο τη συχνότητα, καθώς ελέγχει τη μηχανική ισχύ που παράγεται στις γεννήτριες. Σαν είσοδο έχει την τιμή της συχνότητας περιστροφής και με βάση αυτήν αυξομειώνει την ισχύ που παράγει η γεννήτρια μέσω της ρύθμισης του καυσίμου.

Ωστόσο επειδή ο ρυθμιστής στροφών αφήνει μόνιμα σφάλματα στη συχνότητα εισάγεται και η **δευτερεύουσα ρύθμιση**. Ο έλεγχος αυτός ρυθμίζει τις μακροχρόνιες

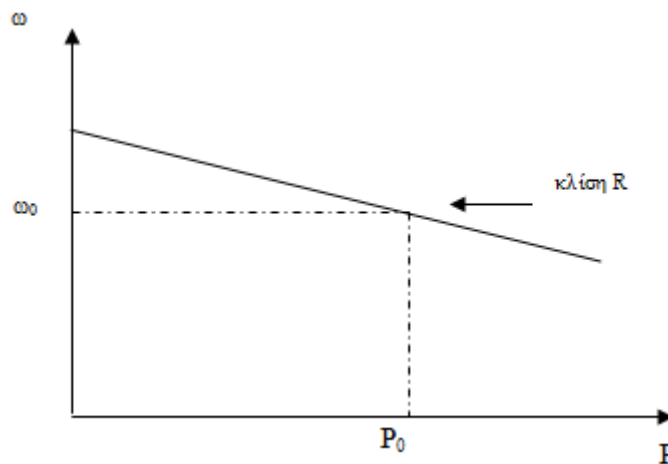
μεταβολές της ισχύος, δηλαδή αντισταθμίζει τα μόνιμα σφάλματα που προκύπτουν από την πρωτεύουσα ρύθμιση.

Γενικότερα ισχύει ότι για μικρές μεταβολές στο φορτίο χρησιμοποιούνται τα ρυθμιστικά εργοστάσια (υδροηλεκτρικά, αεριοστροβιλικά) τα οποία έχουν μικρούς χρόνους ανάληψης ισχύος, ενώ για μεγαλύτερες χρησιμοποιούνται οι ατμοηλεκτρικοί σταθμοί. Αυτό συμβαίνει γιατί η χρήση αυτών των σταθμών γίνεται προγραμματισμένα καθώς αποτελούν πολύπλοκα συστήματα και η εκκίνησή τους απαιτεί πολλές ώρες.

Κατά τη διάρκεια του πρωτεύουσας ρύθμισης όπως αναφέρθηκε και παραπάνω κεντρικό ρόλο έχει ο ρυθμιστής στροφών. Ο ρυθμιστής στροφών ανάλογα με τις μεταβολές της συχνότητας δίνει ανάλογο σήμα ώστε να προσαρμοστεί η παραγωγή της μονάδας στη μεταβολή του φορτίου κρατώντας την ταχύτητα της μονάδας σταθερή.

Ωστόσο ο ρυθμιστής στροφών παρότι διορθώνει τη συχνότητα λειτουργίας της γεννήτριας αφήνει μόνιμα σφάλματα για κάθε μεταβολή της ισχύος. Έτσι προκύπτει και το διάγραμμα φορτίου-συχνότητας το οποίο με δεδομένη μια συχνότητα αναφοράς αντιστοιχίζει κάθε τιμή της παραγόμενης ισχύος σε μια τιμή συχνότητας. Αυτή η τιμή αναφέρεται στη μόνιμο κατάσταση μετά την επίδραση του ρυθμιστή στροφών. Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται μια τυπική χαρακτηριστική καμπύλη φορτίου συχνότητας. Η κλίση της χαρακτηριστικής καμπύλης φορτίου-συχνότητας ονομάζεται **στατισμός** και συμβολίζεται με R .

$$R = -\frac{\Delta\omega}{\Delta P} \quad (1.37)$$



Σχήμα 1.1: Χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας

Ο στατισμός μετριέται συνήθως σε ποσοστό επί τοις εκατό. Ουσιαστικά αυτό που εκφράζει είναι το ποσοστό επί τοις εκατό της μόνιμης μεταβολής της συχνότητας λειτουργίας για μεταβολή του φορτίου ίση με την ονομαστική ισχύ της γεννήτριας. Η μεταβολή αυτή στη συχνότητα στη μόνιμο κατάσταση οφείλεται στο ότι ο ρυθμιστής στροφών αφήνει πάντοτε ένα μόνιμο σφάλμα συχνότητας όταν παρουσιάζεται μεταβολή του φορτίου. Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να ξεκαθαρίσουμε ότι η χαρακτηριστική

φορτίου-συχνότητας αναφέρεται στη μόνιμο κατάσταση μετά την πρωτεύουσα και πριν τη δευτερεύουσα ρύθμιση. Μετά και τη δευτερεύουσα ρύθμιση η τιμή της συχνότητας επιστρέφει στην ονομαστική της τιμή αποκαθιστώντας το μόνιμο σφάλμα του ρυθμιστή στροφών.

Με βάση το στατισμό διαφοροποιούνται οι διάφορες μονάδες του συστήματος. Για παράδειγμα αν μια μονάδα έχει μικρό στατισμό σε μια μικρή μεταβολή της συχνότητας μεταβάλει σημαντικά το φορτίο της και εξαιτίας του λόγου αυτού οι μονάδες αυτές ονομάζονται ρυθμίζουσες μονάδες. Αντίθετα μια μονάδα με μεγάλο στατισμό στην αντίστοιχη μεταβολή της συχνότητας θα μεταβάλει πολύ λιγότερο την παραγωγή της σε σχέση με την προηγούμενη μονάδα.

Στην οριακή περίπτωση μηδενικού στατισμού η συχνότητα παρουσιάζει μηδενική ευαισθησία στις αλλαγές του φορτίου. Η μέθοδος αυτή για τον έλεγχο της συχνότητας ονομάζεται επίπεδος έλεγχος. Οι μονάδες παράγουν ισχύ σε ονομαστική συχνότητα ενώ τις μεταβολές στο φορτίο τις καλύπτει η μονάδα μηδενικού στατισμού χωρίς να παρουσιάζεται μόνιμο σφάλμα στη συχνότητα.

Σημαντικό ρόλο στη διαδικασία ελέγχου της συχνότητας έχει και η αυτορρύθμιση του φορτίου. Το συνολικό φορτίο ενός συστήματος λόγω της επαγωγικής του συνιστώσας εξαρτάται από τη συχνότητα. Η εξάρτηση αυτή εκφράζεται από την τιμή της μερικής παραγώγου του φορτίου ως προς τη συχνότητα $\partial P / \partial f$. Όταν λοιπόν υπάρχει αυξημένο φορτίο σε σχέση με την παραγωγή και έχουμε βύθιση της συχνότητας το φορτίο μειώνεται λόγω της εξάρτησης της επαγωγικής συνιστώσας από την τιμή της συχνότητας, άρα μειώνεται και η διαφορά μεταξύ παραγωγής και φορτίου. Έτσι, η αυτορρύθμιση του φορτίου αποτελεί έναν παράγοντα ο οποίος τείνει να διατηρήσει το σύστημα σε ευσταθή κατάσταση αφού περιορίζει το αίτιο της διαταραχής, δηλαδή τη διαφορά μεταξύ φορτίου και παραγωγής και τη διαταραχή στην τιμή της συχνότητας.

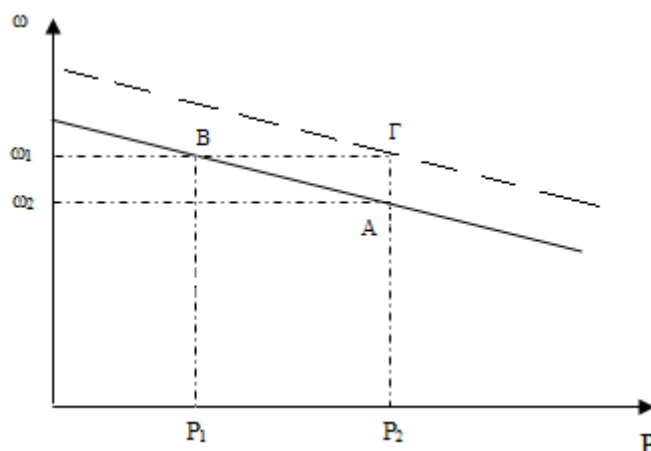
1.5.3 Δευτερεύουσα ρύθμιση

Επειδή όμως για τις διάφορες τιμές του φορτίου απαιτείται η τιμή της συχνότητας να σταθεροποιείται κοντά στην ονομαστική τιμή είναι απαραίτητο να εισαχθεί και μια επιπλέον ρύθμιση που σε ένα δεύτερο επίπεδο θα εξαλείφει το μόνιμο σφάλμα που δημιουργείται από την πρωτεύουσα ρύθμιση. Για αυτόν το λόγο διακρίνουμε, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, δυο είδη ρύθμισης: την πρωτεύουσα και τη δευτερεύουσα. Η πρωτεύουσα ρύθμιση γίνεται από τον ρυθμιστή στροφών, ενώ η δευτερεύουσα ρύθμιση γίνεται με το μηχανισμό αλλαγής στροφών.

Οι ρυθμιστές στροφών είναι εφοδιασμένοι με αυτόν το μηχανισμό, ο οποίος μεταθέτει τη χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας της μονάδας προκειμένου να μεταβάλει και την παραγόμενη ισχύ. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να μηδενίζουμε τα μόνιμα σφάλματα που παρουσιάζονται στην πρωτεύουσα ρύθμιση.

Αν για παράδειγμα σε μια γεννήτρια με τη χαρακτηριστική AB του Σχήματος 1.2 μεταβληθεί το φορτίο από P_1 σε P_2 τότε μετά την πρωτεύουσα ρύθμιση η συχνότητα θα σταθεροποιηθεί στη νέα τιμή ω_2 . Η δευτερεύουσα ρύθμιση μεταβάλλει τη θέση της

χαρακτηριστικής μετατοπίζοντάς την προς τα πάνω, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.2, οπότε η γεννήτρια παράγει τη ζητούμενη ισχύ P_2 στην ονομαστική συχνότητα ω_1 .



Σχήμα 1.2: Μετατόπιση χαρακτηριστικής φορτίου-συχνότητας με δευτερεύουσα ρύθμιση

1.6 Ανασκόπηση βιβλιογραφίας

Στα συγγράμματα [1, 2] αναπτύσσονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των ΣΗΕ και των συνιστωσών που τα αποτελούν. Στη διδακτορική διατριβή [5] και το σύγγραμμα [4] μελετάται η ευστάθεια των ΣΗΕ. Δίνονται οι βασικές έννοιες της ευστάθειας, της γραμμικοποίησης, των ιδιοτιμών και των ιδιοδιανυσμάτων των δυναμικών συστημάτων, των ρυθμών απόκρισης κλπ.

Στο σύγγραμμα [9] αναπτύσσονται βασικές αρχές της θερμοδυναμικής και της ρευστομηχανικής που είναι απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για τη μελέτη των θερμικών στροβιλομηχανών. Επίσης περιγράφεται λεπτομερώς η λειτουργία των συμπιεστών και των στροβίλων. Στα συγγράμματα [3, 12, 14, 19] παρουσιάζονται θέματα που αφορούν στη λειτουργία των αεριοστροβίλων με μεγάλη λεπτομέρεια.

Στη διπλωματική εργασία [6] και το ερευνητικό έργο [13] αναπτύσσονται οι αρχές για τη μοντελοποίηση των αεριοστροβίλων και συγκεκριμένα μοντέλα για την προσομοίωση στο Simulink της Matlab. Συγκεκριμένα, στο ερευνητικό έργο [13] αναπτύσσονται μοντέλα για τη δυναμική προσομοίωση αυτόνομων συστημάτων και σε αυτά συμπεριλαμβάνεται και η μοντελοποίηση αεριοστροβίλων. Επίσης, στην εργασία [6] αναπτύχθηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης μιας μονάδας συνδυασμένου κύκλου όπου περιγράφονται η μοντελοποίηση του θερμοδυναμικού μέρους και ο τρόπος ελέγχου της μονάδας. Η [6] βασίστηκε στην εργασία [7] όπου παρουσιάζεται ένα μοντέλο προσομοίωσης ενός αεριοστροβίλου με τις διατάξεις ελέγχου του, τις σχέσεις που περιγράφουν τη λειτουργία του και τις τιμές των παραμέτρων του. Επίσης βασίστηκε και στην εργασία [8] όπου δίνεται ένα μοντέλο προσομοίωσης μιας μονάδας συνδυασμένου κύκλου και περιγράφεται ο τρόπος ελέγχου της και οι τιμές των παραμέτρων.

Στην αναφορά [15] παρουσιάζεται μια μέθοδος μεταβατικής αύξησης της ισχύος ενός αεριοστροβίλου και η υλοποίησή της με τη χρήση ενός αεροφυλακίου αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα. Στο τεχνικό φυλλάδιο [11] παρουσιάζονται στοιχεία από διάφορες θερμικές μονάδες του ΑΗΣ Χανίων που δόθηκαν από τη ΔΕΗ ΑΕ κατά τη διάρκεια επίσκεψης στον ΑΗΣ Χανίων στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου [13] και στο [17] παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των αεριοστροβίλων διπλού άξονα συγκεκριμένης κατασκευάστριας εταιρείας.

1.7 Σκοπός και δομή της εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη και η προσομοίωση ενός μοντέλου αεριοστροβίλου απλού άξονα με αεροφυλάκιο και η ανάπτυξη και η προσομοίωση ενός μοντέλου αεριοστροβίλου διπλού άξονα.

Με βάση τη βιβλιογραφία [6, 7, 8, 13] υλοποιείται ένα μοντέλο αεριοστροβίλου απλού άξονα στο Simulink, το οποίο γίνεται η βάση πάνω στην οποία θα αναπτυχθούν και τα μοντέλα ενός αεροφυλακίου για τη μεταβατική αύξηση της ισχύος ενός αεριοστροβίλου και ενός μοντέλου αεριοστροβίλου διπλού άξονα. Η χρήση του αεροφυλακίου δίνει τη δυνατότητα μεταβατικής αύξησης της ισχύος πάνω από το ονομαστικό φορτίο αλλά και ταχείας αύξησης της ισχύος του αεριοστροβίλου χωρίς τον κίνδυνο υπερθέρμανσης, ενώ παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες μεθόδους αύξησης της ισχύος των αεριοστροβίλων. Για παράδειγμα η χρήση του δεν εξαρτάται από τις συνθήκες του περιβάλλοντος όπως συμβαίνει με τις μεθόδους έγχυσης νερού ή ατμού στο στρόβιλο ενώ μπορεί να βελτιώσει την απόκριση συχνότητας αυξάνοντας άμεσα την παραγόμενη ισχύ του αεριοστροβίλου. Για το λόγο αυτό είναι χρήσιμο να μοντελοποιηθεί η λειτουργία του μιας και η μέθοδος της αποθήκευσης ενέργειας μέσω συμπιεσμένου αέρα κερδίζει έδαφος. Η ανάπτυξη του μοντέλου περιλαμβάνει τη σχεδίαση και υλοποίηση των διατάξεων ελέγχου του καθώς και την επιλογή των κατάλληλων τιμών των παραμέτρων.

Σκοπός της εργασίας είναι ακόμα η ανάπτυξη ενός μοντέλου αεριοστροβίλου διπλού άξονα με βάση τις αρχές ελέγχου και λειτουργίας του μοντέλου απλού άξονα. Όπως προαναφέραμε, οι αεριοστροβίλοι διπλού άξονα παρουσιάζουν διάφορα λειτουργικά και οικονομικά πλεονεκτήματα οπότε υπάρχει ανάγκη μοντελοποίησης και παράστασής τους ώστε να μελετηθεί η λειτουργία τους σε μελέτες δυναμικής συμπεριφοράς ΣΗΕ.

Για την ανάπτυξη του μοντέλου πρέπει να τροποποιηθούν κατάλληλα οι θερμοδυναμικές σχέσεις για να περιγράφουν τη λειτουργία του αεριοστροβίλου διπλού άξονα. Επίσης πρέπει να προσομοιωθεί η λειτουργία του άξονα της αεριογόνου και να υλοποιηθεί η διάταξη ελέγχου της ταχύτητάς της. Ακόμα, πρέπει να επιλεγούν οι κατάλληλες τιμές των παραμέτρων του μοντέλου με βάση τη βιβλιογραφία και τα διαθέσιμα στοιχεία και να γίνουν οι απαραίτητες ρυθμίσεις στο μοντέλο ώστε να βελτιστοποιηθεί η λειτουργία του.

Το μοντέλο αεριοστροβίλου απλού άξονα με αεροφυλάκιο και το μοντέλο αεριοστροβίλου διπλού άξονα θα υλοποιηθούν στην παρούσα εργασία σε περιβάλλον

Simulink, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μελέτες δυναμικής συμπεριφοράς ΣΗΕ.

Η διπλωματική αυτή εργασία διαρθρώνεται ως εξής: Στο 1^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται βασικές έννοιες που είναι απαραίτητες για τη μελέτη ευστάθειας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας όπως τα δυναμικά συστήματα, η γραμμικοποίηση, οι ρυθμοί απόκρισης κλπ.

Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε κάποιες βασικές αρχές της θερμοδυναμικής (ορισμός τέλει αερίου, πρώτο και δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα, βασικές θερμοδυναμικές μεταβολές κλπ) που είναι απαραίτητες για την κατανόηση της λειτουργίας των θερμικών στροβιλομηχανών και των θερμοδυναμικών σχέσεων που περιγράφουν τις μεταβολές σε έναν αεριοστρόβιλο.

Στο 3^ο κεφάλαιο περιγράφονται οι κατηγορίες των στροβιλομηχανών και δίνονται κάποιες αρχές της ρευστομηχανικής. Έπειτα εξετάζονται οι βασικές συνιστώσες ενός αεριοστρόβιλου (συμπιεστής, θάλαμος καύσης, στρόβιλος) όπου περιγράφεται η αρχή λειτουργίας τους και αναπτύσσονται οι αντίστοιχες εξισώσεις. Επίσης γίνεται αναφορά στον ιδανικό και στον πραγματικό θερμοδυναμικό κύκλο του αεριοστρόβιλου.

Στο 4^ο κεφάλαιο δίνονται οι θερμοδυναμικές εξισώσεις που περιγράφουν τη λειτουργία ενός αεριοστρόβιλου οι οποίες είναι απαραίτητες για τη μοντελοποίησή του. Έπειτα περιγράφονται όλες οι διατάξεις ελέγχου και οι συναρτήσεις μεταφοράς του μοντέλου ενώ στις επόμενες ενότητες περιγράφονται τα μοντέλα που αναπτύσσονται για τον αεριοστρόβιλο απλού άξονα με αεροφυλάκιο και τον αεριοστρόβιλο διπλού άξονα.

Στο 5^ο κεφάλαιο περιγράφεται η υλοποίηση του μοντέλου του αεριοστρόβιλου απλού άξονα στο Simulink του Matlab. Κατόπιν υλοποιείται το μοντέλο του αεροφυλακίου με τον απαραίτητο έλεγχο λειτουργίας του και επιλέγονται οι κατάλληλες τιμές των παραμέτρων του. Επίσης γίνονται και οι απαραίτητες τροποποιήσεις στο μοντέλο αεριοστρόβιλου απλού άξονα ώστε να εισαχθεί το μοντέλο του αεροφυλακίου σε αυτό. Τέλος γίνεται η προσομοίωση ορισμένων διαταραχών όπως η βηματική μεταβατική αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου ή η βηματική μόνιμη αύξηση του φορτίου και εξάγονται τα συμπεράσματα.

Στο 6^ο κεφάλαιο υλοποιείται το μοντέλο του αεριοστρόβιλου διπλού άξονα. Μετά εξετάζεται η επίδραση του συστήματος καυσίμου, της αδράνειας του άξονα της γεννήτριας και του ρυθμιστή στροφών στην απόκριση της συχνότητας και γίνονται οι απαραίτητες τροποποιήσεις ώστε η μονάδα να λειτουργεί ικανοποιητικά. Κατόπιν γίνεται η προσομοίωση ορισμένων διαταραχών όπως η βηματική μεταβατική αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου ή η βηματική μόνιμη αύξηση του φορτίου και εξάγονται τα συμπεράσματα.

Στο 7^ο κεφάλαιο αναλύονται τα συμπεράσματα από την υλοποίηση και την προσομοίωση των μοντέλων και περιγράφονται οι προοπτικές της εργασίας (περαιτέρω έρευνα και χρήση των μοντέλων σε προσομοιώσεις ευστάθειας συχνότητας ΣΗΕ).

Κεφάλαιο 2^ο: Αρχές Θερμοδυναμικής

2.1 Εισαγωγή

Ένα σύστημα που περιλαμβάνει συγκεκριμένη και σταθερή μάζα (του εργαζόμενου μέσου που χρησιμοποιείται) και στο οποίο επιτρέπονται μόνο συναλλαγές ενέργειας (θερμότητας ή έργου) με το περιβάλλον, αποτελεί ένα **κλειστό σύστημα**. Τα όρια του κλειστού συστήματος μπορεί να κινούνται, ο δε όγκος του είναι δυνατό να μεταβάλλεται αλλά η μάζα πάντοτε παραμένει η ίδια. Ένα κλειστό σύστημα στο οποίο δεν επιτρέπονται ούτε συναλλαγές θερμότητας λέγεται απομονωμένο σύστημα.

Αντίθετα, ένα σύστημα στο οποίο επιτρέπεται οποιαδήποτε συναλλαγή ενέργειας και μάζας με το περιβάλλον ορίζεται ως **ανοιχτό σύστημα**. Στα ανοιχτά συστήματα οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται ορίζοντας έναν όγκο αναφοράς ή ελέγχου με καθορισμένα όρια στο χώρο, το σύνολο ή τμήμα του οποίου διαρρέει εισερχόμενη και εξερχόμενη η μάζα του εργαζόμενου μέσου.

2.2 Ορισμός τέλειου αερίου

Τα πραγματικά αέρια υπακούουν σε σχετικά πολύπλοκες καταστατικές εξισώσεις και για αυτό συχνά χρησιμοποιείται η έννοια του τέλειου αερίου ως προσέγγιση. Στην περίπτωση του τέλειου αερίου, τα θεμελιώδη θερμοδυναμικά μεγέθη συνδέονται με την επονομαζόμενη καταστατική εξίσωση των αερίων:

$$pV = nRT \quad (2.1)$$

όπου

p η πίεση του αερίου

n τα γραμμομόρια του αερίου (σε mol)

V ο όγκος που καταλαμβάνει το αέριο

T η θερμοκρασία του σε βαθμούς Kelvin

R η παγκόσμια σταθερά των αερίων

Η εξίσωση (2.1) ονομάζεται καταστατική επειδή συνδέει τα καταστατικά μεγέθη του αερίου, δηλαδή την πίεση, την θερμοκρασία και τον όγκο. Η τιμή της σταθεράς R είναι ανεξάρτητη από την φύση του αερίου. Η παραπάνω εξίσωση λόγω της σχέσης $n=m/M$ (όπου m η μάζα του αερίου και M το μοριακό βάρος του) συνήθως γράφεται ως:

$$pv = RT \quad (2.2)$$

όπου

v ο ειδικός όγκος, δηλαδή $v=V/m$ σε m^3/kg .

p η πίεση του αερίου σε kPa

$R = \underline{R}/M$ η ειδική σταθερά του αερίου σε $kJ/kg.K$

$\underline{R}$ η προαναφερθείσα παγκόσμια σταθερά των αερίων = $8.3143 kJ/kmol.K$

M το γραμμομόριο του αερίου σε g/mol .

Για τον αέρα ειδικά ισχύει $R=0.287 kJ/kg.K$. Επίσης ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$u(T) = \int_0^T c_v(T) dT \quad (2.3)$$

$$R = c_p - c_v \quad (2.4)$$

$$c_v = c_v(T) = \frac{du}{dT} = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad (2.5)$$

όπου c_v είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο σε $kJ/kg.K$

$$c_p = c_p(T) = \frac{dh}{dT} = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad (2.6)$$

όπου c_p είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση επίσης σε $kJ/kg.K$, u είναι η ειδική εσωτερική ενέργεια και h η ειδική ενθαλπία, για τις οποίες θα γίνει λόγος σε επόμενη ενότητα.

2.3 Πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα

2.3.1 Κλειστό θερμοδυναμικό σύστημα

Σε ένα κλειστό σύστημα το πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα διατυπώνεται ως εξής: για ένα δεδομένο κλειστό σύστημα σε ηρεμία, το αλγεβρικό άθροισμα της θερμότητας που προσδίδεται σε αυτό ή απάγεται από αυτό και του έργου που παράγεται ή δαπανάται, κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας, ισούται με τη μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του συστήματος [7]. Η διατύπωσή του έχει ως εξής:

$$\delta Q = \delta U + \delta W \quad (2.7)$$

όπου Q είναι η συναλλασσόμενη θερμότητα με το περιβάλλον και είναι θετική όταν αναφέρεται σε ποσά θερμότητας που εισέρχονται στο σύστημα, W είναι το έργο που παράγεται ή δαπανάται και είναι θετικό όταν παράγεται από το σύστημα και U είναι η εσωτερική ενέργεια (το άθροισμα όλων των μορφών ενέργειας που περιλαμβάνει και

έχουν σχέση με την εσωτερική του κατάσταση). Αν m είναι η μάζα του εργαζόμενου μέσου, η παραπάνω σχέση διαιρώντας με τη μάζα m γράφεται ως εξής:

$$\delta q = \delta u + \delta w \quad (2.8)$$

Με μικρό γράμμα συμβολίζεται η ειδική θερμότητα, η ειδική εσωτερική ενέργεια και το ειδικό έργο αντίστοιχα. Πρόκειται για τα γνωστά μεγέθη ανά μονάδα μάζας. Δηλαδή ισχύει ότι:

$$\delta q = \frac{\delta Q}{m}, \quad \delta w = \frac{\delta W}{m}, \quad \delta u = \frac{\delta U}{m}$$

Η ειδική εσωτερική ενέργεια είναι ιδιότητα ενός υλικού και εξαρτάται από την κατάσταση στην οποία αυτό βρίσκεται, ανεξάρτητα από τον τρόπο που έγινε η μετάβαση στην κατάσταση αυτή. Ως εκ τούτου, σαν καταστατικό μέγεθος, η διαφορά δu είναι τέλει διαφορικό. Αντίθετα, οι ποσότητες δq και δw εξαρτώνται από τη διεργασία που ακολουθήθηκε για να προκύψει η τελική κατάσταση. Σε διαφορική μορφή η εξίσωση γράφεται (χωρίς οι ποσότητες dw , dq να είναι τέλεια διαφορικά):

$$dq = du + dw \quad (2.9)$$

2.3.2 Ανοιχτό θερμοδυναμικό σύστημα

Μια διεργασία ροής μπορεί να είναι χρονικά μόνιμη ή μη μόνιμη. Εξετάζουμε μόνο τη μόνιμη ροή για την οποία ισχύει [7]:

- Ο χρονικός ρυθμός της ροής μάζας από τα όρια του συστήματος παραμένει σταθερός. Αυτό σημαίνει ότι η μάζα του εργαζόμενου μέσου που εισέρχεται στο σύστημα ισούται με τη μάζα που το εγκαταλείπει.
- Η μεταφορά ενέργειας προς και από το σύστημα πρέπει να γίνεται με σταθερό χρονικό ρυθμό.
- Οι ιδιότητες του εργαζόμενου μέσου σε κάθε σημείο του συστήματος δεν μεταβάλλονται με το χρόνο. Μια ιδιότητα μπορεί να μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο, αλλά παραμένει σταθερή για το ίδιο σημείο, καθώς αυτό διαρρέεται από το ρευστό.

Θεωρούμε ένα ανοιχτό σύστημα μόνιμης και συνεχούς ροής σε έναν όγκο ελέγχου. Σε διάστημα δt εισέρχεται από την είσοδο και εξέρχεται στην έξοδο μάζα δm του εργαζόμενου μέσου. Στο ίδιο χρονικό διάστημα προσδίδεται θερμότητα δQ και παράγεται έργο δW . Για τον όγκο ελέγχου το ενεργειακό ισοζύγιο βάσει του πρώτου θερμοδυναμικού αξιώματος έχει ως εξής:

$$\delta Q = \delta m \left(u_2 - u_1 + \frac{V_2^2}{2} - \frac{V_1^2}{2} + gz_2 - gz_1 + v_2 p_2 - v_1 p_1 \right) + \delta W \quad (2.10)$$

Ο δείκτης 2 δηλώνει τη θέση εξόδου και ο 1 τη θέση εισόδου από τον όγκο αναφοράς. Μπορούμε να απαλείψουμε τον όρο gz (z είναι το υψόμετρο) που εκφράζει τη διαφορά δυναμικής ενέργειας αφού στις μηχανές στις οποίες εστιάζουμε η διαφορά $z_2 - z_1$ είναι αμελητέα. Διαιρώντας και με το χρόνο δt έχουμε:

$$\dot{Q} = \dot{m} \left[[u]_{in}^{out} + \left[\frac{V^2}{2} \right]_{in}^{out} + [vp]_{in}^{out} \right] + \dot{W} \quad (2.11)$$

Όπου $\dot{Q}$ ο ρυθμός συναλλαγής θερμότητας, $\dot{W}$ ο ρυθμός παραγωγής έργου και $\dot{m}$ ο ρυθμός παροχής μάζας. Το σύμβολο $[.]$ εκφράζει διαφορές μεταξύ τιμών εξόδου (out) και εισόδου (in) στον όγκο αναφοράς. Έργο εξώθησης (που ισούται με $\dot{m}pv$) είναι το έργο που παράγει και καταναλίσκει το σύστημα για την έξοδο και είσοδο αντίστοιχα του ρευστού μέσω των ορίων του ανοιχτού συστήματος. v είναι ο ειδικός όγκος (V/m) και p η στατική πίεση του ρευστού.

Εναλλακτικά η παραπάνω σχέση γράφεται και ως:

$$\dot{q} = [u]_{in}^{out} + \left[\frac{V^2}{2} \right]_{in}^{out} + [vp]_{in}^{out} + \dot{w} \quad (2.12)$$

όπου το q είναι η συναλλαγή θερμότητας ανηγμένη στη μονάδα μάζας του εργαζόμενου μέσου που διασχίζει τα όρια του όγκου αναφοράς, όπως και το w αντίστοιχα το ανηγμένο έργο. Γενικεύοντας, θεωρώντας μια στοιχειώδη μεταβολή, η παραπάνω εξίσωση γράφεται σε διαφορική μορφή:

$$dq = du + dw + d \left(\frac{V^2}{2} \right) + vdp + pdv \quad (2.13)$$

Το άθροισμα $pv+u$ εκφράζεται με τον όρο ενθαλπία, δηλαδή $h=pv+u$. Πρόκειται για την ειδική ενθαλπία ($h=H/m$), δηλαδή την ενθαλπία ανά μονάδα μάζας. Η ενθαλπία H ισούται με $H=pV+U$. Η ενθαλπία, όπως και η εσωτερική ενέργεια, μετρώνται ως προς κάποια αυθαίρετη τιμή αναφοράς, αν και αυτό που ενδιαφέρει στους υπολογισμούς είναι η μεταβολή των μεγεθών αυτών. Έτσι, προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$\dot{Q} = \dot{m} \left[[h]_{in}^{out} + \left[\frac{V^2}{2} \right]_{in}^{out} \right] + \dot{W} \quad (2.14)$$

Η άθροιση της στατικής ενθαλπίας h και της κινητικής ενέργειας ορίζει ένα νέο μέγεθος, την ολική ενθαλπία h_t :

$$h_t = h + \frac{V^2}{2} \quad (2.15)$$

Από τις δύο παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι:

$$\dot{Q} = \dot{m}[h_t]_{in}^{out} + \dot{W} \quad (2.16)$$

Για ασυμπίεστες ροές, δηλαδή για ροές όπου η πυκνότητα ρ (άρα κι ο ειδικός όγκος v) είναι ή θεωρούνται σταθερά, ορίζεται το μέγεθος της ολικής πίεσης ως εξής:

$$p_t = p + \frac{1}{2}\rho V^2 \quad (2.17)$$

Η προηγούμενη σχέση ισχύει για ασυμπίεστες ροές, για τις οποίες η ενεργειακή εξίσωση της μόνιμης και συνεχούς ροής γράφεται:

$$\dot{Q} = \dot{m} \left[\left[\frac{p_t}{\rho} \right]_{in}^{out} + [u]_{in}^{out} \right] + \dot{W} \quad (2.18)$$

Μια ισοδύναμη γραφή του πρώτου θερμοδυναμικού αξιώματος είναι η εξίσωση του Gibbs:

$$Tds = du + pdv \quad (2.19)$$

Το μέγεθος s ονομάζεται ειδική εντροπία (και προκύπτει ως $s=S/m$, όπου S η εντροπία) και ορίζεται στην επόμενη ενότητα. Από τη σχέση της ειδικής ενθαλπίας $h=u+pv$ προκύπτει με διαφορίση:

$$dh=du+pdv+vdp \quad (2.20)$$

Από το συνδυασμό των παραπάνω σχέσεων προκύπτει:

$$Tds = dh - vdp \Rightarrow ds = \frac{dh}{T} - \frac{v}{T}dp = c_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p} \quad (2.21)$$

όπου έγινε χρήση της καταστατικής των αερίων.

Μέχρι τώρα δεν έγινε καμία ιδιαίτερη αναφορά για το αν η ροή που μελετάται, συμπίεστη ή ασυμπίεστη, διέπεται ή όχι από απώλειες λόγω τριβής. Στην περίπτωση ύπαρξης εσωτερικών τριβών γίνεται η παραδοχή ότι η θερμότητα τριβής, η οποία ισοδυναμεί με το έργο των δυνάμεων τριβής στην επιφάνεια κάθε ρευστοστοιχείου που ανήκει στο μελετώμενο σύστημα, μεταφέρεται αυτόματα σε κάθε σημείο του ρευστοστοιχείου. Η παραδοχή αυτή είναι σε πλήρη συμφωνία με τη θερμοδυναμική ισορροπία. Με την παραδοχή αυτή να διέπει κάθε ρευστοστοιχείο που διασχίζει τον όγκο αναφοράς, είναι προφανές ότι δεν υπάρχει θερμότητα τριβής η οποία να διαφεύγει προς

τον περιβάλλοντα χώρο και συνεπώς δεν υπάρχει λόγος να μεταβάλλεται η ολική ενέργεια της ροής. Ανάλογα όμως με το αν η ροή θεωρείται συμπιεστή ή ασυμπίεστη, η θερμότητα τριβής συμμετέχει με διαφορετικό τρόπο στην ενεργειακή εξίσωση.

Στις συμπιεστές ροές η θερμότητα αποτελεί τμήμα της ενέργειας που συμπεριλαμβάνεται στο μέγεθος της ολικής ενθαλπίας. Για το λόγο αυτό η ενεργειακή εξίσωση (2.16) δεν περιέχει κάποιο διακριτό όρο που να αντιστοιχεί στο έργο λόγω εσωτερικών τριβών. Στις ασυμπίεστες ροές η εξίσωση (2.18) διατυπώθηκε ως συνάρτηση της ολικής πίεσης p_i που είναι το άθροισμα της στατικής πίεσης και της κινητικής ενέργειας. Για το λόγο αυτό η ενεργειακή εξίσωση για το ασυμπίεστο ρευστό συμπεριλαμβάνει ρητά τους όρους των απωλειών, αφού η θερμότητα τριβής αυξάνει τη θερμοκρασία του ασυμπίεστου ρευστού και συνεπώς την εσωτερική του ενέργεια. Η αύξηση αυτή της θερμοκρασίας είναι πάρα πολύ μικρή και μη χρησιμοποιήσιμη.

2.4 Δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα

Η μετατροπή της θερμότητας σε μηχανικό έργο γίνεται με θερμικές μηχανές, οι οποίες παραλαμβάνουν θερμότητα από ένα θερμοδοχείο υψηλής θερμοκρασίας, μετατρέπουν ένα τμήμα της σε μηχανικό έργο και το υπόλοιπο το αποδίδουν σε ένα άλλο θερμοδοχείο χαμηλότερης θερμοκρασίας. Ο θερμικός βαθμός απόδοσης μιας μηχανής ορίζεται ως [7]:

$$\eta_{th} = \frac{W}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad (2.22)$$

όπου W το παραγόμενο έργο, Q_1 και Q_2 η προσδιδόμενη και απορριπτόμενη θερμότητα αντίστοιχα.

Το δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα εκφράζει την απόλυτα λογική και εμπειρικά αποδεδειγμένη πρόταση ότι είναι αδύνατο να κατασκευασθεί θερμική μηχανή η οποία εργαζόμενη περιοδικά να μετατρέπει εξ ολοκλήρου τη θερμότητα που προσλαμβάνει σε μηχανικό έργο, χωρίς ταυτόχρονα να αποδίδει ένα ποσό θερμότητας σε ένα θερμοδοχείο χαμηλότερης θερμοκρασίας. Δηλαδή ο θερμικός βαθμός απόδοσης κάθε θερμικής μηχανής είναι μικρότερος της μονάδας ($\eta_{th} < 1$).

Ως αναστρέψιμη θερμοδυναμική μεταβολή ορίζουμε τη μεταβολή εκείνη η οποία μετά το πέρας της είναι δυνατόν να επανέλθει στην αρχική κατάσταση με την εκτέλεση των ίδιων διαδικασιών με αντίθετη όμως φορά.

Ας θεωρήσουμε μια στοιχειώδη αναστρέψιμη μεταβολή κατά την οποία προσφέρεται στο μελετώμενο σύστημα η θερμότητα dq_R ανά μονάδα μάζας, σε σταθερή θερμοκρασία T . Ο δείκτης R δείχνει ότι η μεταβολή είναι αντιστρέψιμη. Ορίζουμε ως μεταβολή (αύξηση) της εντροπίας του συστήματος, που σχετίζεται με την παραπάνω αναστρέψιμη μεταβολή, την ποσότητα:

$$ds = \frac{dq_R}{T} \quad (2.23)$$

Η ποσότητα s είναι η ειδική εντροπία (αφού και η θερμότητα είναι ειδική στον ορισμό), δηλαδή ανηγμένη στη μονάδα μάζας. Αν η αναστρέψιμη μεταβολή δεν είναι στοιχειώδης, τότε η ολική μεταβολή της εντροπίας μεταξύ των καταστάσεων 1 και 2 προκύπτει από την υποδιαίρεσή της σε διαδοχικές στοιχειώδεις μεταβολές και ολοκλήρωση ώστε:

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{dq_R}{T} \quad (2.24)$$

Η εντροπία αποδεικνύεται ότι είναι συνάρτηση μόνο της κατάστασης στην οποία βρίσκεται ένα σύστημα και όχι του τρόπου με τον οποίο το σύστημα έφτασε στην κατάσταση αυτή. Σε αντίθεση με τη θερμότητα η οποία εξαρτάται από τον τρόπο που πραγματοποιείται η μεταβολή μεταξύ αρχικής και τελικής κατάστασης, η σχετιζόμενη μεταβολή της εντροπίας εξαρτάται αποκλειστικά από την αρχική και τελική κατάσταση. Κατά συνέπεια, αν ένα σύστημα εκτελεί αναστρέψιμη θερμοδυναμική μεταβολή, η ολική μεταβολή της εντροπίας του είναι μηδενική, δηλαδή:

$$\oint ds = 0 \quad (2.25)$$

Άμεση συνέπεια του δεύτερου θερμοδυναμικού αξιώματος είναι η ανισότητα του Clausius σύμφωνα με την οποία σε ένα σύστημα που υφίσταται ένα μη αναστρέψιμο θερμοδυναμικό κύκλο (όπου η αρχική και η τελική κατάσταση ταυτίζονται) που περιλαμβάνει συναλλαγές θερμότητας, ισχύει ότι:

$$\oint \frac{dq}{T} \leq 0 \quad (2.26)$$

όπου dq η στοιχειώδης ποσότητα θερμότητας ανά μονάδα μάζας που μεταφέρεται στο σύστημα σε θερμοκρασία T . Η ισότητα ισχύει όταν όλες οι διεργασίες του κύκλου είναι αναστρέψιμες.

2.5 Μερικές συνήθεις μεταβολές

Στα κλειστά συστήματα υπάρχουν κάποιες χρήσιμες προς μελέτη μεταβολές για τα τέλεια αέρια. Με δείκτη 1 θεωρούμε την αρχική και 2 την τελική κατάσταση. Να σημειώσουμε εδώ ότι το ειδικό έργο ογκομεταβολής δίνεται από τη σχέση:

$$w_{12} = \int_1^2 p dv \quad (2.27)$$

ενώ το πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα εκφράζεται από τη σχέση:

$$Q_{12} = u_{12} + w_{12} \quad (2.28)$$

Οι συνήθεις μεταβολές που εξετάζουμε ακολούθως είναι [8]:

- Ισόθερμη μεταβολή
- Ισοβαρής μεταβολή
- Ισόχωρη μεταβολή
- Αδιαβατική μεταβολή

2.5.1 Ισόθερμη μεταβολή

Η ισόθερμη ή ισοθερμοκρασιακή μεταβολή είναι η μεταβολή κατά την οποία η τιμή της θερμοκρασίας παραμένει σταθερή. Σύμφωνα με την καταστατική εξίσωση $pV=RT$ ο ειδικός όγκος παραμένει σταθερός και έτσι προκύπτει η σχέση:

$$p_1V_1=p_2V_2$$

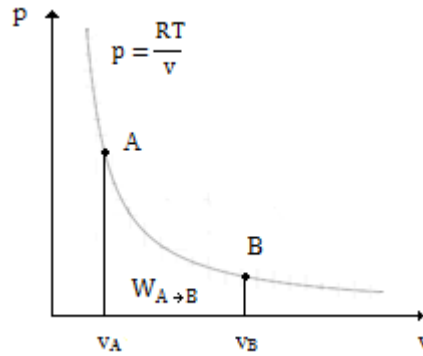
Στην περίπτωση αυτή το ειδικό έργο ογκομεταβολής είναι ίσο με:

$$w_{12} = \int_1^2 p dv = \int_1^2 \frac{RT}{v} dv = RT(\ln v_2 - \ln v_1) = RT \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (2.29)$$

Από το πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα και το γεγονός ότι η εσωτερική θερμότητα εξαρτάται από τη θερμοκρασία και μόνο συμπεραίνουμε ότι ισχύει:

$$Q_{12} = w_{12}$$

Αυτό σημαίνει πως όλη η θερμότητα που απορροφά το σύστημα χρησιμοποιείται για αύξηση του όγκου και παραγωγή έργου ογκομεταβολής. Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται μια ισόθερμη μεταβολή σε διάγραμμα πίεσης-ειδικού όγκου, όπου $v_B > v_A$ και έχουμε εκτόνωση του αερίου και έτσι θετικό έργο ογκομεταβολής που είναι ίσο με τη θερμότητα που απορροφά αυτό από το περιβάλλον.



Σχήμα 2.1: Διάγραμμα p-v ισόθερμης μεταβολής
(όπου: A η αρχική και B η τελική κατάσταση)

2.5.2 Ισοβαρής μεταβολή

Στην ισοβαρή μεταβολή δεν μεταβάλλεται η πίεση του συστήματος οπότε από την καταστατική εξίσωση προκύπτει:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Το ειδικό έργο ογκομεταβολής είναι ίσο με:

$$w_{12} = \int_1^2 p dv = p(v_2 - v_1) \quad (2.30)$$

Από το πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα προκύπτει ότι:

$$q_{12} = w_{12} + (u_2 - u_1) = p(v_2 - v_1) + (u_2 - u_1) = h_2 - h_1 = \int_1^2 c_p(T) dT \quad (2.31)$$

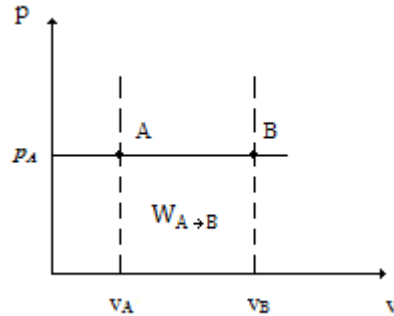
$$q_{12} \approx c_{p,aver} (T_2 - T_1) \quad (2.32)$$

Για τον απλό υπολογισμό χρησιμοποιείται μια μέση τιμή του c_p που δίνεται προσεγγιστικά από τους παρακάτω τύπους:

$$c_{p,aver} = \frac{c_p(T_2) + c_p(T_1)}{2} \quad (2.33)$$

$$c_{p,aver} = c_p(T_{aver}) = c_p\left(\frac{T_1 + T_2}{2}\right) \quad (2.34)$$

Στο Σχήμα 2.2 φαίνεται το διάγραμμα πίεσης-ειδικού όγκου για μια ισοβαρή μεταβολή, όπου η πίεση είναι σταθερή (p_A) και ο ειδικός όγκος αυξάνεται από v_A σε v_B .



Σχήμα 2.2: Διάγραμμα p-v ισοβαρούς μεταβολής (όπου: A η αρχική και B η τελική κατάσταση)

2.5.3 Ισόχωρη μεταβολή

Στην ισόχωρη μεταβολή δεν μεταβάλλεται ο όγκος του συστήματος οπότε από την καταστατική εξίσωση προκύπτει:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Το ειδικό έργο ογκομεταβολής είναι ίσο με μηδέν αφού δεν υπάρχει μεταβολή του όγκου. Οπότε:

$$q_{12} = u_2 - u_1 = \int_1^2 c_v(T) dT \approx c_{v,aver} (T_2 - T_1) \quad (2.35)$$

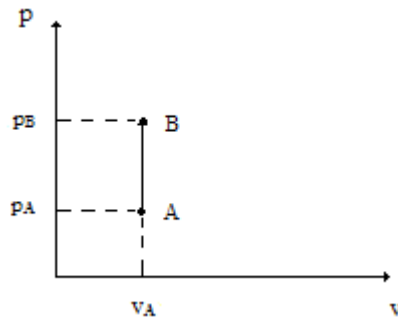
$$q_{12} \approx c_{v,aver} (T_2 - T_1) \quad (2.36)$$

Για τον απλό υπολογισμό χρησιμοποιείται μια μέση τιμή του c_v που δίνεται προσεγγιστικά από τους παρακάτω τύπους:

$$c_{v,aver} = \frac{c_v(T_2) + c_v(T_1)}{2} \quad (2.37)$$

$$c_{v,aver} = c_v(T_{aver}) = c_v\left(\frac{T_1 + T_2}{2}\right) \quad (2.38)$$

Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται το διάγραμμα πίεσης-ειδικού όγκου μιας ισόχωρης μεταβολής.



Σχήμα 2.3: Διάγραμμα P-V ισόχωρης μεταβολής
(όπου: A η αρχική και B η τελική κατάσταση)

2.5.4 Αδιαβατική μεταβολή

Κατά την αδιαβατική μεταβολή δεν έχουμε συναλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον, αυτό σημαίνει πως $q_{12} = 0$. Από τη διατύπωση του πρώτου θερμοδυναμικού αξιώματος και λόγω της μηδενικής συναλλαγής θερμότητας προκύπτει:

$$0 = w_{12} + u_2 - u_1$$

$$0 = dw_{12} + du$$

Η τελευταία σχέση σύμφωνα με τον ορισμό του έργου ογκομεταβολής και της εσωτερικής ενέργειας του τέλει αερίου γράφεται:

$$0 = p dv + c_v dT \quad (2.39)$$

Με βάση την καταστατική και την ισότητα $R = c_p - c_v$ καταλήγουμε στις παρακάτω σχέσεις που διέπουν μια αδιαβατική μεταβολή:

$$p_1 v_1^\gamma = p_2 v_2^\gamma \quad (2.40)$$

$$p_1 v_1^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = p_2 v_2^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \quad (2.41)$$

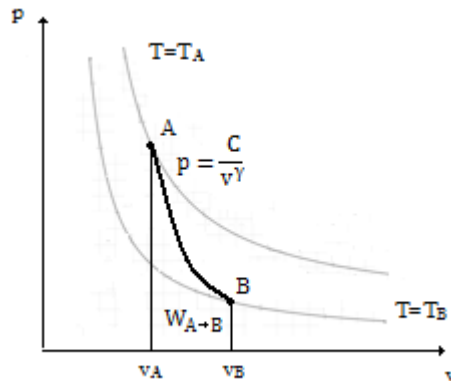
Το ειδικό έργο ογκομεταβολής είναι ίσο με:

$$w_{12} = \int_1^2 p dv = - \int_1^2 c_v dT \quad (2.42)$$

όπου το γ είναι ο λόγος των ειδικών θερμοχωρητικοτήτων και για τον αέρα είναι ίσος με 1.4:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \quad (2.43)$$

Στο Σχήμα 2.4 φαίνεται το διάγραμμα πίεσης-ειδικού όγκου μιας αδιαβατικής μεταβολής.



Σχήμα 2.4: Διάγραμμα p-v αδιαβατικής μεταβολής (όπου: A η αρχική και B η τελική κατάσταση)

2.6 Σχέσεις ολικών και στατικών μεγεθών

Σε προηγούμενη ενότητα έγινε αναφορά στα ολικά μεγέθη (που συμβολίζονται με δείκτη t) της ενθαλπίας και της πίεσης. Οι ολικές συνθήκες της ροής ενός συμπιεστού ρευστού ορίζονται ως ταυτόσημες με τις συνθήκες ισεντροπικής ανακοπής, δηλαδή τις συνθήκες στις οποίες έρχεται ένα στοιχείο ρευστού όταν επιβραδυνθεί ισεντροπικά σε μηδενική ταχύτητα. Για αυτό τα ολικά μεγέθη ονομάζονται και μεγέθη ανακοπής.

Για τέλειο αέριο ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις για τη στατική και ολική ειδική ενθαλπία αντίστοιχα:

$$h = c_p T \quad (2.44)$$

$$h_t = c_p T_t \quad (2.45)$$

Για την ολική θερμοκρασία ισχύει:

$$T_t = T + \frac{V^2}{2c_p} \quad (2.46)$$

Χρησιμοποιώντας τον ορισμό του αριθμού Mach:

$$M = \frac{V}{\sqrt{\gamma RT}} \quad (2.47)$$

προκύπτει η συσχέτιση στατικής και ολικής θερμοκρασίας, μέσω του αριθμού Mach, ως:

$$T_t = T \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right) \quad (2.48)$$

Όπως προαναφέρθηκε η σχέση που συνδέει τη στατική με την ολική πίεση είναι η (2.17) :

$$p_t = p + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (2.17)$$

Με βάση και τις σχέσεις από την ισεντροπική ροή από μια κατάσταση 1 σε μια άλλη 2 έχουμε:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}, \quad \frac{\rho_1}{\rho_2} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{\gamma}}, \quad \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{\gamma-1} \quad (2.49)$$

Μπορούμε να γράψουμε τελικά:

$$\frac{T_t}{T} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \quad (2.50)$$

$$\frac{p_t}{p} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (2.51)$$

$$\frac{\rho_t}{\rho} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (2.52)$$

Οι σχέσεις έχουν διατυπωθεί χωρίς να γίνει καμία παραδοχή για κινητική ενέργεια και συνεπώς ισχύουν εξίσου για ολικά και στατικά μεγέθη.

2.7 Υπολογισμός μεταβολών κατάστασης για μεταβλητό c_p

Για τον υπολογισμό μεταβολών εντροπίας ενός αερίου που υφίσταται μια θερμοδυναμική μεταβολή μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση του Gibbs, που εκφράζει τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο για αναστρέψιμες μεταβολές. Η σχέση (2.21) όταν εφαρμοστεί σε αέριο με σταθερό c_p και ολοκληρωθεί μεταξύ της αρχικής κατάστασης 1 και της τελικής κατάστασης 2 δίνει:

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (2.53)$$

Αν το c_p είναι μεταβλητό, τότε ορίζεται η συνάρτηση Φ από τη σχέση:

$$\Phi = \int \frac{c_p dT}{T} \quad (2.54)$$

οπότε η μεταβολή ειδικής εντροπίας γράφεται ως εξής:

$$s_2 - s_1 = \Phi_2 - \Phi_1 - R \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (2.55)$$

Η παραπάνω σχέση παρέχει έναν τρόπο υπολογισμού των ισεντροπικών μεταβολών όταν πρόκειται για αέριο με μεταβλητό c_p . Θεωρώντας τη διαφορά ειδικής εντροπίας ίση με μηδέν έχουμε για την πίεση:

$$\frac{p_2}{p_1} = e^{\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{R}} \quad (2.56)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις μπορούμε να υπολογίσουμε μεταβολές σε αέρια στα οποία η ειδική θερμοχωρητικότητα c_p είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας T του αερίου. Το c_p εκφράζεται συνήθως σε μορφή δυναμοσειράς:

$$c_p = R (\alpha_0 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + \dots) \quad (2.57)$$

Τιμές οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τους συντελεστές αυτής της εξίσωσης σε υπολογισμούς στις στροβιλομηχανές με εργαζόμενο μέσο τον αέρα είναι: $\alpha_0 = 3,31$ και $\alpha_1 = 7,31 \cdot 10^{-4}$ ενώ οι ανώτεροι όροι μπορούν να αμεληθούν. Η θερμοκρασία δίνεται σε Kelvin. Για ακριβέστερους υπολογισμούς η συσχέτιση στατικών και ολικών μεγεθών δεν γίνεται με τις σχέσεις (2.50)-(2.52) διότι το γ δεν είναι σταθερό. Οι υπολογισμοί πρέπει να γίνουν με βάση το γεγονός ότι οι ολικές και οι στατικές συνθήκες συνδέονται με ισεντροπικές σχέσεις και τις σχέσεις ορισμού ολικής ενθαλπίας και μεταβολής ενθαλπίας.

Κεφάλαιο 3^ο: Θερμικές στροβιλομηχανές

3.1 Εισαγωγικά

Με τον όρο στροβιλομηχανές χαρακτηρίζουμε μηχανές που ανταλλάσσουν ενέργεια με το ρευστό το οποίο ρέει συνεχώς μέσα σε αυτές, ενώ αυτή η μεταφορά ενέργειας συντελείται με τη δυναμική αλληλεπίδραση του ρευστού και μιας ή περισσοτέρων σειρών στρεφόμενων πτερυγίων. Στον όρο συναλλαγή ενέργειας εμπεριέχονται γενικά δύο περιπτώσεις, κατά τις οποίες η μεταφορά ενέργειας μπορεί να γίνεται είτε από το ρευστό προς την άτρακτο της μηχανής όπου είναι προσδεδεμένα τα στρεφόμενα πτερύγια ή αντίστροφα [9].

Η ύπαρξη στρεφομένων πτερυγίων αποτελεί την ειδοποιό διαφορά μεταξύ των στροβιλομηχανών και άλλων μηχανών που συναλλάσσουν ενέργεια με κάποιο ρευστό-εργαζόμενο μέσο. Ο όρος δυναμική αλληλεπίδραση, που προαναφέρθηκε, σημαίνει ότι στα πτερύγια αναπτύσσονται δυνάμεις αεροδυναμικής φύσης, αντίστοιχες της δυναμικής άνωσης που αναπτύσσεται σε μια μεμονωμένη αεροτομή που βρίσκεται μέσα στη ροή του ρευστού. Οι δυνάμεις αυτές έχουν περιφερειακή συνιστώσα, που δημιουργεί ροπή ως προς τον άξονα περιστροφής και λόγω της περιστροφής των πτερυγίων οδηγεί σε παραγωγή ή απορρόφηση μηχανικής ενέργειας στον/από τον άξονα της μηχανής. Οι συστοιχίες πτερυγίων που χρησιμοποιούνται για την πραγματοποίηση της συναλλαγής έργου σε μια στροβιλομηχανή ονομάζονται πτερυγώσεις. Συγχρόνως η συνεχής ροή ρευστού καθορίζει μια ουσιαστική διαφορά των στροβιλομηχανών από τις μηχανές μετατόπισης, όπως οι εμβολοφόρες.

3.2 Κατηγορίες στροβιλομηχανών

Οι στροβιλομηχανές μπορούν να χωριστούν σε κατηγορίες, εφαρμόζοντας διάφορα κριτήρια τα οποία σχετίζονται με το είδος της λειτουργίας, τη γεωμετρία ή άλλα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους [9].

Ο πρώτος βασικός διαχωρισμός γίνεται ανάλογα με το αν η μηχανή προσδίδει έργο στο ρευστό ή απορροφά έργο από αυτό. Οι μηχανές που απορροφούν έργο από το ρευστό και το αποδίδουν ως μηχανική ισχύ στην άτρακτο ονομάζονται **στρόβιλοι**. Οι μηχανές που προσδίδουν έργο στο ρευστό, απορροφώντας μηχανική ισχύ από την άτρακτο, ονομάζονται **εργοστροβιλομηχανές**.

Ένας άλλος διαχωρισμός γίνεται σύμφωνα με τη γεωμετρική μορφή που έχει η δίοδος του ρευστού μέσα από τη μηχανή. Στις λεγόμενες **αξονικές στροβιλομηχανές**, η δίοδος του ρευστού είναι περίπου «παράλληλη» με τον άξονα της μηχανής, ενώ όταν η δίοδος είναι κατά κύριο λόγο «κάθετη» με τον άξονα της μηχανής, τότε πρόκειται για **ακτινικές στροβιλομηχανές**. Τέλος σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει προεξάρχουσα διεύθυνση, δηλαδή έχουμε κατεύθυνση της δίοδου της ροής που δεν είναι κοντά στην αξονική ή την ακτινική, τότε πρόκειται για μηχανές **μικτής ροής**.

Το είδος του ρευστού που διαρρέει μια στροβιλομηχανή καθώς και το μέγεθος της θερμοδυναμικής μεταβολής που αυτό υφίσταται δίνει ένα άλλο κριτήριο διαχωρισμού. Έτσι οι στρόβιλοι χωρίζονται σε **υδροστροβίλους** όταν το εργαζόμενο μέσο είναι το νερό, **ατμοστροβίλους** όταν το εργαζόμενο μέσο είναι ατμός και **αεριοστροβίλους** όταν το εργαζόμενο μέσο είναι αέριο. Για τις εργοστροβιλομηχανές, όταν το εργαζόμενο μέσο είναι υγρό, χρησιμοποιείται ο όρος **αντλία**. Όταν το εργαζόμενο μέσο είναι αέριο αλλά η θερμοδυναμική μεταβολή που υφίσταται οδηγεί σε αμελητέες μεταβολές της πυκνότητάς του, τότε πρόκειται για **φυσητήρα** ή **ανεμιστήρα**. Στην περίπτωση αερίου που υφίσταται σημαντικές αλλαγές πυκνότητας και συνακόλουθα πίεσης και θερμοκρασίας, η στροβιλομηχανή ονομάζεται **συμπιεστής**. Πολλές φορές χρησιμοποιείται και ο όρος **στροβιλοσυμπιεστής** για να γίνει η διάκριση από τους εμβολοφόρους συμπιεστές.

Η συναλλαγή έργου μεταξύ στροβιλομηχανής και ρευστού πραγματοποιείται με τη χρήση σειρών πτερυγίων, όπως είπαμε προηγουμένως. Ο αριθμός των σειρών των πτερυγίων που απαρτίζουν τη μηχανή εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, ιδιαίτερα όμως από περιορισμούς που επιβάλλει η δυναμική της ροής μέσα από τη μηχανή. Για να χαρακτηρίσουμε τον αριθμό σειρών πτερυγίων από τα οποία αποτελείται μια μηχανή χρησιμοποιούμε την έννοια της βαθμίδας.

Η βαθμίδα αποτελεί ένα τυπικό στοιχειώδες μέρος μιας μηχανής και αποτελείται, στη γενική περίπτωση, από μια κινητή και μια ακίνητη πτερύγωση. Στη βαθμίδα συμπιεστή έχουμε μια κινητή πτερύγωση που ακολουθείται από μια σταθερή ενώ στην βαθμίδα στροβίλου προηγείται η σταθερή και ακολουθεί η κινητή πτερύγωση. Μια μηχανή μπορεί να αποτελείται από μια βαθμίδα (μονοβάθμια) ή περισσότερες (πολυβάθμια).

Μια μηχανή συχνά περιλαμβάνει και άλλες δύο ακίνητες πτερυγώσεις, οι οποίες δεν ανήκουν σε βαθμίδα. Αυτές είναι τα οδηγία πτερύγια εισόδου (Inlet Guide Vanes, IGV) που χρησιμεύουν για να κατευθύνουν τη ροή και να καθορίσουν την ποσότητα του αέρα πριν από την είσοδο στην πρώτη βαθμίδα και τα οδηγία πτερύγια εξόδου (Exit Guide Vanes, EGV) που επαναφέρουν τη ροή στην επιθυμητή κατεύθυνση, μετά την έξοδο από την τελευταία βαθμίδα.

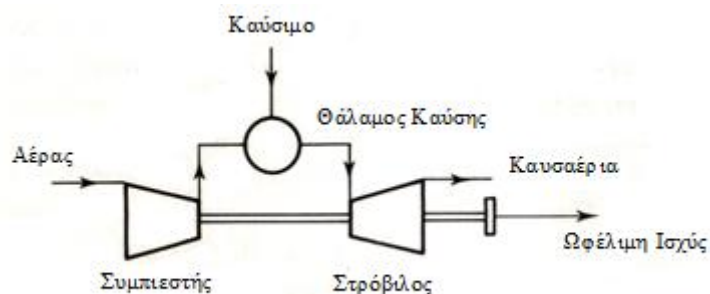
Οι αεριοστροβίλοι, που μας ενδιαφέρουν στην εργασία αυτή, αποτελούνται κατά βάση από τρία μέρη. Το συμπιεστή, το θάλαμο καύσης όπου προσδίδεται θερμότητα στο ρευστό και το στρόβιλο. Η λειτουργία κάθε μέρους θα αναλυθεί στις επόμενες ενότητες.

Οι αεριοστροβίλοι μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τη διαδρομή που εκτελεί το εργαζόμενο μέσο. Έτσι έχουμε:

- **Αεριοστροβίλους κλειστού κυκλώματος**, στους οποίους το εργαζόμενο μέσο μετά την έξοδό του από το στρόβιλο ψύχεται και επαναφέρεται στην εισαγωγή του συμπιεστή.
- **Αεριοστροβίλους ανοιχτού κυκλώματος**, όπου αναρροφάται αέρας περιβάλλοντος από το συμπιεστή και τα καυσαέρια του στροβίλου εξέρχονται στην ατμόσφαιρα. Αυτή η διάταξη είναι μηχανή εσωτερικής καύσεως.

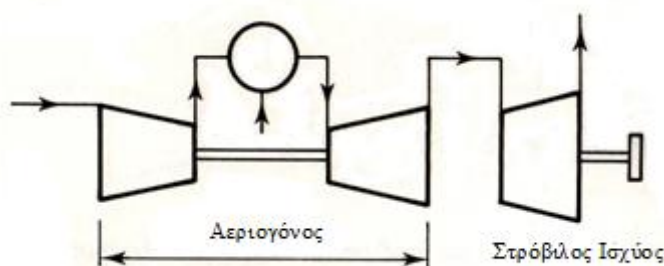
Η μηχανική ισχύς εξόδου ενός αεριοστροβίλου μπορεί να αποδοθεί με δύο ειδών διατάξεις. Στην πρώτη περίπτωση η ισχύς λαμβάνεται πάνω στην κύρια άτρακτο του αεριοστροβίλου ως η διαφορά μεταξύ της παραγόμενης από το στρόβιλο ισχύος και της

απορροφούμενης από το συμπιεστή. Η διάταξη αυτή λέγεται διάταξη **απλής ατράκτου (single shaft)** και φαίνεται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Διάταξη απλής ατράκτου

Η δεύτερη περίπτωση είναι ο συμπιεστής και ο στρόβιλος να ισορροπούν ενεργειακά και να υπάρχει δεύτερος στρόβιλος που παράγει την ισχύ εξόδου από τα καυσαέρια. Ο δεύτερος αυτός στρόβιλος ονομάζεται **στρόβιλος ισχύος (power turbine)** ή **ελεύθερος στρόβιλος (free turbine)**, ενώ το ζεύγος συμπιεστή-στροβίλου που ισορροπεί ενεργειακά ονομάζεται **αεριογόνος (gas generator)**. Η διάταξη αυτή ονομάζεται διάταξη **διδύμων ατράκτων (twin shaft)** και φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Στη θέση της αεριογόνου μπορεί να χρησιμοποιηθεί αεροπορικός στροβιλοαντιδραστήρας.



Σχήμα 3.2: Διάταξη διδύμων ατράκτων

Ο αεροπορικός **στροβιλοαντιδραστήρας (turbojet)** έχει την ίδια δομή με τον αεριοστρόβιλο αλλά είναι σχεδιασμένος ώστε η παραγόμενη ισχύς από το στρόβιλο να καλύπτει την απαιτούμενη ισχύ από το συμπιεστή συν τις ενδιάμεσες απώλειες και η μηχανή να παράγει ωστική δύναμη μέσω της εκτόνωσης της δέσμης καυσαερίων που εξέρχονται από το στρόβιλο προς την ατμόσφαιρα με κατάλληλα διαμορφωμένο ακροφύσιο εξόδου. Ο στροβιλοαντιδραστήρας χρησιμοποιείται για την προώθηση αεροσκαφών.

Ο αεριοστρόβιλος μπορεί να περιλαμβάνει μια άτρακτο πάνω στην οποία είναι τοποθετημένος ο συμπιεστής και ο στρόβιλος, οπότε έχουμε τη διάταξη απλής ατράκτου που προαναφέραμε, ή περισσότερες από μια άτρακτους, οπότε έχουμε διατάξεις **πολλαπλών ατράκτων (multi-shaft)** που στην πράξη είναι το πολύ μέχρι τρεις. Για τέτοιες μηχανές συχνά χρησιμοποιείται ο όρος μηχανή **πολλαπλών τυμπάνων** και στην πράξη συναντώνται μηχανές **διπλού τυμπάνου (two-spool)** ή **τριπλού τυμπάνου (three-spool)**. Η ορολογία αυτή προέρχεται από το γεγονός ότι ο συμπιεστής αποτελείται από

δύο ή περισσότερα τύμπανα πάνω στα οποία στερεώνονται τα στρεφόμενα πτερύγιά του. Οι άτρακτοι μπορεί να είναι ομόκεντροι ή όχι. Οι διατάξεις πολλαπλών ατράκτων χρησιμοποιούνται για την επίτευξη ικανοποιητικής περιοχής λειτουργίας του συμπιεστή σε μηχανές με μεγάλο λόγο πίεσης.

Πέραν της απλής διάταξης αεριοστροβίλου (συμπιεστής, θάλαμος καύσης, στρόβιλος) χρησιμοποιούνται και άλλες διατάξεις για τη βελτίωση της απόδοσης του κύκλου:

- Ανακόμιση θερμότητας καυσαερίων για θέρμανση του αέρα εξόδου του συμπιεστή πριν μπει στο θάλαμο καύσης
- Ενδιάμεση ψύξη κατά τη συμπίεση
- Ενδιάμεση αναθέρμανση κατά την εκτόνωση
- Συνδυασμένος κύκλος όπου τα καυσαέρια ενός ή περισσότερων αεριοστροβίλων χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ατμού και μέσω αυτού μηχανικού έργου σε ατμοστρόβιλο, αυξάνοντας τη θερμική απόδοση

3.3 Αρχές ρευστομηχανικής

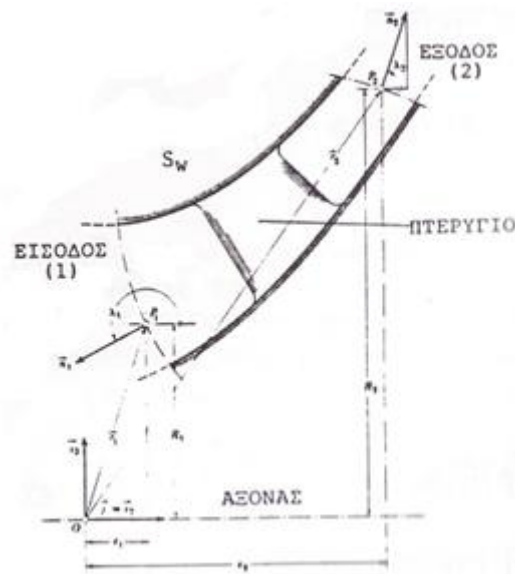
Στην ενότητα αυτή θα αναλυθούν κάποιες βασικές αρχές της ρευστομηχανικής που είναι απαραίτητες για την κατανόηση της λειτουργίας του συμπιεστή και του στροβίλου. Θα αναπτυχθεί το θεώρημα του Euler στις στροβιλομηχανές, το σχετικό σύστημα αναφοράς και τα τρίγωνα ταχυτήτων. Τέλος, στην ενότητα αυτή θα δοθούν οι βασικές αρχές της μονοδιάστατης ανάλυσης στροβιλομηχανών βάσει της οποίας θα γίνει η ανάλυση της λειτουργίας του συμπιεστή και του στροβίλου.

3.3.1 Θεώρημα του Euler στις στροβιλομηχανές

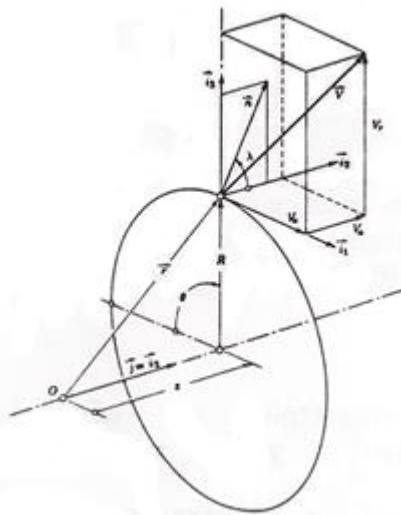
Στο Σχήμα 3.3 φαίνονται τα πτερύγια, τα οποία μαζί με το άνω και κάτω κέλυφος της μηχανής αποτελούν το τμήμα του ορίου του όγκου αναφοράς που θα συμβολίζεται με S_w , η είσοδος της διατομής S_1 και η έξοδος της διατομής S_2 . Στο σύστημα των κυλινδρικών συντεταγμένων (που φαίνεται στο Σχήμα 3.4) ισχύει για τη διανυσματική ταχύτητα $\vec{V}$:

$$\vec{V} = V_u \hat{e}_1 + V_a \hat{e}_2 + V_r \hat{e}_3 \quad (3.1)$$

όπου V_u, V_a, V_r είναι αντίστοιχα η περιφερειακή, η αξονική και η ακτινική συνιστώσα της ταχύτητας.



Σχήμα 3.3: Υπολογισμός της αξονικής ροπής σε περιφερειακή πτερύγωση

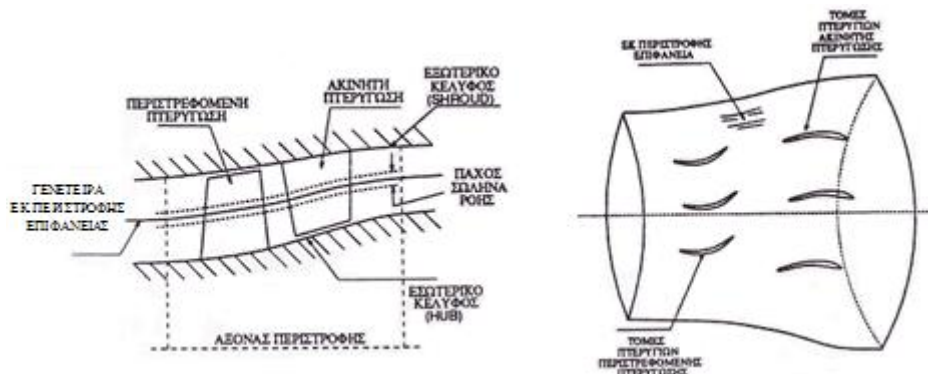


Σχήμα 3.4: Το σύστημα κυλινδρικών συντεταγμένων

Αποδεικνύεται ότι για χρονικά μόνιμη ροή ισχύει η παρακάτω σχέση για την αξονική συνιστώσα της ροπής:

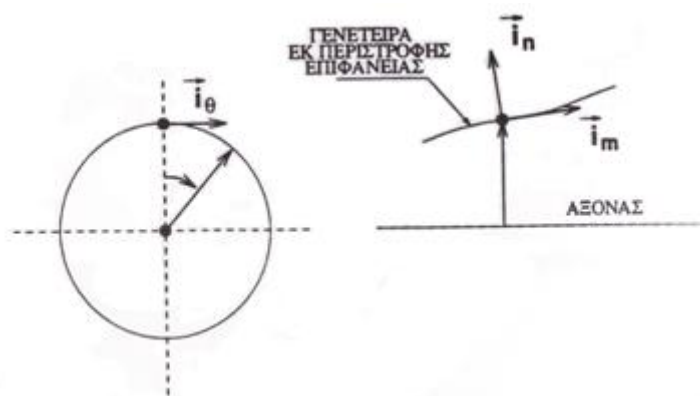
$$M_a = \int_{S_1} dm_{S1} R_1 V_{u1} - \int_{S_2} dm_{S2} R_2 V_{u2} \quad (3.2)$$

Αν εξεταστεί η περιφερειακή πτερύγωση του Σχήματος 3.5 η παραπάνω εξίσωση μπορεί να απλοποιηθεί ακόμη περισσότερο.



Σχήμα 3.5: Περιφερειακή πτερύγωση. Εκ περιστροφής επιφάνεια και σωλήνας ροής

Η επιφάνεια που φαίνεται στο Σχήμα 3.5 είναι επιφάνεια αξονικής συμμετρίας και μπορεί να θεωρηθεί ως επιφάνεια ροής, σύμφωνα με ένα απλοποιημένο μοντέλο ροής που τακτικά χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς στις στροβιλομηχανές. Η υιοθέτηση μιας τέτοιας αξονο-συμμετρικής επιφάνειας ροής σημαίνει ταυτόχρονα αμελητέες μεταβολές των μεγεθών ροής κάθετα σε αυτήν. Η επιφάνεια αυτή, στη γενική περίπτωση, δεν έχει σταθερή ακτίνα και χαρακτηρίζει ένα σωλήνα ροής μέσα στο πεδίο, με ενδεχόμενα μεταβλητό πάχος Δn . Στην περίπτωση αυτή, αντί του συστήματος κυλινδρικών συντεταγμένων, χρησιμοποιείται το σύστημα καμπυλόγραμμων συντεταγμένων, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6: Σύστημα καμπυλόγραμμων συντεταγμένων

Η κατεύθυνση m χαρακτηρίζει την τομή της εκ περιστροφής επιφάνειας με ένα μεσημβρινό επίπεδο, η περιφερειακή κατεύθυνση ορίζεται όπως και προηγουμένως, ενώ η κατεύθυνση n είναι κάθετη στις δύο πρώτες. Στο καμπυλόγραμμο σύστημα συντεταγμένων, οι συνιστώσες του διανύσματος της ταχύτητας είναι η περιφερειακή V_u , η μεσημβρινή V_m και η κάθετη V_n .

Αν $\dot{m}$ είναι η παροχή μάζας που περνά από το σωλήνα ροής που αντιστοιχεί στην εκ περιστροφής επιφάνεια του Σχήματος 3.5 ισχύει ότι:

$$\dot{m} = 2\pi R \cdot \Delta n \cdot \rho \cdot V_m \quad (3.3)$$

και αν επιπλέον υποθέσουμε περιφερειακά ομοιόμορφες συνθήκες ροής στην είσοδο και την έξοδο του χωρίου, τότε η συμμετοχή του συγκεκριμένου σωλήνα ροής στην αξονική ροπή της μηχανής θα είναι:

Αν $\dot{m}$ είναι η παροχή μάζας που περνά από το σωλήνα ροής που αντιστοιχεί στην εκ περιστροφής επιφάνεια του Σχήματος 3.5 ισχύει ότι:

$$M_a = \dot{m}(R_1 V_{u1} - R_2 V_{u2}) \quad (3.4)$$

όπως εύκολα προκύπτει από την προσέγγιση των ολοκληρωμάτων της σχέσης (3.2).

Η αντίστοιχη συμμετοχή στην ισχύ που μεταφέρει η πτερύγωση, προκύπτει με πολλαπλασιασμό με την γωνιακή ταχύτητα ω περιστροφής της μηχανής και είναι:

$$P = \omega M_a = \dot{m}(\omega R_1 V_{u1} - \omega R_2 V_{u2}) = \dot{m}(U_1 V_{u1} - U_2 V_{u2}) \quad (3.5)$$

όπου U είναι η γραμμική ταχύτητα περιστροφής που συνδέεται με τη γωνιακή ταχύτητα ω , με τη σχέση:

$$U = \omega R \quad (3.6)$$

Σύμφωνα με το πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα για ανοικτό σύστημα ροής με αδιαβατικές συνθήκες ροής, η μεταβολή της ολικής ενθαλπίας h_t ισούται με τη συναλλασσόμενη ισχύ. Επομένως ισχύει η σχέση:

$$h_{t2} - h_{t1} = U_2 V_{u2} - U_1 V_{u1} \quad (3.7)$$

Η τελευταία εξίσωση, η οποία καθορίζει τη μεταβολή της ολικής ενθαλπίας λόγω συναλλαγής έργου στον άξονα της στροβιλομηχανής, λέγεται και εξίσωση του Euler. Η εξίσωση διατήρησης της ροπής της ορμής, όταν εφαρμοστεί κατά μήκος ενός αξονο-συμμετρικού σωλήνα ροής που δεν περιέχει στερεά τοιχώματα, όπου δηλαδή η ροπή είναι μηδενική, δίνει ότι:

$$R_1 V_{u1} = R_2 V_{u2} \quad (3.8)$$

Υπενθυμίζεται πάντως ότι, για την εξαγωγή της σχέσης αυτής, αμελούνται οι δυνάμεις εσωτερικών τριβών.

3.3.2 Σχετικό σύστημα αναφοράς

Η μελέτη της ροής στις θερμικές στροβιλομηχανές αφορά ακίνητες και κινητές πτερυγώσεις, όπου οι τελευταίες περιστρέφονται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω γύρω από τον άξονα της μηχανής. Η περιγραφή των φαινομένων διευκολύνεται σημαντικά όταν γίνεται με τη χρήση ενός συστήματος αναφοράς που είναι ακίνητο ως προς τα πτερύγια

που μελετώνται κάθε φορά. Έτσι, είναι βολικό να χρησιμοποιείται ένα σύστημα αναφοράς ακίνητο ως προς έναν εξωτερικό παρατηρητή για τη μελέτη των ακίνητων (ή σταθερών, όπως αλλιώς λέγονται) πτερυγίων. Ένα τέτοιο σύστημα και τα μεγέθη που αναφέρονται σε αυτό θα ονομάζεται απόλυτο. Οι κινητές πτερυγώσεις είναι βολικό να μελετώνται ως προς ένα σύστημα αναφοράς που περιστρέφεται με τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου της μηχανής. Το σύστημα αυτό θα ονομάζεται σχετικό ή περιστρεφόμενο και όλες οι ποσότητες που θα αναφέρονται σε αυτό σχετικές.

Μπορεί τώρα να εισαχθεί ο ορισμός της απόλυτης $\vec{V}$ και της σχετικής $\vec{W}$ ταχύτητας. Αν η θέση ενός τυχόντος ρευστοστοιχείου καθορίζεται για το απόλυτο σύστημα αναφοράς με το στιγμιαίο διάνυσμα θέσης $\vec{r}$, ενώ για το σχετικό σύστημα με το αντίστοιχο $\vec{r}_R$, τα διανύσματα της απόλυτης και της σχετικής ταχύτητας ορίζονται ως εξής:

$$\vec{V} = \frac{d\vec{r}}{dt}, \vec{W} = \frac{d\vec{r}_R}{dt}$$

Κατά τα γνωστά από τη μηχανική, η συσχέτιση μεταξύ των διανυσμάτων $\vec{V}$ και $\vec{W}$ δίνεται από τη σχέση:

$$\vec{V} = \vec{W} + \vec{\omega} \times \vec{r}_R \quad (3.9)$$

όπου ισχύει:

$$|\vec{\omega} \times \vec{r}_R| = |\vec{\omega} \times \vec{r}| = \omega R \quad (3.10)$$

Ισχύει ότι $U = \omega R$, όπου U είναι η γραμμική ταχύτητα περιστροφής, ω η γωνιακή ταχύτητα και R η ακτίνα. Το διάνυσμα:

$$\vec{\omega} \times \vec{r}_R = \vec{\omega} \times \vec{r}$$

παριστάνει το διάνυσμα της περιφερειακής ταχύτητας στη θέση που μελετάμε, λόγω της περιστροφής του σχετικού συστήματος. Το διάνυσμα αυτό θα συμβολίζεται με $\vec{U}$ και συνεπώς θα είναι:

$$\vec{U} = \vec{\omega} \times \vec{r} \quad (3.11)$$

Ορίζεται ως σχετική ολική ενθαλπία η ποσότητα:

$$h_{tR} = h + \frac{W^2}{2} - \frac{\omega^2 R^2}{2} = h + \frac{W^2}{2} - \frac{U^2}{2} \quad (3.12)$$

Στο σχετικό σύστημα συντεταγμένων ορίζεται συχνά και ένα δεύτερο μέγεθος ανακοπής, αυτό της περιστρεφόμενης ενθαλπίας h_{tr} . Η σχέση ορισμού της είναι:

$$h_{tr} = h + \frac{W^2}{2} \quad (3.13)$$

Συνδυάζοντας τους παραπάνω τύπους, καταλήγουμε στη σχέση:

$$h_{tr} = h_{tR} + \frac{U^2}{2} \quad (3.14)$$

Τα δύο μεγέθη, h_{tr} , h_{tR} , έχουν διαφορετική φυσική σημασία. Η περιστρεφόμενη ολική ενθαλπία εκφράζει το μέγεθος ανακοπής το οποίο είναι άμεσα μετρήσιμο στο σύστημα. Αντίθετα, ο ορισμός της σχετική ολικής ενθαλπίας σχετίζεται με την εφαρμογή του θεωρήματος του Euler στις στροβιλομηχανές. Είναι εκείνη η ποσότητα που παραμένει αναλλοίωτη κατά μήκος της τροχιάς ενός ρευστοστοιχείου στο σχετικό σύστημα. Τέλος, για λόγους πληρότητας, παρουσιάζεται και η σχέση που συνδέει τη σχετική ολική ενθαλπία με την απόλυτη ολική ενθαλπία. Από τη σχέση ορισμού, έχουμε ότι:

$$h_{tR} = h + \frac{1}{2}[V_a^2 + (V_u - U)^2 - U^2] = h + \frac{1}{2}[V^2 - 2UV_u]$$

και τελικά:

$$h_{tR} = h_t - UV_u \quad (3.15)$$

Με τη βοήθεια της τελευταίας σχέσης, μπορεί να εξεταστεί συμπληρωματικά το θεώρημα του Euler στις στροβιλομηχανές. Το πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα οδήγησε στη γραφή της εξίσωσης του Euler. Η αναδιάταξη των όρων της σχέσης (3.7) δίνει, για ένα ανοικτό σύστημα ροής με αδιαβατικές - χρονικά μόνιμες - συνθήκες ροής, ότι:

$$h_{t1} - U_1 V_{u1} = h_{t2} - U_2 V_{u2}$$

ή με τη βοήθεια της σχέσης (3.12):

$$h_{tR1} = h_{tR2} \quad (3.16)$$

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειώσουμε ότι ορίζονται και οι αντίστοιχες θερμοκρασίες T_{tr} και T_{tR} που αντιστοιχούν στις h_{tr} και h_{tR} .

$$T_{tr} = T + \frac{W^2}{2c_p} \quad (3.17)$$

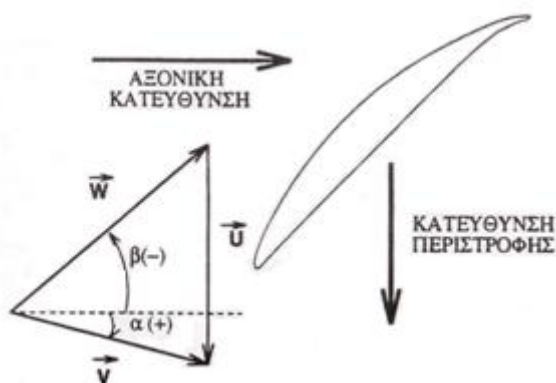
$$T_{tR} = T_{tr} + \frac{U^2}{2c_p} \quad (3.18)$$

3.3.3 Τρίγωνα ταχυτήτων

Το σχετικό σύστημα αναφοράς που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο επιτρέπει τη μελέτη των περιστρεφόμενων πτερυγώσεων, με τρόπο ανάλογο με αυτόν που χρησιμοποιείται για την ανάλυση των σταθερών πτερυγώσεων στο απόλυτο σύστημα συντεταγμένων. Η συσχέτιση των διανυσμάτων της απόλυτης και της σχετικής ταχύτητας γίνεται με τη διανυσματική σχέση (3.9). Η τελευταία, με τη βοήθεια της σχέσης (3.11), γράφεται και ως:

$$\vec{V} = \vec{W} + \vec{U} \quad (3.19)$$

Η τελευταία διανυσματική σχέση ορίζει το λεγόμενο τρίγωνο ταχυτήτων, το οποίο χρησιμοποιείται για τη μονοδιάστατη ανάλυση πτερυγώσεων στις στροβιλομηχανές. Το τρίγωνο ταχυτήτων στην είσοδο μιας περιστρεφόμενης πτερύγωσης, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7: Τρίγωνο ταχυτήτων στην είσοδο μιας περιστρεφόμενης πτερύγωσης

Στη γενική περίπτωση, το διάνυσμα της απόλυτης και της σχετικής ταχύτητας αναλύεται σε δύο συνιστώσες κατά τους κύριους άξονες της πτερύγωσης. Για μια γραμμική πτερύγωση οι δύο συνιστώσες είναι η αξονική και η περιφερειακή, για τις οποίες ισχύει ότι:

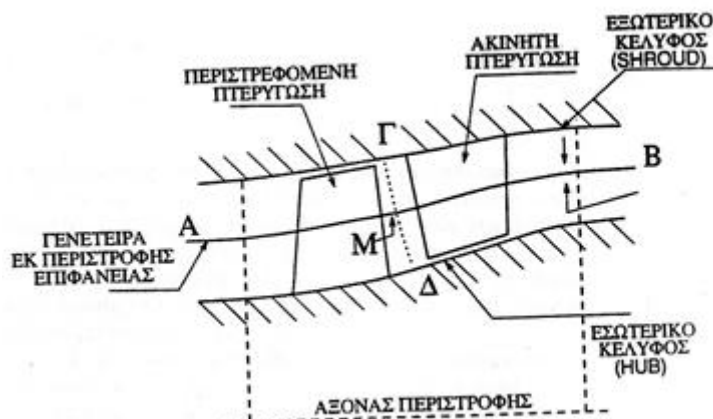
$$V_a = W_a \quad (3.20)$$

$$V_u = W_u + U \quad (3.21)$$

Ο συμβολισμός για τα πρόσημα των συνιστωσών της σχετικής και της απόλυτης ταχύτητας προκύπτει από τη σύμβαση ότι η διεύθυνση της περιστροφής ορίζεται ως θετική.

3.3.4 Μονοδιάστατη ανάλυση στροβιλομηχανών

Στο Σχήμα 3.8 φαίνεται ένας μονοβάθμιος συμπίεστής μικτής ροής για να είναι γενικά τα συμπεράσματα.



Σχήμα 3.8: Μονοδιάστατη ανάλυση ενός μονοβάθμιου συμπίεστή μικτής ροής

Η καμπύλη AB που παρουσιάζεται στο σχήμα είναι η γενέτειρα μιας αντιπροσωπευτικής επιφάνειας, κατά μήκος της οποίας λαμβάνει χώρα η μονοδιάστατη ανάλυση της μηχανής. Κάθε σημείο M στη γενέτειρα αυτή χαρακτηρίζει ολόκληρη τη διατομή που αντιπροσωπεύεται από τη διαμήκη θέση του σημείου M και από τον κύκλο που αυτό παράγει όταν περιστραφεί γύρω από τον άξονα της μηχανής.

Κάθε διατομή της στροβιλομηχανής που μπορεί να ορισθεί «κάθετα» σε κάποιο σημείο της γραμμής AB αντιπροσωπεύεται από μέσα μεγέθη ροής που αντιστοιχούν στο σημείο M. Στα πλαίσια της μονοδιάστατης ανάλυσης στροβιλομηχανής, η συμπεριφορά της ροής σε μια κινητή ή σταθερή πτερύγωση θα καθορίζεται από τα μεγέθη της ροής που αντιστοιχούν σε δυο διατομές, μια πριν και μια μετά τα πτερύγια. Σε αυτές τις δύο διατομές η ροή μπορεί να θεωρηθεί ως συμμετρική κατά την περιφερειακή κατεύθυνση.

Η γνώση των τριγώνων ταχυτήτων στις δύο αυτές θέσεις, με τις αντίστοιχες συνιστώσες τους V_m ή W_m και V_u ή W_u , επιτρέπει τον καθορισμό της παροχής μάζας που διαρρέει τη μηχανή, αλλά και της ισχύος της μηχανής, αν τα γεωμετρικά στοιχεία της κάθε διατομής και τα ολικά μεγέθη της ροής θεωρηθούν γνωστά. Για παράδειγμα, αν η πυκνότητα ρ_1 και η μεσημβρινή ταχύτητα V_{m1} στη θέση 1, διατομής A_1 , είναι γνωστά, τότε η παροχή μάζας που διαρρέει τη στροβιλομηχανή θα είναι:

$$\dot{m} = A_1 \rho_1 V_{m1} \quad (3.22)$$

Αν οι θέσεις 1, 2 και 3 ορισθούν πριν την κινητή πτερύγωση, μετά την κινητή πτερύγωση και μετά τη σταθερή πτερύγωση, αντίστοιχα, το θεώρημα του Euler δίνει λ.χ. τη μεταβολή της ολικής ενθαλπίας εκατέρωθεν της κινητής πτερύγωσης, ως:

$$h_{t2} - h_{t1} = V_{u2}U_2 - V_{u1}U_1 \quad (3.23)$$

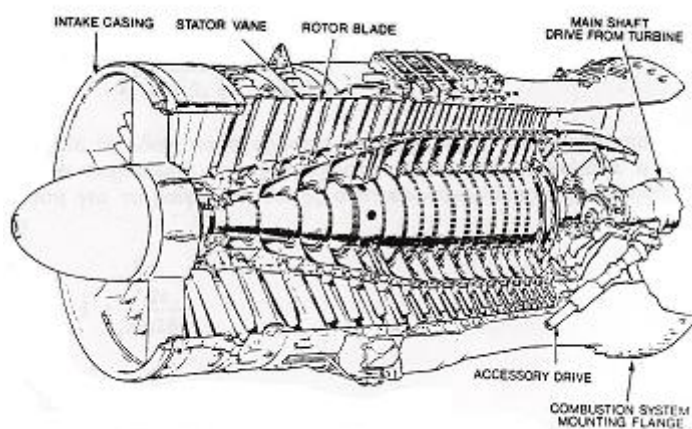
Κατά συνέπεια, η ισχύς P του συμπιεστή θα δίνεται από τη σχέση:

$$P = \dot{m}(h_{t2} - h_{t1}) = \dot{m}(V_{u2}U_2 - V_{u1}U_1) \quad (3.24)$$

3.4 Συμπιεστές

3.4.1 Γενικά

Οι συμπιεστές βιομηχανικών αεριοστροβίλων είναι στην πλειοψηφία τους πολυβάθμιοι (δηλαδή με πολλές βαθμίδες διαδοχικά) αξονικοί. Ο αξονικός συμπιεστής έχει σήμερα επικρατήσει σε μηχανές μεσαίου και μεγάλου μεγέθους, ενώ ο ακτινικός συναντάται μόνο σε μικρές μηχανές. Οι αξονικοί συμπιεστές χαρακτηρίζονται από το ότι η διαδρομή του ρευστού είναι κατά κύριο λόγο παράλληλη με τον άξονα περιστροφής. Θα αναφερθούμε μόνο σε αξονικούς συμπιεστές αφού στις μηχανές που προορίζονται για ηλεκτροπαραγωγή οι συμπιεστές είναι αποκλειστικά αυτού του τύπου. Μια τυπική εικόνα ενός αξονικού πολυβάθμιου συμπιεστή φαίνεται στο Σχήμα 3.9.



Σχήμα 3.9: Τυπική εικόνα πολυβάθμιου συμπιεστή

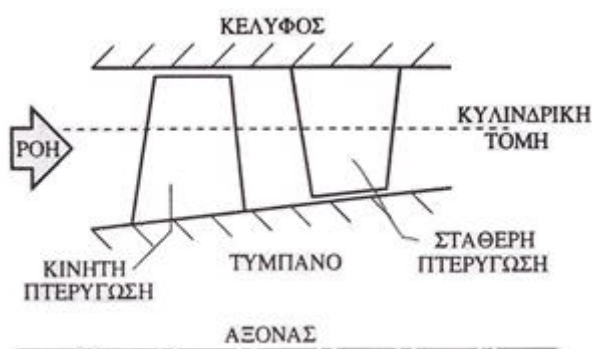
Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των αξονικών συμπιεστών είναι οι μεγαλύτεροι βαθμοί απόδοσης από τους ακτινικούς και η ευκολία συνδυασμού βαθμίδων για συγκρότηση πολυβάθμιων μηχανών δίνει τη δυνατότητα μεγαλύτερων λόγων πίεσης. Ακόμα έχουν μεγαλύτερη αναρροφητική ικανότητα από τους ακτινικούς για ίδια μετωπική επιφάνεια.

Ο συμπιεστής αποτελείται από διαδοχικές βαθμίδες, κάθε μια από τις οποίες αποτελείται από μια περιστρεφόμενη και μια σταθερή πτερύγωση. Στην είσοδο του συμπιεστή μπορεί να υπάρχουν τα οδηγά πτερύγια εισόδου (inlet guide vanes, IGV), τα οποία χρησιμεύουν για να δώσουν στη ροή κατάλληλη κατεύθυνση, έτσι ώστε αυτή να έχει την επιθυμητή ομαλή είσοδο στην πρώτη περιστρεφόμενη πτερύγωση και να επιτρέψουν τον έλεγχο της ροής του εισερχόμενου αέρα. Η συμπίεση του εργαζόμενου

μέσου σε κάθε βαθμίδα γίνεται με τον τρόπο που περιγράφεται στην παρακάτω παράγραφο.

3.4.2 Μεταβολές κατάστασης σε βαθμίδα συμπίεστή και βαθμοί απόδοσης

Στην παράγραφο αυτή θα μελετήσουμε τις μεταβολές στις θερμοδυναμικές συνθήκες του ρευστού στις πτερυγώσεις του συμπίεστή. Στο Σχήμα 3.10 φαίνεται η τομή ενός μονοβάθμιου αξονικού συμπίεστή. Θα συμβολίζεται με 1 η είσοδος της κινητής πτερύγωσης και με 2 η έξοδος αυτής, που ταυτίζεται με την είσοδο της σταθερής πτερύγωσης. Με 3 θα συμβολίζεται η έξοδος της σταθερής.



Σχήμα 3.10: Τομή μονοβάθμιου αξονικού συμπίεστή

Στην είσοδο της κινητής πτερύγωσης επικρατεί ολική πίεση p_{t1} και ολική θερμοκρασία T_{t1} . Για αναρρόφηση από το περιβάλλον μέσω αγωγού εισόδου μικρού μήκους, θερμικά μονωμένου και με αμελητέες απώλειες, τα παραπάνω ολικά μεγέθη ταυτίζονται με την πίεση και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αν V_1 είναι το μέτρο της ταχύτητας στην είσοδο της κινητής πτερύγωσης, τότε είναι γνωστή η κινητική ενέργεια εισόδου $\frac{1}{2} V_1^2$ και η στατική θερμοκρασία εισόδου T_1 προσδιορίζεται γραφικά από το Σχήμα 3.11, στο οποίο οι θέσεις 01, 02, 03 συμβολίζουν ολικά μεγέθη και οι θέσεις 1, 2, 3 στατικά.

Η στατική πίεση εισόδου καθορίζεται στο ίδιο σχήμα από την ισόθλιπτη η οποία διέρχεται από το σημείο του διαγράμματος όπου αντιστοιχεί η στατική κατάσταση της θέσης 1. Μέσα στην κινητή πτερύγωση, η ολική θερμοκρασία του ρευστού αυξάνεται κατά:

$$\Delta T_{t12} = T_{t2} - T_{t1}$$

Η ολική ενεργειακή απόδοση ενός συμπίεστη εκφράζει ποσοτικά το λόγο του έργου που θα προσελάμβανε το εργαζόμενο μέσο από τα κινητά πτερύγια σε μια ιδανική διεργασία χωρίς απώλειες, προς το έργο που στην πραγματικότητα προσλαμβάνει, έτσι ώστε και στις δύο περιπτώσεις να πραγματοποιήσει τη συγκεκριμένη συμπίεση. Η ολική ενεργειακή απόδοση ενός συμπίεστη εκφράζεται καταρχήν με τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσής του $\eta_{is,C}$. Ο τυπικός ορισμός του προκύπτει από τη φυσική ερμηνεία των ενεργειακών μεταβολών που παρουσιάζονται στο διάγραμμα T-s του Σχήματος 3.11.

Η ιδανική διεργασία χωρίς απώλειες που χρησιμοποιείται στον ορισμό του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης είναι η ισεντροπική μεταβολή $1 \rightarrow 3'$ που αντιστοιχεί στην πραγματική μεταβολή $1 \rightarrow 3$.

Ορίζονται δύο βαθμοί απόδοσης. Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης ολικές προς ολικές συνθήκες και ο ολικές προς στατικές. Ανάλογα με την περίπτωση χρησιμοποιείται ο κατάλληλος, κυρίως με κριτήριο αν χρησιμοποιείται η κινητική ενέργεια στην έξοδο. Για απλότητα θα χρησιμοποιούμε πάντα ολικά μεγέθη και τον πρώτο βαθμό απόδοσης, εξάλλου για μικρούς αριθμούς Mach η διάκριση δεν είναι τόσο σημαντική.

Ο βαθμός απόδοσης ορίζεται ως:

$$\eta_{is,C} = \frac{h_{t3'} - h_{t1}}{h_{t3} - h_{t1}} \quad (3.25)$$

Για σταθερό c_p έχουμε:

$$\eta_{is,C} = \frac{h_{t3'} - h_{t1}}{h_{t3} - h_{t1}} = \frac{T_{t3'} - T_{t1}}{T_{t3} - T_{t1}} \quad (3.26)$$

Για επίσης σταθερό c_p η ισεντροπική μεταβολή μεταξύ των καταστάσεων 1 και $3'$ διέπεται από τη σχέση:

$$\frac{T_{t3'}}{T_{t1}} = \left(\frac{p_{t3}}{p_{t1}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \pi_c^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (3.27)$$

όπου π_c ο λόγος πίεσης του συμπίεστη:

$$\pi_c = \frac{p_{t3}}{p_{t1}} \quad (3.28)$$

Επειδή δεν έχουμε ουσιαστική ακτινική μετατόπιση των γραμμών ροής από την είσοδο μέχρι και την έξοδο μιας κινητής πτερύγωσης μπορεί να γίνει η υπόθεση (χωρίς αυτό να λαμβάνεται ως δεδομένο) ότι η ακτίνα εξόδου είναι ίση με την ακτίνα εισόδου της ροής. Έτσι, ενώ οι κινητές πτερυγώσεις αυξάνουν την απόλυτη ταχύτητα του ρευστού, η ροή σχετικά με τα στρεφόμενα πτερύγια είναι επιβραδυνόμενη, όπως και στα σταθερά πτερύγια.

Το γεγονός ότι η ροή είναι επιβραδυνόμενη τόσο στις κινητές όσο και στις σταθερές πτερυγώσεις, επιβάλλει ορισμένα όρια στο λόγο πίεσης που μπορεί να πετύχει μια βαθμίδα. Η μέγιστη τιμή που έχει επιτευχθεί σήμερα είναι της τάξης του 2, ενώ μια συνήθης βαθμίδα υψηλών επιδόσεων έχει λόγο της τάξης του 1.4 ως 1.6. Αν απαιτείται υψηλός λόγος πίεσης προφανώς χρειάζονται πολλές διαδοχικές βαθμίδες. Σήμερα έχουν επιτευχθεί (ολικές) συμπίεσεις πέραν της τάξης του 30:1. Στους στροβίλους που η ροή είναι επιταχυνόμενη δεν υπάρχει τέτοιος περιορισμός στο λόγο πίεσης ανά βαθμίδα οπότε απαιτούνται λιγότερες βαθμίδες για ίδιο ολικό λόγο πίεσης.

Μια άλλη συνέπεια της επιβραδυνόμενης ροής είναι η μεγάλη ευαισθησία των συμπίεστων σε αλλαγές των συνθηκών λειτουργίας τους. Επειδή η επιβράδυνση ευνοεί την ανάπτυξη οριακών στρωμάτων και συνεπώς αύξηση απωλειών, κάθε αλλαγή του σημείου λειτουργίας ενός συμπίεστη συνοδεύεται από αλλαγή της απόδοσής του. Έτσι έχουμε συνήθως σχετικά στενές περιοχές λειτουργίας του συμπίεστη που αντιστοιχούν στη μέγιστη απόδοσή του.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των αξονικών συμπίεστων είναι η μείωση της διατομής τους από την είσοδο προς την έξοδο. Η μείωση της διατομής οφείλεται στο ότι κατά τη σχεδίαση των κινητών ή σταθερών πτερυγώσεων είναι επιθυμητό να μη μεταβάλλεται σημαντικά η αξονική ταχύτητα κατά μήκος τους. Συγχρόνως, η αδιαβατική συμπίεση κατά μήκος του συμπίεστη οδηγεί σε αύξηση της πυκνότητας κατά μήκος του (λόγω αύξησης της πίεσης) και η διατήρηση της παροχής από την είσοδο στην έξοδο επιβάλλει μείωση της διατομής κατά μήκος του. Αυτό φαίνεται άμεσα από την έκφραση της παροχής σε οποιαδήποτε διατομή Α:

$$\dot{m} = \rho V_a A \quad (3.29)$$

Με σταθερή την παροχή μάζας και με επιθυμητή τη διατήρηση της αξονικής συνιστώσας V_a της ταχύτητας, η αύξηση της πυκνότητας ρ επιβάλλει μείωση του A .

3.4.3 Λειτουργική συμπεριφορά πολυβάθμιου αξονικού συμπίεστη

Όταν η μηχανή λειτουργεί στο σημείο σχεδίασης τότε όλες οι βαθμίδες λειτουργούν η κάθε μια στο σημείο σχεδίασής της. Αν τώρα ελαττωθεί η παροχή, τότε έχουμε ελάττωση της αξονικής ταχύτητας κατ' αρχήν στην πρώτη βαθμίδα. Επειδή αυξάνεται ο λόγος πίεσής της, έχουμε αύξηση της πυκνότητας στην έξοδό της, με αποτέλεσμα ακόμα μεγαλύτερη ελάττωση της αξονικής ταχύτητας και συνεπώς του συντελεστή παροχής στη δεύτερη βαθμίδα. Το ίδιο επαναλαμβάνεται κατά μήκος των υπολοίπων βαθμίδων, με αποτέλεσμα η τελευταία βαθμίδα να παρουσιάζει μια απόκλιση από τις ονομαστικές συνθήκες πολύ μεγαλύτερη από ό,τι η πρώτη. Έτσι, κάποια από τις πίσω βαθμίδες μπορεί να μπει στην περιοχή ασταθούς λειτουργίας πολύ πριν αυτό συμβεί στην πρώτη βαθμίδα. Αντίστοιχα ισχύουν για αύξηση της παροχής. Από τα παραπάνω φαίνεται ότι τα φαινόμενα αυτά είναι πιο έντονα όσο πιο έντονα είναι τα φαινόμενα συμπίεστότητας της ροής. Συνεπώς η συμπεριφορά αυτή γίνεται ιδιαίτερα αισθητή σε μηχανές υψηλών

ταχυτήτων. Το αποτέλεσμα είναι η ωφέλιμη περιοχή παροχών του πολυβάθμιου συμπίεστή να είναι ένα μέρος μόνο της ωφέλιμης περιοχής παροχών της πρώτης βαθμίδας του, γύρω από το σημείο σχεδίασής της.

Η πρώτη βαθμίδα μπορεί να δουλεύει σε ονομαστικές συνθήκες. Επειδή ο λόγος πίεσης είναι μικρός, η πυκνότητα δεν αυξάνεται αρκετά με αποτέλεσμα να αυξάνεται σημαντικά η ταχύτητα κατά μήκος του συμπίεστή λόγω της σύγκλισης τοιχωμάτων. Έτσι η αξονική ταχύτητα γίνεται πολύ μεγάλη στις πίσω βαθμίδες και μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε στραγγαλισμό της ροής. Αυτό μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε κατάσταση τέτοια που να μην μπορούν οι πρώτες βαθμίδες να φτάσουν στο σημείο σχεδίασης για την ταχύτητα περιστροφής αυτή. Τα προβλήματα αυτά γίνονται ιδιαίτερα αισθητά στο ξεκίνημα της μηχανής και για να ξεπεραστούν χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τεχνικές:

- **Βαλβίδες απομάστευσης.** Αφαιρώντας αέρα από κάποιες ενδιάμεσες βαθμίδες μπορεί να διατηρηθεί η αξονική ταχύτητα χαμηλή και για τις πίσω βαθμίδες, επιτρέποντας στις μπροστά να δουλεύουν σε αποδεκτές τιμές αξονικής ταχύτητας.
- **Σταθερά πτερύγια μεταβλητής γεωμετρίας.** Περιστρέφοντας τα σταθερά πτερύγια είναι δυνατόν να μεταβάλλεται η γωνία εισόδου στα κινητά. Με κατάλληλη προσαρμογή αυτό μπορεί να γίνεται κατά τρόπο που να προσεγγίζεται κάθε φορά η γωνία πρόσπτωσης σχεδίασης. Έτσι μπορούν να αποφευχθούν οι περιπτώσεις λειτουργίας με τις πρώτες βαθμίδες με πλήρως αποκολλημένη ροή και τις τελευταίες να δουλεύουν με μεγάλες αρνητικές γωνίες πρόσπτωσης.
- **Πολλαπλά τύμπανα.** Ένας άλλος τρόπος να αποφευχθεί το πρόβλημα είναι να έχουμε το μπρος και το πίσω μισό του συμπίεστή να περιστρέφονται με διαφορετικές ταχύτητες. Κατά την εκκίνηση μπορεί το τμήμα υψηλής πίεσης να λειτουργεί με μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής, πραγματοποιώντας μεγαλύτερη συμπίεση και επιτρέποντας στην παροχή να περάσει. Από την άλλη μεριά οι πρώτες βαθμίδες μπορούν να λειτουργούν με χαμηλότερες στροφές διατηρώντας σε επιτρεπτά επίπεδα τις γωνίες πρόσπτωσης.

Ο συμπίεστής περιορίζει την περιοχή λειτουργίας του αεριοστροβίλου λόγω των στενών περιοχών των συνθηκών που μπορούν να λειτουργούν ικανοποιητικά τα πτερύγια των βαθμίδων του. Το μικρό εύρος συνθηκών προκύπτει από το γεγονός ότι η ροή μέσω των βαθμίδων συμπίεστή είναι επιβραδυνόμενη.

3.5 Στροβίλοι

3.5.1 Γενικά

Ο ρόλος ενός στροβίλου συνίσταται στην αφαίρεση της ενέργειας που μεταφέρει το εργαζόμενο μέσο, την οποία και μεταφέρει ως ενέργεια περιστροφής στον άξονα της μηχανής. Ο στροβίλος, ως μια από τις συνιστώσες μιας θερμικής στροβιλομηχανής, εκμεταλλεύεται την υψηλή θερμοκρασία και πίεση με την οποία εισέρχεται το εργαζόμενο

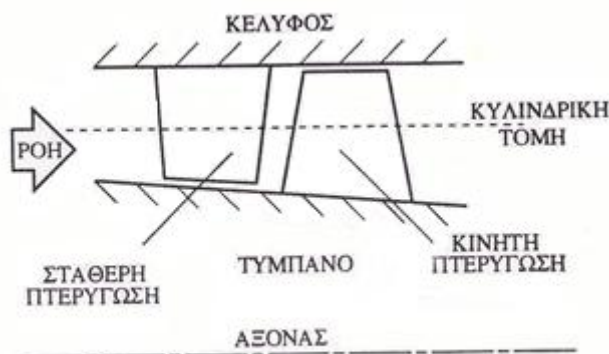
μέσο το οποίο αποτονώνει σε χαμηλότερη πίεση και θερμοκρασία. Συνέπεια των υψηλών θερμοκρασιών με τις οποίες εισέρχεται το εργαζόμενο μέσο είναι η ανάπτυξη ισχυρών θερμικών τάσεων στα περύγια του στρόβιλου.

Η απόδοση μέρους της ενέργειας του ρέοντος μέσου στον άξονα του στρόβιλου πραγματοποιείται ενδεχομένως με περισσότερες από μια βαθμίδες και στην περίπτωση αυτή πρόκειται για έναν πολυβάθμιο στρόβιλο. Κάθε βαθμίδα αποτελείται από μια σταθερή περύγωση, την οποία ακολουθεί η περιστρεφόμενη. Τα περύγια της σταθερής περύγωσης χαρακτηρίζονται συνήθως ως ακροφύσια (nozzles) ή διανομείς.

Κατά τον ίδιο τρόπο με τους συμπιεστές και οι στρόβιλοι διακρίνονται σε αξονικούς και ακτινικούς. Στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται αποκλειστικά αξονικοί στρόβιλοι λόγω της ικανότητάς τους στη διαχείριση υψηλών παροχών μάζας και της ευκολίας χρήσης πολλών βαθμίδων. Έτσι, οι πολυβάθμιοι αξονικοί στρόβιλοι, με τους οποίους θα ασχοληθούμε, έχουν επικρατήσει στην ηλεκτροπαραγωγή.

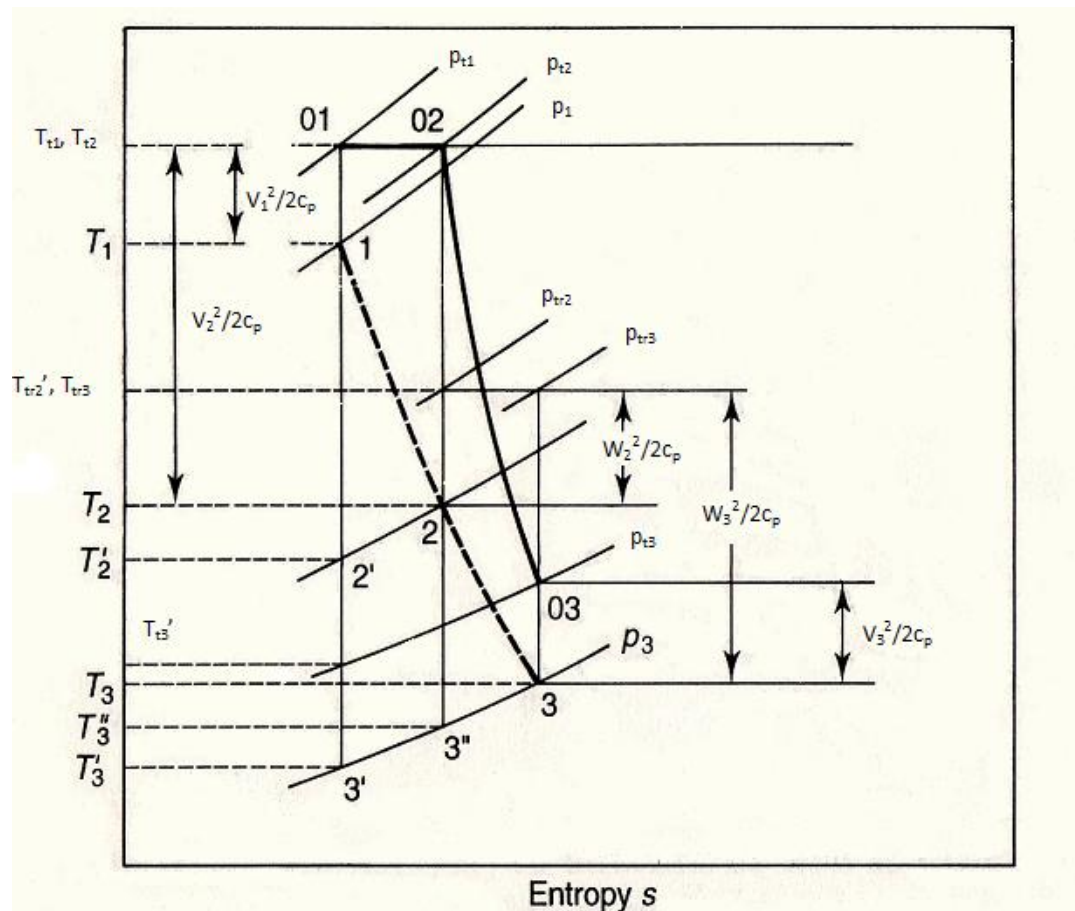
3.5.2 Μεταβολές κατάστασης σε βαθμίδα συμπιεστή και βαθμοί απόδοσης

Στην παράγραφο αυτή θα μελετήσουμε τις μεταβολές στις θερμοδυναμικές συνθήκες του ρευστού στις περυγώσεις του στρόβιλου. Στο Σχήμα 3.12 φαίνεται η τομή ενός μονοβάθμιου αξονικού στρόβιλου. Θα συμβολίζεται με 1 η είσοδος της κινητής περύγωσης και με 2 η έξοδος αυτής, που ταυτίζεται με την είσοδο της σταθερής περύγωσης. Με 3 θα συμβολίζεται η έξοδος της σταθερής.



Σχήμα 3.12: Τομή μονοβάθμιου αξονικού στρόβιλου

Το εργαζόμενο μέσο εισέρχεται στη σταθερή περύγωση, τα λεγόμενα ακροφύσια (nozzles) ή διανομείς του στρόβιλου με ολική πίεση p_{t1} και ολική θερμοκρασία T_{t1} . Με τον ίδιο τρόπο όπως και για το συμπιεστή, η γνώση του μέτρου της απόλυτης ταχύτητας V_1 στην είσοδο επιτρέπει διαδοχικά τον καθορισμό της στατικής θερμοκρασίας T_1 (από τον ορισμό της ολικής θερμοκρασίας) και της στατικής πίεσης p_1 (εφαρμόζοντας στο διάγραμμα ισεντροπική μεταβολή στη θέση 1). Στο Σχήμα 3.13 φαίνεται το διάγραμμα $T-s$ ενός μονοβάθμιου αξονικού στρόβιλου.



Σχήμα 3.13: Διάγραμμα T-s μονοβάθμιου αξονικού στροβίλου

Η άεργος εκτόνωση η οποία πραγματοποιείται μέσα στο διανομέα ισοδυναμεί με τη διατήρηση της ολικής ενθαλπίας και (αν ο συντελεστής c_p θεωρηθεί σταθερός) της ολικής θερμοκρασίας μεταξύ των θέσεων 1 και 2. Λόγω σταθερού c_p ισχύει:

$$T_{t1}=T_{t2}$$

Ο καθορισμός της ολικής πίεσης p_{t2} απαιτεί δεδομένα για τις απώλειες οι οποίες λαμβάνουν χώρα στο διανομέα. Με γνωστό το ενεργειακό επίπεδο, δηλαδή την T_{t2} στη θέση 2, αρκεί η γνώση της αύξησης της εντροπίας που προκαλεί ο διανομέας ώστε να υπολογισθεί η πίεση p_{t2} . Η επιπλέον γνώση της ταχύτητας V_2 εξόδου του διανομέα, καθορίζει και τα στατικά μεγέθη T_2 και p_2 στη θέση 2. Οι συνθήκες στην έξοδο του διανομέα που υπολογίστηκαν με τον τρόπο αυτό αποτελούν ταυτόχρονα και τις συνθήκες εισόδου στην κινητή πτερύγωση.

Μέσα στην κινητή πτερύγωση το ρευστό προσδίδει ενέργεια στα κινητά πτερύγια και μέσω αυτών στην άτρακτο του στροβίλου. Η προσδιδόμενη ενέργεια αντιστοιχεί στην ενθαλπική πτώση:

$$\Delta h_{t23}=h_{t2}-h_{t3}$$

ή στην αντίστοιχη πτώση ολικής θερμοκρασίας:

$$\Delta T_{t23} = T_{t2} - T_{t3}$$

Ο υπολογισμός της ολικής πίεσης p_{t3} στην έξοδο της βαθμίδας απαιτεί τη γνώση των απωλειών που λαμβάνουν χώρα σε αυτό, ενδεχομένως στη μορφή της αύξησης εντροπίας Δs_{23} . Με γνωστά τα ολικά μεγέθη p_{t3} και T_{t3} προκύπτουν τα αντίστοιχα στατικά μεγέθη p_3 και T_3 αν είναι γνωστή η ταχύτητα V_3 στο σημείο αυτό. Η μελέτη της εκτόνωσης μεταξύ των θέσεων 2 και 3 στο σχετικό σύστημα αναφοράς δίνει, σύμφωνα με την ενεργειακή εξίσωση στο σύστημα αυτό, ότι:

$$h_{tR2} = h_{tR3}$$

ή ως έκφραση των σχετικών ολικών θερμοκρασιών:

$$T_{tR2} = T_{tR3}$$

Σε αντιστοιχία με την περίπτωση του συμπιεστή, ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου εκφράζει το λόγο του έργου που πραγματικά λαμβάνουμε στον άξονα του στροβίλου προς το έργο που θα παίρναμε αν η μεταβολή λάμβανε χώρα ισεντροπικά. Η αντίστοιχη ισεντροπική μεταβολή είναι αυτή που επιτυγχάνει με την ίδια ολική πίεση p_{t3} στην έξοδο, μέσω μιας ισεντροπικής μεταβολής μεταξύ 1 και 3. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.13, η ισεντροπική αυτή μεταβολή χαρακτηρίζεται από την ολική ενθαλπία εξόδου $h_{t3'}$ ή την αντίστοιχη ολική θερμοκρασία $T_{t3'}$.

Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης ολικές προς ολικές συνθήκες του στροβίλου ορίζεται ως:

$$\eta_{is,T} = \frac{h_{t1} - h_{t3}}{h_{t1} - h_{t3'}} \quad (3.30)$$

Για σταθερό c_p έχουμε:

$$\eta_{is,T} = \frac{h_{t1} - h_{t3}}{h_{t1} - h_{t3'}} = \frac{T_{t1} - T_{t3}}{T_{t1} - T_{t3'}} \quad (3.31)$$

Για επίσης σταθερό c_p η ισεντροπική μεταβολή μεταξύ των καταστάσεων 1 και 3' διέπεται από τη σχέση:

$$\frac{T_{t1}}{T_{t3'}} = \left(\frac{p_{t1}}{p_{t3'}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \pi_T^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (3.32)$$

όπου π_T ο λόγος πίεσης του συμπιεστή:

$$\pi_T = \frac{p_{t1}}{p_{t3}} \quad (3.33)$$

3.6 Θάλαμος Καύσης

3.6.1 Γενικά

Η πρόσδοση θερμότητας στο εργαζόμενο μέσο στους αεριοστροβίλους ανοιχτού κυκλώματος γίνεται με καύση ενός καυσίμου μέσα στο θάλαμο καύσης (στις εγκαταστάσεις κλειστού κυκλώματος χρησιμοποιείται και εναλλάκτης θερμότητας).

Ο αέρας αφού συμπιεστεί στο συμπιεστή εισάγεται στο θάλαμο καύσης όπου αυξάνεται η θερμοκρασία του. Η άνοδος της θερμοκρασίας εξαρτάται από την ποσότητα του καυσίμου που εισάγεται στο θάλαμο από το ακροφύσιο εισόδου και τη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου. Η καύση θεωρείται αδιαβατική γιατί τα ποσά θερμότητας που συναλλάσσονται μέσω των τοιχωμάτων είναι πολύ μικρά σε σχέση με αυτά που συναλλάσσονται μέσα στη ροή οπότε θεωρούνται αμελητέα. Ορίζεται ως λόγος καυσίμου ο λόγος:

$$f = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} \quad (3.34)$$

Όπου $\dot{m}_f$ η παροχή καυσίμου που εισάγεται στο θάλαμο καύσης και $\dot{m}_a$ η παροχή εισερχόμενου αέρα. Ο ισολογισμός ενέργειας ανά μονάδα μάζας εισερχόμενου αέρα έχει ως εξής:

$$(1 + f)(h_{tg4} - h_{tgr}) = (h_{ta3} - h_{tar}) + \eta_b f q_f + f(h_{FTf} - h_{fr}) \quad (3.35)$$

q_f : είναι η θερμογόνο δύναμη του καυσίμου σε μια θερμοκρασία αναφοράς T_r . Το μέγεθος αυτό ορίζεται ως το ποσό θερμότητας που αποδίδεται στο περιβάλλον, όταν τα αντιδρώντα και τα προϊόντα της καύσης βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία. Ο προσδιορισμός του μεγέθους αυτού γίνεται σε μια θερμοκρασία T_r . Δηλαδή, καίγεται ένα μείγμα που βρίσκεται στη θερμοκρασία αναφοράς και στη συνέχεια αφαιρείται η θερμότητα που απαιτείται για να επανέλθουν τα προϊόντα της καύσης στην αρχική θερμοκρασία. Από κει και πέρα το q_f έχει μια μικρή εξάρτηση από τη θερμοκρασία. Πρακτικά θεωρείται σταθερό με πολύ καλή προσέγγιση. Συνήθως δίνονται οι τιμές του q_f για μια θερμοκρασία αναφοράς 25°C .

h_{tg4} , h_{tgr} : η ειδική ενθαλπία του καυσαερίου στην τελική θερμοκρασία της καύσης και στη θερμοκρασία αναφοράς αντίστοιχα.

h_{ta3} , h_{tar} : η ειδική ενθαλπία του αέρα στη θερμοκρασία εισόδου στο θάλαμο καύσης και τη θερμοκρασία αναφοράς αντίστοιχα.

h_{FTf} : η ειδική ενθαλπία του καυσίμου στη θερμοκρασία προσαγωγής του στο θάλαμο καύσης.

h_{fr} : η ειδική ενθαλπία του καυσίμου στη θερμοκρασία αναφοράς.

η_b : ο βαθμός απόδοσης της καύσης.

Η παραπάνω σχέση μπορεί να απλοποιηθεί αν για κάθε ένα από τα μέσα στα οποία αναφέρεται χρησιμοποιηθεί μια αντίστοιχη μέση ειδική θερμοχωρητικότητα, οπότε γράφεται:

$$(1 + f)c_{pg}(T_{t4} - T_r) = c_{pa}(T_{t3} - T_r) + \eta_b f q_f + f c_{pf}(T_f - T_r) \quad (3.36)$$

όπου c_{pg} η μέση ειδική θερμοχωρητικότητα των καυσαερίων μεταξύ των θερμοκρασιών T_r και T_{t4} και c_{pa} , c_{pf} οι αντίστοιχες ποσότητες για τον αέρα και το καύσιμο.

Η παραπάνω σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων T_{t4} όταν είναι γνωστές οι θερμοκρασίες εισόδου καυσίμου και αέρα καθώς και ο λόγος f ή για τον προσδιορισμό του f που απαιτείται για να επιτευχθεί συγκεκριμένο T_{t4} , όταν είναι δεδομένο το T_{t3} .

Για την πραγματοποίηση υπολογισμών με ακρίβεια απαιτείται η χρήση δεδομένων για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες των σωμάτων που συμμετέχουν στην καύση. Οι ειδικές θερμοχωρητικότητες είναι συναρτήσεις της θερμοκρασίας ώστε για να βρεθεί πχ το T_{t4} πρέπει να επιλυθεί μια μη γραμμική σχέση $c_{pg} = c_{pg}(T_{t4})$. Επίσης, το ίδιο το c_{pg} εξαρτάται από την ποσότητα καυσίμου, δηλ. το λόγο f . Όλες αυτές οι αλληλεξαρτήσεις μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι αν απαιτείται μεγάλη ακρίβεια στους υπολογισμούς τότε απαιτείται η χρήση υπολογιστικών μεθόδων.

Μια απλοποιημένη σχέση προτείνεται από τον Harman, μέσω των οποίων μπορεί να υπολογιστεί η αύξηση της θερμοκρασίας με ακρίβεια $\pm 1\%$.

$$f = 1.1 \frac{(T_{t4} - T_{t3} - 50) \left(1 + \frac{T_{t3}}{3250}\right)}{\eta_b q_f} \quad \text{για } 400^\circ\text{C} < T_{t4} - T_{t3} < 900^\circ\text{C} \quad (3.37)$$

$$f = 0.99 \frac{(T_{t4} - T_{t3} - 50) \left(1 + \frac{T_{t3}}{3250}\right)}{\eta_b q_f} \quad \text{για } 200^\circ\text{C} < T_{t4} - T_{t3} < 400^\circ\text{C} \quad (3.38)$$

Αν θεωρηθεί ότι οι ειδικές θερμοχωρητικότητες εκφράζουν μια μέση τιμή για την απόλυτη θερμοκρασία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η απλοποιημένη έκφραση:

$$(1 + f)c_{pg} T_{t4} - c_{pa} T_{t3} = \eta_b f q_f \quad (3.39)$$

Επανερχόμενοι στη σχέση (3.35):

$$(1 + f)(h_{tg4} - h_{tgr}) = (h_{ta3} - h_{tar}) + \eta_b f q_f + f(h_{fTf} - h_{fr}) \quad (3.35)$$

Παρατηρούμε ότι ο τελευταίος όρος, που εκφράζει τη συνεισφορά θερμότητας λόγω της θερμοκρασίας του καυσίμου από την τιμή αναφοράς στην οποία δίνεται η θερμογόνο

δύναμη, είναι πολύ μικρού μεγέθους σε σχέση με τον όρο $f q_f$. Σε απλοποιημένους υπολογισμούς και όταν το καύσιμο βρίσκεται σε θερμοκρασία πλησίον της θερμοκρασίας περιβάλλοντος ο όρος μπορεί να αμεληθεί χωρίς ιδιαίτερο σφάλμα.

3.6.2 Βαθμός απόδοσης της καύσης

Για να αποδώσει πλήρως ένα καύσιμο τη θερμογόνο δύναμή του θα πρέπει να είναι πλήρης η καύση, δηλαδή να μην απομείνουν στα καυσαέρια συστατικά που θα μπορούσαν να καούν παραπέρα και να αποδώσουν επιπλέον θερμότητα (πχ. CO, αιθάλη). Παρ' όλο που στους αεριοστροβίλους οι συνθήκες είναι ευνοϊκές, γενικά η καύση δεν είναι πλήρης. Υπάρχει επίσης και το γεγονός ότι σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες συμβαίνει διάσπαση των προϊόντων της πλήρους καύσης, με απορρόφηση μέρους της εκλυόμενης θερμότητας.

Επειδή η q_f αναφέρεται σε πλήρη καύση, πράγμα που γενικά δεν πετυχαίνεται στους θαλάμους καύσης, εισάγεται ο βαθμός απόδοσης της καύσης που ορίζεται ως εξής:

$$\eta_b = \frac{\text{θεωρητικό } f \text{ για δεδομένο } \Delta T}{\text{πραγματικό } f \text{ για δεδομένο } \Delta T}$$

Εναλλακτικά, μπορεί να οριστεί μέσω του ισολογισμού ενέργειας που αναφέραμε πιο πριν.

Στο σημείο αυτό είναι σκόπιμο να δούμε τους περιορισμούς που μπαίνουν στο μέγεθος αναλογίας αέρα-καυσίμου, από τα όρια αντοχής των υλικών κατασκευής του θερμού τμήματος της μηχανής. Κατ' αρχήν, ο λόγος καυσίμου αέρα συνδέεται με τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου στο θάλαμο καύσης μέσω του ισολογισμού ενέργειας, που σε απλοποιημένη μορφή δίνει:

$$f = \frac{c_{pg} T_{t4} - c_{pa} T_{t3}}{\eta_b q_f - c_{pg} T_{t4}} \quad (3.40)$$

Αν μπει κάποιο πάνω όριο στην θερμοκρασία T_{t4} το όριο αυτό συνεπάγεται αμέσως μια μέγιστη επιτρεπτή τιμή για το λόγο καυσίμου αέρα, για ένα συγκεκριμένο καύσιμο. Η τιμή αυτή, για τις θερμοκρασίες που είναι επιτρεπτές για τα υλικά που χρησιμοποιούνται σήμερα στους αεριοστροβίλους, είναι πολύ μικρότερη της στοιχειομετρικής.

3.6.3 Απώλειες πίεσης

Οι απώλειες πίεσης μπορούν να εκτιμηθούν μέσω ενός συντελεστή απωλειών K , σύμφωνα με τη σχέση :

$$\frac{p_{t4} - p_{t3}}{p_{t3}} = K \left(\frac{\dot{m}_a \sqrt{T_{t2}}}{p_{t2}} \right)^2 \quad (3.41)$$

Το K μπορεί να γραφτεί ως εξής :

$$K = K_1 + K_2 \frac{T_{t4} - T_{t3}}{T_{t3}} \quad (3.42)$$

όπου ο πρώτος όρος εκφράζει απώλειες λόγω τριβής και ο δεύτερος λόγω προσθήκης θερμότητας. Για αρχικούς υπολογισμούς κύκλου είναι συνήθως αρκετό να θεωρήσουμε ότι η απώλεια πίεσης είναι σταθερό ποσοστό της ολικής πίεσης εισόδου στο θάλαμο καύσης:

$$p_{t4} = p_{t3} (1 - K_b) \quad (3.43)$$

3.7 Θερμοδυναμικός κύκλος αεριοστροβίλου

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιάσουμε τον ιδανικό και τον πραγματικό θερμοδυναμικό κύκλο ενός αεριοστροβίλου. Να σημειώσουμε στο σημείο αυτό ότι από την ενότητα αυτή και έπειτα τα μεγέθη αναφέρονται σε μετρήσιμα στατικά μεγέθη αφού και η θερμοκρασία που μετράται στον αεριοστρόβιλο και μέσω αυτής επιτυγχάνεται ο έλεγχός του είναι η στατική θερμοκρασία των καυσαερίων.

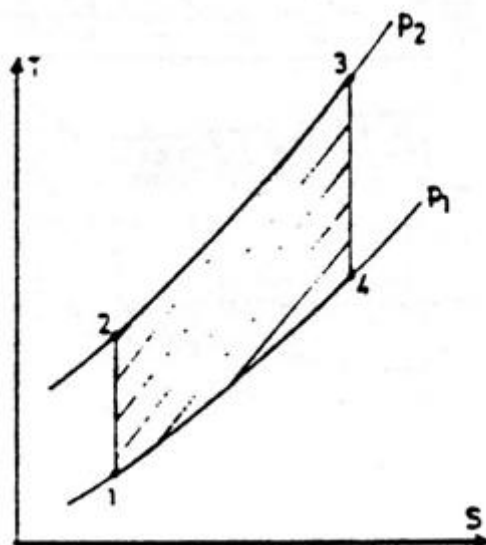
Σημειώνεται εξάλλου ότι σε όλα τα μοντέλα αεριοστροβίλων που χρησιμοποιούνται στις μελέτες ΣΗΕ, στις θερμοδυναμικές εξισώσεις δεν γίνεται διάκριση μεταξύ στατικών και ολικών μεγεθών, ενώ οι αποκλίσεις για τις διαφορές των ενθαλπιών που στην ουσία ενδιαφέρουν είναι πολύ μικρές, αφού οι ταχύτητες είναι χαμηλές όπως και ο αριθμός Mach.

3.7.1 Ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος αεριοστροβίλου

Ο ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος που εκτελείται σ' έναν αεριοστρόβιλο είναι ο Joule-Brayton που αποτελείται από τις εξής μεταβολές:

- Ισεντροπική αδιαβατική συμπίεση με λόγο πίεσης p_2/p_1 .
- Πρόσδοση θερμότητας υπό σταθερή πίεση
- Ισεντροπική αδιαβατική εκτόνωση μέχρι την αρχική πίεση p_1 .
- Αποβολή θερμότητας προς το περιβάλλον υπό σταθερή πίεση

Στο Σχήμα 3.14 φαίνεται το διάγραμμα T-s για τον ιδανικό κύκλο Joule-Brayton.



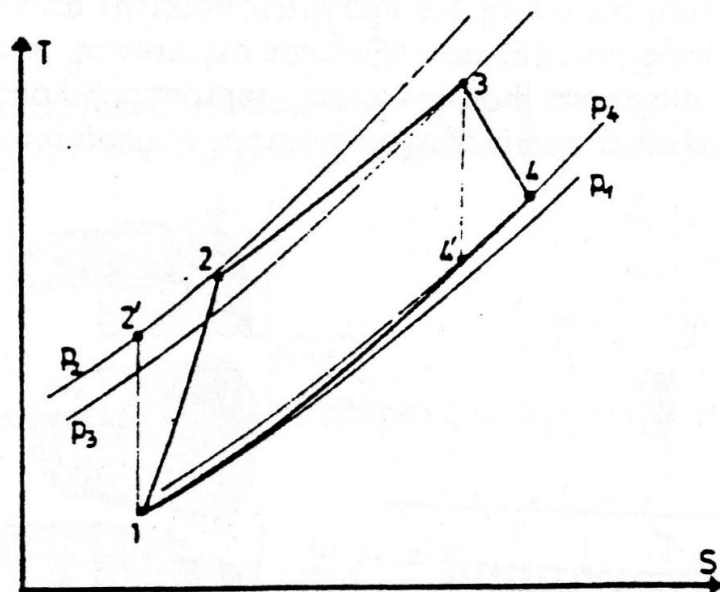
Σχήμα 3.14: Ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος αεριοστροβίλου (Joule Brayton)

3.7.2 Πραγματικός θερμοδυναμικός κύκλος αεριοστροβίλου

Ο πραγματικός κύκλος διαφέρει από τον ιδανικό Joule-Brayton αφού η αδιαβατική συμπίεση στο συμπιεστή και η αδιαβατική εκτόνωση στο στρόβιλο δεν είναι ισεντροπικές μεταβολές. Λόγω εσωτερικών τριβών και μη αντιστρεπτών διαδικασιών μέρος της ενέργειας που απορροφάται ή αποδίδεται στο εργαζόμενο μέσο μετατρέπεται σε θερμότητα. Έτσι, προκύπτει μια αύξηση θερμοκρασίας (σε σχέση με την τιμή που αντιστοιχεί σε μια ισεντροπική μεταβολή) και αύξηση της εντροπίας. Για αυτό στον πραγματικό κύκλο δεν γίνεται λόγος για ισεντροπικές μεταβολές αλλά αδιαβατικές με αντίστοιχο βαθμό απόδοσης που εκφράζει την απόκλιση από τις ισεντροπικές.

Επίσης, η συναλλαγή θερμότητας στο θάλαμο καύσης δεν είναι ισόθλιπτη αλλά υπάρχουν απώλειες πίεσης. Στο Σχήμα 3.15 φαίνεται το διάγραμμα T-s για τον πραγματικό κύκλο αεριοστροβίλου.

Μεταξύ των τριών κύριων συνιστωσών υπάρχουν αγωγοί από τους οποίους περνά ο αέρας ή τα καυσαέρια αλλά θεωρούμε ότι η ροή είναι αδιαβατική και η επίδραση στη θερμοκρασία και την πίεση αμελητέα. Επίσης η αλλαγή κινητικής ενέργειας του εργαζόμενου μέσου μεταξύ εισόδου και εξόδου κάθε συνιστώσας της μηχανής είναι αμελητέα ενώ η ροή μάζας του αερίου θεωρείται σταθερή στη μόνιμο κατάσταση.



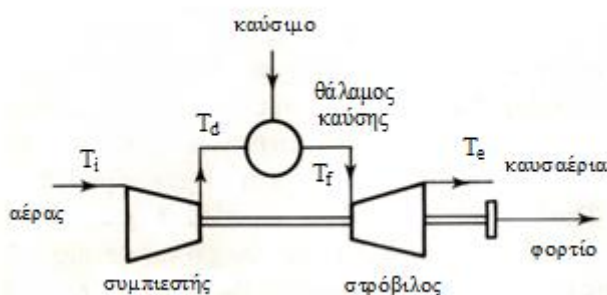
Σχήμα 3.15: Πραγματικός κύκλος αεριοστροβίλου

Κεφάλαιο 4^ο: Παράσταση μοντέλων αεριοστροβίλων για μελέτη ευστάθειας ΣΗΕ

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν δύο μοντέλα αεριοστροβίλων για χρήση σε μελέτες ευστάθειας συχνότητας ΣΗΕ. Στην ενότητα 4.1 αναπτύσσονται οι θερμοδυναμικές σχέσεις που διέπουν τη λειτουργία ενός αεριοστροβίλου απλού άξονα και στην ενότητα 4.2 οι διατάξεις ελέγχου του. Στην ενότητα 4.3 αναλύεται μια μέθοδος μεταβατικής αύξησης της ισχύος ενός αεριοστροβίλου με τη χρήση αεροφυλακίου ενώ στην ενότητα 4.4 αναπτύσσεται το μοντέλο αεριοστροβίλου διπλού άξονα.

4.1 Μοντέλο αεριοστροβίλου απλού άξονα

Στην ενότητα αυτή θα αναπτυχθούν οι θερμοδυναμικές σχέσεις που περιγράφουν τη λειτουργία ενός αεριοστροβίλου απλού άξονα. Όπως έχουμε αναφέρει στο 3^ο κεφάλαιο ένας αεριοστροβίλος αποτελείται από το συμπιεστή, το θάλαμο καύσης και το στρόβιλο. Ο αεριοστροβίλος και οι θερμοκρασίες στα διάφορα στάδια λειτουργίας φαίνονται στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1: Αεριοστροβίλος απλού άξονα

Ο αέρας εισέρχεται από το περιβάλλον με συνθήκες T_i/p_i και συμπιέζεται στο συμπιεστή. Εξέρχεται με συνθήκες T_d/p_d και προσλαμβάνει θερμότητα στο θάλαμο καύσης. Ο αέρας αναμειγνύεται με καύσιμο (φυσικό αέριο ή diesel) και καίγεται. Τα καυσάερια που δημιουργούνται από την καύση, συνθηκών T_f/p_f , εισέρχονται στο στρόβιλο και όπου αφού εκτονωθούν παράγουν το ωφέλιμο έργο και επιστρέφουν στο περιβάλλον με συνθήκες T_e/p_e .

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται οι τρεις βασικές συνιστώσες ενός αεριοστροβίλου και οι σχέσεις που χρειάζονται για την παράστασή του. Στη συνέχεια γίνεται η ανάπτυξη του μοντέλου και η συνολική παρουσίασή του.

4.1.1 Συμπιεστής

Ο ρόλος του συμπιεστή είναι να αυξάνει την πίεση και τη θερμοκρασία του αέρα πριν πραγματοποιηθεί η καύση του. Ο συμπιεστής περιστρέφεται με ταχύτητα N_r που εκφράζεται σε στροφές ανά λεπτό (rpm) ή N ανά μονάδα (ως προς την ονομαστική τιμή). Ο αέρας εισέρχεται με συνθήκες T_i και p_i από το περιβάλλον. Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οι συνθήκες αυτές ταυτίζονται με τις συνθήκες εισόδου στο συμπιεστή με την παραδοχή ότι οι απώλειες στους αγωγούς εισόδου είναι ασήμαντες.

Με T_d και p_d συμβολίζουμε τις πραγματικές συνθήκες στην έξοδο του συμπιεστή. Αν συμβολίσουμε με P_c το λόγο συμπίεσης, έχουμε για ιδανική ισεντροπική μεταβολή σύμφωνα με την (3.27):

$$\frac{T_d'}{T_i} = \left(\frac{p_d}{p_i}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = (P_c)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (3.27)$$

όπου T_d' είναι η ισεντροπική θερμοκρασία και γ είναι η τιμή του λόγου c_p/c_v του αέρα θεωρώντας σταθερές θερμοχωρητικότητες κατά τη μεταβολή. Να σημειώσουμε ότι όλες οι θερμοκρασίες αναφέρονται σε βαθμούς Kelvin. Επειδή η συμπίεση δεν είναι ισεντροπική χρησιμοποιούμε τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του συμπιεστή n_c (για να εκφράσουμε τις απώλειες στο συμπιεστή) όπως τον ορίσαμε στη σχέση (3.26):

$$n_c = \frac{h_d' - h_i}{h_d - h_i} = \frac{T_d' - T_i}{T_d - T_i} \quad (3.26)$$

όπου στις παραπάνω σχέσεις θεωρήσαμε σταθερό c_p .

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει η σχέση:

$$T_d = T_i \left[1 + \frac{1}{n_c} (x - 1) \right] \quad (4.1)$$

όπου

$$x = (P_c)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (4.2)$$

Η ισχύς που καταναλώνει ο συμπιεστής είναι ίση με:

$$P_{\text{συμπ}} = \dot{m}(h_d - h_i) = \dot{m} c_p (T_d - T_i) \quad (4.3)$$

όπου $\dot{m} = W\dot{m}_0$ είναι η ροή του αέρα σε kg/s και c_p η τιμή του συντελεστή θερμοχωρητικότητας (για σταθερή πίεση) του αέρα. Το c_p εκφράζεται σε kJ/kg.K και το έργο σε kW. Το $\dot{m}_0$ είναι η ονομαστική ροή του αέρα του αεριοστροβίλου και το W είναι ένας συντελεστής διόρθωσης της ροής για τον οποίο ισχύει ότι:

$$W = g N \quad (4.4)$$

όπου το g εκφράζει το άνοιγμα ανά μονάδα των οδηγών πτερυγίων εισόδου (IGV) και το N την ταχύτητα (επίσης ανά μονάδα) περιστροφής. Προφανώς το g δεν μπορεί να υπερβεί την τιμή $g=1$, για την οποία τα πτερύγια είναι πλήρως ανοιχτά.

Το W δηλαδή είναι ανάλογο του ανοίγματος των πτερυγίων (όταν αυτά είναι πλήρως ανοιχτά η ροή είναι μέγιστη) και της ταχύτητας περιστροφής (όταν αυτή μειώνεται τότε μειώνεται ανάλογα και η ροή του αέρα). Τελικά το W εκφράζει την ανά μονάδα ροή του αέρα. Έτσι για $W=1$ έχουμε ονομαστική ροή, ενώ αυτή δεν μπορεί να γίνει μικρότερη από μια ορισμένη τιμή $W_{\min}$ για λόγους ευστάθειας του συμπιεστή [3].

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειώσουμε ότι ο πραγματικός λόγος συμπίεσης P_c δεν είναι σταθερός αλλά εξαρτάται από τη ροή του αέρα. Η σχέση που συνδέει τα δύο μεγέθη είναι η [6]:

$$P_c = P_{c0}W \quad (4.5)$$

όπου P_{c0} είναι ο λόγος πίεσης στις ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή για πλήρες φορτίο.

4.1.2 Θάλαμος καύσης

Όπως αναφέραμε στην παράγραφο 3.4.3 η πρόσδοση θερμότητας στο εργαζόμενο μέσο στους αεριοστροβίλους ανοιχτού κυκλώματος γίνεται με καύση ενός καυσίμου μέσα στο θάλαμο καύσης. Ο αέρας αφού συμπιεστεί στο συμπιεστή εισάγεται στο θάλαμο καύσης. Η άνοδος της θερμοκρασίας κατά την καύση εξαρτάται από την ποσότητα του καυσίμου που εισάγεται στο θάλαμο από το ακροφύσιο εισόδου και τη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου. Η καύση θεωρείται αδιαβατική γιατί τα ποσά θερμότητας που συναλλάσσονται μέσω των τοιχωμάτων είναι πολύ μικρά σε σχέση με αυτά που συναλλάσσονται μέσα στη ροή οπότε θεωρούνται αμελητέα.

Η ροή του αέρα που εισέρχεται στο θάλαμο καύσης είναι ίση με $\dot{m}$ σε kg/s και του καυσίμου $\dot{m}_f$ επίσης σε kg/s. Σε ανά μονάδα τιμές η ροή του αέρα όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο εκφράζεται από το W ενώ η ροή καυσίμου ορίζεται ανά μονάδα ως W_f . Επειδή η μάζα του καυσίμου είναι πολύ μικρή σε σχέση με τη μάζα του αέρα (συνήθως κάτω του 2% σε ονομαστικές τιμές λειτουργίας [11]) μπορούμε με μεγάλη ακρίβεια να θεωρήσουμε ότι η ροή μάζας των καυσαερίων (που εμπεριέχουν δηλαδή τη μάζα του καυσίμου) ισούται με τη ροή μάζας στο στρόβιλο. Έτσι θα θεωρούμε ότι η ροή μάζας του αέρα W δεν επηρεάζεται από τη μάζα του καυσίμου.

Η καύση του μείγματος είναι μια εξώθερμη αντίδραση και ως γνωστόν η ποσότητα της θερμότητας που απελευθερώνεται στο περιβάλλον από την καύση είναι ανάλογη της ποσότητας των αντιδρώντων. Πάντα θα θεωρούμε ότι ο αέρας βρίσκεται σε επαρκή ποσότητα ώστε η καύση να είναι πλήρης. Η στοιχειομετρική τιμή του λόγου f , δηλαδή του λόγου καυσίμου προς τον αέρα όπως ορίστηκε στην (3.33), είναι περίπου 1/15 [3] ενώ οι συνήθεις τιμές του λόγου f στους αεριοστροβίλους είναι 1/50 οπότε η παραδοχή είναι αρκετά ασφαλής και σωστή. Επειδή ο αέρας βρίσκεται σε περίσσεια αντιδρά το σύνολο

της ποσότητας του καυσίμου οπότε η ποσότητα της θερμότητας που εκλύεται από την καύση είναι ανάλογη της ποσότητας του καυσίμου.

Η θερμοκρασία ενός σώματος εκφράζει την κινητική ενέργεια των μορίων του λόγω θερμικής κίνησης. Αν λοιπόν σε ένα σώμα (πχ στον αέρα που βρίσκεται στο θάλαμο καύσης) προσδοθεί ποσότητα θερμότητας (μέσω της καύσης), η ενέργεια αυτή θα κατανεμηθεί στο σύνολο των μορίων του αερίου αυξάνοντας την κινητική ενέργεια των μορίων, αυξάνοντας δηλαδή τη θερμοκρασία. Για μια δεδομένη ποσότητα ενέργειας το κλάσμα της ενέργειας που θα απορροφήσει κάθε μόριο είναι αντιστρόφως ανάλογο του αριθμού των μορίων. Οπότε ερευνώντας μακροσκοπικά το φαινόμενο ισχύει ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του εργαζόμενου μέσου είναι αντιστρόφως ανάλογη της ποσότητάς του για δεδομένο ποσό εκλυόμενης ενέργειας ή αλλιώς για το συγκεκριμένο παράδειγμα, για δεδομένη ποσότητα καυσίμου. Στην πραγματικότητα εργαζόμενο μέσο είναι το μείγμα των καυσαερίων, άρα η μεταβολή της θερμοκρασίας είναι αντιστρόφως ανάλογη της ποσότητας $W+W_f$, ωστόσο λόγω του γεγονότος ότι η ποσότητα του καυσίμου είναι πολύ μικρή σχετικά με την ποσότητα του αέρα που εισέρχεται στο θάλαμο καύσης, μπορούμε να αγνοήσουμε το W_f χωρίς σημαντικό σφάλμα.

Θεωρώντας λοιπόν τις τιμές των W (αέρας) και W_f (καύσιμο) ανά μονάδα μπορούμε να καταλήξουμε στη σχέση:

$$T_f = T_d + (T_{f0} - T_{d0}) \frac{W_f}{W} \quad (4.6)$$

όπου T_{f0} , T_{d0} οι ονομαστικές τιμές για τις αντίστοιχες θερμοκρασίες (οι θερμοκρασίες δηλαδή που προκύπτουν για την T_f και την T_d όταν οι ροές W_f και W έχουν τις ονομαστικές τους τιμές). Για λόγους απλότητας του μοντέλου θα θεωρήσουμε ότι η πίεση του εργαζόμενου μέσου στο θάλαμο καύσης παραμένει σταθερή, χωρίς αυτό να προκαλεί σημαντικές αποκλίσεις.

4.1.3 Στρόβιλος

Ο ρόλος του στρόβιλου είναι να παράγει τη μηχανική ισχύ στον άξονα της μηχανής. Η αναπτυσσόμενη ροπή κινεί τη γεννήτρια παράγοντας ηλεκτρική ισχύ. Στον αεριοστρόβιλο απλού άξονα η ταχύτητά του είναι ίδια με του συμπιεστή, δηλαδή N_f σε στροφές ανά λεπτό (rpm) ή N ανά μονάδα. Τα καυσαέρια εισέρχονται με συνθήκες T_f/p_f από την έξοδο του θαλάμου καύσης και εξέρχονται στο περιβάλλον με συνθήκες T_e/p_e , όπου p_e είναι η πίεση της ατμόσφαιρας, δηλαδή p_i .

Αν συμβολίσουμε με P_t το λόγο εκτόνωσης στο στρόβιλο, που ισούται με το λόγο P_c όπως εξηγείται παρακάτω, έχουμε για ισεντροπική μεταβολή σύμφωνα με την (3.32):

$$\frac{T_f}{T_e} = (P_t)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = (P_c)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = x \quad (3.32)$$

Ο λόγος εκτόνωσης P_t δεν είναι σταθερός αλλά εξαρτάται από τη ροή του αέρα. Η σχέση που συνδέει τα δύο μεγέθη είναι η [6]:

$$P_t = P_{t0} W \quad (4.7)$$

όπου P_{t0} είναι ο λόγος πίεσης στις ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή για πλήρες φορτίο.

Ο λόγος συμπίεσης του συμπιεστή είναι ίσος με το λόγο εκτόνωσης του στροβίλου (επειδή τα καυσαέρια εξέρχονται με πίεση ίση με αυτή του περιβάλλοντος και υποθέσαμε ισοβαρή καύση), συνεπώς έχουμε την ισότητα:

$$P_{t0} = P_{c0} \quad (4.8)$$

Έτσι ισχύει και ότι ο όρος $(P_t)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$ ισούται επίσης με x , όπως και ο $(P_c)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$.

Έστω ότι T_e είναι η ισεντροπική θερμοκρασία. Επειδή η συμπίεση δεν είναι ισεντροπική χρησιμοποιούμε τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του στροβίλου η_t (για να εκφράσουμε τις απώλειες στο στρόβιλο) όπως τον ορίσαμε στην (3.31):

$$\eta_t = \frac{h_f - h_e}{h_f - h_{e'}} = \frac{T_f - T_e}{T_f - T_{e'}} \quad (3.31)$$

όπου στις παραπάνω σχέσεις θεωρήσαμε σταθερό c_p .

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει η σχέση

$$T_e = T_f \left[1 - \eta_t \left(1 - \frac{1}{x} \right) \right] \quad (4.9)$$

όπου $x = (P_t)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = (P_c)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$

Η ισχύς που παράγει ο στρόβιλος είναι ίση με:

$$P_{\text{στροβ}} = \dot{m}(h_f - h_e) = \dot{m} c_p (T_f - T_e) \quad (4.10)$$

όπου το c_p θεωρήθηκε ίσο με αυτό στο συμπιεστή.

4.1.4 Αλγεβρικές εξισώσεις θερμοδυναμικού συστήματος

Από τις σχέσεις που αναπτύξαμε στις παραγράφους 4.1.1-4.1.3 παίρνουμε τις αλγεβρικές εξισώσεις, η λύση των οποίων μας δίνει το σημείο λειτουργίας του αεριοστροβίλου. Η παραγόμενη από τον αεριοστρόβιλο ισχύς προκύπτει αν αφαιρέσουμε την ισχύ του συμπιεστή από αυτήν του στροβίλου. Η διαφορά ισούται με την περιστροφική ισχύ που στη μόνιμο κατάσταση ισούται με το ηλεκτρικό φορτίο. Επειδή

κατά τη μετάδοση ισχύος από ή προς τον άξονα παρουσιάζονται μηχανικές απώλειες (από το στρόβιλο, το συμπιεστή και τη γεννήτρια), χρησιμοποιούμε έναν ισοδύναμο μηχανικό βαθμό απόδοσης $\eta_{M\Sigma}$ που εκφράζει το σύνολο των απωλειών. Η μηχανική ισχύς δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} P_{\mu\eta\chi} &= \eta_{M\Sigma} \left(\dot{m}c_p(T_f - T_e) - \dot{m}c_p(T_d - T_i) \right) = \\ &= \eta_{M\Sigma} \dot{m}_0 W c_p [T_f - T_e - T_d + T_i] \end{aligned} \quad (4.11)$$

Η ονομαστική μηχανική ισχύς ισούται με:

$$P_{mN} = \eta_{M\Sigma} c_p \dot{m}_0 [T_{f0} - T_{e0} - T_{d0} + T_i] \quad (4.12)$$

όπου ο δείκτης 0 εκφράζει τις ονομαστικές τιμές θερμοκρασίας.

Διαιρώντας την (4.11) με την (4.12) παίρνουμε την ανά μονάδα μηχανική ισχύ P_m :

$$P_m = \frac{P_{\mu\eta\chi}}{P_{mN}} = W \frac{[T_f - T_e - T_d + T_i]}{[T_{f0} - T_{e0} - T_{d0} + T_i]} = WK[T_f - T_e - T_d + T_i] \quad (4.13)$$

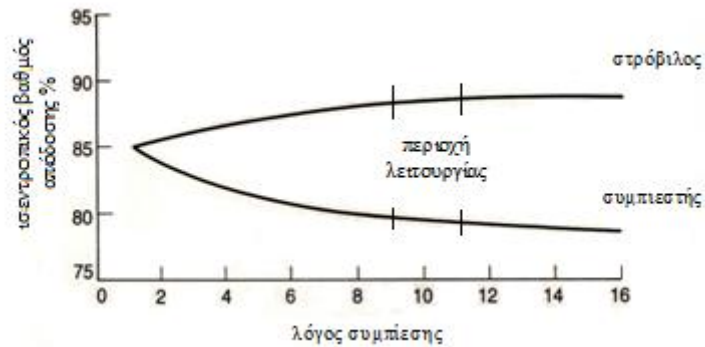
όπου:

$$K = \frac{1}{[T_{f0} - T_{e0} - T_{d0} + T_i]} \quad (4.14)$$

Οι θερμοκρασίες T_d , T_f και T_e δίνονται από τις σχέσεις (4.1), (4.6) και (4.9) συναρτήσει των W , W_f και T_i ενώ η (4.2) λόγω της (4.5) γράφεται:

$$x = (P_{c0} W)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (4.15)$$

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειώσουμε ότι οι εσωτερικοί βαθμοί απόδοσης του στροβίλου και του συμπιεστή θεωρήθηκαν σταθεροί και ίσοι με η_f και η_c αντίστοιχα. Στην πραγματικότητα μεταβάλλονται με βάση το λόγο συμπίεσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2 [12]. Επειδή όμως ο λόγος συμπίεσης είναι υψηλός, της τάξης του 11-12, ακόμα και μια σχετικά μεγάλη μεταβολή της ροής του αέρα της τάξης του 20% δεν μεταβάλλει σημαντικά το βαθμό απόδοσης. Για αυτό τους θεωρούμε με ικανοποιητική ακρίβεια σταθερούς.



Σχήμα 4.2: Εξάρτηση ισεντροπικού βαθμού απόδοσης και λόγου πίεσης

Για τον προσδιορισμό ενός σημείου λειτουργίας έχουμε τέσσερις εξισώσεις (τρεις από τις εξισώσεις των θερμοκρασιών και μια από την ισχύ) και πέντε αγνώστους: T_d , T_f και T_e (αφού η θερμοκρασία περιβάλλοντος T_i θεωρείται γνωστή) και τις ροές W και W_f . Να σημειώσουμε ότι η ταχύτητα περιστροφής θεωρείται στη μόνιμο κατάσταση ίση με την ονομαστική ($N=1$) οπότε από την (4.4) ο προσδιορισμός της ροής του αέρα δίνει και την τιμή του ανοίγματος των πτερυγίων g .

Χρειαζόμαστε συνεπώς άλλη μια συνθήκη για να λυθεί το πρόβλημα εύρεσης του σημείου λειτουργίας και αυτή εξαρτάται από τον τρόπο λειτουργίας του αεριοστροβίλου. Θεωρούμε ότι η μονάδα λειτουργεί σε τρεις περιοχές ανάλογα με το μηχανικό φορτίο P_m , που ισούται στη μόνιμο κατάσταση με το ηλεκτρικό φορτίο P_e της μονάδας:

- 1) Στην πρώτη περιοχή η ροή του αέρα είναι μέγιστη ($W=1$) και τα πτερύγια πλήρως ανοιχτά. Καθώς το φορτίο μειώνεται, όταν η θερμοκρασία καυσαερίων φτάσει μια επιθυμητή τιμή T_{r1} , όπου αντιστοιχεί μια τιμή ισχύος ανά μονάδα P_{e1} , ενεργοποιούνται τα πτερύγια εισόδου περιορίζοντας τη ροή του αέρα για να διατηρηθεί η επιθυμητή θερμοκρασία T_{r1} .
- 2) Στην περιοχή λειτουργίας αυτή διατηρείται σταθερή η θερμοκρασία καυσαερίων στην τιμή T_{r1} ανά μονάδα ώστε να μην μειωθεί σημαντικά η απόδοση του θερμοδυναμικού κύκλου λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών. Έτσι θεωρούμε ότι ισχύει $T_{e_{pu}}=T_{r1}$ και λύνεται το σύστημα των τεσσάρων εξισώσεων με τέσσερις πλέον αγνώστους. Η ροή του αέρα ρυθμίζεται από τα πτερύγια τα οποία προσαρμόζονται κατάλληλα ώστε να επιτευχθεί η ροή του αέρα που υπολογίζεται από τη λύση των εξισώσεων. Κατά την επίλυση και καθώς μειώνεται η ισχύς, όταν η τιμή της ροής του αέρα προκύψει ίση με την ελάχιστη (W_{min}) σε μια ισχύ P_{e2} , μπαίνουμε στην τρίτη περιοχή λειτουργίας διότι η ροή του αέρα δεν μπορεί να μειωθεί περαιτέρω.
- 3) Στην τρίτη περιοχή λειτουργίας η ροή του αέρα είναι ίση με την ελάχιστη και ο αεριοστροβίλος λειτουργεί σε χαμηλό φορτίο. Τα πτερύγια στην περίπτωση αυτή είναι σταθερά ανοιχτά στην ίδια ανά μονάδα τιμή. Στις εξισώσεις θέτουμε $W=W_{min}$ οπότε έχουμε τέσσερις αγνώστους και η επίλυση είναι δυνατή για κάθε δοσμένη ισχύ.

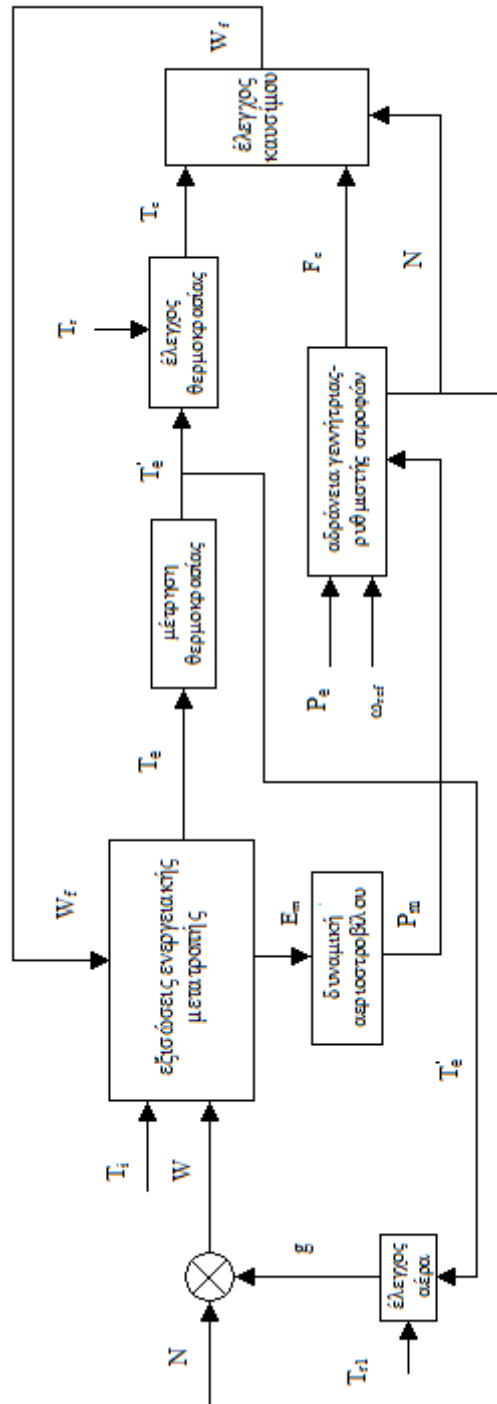
4.2 Διατάξεις ελέγχου και συναρτήσεις μεταφοράς

Έχοντας καθορίσει τις εξισώσεις που περιγράφουν τη λειτουργία του αεριοστροβίλου στην ενότητα 4.1 μπορούμε να προχωρήσουμε στην ανάπτυξη του μοντέλου λειτουργίας ενός αεριοστροβίλου κοινού άξονα, εισάγοντας παράλληλα τους κατάλληλους ρυθμιστές [6, 13] προκειμένου το σύστημα αυτό να παραμένει εντός των ορίων λειτουργίας του. Στο Σχήμα 4.3 φαίνεται ένα διάγραμμα βαθμίδων που περιγράφει τη λειτουργία της μονάδας με όλους τους επιμέρους ρυθμιστές.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τις συνιστώσες του αεριοστροβίλου δόθηκαν στην ενότητα 4.1. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος T_i , η ροή του καυσίμου W_f και η ροή του αέρα W (που εξαρτάται από το άνοιγμα g των πτερυγίων και την ταχύτητα N) καθορίζουν μέσω των ενεργειακών εξισώσεων, όπως θα φανεί στην παράγραφο 4.2.1, τη θερμοκρασία T_e και τη διαθέσιμη ισχύ E_m . Η ισχύς αυτή μετατρέπεται λόγω της δυναμικής του αεριοστροβίλου στην περιστροφική ισχύ του άξονα P_m . Να τονίσουμε εδώ ότι η θερμοκρασία T_e είναι σε βαθμούς Kelvin, όπως όλες οι θερμοκρασίες. Σαν σήμα η T_e σε αμ τιμές θα συμβολίζεται T_{e_pu} . Υπάρχουν δύο βρόχοι ελέγχου του αεριοστροβίλου και αυτοί είναι ο βρόχος ρύθμισης στροφών και ο βρόχος αποφυγής υπερθέρμανσης.

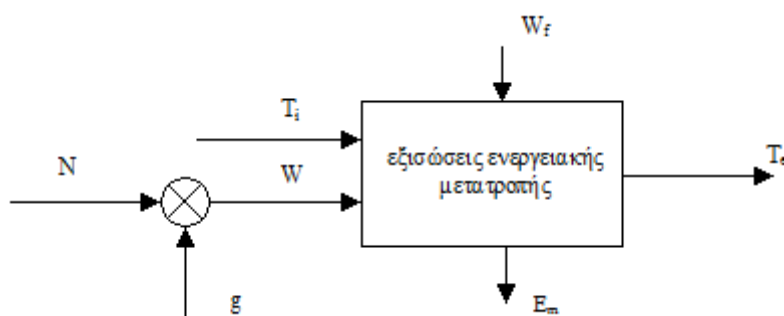
Το σήμα που καθορίζει τη ροή καυσίμου W_f (F_d) προκύπτει από τον επιλογέα ελάχιστης τιμής μεταξύ των σημάτων T_c του βρόχου αποφυγής υπερθέρμανσης και της ζήτησης καυσίμου F_c του ρυθμιστή στροφών. Ο μορφοτροπέας (μετρητής) θερμοκρασίας αποτελεί τη διάταξη μέτρησης της θερμοκρασίας των καυσαερίων (T_{e_pu}). Η μετρούμενη τιμή της θερμοκρασίας αυτής (T'_{e_pu}) είναι αυτή που υπεισέρχεται σε όλους τους ελέγχους της θερμοκρασίας.

Η παραγόμενη από την μονάδα ισχύς P_m και το φορτίο P_e αποτελούν τις εισόδους του τμήματος που μοντελοποιεί την αδράνεια της γεννήτριας καθώς και τη λειτουργία του ρυθμιστή στροφών. Η σχέση μεταξύ της παραγόμενης και καταναλισκόμενης ισχύος καθορίζει την συχνότητα λειτουργίας της μονάδας κατά την απομονωμένη λειτουργία, και μέσω αυτής το σήμα εξόδου του ρυθμιστή στροφών που είναι η ζήτηση καυσίμου F_d , που καθορίζει τη ροή καυσίμου W_f .



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα λειτουργίας και ελέγχου αεροστροβίλου

4.2.1 Εξισώσεις ενεργειακής μετατροπής



Σχήμα 4.4: Ενεργειακή μετατροπή

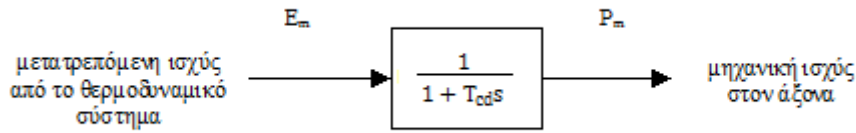
Το τμήμα εξισώσεων ενεργειακής μετατροπής είναι ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.4 το τμήμα αυτό με βάση το εισερχόμενο καύσιμο, τον αέρα, καθώς και τη θερμοκρασία του αέρα κατά την είσοδό του στο συμπιεστή (θερμοκρασία περιβάλλοντος που θεωρείται γνωστή) υπολογίζει τη μετατρεπόμενη από το θερμοδυναμικό σύστημα ισχύ και τις θερμοκρασίες. Εδώ θα θεωρήσουμε ότι η παραγωγή ισχύος μεταβάλλεται ακαριαία μετά από μια μεταβολή στις εισόδους του ζεύγους συμπιεστή-θαλάμου καύσης και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται αλγεβρικές εξισώσεις. Θεωρούμε δηλαδή ότι το τμήμα αυτό δεν έχει χρονική σταθερά αλλά αποκρίνεται σε μηδενικό χρόνο στην όποια μεταβολή στις εισόδους. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, έξοδοι αυτού του τμήματος είναι η καθαρή μετατρεπόμενη ισχύς η οποία θα μετατραπεί σε μηχανική ισχύ. Επίσης, στο τμήμα αυτό υπολογίζεται και η θερμοκρασία των καυσαερίων πριν (T_f) και μετά (T_e) την εκτόνωση στο στρόβιλο καθώς και η θερμοκρασία στην έξοδο του συμπιεστή (T_d).

Πριν γίνει η ανάλυση των αλγεβρικών εξισώσεων του τμήματος αυτού είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι όλα τα μεγέθη θεωρούνται ανηγμένα στις ονομαστικές τους τιμές εκτός από τις τιμές των θερμοκρασιών οι οποίες είναι σε βαθμούς Kelvin. Οι ανά μονάδα τιμές των θερμοκρασιών θα συμβολίζονται με τον δείκτη $_{pu}$.

4.2.2 Δυναμική αεριοστροβίλου

Στην προηγούμενη ενότητα εξαγάγαμε τις θερμοδυναμικές σχέσεις που περιγράφουν τη λειτουργία του αεριοστροβίλου. Οι εξισώσεις που δίνουν την ισχύ εκφράζουν τη μετατρεπόμενη ισχύ από το θερμοδυναμικό σύστημα και η μετατροπή σε μηχανική ισχύ περιστροφής δεν είναι ακαριαία αλλά γίνεται με μια χρονική καθυστέρηση. Η χρονική σταθερά T_{cd} εκφράζει αυτήν την καθυστέρηση. Η συνάρτηση μεταφοράς που δίνει την απόκριση του αεριοστροβίλου δίνεται από την παρακάτω σχέση και παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5:

$$\frac{P_m}{E_m} = \frac{1}{1 + T_{cd}s} \quad (4.16)$$



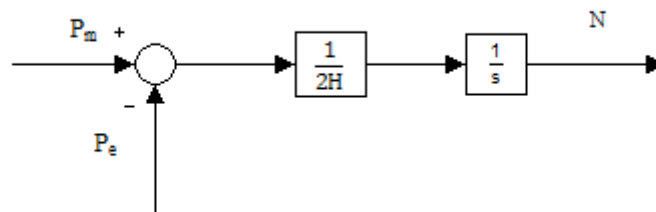
Σχήμα 4.5: Το διάγραμμα του αεριοστροβίλου

4.2.3 Μηχανικό μοντέλο γεννήτριας

Η μοντελοποίηση του μηχανικού μέρους της γεννήτριας γίνεται σε αυτό το κεφάλαιο θεωρώντας απομονωμένη λειτουργία της αεριοστροβιλικής μονάδας. Συνεπώς η γεννήτρια παριστάνεται με την αδράνεια του στρεφόμενου άξονα, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6. Η ανηγμένη χρονική σταθερά αδράνειας H δίνεται σε sec και συνδέεται με την ταχύτητα και τις ισχύεις με τη διαφορική εξίσωση επιταχύνσεως:

$$P_m - P_e = 2H\dot{N} \quad (4.17)$$

όπου P_m είναι η καθαρή μηχανική ισχύς που αποδίδει ο αεριοστροβίλος και ισούται με τη διαφορά ισχύος στροβίλου-συμπίεστη όπως προαναφέραμε και P_e είναι η ηλεκτρική ισχύς του φορτίου (η οποία θεωρείται σε αυτό το κεφάλαιο ως είσοδος στο μοντέλο). $\dot{N}$ είναι ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας περιστροφής του άξονα ανά μονάδα. Όλα τα μεγέθη είναι ανά μονάδα και με τη χρήση του ολοκληρωτή τελικά παίρνουμε την ανά μονάδα ταχύτητα. Η ταχύτητα συμβολίζεται με N και ταυτίζεται με την ανά μονάδα συχνότητα του συστήματος. Αν η μηχανική ισχύς είναι μεγαλύτερη της ηλεκτρικής τότε ο άξονας επιταχύνεται ενώ επιβραδύνεται όσο το φορτίο υπερβαίνει τη μηχανική ισχύ. Μόνο όταν εξισωθούν οι δύο ισχύεις ο άξονας ισορροπεί και περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα.



Σχήμα 4.6: Μηχανικό μοντέλο γεννήτριας

4.2.4 Ρυθμιστής στροφών

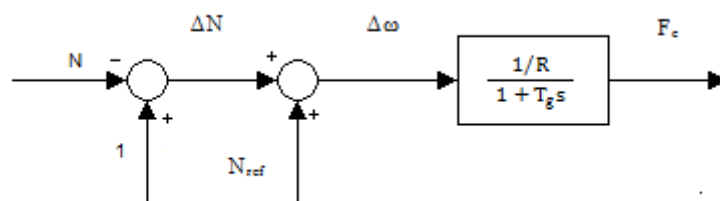
Η παραγόμενη ισχύς του αεριοστροβίλου επιταχύνει τον κοινό άξονα ενώ η ισχύς του φορτίου, η οποία ορίζεται από το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, επιβραδύνει τον άξονα μέσω της ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Για να εξισορροπείται το φορτίο με τη μηχανική ισχύ απαιτείται ένας ρυθμιστής στροφών που ανάλογα με τη διαφορά στις δύο ισχύεις θα παράγει το ανάλογο διορθωτικό σήμα. Το διάγραμμα βαθμίδων του ρυθμιστή στροφών φαίνεται στο Σχήμα 4.7. Η ταχύτητα της μηχανής ταυτίζεται με τη συχνότητα του συστήματος σε ανά μονάδα τιμές. Σε ονομαστική λειτουργία η συχνότητα είναι 1 αμ (50 Hz) και το σήμα της ταχύτητας του αεριοστροβίλου συγκρίνεται με την τιμή αυτή.

Αν λοιπόν η μηχανική ισχύς είναι μεγαλύτερη του φορτίου τότε η μηχανή επιταχύνεται και η σύγκριση παράγει ένα αρνητικό σήμα F_d για τη ζήτηση του καυσίμου ώστε να μειωθεί η παραγόμενη ισχύς. Αντίστοιχα αν το φορτίο είναι μεγαλύτερο τότε η ταχύτητα πέφτει κάτω από την ονομαστική και το σήμα γίνεται θετικό οπότε η ζήτηση καυσίμου αυξάνεται για να παραχθεί η επιπλέον ποσότητα ισχύος και να ισορροπήσουν οι δύο ισχύεις και η ταχύτητα. Ο ρυθμιστής στροφών έχει συνάρτηση μεταφοράς:

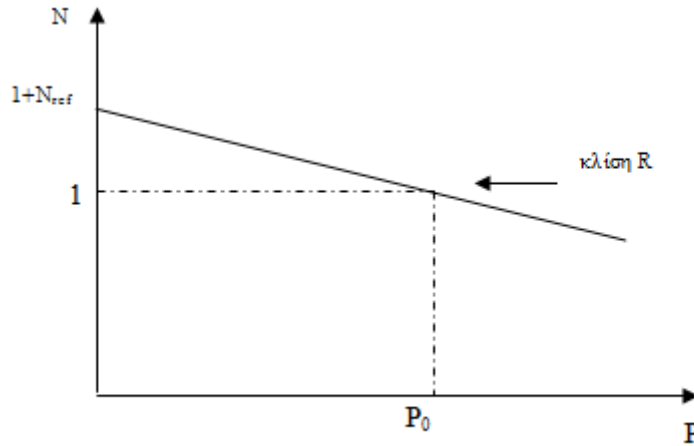
$$\frac{F_c}{\Delta\omega} = \frac{1/R}{1 + T_g s} \quad (4.18)$$

όπου $\Delta\omega = 1 - N - N_{ref}$, R είναι ο στατισμός και T_g η χρονική σταθερά του ρυθμιστή.

Η είσοδος του ελεγκτή στροφών περιέχει και τον όρο N_{ref} (load reference) που αντιστοιχεί στη δευτερεύουσα ρύθμιση. Συγκεκριμένα $N_{ref} = RP_0$ όπως θα αποδειχθεί παρακάτω, όπου P_0 το φορτίο για ονομαστική συχνότητα $N=1$. Η χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας της γεννήτριας παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.7: Ρυθμιστής στροφών



Σχήμα 4.8: Χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας μιας σύγχρονης γεννήτριας

Όταν $N=1$ η συχνότητα έχει ονομαστική τιμή οπότε ο αεριοστρόβιλος παράγει αντίστοιχα ισχύ P_0 . Για την παραγωγή αυτή απαιτείται ροή καυσίμου στον θάλαμο καύσης ίση με F_{d0} . Στην περίπτωση αυτή ισχύει:

$$N_{ref} \frac{1/R}{1+sT} = F_{d0} \quad (4.19)$$

Ενώ στην μόνιμο κατάσταση, όπου $s=0$, αντικαθιστώντας στην πιο πάνω σχέση παίρνουμε:

$$N_{ref} = F_{d0}R \quad (4.20)$$

Αν θεωρήσουμε ανάλογη την τιμή του F_d με την ισχύ P , ισχύει ότι:

$$N_{ref} = P_0R \quad (4.21)$$

το οποίο ουσιαστικά είναι η συχνότητα κενής λειτουργίας μείον 1.

Το N_{ref} (load reference) είναι η τιμή της εισόδου του ελεγκτή στροφών προκειμένου να παράγεται ισχύς P_0 (δηλαδή η έξοδος του ρυθμιστή στροφών να είναι F_{d0}) όταν η συχνότητα είναι ονομαστική. Η παράμετρος αυτή καθορίζει την ισχύ που παράγεται (μέσω της ροής του καυσίμου) όταν η συχνότητα είναι ονομαστική. Αν ο στατισμός R είναι η κλίση της καμπύλης του Σχήματος 4.8 το N_{ref} καθορίζει τη θέση της. Η τομή της καμπύλης φορτίου-συχνότητας με τον άξονα N καθορίζεται αποκλειστικά από το N_{ref} ενώ η κλίση από την τιμή του στατισμού. Αν λοιπόν αλλάξει η τιμή του N_{ref} η ευθεία του Σχήματος 4.8 μετατοπίζεται παράλληλα. Η παράμετρος αυτή αποτελεί το σημείο από το οποίο εισάγεται η δευτερεύουσα ρύθμιση. Στην περίπτωση μόνιμης αλλαγής του φορτίου, σύμφωνα με το Σχήμα 4.8, θα παρουσιαστεί μόνιμο σφάλμα στη συχνότητα. Με κατάλληλη αλλαγή του N_{ref} θα μετατοπιστεί η καμπύλη έτσι ώστε το νέο φορτίο να παράγεται σε ονομαστική συχνότητα.

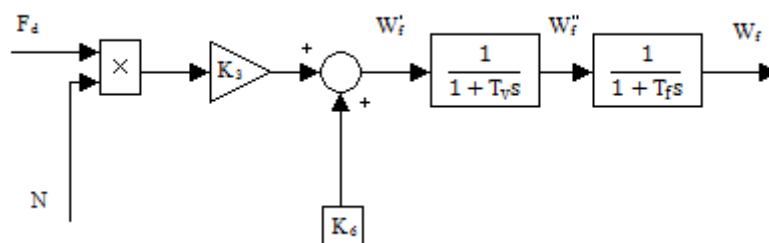
4.2.5 Έλεγχος καυσίμου

Ο έλεγχος της ροής του καυσίμου (που φαίνεται στο Σχήμα 4.9) δέχεται ως είσοδο το σήμα ζήτησης καυσίμου (F_d) το οποίο είναι η έξοδος της συνάρτησης ελάχιστης τιμής που προκύπτει από τη σύγκριση μεταξύ των εξόδων του συστήματος ελέγχου υπερθέρμανσης και του ρυθμιστή στροφών. Η έξοδος του ρυθμιστή καυσίμου είναι η πραγματική ροή στο θάλαμο καύσης (W_f ανά μονάδα).

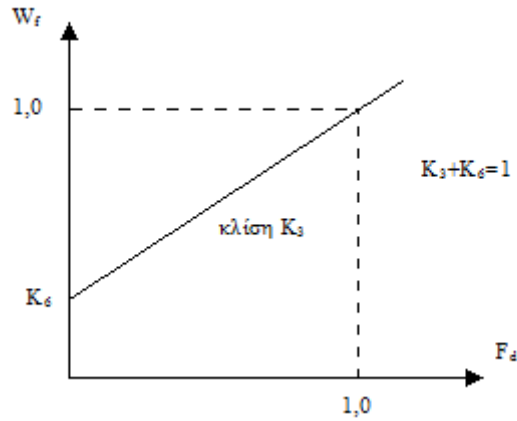
Το σήμα ελέγχου υπερθέρμανσης (T_c) και το σήμα ζήτησης καυσίμου από το ρυθμιστή στροφών (F_c) εισέρχονται στον επιλογέα ελάχιστης τιμής και το μικρότερο σήμα περνάει από έναν περιοριστή που περιορίζει τις τιμές του σήματος καυσίμου μεταξύ της ελάχιστης F_{dmin} και της μέγιστης F_{dmax} . Το σήμα που προκύπτει είναι η ζήτηση του καυσίμου. Οι αντλίες καυσίμου λειτουργούν χρησιμοποιώντας την περιστροφική κίνηση του άξονα, οπότε η ροή του καυσίμου είναι ανάλογη της ταχύτητας του άξονα της μηχανής. Για το λόγο αυτό το σήμα της εισόδου του ρυθμιστή καυσίμου πολλαπλασιάζεται με τη συχνότητα λειτουργίας της μονάδας.

Στη συνέχεια υπάρχει ένας ενισχυτής και στο σήμα που προκύπτει προστίθεται μια σταθερή ποσότητα. Για τη λειτουργία του ο αεριοστροβίλος σε κενό φορτίο απαιτεί μια σημαντική ποσότητα καυσίμου. Το ποσό αυτό είναι η παράμετρος K_6 (της οποίας ενδεικτική τιμή είναι το 0.23 [6]). Για το λόγο αυτό μια από τις παραμέτρους οικονομικής λειτουργίας μιας αεριοστροβιλικής μονάδας είναι η ελαχιστοποίηση των ωρών που λειτουργεί σε κενό φορτίο.

Το γεγονός αυτό περιορίζει τις πραγματικές διακυμάνσεις της ροής του καυσίμου στην περιοχή $K_6 - 1$ αμ. Επειδή όμως το σήμα ζήτησης καυσίμου που προέρχεται από το ρυθμιστή στροφών (ή τον ελεγκτή υπερθέρμανσης) στη γενική περίπτωση κινείται στην περιοχή $0 - 1$ αμ, πολλαπλασιάζεται με K_3 (όπου ισχύει $K_3 + K_6 = 1$) προκειμένου το νέο διάστημα πιθανών τιμών να γίνει $0 - K_3$ αμ και στη συνέχεια προστίθεται το K_6 μετατρέποντας το διάστημα αυτό στο ζητούμενο ($K_6 - 1$ αμ) που αντιστοιχεί στη λειτουργία της αεριοστροβιλικής μονάδας. Στο Σχήμα 4.10 φαίνεται η εξάρτηση της κατανάλωσης καυσίμου από τη ζήτησή του στη μόνιμο κατάσταση.



Σχήμα 4.9: Ο ρυθμιστής ροής καυσίμου



Σχήμα 4.10: Εξάρτηση κατανάλωσης καυσίμου από τη ζήτηση (μόνιμος κατάσταση)

Στη συνέχεια υπάρχουν δυο συστήματα που παριστάνονται από συναρτήσεις μεταφοράς πρώτης τάξεως. Το πρώτο σχετίζεται με το μηχανισμό αλλαγής θέσης της βαλβίδας με χρονική σταθερά T_v :

$$\frac{W''_f}{W'_f} = \frac{1}{1 + T_v s} \quad (4.22)$$

ενώ το δεύτερο με το σύστημα της ροής και διανομής του καυσίμου με χρονική σταθερά T_f :

$$\frac{W_f}{W''_f} = \frac{1}{1 + T_f s} \quad (4.23)$$

4.2.6 Μετρητής θερμοκρασίας (μορφοτροπέας)

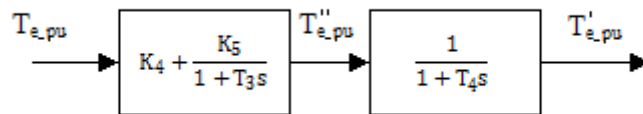
Η θερμοκρασία των καυσαερίων είναι από τις πιο σημαντικές παραμέτρους ενός αεριοστροβίλου διότι οι υπερβολικές θερμοκρασίες στο στρόβιλο μειώνουν το χρόνο ζωής του ή ακόμα προκαλούν και καταστροφικές βλάβες (κυρίως στα μέταλλά του) [14]. Σε παλαιότερους αεριοστροβίλους, όπου οι θερμοκρασίες δεν ήταν τόσο υψηλές όσο στους σύγχρονους, η θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο μετρούταν απευθείας. Στους σύγχρονους αεριοστροβίλους που η θερμοκρασία στην είσοδο του στροβίλου είναι ιδιαίτερα υψηλή για να μετρηθεί από τα διαθέσιμα όργανα μέτρησης, η θερμοκρασία των καυσαερίων χρησιμοποιείται ως ένδειξη της θερμοκρασίας του στροβίλου.

Η διάταξη του Σχήματος 4.11 μετρά την τιμή της θερμοκρασίας των καυσαερίων T_e μετατρέποντάς την σε ηλεκτρικό σήμα το οποίο αντιστοιχεί στη θερμοκρασία T_e' . Κατά τη μέτρηση θερμοκρασίας τα μεγέθη παρίστανται ανά μονάδα και για αυτό χρησιμοποιείται ο δείκτης pu.

Το πρώτο στάδιο του μορφοτροπέα σχετίζεται με τη μέθοδο της μέτρησης. Λόγω των υψηλών τιμών θερμοκρασίας που παίρνει το T_e ο αισθητήρας θερμοκρασίας θα πρέπει να

είναι θερμικά μονωμένος. Για το λόγο αυτό ένα ποσοστό της μεταβολής της θερμοκρασίας (K_4) γίνεται ακαριαία αντιληπτό από τον αισθητήρα ενώ το υπόλοιπο ποσοστό (K_5) γίνεται αντιληπτό με μια χρονική σταθερά T_3 . Η συνάρτηση μεταφοράς αυτή φαίνεται στο Σχήμα 4.11.

Το δεύτερο τμήμα που φαίνεται στο Σχήμα 4.11 αναφέρεται στη δυναμική απόκριση του θερμοστοιχείου (αισθητήρας θερμοκρασίας). Ο αισθητήρας αυτός αντιλαμβάνεται τη μετρούμενη θερμοκρασία με μια χρονική σταθερά T_4 . Ισχύει ότι $K_4+K_5=1$ ώστε το κέρδος του μορφοτροπέα να είναι ίσο με τη μονάδα και έτσι η μετρούμενη θερμοκρασία να είναι ίση με την πραγματική στη μόνιμο κατάσταση.

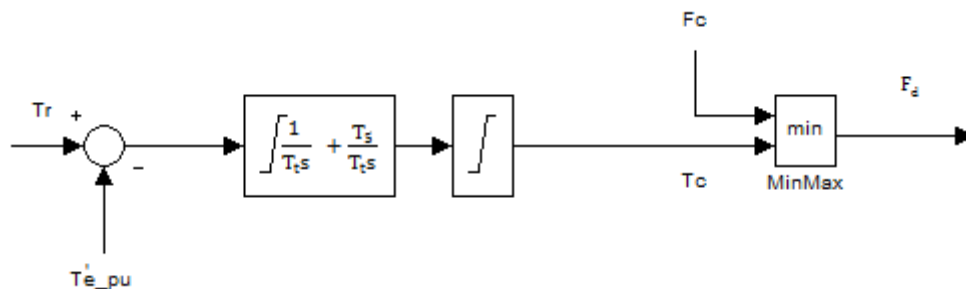


Σχήμα 4.11: Μετρητής θερμοκρασίας

4.2.7 Έλεγχος υπερθέρμανσης

Ο έλεγχος υπερθέρμανσης, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.12, είναι απαραίτητος ώστε να διασφαλίζει ότι η θερμοκρασία δεν θα υπερβαίνει κατά πολύ την ονομαστική. Σε μια απότομη αύξηση της ζήτησης φορτίου (πχ πτώση της συχνότητας) ο ρυθμιστής στροφών θα ανταποκριθεί δίνοντας μεγάλη τιμή στο σήμα ζήτησης καυσίμου F_c λόγω του κέρδους του $1/R$. Αν δεν υπήρχε ο έλεγχος υπερθέρμανσης αυτό μπορεί να προκαλούσε μεγάλη αύξηση στη ροή του καυσίμου χωρίς παράλληλη αύξηση του αέρα (εξάλλου υπάρχει περιορισμός από τα πετρώγια αφού όταν είναι πλήρως ανοιχτά δεν γίνεται να αυξηθεί η ροή του αέρα). Το αποτέλεσμα θα ήταν μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας στο στρόβιλο, πράγμα ανεπιθύμητο που μπορεί να προκαλέσει σοβαρές βλάβες κυρίως στα μέταλλα του στρόβιλου.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.12 η μετρούμενη ανά μονάδα θερμοκρασία των καυσαερίων $T'_{e,pu}$ συγκρίνεται με μια θερμοκρασία αναφοράς T_r . Η διαφορά εισάγεται σε έναν αναλογικό-ολοκληρωτικό ελεγκτή και περνά από έναν περιοριστή ώστε να περιοριστεί το σήμα ελέγχου.



Σχήμα 4.12: Διάταξη ελέγχου υπερθέρμανσης

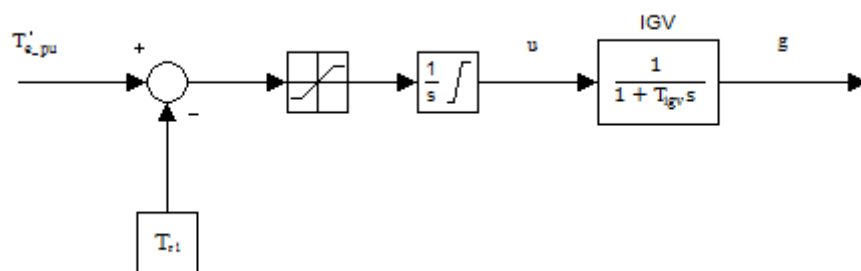
Το σήμα που προκύπτει (T_c) μαζί με το σήμα του ρυθμιστή στροφών F_c καθορίζουν (αφού εισαχθούν στον επιλογέα ελάχιστης τιμής) τη ζήτηση του καυσίμου F_d . Κατά τη διάρκεια της εκκίνησης υπάρχει και τρίτο σήμα, αυτό του βρόχου επιτάχυνσης, αλλά στην κανονική λειτουργία παραλείπεται.

Σε κανονικές συνθήκες το σήμα T'_{e_pu} είναι μικρότερο του T_r . Έτσι η διαφορά είναι θετική και το σήμα T_c έχει την άνω τιμή του περιοριστή οπότε η λειτουργία καθορίζεται από το ρυθμιστή στροφών. Σε μια απότομη άνοδο της θερμοκρασίας που προκαλείται από άνοδο της ροής του καυσίμου, όταν το T'_{e_pu} ξεπεράσει την θερμοκρασία αναφοράς (T_r), τότε το T_c αρχίζει να μειώνεται. Σε κάποια χρονική στιγμή αλλάζει η έξοδος στη συνάρτηση ελάχιστης τιμής και πλέον μικρότερο σήμα είναι το T_c και όχι το F_d . Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η παροχή του καυσίμου στο θάλαμο καύσης, αφού το καύσιμο ορίζεται από το μικρότερο σήμα, ώστε να μειωθεί η τιμή της θερμοκρασίας των καυσαερίων στα επίπεδα αναφοράς. Όταν βέβαια το $T_r - T'_{e_pu}$ αλλάξει ξανά πρόσημο και αυξηθεί το T_c , η ροή του καυσίμου μπορεί πάλι να αρχίσει να αυξάνεται.

4.2.8 Έλεγχος της ροής του αέρα (οδηγία πτερύγια εισόδου)

Στον κανονικό έλεγχο της θερμοκρασίας συνεισφέρει και ο έλεγχος του αέρα όταν τα πτερύγια δεν είναι πλήρως ανοιχτά. Τα πτερύγια ελέγχουν τη ροή του αέρα και μαζί με τη ροή του καυσίμου ελέγχουν την παραγόμενη ισχύ. Περισσότερος αέρας σημαίνει περισσότερη ισχύς και χαμηλότερες θερμοκρασίες. Το πλεονέκτημα του απλού αεριοστροβίλου είναι ότι σε αντίθεση με το συνδυασμένο κύκλο δεν απαιτεί ιδιαιτέρως υψηλές θερμοκρασίες καυσαερίων (που απαιτεί ο συνδυασμένος κύκλος για την παραγωγή ατμού). Εντούτοις η μεγάλη μείωση των θερμοκρασιών επιδρά αρνητικά στο βαθμό απόδοσης της μονάδας.

Στα χαμηλά φορτία τα πτερύγια κλείνουν και μειώνουν τη ροή του αέρα κάτω από την ονομαστική τιμή. Αν δεν υπήρχαν τα πτερύγια η ροή του αέρα θα ήταν αναγκαστικά ίση με την ονομαστική (εκτός από τις όποιες μεταβολές της συχνότητας). Στα σημεία λειτουργίας όμως για μεγαλύτερα φορτία τα πτερύγια είναι πλήρως ανοιχτά και δεν υπάρχει δυνατότητα αύξησης της ροής του αέρα. Στα χαμηλότερα φορτία, αντίθετα, η μονάδα ελέγχεται και από τα πτερύγια. Αυτό φαίνεται από τη διάταξη ελέγχου του αέρα στο Σχήμα 4.13:



Σχήμα 4.13: Διάταξη ελέγχου αέρα

Το T_{r1} είναι μια θερμοκρασία κάτω της οποίας η ροή του αέρα είναι σταθερή. Έγινε αναφορά σε αυτήν στην παράγραφο 4.1.4, όπου αναπτύχθηκε ο τρόπος λειτουργίας των πτερυγίων σε κατάσταση ισορροπίας στις τρεις περιοχές λειτουργίας του αεριοστροβίλου. Όταν η θερμοκρασία λόγω κάποιας διαταραχής υπερβεί την τιμή αναφοράς και τα πτερύγια δεν είναι πλήρως ανοιχτά (περιοχές λειτουργίας 2 και 3 παραγράφου 4.1.4) ανοίγουν ώστε να αυξηθεί η ροή του αέρα και να μειωθεί η θερμοκρασία. Ο πρώτος περιοριστής θέτει όρια στο ρυθμό τους, από -0.01 ως 0.01, ώστε να μην ανοιγοκλείνουν απότομα επηρεάζοντας έντονα τη ροή του αέρα και έτσι προκαλώντας προβλήματα αστάθειας της φλόγας στο θάλαμο καύσης [6]. Ο ολοκληρωτής ολοκληρώνει το σήμα (μαζί με τον περιοριστή που θέτει άνω όριο τη μονάδα όπου τα πτερύγια είναι πλήρως ανοιχτά και κάτω όριο ώστε να εξασφαλίζεται μια ελάχιστη ροή αέρα) ώστε να δώσει μετά από μια απλή συνάρτηση μεταφοράς το σήμα των πτερυγίων. Η συνάρτηση μεταφοράς έχει τη μορφή:

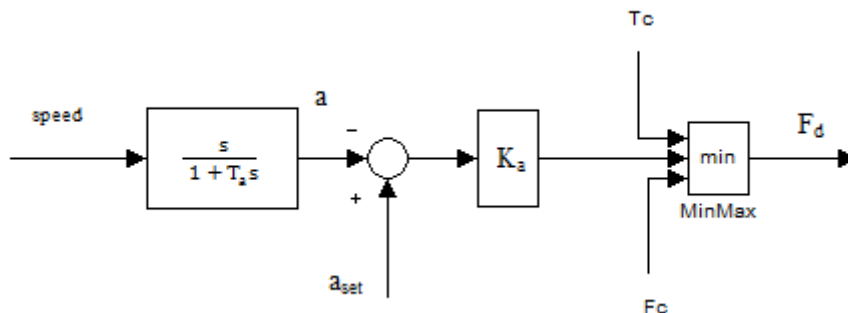
$$\frac{g}{u} = \frac{1}{1 + T_{igv}s} \quad (4.24)$$

όπου T_{igv} η χρονική σταθερά απόκρισης του σερβομηχανισμού ελέγχου των πτερυγίων.

4.2.9 Έλεγχος επιτάχυνσης

Ο έλεγχος επιτάχυνσης, που φαίνεται στο Σχήμα 4.14, εισάγεται για να περιορίζει την επιτάχυνση σε ανεκτά επίπεδα ώστε να μην δημιουργείται πρόβλημα στα μηχανικά μέρη του αεριοστροβίλου. Ο κλάδος έχει ουσιαστικό ρόλο κατά την εκκίνηση της μηχανής οπότε όταν εξετάζουμε τη λειτουργία του αεριοστροβίλου μπορεί να παραληφθεί.

Το σήμα εισόδου είναι η ταχύτητα, δηλαδή η συχνότητα λειτουργίας της μονάδας. Η ταχύτητα παραγωγίζεται - με μια χρονική σταθερά T_a - ώστε να προκύψει η επιτάχυνση (σήμα a). Αυτή συγκρίνεται με μια τιμή αναφοράς a_{set} και το σήμα πολλαπλασιάζεται με μια σταθερά K_a και μετά συγκρίνεται με τα T_c , F_c στον επιλογέα ελάχιστης τιμής. Αν το σήμα της επιτάχυνσης είναι μεγαλύτερο του a_{set} τότε το σήμα είναι αρνητικό και η ροή του καυσίμου μειώνεται. Αν είναι μεγαλύτερο τότε το σήμα που παράγεται είναι μεγαλύτερο των άλλων δύο και ο κλάδος δεν επηρεάζει τη λειτουργία της μονάδας.



Σχήμα 4.14: Έλεγχος επιτάχυνσης

4.3 Ανάπτυξη μοντέλου αεριοστροβίλου απλού άξονα με αεροφυλάκιο

4.3.1 Αναγκαιότητα και μέθοδοι μεταβατικής αύξησης ισχύος αεριοστροβίλου

Σε έναν αεριοστρόβilo μπορούν να γίνουν διάφορες τροποποιήσεις ώστε να αυξηθεί η ικανότητά του να ανταποκριθεί σε αυξημένο φορτίο για κάποιο χρονικό διάστημα με δεδομένα τα μεγέθη του, δηλαδή χωρίς υπερδιαστασιολόγηση του εξοπλισμού. Σε μια απότομη αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου ο κύριος λόγος που ο αεριοστρόβilo δεν μπορεί να δώσει την απαιτούμενη μηχανική ισχύ είναι η υπερθέρμανση. Καθώς αυξάνεται η ροή του καυσίμου για να αυξηθεί το παραγόμενο έργο, όταν η ροή του αέρα είναι ήδη μέγιστη τότε αρχίζουν να αυξάνονται οι θερμοκρασίες των καυσαερίων. Αυτό μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα και βλάβες στον εξοπλισμό οπότε ο βρόχος υπερθέρμανσης δρα μειώνοντας την παροχή του καυσίμου. Αν παραμείνει η απαίτηση για επιπλέον ηλεκτρικό φορτίο για κάποιο χρονικό διάστημα, η αδυναμία ανταπόκρισης οδηγεί σε αποσυγχρονισμό της μηχανής.

Επίσης σε περιπτώσεις μεγάλης υποσυχνότητας στο δίκτυο, πιθανό ενδεχόμενο σε απομονωμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, οι αεριοστρόβiloι έχουν το μειονέκτημα ότι επειδή ο συμπιεστής περιστρέφεται με τη συχνότητα του δικτύου, όπως αναφέραμε, μειώνεται η ροή του αέρα (αφού είναι ανάλογη της συχνότητας-ταχύτητας περιστροφής). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της παραγόμενης ισχύος και επιδείνωση του προβλήματος της υποσυχνότητας.

Έχουν προταθεί και υλοποιηθεί διάφορες μέθοδοι μεταβατικής αύξησης της ισχύος ενός αεριοστροβίλου ή σταθμού συνδυασμένου κύκλου. Ενδεικτικά αναφέρονται οι ακόλουθες μέθοδοι σχετικά με σταθμούς αεριοστροβίλων [15]:

- Ατμοποιητική ψύξη εισόδου (evaporative inlet cooling)
- Ψεκάσμος εισόδου (inlet fogger)
- Ψύξη εισόδου (inlet chilling)
- Έγχυση ατμού στο στρόβilo
- Έγχυση νερού στο στρόβilo
- Αεροφυλάκιο συμπιεσμένου αέρα

Από τις παραπάνω μεθόδους στις τρεις πρώτες η αύξηση στην ισχύ περιορίζεται από τις συνθήκες του περιβάλλοντος (πχ υψηλή υγρασία ή χαμηλή θερμοκρασία) οπότε δεν είναι ιδιαίτερα αξιόπιστες. Η έγχυση νερού ή ατμού έχει το πρόβλημα της πρόκλησης διάβρωσης στα περύγια του στροβίλου. Με την τελευταία μέθοδο, του αεροφυλακίου, είναι δυνατή η αύξηση της ροής του αέρα προσφέροντας αυξημένη παραγόμενη ισχύ αμέσως χωρίς πρόβλημα υπερθέρμανσης.

4.3.2 Περιγραφή της μεθόδου μεταβατικής αύξησης της ισχύος με χρήση αεροφυλακίου

Η μέθοδος αυτή [16] δίνει τη δυνατότητα σε έναν αεριοστρόβιλο να διατηρεί ή και να αυξάνει άμεσα την παραγόμενη ισχύ του σε περιπτώσεις μεγάλης υποσυχνότητας αλλά και να ανταποκριθεί σε μεγαλύτερη απαίτηση φορτίου για κάποιο χρονικό διάστημα επειδή με τη ροή του επιπλέον αέρα αποφεύγεται η υπερθέρμανση.

Όταν δεν υπάρχει απαίτηση από το σύστημα ο αεριοστρόβιλος να λειτουργεί στην ονομαστική του ισχύ μπορεί ένα μέρος του συμπιεσμένου αέρα (στην έξοδο του συμπιεστή) να αποθηκεύεται σε ένα ειδικά διαμορφωμένο στεγανοποιημένο αεροφυλάκιο. Κατά το διάστημα της αποθήκευσης η ροή του αέρα θα είναι μικρότερη όπως και η παραγόμενη ισχύς εκτός αν αυξηθεί η ροή του καυσίμου και η θερμοκρασία. Όταν, λοιπόν, το αεροφυλάκιο ενεργοποιείται η ροή του αέρα από το αεροφυλάκιο προστίθεται στη ροή του αέρα που εξέρχεται από το συμπιεστή:

$$W_{ol} = W + W_{ch} \quad (4.25)$$

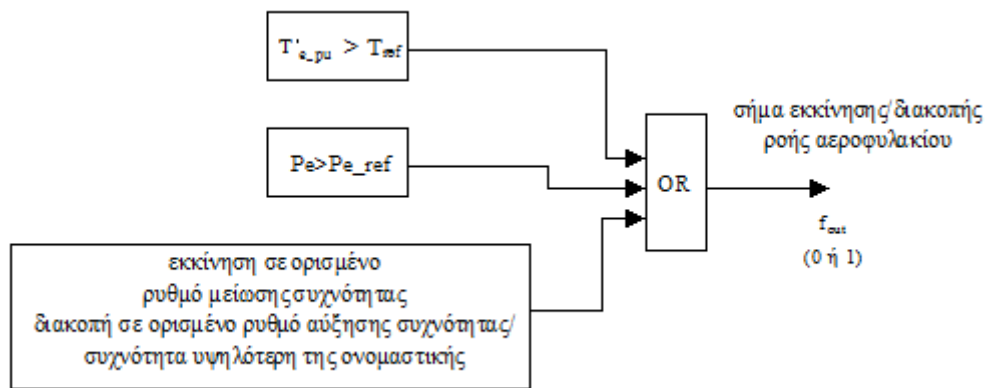
όπου με W συμβολίζεται κατά τα προαναφερθέντα η ροή του αέρα ανά μονάδα, με W_{ch} συμβολίζεται η ανά μονάδα (ως προς την ονομαστική ροή του αέρα) ροή αέρα του αεροφυλακίου και με W_{ol} η συνολική ροή του αέρα που οδηγείται στο θάλαμο καύσης και επίσης εκφράζεται ανά μονάδα (ως προς την ονομαστική ροή του αέρα).

Η ποσότητα του αέρα που μπορεί να αποθηκευτεί είναι ανάλογη του μεγέθους του αεροφυλακίου. Όταν θα χρειαστεί να ενεργοποιηθεί το σύστημα του αεροφυλακίου και επιπλέον μάζα συμπιεσμένου αέρα να προστεθεί στην εξερχόμενη μάζα αέρα από το συμπιεστή (πριν το θάλαμο καύσης δηλαδή), η πίεση του αέρα του αεροφυλακίου πρέπει να ισούται με την πίεση της κύριας μάζας αέρα στη μηχανή. Για να είναι δυνατή η συνεισφορά του αεροφυλακίου στο πλήρες φορτίο (που η πίεση είναι μέγιστη) και επειδή η πίεση του αέρα στο αεροφυλάκιο μειώνεται καθώς αυτό αδειάζει, η πίεση τελικά σε αυτό πρέπει να είναι μεγαλύτερη της ονομαστικής πίεσης εξόδου από το συμπιεστή. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας ένα μικρό συμπιεστή που θα υπερσυμπιέζει τον αέρα ώστε να έχει ένα περιθώριο ασφάλειας σε σχέση με την πίεση στην έξοδο του συμπιεστή.

Στο σημείο αυτό θα περιγράψουμε το σύστημα ελέγχου του αεροφυλακίου που θεωρήθηκε σε αυτήν την εργασία. Η κύρια λειτουργία του αεροφυλακίου είναι να αναιρέσει την επίδραση του επιπλέον καυσίμου στη θερμοκρασία αποτρέποντας την υπερθέρμανση και να αυξήσει την παροχή του αέρα. Δηλαδή μπορεί να αυξηθεί η παραγόμενη ισχύς λόγω αυξημένης ροής αέρα και αυξημένης ροής καυσίμου, η οποία θα ήταν αδύνατη χωρίς τη χρήση του αεροφυλακίου λόγω ενεργοποίησης του βρόχου υπερθέρμανσης που θα περιόριζε τη ροή του καυσίμου.

Το πρώτο σήμα του συστήματος ελέγχου, που φαίνεται στο Σχήμα 4.15, είναι ο έλεγχος της υπερθέρμανσης. Το αεροφυλάκιο θα ενεργοποιείται αν η μετρούμενη θερμοκρασία (ανά μονάδα) T'_{e_pu} των καυσαερίων ξεπεράσει την τιμή T_{ref} . Επίσης, το αεροφυλάκιο τίθεται σε λειτουργία όταν το ηλεκτρικό φορτίο ξεπεράσει κάποια τιμή

μεγαλύτερη της ονομαστικής αφού τότε αυξάνεται η θερμοκρασία και η μονάδα δεν μπορεί να ανταποκριθεί λόγω του βρόχου υπερθέρμανσης. Ακόμα, το αεροφυλάκιο μπορεί να τίθεται σε λειτουργία όταν ο ρυθμός μείωσης της συχνότητας ξεπεράσει κάποια τιμή (που σημαίνει ότι αυξήθηκε απότομα το φορτίο) και να διακόπτει τη λειτουργία του όταν το αίτιο εξαλείφεται (και αυξάνεται απότομα η συχνότητα ή αυτή παίρνει τιμή μεγαλύτερη της ονομαστικής).



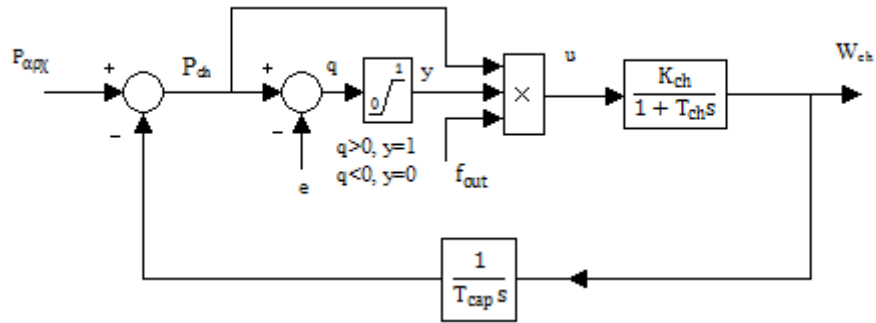
Σχήμα 4.15: Λογικό διάγραμμα συστήματος ελέγχου αεροφυλακίου

Η τελική έξοδος αυτού του υποσυστήματος ελέγχου δίνει ένα σήμα για την εκκίνηση ή τη διακοπή της λειτουργίας του αεροφυλακίου (λειτουργία on-off, λογικό 1-0). Είναι απαραίτητος και ο έλεγχος της πίεσης αφού αυτή πρέπει να είναι μεγαλύτερη της πίεσης στο σημείο εισόδου στον αεριοστρόβιλο, πριν το θάλαμο καύσης. Για απλοποίηση κάνουμε την παραδοχή ότι είναι δυνατή η προσαρμογή της πίεσης του αέρα από το αεροφυλάκιο στην πίεση στο σημείο εισόδου με κατάλληλο σύστημα ελέγχου. Όταν το αεροφυλάκιο παρέχει πρόσθετη ροή αέρα τότε μειώνεται η μάζα του αέρα σε αυτό και μειώνεται και η πίεση ανάλογα αφού θεωρούμε τον όγκο του σταθερό. Έτσι, αν ολοκληρώσουμε τη ροή του αεροφυλακίου πολλαπλασιασμένη με μια σταθερά που εκφράζει το μέγεθος του αεροφυλακίου ($1/T_{cap}$) και την αφαιρέσουμε από την αρχική υπερπίεση ($P_{αρχ}$) του αεροφυλακίου παίρνουμε την υπερπίεση σε αυτό. Η αρχική υπερπίεση εκφράζει την ανά μονάδα υπερπίεση που επικρατεί στο αεροφυλάκιο.

Σημειώνεται ότι η ροή του αεροφυλακίου (W_{ch}) είναι ανάλογη της υπερπίεσής του (P_{ch}). Καθώς το αεροφυλάκιο αδειάζει (με ρυθμό που εξαρτάται από τη χωρητικότητά του T_{cap}), η υπερπίεσή του μειώνεται και όταν αυτή πέσει κάτω από την ονομαστική πέραν ενός ορίου e η συμβολή του εξαντλείται. Για να πάρουμε την τελική ροή του αεροφυλακίου ανά μονάδα (W_{ch}) το σήμα πολλαπλασιάζεται με μια σταθερά K_{ch} που εκφράζει το μέγιστο άνοιγμα της βαλβίδας και μια συνάρτηση μεταφοράς πρώτης τάξεως, που εκφράζει το την απόκριση της βαλβίδας με την αντίστοιχη χρονική σταθερά T_{ch} :

$$\frac{W_{ch}}{u} = \frac{K_{ch}}{1 + T_{ch}s} \quad (4.26)$$

Το αντίστοιχο διάγραμμα βαθμίδων στο Σχήμα 4.16.



Σχήμα 4.16: Σύστημα ελέγχου για το άνοιγμα της ροής αέρα του αεροφυλακίου

Οι θερμοδυναμικές εξισώσεις που αναπτύξαμε στην παράγραφο 4.1.4 παραλλάσσονται για να συμπεριλάβουν την επίδραση του αεροφυλακίου. Οι εξισώσεις του συμπιεστή είναι ίδιες αφού ο συμπιεσμένος αέρας εισέρχεται πριν το θάλαμο καύσης. Έχουμε δηλαδή:

$$T_d = T_i \left[1 + \frac{1}{n_c} (x - 1) \right] \quad (4.1)$$

$$x = (P_{c0} W)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (4.2)$$

Αντίστοιχα για το θάλαμο καύσης όπου εισέρχεται το άθροισμα των δύο ροών, δηλαδή το W_{ol} , ισχύει:

$$T_f = T_d + (T_{f0} - T_{d0}) \frac{W_f}{W_{ol}} \quad (4.27)$$

Στο στρόβιλο όπου εισέρχεται το W_{ol} έχουμε:

$$T_e = T_f \left[1 - n_t \left(1 - \frac{1}{y} \right) \right] \quad (4.28)$$

όπου τώρα ισχύει για το y :

$$y = (P_{t0} W_{ol})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (4.29)$$

Από την (4.8) γνωρίζουμε ότι:

$$P_{t0} = P_{c0} \quad (4.8)$$

Η σχέση για την ισχύ αλλάζει επίσης, λόγω του ότι η ροή του στροβίλου είναι W_{ol} . Οπότε η ανά μονάδα ισχύς του αεριοστροβίλου δίνεται από τη σχέση:

$$P_m = K[W_{ol}(T_f - T_e) - W(T_d - T_i)] \quad (4.30)$$

όπου το K δίνεται από τη σχέση (4.14):

$$K = \frac{1}{[T_{f0} - T_{e0} - T_{d0} + T_i]} \quad (4.14)$$

4.4 Μοντέλο αεριοστροβίλου διπλού άξονα

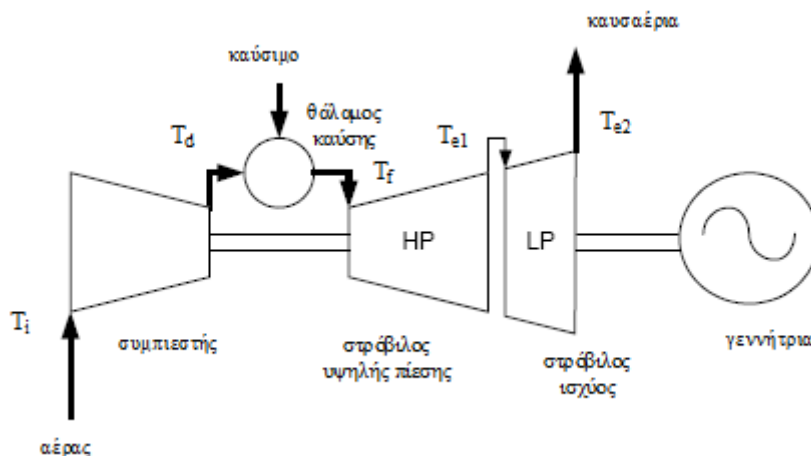
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται το μοντέλο αεριοστροβίλου διπλού άξονα. Στην πρώτη παράγραφο γίνεται μια εισαγωγή στους αεριοστροβίλους διπλού άξονα, στη δεύτερη αναπτύσσονται οι θερμοδυναμικές σχέσεις που περιγράφουν τη λειτουργία τους, στην τρίτη περιγράφεται η τεχνική ελέγχου του και στην τελευταία περιγράφονται οι θερμοδυναμικές σχέσεις με μεγαλύτερη ακρίβεια και λιγότερες απλουστεύσεις.

4.4.1 Εισαγωγή στους αεριοστροβίλους διπλού άξονα

Όπως έχουμε αναφέρει, εκτός από τους αεριοστροβίλους απλού άξονα όπου ο συμπίεστής και ο στρόβιλος βρίσκονται σε κοινό άξονα και περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα, υπάρχει και η διάταξη διπλού άξονα.

Στους αεριοστροβίλους διπλού άξονα υπάρχουν δύο στρόβιλοι. Ο συμπίεστής με τον έναν στρόβιλο ισορροπούν ενεργειακά (η ισχύς που παράγει ο στρόβιλος καταναλώνεται όλη στο συμπίεστή) και τα καυσαέρια οδηγούνται σε ένα δεύτερο στρόβιλο που βρίσκεται σε διαφορετικό άξονα και περιστρέφεται με τη συχνότητα του δικτύου αφού αυτός κινεί τη γεννήτρια (για την περίπτωση που ο αεριοστρόβιλος χρησιμοποιείται για ηλεκτροπαραγωγή). Το ζεύγος συμπίεστή-στροβίλου καλείται αεριογόνος διότι παράγει τα καυσαέρια τα οποία παράγουν ισχύ στο δεύτερο στρόβιλο, που καλείται στρόβιλος ισχύος. Η διάταξη με τις επιμέρους θερμοκρασίες φαίνεται στο Σχήμα 4.17.

Ο αέρας εισέρχεται στο συμπίεστή με συνθήκες T_i/p_i και εξέρχεται (αφού συμπιεστεί) με συνθήκες T_d/p_d . Ο συμπιεσμένος αέρας εισέρχεται στο θάλαμο καύσης και μετά την καύση του τα παραγόμενα καυσαέρια εξέρχονται με συνθήκες T_f/p_f . Αφού εκτονωθούν στο στρόβιλο της αεριογόνου, που θα ονομάζεται και στρόβιλος υψηλής πίεσης εξαιτίας του γεγονότος ότι οι πιέσεις είναι υψηλότερες σε σχέση με το στρόβιλο ισχύος, παράγουν ισχύ ίση με αυτή που καταναλώνει ο συμπίεστής και εξέρχονται με συνθήκες T_{e1}/p_{e1} . Στη συνέχεια εκτονώνονται για δεύτερη φορά στο στρόβιλο ισχύος, που ανάλογα ονομάζεται και στρόβιλος χαμηλής πίεσης, παράγοντας την ωφέλιμη ισχύ της μονάδας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική από τη γεννήτρια. Τελικά εξέρχονται στην ατμόσφαιρα με συνθήκες T_{e2}/p_{e2} όπου η πίεση p_{e2} είναι ίση με την ατμοσφαιρική πίεση p_i .



Σχήμα 4.17: Αεριοστροβίλος διπλού άξονα

Οι κύριες διαφορές μεταξύ των αεριοστροβίλων απλού άξονα και των αεριοστροβίλων διπλού άξονα είναι οι ακόλουθες [16, 17, 18]:

- Η αδράνεια της γεννήτριας και ενός αεριοστροβίλου απλού άξονα (συμπιεστή και στροβίλου) είναι σαφώς μεγαλύτερη από αυτήν της γεννήτριας και του στροβίλου ισχύος ενός αεριοστροβίλου διπλού άξονα, αφού στη δεύτερη περίπτωση ο συμπιεστής δεν βρίσκεται στον άξονα της γεννήτριας και η αδράνεια του άξονα οφείλεται περισσότερο στη γεννήτρια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ταχύτητα του στροβίλου ισχύος να είναι πιο ευαίσθητη στις διαταραχές και τις μεταβολές της ισχύος.
- Μια μονάδα αεριοστροβίλου διπλού άξονα δεν έχει κάποιους από τους περιορισμούς του αεριοστροβίλου απλού άξονα αφού ο συμπιεστής είναι σε ξεχωριστό άξονα. Αυτό σημαίνει ότι μια πτώση της συχνότητας του δικτύου δεν επηρεάζει τη ροή του αέρα και την παραγόμενη ισχύ ώστε ο αεριοστροβίλος να επιτείνει το πρόβλημα της υποσυχνότητας (μειώνοντας δηλαδή την ισχύ κατά τη διάρκεια μιας υποσυχνότητας του δικτύου). Επίσης, επειδή η ταχύτητα της αεριογόνου δεν είναι ίση με του δικτύου είναι δυνατόν σε περίπτωση υποσυχνότητας να αυξηθεί επιπλέον η ροή του αέρα αν αυξηθεί η ταχύτητα της αεριογόνου, κάτι που δεν γίνεται στον απλό αεριοστροβίλο.
- Η ταχύτητα του συμπιεστή στην περίπτωση του απλού αεριοστροβίλου είναι σταθερή και δεν μπορεί να μεταβληθεί λόγω της σύζευξης με το δίκτυο. Επειδή συνήθως οι συμπιεστές έχουν υψηλές ταχύτητες περιστροφής απαιτείται η χρήση ενός μειωτήρα στροφών ώστε η γεννήτρια να περιστρέφεται με την απαιτούμενη ταχύτητα (η οποία εξαρτάται από τη συχνότητα του δικτύου και τους πόλους της γεννήτριας). Αντίθετα, στους αεριοστροβίλους διπλού άξονα, όπου ο στροβίλος ισχύος και η γεννήτρια βρίσκονται σε ξεχωριστό άξονα, είναι δυνατόν να μην απαιτείται μειωτήρας στροφών αν η ταχύτητα του στροβίλου ισχύος είναι ίδια με της γεννήτριας.

4.4.2 Θερμοδυναμικές σχέσεις του μοντέλου διπλού άξονα

Στη μόνιμο κατάσταση ο συμπίεστος και ο στρόβιλος υψηλής πίεσης ισορροπούν ενεργειακά (δηλαδή ο συμπίεστος καταναλώνει όση περιστροφική ισχύ αποδίδει ο στρόβιλος στον άξονα) ώστε ο άξονας να περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα. Έστω, λοιπόν, ότι ο συμπίεστος περιστρέφεται με ταχύτητα ανά μονάδα N_1 και ότι ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης του συμπίεστη είναι ίσος με η_c . Κρατάμε ίδιο τον συμβολισμό για τα W , W_f όπως στις προηγούμενες ενότητες. Σύμφωνα με όσα εξαγάγαμε στην παράγραφο 4.1.1 έχουμε:

$$T_d = T_i \left[1 + \frac{1}{\eta_c} (q - 1) \right] \quad (4.31)$$

όπου

$$q = \left(\frac{p_d}{p_i} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = (P_c)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (4.32)$$

P_c είναι ο πραγματικός λόγος συμπίεσης που αντίστοιχα εξαρτάται από τη ροή του αέρα σύμφωνα με την (4.5):

$$P_c = P_{c0} W \quad (4.5)$$

όπου P_{c0} είναι ο ονομαστικός λόγος συμπίεσης: p_{d0}/p_{i0} .

Η ισχύς που καταναλώνει ο συμπίεστος είναι λόγω της (4.3) ίση με:

$$P_{\text{συμπ}} = \dot{m}(h_d - h_i) = \dot{m} c_p (T_d - T_i) \quad (4.3)$$

Το $\dot{m}$ συμβολίζει όπως έχουμε αναφέρει τη ροή μάζας του αέρα σε kg/s. Για τη ροή του αέρα ανά μονάδα, η οποία πλέον εξαρτάται από την ταχύτητα της αεριογόνου N_1 και το άνοιγμα των πτερυγίων g , ισχύει η σχέση:

$$W = g N_1 \quad (4.33)$$

Για το θάλαμο καύσης ισχύει και εδώ η σχέση (4.6):

$$T_f = T_d + (T_{f0} - T_{d0}) \frac{W_f}{W} \quad (4.6)$$

Για το στρόβιλο της αεριογόνου θεωρούμε ότι τα καυσαέρια εξέρχονται με θερμοκρασία T_{e1} και αντίστοιχα ειδική ενθαλπία ίση με h_{e1} , ενώ ο στρόβιλος περιστρέφεται με ταχύτητα N_1 ανά μονάδα όπως ο συμπίεστος (αφού στη μόνιμο κατάσταση ο άξονας ισορροπεί) και ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης είναι ίσος με η_{t1} .

Σύμφωνα με όσα εξαγάγαμε στην παράγραφο 4.1.1 έχουμε λόγω της (4.9) για τη θερμοκρασία:

$$T_{e1} = T_f \left[1 - n_{t1} \left(1 - \frac{1}{n} \right) \right] \quad (4.34)$$

όπου

$$n = \left(\frac{p_f}{p_{e1}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = (P_{t1})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (4.35)$$

όπου P_{t1} είναι ο πραγματικός λόγος εκτόνωσης στο στρόβιλο υψηλής πίεσης και δεν εξαρτάται από τη ροή του αέρα, οπότε θεωρούμε ότι είναι σταθερός. Αυτό ισχύει διότι θεωρούμε το στρόβιλο χαμηλής πίεσης στραγγαλισμένο, σύμβαση που ισχύει για μεγάλο εύρος λειτουργίας της μονάδας [3]. Οπότε ο πραγματικός λόγος εκτόνωσης είναι ίσος με τον ονομαστικό λόγο P_{t1_0} , δηλαδή ισχύει:

$$P_{t1} = P_{t1_0} \quad (4.36)$$

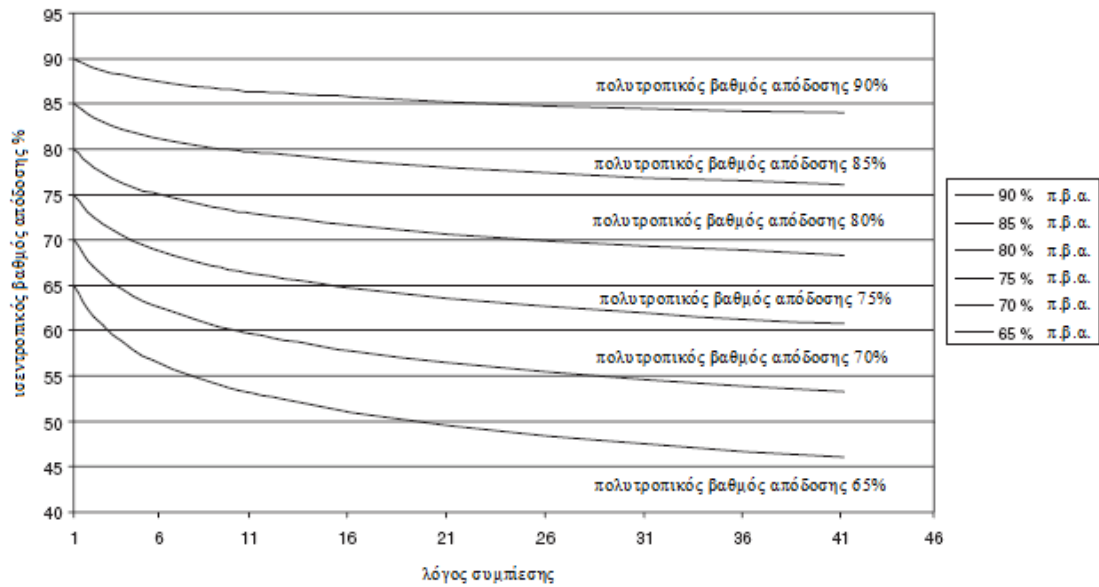
Η ισχύς που παράγει ο στρόβιλος υψηλής πίεσης είναι λόγω της (4.10) ίση με:

$$P_{\sigma\tau\rho\omicron\beta} = \dot{m}(h_f - h_{e1}) = \dot{m} c_p (T_f - T_{e1}) \quad (4.37)$$

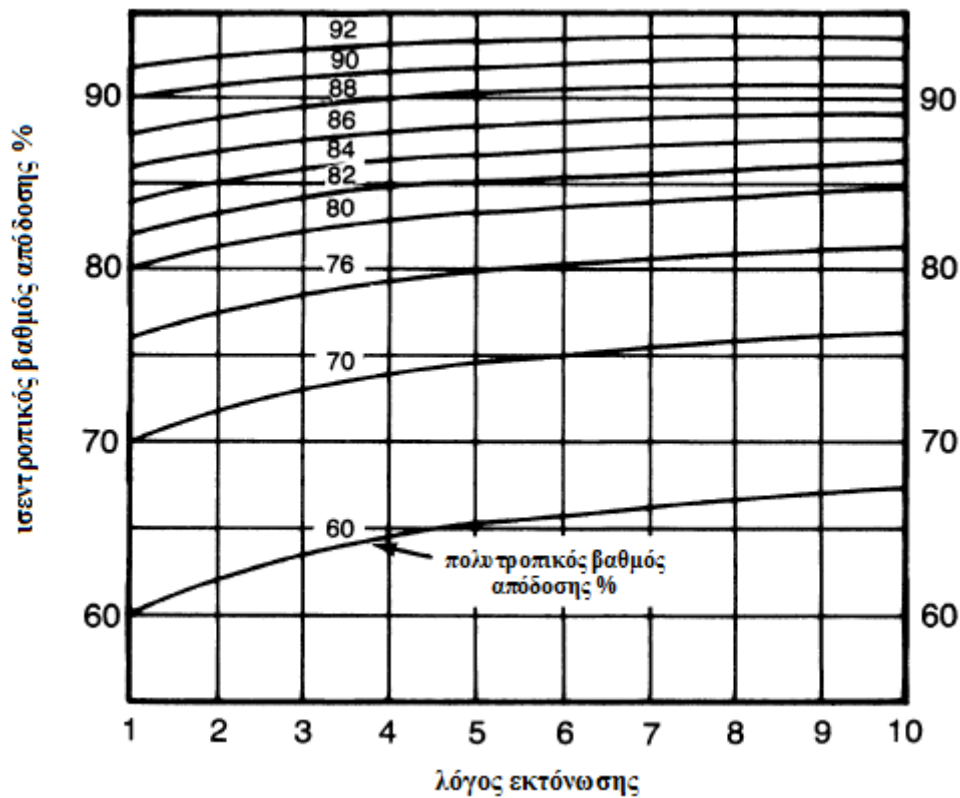
όπου το c_p θεωρήθηκε όμοιο με του αέρα στο συμπιεστή ενώ η ροή του αέρα (εδώ καυσαερίων) είναι ίση με του συμπιεστή αμελώντας την συνεισφορά της μάζας του καυσίμου.

Στο Σχήμα 4.18 φαίνεται η εξάρτηση ενός συμπιεστή από το λόγο συμπίεσης για διαφορετικούς πολυτροπικούς βαθμούς απόδοσης [19]. Ως πολυτροπικός βαθμός απόδοσης ορίζεται ο σταθερός ισεντροπικός βαθμός απόδοσης που θα έπρεπε να έχει κάθε βαθμίδα μιας στροβιλομηχανής ώστε ο συνολικός βαθμός απόδοσής της μέσω όλων των βαθμίδων να προκύπτει ίσος με τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης της στροβιλομηχανής [12]. Στο Σχήμα 4.19 φαίνεται, αντίστοιχα, η εξάρτηση ενός στροβίλου από τον λόγο εκτόνωσης για διαφορετικούς πολυτροπικούς βαθμούς απόδοσης [19].

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.19 ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης ενός συμπιεστή αεριοστροβίλου διπλού άξονα, όπου ο λόγος συμπίεσης παίρνει τιμές 18, 22 ή και μεγαλύτερες, μεταβάλλεται λίγο σε σχέση με το λόγο συμπίεσης ακόμα και για σχετικά μεγάλες μεταβολές του λόγου συμπίεσης. Έτσι μπορούμε προσεγγιστικά να θεωρήσουμε ότι ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή είναι σταθερός. Το ίδιο ισχύει για τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης των στροβίλων όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.20, όπου οι λόγοι εκτόνωσης προσεγγιστικά παίρνουν τιμές στο διάστημα 4-5 για λόγο συμπίεσης 20. Έτσι όλοι οι ισεντροπικοί βαθμοί απόδοσης θα θεωρούνται σταθεροί χωρίς αυτό να οδηγεί σε σημαντικά σφάλματα.



Σχήμα 4.18: Εξάρτηση ισεντροπικού βαθμού απόδοσης συμπίεστη από τον λόγο συμπίεσης για διαφορετικούς πολυτροπικούς βαθμούς απόδοσης



Σχήμα 4.19: Εξάρτηση ισεντροπικού βαθμού απόδοσης στροβίλου από τον λόγο εκτόνωσης για διαφορετικούς πολυτροπικούς βαθμούς απόδοσης

Για το στρόβιλο ισχύος θεωρούμε ότι τα καυσάερια εξέρχονται αυτού με θερμοκρασία T_{e2} και αντίστοιχα ειδική ενθαλπία ίση με h_{e2} , περιστρέφεται με ταχύτητα N_2 ανά μονάδα, δηλαδή ίση με τη συχνότητα αφού είναι συζευγμένος με τη γεννήτρια και το δίκτυο και ο

ισεντροπικός βαθμός απόδοσης είναι ίσος με η_{t2} . Σύμφωνα με όσα εξαγάγαμε στην παράγραφο 4.1.1 έχουμε λόγω της (4.9) για τη θερμοκρασία:

$$T_{e2} = T_{e1} \left[1 - \eta_{t2} \left(1 - \frac{1}{z} \right) \right] \quad (4.38)$$

όπου

$$z = \left(\frac{p_{e1}}{p_{e2}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{p_{e1}}{p_i} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = (P_{t2})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (4.39)$$

όπου P_{t2} είναι ο πραγματικός λόγος εκτόνωσης του στροβίλου ισχύος. Τα καυσαέρια εξέρχονται με πίεση p_{e2} ίση με αυτήν του περιβάλλοντος (p_i). Ο λόγος εκτόνωσης είναι ανάλογος του αέρα αφού θεωρούμε στραγγαλισμένη λειτουργία του στροβίλου ισχύος. Αυτό σημαίνει ότι μια αύξηση του λόγου συμπίεσης στο συμπιεστή δεν επηρεάζει το λόγο εκτόνωσης του στροβίλου υψηλής πίεσης αλλά αυξάνεται αντίστοιχα ο λόγος εκτόνωσης του στροβίλου ισχύος. Έτσι ο λόγος εκτόνωσης του στροβίλου ισχύος δίνεται από τη σχέση:

$$P_{t2} = P_{t2,0} W \quad (4.40)$$

Η ισχύς που παράγει ο στροβίλος ισχύος είναι, λόγω της (4.10), ίση με:

$$P_{\sigma\tau\rho\beta\ 2} = \dot{m}(h_{e1} - h_{e2}) = \dot{m} c_p (T_{e1} - T_{e2}) \quad (4.41)$$

όπου το c_p θεωρήθηκε όμοιο με του αέρα στο συμπιεστή ενώ η μάζα του αέρα (εδώ καυσαερίων) είναι ίδια αφού διατρέχει όλη τη μηχανή.

Η ισχύς στον άξονα της αεριογόνου ισούται με τη διαφορά της ισχύος του συμπιεστή από αυτήν του στροβίλου. Η διαφορά των δύο ισχύων πρέπει να ισούται με μηδέν ώστε ο άξονας να ισορροπεί. Όπως αναφέραμε και στην περίπτωση του αεριοστροβίλου απλού άξονα, κατά τη μετάδοση της ισχύος του στροβίλου στον άξονα περιστροφής και από αυτόν προς τη γεννήτρια ή το συμπιεστή, υφίστανται απώλειες μετάδοσης. Έτσι, αν συμβολίσουμε με η_{tc} τον ισοδύναμο μηχανικό βαθμό απόδοσης της αεριογόνου, προκύπτει για την ισχύ στον άξονα της αεριογόνου ($P_{\alpha\epsilon\rho\iota\omicron\gamma}$) η σχέση:

$$P_{\alpha\epsilon\rho\iota\omicron\gamma} = \eta_{tc} P_{\sigma\tau\rho\beta\ 1} - P_{\sigma\upsilon\mu\pi} = \dot{m} [\eta_{tc} (h_f - h_{e1}) - (h_d - h_i)] \quad (4.42)$$

Και τελικά:

$$P_{\alpha\epsilon\rho\iota\omicron\gamma} = \dot{m}_0 c_p W \left[\eta_{tc} (T_f - T_{e1}) - T_d + T_i \right] \quad (4.43)$$

Τελικά η ανά μονάδα ισχύς της αεριογόνου (P_{HP}) προκύπτει διαιρώντας την ισχύ $P_{\alpha\epsilon\rho\iota\omicron\gamma}$ με την ονομαστική ισχύ της γεννήτριας. Η ισχύς του στροβίλου ισχύος, αν θεωρήσουμε

έναν ισοδύναμο μηχανικό βαθμό απόδοσης η_{gt} (για τη γεννήτρια και το στροβίλο), ισούται με:

$$P_{\sigma\tau\rho\beta 2} = \dot{m}\eta_{gt}(h_{e1} - h_{e2}) = \dot{m}_0 c_p W \eta_{gt}(T_{e1} - T_{e2}) \quad (4.44)$$

Η ονομαστική ισχύς του στροβίλου ισχύος P_{LPN} , η οποία ταυτίζεται με της γεννήτριας (P_e) ισούται με:

$$P_{LPN} = \eta_{gt} \dot{m}_0 c_p (T_{e1\ 0} - T_{e2\ 0}) \quad (4.45)$$

όπου με δείκτη 0 συμβολίζονται οι ονομαστικές θερμοκρασίες.

Τελικά η ανά μονάδα ισχύς του στροβίλου ισχύος δίνεται από τη σχέση:

$$P_{LP} = \frac{P_{\sigma\tau\rho\beta 2}}{P_{LPN}} = W \frac{(T_{e1} - T_{e2})}{(T_{e1\ 0} - T_{e2\ 0})} = WK_{LP}(T_{e1} - T_{e2}) \quad (4.46)$$

Για το K_{LP} ισχύει:

$$K_{LP} = \frac{1}{(T_{e1\ 0} - T_{e2\ 0})} \quad (4.47)$$

Η ανά μονάδα ισχύς της αεριογόνου δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} P_{HP} &= \frac{P_{\alpha\epsilon\rho\iota\omicron\gamma}}{P_{LPN}} = W \frac{[\eta_{tc}(T_f - T_{e1}) - T_d + T_i]}{\eta_{gt}(T_{e1\ 0} - T_{e2\ 0})} = \\ &= WK_{HP} [\eta_{tc}(T_f - T_{e1}) - T_d + T_i] \end{aligned} \quad (4.48)$$

όπου

$$K_{HP} = \frac{1}{\eta_{gt}(T_{e1\ 0} - T_{e2\ 0})} \quad (4.49)$$

Στο σημείο αυτό θα δώσουμε τη συνθήκη ισορροπίας της αεριογόνου, που δεν είναι άλλη από την ισότητα ισχύος συμπίεστη και στροβίλου. Ή αλλιώς:

$$P_{HP}=0 \quad (4.50)$$

Η παραπάνω σχέση ισοδυναμεί λόγω της (4.48) με την παρακάτω:

$$\eta_{tc}(T_f - T_{e1}) = T_d - T_i \quad (4.51)$$

4.4.3 Λειτουργία και διατάξεις ελέγχου του μοντέλου διπλού άξονα

Στην παράγραφο 4.4.2 αναπτύξαμε τις θερμοδυναμικές σχέσεις ενός αεριοστροβίλου διπλού άξονα και στην παράγραφο αυτή θα περιγράψουμε τον τρόπο λειτουργίας και ελέγχου αυτού. Κατά βάση θα χρησιμοποιήσουμε τις διατάξεις ελέγχου και τις συναρτήσεις μεταφοράς της ενότητας 4.2.

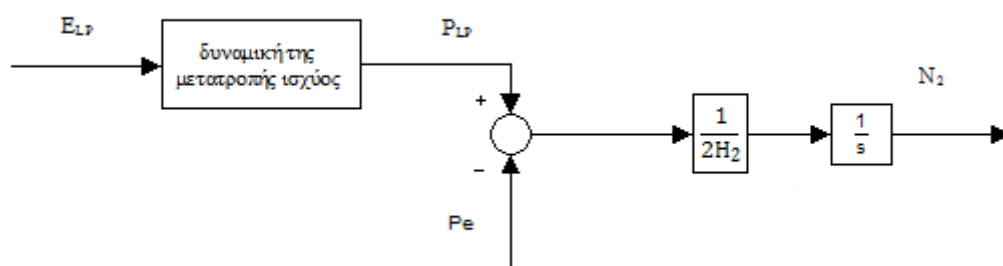
Όπως έχουμε ήδη αναφέρει οι εξισώσεις που δίνουν την ισχύ εκφράζουν τη μετατρεπόμενη ισχύ από το θερμοδυναμικό σύστημα και η μετατροπή σε μηχανική ισχύ περιστροφής δεν είναι ακαριαία αλλά γίνεται με μια χρονική καθυστέρηση (T_{cd}). Στο μοντέλο αυτό χρησιμοποιούμε την ίδια συνάρτηση μεταφοράς (4.16):

$$\frac{P_m}{E_m} = \frac{1}{1 + T_{cd}s} \quad (4.16)$$

Η συνάρτηση μεταφοράς αυτή χρησιμοποιείται δύο φορές στο μοντέλο διπλού άξονα. Την πρώτη φορά η μετατρεπόμενη ισχύς από το θερμοδυναμικό σύστημα είναι η διαφορά ισχύος στροβίλου υψηλής πίεσης και συμπιεστή στην αεριογόνο (E_{HP}) και τη δεύτερη φορά είναι η ισχύς του στροβίλου ισχύος (E_{LP}).

Η μοντελοποίηση του μηχανικού μέρους της γεννήτριας γίνεται όπως περιγράψαμε στην παράγραφο 4.2.3, επίσης θεωρώντας απομονωμένη λειτουργία της αεριοστροβιλικής μονάδας. Η γεννήτρια παριστάνεται με την αδράνεια του στρεφόμενου άξονα (δηλαδή η H_2 εκφράζει την αδράνεια στροβίλου-γεννήτριας), όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.20. Να τονίσουμε εδώ ότι η αδράνεια H_2 μπορεί να περιλαμβάνει τη συνολική αδράνεια ενός αυτόνομου συστήματος στο οποίο συνδέεται η αεριοστροβιλική μονάδα. Η ανηγμένη χρονική σταθερά αδράνειας H_2 δίνεται σε δευτερόλεπτα και συνδέεται με την ταχύτητα και τις ισχύεις με τη διαφορική εξίσωση επιταχύνσεως:

$$P_{LP} - P_e = 2H_2\dot{N}_2 \quad (4.52)$$



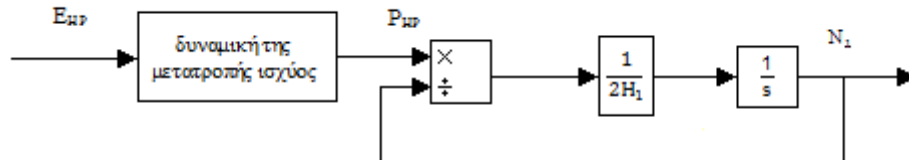
Σχήμα 4.20: Μηχανικό μοντέλο γεννήτριας

Η (4.52) δεν μπορεί να εφαρμοστεί στην περίπτωση του άξονα της αεριογόνου επειδή η ταχύτητά του μεταβάλλεται σημαντικά (ενώ στην περίπτωση του μοντέλου απλού άξονα η απόκλιση από την ονομαστική ταχύτητα είναι πολύ μικρή). Η ανηγμένη χρονική

σταθερά αδράνειας H_1 εκφράζει την αδράνεια της αεριογόνου (στρόβιλος-συμπιεστής). Η διαφορική εξίσωση επιτάχυνσης του άξονα της αεριογόνου δίνεται από την σχέση:

$$\frac{P_{HP}}{N_1} = 2H_1 \dot{N}_1 \quad (4.53)$$

Η (4.53) φαίνεται στο Σχήμα 4.21 σε διάγραμμα βαθμίδων.

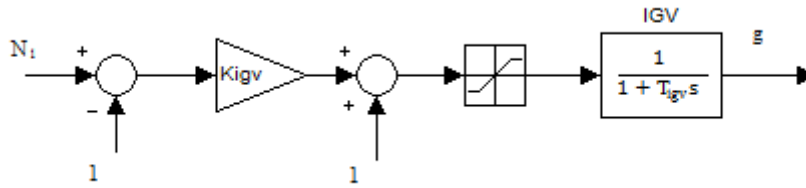


Σχήμα 4.21: Μοντελοποίηση του άξονα της αεριογόνου

Μια ακόμα διαφορά είναι ότι στο ρυθμιστή της ροής καυσίμου, επειδή οι αντλίες καυσίμου λειτουργούν χρησιμοποιώντας την περιστροφική κίνηση του άξονα, η ροή του καυσίμου θα είναι πλέον ανάλογη της ταχύτητας του άξονα της αεριογόνου (N_1). Επίσης, όπως είπαμε, η ροή του αέρα είναι και αυτή ανάλογη της ταχύτητας N_1 . Ακόμα, στο μορφοτροπέα μετράται η θερμοκρασία των καυσαερίων T_{e2} και το μετρούμενο σήμα ανά μονάδα, T'_{e2_pu} χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της υπερθέρμανσης.

Ο έλεγχος της ροής του αέρα γίνεται πλέον με βάση το σήμα της ταχύτητας N_1 . Ο βρόχος πρέπει να υπάρχει ώστε μέσω του κέρδους K_{igv} να ελέγχεται η τιμή της ταχύτητας της αεριογόνου. Το κέρδος K_{igv} καθορίζει και το εύρος διακύμανσης της ταχύτητας της αεριογόνου και ένας τρόπος υπολογισμού του θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο. Αρχικά η ταχύτητα συγκρίνεται με την ονομαστική τιμή και η διαφορά πολλαπλασιάζεται με το προαναφερθέν κέρδος. Στο αποτέλεσμα προστίθεται η μονάδα ώστε στο ονομαστικό φορτίο, όπου η διαφορά N_1-1 ισούται με το μηδέν, η τιμή του σήματος να είναι ίση με τη μονάδα, όση δηλαδή και η τιμή των οδηγών περυγίων εισόδου. Ο περιοριστής περιορίζει την τιμή του σήματος ώστε να μην ξεπερνά ποτέ το μέγιστο άνοιγμα των περυγίων, δηλαδή $g=1$, και να εξασφαλίζεται ότι η ροή του αέρα δεν γίνεται μικρότερη της ελάχιστης απαιτούμενης ενώ η απόκριση του σερβομηχανισμού είναι ίδια με αυτήν της παραγράφου 4.2.8. Ο έλεγχος της ροής του αέρα στον αεριοστρόβιλο διπλού άξονα φαίνεται στο Σχήμα 4.22.

Σε μια αύξηση του φορτίου αυξάνεται η ταχύτητα της αεριογόνου ώστε να αυξηθεί η ροή του αέρα. Η αυξημένη ροή του αέρα (μαζί με την αυξημένη ροή καυσίμου) αυξάνει την παραγωγή καυσαερίων και το φορτίο. Καθώς όμως ο στρόβιλος υψηλής πίεσης παράγει περισσότερη ισχύ και αυξάνεται η ροή του αέρα, αυξάνεται και η κατανάλωση του συμπιεστή επιβραδύνοντας την αεριογόνο μέχρι να εξισωθούν οι δύο αυτές ισχύεις και η αεριογόνο να ισορροπήσει σε μια ταχύτητα υψηλότερη (σε σχέση με την ταχύτητα προ της αύξησης του φορτίου). Αντίστοιχα σε μια μείωση του φορτίου έχουμε ισορροπία σε μια χαμηλότερη ταχύτητα.



Σχήμα 4.22: Έλεγχος της ροής του αέρα του μοντέλου διπλού άξονα

4.4.4 Λεπτομερείς θερμοδυναμικές σχέσεις του μοντέλου διπλού άξονα

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν εν συντομία οι θερμοδυναμικές σχέσεις του μοντέλου διπλού άξονα εξετάζοντας την επίδραση των διαφορετικών ειδικών θερμοχωρητικοτήτων υπό σταθερή πίεση (c_p).

Η θερμοχωρητικότητα εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τη φύση του αερίου. Επειδή η ποσότητα του καυσίμου, όπως έχουμε πει, είναι αρκετά μικρή (της τάξης του 2%) θεωρούμε ότι η συνεισφορά του στον καθορισμό του c_p είναι πολύ μικρή οπότε θεωρούμε ότι εξετάζουμε το c_p του αέρα και όχι ενός μείγματος αέριο-καυσίμου. Έτσι, η μόνη εξάρτησή του είναι από τη θερμοκρασία και δύναται να εκφραστεί σαν συνάρτηση αυτής [20]. Έτσι, για θερμοκρασίες 200-800K έχουμε:

$$c_p = 1018,9 - 0,13784 T + 1,9843 \cdot 10^{-4} T^2 + 4,2399 \cdot 10^{-7} T^3 - 3,7632 \cdot 10^{-10} T^4 \quad (4.54)$$

Για θερμοκρασίες 800-2200 K έχουμε:

$$c_p = 798.65 + 0.5339 T - 2,2882 \cdot 10^{-4} T^2 + 3,7421 \cdot 10^{-8} T^3 \quad (4.55)$$

Να τονιστεί ότι οι τιμές προκύπτουν σε J/kg K οπότε διαιρούμε με το 1000 για να πάρουμε τιμές σε kJ/kg K.

Η υπόθεση για σταθερό c_p στις διάφορες μεταβολές μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητικά ακριβής ώστε να προκύψουν εύχρηστες σχέσεις. Αυτό συμβαίνει γιατί το c_p και το γ έχουν αντίθετη επίδραση σε σχέση με τη θερμοκρασία T . Θεωρούμε για κάθε μεταβολή μια τιμή του c_p αντιπροσωπευτική κάθε μεταβολής (δηλαδή που αντιστοιχεί στη μέση θερμοκρασία της μεταβολής). Να σημειώσουμε ότι ισχύει η σχέση:

$$\frac{\gamma - 1}{\gamma} = \frac{R}{c_p} \quad (4.56)$$

Σε όλες τις σχέσεις που αναπτύξαμε μέχρι τώρα θεωρήσαμε ότι η τιμή του c_p (άρα και του γ) είναι σταθερή σε όλο το θερμοδυναμικό κύκλο. Έστω ότι διαλέγουμε ένα γ (και από αυτό προκύπτει ένα c_p αφού το R είναι σταθερό). Υπολογίζουμε έτσι τη μέση θερμοκρασία. Αν η θερμοκρασία που αντιστοιχεί στο c_p που διαλέξαμε είναι πιο μικρή από τη μέση τότε υποεκτιμήσαμε το c_p αλλά υπερεκτιμήσαμε το ΔT και έτσι έχουμε μια αντιστάθμιση στο γινόμενο της μεταβολής της ενθαλπίας $c_p \Delta T$ [13].

Θεωρούμε τρεις αντιπροσωπευτικές τιμές θερμοχωρητικοτήτων που αντιστοιχούν σε μέσες θερμοκρασίες, c_{pa} για τη συμπίεση, c_{pt} για την πρώτη εκτόνωση και c_{pg} για τη δεύτερη. Αντίστοιχα ορίζονται και οι λόγοι γ_a , γ_t και γ_g . Η θερμοκρασία T_d δίνεται από την (4.31):

$$T_d = T_i \left[1 + \frac{1}{n_c} (q - 1) \right] \quad (4.31)$$

όπου

$$q = (P_c)^{\frac{\gamma_a - 1}{\gamma_a}} \quad (4.57)$$

Για το θάλαμο καύσης ισχύει και εδώ η σχέση (4.6):

$$T_f = T_d + (T_{f0} - T_{d0}) \frac{W_f}{W} \quad (4.6)$$

Η θερμοκρασία T_{e1} δίνεται από την (4.34):

$$T_{e1} = T_f \left[1 - n_{t1} \left(1 - \frac{1}{n} \right) \right] \quad (4.34)$$

όπου

$$n = (P_{t1})^{\frac{\gamma_t - 1}{\gamma_t}} \quad (4.58)$$

Η θερμοκρασία T_{e2} δίνεται από την (4.38):

$$T_{e2} = T_{e1} \left[1 - n_{t2} \left(1 - \frac{1}{z} \right) \right] \quad (4.38)$$

όπου

$$z = (P_{t2})^{\frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g}} \quad (4.59)$$

Για τις ισχείς ισχύουν οι σχέσεις:

$$P_{αεριογ} = \dot{m}_0 W [\eta_{tc} c_{pt} (T_f - T_{e1}) - c_{pa} (T_d - T_i)] \quad (4.60)$$

$$P_{στροβ 2} = \eta_{gt} \dot{m} (h_{e1} - h_{e2}) = \eta_{gt} W \dot{m}_0 c_{pg} (T_{e1} - T_{e2}) \quad (4.61)$$

$$P_{LPN} = \eta_{gt} \dot{m}_0 c_{pg} (T_{e10} - T_{e20}) \quad (4.62)$$

$$P_{LP} = \frac{P_{\sigma\tau\rho\beta\ 2}}{P_{LPN}} = W \frac{(T_{e1} - T_{e2})}{(T_{e1\ 0} - T_{e2\ 0})} = WK_{LP} (T_{e1} - T_{e2}) \quad (4.63)$$

Για το K_{LP} ισχύει πάλι (4.47):

$$K_{LP} = \frac{1}{(T_{e1\ 0} - T_{e2\ 0})} \quad (4.47)$$

Η ανά μονάδα ισχύς της αεριογόνου δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} P_{HP} &= \frac{P_{\alpha\epsilon\rho\iota\omicron\gamma}}{P_{LPN}} = W \frac{[\eta_{tc} c_{pt} (T_f - T_{e1}) - c_{pa} (T_d - T_i)]}{\eta_{gt} c_{pg} (T_{e1\ 0} - T_{e2\ 0})} = \\ &= WK_{HP} [\eta_{gt} c_{pt} (T_f - T_{e1}) - c_{pa} (T_d - T_i)] \end{aligned} \quad (4.64)$$

όπου

$$K_{HP} = \frac{1}{\eta_{gt} c_{pg} (T_{e1\ 0} - T_{e2\ 0})} \quad (4.65)$$

Η συνθήκη ισορροπίας παίρνει πλέον τη μορφή:

$$\eta_{tc} c_{pt} (T_f - T_{e1}) = c_{pa} (T_d - T_i) \quad (4.66)$$

Οι εξισώσεις αυτές περιγράφουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τις θερμοδυναμικές μεταβολές στον αεριοστρόβιλο διπλού άξονα αφού οι ειδικές θερμοχωρητικότητες μεταβάλλονται σημαντικά σε κάθε μια από τις τρεις μεταβολές (συμπίεση και δύο εκτονώσεις). Για το λόγο αυτό αυτές θα χρησιμοποιηθούν και την ανάπτυξη του μοντέλου του αεριοστροβίλου διπλού άξονα στο περιβάλλον του Simulink.

Κεφάλαιο 5^ο: Προσομοίωση λειτουργίας αεριοστροβίλου απλού άξονα με αεροφυλάκιο

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί η υλοποίηση του μοντέλου του αεριοστροβίλου απλού άξονα με αεροφυλάκιο στο Simulink. Στην πρώτη ενότητα θα περιγραφεί ο τρόπος υλοποίησης και προσομοίωσης του μοντέλου του αεριοστροβίλου, τα δεδομένα και η αρχικοποίηση. Στη δεύτερη θα γίνει η περιγραφή της λειτουργίας του αεροφυλακίου, η διάταξη ελέγχου και η υλοποίηση στο Simulink μαζί με τις κατάλληλες παραμέτρους. Στην τρίτη θα γίνει η προσομοίωση και θα εξαχθούν τα συμπεράσματα από τη λειτουργία του.

5.1 Υλοποίηση μοντέλου αεριοστροβίλου απλού άξονα στο Simulink

Στην ενότητα αυτή θα αναπτύξουμε το μοντέλο του αεριοστροβίλου απλού άξονα στο Simulink του Matlab. Το μοντέλο παρουσιάστηκε στο 4^ο κεφάλαιο και τώρα θα υλοποιηθεί στο Simulink ώστε να είναι δυνατή η προσομοίωση της λειτουργίας του. Το Simulink είναι ένα εργαλείο του Matlab το οποίο μας δίνει την δυνατότητα, με χρήση έτοιμων μπλοκ και αλγεβρικών συναρτήσεων από τη βιβλιοθήκη την οποία διαθέτει, υλοποίησης και μελέτης μιας αρκετά ευρείας γκάμας μοντέλων. Στην πρώτη παράγραφο περιγράφεται ο τρόπος που το μοντέλο υλοποιείται μέσω του Simulink, στη δεύτερη δίνονται τα απαραίτητα δεδομένα του μοντέλου και στην τρίτη περιγράφεται η αρχικοποίησή του.

5.1.1 Παράσταση μοντέλου αεριοστροβίλου απλού άξονα στο Simulink

Το μοντέλο του αεριοστροβίλου αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στην παράγραφο αυτή θα δείξουμε τον τρόπο με τον οποίο υλοποιείται στο Simulink. Αρχικά, οι θερμοδυναμικές εξισώσεις που περιγράφουν τη λειτουργία του αεριοστροβίλου υλοποιούνται στο μπλοκ της ενεργειακής μετατροπής του αεριοστροβίλου. Οι εξισώσεις, που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.1, φαίνονται παρακάτω.

$$T_d = T_i \left[1 + \frac{1}{n_c} (x - 1) \right] \quad (5.1)$$

$$x = (P_{c0} W)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (5.2)$$

$$T_e = T_f \left[1 - n_t \left(1 - \frac{1}{x} \right) \right] \quad (5.3)$$

$$T_f = T_d + (T_{f0} - T_{d0}) \frac{W_f}{W} \quad (5.4)$$

$$E_m = WK[T_f - T_e - T_d + T_i] \quad (5.5)$$

$$K = \frac{1}{[T_{f0} - T_{e0} - T_{d0} + T_i]} \quad (5.6)$$

$$W = g N \quad (5.7)$$

Οι σχέσεις (5.1)-(5.4) δίνουν τις θερμοκρασίες του αεριοστροβίλου σε βαθμούς Kelvin, οι σχέσεις (5.5)-(5.6) τη μετατρεπόμενη θερμική ισχύ ανά μονάδα και η (5.7) συνδέει τη ροή μάζας αέρα με το άνοιγμα των πτερυγίων του αέρα και τη συχνότητα. Στο μπλοκ έχουμε ως εισόδους την ανά μονάδα ροή μάζας αέρα (W) και την ανά μονάδα ροή του καυσίμου (W_f) ενώ ως εξόδους έχουμε την ανά μονάδα θερμοκρασία των καυσαερίων (T_e) και την ανά μονάδα μετατρεπόμενη θερμική ενέργεια (E_m).

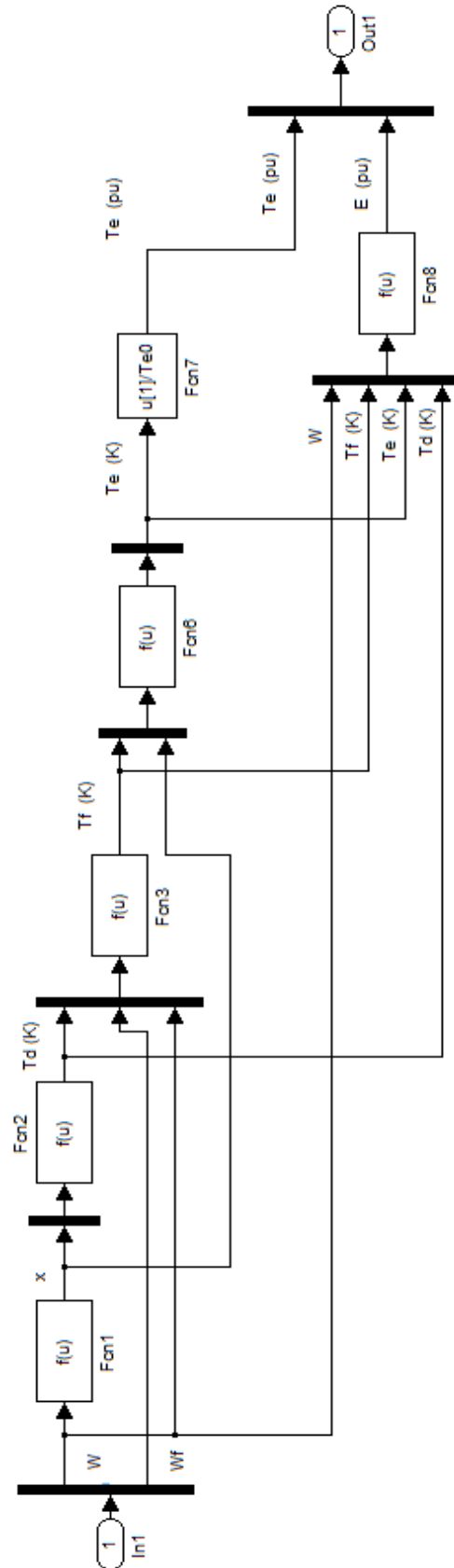
Μέσα στο μπλοκ οι εξισώσεις υλοποιούνται από τη συνάρτηση F_{cn} που παίρνει διάφορες εισόδους ($u[1]$, $u[2]$ κλπ), κάνει τις αντίστοιχες πράξεις που επιθυμούμε και δίνει ανάλογη έξοδο. Για παράδειγμα η σχέση (5.4) υλοποιείται ως εξής:

$$T_f = u[1] + (T_{f0} - T_{d0}) * (u[2] / u[3])$$

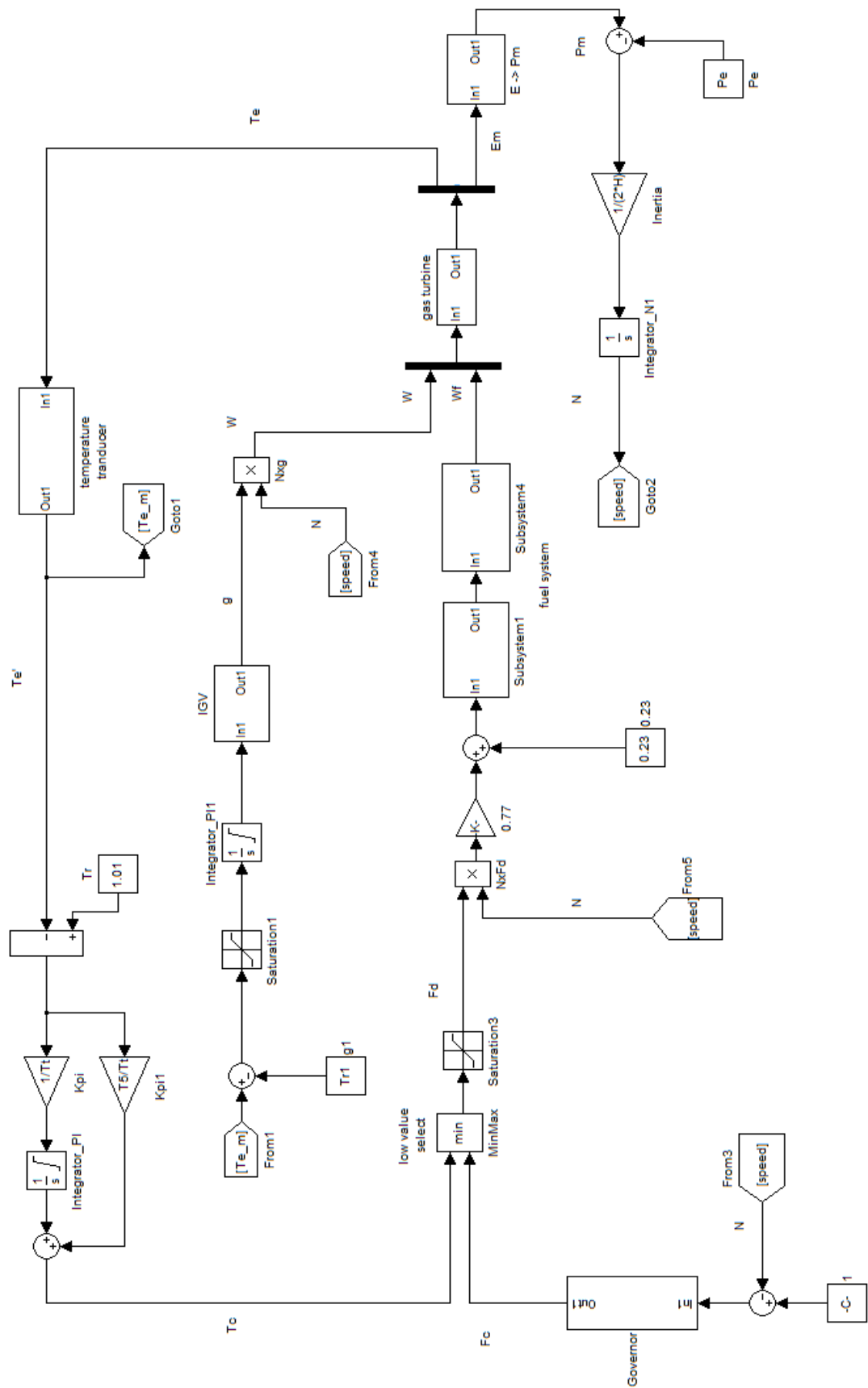
όπου $u[1]=T_d$, $u[2]=W_f$, $u[3]=W$.

Παρόμοια υλοποιούνται και οι υπόλοιπες σχέσεις οπότε το μπλοκ της ενεργειακής μετατροπής με τις θερμοδυναμικές σχέσεις παίρνει τη μορφή του Σχήματος 5.1. Οι διάφορες συναρτήσεις εκτελούν τις κατάλληλες πράξεις ώστε να προκύψουν οι εξισώσεις. Μέσα στο μπλοκ οι θερμοκρασίες είναι σε βαθμούς Kelvin όπως δείχνει και η ένδειξη (K) ενώ οι ανά μονάδα τιμές συμβολίζονται με (pu).

Το πλήρες μοντέλο του αεριοστροβίλου απλού άξονα υλοποιείται με βάση τα όσα αναπτύχθηκαν στην ενότητα 4.2 για τις διατάξεις ελέγχου και τη λειτουργία του μοντέλου και φαίνεται στο Σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.1: Ενεργειακή μετατροπή με τη χρήση του Simulink

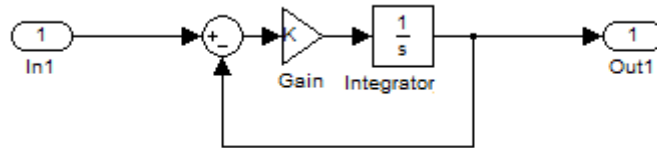


Σχήμα 5.2: Το μοντέλο αεριοστροβίλου στο Simulink

Οι συναρτήσεις μεταφοράς της μορφής:

$$\frac{1}{1 + Ts}$$

υλοποιούνται απλά σε ένα μπλοκ με ένα κέρδος ($1/T$), έναν αθροιστή και έναν ολοκληρωτή (που χρειάζεται την κατάλληλη αρχική συνθήκη, για την οποία θα γίνει λόγος παρακάτω) όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3.



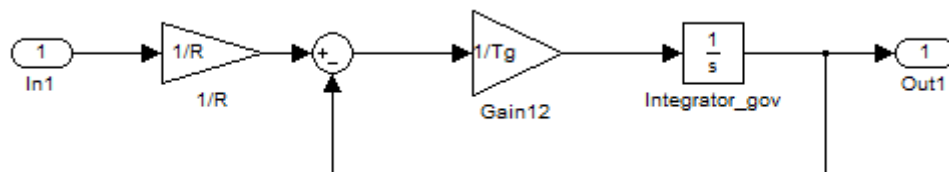
Σχήμα 5.3: Υλοποίηση συνάρτησης μεταφοράς πρώτου βαθμού

Οι συναρτήσεις μεταφοράς αυτού του τύπου είναι αυτή της αλλαγής θέσης της βαλβίδας με χρονική σταθερά T_v , της ροής και διανομής του καυσίμου με χρονική σταθερά T_f , της δυναμικής του αεριοστροβίλου με χρονική σταθερά T_{cd} , των οδηγών πτερυγίων εισόδου του αέρα με χρονική σταθερά T_{igv} και του δευτέρου τμήματος του μορφοτροπέα θερμοκρασίας που αναφέρεται στη δυναμική απόκριση του θερμοστοιχείου (αισθητήρας θερμοκρασίας) με χρονική σταθερά T_4 .

Ο ρυθμιστής στροφών υλοποιείται όπως η συνάρτηση μεταφοράς με ένα επιπλέον κέρδος $1/R$ στην αρχή για να πάρουμε τη συνάρτηση μεταφοράς:

$$\frac{1/R}{1 + T_g s}$$

Η υλοποίηση αυτή φαίνεται στο Σχήμα 5.4.

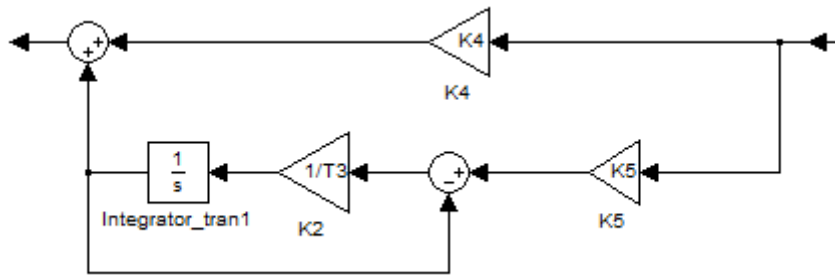


Σχήμα 5.4: Υλοποίηση του ρυθμιστή στροφών

Το πρώτο στάδιο του μορφοτροπέα με συνάρτηση μεταφοράς:

$$K_4 + \frac{K_5}{1 + T_3 s}$$

υλοποιείται με την άθροιση των 2 μερών. Το πρώτο με το σταθερό κέρδος K_4 και το δεύτερο με συνάρτηση μεταφοράς όμοια με του ρυθμιστή στροφών που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 5.4. Η άθροισή τους δίνει τη συνάρτηση μεταφοράς που φαίνεται στο Σχήμα 5.5.

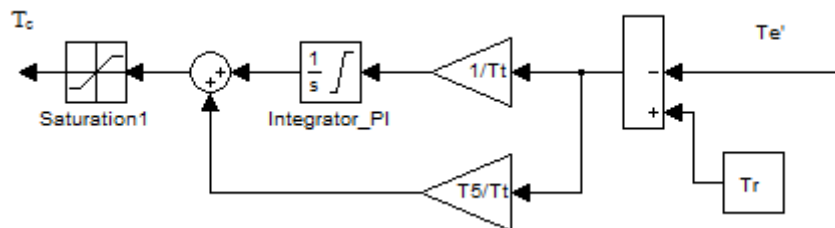


Σχήμα 5.5: Υλοποίηση του πρώτου σταδίου του μορφοτροπέα

Η διάταξη του ελέγχου υπερθέρμανσης φαίνεται στο Σχήμα 5.6. Η συνάρτηση μεταφοράς είναι:

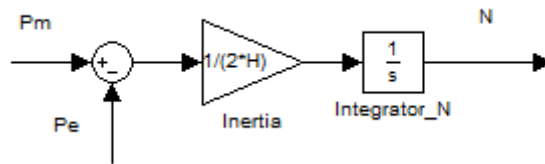
$$\frac{1 + K_5 s}{T_t s} = \frac{1}{T_t s} + \frac{T_5}{T_t}$$

και υλοποιείται με την άθροιση ενός αναλογικού κέρδους και ενός κέρδους με έναν ολοκληρωτή. Η είσοδος είναι η διαφορά της μετρούμενης θερμοκρασίας από τη θερμοκρασία αναφοράς T_r . Ο ολοκληρωτής εμπεριέχει και έναν περιοριστή που περιορίζει το σήμα εξόδου του σε τιμές από T_{c_min} ως T_{c_max} . Ο ολοκληρωτής έχει αρχική τιμή ίση με T_{c_max} και στην κανονική μόνιμο λειτουργία, όπου η διαφορά $T_r - T'_e$ είναι θετική, έχει ως έξοδο T_{c_max} λόγω του περιοριστή. Μόνο όταν η διαφορά γίνει αρνητική και παρατηρηθεί υπερθέρμανση θα δοθεί αρνητικό σήμα που θα μειώσει το T_c ώστε να λειτουργήσει ο βρόχος της υπερθέρμανσης. Στην έξοδο του ελεγκτή υπερθέρμανσης υπάρχει ένας περιοριστής που σε κάθε περίπτωση δεν αφήνει το T_c να έχει τιμή εκτός του εύρους $T_{c_min}-T_{c_max}$.



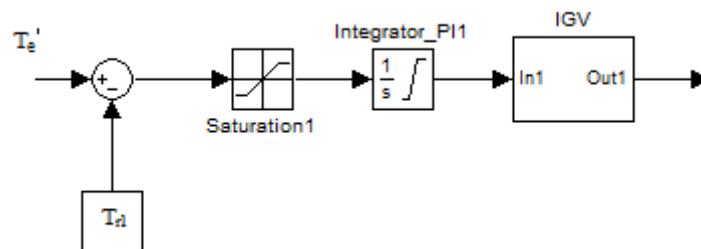
Σχήμα 5.6: Υλοποίηση του ελέγχου υπερθέρμανσης

Στο Σχήμα 5.7 φαίνεται η υλοποίηση της εξίσωσης επιτάχυνσης του της γεννήτριας με τη χρήση του κέρδους $1/2H$ και ενός ολοκληρωτή.



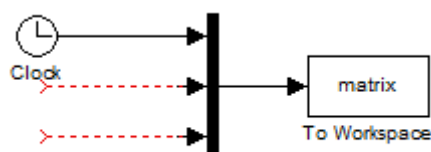
Σχήμα 5.7: Υλοποίηση της εξίσωσης επιτάχυνσης του άξονα της γεννήτριας

Στο Σχήμα 5.8 φαίνεται η υλοποίηση του ελέγχου των πτερυγίων του αέρα όπως περιγράφηκε στο 4^ο κεφάλαιο. Το άνοιγμα ή το κλείσιμο των πτερυγίων εξαρτάται από τη διαφορά των θερμοκρασιών. Αν η θερμοκρασία των καυσαερίων αυξηθεί πάνω από την τιμή αναφοράς τότε αυτά ανοίγουν και αντίστροφα κλείνουν όταν η θερμοκρασία πέσει κάτω από αυτήν. Σε κάθε περίπτωση υπάρχει ένας ρυθμός με τον οποίο επιτρέπεται να ανοιγοκλείνουν τα πτερύγια και για αυτό χρησιμοποιείται ένας περιοριστής (του ρυθμού από -0.01 ως 0.01 ανά μονάδα), όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η διαφορά αυτή ολοκληρώνεται και το αποτέλεσμα αφού περιοριστεί μεταξύ των τιμών $g_{\min}$ και $g_{\max}$ περνά από μια απλή συνάρτηση μεταφοράς πρώτης τάξης όπως αναφέραμε προηγουμένως (δυναμική των πτερυγίων).



Σχήμα 5.8: Υλοποίηση ελέγχου πτερυγίων εισόδου

Τα υπόλοιπα μέρη του μοντέλου υλοποιούνται πολύ απλά με αθροιστές και πολλαπλασιαστές ενώ ο επιλογέας ελάχιστης τιμής υλοποιείται με τη χρήση συνάρτησης min/max του Simulink με την επιλογή min που έχει ως έξοδο τη μικρότερη από τις εισόδους της. Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων και την επεξεργασία τους χρησιμοποιούμε το To Workspace μαζί με ένα ρολόι (Clock), όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.9. Μπορούμε έτσι να πάρουμε δεδομένα για όσα σήματα θέλουμε και να τα εξάγουμε στο Matlab μαζί με το χρόνο ώστε να γίνουν πολύ εύκολα γραφικές παραστάσεις. Τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε έναν πίνακα όπου η πρώτη στήλη είναι ο χρόνος και οι άλλες τα σήματα που θέλουμε εμείς.



Σχήμα 5.9: Αποθήκευση των δεδομένων της προσομοίωσης στον πίνακα matrix

5.1.2 Δεδομένα

Οι παράμετροι για το μοντέλο παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες [6]. Οι τιμές των εσωτερικών βαθμών απόδοσης έχουν τροποποιηθεί με βάση όσα αναφέρθηκαν στο 4^ο κεφάλαιο. Όλα τα μεγέθη (συμπεριλαμβανομένων και των θερμοκρασιών) είναι σε ανηγμένες τιμές. Μοναδική εξαίρεση είναι στο εσωτερικό του μπλοκ αλγεβρικών εξισώσεων (εξισώσεις ενεργειακής μετατροπής), όπου οι τιμές είναι σε βαθμούς Kelvin. Ωστόσο η έξοδος του μπλοκ αυτού είναι σε ανά μονάδα τιμές. Για τον προσδιορισμό των ονομαστικών θερμοκρασιών αρκεί μια, έστω η T_{f0} και οι άλλες προσδιορίζονται από τις ενεργειακές εξισώσεις. Οι τιμές των P_{e1} , P_{e2} , T_{r1} και W_{min} που δίνονται υπολογίζονται με βάση την ανάλυση της επόμενης παραγράφου.

Πίνακας 5.1: Παράμετροι αεριοστροβίλου (σε ανά μονάδα τιμές εκτός αν αναφέρεται)

Συμβολισμός	Παράμετρος	Τιμή
T_i	Θερμοκρασία εισόδου του συμπιεστή (ονομαστική) (K)	288
T_{f0}	Θερμοκρασία εισόδου στροβίλου (ονομαστική) (K)	1350
T_r	Θερμοκρασία αναφοράς ελέγχου υπερθέρμανσης	1.01
P_{e1}	Ισχύς έναρξης δεύτερης περιοχής λειτουργίας	0.85
P_{e2}	Ισχύς έναρξης τρίτης περιοχής λειτουργίας	0.55
P_{c0}	Ονομαστικός λόγος συμπίεσης	11.5
γ	Λόγος ειδικών θερμοχωρητικοτήτων (c_p/c_v)	1.4
η_c	Απόδοση συμπιεστή	0.82
η_t	Εσωτερική απόδοση στροβίλου	0.86
H	Ανηγμένη χρονική σταθερά αδράνειας (s)	6

Πίνακας 5.2: Παράμετροι ελέγχου (σε ανά μονάδα τιμές εκτός αν αναφέρεται)

Συμβολισμός	Παράμετρος	Τιμή
R	Στατισμός	0.06
T _g	Χρονική σταθερά ρυθμιστή στροφών (s)	0.1
K ₄	Κέρδος ασπίδας θερμότητας (ακαριαία)	0.8
K ₅	Κέρδος ασπίδας θερμότητας	0.2
T ₃	Χρονική σταθερά ασπίδας θερμότητας (s)	15
T ₄	Χρονική σταθερά αισθητήρα θερμοκρασίας (s)	2.5
T ₅	Χρονική σταθερά του τμήματος του ελέγχου θερμοκρασίας που παρεμβαίνει στην ροή του καυσίμου (s)	3.3
T _t	Ρυθμός ολοκλήρωσης του τμήματος του ελέγχου θερμοκρασίας που παρεμβαίνει στην ροή του καυσίμου (s)	0.4699
T _{c_max}	Μέγιστη τιμή της εξόδου T _c του τμήματος ελέγχου θερμοκρασίας	1.1
T _{c_min}	Ελάχιστη τιμή της εξόδου T _c του τμήματος ελέγχου θερμοκρασίας	0
F _{d_max}	Άνω όριο εισόδου στον έλεγχο καυσίμου	1.1
F _{d_min}	Κάτω όριο εισόδου στον έλεγχο καυσίμου	0
K ₃	Εύρος ανοίγματος βαλβίδας καυσίμου	0.77
K ₆	Ελάχιστο άνοιγμα βαλβίδας καυσίμου	0.23
T _v	Χρονική σταθερά ρυθμιστή θέσης της βαλβίδας καυσίμου (s)	0.05
T _f	Χρονική σταθερά συστήματος καυσίμου (s)	0.4
W _{min}	Ελάχιστη τιμή ανοίγματος βαλβίδας αέρα	0.7333
g _{max}	Μέγιστο άνοιγμα πτερυγίων εισόδου	1
g _{min}	Ελάχιστο άνοιγμα πτερυγίων εισόδου	0.7333
T _{igv}	Χρονική σταθερά πτερυγίων (s)	1
T _{cd}	Χρονική σταθερά αεριοστροβίλου (s)	0.2

5.1.3 Αρχικοποίηση μοντέλου

Η αρχικοποίηση του μοντέλου γίνεται ώστε να λειτουργεί σε μόνιμο κατάσταση, δηλαδή σε ισορροπία για δοσμένο αρχικό φορτίο. Γνωρίζουμε το P_e (που στη μόνιμο κατάσταση ισούται με την ισχύ E_m) και βρίσκουμε από τις εξισώσεις τις τιμές των T_d , T_f , T_e , W_f , W , g . Σε κάθε μόνιμο κατάσταση η ανά μονάδα τιμή της συχνότητας είναι ίση με τη μονάδα οπότε λόγω της σχέσης (5.7) η εύρεση της ανά μονάδας τιμής της ροής μάζας του αέρα (W) προσδιορίζει το άνοιγμα των πτερυγίων αέρα (g). Άρα οι μεταβλητές που πρέπει να υπολογισθούν είναι 5: T_d , T_f , T_e , W_f και W . Αυτές προσδιορίζονται από τις εξισώσεις:

$$T_f = T_d + (T_{f0} - T_{d0}) \frac{W_f}{W} \quad (5.4)$$

$$E_m = WK[T_f - T_e - T_d + T_i] \quad (5.5)$$

$$T_d = T_i \left[1 + \frac{1}{n_c} \left((P_{c0} W)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \right] \quad (5.8)$$

$$T_e = T_f \left[1 - \eta_t \left(1 - \frac{1}{(P_{c0} W)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \right) \right] \quad (5.9)$$

Οι σχέσεις (5.8)-(5.9) προέκυψαν από τις σχέσεις (5.1)-(5.3). Όπως αναφέραμε στην ενότητα 4.1, για να λύσουμε το σύστημα των εξισώσεων παίρνουμε τρεις περιοχές λειτουργίας διότι χρειαζόμαστε μια ακόμα σχέση.

Στο ονομαστικό φορτίο γνωρίζουμε ότι όλες οι ανά μονάδα τιμές είναι ίσες με τη μονάδα οπότε μπορούμε να υπολογίσουμε τις ονομαστικές θερμοκρασίες αν γνωρίζουμε μια, έστω την T_{f0} . Για τα δεδομένα που αναφέραμε βρίσκουμε ότι :

$$T_{d0} = 642.4803 \text{ K}$$

$$T_{e0} = 766.8177 \text{ K}$$

Λύνοντας τις εξισώσεις για $W=1$ βρίσκουμε ότι για $P_{e1}=0.85$ η ανά μονάδα θερμοκρασία των καυσαερίων T_e ισούται με 0.939. Όπως έχουμε αναφέρει, επιθυμούμε η θερμοκρασία των καυσαερίων να κρατιέται σχετικά υψηλή ώστε η απόδοση του αεριοστροβίλου να είναι σχετικά υψηλή. Η τιμή 0.939 αμ που προκύπτει για φορτίο 0.85 αμ είναι ικανοποιητική οπότε θέτουμε $T_{r1}=0.939$. Για χαμηλότερο φορτίο η ροή του αέρα μειώνεται ώστε να κρατηθεί η θερμοκρασία σταθερή. Έτσι η πρώτη περιοχή λειτουργίας ορίζεται για φορτίο 0.85-1 αμ με $W=1$ και η δεύτερη για φορτίο μικρότερο από 0.85 αμ όπου $T_e=T_{r1}$. Η ροή μάζας αέρα πρέπει για λόγους ευστάθειας του συμπιεστή να μην είναι μικρότερη από μια τιμή. Η τιμή αυτή είναι περίπου 0.73 ανά μονάδα [6]. Από τη λύση των εξισώσεων για $T_e=T_{r1}$ η τιμή αυτή προκύπτει για $P_{e2}=0.55$ όπου $W=0.7333$. Αυτή είναι η τιμή από την οποία η ροή της μάζας του αέρα δεν γίνεται να είναι μικρότερη οπότε $W_{min}=0.7333$. Στην τρίτη περιοχή λειτουργίας για φορτίο μικρότερο από 0.55 αμ ισχύει $W=W_{min}=0.7333$.

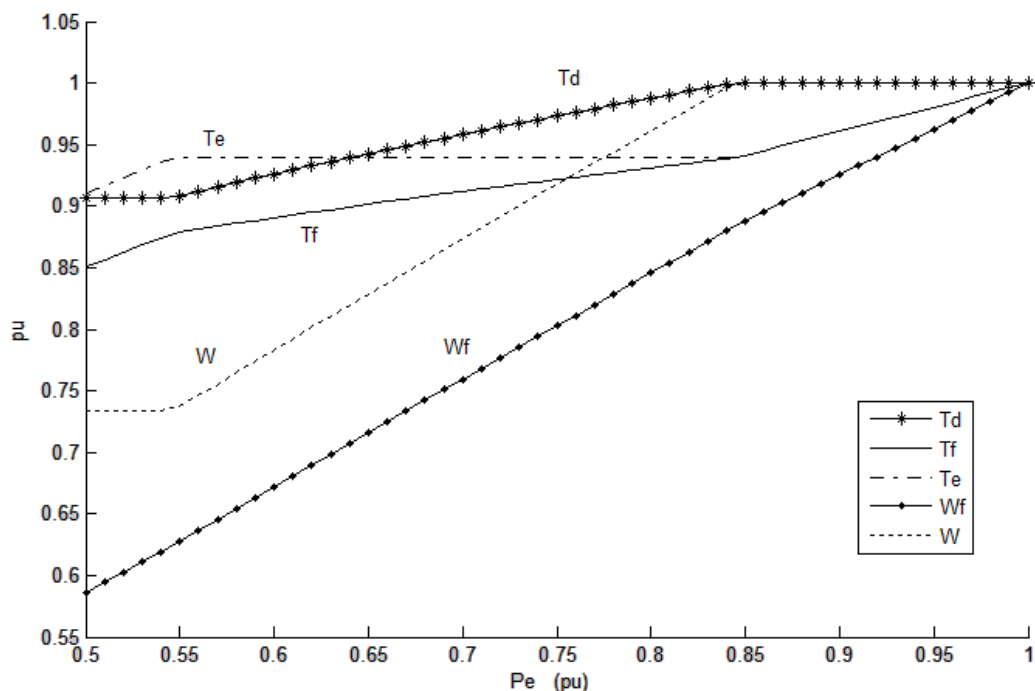
Μπορούμε με τη δημιουργία μερικών m.file στο Matlab όλες οι τιμές να υπολογίζονται αυτόματα. Αρχικά δημιουργούμε ένα αρχείο beginch.m όπου βάζουμε όλα τα δεδομένα τα

οποία θα φορτώνονται στο μοντέλο. Μετά δημιουργούμε ένα αρχείο initch.m που επιστρέφει τις τιμές των μεταβλητών ανάλογα με το δοσμένο P_e . Το αρχείο initch.m καλεί τρία αρχεία (τα funch, funch1, funch2) που λύνουν το πρόβλημα ανάλογα με την περιοχή λειτουργίας που βρισκόμαστε, όπως περιγράψαμε προηγουμένως. Τα 5 αρχεία παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.

Έτσι όταν εκτελέσουμε το αρχείο beginch.m αυτό επιστρέφει αυτόματα τις ζητούμενες τιμές που είναι απαραίτητες για την αρχικοποίηση. Στο Σχήμα 5.10 φαίνεται ένα διάγραμμα που δείχνει τις διάφορες τιμές των μεταβλητών για φορτίο από 0.5 ως 1 ανά μονάδα. Να τονίσουμε πάλι ότι η τιμή του ανοίγματος των πτερυγίων του αέρα ταυτίζεται με τη ροή μάζας αέρα.

Για να ολοκληρωθεί η αρχικοποίηση πρέπει η είσοδος σε όλους τους ολοκληρωτές να είναι ίση με μηδέν για να βρισκόμαστε σε κατάσταση ισορροπίας. Με αυτή τη λογική συμπληρώνονται οι αρχικές τιμές των ολοκληρωτών. Το αρχείο beginch.m μας δίνει τις τιμές των μεταβλητών στη μόνιμο κατάσταση ανάλογα με το φορτίο. Η τιμή του ολοκληρωτή που δίνει τη συχνότητα πρέπει να έχει τιμή ίση με τη μονάδα αφού σε όλες τις περιπτώσεις η τιμή της στην αρχικοποίηση είναι ίση με τη μονάδα. Η αρχική τιμή του ολοκληρωτή που δίνει τη μηχανική ισχύ και εκφράζει τη δυναμική του αεριοστροβίλου είναι ίση με P_e ώστε η τιμή στην είσοδο του ολοκληρωτή που δίνει τη συχνότητα να είναι ίση με μηδέν. Αντίστοιχα συμπληρώνονται και οι τιμές των άλλων ολοκληρωτών.

Στους ολοκληρωτές του συστήματος ελέγχου καυσίμου η αρχική τιμή των ολοκληρωτών είναι ίση με W_f ανά μονάδα και η τιμή προκύπτει από το αρχείο beginch.m. Η αρχική τιμή του ολοκληρωτή του ρυθμιστή στροφών είναι ίση με $(W_f - 0.23)/0.77$ ενώ προσθέτουμε μια σταθερά με τιμή $1 + R \cdot (W_f - 0.23)/0.77$ που αφαιρείται από τη συχνότητα N στην είσοδο του ρυθμιστή. Αυτό γίνεται ώστε η διαφορά τους στη μόνιμο κατάσταση να είναι ίση με $R \cdot (W_f - 0.23)/0.77$ και η έξοδος του ολοκληρωτή ίση με $(W_f - 0.23)/0.77$ όπως θέσαμε προηγουμένως σαν αρχική τιμή. Με αυτή τη λογική συμπληρώνονται οι αρχικές τιμές όλων των ολοκληρωτών.



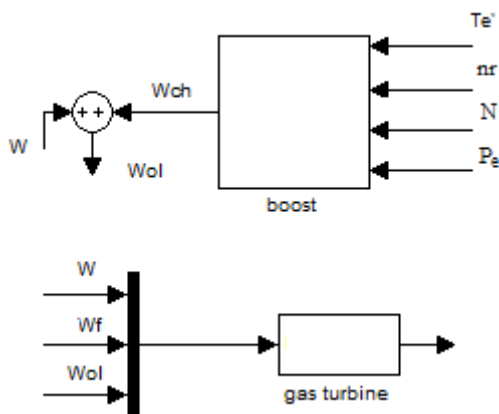
Σχήμα 5.10: Διάγραμμα μονίμου καταστάσεως για φορτίο από 0.5 ως 1 αμ (πλήρες φορτίο) για τις μεταβλητές T_d , T_f , T_e , W_f , W

5.2 Υλοποίηση του αεροφυλακίου στο Simulink

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η υλοποίηση του αεροφυλακίου σε Simulink. Στην πρώτη παράγραφο περιγράφουμε τον τρόπο με τον οποίο το αεροφυλάκιο λειτουργεί και δείχνουμε πως υλοποιείται αυτό και η διάταξη ελέγχου του στο Simulink. Στη δεύτερη παράγραφο επιλέγουμε τις παραμέτρους που θα χρησιμοποιήσουμε στην προσομοίωση.

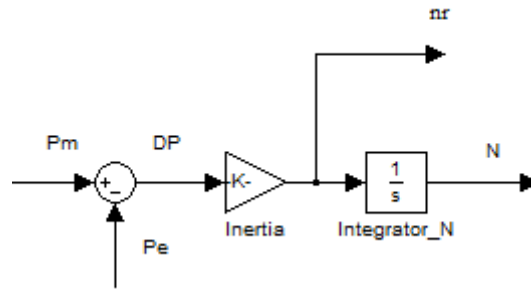
5.2.1 Περιγραφή και παρουσίαση του αεροφυλακίου στο Simulink

Όπως περιγράψαμε στο 4^ο κεφάλαιο το αεροφυλάκιο όταν ενεργοποιείται δίνει άμεσα επιπλέον ροή συμπιεσμένου αέρα. Στο Σχήμα 5.11 φαίνονται οι τροποποιήσεις του μοντέλου αεριοστροβίλου απλού άξονα ώστε να συμπεριληφθεί το αεροφυλάκιο.



Σχήμα 5.11: Τροποποιήσεις μοντέλου ώστε να συμπεριληφθεί το αεροφυλάκιο

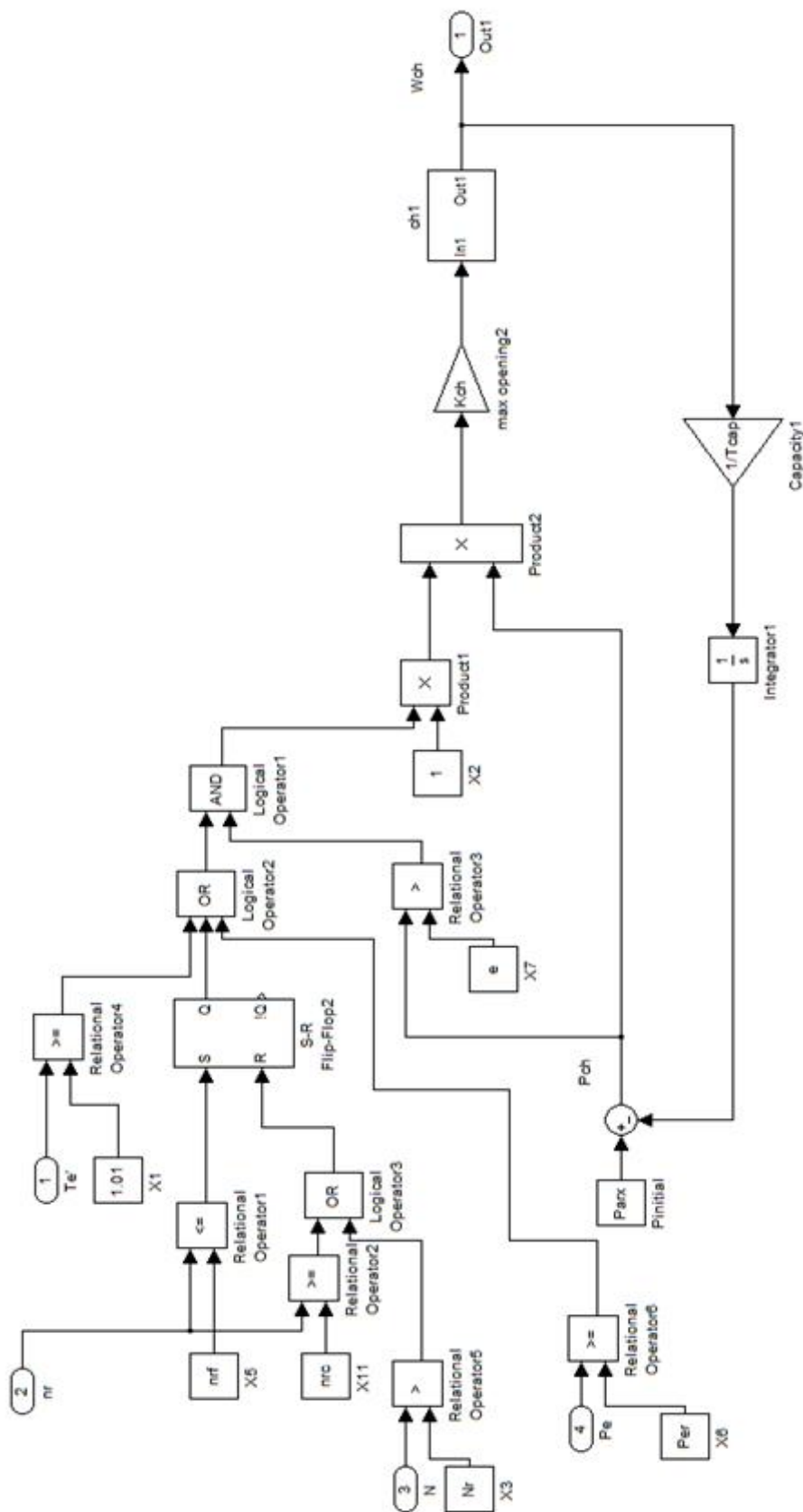
Η πρώτη διαφορά είναι η έξοδος του αεροφυλακίου (W_{ch}) που προστίθεται στη ροή μάζας αέρα (W) και προκύπτει η ολική ροή μάζας αέρα (W_{ol}). Τα W και W_{ol} μαζί με τη ροή του καυσίμου (W_f) είναι είσοδοι του μπλοκ του αεριοστροβίλου. Οι θερμοδυναμικές εξισώσεις τροποποιούνται σύμφωνα με τα αναφερθέντα στην παράγραφο 4.3.2. Η δεύτερη διαφορά είναι το μπλοκ του αεροφυλακίου (boost) που έχει ως έξοδο τη ροή μάζας αέρα από αυτό (W_{ch}) και ως εισόδους τη μετρούμενη θερμοκρασία καυσαερίων (T_e'), τη συχνότητα (N), το ηλεκτρικό φορτίο (P_e) και το ρυθμό μεταβολής της συχνότητας (nr). Οι εξισώσεις στο τμήμα της ενεργειακής μετατροπής αλλάζουν σύμφωνα με όσα αναφέραμε στην ενότητα 4.3. Στο Simulink ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας παίρνεται ως το σήμα πριν τον ολοκληρωτή που δίνει την ταχύτητα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.12. Το αεροφυλάκιο όπως υλοποιείται στο Simulink φαίνεται στο Σχήμα 5.13.



Σχήμα 5.12: Ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας από το μοντέλο

Όπως έχουμε αναφέρει, δεχόμαστε ότι η ροή αέρα του αεροφυλακίου είναι ανάλογη της υπερπίεσης σε αυτό. Συμβολίζουμε με P_{arx} την ανά μονάδα τιμή πάνω από την ονομαστική, P_{ch} την υπερπίεση (δηλαδή την ανά μονάδα πίεση πάνω από την ονομαστική) με την οποία πολλαπλασιάζεται η ροή και e το περιθώριο πτώσης της υπερπίεσης. Η υπερπίεση είναι ανάλογη της μάζας στο αεροφυλάκιο αφού ο όγκος του είναι σταθερός. Η ροή μάζας αέρα του αεροφυλακίου (W_{ch}) αφού διαιρεθεί με τη χωρητικότητα T_{cap} του αεροφυλακίου και ολοκληρωθεί δίνει τη μάζα του αέρα που εξέρχεται από αυτό. Η διαφορά της από την P_{arx} δίνει την υπερπίεση στο αεροφυλάκιο (P_{ch}). Όπως έχουμε αναφέρει στο προηγούμενο κεφάλαιο η υπερπίεση πρέπει πάντα να είναι μεγαλύτερη από την τιμή e . Έτσι χρησιμοποιούμε έναν ελεγκτή που όταν $P_{ch} > e$ δίνει λογικό ένα αλλιώς δίνει λογικό μηδέν. Το σήμα που προκύπτει οδηγείται στην πύλη AND μαζί με το σήμα της διάταξης ελέγχου. Να τονίσουμε ότι η ροή του αέρα (W_{ch}) είναι ανάλογη της διαφοράς πίεσης του αέρα στο αεροφυλάκιο και του αέρα στον αγωγό όπου εγχέεται ο αέρας από το αεροφυλάκιο. Θεωρούμε ότι η πίεση του αέρα στην έξοδο του αεροφυλακίου ρυθμίζεται έτσι ώστε να ταυτίζεται με την πίεση της κύριας μάζας του αέρα στον αγωγό πριν το θάλαμο καύσης. Με αυτή την παραδοχή θεωρούμε ότι η ροή του αέρα (W_{ch}) είναι ανάλογη της υπερπίεσης P_{ch} .

Το σήμα μετά πολλαπλασιάζεται με τη μονάδα ώστε στο Simulink να μετατραπεί το λογικό ένα σε φυσικό αριθμό. Η έξοδος πολλαπλασιάζεται με την πίεση του αεροφυλακίου, το K_{ch} που αντιπροσωπεύει το άνοιγμα της βαλβίδας και μια απλή χρονική καθυστέρηση πρώτου βαθμού με σταθερά χρόνου T_{ch} , όπως περιγράψαμε στο 4^ο κεφάλαιο. Το αεροφυλάκιο έχει ως έξοδο τη ροή της μάζας του αέρα W_{ch} όπως προαναφέραμε. Αυτό που μένει να καθορίσουμε είναι το πότε θα τίθεται σε λειτουργία το αεροφυλάκιο.



Σχήμα 5.13: Η υλοποίηση του μπλοκ του αεροφυλακίου στο Simulink

Το αεροφυλάκιο ενεργοποιείται όταν υπάρχει μια απότομη μείωση της συχνότητας, όταν δηλαδή ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας (nr) υπερβεί μια κρίσιμη αρνητική τιμή, έστω nr_f , αν παρατηρηθεί υπερθέρμανση και η τιμή της μετρούμενης θερμοκρασίας των καυσαερίων ξεπεράσει μια τιμή T_{er} ή αν το ηλεκτρικό φορτίο ξεπεράσει μια τιμή P_{er} . Ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας ελέγχεται με την τιμή nr_f και αν είναι μικρότερος (δηλαδή μεγαλύτερος κατά απόλυτη τιμή) τότε δίνει λογικό ένα σε ένα flip flop S-R. Το S-R flip flop όταν δέχεται λογικό ένα στην είσοδο S τότε έχει ως έξοδο ένα μέχρι να δεχτεί στην είσοδο R λογικό ένα οπότε η έξοδος του μόνο τότε γίνεται μηδέν.

Όταν λοιπόν ο ρυθμός ξεπεράσει την τιμή nr_f το flip flop δίνει έξοδο ένα και το αεροφυλάκιο ενεργοποιείται. Η έξοδος του flip flop μηδενίζεται όταν ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας ξεπεράσει μια θετική τιμή nr_c που σημαίνει ότι το αίτιο της διαταραχής εξαλειφθηκε διότι τότε παρουσιάζεται μια έντονη αύξηση της συχνότητας. Επίσης, η έξοδος του flip flop μηδενίζεται και όταν η συχνότητα γίνει μεγαλύτερη από την ονομαστική (τίθεται μια τιμή N_f ίση με 1.001) αφού τότε δεν υπάρχει ανάγκη χρήσης του αεροφυλακίου.

Στην έξοδο του flip flop υπάρχει ένα λογικό OR όπου προστίθεται ένα σήμα ελέγχου της θερμοκρασίας και του φορτίου. Αν η τιμή της μετρούμενης θερμοκρασίας καυσαερίων γίνει μεγαλύτερη από μια τιμή T_{er} τότε δίνει λογικό ένα αλλιώς δίνει λογικό μηδέν. Άρα το αεροφυλάκιο ενεργοποιείται και σε περίπτωση υπερθέρμανσης και για όσο αυτή διαρκεί και όταν το φορτίο ξεπεράσει την τιμή P_{er} . Τέλος με το λογικό AND ελέγχεται η πίεση του αεροφυλακίου όπως προαναφέραμε.

5.2.2 Επιλογή παραμέτρων και σχολιασμός

Στην παράγραφο αυτή θα επιλέξουμε τις παραμέτρους του μοντέλου του αεροφυλακίου. Αυτές είναι οι τιμές nr_f και nr_c για τους ρυθμούς μεταβολής της συχνότητας και οι τιμές K_{ch} και T_{ch} για το μέγιστο άνοιγμα και το χρόνο απόκρισης του αεροφυλακίου. Επίσης η αρχική υπερπίεση P_{arx} και το περιθώριο e , η χωρητικότητα του αεροφυλακίου T_{cap} , η τιμή T_{er} ως θερμοκρασία αναφοράς για την υπερθέρμανση και η τιμή αναφοράς του φορτίου P_{er} .

Η τιμή της αρχικής πίεσης καθορίζεται στο 0.05 πάνω από την ονομαστική διότι υπάρχει ανάγκη υπερπίεσης όπως αναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το περιθώριο e ισούται με 0.02. Ο ρυθμός nr_f ορίζεται ίσος με -0.004 και ο ρυθμός nr_c με 0.003 (ανά μονάδα τιμές). Όσο μικρότερος είναι ο ρυθμός nr_f σε απόλυτη τιμή τόσο πιο εύκολα τίθεται σε λειτουργία το αεροφυλάκιο. Για αυτό επιλέγεται μια μέση τιμή όχι αρκετά μικρή (σε απόλυτη τιμή) ώστε να μην τίθεται σε λειτουργία πολύ εύκολα σε μια μικρή διαταραχή και να αποφεύγονται πιθανές ταλαντωτικές συμπεριφορές ούτε πολύ μεγάλη ώστε να τίθεται σε λειτουργία μόνο σε πολύ ακραίες συνθήκες.

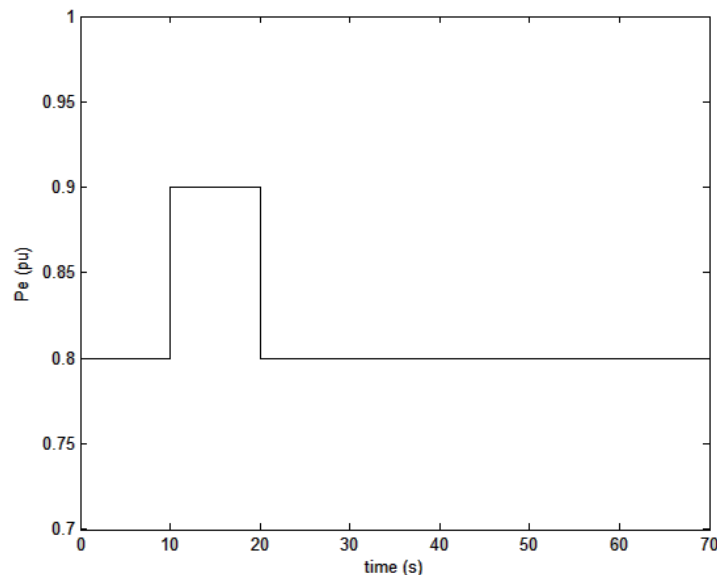
Η απόκριση του αεροφυλακίου είναι ταχεία οπότε θέτουμε μια σταθερά χρόνου $T_{ch}=0.1s$. Η χωρητικότητα παίζει ρόλο στο πόσο χρόνο θα μπορεί να είναι σε λειτουργία το αεροφυλάκιο. Όσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα τόσο μεγαλύτερο χρονικό

διάστημα μπορεί να συνεισφέρει το αεροφυλάκιο. Θέτουμε μια τιμή $T_{cap}=60s$. Τέλος μένει να καθορίσουμε την τιμή του μέγιστου ανοίγματος K_{ch} .

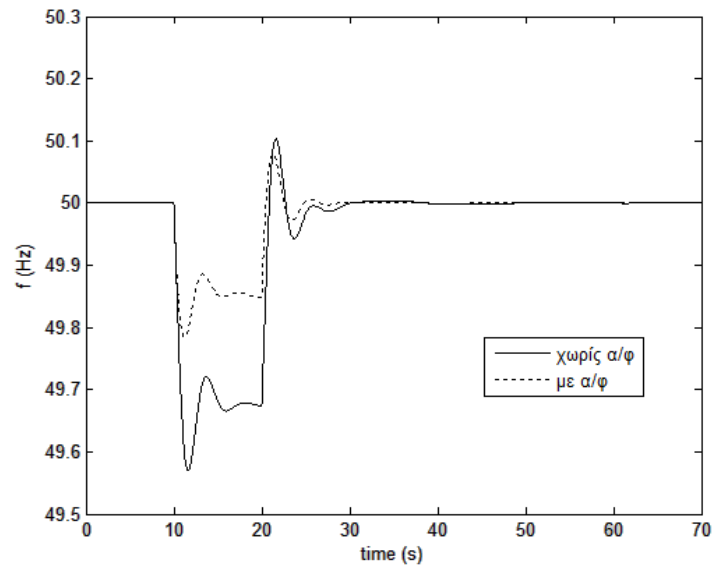
Το μέγιστο άνοιγμα αν είναι πολύ μικρό τότε το αεροφυλάκιο θα έχει μικρή συνεισφορά και δεν θα μπορεί να μειώσει σημαντικά τις μεταβατικές υποσυχνότητες, ούτε να προσφέρει επαρκή ισχύ σε μια μεταβατική αύξηση της ισχύος πάνω από το ονομαστικό φορτίο. Από την άλλη, δεν μπορεί να είναι πολύ μεγάλο για λόγους ευστάθειας της φλόγας (διότι προσφέρεται απότομα μια ποσότητα αέρα προς καύση στο θάλαμο καύσης), για να μην εξαντλείται γρήγορα ο αέρας του αεροφυλακίου και διότι δημιουργούνται ταλαντώσεις. Οπότε πρέπει να επιλέξουμε μια συμβιβαστική τιμή. Επιλέγουμε μια τιμή $K_{ch}=0.6$ για τους λόγους αυτούς. Αυτό σημαίνει ότι η μέγιστη τιμή της ροής W_{ch} θα είναι 0.03 αμ/s αφού το άνοιγμα πολλαπλασιάζεται με την υπερπίεση που έχει μέγιστη τιμή 0.05 . Καθώς το αεροφυλάκιο αδειάζει και η πίεση μειώνεται το W_{ch} θα μειώνεται, ανάλογα με την πτώση της πίεσης.

5.3 Προσομοίωση με χρήση αεροφυλακίου και σχολιασμός

Στην ενότητα αυτή θα προσομοιώσουμε στο Simulink τη λειτουργία του αεροφυλακίου με βάση όσα αναφέραμε στις προηγούμενες ενότητες. Αρχικά θα εφαρμόσουμε μια μεταβατική διαταραχή (παλμό) στο ηλεκτρικό φορτίο όταν ο αεριοστρόβιλος λειτουργεί υπό φορτίο 0.8 ανά μονάδα. Η διαταραχή φαίνεται στο Σχήμα 5.14, όπου η ισχύς στα $10s$ από 0.8 αμ γίνεται 0.9 αμ βηματικά για $10s$ και επιστρέφει στην αρχική τιμή. Στο Σχήμα 5.15 φαίνεται η απόκριση της συχνότητας με και χωρίς τη χρήση αεροφυλακίου.

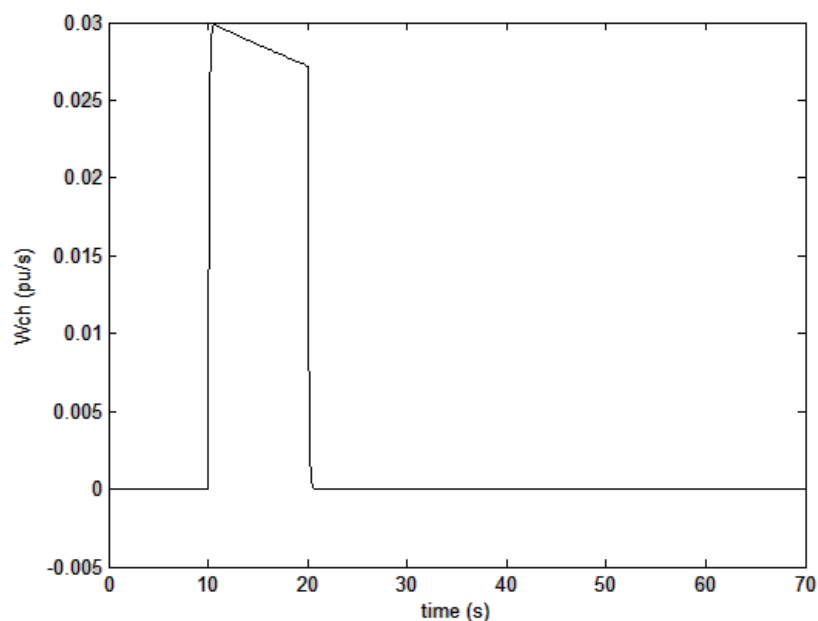


Σχήμα 5.14: Διαταραχή του ηλεκτρικού φορτίου

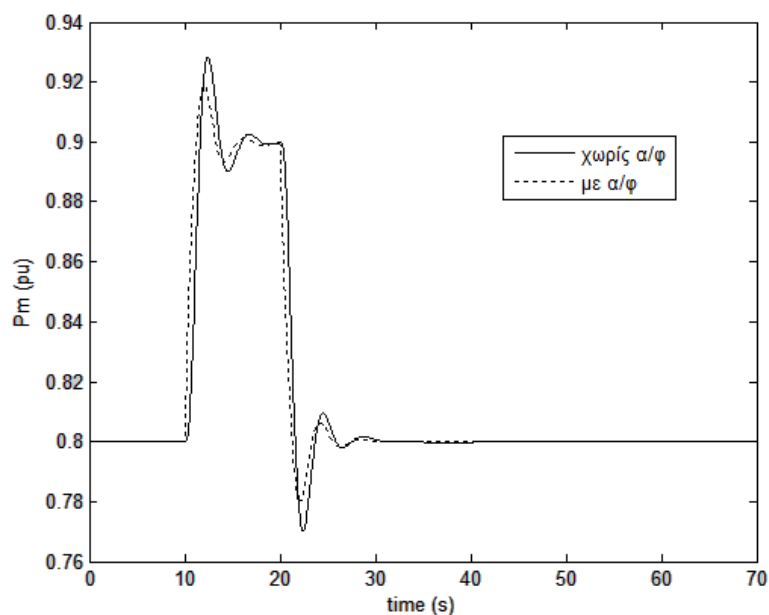


Σχήμα 5.15: Απόκριση συχνότητας με χρήση αεροφυλακίου και χωρίς

Επειδή το φορτίο στη μόνιμο κατάσταση είναι 0.8 αμ κατά τη διαταραχή δεν παρουσιάζεται υπερθέρμανση οπότε ο ανάλογος βρόχος είναι ανενεργός. Όπως βλέπουμε στο Σχήμα 5.15 η χρήση του αεροφυλακίου βελτιώνει αισθητά την απόκριση της συχνότητας. Όταν το ηλεκτρικό φορτίο αυξάνεται η συχνότητα αρχίζει να μειώνεται μέχρι να δράσει ο ρυθμιστής στροφών και φτάνει περίπου την τιμή των 49.58Hz ενώ με τη χρήση του αεροφυλακίου προσφέρεται άμεσα ροή αέρα (λόγω του ρυθμού πτώσης συχνότητας) και αυξάνεται η μηχανική ισχύς με αποτέλεσμα η υποσυχνότητα να περιορίζεται περίπου στα 49.79Hz. Η βελτίωση αυτή οφείλεται στην παροχή αέρα από το αεροφυλάκιο όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.16. Η διαφορά στη μηχανική ισχύ λόγω της εισροής του επιπλέον αέρα φαίνεται στο Σχήμα 5.17 και είναι αυτή που προκαλεί τη βελτίωση της απόκρισης της συχνότητας.



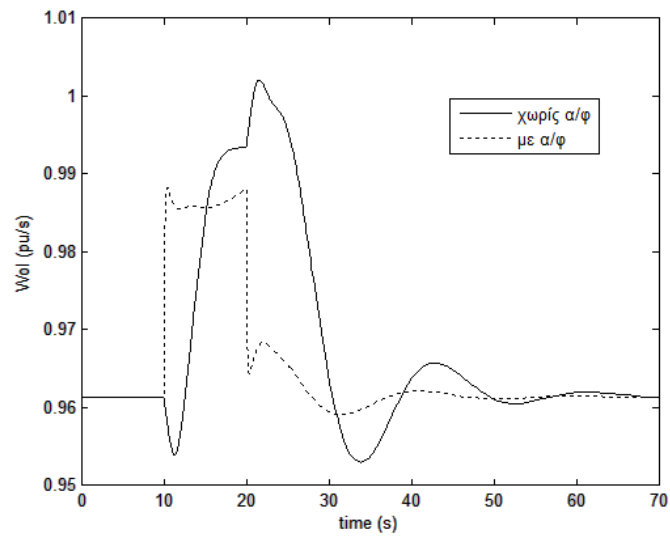
Σχήμα 5.16: Ροή μάζας αέρα από το αεροφυλάκιο



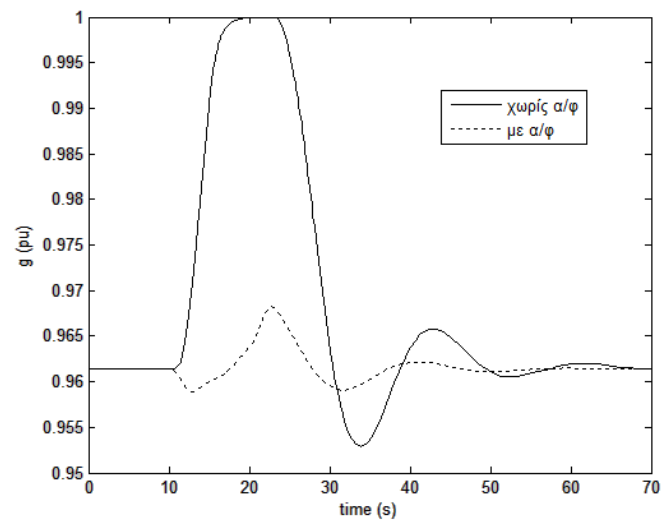
Σχήμα 5.17: Μηχανική ισχύς με χρήση και χωρίς αεροφυλακίου

Στο Σχήμα 5.17 φαίνεται ότι η μηχανική ισχύς με τη χρήση αεροφυλακίου αυξάνεται ταχύτερα λόγω του ότι εισρέει η επιπλέον ροή αέρα από το αεροφυλάκιο. Άρα η απόκριση είναι ταχύτερη και τελικά η μηχανική ισχύς δεν χρειάζεται να αυξηθεί τόσο πολύ. Τελικά και η απόκριση του στροβίλου δυναμικά είναι καλύτερη και καταπονείται λιγότερο. Δηλαδή δεν χρειάζεται να παραχθεί περισσότερη ισχύς μεταβατικά απλά να παραχθεί ταχύτερα ώστε να περιορισθούν οι διαταραχές στη συχνότητα. Για του λόγου το αληθές, στο Σχήμα 5.18 που παρουσιάζεται η ολική ροή μάζας αέρα, χωρίς το αεροφυλάκιο η ροή του αέρα μειώνεται αρχικά και μετά αυξάνεται λόγω ανοίγματος των πτερυγίων (Σχήμα 5.19) παρά τη μείωση της συχνότητας. Υπενθυμίζουμε ότι η ροή του αέρα είναι ανάλογη του ανοίγματος των πτερυγίων και της συχνότητας.

Αντίθετα, με τη χρήση του αεροφυλακίου η ροή του αέρα αυξάνεται άμεσα όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.18 και αυτό οδηγεί σε αύξηση της μηχανικής ισχύος και αποφυγή της μεγάλης υποσυχνότητας. Επειδή μειώνεται η θερμοκρασία των καυσαερίων τα πτερύγια αρχικά κλείνουν (Σχήμα 5.19) ενώ γενικά το άνοιγμά τους μεταβάλλονται πολύ λίγο αφού δεν υπάρχει απαίτηση σημαντικής μείωσης της θερμοκρασίας.

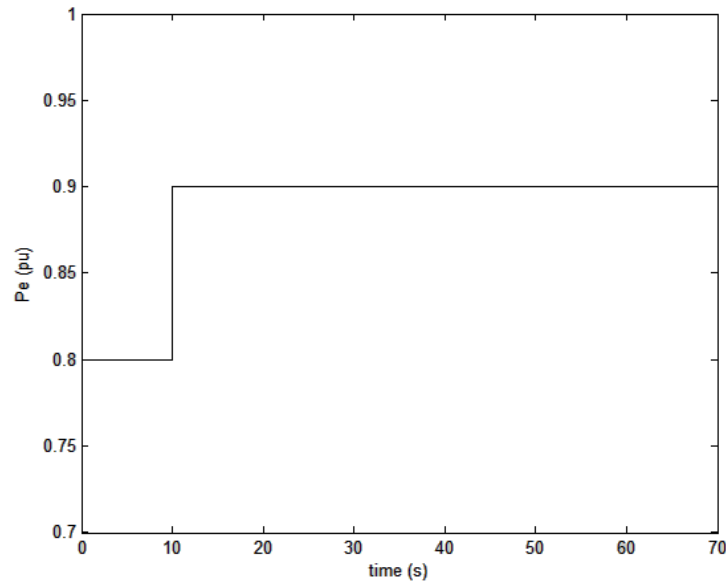


Σχήμα 5.18: Ολική ροή μάζας αέρα με χρήση και χωρίς αεροφυλακίου



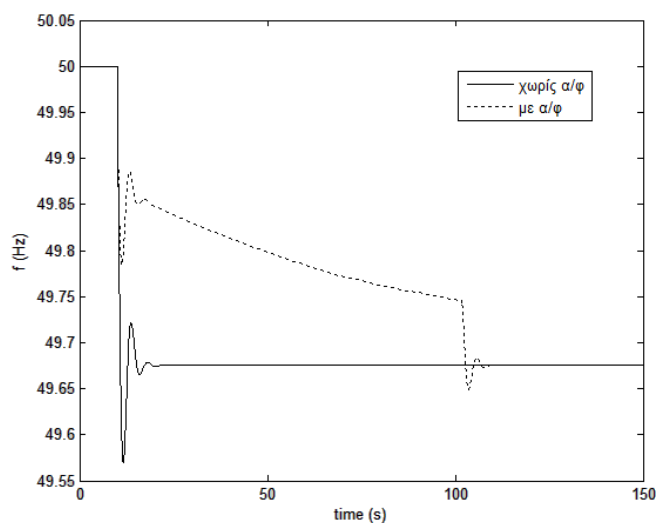
Σχήμα 5.19: Απόκριση των περυγίων με χρήση και χωρίς αεροφυλακίου

Τώρα θα δούμε τι γίνεται σε περίπτωση μόνιμης διαταραχής. Αν δηλαδή η μεταβολή του φορτίου είναι όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.20.

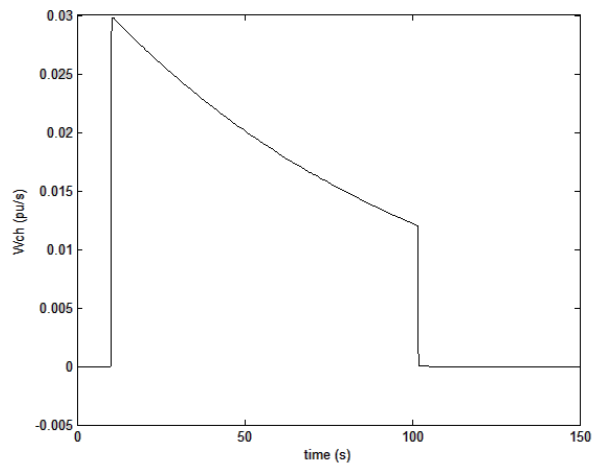


Σχήμα 5.20: Βηματική αύξηση του φορτίου από 0.8 σε 0.9 αμ στα 10s

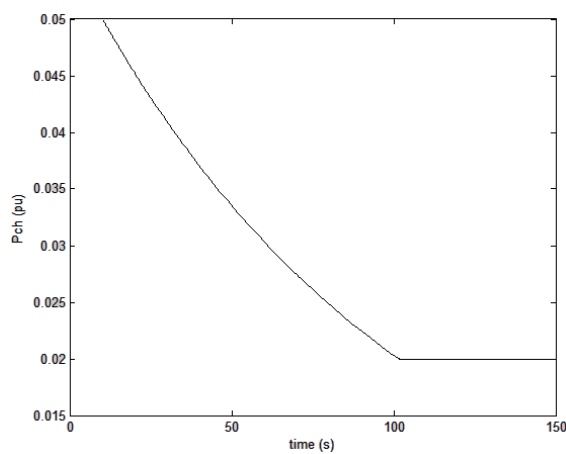
Η μεταβολή της συχνότητας φαίνεται στο Σχήμα 5.21. Αρχικά η χρήση του αεροφυλακίου περιορίζει την πτώση της συχνότητας όπως και στην προηγούμενη περίπτωση. Στα 100s περίπου το αεροφυλάκιο εξαντλείται και παύει η συνεισφορά του οπότε η συχνότητα πέφτει πάλι, στα επίπεδα που θα έπεφτε χωρίς το αεροφυλάκιο, δηλαδή στο μόνιμο σφάλμα συχνότητας μετά την πρωτεύουσα ρύθμιση. Προφανώς και το αεροφυλάκιο επειδή έχει περιορισμένη χωρητικότητα δεν μπορεί να κρατήσει μόνιμες μεταβολές αλλά μόνο προσωρινές. Παρ' όλα αυτά δίνει τη δυνατότητα στο σύστημα να ανταποκριθεί (εφόσον υπάρχουν άλλες ρυθμίζουσες μονάδες) κρατώντας τη συχνότητα σε πιο ανεκτά επίπεδα για χρόνο ανάλογο της χωρητικότητάς του. Πέραν αυτού η πτώση της συχνότητας γίνεται σε δύο στάδια και όχι τόσο απότομα ενώ μειώνεται και η ελάχιστη τιμή που παίρνει η συχνότητα.



Σχήμα 5.21: Απόκριση της συχνότητας με χρήση και χωρίς αεροφυλακίου



Σχήμα 5.22: Ροή μάζας αέρα του αεροφυλακίου

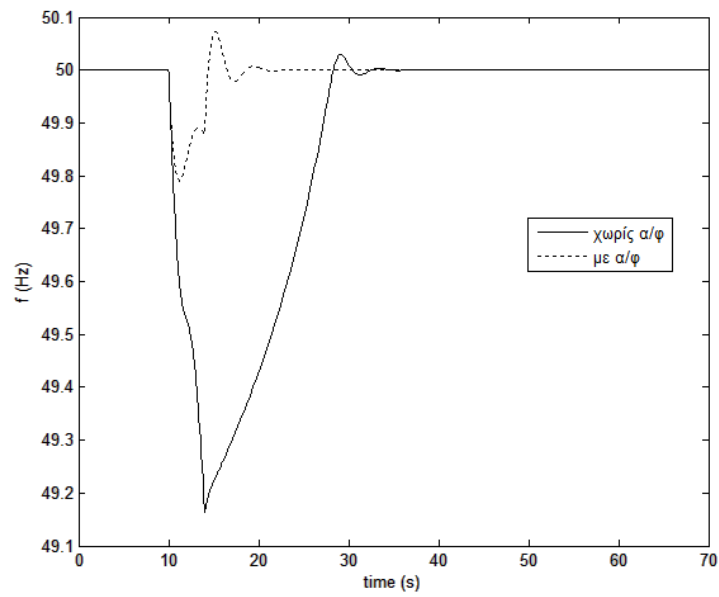


Σχήμα 5.23: Υπερπίεση του αεροφυλακίου

Στα Σχήματα 5.22 και 5.23 φαίνεται η ροή μάζας αέρα του αεροφυλακίου και η υπερπίεση αντίστοιχα. Στα 100s περίπου η ροή του αεροφυλακίου σταματά αφού η πίεση πέφτει στο 0.02 αμ πάνω από την ονομαστική, όριο κάτω από το οποίο το αεροφυλάκιο παύει να λειτουργεί. Καθώς δίνει ροή αέρα η υπερπίεση πέφτει αφού μειώνεται η μάζα του αέρα σε αυτό.

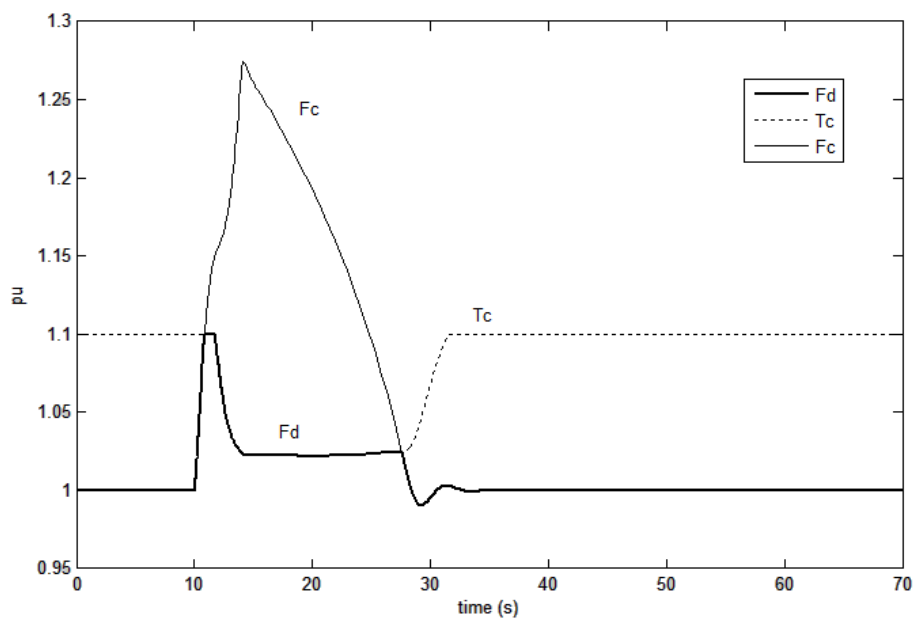
Όπως είδαμε το αεροφυλάκιο μπορεί και προσφέρει στο σύστημα κατά τη διάρκεια απότομων αυξήσεων του φορτίου σε μερικά φορτία. Τώρα θα εξετάσουμε την περίπτωση όπου η μονάδα λειτουργεί σε ονομαστικό φορτίο, όπου υπάρχουν μεγάλοι περιορισμοί λόγω του βρόχου υπερθέρμανσης. Στα μερικά φορτία η θερμοκρασία δεν φτάνει σε υψηλές τιμές ώστε να ενεργοποιηθεί ο βρόχος ελέγχου της υπερθέρμανσης που δρα πολύ περιοριστικά στη λειτουργία της μονάδα όπως θα φανεί παρακάτω.

Όταν η μονάδα λειτουργεί κοντά στο ονομαστικό φορτίο τότε η θερμοκρασία των καυσαερίων είναι ανάλογα υψηλή. Στο Σχήμα 5.24 φαίνεται η απόκριση συχνότητας με και χωρίς αεροφυλάκιο σε μια βηματική μεταβατική διαταραχή όπως του Σχήματος 5.14 από τα 10s μέχρι τα 14s και από φορτίο 1 αμ στο 1.1 αμ. Φαίνεται ότι χωρίς το αεροφυλάκιο η μονάδα δυσκολεύεται να λειτουργήσει και κινδυνεύει να αποσυγχρονιστεί. Αν η διαταραχή διαρκούσε λίγο περισσότερο η μονάδα θα αποσυγχρονιζόταν, όπως θα φανεί παρακάτω.

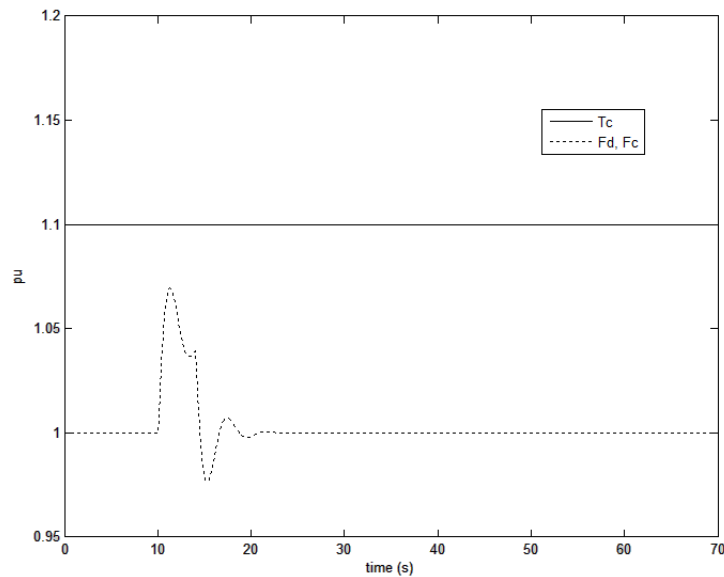


Σχήμα 5.24: Απόκριση συχνότητας με και χωρίς αεροφυλάκιο για παλμό του φορτίου από 1 αμ σε 1.1 αμ (στο διάστημα 10-14s)

Στα Σχήματα 5.25 και 5.26 φαίνονται τα σήματα F_c , T_c και F_d για τη λειτουργία με και χωρίς αεροφυλάκιο αντίστοιχα.

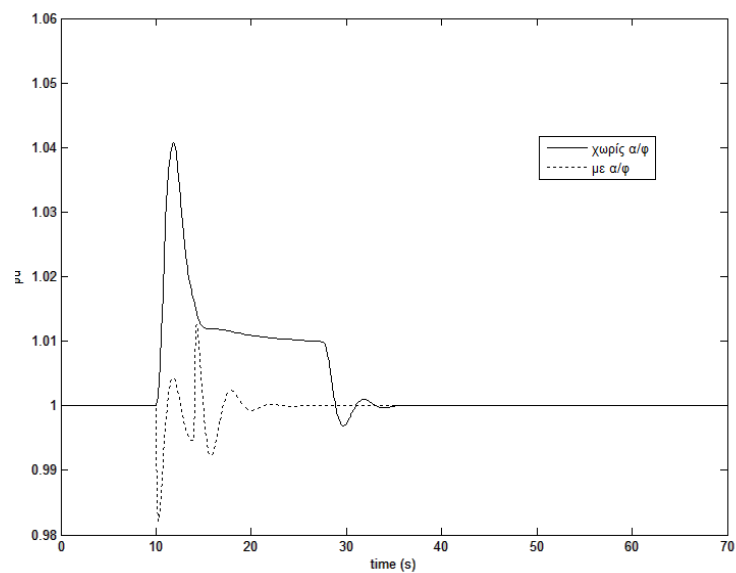


Σχήμα 5.25: Τα σήματα F_c , T_c και F_d χωρίς χρήση αεροφυλακίου

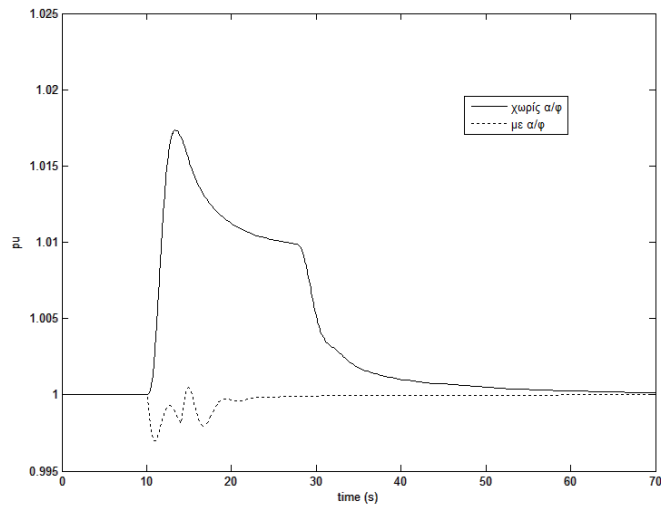


Σχήμα 5.26: Τα σήματα F_c , T_c και F_d με χρήση αεροφυλακίου

Όπως βλέπουμε, χωρίς αεροφυλάκιο το σήμα της υπερθέρμανσης καθορίζει τη λειτουργία της μονάδας και περιορίζει το σήμα της ζήτησης καυσίμου με αποτέλεσμα ο αεριοστρόβιλος να περιορίζεται αφού δεν γίνεται να δοθεί το απαραίτητο σήμα από το ρυθμιστή στροφών. Με τη χρήση του αεροφυλακίου ο αέρας που εισρέει μειώνει τη θερμοκρασία και έτσι δεν ενεργοποιείται ο βρόχος υπερθέρμανσης οπότε ο αεριοστρόβιλος μπορεί και δίνει την απαραίτητη ισχύ χωρίς να υπερθερμαίνεται. Η διαφορά της θερμοκρασίας φαίνεται στα Σχήματα 5.27 και 5.28.

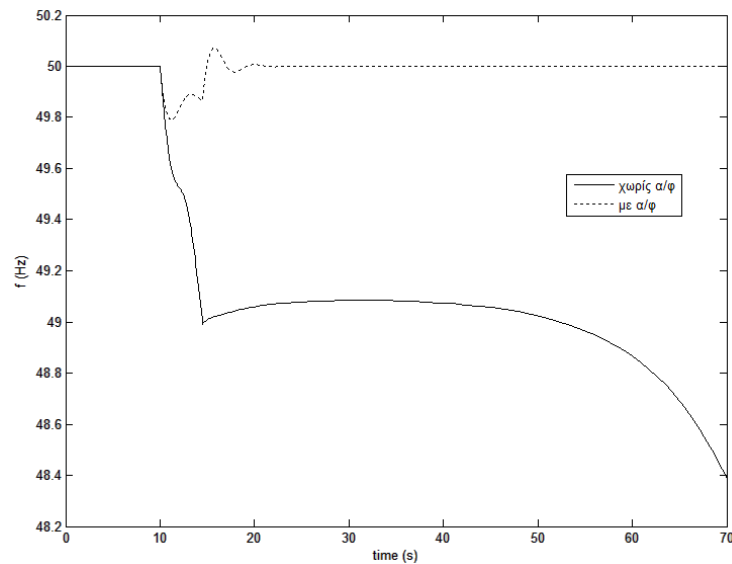


Σχήμα 5.27: Πραγματική θερμοκρασία καυσαερίων



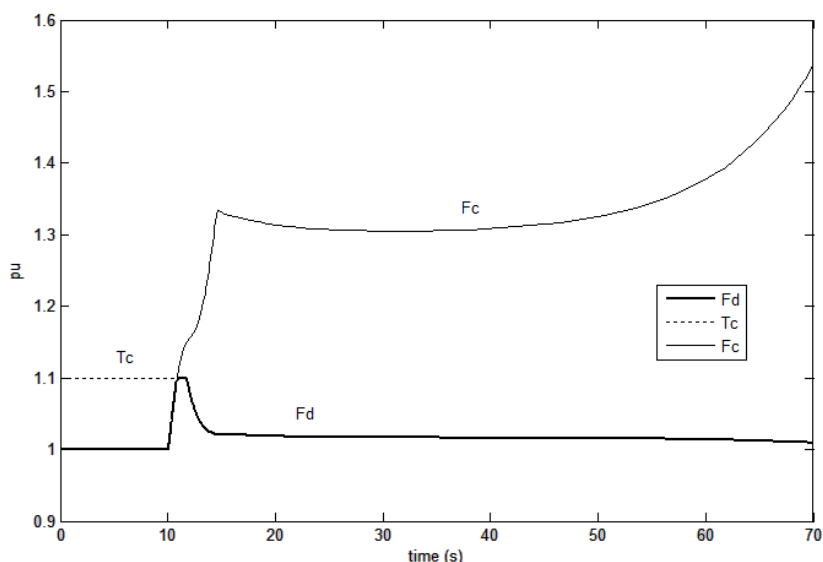
Σχήμα 5.28: Μετρούμενη θερμοκρασία καυσασερίων

Στο Σχήμα 5.29 φαίνεται η απόκριση συχνότητας για διαταραχή μέχρι τα 14.5s, για 0.5s περισσότερα από πριν.



Σχήμα 5.29: Απόκριση συχνότητας με και χωρίς αεροφυλάκιο για βηματική αύξηση του φορτίου από 1 αμ σε 1.1 αμ (στο διάστημα 10-14.5s)

Όπως φαίνεται η μονάδα αποσυγχρονίζεται αφού δεν μπορεί πια να ανταποκριθεί στο φορτίο. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της υπερθέρμανσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.30.

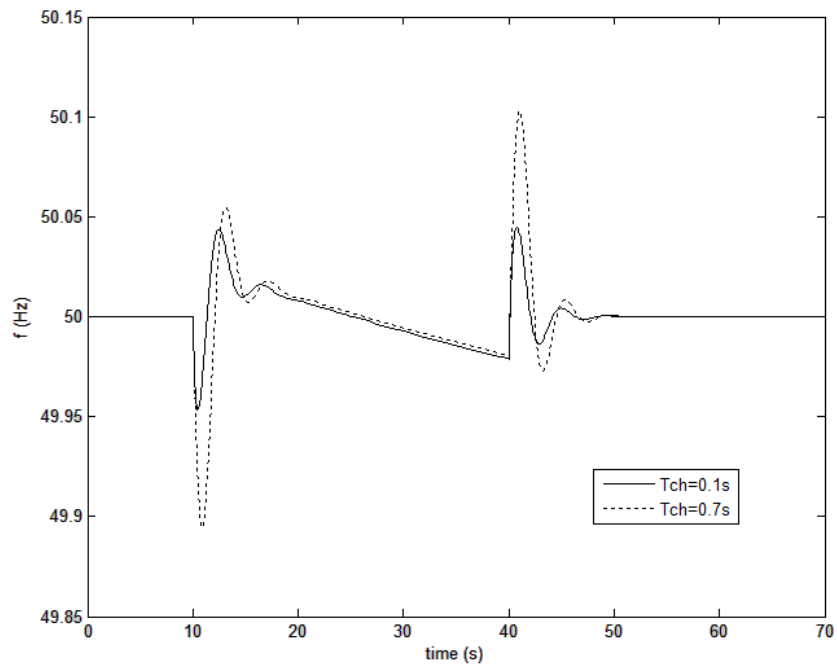


Σχήμα 5.30: Τα σήματα F_c , T_c και F_d χωρίς χρήση αεροφυλακίου

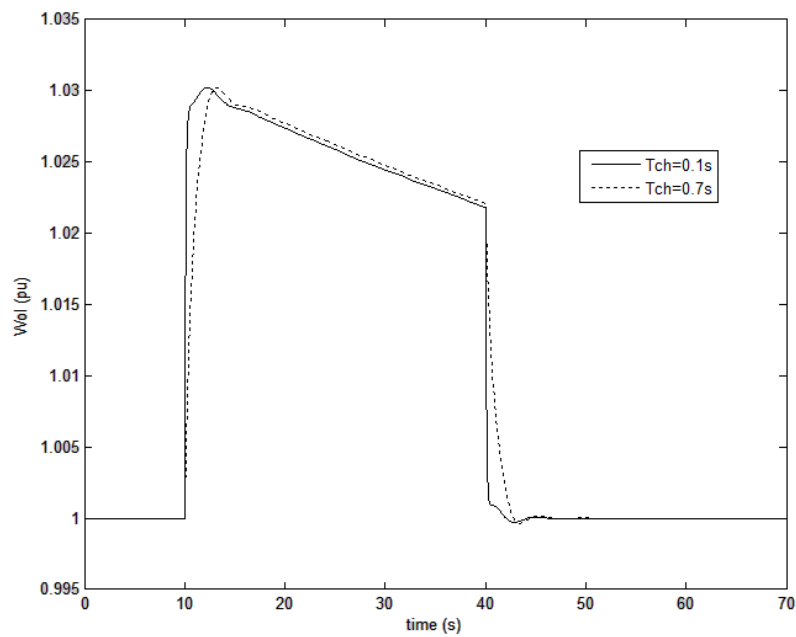
Όπως βλέπουμε η υπερθέρμανση αναγκάζει το σήμα ζήτησης του καυσίμου να παραμένει χαμηλό και έτσι δεν μπορεί να δοθεί το απαραίτητο καύσιμο ώστε να κρατηθεί η συχνότητα και τελικά η μονάδα αποσυγχρονίζεται. Ουσιαστικά ο αποσυγχρονισμός προκαλείται από το γεγονός της υπερθέρμανσης και όταν αυτή κρατιέται για μεγαλύτερο από κάποιο κρίσιμο χρονικό διάστημα.

Διαπιστώνουμε δηλαδή ότι με τη χρήση του αεροφυλακίου είναι δυνατόν να αυξηθούν τα περιθώρια λειτουργίας της μονάδας. Είναι δυνατόν να λειτουργήσει για αρκετά μεγαλύτερο χρονικό διάστημα πάνω από το ονομαστικό φορτίο, ανάλογα με τη χωρητικότητα του αεροφυλακίου ή να βελτιώσει σημαντικά την απόκριση της συχνότητας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.31, για αύξηση του φορτίου από το ονομαστικό στο 1.05 αμ και για 30s η μονάδα ανταποκρίνεται πολύ ικανοποιητικά χωρίς να υπερθερμαίνεται λόγω του επιπλέον αέρα. Άρα ανάλογα με τη χωρητικότητα και τις προδιαγραφές της μονάδας (κατά πόσο είναι ανεκτή η επιπλέον παραγωγή από το στρόβιλο και τη γεννήτρια και για πόσο διάστημα) είναι δυνατόν ο αεριοστρόβιλος να μπορεί να παράγει επιπλέον ισχύ για ορισμένο διάστημα χωρίς να προκαλείται υπερθέρμανση. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και η επίδραση της μεταβολής της χρονικής σταθεράς T_{ch} .

Πέραν της παραδοχής ότι η ροή αέρα του αεροφυλακίου είναι ανάλογη της υπερπίεσης σε αυτό, θεωρήσαμε ότι η απότομη εισροή ή εκροή αέρα δεν επηρεάζει τη φλόγα στο θάλαμο καύσης. Αν αυξήσουμε τη χρονική σταθερά του αεροφυλακίου ώστε η ροή μάζας αέρα να αυξάνεται με μικρότερο ρυθμό τότε η απόκριση της συχνότητας είναι χειρότερη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.31 για $T_{ch}=0.7s$. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ροή μάζας αέρα δεν αυξάνεται ούτε μειώνεται τόσο απότομα λόγω της μεγαλύτερης χρονικής σταθεράς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.32. Για αυτό και η μεταβατική υποσυχνότητα στα 10s και η μεταβατική υπερσυχνότητα στα 40s είναι μεγαλύτερες λόγω της πιο αργής μεταβολής της ροής μάζας του αέρα.



Σχήμα 5.31: Απόκριση συχνότητας με αεροφυλάκιο για βηματική αύξηση του φορτίου από 1 αμ σε 1.05 αμ (στο διάστημα 10-40s) για $T_{ch}=0.1s$ και $T_{ch}=0.7s$



Σχήμα 5.32: Ολική ροή μάζας αέρα με αεροφυλάκιο για βηματική αύξηση του φορτίου από 1 αμ σε 1.05 αμ (στο διάστημα 10-40s) για $T_{ch}=0.1s$ και $T_{ch}=0.7s$

Κεφάλαιο 6^ο: Προσομοίωση λειτουργίας αεριοστροβίλου διπλού άξονα

Στο κεφάλαιο αυτό θα υλοποιήσουμε το μοντέλο αεριοστροβίλου διπλού άξονα που αναπτύχθηκε στο 4^ο κεφάλαιο στο Simulink. Στην πρώτη ενότητα θα παραστήσουμε το μοντέλο διπλού άξονα στο Simulink, κατά τρόπο ανάλογο με το μοντέλο απλού άξονα στο 5^ο κεφάλαιο, θα παρουσιάσουμε τα δεδομένα και τις παραμέτρους του και τέλος θα αρχικοποιήσουμε το μοντέλο ώστε να προσομοιωθεί η λειτουργία του. Στη δεύτερη ενότητα θα εξηγηθεί η ανάγκη μεταβολής ορισμένων παραμέτρων του μοντέλου, θα επιλεγούν οι νέες παράμετροι και θα αναλυθεί η νέα σχεδίαση του ρυθμιστή στροφών. Στην τρίτη ενότητα θα γίνει η προσομοίωση για μερικές διαταραχές και θα εξαχθούν τα συμπεράσματα.

6.1 Υλοποίηση μοντέλου αεριοστροβίλου διπλού άξονα στο Simulink

Στην ενότητα αυτή θα υλοποιήσουμε το μοντέλο αεριοστροβίλου διπλού άξονα στο Simulink ώστε να είναι δυνατή αργότερα η προσομοίωση του μοντέλου. Στην πρώτη παράγραφο θα παραστήσουμε το μοντέλο, στη δεύτερη θα παρουσιάσουμε τα δεδομένα και την επιλογή των παραμέτρων του και στην τρίτη την αρχικοποίηση.

6.1.1 Παράσταση μοντέλου αεριοστροβίλου διπλού άξονα στο Simulink

Το μοντέλο υλοποιείται στο Simulink κατά τρόπο παρόμοιο με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε για το μοντέλο απλού άξονα στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αρχικά θα ορίσουμε το κομμάτι της ενεργειακής μετατροπής. Όπως γνωρίζουμε στο μοντέλο διπλού άξονα έχουμε δύο βαθμίδες ενεργειακής μετατροπής, μέσα στις οποίες υλοποιούνται οι θερμοδυναμικές εξισώσεις. Η μια βαθμίδα ενεργειακής μετατροπής είναι της αεριογόνου (aeroderivative block) και η άλλη του στροβίλου ισχύος (power turbine block).

Οι θερμοδυναμικές εξισώσεις που θα χρησιμοποιηθούν για τις δυο βαθμίδες είναι αυτές που αναπτύχθηκαν στην παράγραφο 4.4.4, ενώ ο όρος $(\gamma-1)/\gamma$ αντικαθίσταται με βάση τη σχέση:

$$\frac{\gamma - 1}{\gamma} = \frac{R_a}{c_p} \quad (6.1)$$

Οι υπόλοιπες σχέσεις έχουν ως εξής:

$$T_d = T_i \left[1 + \frac{1}{n_c} (q - 1) \right] \quad (6.2)$$

$$q = (P_{c0} W)^{\frac{R_a}{c_{pa}}} \quad (6.3)$$

$$T_f = T_d + (T_{f0} - T_{d0}) \frac{W_f}{W} \quad (6.4)$$

$$T_{e1} = T_f \left[1 - n_{t1} \left(1 - \frac{1}{n} \right) \right] \quad (6.5)$$

$$n = (P_{t1_0})^{\frac{R_a}{c_{pt}}} \quad (6.6)$$

$$T_{e2} = T_{e1} \left[1 - n_{t2} \left(1 - \frac{1}{z} \right) \right] \quad (6.7)$$

$$z = (P_{t2_0} W)^{\frac{R_a}{c_{pg}}} \quad (6.8)$$

$$E_{lp} = WK_{lp} (T_{e1} - T_{e2}) \quad (6.9)$$

$$K_{lp} = \frac{1}{(T_{e1_0} - T_{e2_0})} \quad (6.10)$$

$$E_c = WK_c \left[\eta_{gt} c_{pt} (T_f - T_{e1}) - c_{pa} (T_d - T_i) \right] \quad (6.11)$$

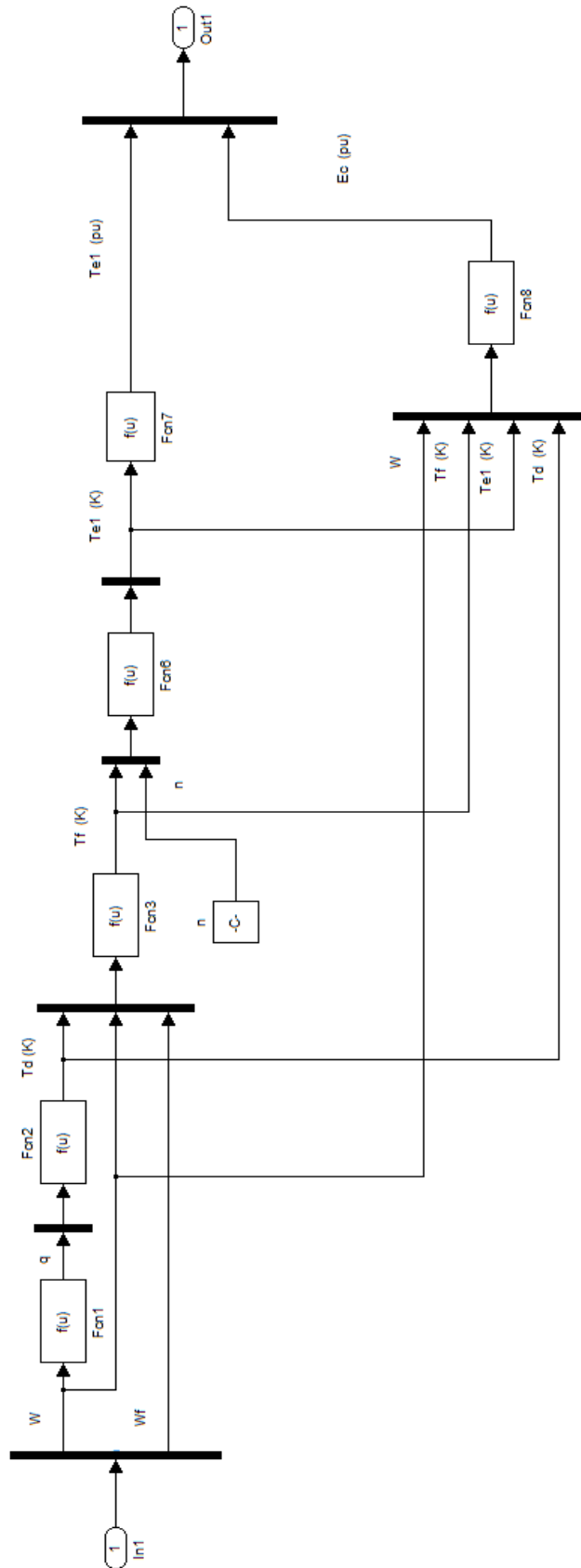
$$K_c = \frac{1}{\eta_{gt} c_{pg} (T_{e1_0} - T_{e2_0})} \quad (6.12)$$

Οι σχέσεις (6.2)-(6.8) δίνουν τις θερμοκρασίες του αεριοστροβίλου σε βαθμούς Kelvin ενώ οι σχέσεις (6.9)-(6.12) τις μετατρεπόμενες θερμικές ισχύεις ανά μονάδα (E_c και E_{lp} της αεριογόνου και του στροβίλου ισχύος αντίστοιχα). Η σημασία κάθε παραμέτρου έχει αναφερθεί στο 4^ο κεφάλαιο. Στο Σχήμα 6.1 φαίνεται το μπλοκ της ενεργειακής μετατροπής της αεριογόνου, όπου έχουμε ως εισόδους την ανά μονάδα ροή μάζας αέρα (W) και την ανά μονάδα ροή μάζας του καυσίμου (W_f) ενώ ως εξόδους έχουμε τη θερμοκρασία των καυσαερίων (T_{e1}) ανά μονάδα και τη μετατρεπόμενη θερμική ενέργεια (E_c) επίσης ανά μονάδα. Χρησιμοποιούνται οι σχέσεις (6.2)-(6.6) και (6.11)-(6.12).

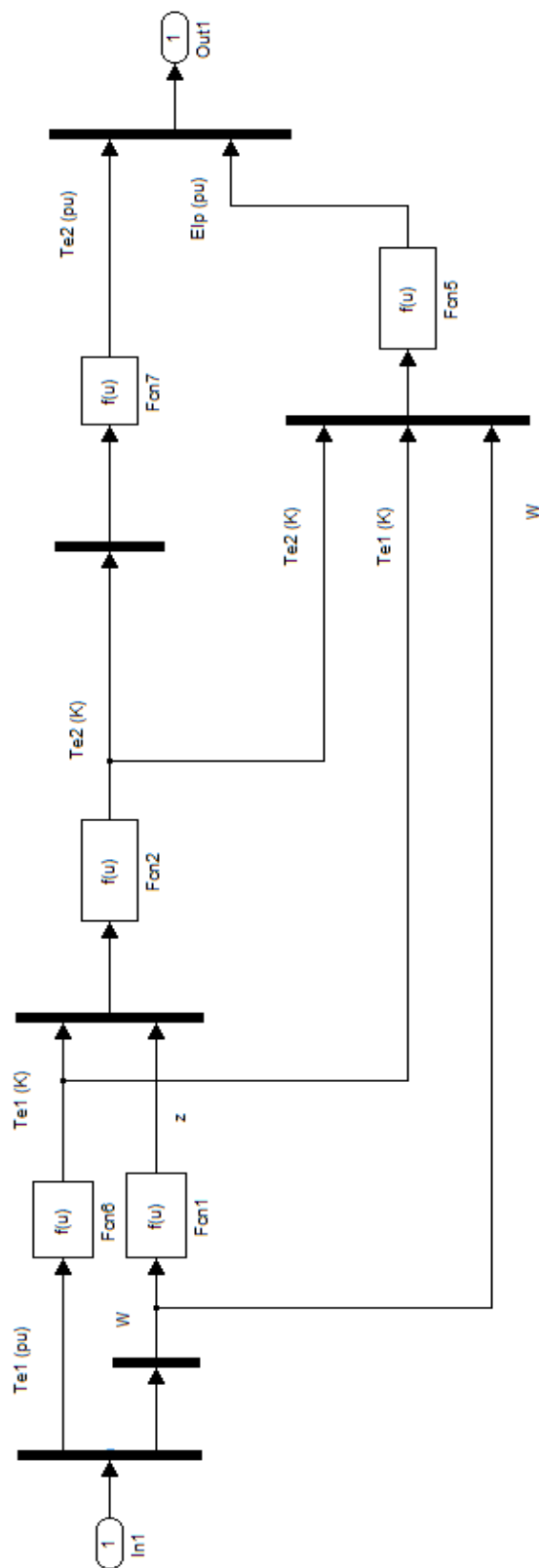
Όπως έχουμε αναφέρει η συνάρτηση F_{cn} εκτελεί όποια πράξη θέλουμε ώστε να υλοποιηθούν οι εξισώσεις, με εισόδους $u[1]$, $u[2]$ κλπ. Οι θερμοκρασίες που χρησιμοποιούνται είναι είτε σε Kelvin ή σε τιμές ανά μονάδα ανάλογα με το σύμβολο που χρησιμοποιείται. Η αλλαγή από Kelvin σε αμ γίνεται διαιρώντας με την ονομαστική τιμή ή αντίστροφα από αμ σε Kelvin πολλαπλασιάζοντας με την ονομαστική τιμή. Η υλοποίηση των εξισώσεων είναι πολύ απλή και γίνεται με τον τρόπο που χρησιμοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο για την υλοποίηση των εξισώσεων του μοντέλου απλού άξονα.

Το μπλοκ της ενεργειακής μετατροπής του στροβίλου ισχύος υλοποιείται με τον ίδιο τρόπο όπως αυτό της αεριογόνου και φαίνεται στο Σχήμα 6.2. Οι είσοδοι του δεύτερου μπλοκ είναι η θερμοκρασία των καυσαερίων (T_{e1}) και η ροή μάζας αέρα (W) ενώ οι έξοδοι είναι η μετατρεπόμενη θερμική ενέργεια (E_{lp}) και η θερμοκρασία των τελικών καυσαερίων (T_{e2}), όλα σε ανά μονάδα μεγέθη. Χρησιμοποιούνται οι σχέσεις (6.7)-(6.10).

Το υπόλοιπο μοντέλο υλοποιείται με βάση τα όσα αναπτύχθηκαν στην παράγραφο 4.4.3 για τις διατάξεις ελέγχου και τη λειτουργία του μοντέλου και με παρόμοιο τρόπο με το μοντέλο απλού άξονα, η υλοποίηση του οποίου παρουσιάστηκε στο 5^ο κεφάλαιο. Στο Σχήμα 6.3 παρουσιάζεται το μοντέλο αεριοστροβίλου διπλού άξονα στο Simulink.

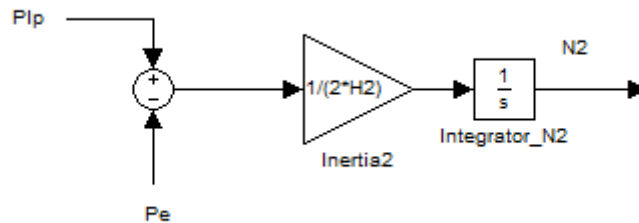


Σχήμα 6.1: Ενεργειακή μετατροπή στην αεριογόνο με τη χρήση του Simulink



Σχήμα 6.2: Ενεργειακή μετατροπή στο στρόβιλο ισχύος με τη χρήση του Simulink

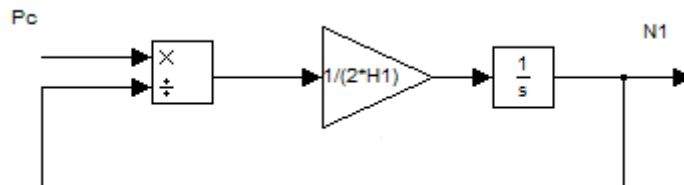
Η υλοποίηση της διάταξης μέτρησης της θερμοκρασίας των τελικών καυσαερίων γίνεται όπως και στο μοντέλο απλού άξονα με μια συνάρτηση μεταφοράς πρώτου βαθμού (βλ. Σχήμα 5.3 του 5^{ου} κεφαλαίου) και μια συνάρτηση μεταφοράς όπως του Σχήματος 5.5 του 5^{ου} κεφαλαίου. Ο βρόχος ελέγχου της υπερθέρμανσης υλοποιείται όπως στο Σχήμα 5.6 του 5^{ου} κεφαλαίου και ο ρυθμιστής στροφών όπως στο Σχήμα 5.4 του 5^{ου} κεφαλαίου. Η υλοποίηση του μηχανικού μέρους της γεννήτριας είναι επίσης ίδια με τη διαφορά ότι η συχνότητα είναι αμ ίση με N_2 και η μηχανική ισχύς παράγεται από το στρόβιλο ισχύος και φαίνεται στο Σχήμα 6.4.



Σχήμα 6.4: Υλοποίηση στο Simulink της εξίσωσης επιτάχυνσης του άξονα της γεννήτριας

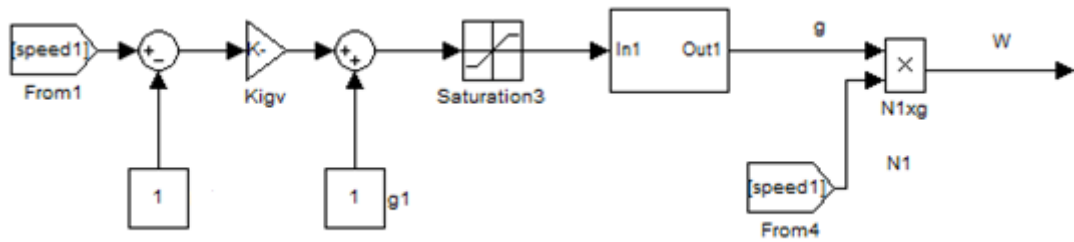
Διαφορά υπάρχει στην υλοποίηση του άξονα της αεριογόνου, που φαίνεται στο Σχήμα 6.5 και υλοποιείται με βάση τη σχέση (4.53):

$$\frac{P_c}{N_1} = 2H_1 \dot{N}_1 \quad (6.13)$$



Σχήμα 6.5: Υλοποίηση στο Simulink της εξίσωσης επιτάχυνσης του άξονα της αεριογόνου

Οι συναρτήσεις μεταφοράς πρώτου βαθμού παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο (στο Σχήμα 5.3 του 5^{ου} κεφαλαίου) και χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της δυναμικής του στρόβιλου ισχύος, της αεριογόνου, των οδηγών πτερυγίων εισόδου κλπ. Μια επιπλέον διαφορά υπάρχει στη διάταξη των πτερυγίων εισόδου που φαίνεται στο Σχήμα 6.6. Τα πτερύγια εισόδου εξασφαλίζουν τον έλεγχο της ταχύτητας της αεριογόνου για μεταβαλλόμενο φορτίο.



Σχήμα 6.6: Υλοποίηση στο Simulink της διάταξης ελέγχου των πτερυγίων

Η ταχύτητα της αεριογόνου N_1 αμ αφαιρείται από την ονομαστική τιμή της (που ισούται με τη μονάδα) και η διαφορά πολλαπλασιάζεται με το κέρδος K_{igv} , το οποίο προσδιορίζεται στην παράγραφο 6.1.2. Στο αποτέλεσμα προστίθεται η μονάδα ώστε στο ονομαστικό φορτίο, όπου η διαφορά N_1-1 ισούται με το μηδέν, η τιμή του σήματος να είναι ίση με τη μονάδα, όση δηλαδή και η τιμή των οδηγών πτερυγίων εισόδου. Ο περιοριστής περιορίζει την τιμή του σήματος μεταξύ των τιμών g_{min} και g_{max} . Όταν μειώνεται το φορτίο και απαιτείται μικρότερη παροχή μάζας καυσαερίων στο στρόβιλο ισχύος τότε κλείνουν τα πτερύγια εισόδου και μειώνεται η ταχύτητα της αεριογόνου (με αποτέλεσμα να μειώνεται και η κατανάλωση του συμπιεστή). Η σχέση μεταξύ της μείωσης του ανοίγματος των πτερυγίων και της ταχύτητας καθορίζεται από το κέρδος K_{igv} , όπως φαίνεται από την εξίσωση της διάταξης ελέγχου των πτερυγίων, όπου στη μόνιμο κατάσταση είναι:

$$[(N_1 - 1) K_{igv} + 1] N_1 = W \quad (6.14)$$

Όπως φαίνεται από τη σχέση (6.14) για μικρότερη παροχή μάζας καυσαερίων, όσο μικρότερο είναι το κέρδος K_{igv} τόσο μικρότερη είναι η ταχύτητα της αεριογόνου. Το κέρδος λοιπόν καθορίζεται έτσι ώστε στο ελάχιστο φορτίο του αεριοστροβίλου η ταχύτητα της αεριογόνου να μην είναι εκτός του επιθυμητού εύρους λειτουργίας.

6.1.2 Δεδομένα και επιλογή παραμέτρων

Στον Πίνακα 6.1 παρατίθενται οι παράμετροι του αεριοστροβίλου διπλού άξονα. Η επιλογή έγινε λύνοντας τις εξισώσεις που αναπτύξαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο στο ονομαστικό φορτίο και με δοκιμές με βάση τα δεδομένα [7], [9]. Τελικά καταλήξαμε στις τιμές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1, οι οποίες αν χρησιμοποιηθούν στις θερμοδυναμικές εξισώσεις δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα (στο να προσεγγίσουν τα δεδομένα του αεριοστροβίλου GE LM 2500 που χρησιμοποιήθηκε ως πρότυπο). Να σημειώσουμε ότι για τις τιμές των ειδικών θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση χρησιμοποιήσαμε τις παρακάτω σχέσεις (όπου οι θερμοχωρητικότητες προκύπτουν σε J/kg K):

Για θερμοκρασίες 200-800K έχουμε:

$$c_p = 1018,9 - 0,13784 T + 1,9843 \cdot 10^{-4} T^2 + 4,2399 \cdot 10^{-7} T^3 - 3,7632 \cdot 10^{-10} T^4 \quad (6.15)$$

Για θερμοκρασίες 800-2200 K έχουμε:

$$c_p = 798.65 + 0.5339 T - 2,2882 \cdot 10^{-4} T^2 + 3,7421 \cdot 10^{-8} T^3 \quad (6.16)$$

Να τονιστεί ότι για να πάρουμε τιμές σε kJ/kg K διαιρούμε τις τιμές που προκύπτουν από τις (6.15)-(6.16) με το 1000.

Για τις υπόλοιπες παραμέτρους θα χρησιμοποιήσουμε αυτές του μοντέλου απλού άξονα. Η ταχύτητα της αεριογόνου απαιτούμε να μεταβάλλεται στο εύρος 1-0.85 αμ για φορτίο 1-0.5 αμ. Δηλαδή σε πολύ χαμηλό φορτίο της τάξης του 0.5 αμ η ταχύτητα της αεριογόνου να είναι περίπου 0.85 αμ. Από την επίλυση των εξισώσεων στη μόνιμο κατάσταση (ο τρόπος επίλυσης αναλύεται στην παράγραφο 6.1.3) προκύπτει ότι (για φορτίο 0.5 αμ) $W=0.7317$. Από τη σχέση (6.14) για την τιμή αυτή βρίσκουμε ότι ένα κέρδος $K_{igv}=0.8$ ικανοποιεί την απαίτησή μας. Στον Πίνακα 6.2 παρουσιάζονται οι παράμετροι ελέγχου του μοντέλου του αεριοστροβίλου διπλού άξονα.

Η τιμή του μέγιστου ανοίγματος των περυγίων είναι ίση με τη μονάδα (πλήρως ανοιχτά). Η ελάχιστη τιμή προκύπτει από τη σχέση:

$$W = N_1 g \quad (6.17)$$

Με το κέρδος $K_{igv}=0.8$ που ορίσαμε, η τιμή της ταχύτητας για το ελάχιστο φορτίο (0.5 αμ) υπολογίζεται από τη σχέση (6.14) ίση με 0.8395 αμ. Για να ικανοποιείται η απαίτηση η ροή του αέρα να μη γίνεται μικρότερη από 0.73 αμ τότε από τη σχέση (6.17) επιλέγουμε ως τιμή ελάχιστου ανοίγματος την τιμή 0.87.

Πίνακας 6.1: Παράμετροι αεριοστροβίλου διπλού άξονα (σε ανά μονάδα τιμές εκτός αν αναφέρεται)

Συμβολισμός	Παράμετρος	Τιμή
T_i	Θερμοκρασία εισόδου του συμπιεστή (ονομαστική) (K)	288
T_{e2_0}	Θερμοκρασία καυσαερίων (ονομαστική) (K)	775
T_r	Θερμοκρασία αναφοράς ελέγχου υπερθέρμανσης	1.01
P_{c0}	Ονομαστικός λόγος συμπίεσης	18
P_{t1_0}	Ονομαστικός λόγος εκτόνωσης στον στρόβιλο ΥΠ	4.5
P_{t2_0}	Ονομαστικός λόγος εκτόνωσης στον στρόβιλο ΧΠ	4
c_{pa}	Ειδική μέση θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση αέρα συμπιεστή (kJ/kg K)	1.03
c_{pt}	Ειδική μέση θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση καυσαερίων στροβίλου ΥΠ (kJ/kg K)	1.18
c_{pg}	Ειδική μέση θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση καυσαερίων στροβίλου ΧΠ (kJ/kg K)	1.12
R_a	Ειδική σταθερά του αερίου (kJ/kg.K)	0.287
η_{tc}	Ισοδύναμος μηχανικός βαθμός απόδοσης της αεριογόνου	0.99
η_{gt}	Ισοδύναμος μηχανικός βαθμός απόδοσης γεννήτριας και στροβίλου	0.99
η_c	Εσωτερική απόδοση συμπιεστή	0.81
η_{t1}	Εσωτερική απόδοση στροβίλου ΥΠ	0.88
η_{t2}	Εσωτερική απόδοση στροβίλου ΧΠ	0.88
H_1	Ανηγμένη χρονική σταθερά αδράνειας άξονα αεριογόνου (s)	3.5
H_2	Ανηγμένη χρονική σταθερά αδράνειας άξονα γεννήτριας-στροβίλου ισχύος (s)	2.2

Πίνακας 6.2: Παράμετροι ελέγχου (σε ανά μονάδα τιμές εκτός αν αναφέρεται)

Συμβολισμός	Παράμετρος	Τιμή
R	Στατισμός	0.05
T_g	Χρονική σταθερά ρυθμιστή στροφών (s)	0.1
K_4	Κέρδος ασπίδας θερμότητας (ακαριαία)	0.8
K_5	Κέρδος ασπίδας θερμότητας	0.2
T_3	Χρονική σταθερά ασπίδας θερμότητας (s)	15
T_4	Χρονική σταθερά αισθητήρα θερμοκρασίας (s)	2.5
T_5	Χρονική σταθερά του τμήματος του ελέγχου θερμοκρασίας που παρεμβαίνει στην ροή του καυσίμου (s)	3.3
T_t	Ρυθμός ολοκλήρωσης του τμήματος του ελέγχου θερμοκρασίας που παρεμβαίνει στην ροή του καυσίμου (s)	0.4699
T_{c_max}	Μέγιστη τιμή της εξόδου T_c του τμήματος ελέγχου θερμοκρασίας	1.1
T_{c_min}	Ελάχιστη τιμή της εξόδου T_c του τμήματος ελέγχου θερμοκρασίας	0
F_{d_max}	Άνω όριο εισόδου στον έλεγχο καυσίμου	1.1
F_{d_min}	Κάτω όριο εισόδου στον έλεγχο καυσίμου	0
g_{max}	Μέγιστο άνοιγμα πτερυγίων εισόδου	1
g_{min}	Ελάχιστο άνοιγμα πτερυγίων εισόδου	0.87
K_3	Εύρος ανοίγματος βαλβίδας καυσίμου	0.77
K_6	Ελάχιστο άνοιγμα βαλβίδας καυσίμου	0.23
T_v	Χρονική σταθερά ρυθμιστή θέσης της βαλβίδας καυσίμου (s)	0.05
T_f	Χρονική σταθερά συστήματος καυσίμου (s)	0.4
W_{min}	Ελάχιστη τιμή ανοίγματος βαλβίδας αέρα	0.73
T_{cd}	Χρονική σταθερά αεριοστροβίλου (s)	0.2
T_{igv}	Χρονική σταθερά πτερυγίων (s)	1
K_{igv}	Κέρδος βρόχου ελέγχου πτερυγίων	0.8

6.1.3 Αρχικοποίηση του μοντέλου διπλού άξονα

Η αρχικοποίηση του μοντέλου γίνεται με παρόμοιο τρόπο όπως στο μοντέλο απλού άξονα. Αρχικά πρέπει να υπολογίσουμε τις τιμές των μεταβλητών στη μόνιμο κατάσταση. Οι μεταβλητές που προσδιορίζονται είναι οι θερμοκρασίες T_d , T_f , T_{e1} , T_{e2} , οι ροές αέρα (W) και καυσίμου (W_f), η ταχύτητα της αεριογόνου (N_1) και το άνοιγμα των πτερυγίων (g). Το αρχείο `beginc.m` δίνει όλα τα δεδομένα στο μοντέλο και τις 8 τιμές των παραπάνω μεταβλητών για κάθε δεδομένη τιμή φορτίου.

Οι τιμές των 8 μεταβλητών προκύπτουν από το αρχείο `initc.m` μαζί με 2 αρχεία `func.m` και `fun1c.m` (όλα τα αρχεία του μοντέλου παρατίθενται στο Παράρτημα Β). Το αρχείο `initc.m` παίρνει ως είσοδο την τιμή του φορτίου και επιλύει το σύστημα 6 εξισώσεων μέσω του αρχείου `func.m`. Οι 6 εξισώσεις είναι οι:

$$E_{lp} = WK_{lp} (T_{e1} - T_{e2}) \quad (6.9)$$

$$\eta_{tc} c_{pt} (T_f - T_{e1}) = c_{pa} (T_d - T_i) \quad (6.18)$$

$$T_f = T_d + (T_{f0} - T_{d0}) \frac{W_f}{W} \quad (6.4)$$

$$T_d = T_i \left[1 + \frac{1}{n_c} \left((P_{c0} W)^{\frac{R_a}{c_{pa}}} - 1 \right) \right] \quad (6.19)$$

$$T_{e1} = T_f \left[1 - n_{t1} \left(1 - \frac{1}{(P_{t1_0})^{\frac{R_a}{c_{pt}}}} \right) \right] \quad (6.20)$$

$$T_{e2} = T_{e1} \left[1 - n_{t2} \left(1 - \frac{1}{(P_{t2_0} W)^{\frac{R_a}{c_{pg}}}} \right) \right] \quad (6.21)$$

Οι τρεις τελευταίες εξισώσεις προκύπτουν από το συνδυασμό των εξισώσεων (6.2)-(6.3), (6.5)-(6.6) και (6.7)-(6.8). Η σχέση (6.18) προκύπτει από την απαίτηση ισορροπίας της αεριογόνου στη μόνιμο κατάσταση ($E_c=0$). Η επίλυση των 6 εξισώσεων μας δίνει τις τιμές των T_d , T_f , T_{e1} , T_{e2} , W και W_f για δοσμένο φορτίο (που ισούται στη μόνιμο κατάσταση με την ισχύ του στροβίλου ισχύος E_{lp}). Αν από την επίλυση προκύψει τιμή για το W μικρότερη από την ελάχιστη τότε το σύστημα επιλύεται μέσω του `fun1c.m` με γνωστό το W ($W=W_{min}$). Στις εξισώσεις το W αντικαθίσταται από την ελάχιστη τιμή W_{min} .

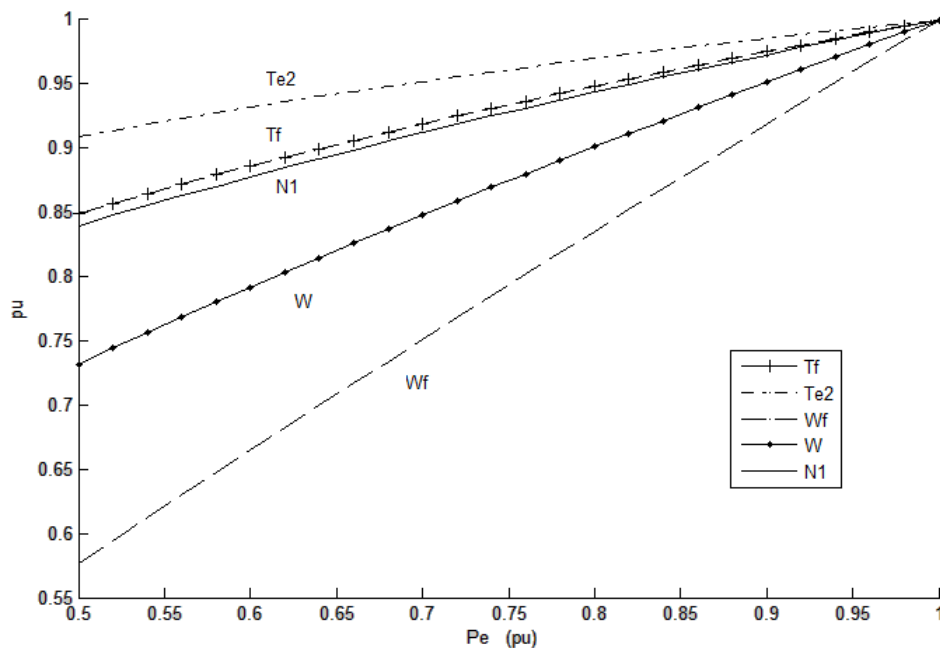
Μένει ο προσδιορισμός των τιμών των g και N_1 . Οι τιμές τους βρίσκονται από τις σχέσεις:

$$[(N_1 - 1) K_{igv} + 1] N_1 = W \quad (6.14)$$

$$W = N_1 g \quad (6.17)$$

Οι τιμές των θερμοκρασιών διαιρούνται με τις ονομαστικές και έτσι όλες οι μεταβλητές δίνονται σε αμ τιμές. Οι ονομαστικές τιμές βρίσκονται πολύ απλά λύνοντας για φορτίο ίσο με τη μονάδα.

Καλώντας το αρχείο `initc.m` πολλές φορές μπορούμε να πάρουμε το διάγραμμα μονίμου καταστάσεως για όποιες μεταβλητές θέλουμε. Στο Σχήμα 6.7 παίρνουμε το διάγραμμα μονίμου καταστάσεως για φορτίο από 0.5 ως 1 αμ (πλήρες φορτίο) για τις μεταβλητές T_f , T_{e2} , W_f , W , N_1 . Όπως βλέπουμε, η τιμή της ροής μάζας αέρα σε καμία περίπτωση δεν γίνεται ελάχιστη αφού για το ελάχιστο φορτίο (0.5 αμ) η τιμή του προκύπτει μεγαλύτερη από το W_{min} .



Σχήμα 6.7: Διάγραμμα μονίμου καταστάσεως για φορτίο από 0.5 ως 1 αμ (πλήρες φορτίο) για τις μεταβλητές T_f , T_{e2} , W_f , W , N_1

Τέλος, για να γίνει η προσομοίωση πρέπει να αρχικοποιηθεί το μοντέλο. Η αρχικοποίηση γίνεται με τον ίδιο τρόπο που αρχικοποιήθηκε το μοντέλο απλού άξονα, ανάλογα με το φορτίο. Τρέχουμε το αρχείο `beginpc.m` που δίνει τα δεδομένα και τις τιμές των 8 μεταβλητών ανάλογα με το φορτίο που επιλέγουμε. Θέτουμε τις κατάλληλες αρχικές συνθήκες στους ολοκληρωτές ώστε να έχουμε τις επιθυμητές τιμές στις μεταβλητές που θέλουμε και οι είσοδοι των ολοκληρωτών να είναι μηδέν.

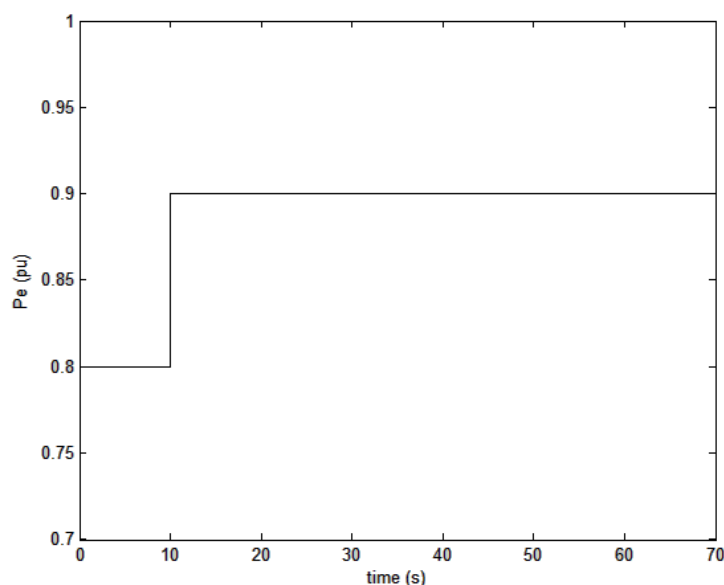
Η αρχική συνθήκη του ολοκληρωτή που δίνει την ταχύτητα του στροβίλου ισχύος (που σε ανά μονάδα τιμή ταυτίζεται με την αμ συχνότητα του δικτύου) είναι σε κάθε

περίπτωση αρχικά ίση με τη μονάδα. Η αρχική συνθήκη στον ολοκληρωτή που δίνει την ταχύτητα της αεριογόνου είναι η τιμή N_1 που υπολογίζεται από την εκτέλεση του αρχείου για δεδομένο φορτίο. Ο ολοκληρωτής που δίνει ως έξοδο το P_c έχει αρχική τιμή μηδέν ώστε η είσοδος του ολοκληρωτή που δίνει την ταχύτητα της αεριογόνου να είναι επίσης μηδέν. Με ανάλογο τρόπο συμπληρώνονται και οι υπόλοιπες αρχικές τιμές των ολοκληρωτών, όπως δείξαμε και στο 5^ο κεφάλαιο.

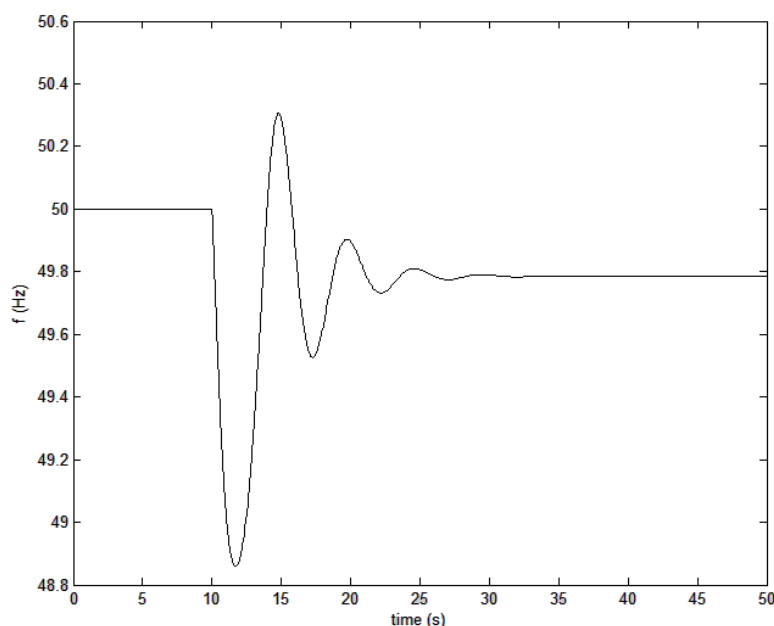
6.2 Προσαρμογή παραμέτρων και σχεδίαση ρυθμιστή στροφών

Για να βελτιώσουμε το μοντέλο είναι σκόπιμο να κάνουμε ανάλυση των ιδιοτιμών του και για το λόγο αυτό το μοντέλο γραμμικοποιείται αριθμητικά με την εντολή `linmod` του Matlab που επιστρέφει τον πίνακα κατάστασης A . Με την εντολή `damp` του Matlab υπολογίζονται οι ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης A , η απόσβεση και η συχνότητα κάθε ταλαντωτικού ρυθμού. Το αρχείο `modana.m` υπολογίζει τις ιδιοτιμές ενός μοντέλου και το συντελεστή συνεισφοράς κάθε μεταβλητής κατάστασης στους ρυθμούς απόκρισης.

Προσομοιώνουμε αρχικά μια βηματική μεταβολή του φορτίου από την τιμή 0.8 αμ στην τιμή 0.9 αμ στα 10s (Σχήμα 6.8) και στο Σχήμα 6.9 δείχνουμε την απόκριση της συχνότητας στη μεταβολή αυτή.



Σχήμα 6.8: Βηματική αύξηση του φορτίου από 0.8 σε 0.9 αμ στα 10s



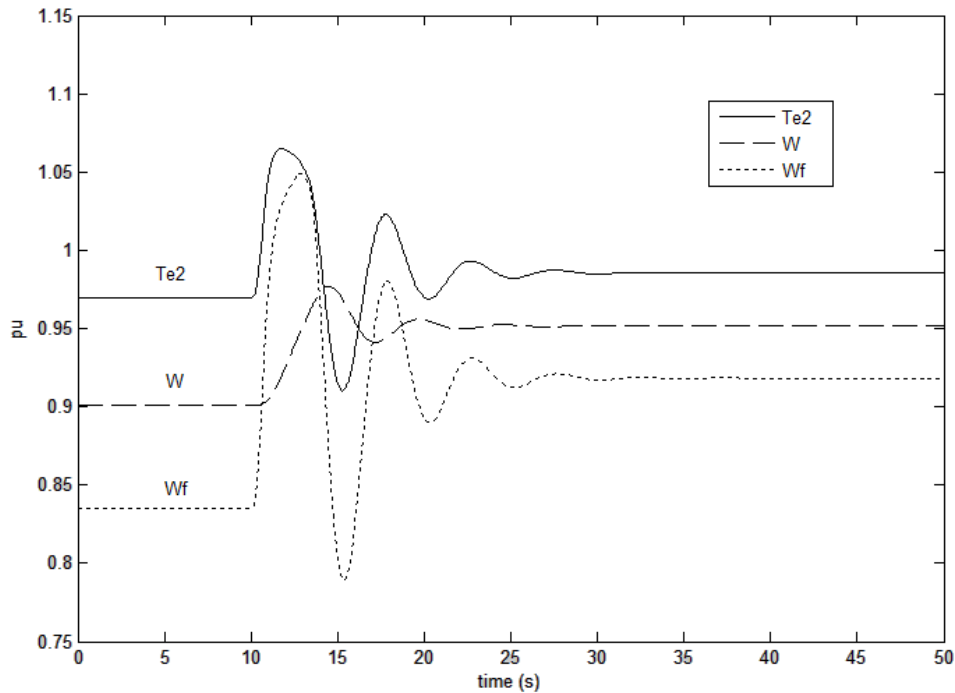
Σχήμα 6.9: Απόκριση συχνότητας στη διαταραχή του Σχήματος 6.8

Όπως βλέπουμε, σε μια βηματική αύξηση του φορτίου η συχνότητα παρουσιάζει ταλαντωτική συμπεριφορά με μεγάλες διακυμάνσεις και μικρή απόσβεση. Στον Πίνακα 6.3 φαίνονται οι ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης για φορτίο 0.8αμ.

Πίνακας 6.3: Ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης

a/a	Ιδιοτιμή	Λόγος απόσβεσης	Συχνότητα (Hz)	Σταθερά χρόνου (s)
1	-0.0667	-	-	15
2	$-0.313 \pm 1.21 i$	0.25	0.1989	-
3	-0.4	-	-	2.5
4	$-0.833 \pm 0.893 i$	0.682	0.1942	-
5	-4.64	-	-	0.2155
6	$-8.25 \pm 1.01 i$	0.993	1.3226	-
7	-10	-	-	0.1
8	-20.1	-	-	0.05

Υπάρχει και μια ακόμα ιδιοτιμή που σε κάθε περίπτωση είναι μηδενική και αντιστοιχεί στο βρόχο ελέγχου υπερθέρμανσης που πάντα είναι ανενεργός στη μόνιμο κατάσταση και η οποία θα παραλείπεται. Η ταλάντωση που βλέπουμε στο Σχήμα 6.9 έχει περίοδο περίπου ίση με 5s οπότε συχνότητα περίπου ίση με 0.2Hz. Συνεπώς οφείλεται στη δεύτερη ιδιοτιμή, που έχει πολύ μικρό λόγο απόσβεσης, ίσο με 0.25. Στον Πίνακα 6.4 φαίνονται οι συντελεστές συμμετοχής των μεταβλητών κατάστασης στο δεύτερο ταλαντωτικό ρυθμό ενώ στο Σχήμα 6.10 φαίνονται οι αποκρίσεις των μεταβλητών W , W_f και T_{e2} οι οποίες επίσης παρουσιάζουν χαμηλή απόσβεση.



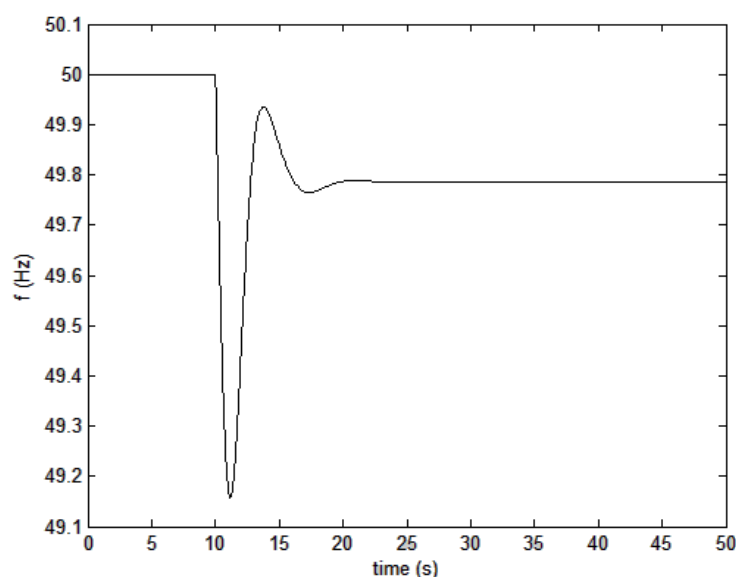
Σχήμα 6.10: Απόκριση W_f , W και T_{e2} στη διαταραχή του Σχήματος 6.8

**Πίνακας 6.4: Συνεισφορά μεταβλητών κατάστασης
στο δεύτερο ταλαντωτικό ρυθμό**

Συντομογραφία	Συντελεστής συμμετοχής μεταβλητής κατάστασης
F_c	0.128
N_1	0.574
N_2	1
P_c	0.149
P_{lp}	0.259
g	0.195
W_f	0.475

Όπως βλέπουμε από τον Πίνακα 6.4 ο δεύτερος ταλαντωτικός ρυθμός επηρεάζεται περισσότερο από το βρόχο ελέγχου φορτίου-συχνότητας οπότε χαρακτηρίζεται ως ρυθμός ελέγχου φορτίου-συχνότητας. Ο μικρός λόγος απόσβεσης οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο σύστημα ρύθμισης και διανομής του καυσίμου και τη χρονική σταθερά T_f . Σε μια μεταβολή του φορτίου στον αεριοστρόβιλο απλού άξονα ο ρυθμιστής στροφών δίνει ανάλογο σήμα ώστε ο στρόβιλος ισχύος να παραγάγει την απαιτούμενη ισχύ αλλά στη διάταξη διπλού άξονα πρέπει πρώτα να δοθεί καύσιμο στην αεριογόνο, να παραχθούν τα ανάλογα καυσάερια (περισσότερα και υψηλότερης θερμοκρασίας σε αύξηση του φορτίου) και έτσι να ανταποκριθεί στη μεταβολή της ισχύος. Για αυτό το λόγο είναι απαραίτητο το σύστημα καυσίμου να είναι ταχύτερο και η χρονική σταθερά του συστήματος να είναι μικρότερη από $T_f = 0.4s$ που έχουμε θέσει στον αεριοστρόβιλο απλού άξονα. Επιλέγουμε

λοιπόν μια τιμή $T_f=0.1s$. Η απόκριση συχνότητας για την τιμή $T_f=0.1s$ και για την ίδια διαταραχή φαίνεται στο Σχήμα 6.11 και είναι πολύ καλύτερη αφού οι ταλαντώσεις αποσβένονται ταχύτερα και η μεταβατική υποσυχνότητα περιορίζεται σημαντικά.



Σχήμα 6.11: Απόκριση συχνότητας στη διαταραχή του Σχήματος 6.8 με $T_f=0.1s$

Στον Πίνακα 6.5 παρουσιάζονται οι ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης για το ίδιο φορτίο (0.8 αμ) και για $T_f=0.1s$.

Πίνακας 6.5: Ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης για $T_f=0.1s$

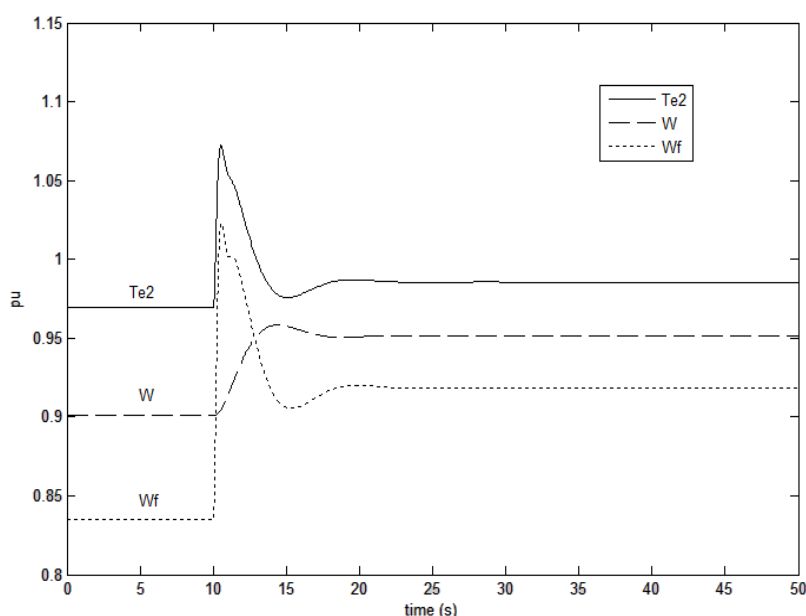
a/a	Ιδιοτιμή	Λόγος απόσβεσης	Συχνότητα (Hz)	Σταθερά χρόνου (s)
1	-0.0667	-	-	15
2	$-0.505 \pm 0.892 i$	0.492	0.1623	-
3	-0.4	-	-	2.5
4	$-1.38 \pm 1.57 i$	0.662	0.3326	-
5	-4.6	-	-	0.217
6	$-11.11 \pm 4.12 i$	0.937	1.878	-
7	-10	-	-	0.1
8	-20.5	-	-	0.049

Η ταλάντωση που βλέπουμε στο Σχήμα 6.11 έχει περίοδο περίπου ίση με 6s οπότε και συχνότητα περίπου ίση με 0.166Hz. Συνεπώς οφείλεται στη δεύτερη ιδιοτιμή, που έχει πλέον καλύτερο λόγο απόσβεσης, ίσο με 0.492. Η απόσβεση είναι ικανοποιητική αλλά υπάρχει περιθώριο βελτίωσης της υποσυχνότητας. Στον Πίνακα 6.6 φαίνονται οι συνεισφορές των μεταβλητών κατάστασης στο δεύτερο ταλαντωτικό ρυθμό. Η κύρια συνεισφορά προέρχεται από τη μεταβλητή της ταχύτητας της αεριογόνου οπότε ο ρυθμός χαρακτηρίζεται ως ρυθμός ελέγχου ταχύτητας αεριογόνου. Στο Σχήμα 6.12 φαίνονται οι

αποκρίσεις των μεταβλητών W_f , W και T_{e2} και οι καλύτερες αποσβέσεις σε σχέση με πριν (Σχήμα 6.10).

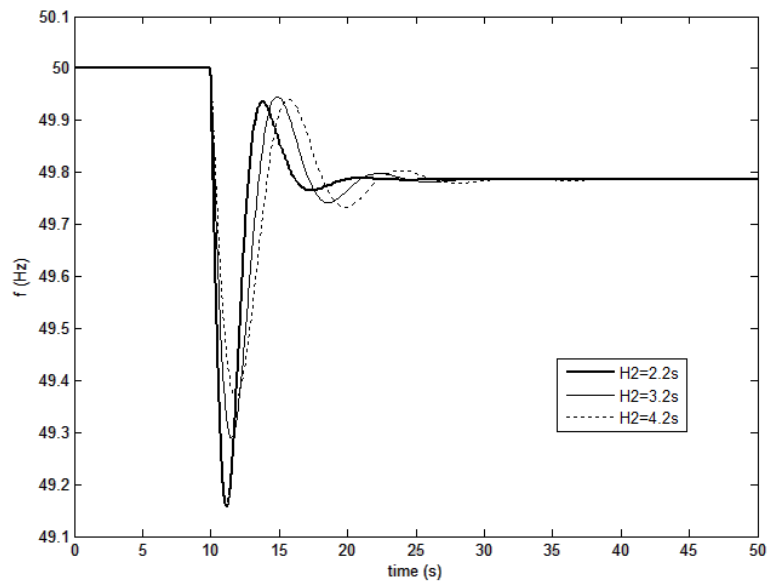
Πίνακας 6.6: Συνεισφορά μεταβλητών κατάστασης στο δεύτερο ταλαντωτικό ρυθμό

Συντομογραφία	Συντελεστής συμμετοχής μεταβλητής κατάστασης
N_1	1
N_2	0.684
P_c	0.224
P_{lp}	0.153
g	0.476



Σχήμα 6.12: Απόκριση W_f , W και T_{e2} στη διαταραχή του Σχήματος 6.8 για $T_f=0.1s$

Η μεγάλη μεταβατική βύθιση της συχνότητας οφείλεται στη μειωμένη αδράνεια του άξονα στροβίλου ισχύος-γεννήτριας (σε σχέση με τον αεριοστρόβιλο απλού άξονα επειδή στον αεριοστρόβιλο διπλού άξονα ο συμπιεστής που συνεισφέρει σημαντικά στην αδράνεια βρίσκεται σε ξεχωριστό άξονα). Για να μειωθεί η μεταβατική βύθιση της συχνότητας σε περίπτωση που ο αεριοστρόβιλος διπλού άξονα λειτουργεί τροφοδοτώντας ένα απομονωμένο φορτίο (όπως στην προσομοίωση που κάνουμε) εξετάζουμε την επίδραση της αύξησης της αδράνειας του άξονα της γεννήτριας. Η αύξηση της αδράνειας μπορεί να γίνει με την προσθήκη ενός σφονδύλου στον άξονα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 6.13, για την ίδια διαταραχή (Σχήμα 6.8).



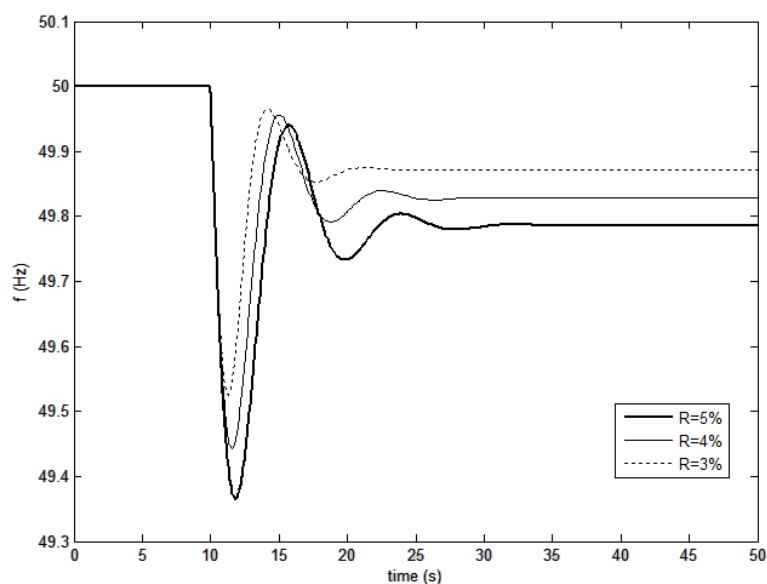
Σχήμα 6.13: Απόκριση συχνότητας για διάφορες αδράνειες H_2

Όπως βλέπουμε στο Σχήμα 6.13 όσο αυξάνεται η αδράνεια του άξονα της γεννήτριας τόσο μικραίνει η αρχική μεταβατική υποσυχνότητα αλλά και η απόσβεση. Αυτό φαίνεται και από τις ιδιοτιμές για $H_2=4.2s$ (Πίνακας 6.7). Η ταλάντωση οφείλεται στη δεύτερη ιδιοτιμή, με συχνότητα 0.1253Hz (αφού η περίοδος της ταλάντωσης είναι περίπου 8s) με λόγο απόσβεσης 0.317.

Πίνακας 6.7: Ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης για $T_f=0.1s$ και $H_2=4.2s$

a/a	Ιδιοτιμή	Λόγος απόσβεσης	Συχνότητα (Hz)	Σταθερά χρόνου (s)
1	-0.0667	-	-	15
2	$-0.249 \pm 0.747 i$	0.317	0.1253	-
3	-0.4	-	-	2.5
4	$-2.08 \pm 0.201 i$	0.995	0.3326	-
5	-4.57	-	-	0.219
6	$-10.8 \pm 3.26 i$	0.957	1.7825	-
7	-10	-	-	0.1
8	-20.3	-	-	0.049

Εξαιτίας της χαμηλής απόσβεσης στην περίπτωση προσθήκης σφονδύλου και αύξησης της αδράνειας του άξονα της γεννήτριας πρέπει να επανασχεδιαστεί ο ρυθμιστής στροφών (για απομονωμένη λειτουργία). Στο Σχήμα 6.14 φαίνεται η απόκριση συχνότητας για διάφορες τιμές του στατισμού, με αδράνεια $H_2=4.2s$. Όσο μειώνεται ο στατισμός μειώνεται η μεταβατική υποσυχνότητα και αυξάνεται η απόσβεση όπως φαίνεται και από τις ιδιοτιμές για στατισμό $R=3\%$ (Πίνακας 6.8).

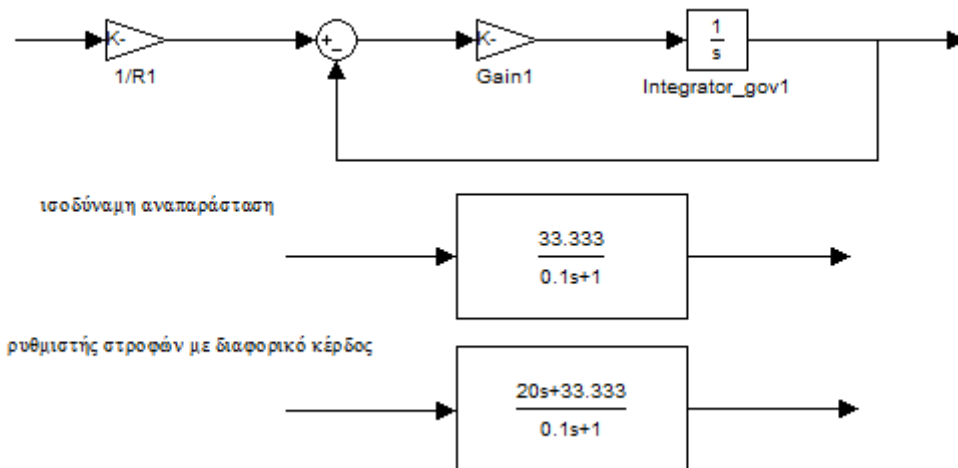


Σχήμα 6.14: Απόκριση συχνότητας για διάφορες τιμές στατισμού

Πίνακας 6.8: Ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης για $T_f=0.1s$ και $H_2=4.2s$ και $R=3\%$

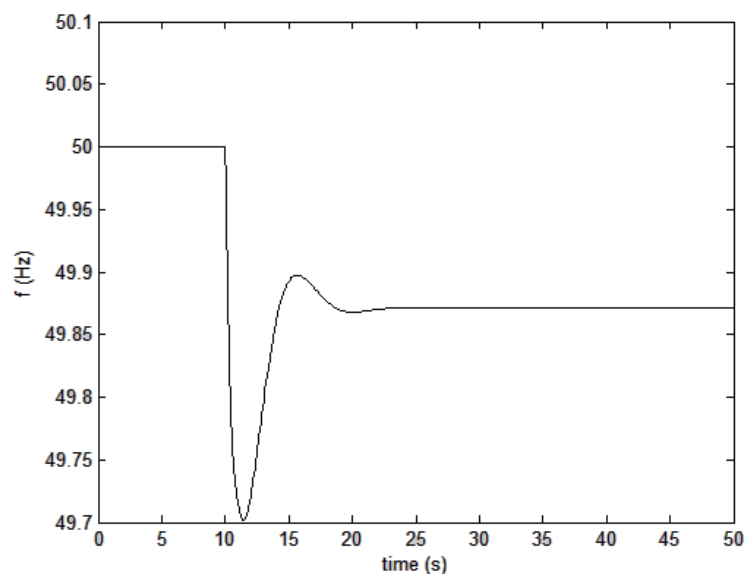
a/a	Ιδιοτιμή	Λόγος απόσβεσης	Συχνότητα (Hz)	Σταθερά χρόνου (s)
1	-0.0667	-	-	15
2	$-0.428 \pm 0.884 i$	0.436	0.1564	-
3	-0.4	-	-	2.5
4	$-1.56 \pm 1.35 i$	0.756	0.3279	-
5	-4.6	-	-	0.217
6	$-11 \pm 3.93 i$	0.942	1.8621	-
7	-10	-	-	0.1
8	-20.4	-	-	0.049

Τελικά η απόκριση με τις νέες τιμές του στατισμού και της αδράνειας είναι πολύ καλύτερη. Κρατώντας αυτές τις τιμές, που συνοψίζονται στον Πίνακα 6.10, μπορούμε να κάνουμε μια ακόμα βελτίωση στο ρυθμιστή στροφών μετατρέποντάς τον από αναλογικό σε αναλογικό-διαφορικό ρυθμιστή. Στο Σχήμα 6.15 φαίνεται ο ρυθμιστής στροφών που έχουμε ήδη περιγράψει, η ισοδύναμη παράστασή του με συνάρτηση μεταφοράς (για στατισμό 3% και χρονική σταθερά 0.1s) και η εισαγωγή του διαφορικού κέρδους. Το διαφορικό κέρδος μεταβάλλει το σήμα του ρυθμιστή στροφών ανάλογα με την παράγωγο, δηλαδή ανάλογα με το ρυθμό μεταβολής της συχνότητας, βελτιώνοντας την απόκριση συχνότητας αφού για παράδειγμα σε μια απότομη πτώση της συχνότητας ο ρυθμιστής θα ανταποκριθεί ταχύτερα. Για διαφορικό κέρδος του ρυθμιστή επιλέγεται η τιμή 20.



Σχήμα 6.15: Ρυθμιστής στροφών με διαφορικό κέρδος

Με την τροποποίηση του ρυθμιστή στροφών η απόκριση συχνότητας φαίνεται στο Σχήμα 6.16. Η μεταβατική υποσυχνότητα περιορίζεται σημαντικά στην τιμή των 49.7Hz ενώ η ταλάντωση αποσβένεται γρήγορα. Οι ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης στην περίπτωση αυτή φαίνονται στον Πίνακα 6.9.



Σχήμα 6.16: Απόκριση συχνότητας για $T_f=0.1s$, $H_2=4.2$, $R=3\%$ και διαφορικό κέρδος 20.

Πίνακας 6.9: Ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης για $T_f=0.1s$, $H_2=4.2$, $R=3\%$ και διαφορικό κέρδος 20

a/a	Ιδιοτιμή	Λόγος απόσβεσης	Συχνότητα (Hz)	Σταθερά χρόνου (s)
1	-0.0667	-	-	15
2	$-0.434 \pm 0.695 i$	0.53	0.1303	-
3	-0.4	-	-	2.5
4	$-3.38 \pm 5.23 i$	0.543	0.9915	-
5	-4.64	-	-	0.2155
6	$-18.8 \pm 4.84 i$	0.968	3.0876	-
7	-10	-	-	0.1
8	-1.16	-	-	0.862

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.16 η περίοδος της ταλάντωσης είναι περίπου 7.5s οπότε προκαλείται από το δεύτερο ταλαντωτικό ρυθμό με συχνότητα 0.1303Hz. Ο λόγος απόσβεσης είναι πλέον 0.53, βελτιωμένος σε σχέση με πριν. Στον Πίνακα 6.10 συνοψίζουμε τις μεταβολές που κάναμε.

Πίνακας 6.10: Τροποποιήσεις μοντέλου

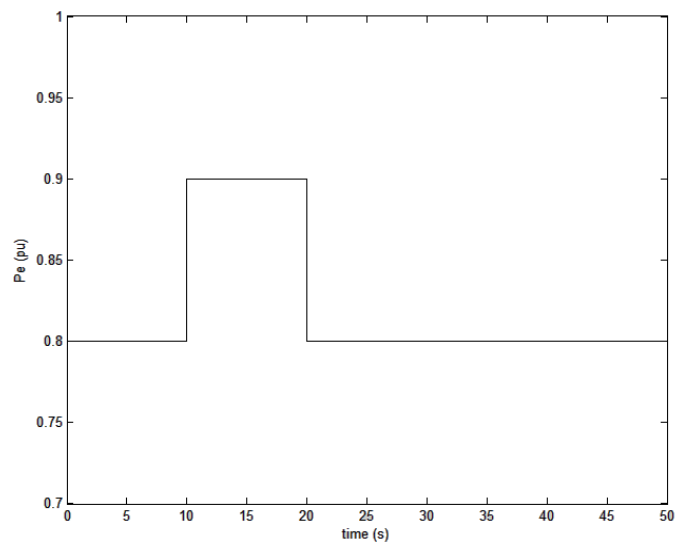
Τροποποίηση	Αρχική Τιμή	Τελική Τιμή
Μείωση σταθεράς T_f	0.4s	0.1s
Αλλαγή ανηγμένης σταθεράς αδράνειας H_2	2.2s	4.2s
Αλλαγή στατισμού	5%	3%
Εισαγωγή διαφορικού κέρδους στο ρυθμιστή στροφών	0	20

6.3 Προσομοίωση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

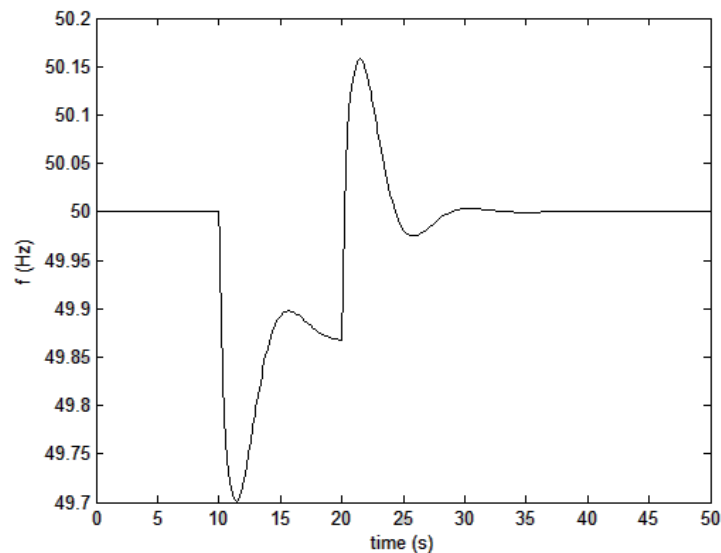
Με βάση το μοντέλο και τις τροποποιήσεις που παρουσιάσαμε θα κάνουμε την προσομοίωση μερικών ακόμα διαταραχών. Θα δούμε την απόκριση του αεριοστροβίλου στη μεταβολή του φορτίου που φαίνεται στο Σχήμα 6.17. Η απόκριση συχνότητας φαίνεται στο Σχήμα 6.18 και των μεταβλητών N_1 , W_f και T_{e2} στο Σχήμα 6.19. Η μεταβατική υποσυχνότητα είναι ίση με 0.3Hz και η διαταραχή αποσβένεται γρήγορα ενώ πριν η συχνότητα ισορροπήσει η διακοπή της διαταραχής προκαλεί μια μεταβατική υπερσυχνότητα περίπου 0.3Hz λόγω της απότομης μείωσης του φορτίου.

Στο Σχήμα 6.19 βλέπουμε ότι η ταχύτητα της αεριογόνου έχει ομαλή απόκριση και στην αρχή αυξάνεται για να αυξηθεί η ροή μάζας του αέρα ώστε να ανταποκριθεί ο στρόβιλος ισχύος στην αύξηση του φορτίου. Όταν η διαταραχή διακόπτεται επιστρέφει

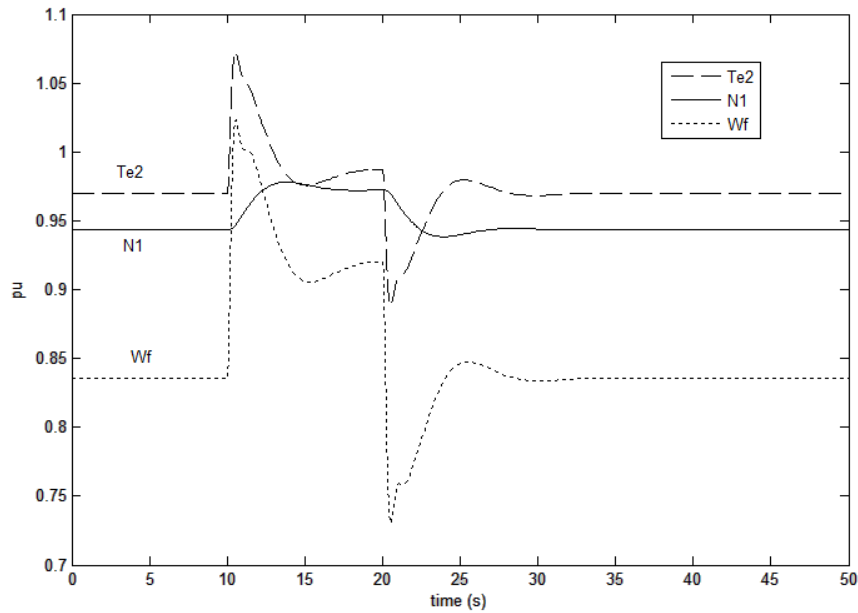
στην αρχική της τιμή. Η ροή του καυσίμου έχει παρόμοια απόκριση με τη θερμοκρασία των καυσαερίων. Το καύσιμο και η θερμοκρασία αυξάνονται απότομα αλλά η αύξηση της ροής μάζας αέρα αυξάνει την παραγόμενη ισχύ μειώνοντας την απαίτηση για καύσιμο και ρίχνοντας τη θερμοκρασία. Όπως είδαμε στο Σχήμα 6.12 η θερμοκρασία των καυσαερίων και η ροή του καυσίμου θα ισορροπούσαν σε μεγαλύτερη από την αρχική τιμή αν η διαταραχή ήταν μόνιμη. Λόγω της διακοπής της η απαίτηση για φορτίο μειώνεται οπότε και πέφτει η ροή του καυσίμου και η θερμοκρασία των καυσαερίων.



Σχήμα 6.17: Βηματική διαταραχή (παλμός) του φορτίου

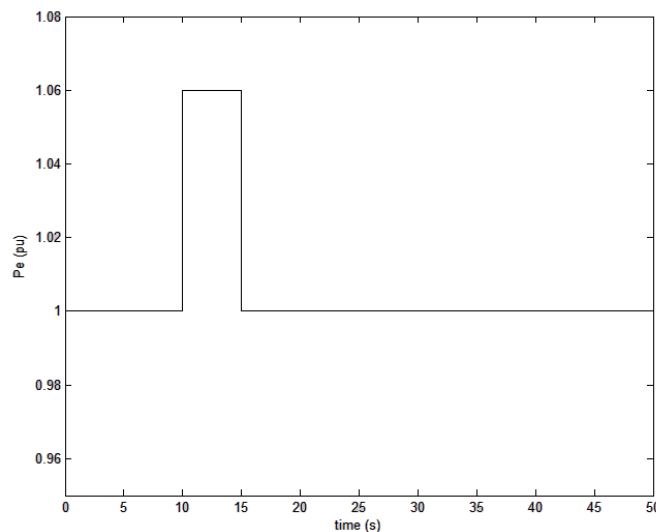


Σχήμα 6.18: Απόκριση συχνότητας στη διαταραχή του Σχήματος 6.17

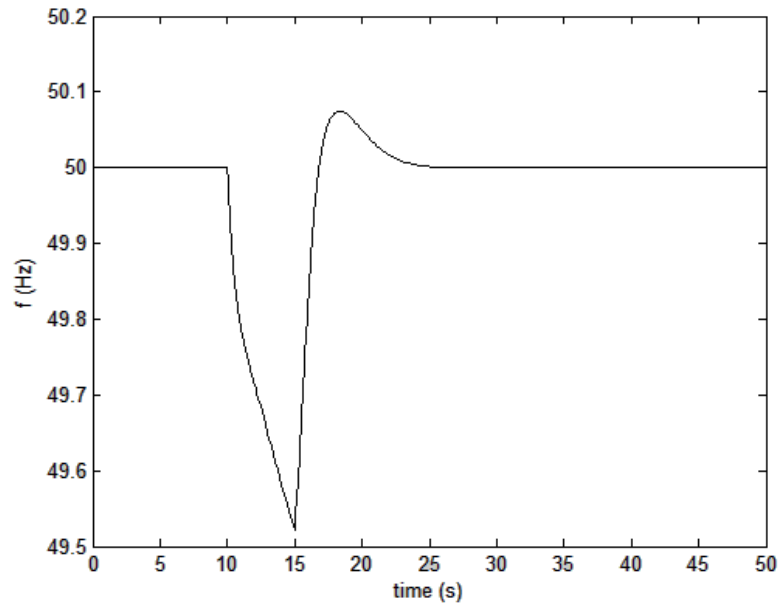


Σχήμα 6.19: Απόκριση των μεταβλητών W_f , N_1 και T_{e2} στη διαταραχή του Σχήματος 6.17

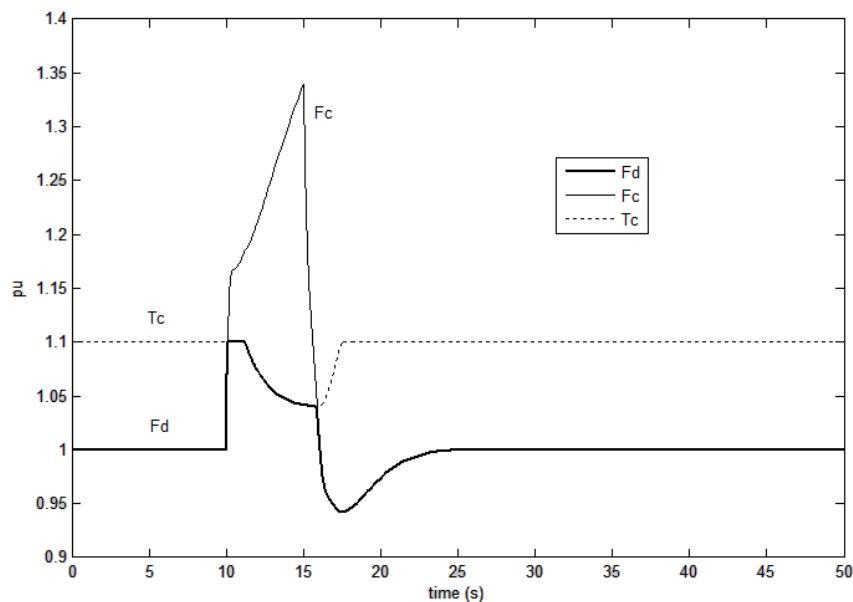
Όσο πιο κοντά στο ονομαστικό φορτίο λειτουργεί η μονάδα τόσο πιο εύκολο είναι να παρουσιαστεί υπερθέρμανση και να μπει σε λειτουργία ο αντίστοιχος βρόχος υπερθέρμανσης περιορίζοντας τις δυνατότητες απόκρισης της μονάδας. Σε μια αύξηση του φορτίου πάνω από το ονομαστικό (Σχήμα 6.20) ενεργοποιείται ο βρόχος υπερθέρμανσης και το σήμα του βρόχου αυτού ορίζει τη ζήτηση του καυσίμου και όχι ο ρυθμιστής στροφών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η μονάδα να τείνει να αποσυγχρονιστεί και αυτό γίνεται σε μια διαταραχή μεγαλύτερης διάρκειας. Στο Σχήμα 6.21 φαίνεται η απόκριση της συχνότητας και στο Σχήμα 6.22 φαίνονται τα σήματα T_c , F_c και F_d . Η ζήτηση του καυσίμου ορίζεται όπως φαίνεται από το σήμα T_c κατά τη διαταραχή και δε μπορεί να αυξηθεί όπως απαιτείται για τη διατήρηση των στροφών και για αυτό το λόγο ο αεριοστρόβιλος τείνει να αποσυγχρονιστεί.



Σχήμα 6.20: Βηματική διαταραχή (παλμός) του φορτίου



Σχήμα 6.21: Απόκριση συχνότητας στη διαταραχή του Σχήματος 6.20

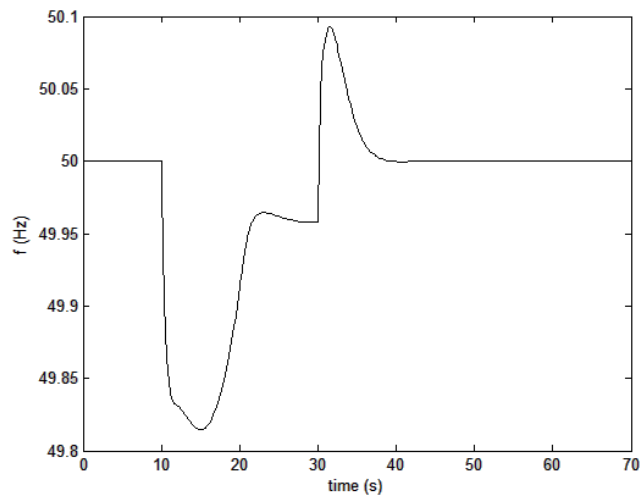


Σχήμα 6.22: Τιμές των T_c , F_c και F_d στη διαταραχή του Σχήματος 6.20

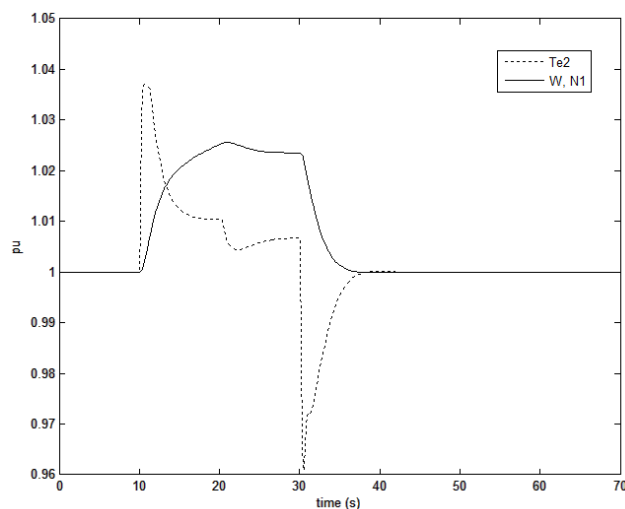
Ένα πλεονέκτημα του αεριοστροβίλου διπλού άξονα είναι ότι μπορεί να λειτουργήσει σε ελαφρώς υψηλότερο φορτίο (από το ονομαστικό) διότι η θερμοκρασία μπορεί να μην αυξηθεί πολύ λόγω της αεριογόνου. Η θερμοκρασία στον αεριοστροβίλο απλού άξονα αυξάνεται για πολύ μικρή τιμή του φορτίου πάνω από το ονομαστικό αφού η ροή του αέρα δε μπορεί να αυξηθεί, αντιθέτως μειώνεται ελαφρώς λόγω της πτώσης της συχνότητας. Στον αεριοστροβίλο διπλού άξονα η αεριογόνος μπορεί να επιταχυνθεί αυξάνοντας τη ροή του αέρα και μειώνοντας τη θερμοκρασία. Αυτό σημαίνει ότι ίδια τελική ανά μονάδα θερμοκρασία καυσασερίων (σε μόνιμο κατάσταση) αντιστοιχεί σε υψηλότερο φορτίο λόγω της αύξησης της ροής μάζας του αέρα. Για το λόγο αυτό ο βρόχος υπερθέρμανσης ενεργοποιείται δυσκολότερα στον αεριοστροβίλο διπλού άξονα αφού υπάρχει περιθώριο αύξησης της ροής του αέρα. Βέβαια πρέπει να ληφθεί υπόψη η

αντοχή της αεριογόνου σε αυξημένη ταχύτητα και η ικανότητα ευσταθούς και ασφαλούς λειτουργίας του συμπιεστή. Δηλαδή δεν θα είναι επιτρεπτή η λειτουργία σε τέτοιες συνθήκες για μεγάλο διάστημα. Για αυτό το λόγο η διαταραχή που επιβάλλουμε είναι παροδική και όχι μόνιμη. Η απόκριση συχνότητας σε μια βηματική αύξηση του φορτίου στα 10s από το ονομαστικό φορτίο στο 1.05 αμ για χρονικό διάστημα 20s φαίνεται στο Σχήμα 6.23.

Στο Σχήμα 6.24 φαίνεται η απόκριση της ροής μάζας αέρα (που είναι ίδια με της ταχύτητας της αεριογόνου αφού τα πτερύγια εισόδου είναι πλήρως ανοιχτά) και η θερμοκρασία των καυσαερίων. Για φορτίο 0.05 αμ άνω του ονομαστικού η θερμοκρασία δεν αυξάνεται αρκετά λόγω της αύξησης της ροής του αέρα στη μόνιμο κατάσταση. Έτσι δεν ενεργοποιείται ο βρόχος υπερθέρμανσης και η μονάδα μπορεί και ανταποκρίνεται στο αυξημένο φορτίο. Αυτό γίνεται όπως φαίνεται από το Σχήμα 6.24 από την αύξηση της ταχύτητας της αεριογόνου και συνεπακόλουθα της ροής μάζας του αέρα.



Σχήμα 6.23: Απόκριση συχνότητας σε βηματική αύξηση του φορτίου από 1αμ σε 1.05 αμ στο διάστημα 10-30s



Σχήμα 6.24: Απόκριση των W, N₁ και T_{e2} σε βηματική αύξηση του φορτίου από 1αμ σε 1.05 αμ στο διάστημα 10-30s

Κεφάλαιο 7^ο: Συμπεράσματα και προοπτικές

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μετά από την παρουσίαση του απαραίτητου θεωρητικού υπόβαθρου θερμοδυναμικής και θερμικών στροβιλομηχανών αναπτύξαμε το μοντέλο αεριοστροβίλου απλού άξονα με βάση τη βιβλιογραφία. Μετά την υλοποίηση του μοντέλου απλού αεριοστροβίλου αναπτύξαμε μια μέθοδο βελτίωσης της απόκρισής του μέσω ενός αεροφυλακίου στο 5^ο κεφάλαιο και με βάση το απλό μοντέλο υλοποιήσαμε ένα μοντέλο αεριοστροβίλου διπλού άξονα στο 6^ο κεφάλαιο. Στην πρώτη ενότητα αυτού του κεφαλαίου παρουσιάζουμε τα συμπεράσματα από την ανάπτυξη και προσομοίωση των μοντέλων για απομονωμένη λειτουργία των αεριοστροβιλικών μονάδων και στη δεύτερη τις προοπτικές για περαιτέρω έρευνα στη συγκεκριμένη περιοχή.

7.1 Συμπεράσματα και συμβολή

7.1.1 Αεριοστρόβιλος απλού άξονα με αεροφυλάκιο

Στην εργασία αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Simulink ένα λεπτομερές μοντέλο αεριοστροβίλου απλού άξονα με αεροφυλάκιο. Αρχικά παρουσιάστηκε το μοντέλο αεριοστροβίλου απλού άξονα με βάση τη βιβλιογραφία. Αυτό το μοντέλο τροποποιήθηκε κατάλληλα ώστε να λειτουργεί με την προσθήκη ενός αεροφυλακίου αέρα που αποθηκεύει συμπιεσμένο αέρα ώστε να αυξάνεται μεταβατικά η ισχύς του, όταν αυτό απαιτηθεί. Αφού δόθηκαν το κατάλληλο θεωρητικό υπόβαθρο και οι αρχές λειτουργίας του, το μοντέλο αεριοστροβίλου απλού άξονα με αεροφυλάκιο υλοποιήθηκε στο Simulink.

Αφού περιγράψαμε και υλοποιήσαμε τις διατάξεις ελέγχου και τον τρόπο λειτουργίας του αεροφυλακίου και τις απαραίτητες τροποποιήσεις στο μοντέλο του αεριοστροβίλου επιλέξαμε τις παραμέτρους του μοντέλου. Να τονίσουμε ότι το μοντέλο αναπτύχθηκε με δύο θεωρήσεις, ότι η πίεση του αέρα που εξέρχεται από το αεροφυλάκιο προσαρμόζεται στην πίεση της κύριας ροής του αέρα στον αεριοστρόβιλο και ότι η εισροή του αέρα από το αεροφυλάκιο είναι αρκετά μικρή και δεν επηρεάζει τη λειτουργία του θαλάμου καύσης.

Όπως είδαμε στο 5^ο κεφάλαιο η προσθήκη ενός αεροφυλακίου σε έναν αεριοστρόβιλο απλού άξονα βελτιώνει σημαντικά τη δυναμική συμπεριφορά του. Συγκεκριμένα, σε μια βηματική αύξηση του φορτίου για ορισμένο διάστημα το αεροφυλάκιο δίνει άμεσα επιπλέον συμπιεσμένο αέρα και στην απότομη αύξηση του φορτίου ο αεριοστρόβιλος είναι σε θέση να αυξήσει ταχύτερα την ισχύ που παράγει και έτσι να περιοριστεί η μεταβατική υποσυχνότητα όταν ο σταθμός λειτουργεί αυτόνομα, όπως και η υπερακόντιση στην αύξηση της μηχανικής ισχύος του στροβίλου.

Στην περίπτωση μόνιμης αύξησης του φορτίου το αεροφυλάκιο πάλι συνεισφέρει σημαντικά μειώνοντας τη μεταβατική υποσυχνότητα, ενώ η συχνότητα μειώνεται σταδιακά μέχρι να εξαντληθεί ο αποθηκευμένος συμπιεσμένος αέρας στο αεροφυλάκιο. Αυτό έχει ως συνέπεια η συχνότητα να μειώνεται σε δύο στάδια και πιο ομαλά ενώ

δίνεται η δυνατότητα στο μεσοδιάστημα (μέχρι εξαντλήσεως του αέρα του αεροφυλακίου) να αναλάβουν άλλες ρυθμίζουσες μονάδες (εφόσον υπάρχουν) ή να γίνουν άλλες κατάλληλες ενέργειες.

Εκτός από τη δυνατότητα βελτίωσης της απόκρισης της συχνότητας σε απότομες διαταραχές, το αεροφυλάκιο μπορεί να αυξήσει μεταβατικά την παραγόμενη ισχύ ακόμα και πάνω από το ονομαστικό φορτίο. Σε περιόδους που δεν είναι απαραίτητο η μονάδα να λειτουργεί στο πλήρες φορτίο είναι δυνατόν να αποθηκεύεται ενέργεια στο αεροφυλάκιο υπό τη μορφή συμπιεσμένου αέρα και η ενέργεια αυτή να αποδίδεται σε στιγμές που απαιτείται αύξηση της ισχύος πάνω από το ονομαστικό φορτίο. Έτσι παρέχεται η δυνατότητα αυξημένης παραγωγής ισχύος για κάποιο χρονικό διάστημα χωρίς υπερδιαστασιολόγηση του εξοπλισμού και χωρίς τα προβλήματα των άλλων μεθόδων όπως η έγχυση νερού ή ατμού που έχει το πρόβλημα της πρόκλησης διάβρωσης στα πτερύγια του στροβίλου ή ο ψεκασμός εισόδου που εξαρτάται από τις συνθήκες του περιβάλλοντος.

Με το αεροφυλάκιο ο αεριοστροβίλος μπορεί να ανταποκρίνεται σε υψηλότερη ζήτηση φορτίου από το ονομαστικό για χρονικό διάστημα ανάλογο της χωρητικότητάς του. Αυτό γίνεται διότι η επιπλέον ροή αέρα αποτρέπει την υπερθέρμανση και έτσι δεν ενεργοποιείται ο βρόχος υπερθέρμανσης, η λειτουργία του οποίου, αν δεν υπήρχε το αεροφυλάκιο, θα καθόριζε τη ζήτηση του καυσίμου οδηγώντας τελικά τη μονάδα σε αδυναμία ανταπόκρισης στο φορτίο με αποτέλεσμα τη διακοπή λειτουργίας λόγω υποσυχνότητας. Άρα η επιπλέον ροή αέρα (από το αεροφυλάκιο) επιτρέπει στο στροβίλο να παράγει περισσότερη ισχύ μεταβατικά αφού δύναται να αυξηθεί η ροή του αέρα και να περιοριστεί η θερμοκρασία.

Σε μια ενδεχόμενη μείωση της συχνότητας του δικτύου ο αεριοστροβίλος αρχικά μειώνει την παραγόμενη ισχύ του λόγω της μείωσης της ροής του αέρα επιτείνοντας το πρόβλημα ρύθμισης της συχνότητας. Με την προσθήκη του αεροφυλακίου ο αεριοστροβίλος μπορεί αντίθετα να αυξήσει την παραγόμενη ισχύ του παρά την πτώση της συχνότητας του δικτύου και έτσι να συνεισφέρει στην ευστάθεια συχνότητας του δικτύου.

Ακόμα, εξετάσαμε την επίδραση μιας βραδύτερης απόκρισης του συστήματος του αεροφυλακίου. Όπως εξηγήσαμε στο 5^ο κεφάλαιο η πολύ απότομη αύξηση της ροής του αέρα ενδέχεται να προκαλέσει δυναμικά προβλήματα και αστάθεια στη φλόγα του θαλάμου καύσεως και για το λόγο αυτό δοκιμάσαμε να αυξήσουμε τη χρονική σταθερά απόκρισης του συστήματος ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα ενδεχόμενα προβλήματα. Όσο αυξάνεται η χρονική σταθερά είδαμε ότι η απόκριση της συχνότητας χειροτερεύει, συνεπώς το όφελος από το αεροφυλάκιο μειώνεται.

Σε γενικές γραμμές με το μοντέλο που αναπτύχθηκε στην εργασία έγινε φανερός ο τρόπος που το αεροφυλάκιο μπορεί να συμπεριληφθεί στο μοντέλο αεριοστροβίλου απλού άξονα με μερικές απλές τροποποιήσεις και έγινε δυνατόν να εκτιμηθούν τα πλεονεκτήματα της χρήσης του, τα οποία συνοπτικά αναφέραμε στην παράγραφο αυτή.

7.1.2 Αεριοστρόβιλος διπλού άξονα

Με βάση το μοντέλο του αεριοστροβίλου απλού άξονα υλοποιήσαμε το μοντέλο αεριοστροβίλου διπλού άξονα, με δύο στροβίλους, όπου η εκτόνωση του στροβίλου υψηλής πίεσης δίνει την απαιτούμενη ισχύ στο συμπιεστή και παράγει τα καυσαέρια ενώ η εκτόνωση του δεύτερου παράγει την ωφέλιμη ισχύ. Μετά την ανάπτυξη των θερμοδυναμικών εξισώσεων που περιγράφουν τη λειτουργία του στη μόνιμο κατάσταση περιγράψαμε τις αρχές ελέγχου του που είναι παρόμοιες με του αεριοστροβίλου απλού άξονα. Προσομοιώσαμε τη λειτουργία της αεριογόνου σχεδιάζοντας τον απαραίτητο ρυθμιστή της ταχύτητάς της και επιλέγοντας το κατάλληλο κέρδος. Τέλος, με βάση τη βιβλιογραφία και δομικές προσδιορίσαμε τις υπόλοιπες παραμέτρους του μοντέλου.

Κατά την προσομοίωση της λειτουργίας του αεριοστροβίλου διπλού άξονα διαπιστώσαμε ότι μερικές τροποποιήσεις είναι απαραίτητες για την ικανοποιητική απόκριση της συχνότητας της μονάδας (σε απομονωμένη λειτουργία) σε μεταβολές του φορτίου. Δείξαμε ότι για την ικανοποιητική λειτουργία του χρειάζεται ένα ταχύτερο σύστημα καυσίμου. Στον αεριοστρόβιλο διπλού άξονα για να αυξηθεί η παραγόμενη ισχύς χρειάζεται περισσότερος χρόνος διότι αφού δοθεί το σήμα για αύξηση της ζήτησης του καυσίμου πρέπει πρώτα να παραχθούν τα καυσαέρια και αυτά να εισέλθουν στο στρόβιλο ισχύος αυξάνοντας την παραγωγή του σε σχέση με τον αεριοστρόβιλο απλού άξονα όπου δεν παρεμβαίνει αυτό το ενδιάμεσο στάδιο αλλά υπάρχει μια μόνο εκτόνωση. Για αυτό το λόγο είναι αναγκαία η ύπαρξη ταχύτερου συστήματος καυσίμου. Έπειτα δείξαμε ότι λόγω της χαμηλής αδράνειας του άξονα στροβίλου ισχύος-γεννήτριας είναι αναγκαία (κατά την απομονωμένη λειτουργία που εξετάζουμε) η αύξηση της αδράνειας μέσω ενός σφονδύλου για παράδειγμα.

Εκτός από αυτές τις μετατροπές του μοντέλου τροποποιήσαμε το ρυθμιστή στροφών για να βελτιωθεί η απόσβεση των ταλαντώσεων και να περιοριστούν οι μεταβατικές υποσυχνότητες. Εκτός από την αλλαγή του κέρδους του ρυθμιστή στροφών εισαγάγαμε και ένα διαφορετικό κέρδος, πέραν του αναλογικού. Με τις μετατροπές αυτές η απόκριση συχνότητας του αεριοστροβίλου βελτιώθηκε σημαντικά όπως δείξαμε στο 6^ο κεφάλαιο.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του αεριοστροβίλου διπλού άξονα είναι η ύπαρξη της αεριογόνου. Η αυξομείωση της ταχύτητάς της, σε αντίθεση με τη σταθερή ταχύτητα (και συχνότητα του δικτύου) του απλού αεριοστροβίλου, επιτρέπει τη βελτίωση της απόδοσης σε μερικά φορτία αφού μειώνεται η κατανάλωση του συμπιεστή λόγω της χαμηλότερης ταχύτητας. Επίσης δίνεται η δυνατότητα μεγαλύτερης παροχής αέρα σε σχέση με τον απλό αεριοστρόβιλο που η ταχύτητα είναι σταθερή (λόγω συχνότητας δικτύου) και έτσι ο αεριοστρόβιλος διπλού άξονα μπορεί μεταβατικά να λειτουργήσει σε φορτίο υψηλότερο του ονομαστικού αφού η υπερθέρμανση υφίσταται σε υψηλότερο φορτίο λόγω της μεγαλύτερης παροχής μάζας αέρα όπως δείξαμε στο 6^ο κεφάλαιο. Άρα ο αεριοστρόβιλος διπλού άξονα έχει το πλεονέκτημα της αύξησης της παροχής αέρα που καθιστά δυσκολότερη την υπερθέρμανση και έτσι έχει μια σημαντική ικανότητα υπερφόρτισης για κάποιο χρονικό διάστημα, ανάλογα με τις αντοχές του εξοπλισμού. Αντίθετα, στον αεριοστρόβιλο απλού άξονα η υπερθέρμανση είναι πολύ πιο εύκολη και ο βρόχος ελέγχου

υπερθέρμανσης ενεργοποιείται πολύ πιο εύκολα περιορίζοντας τη λειτουργία της μονάδας.

Επίσης μια μεταβολή στη συχνότητα του δικτύου δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τη μονάδα αφού δεν επηρεάζει την παροχή του αέρα και του καυσίμου όπως στον αεριοστρόβιλο απλού άξονα. Σε μια πτώση της συχνότητας του δικτύου που η μονάδα χρειάζεται να παραγάγει επιπλέον ισχύ στον απλό αεριοστρόβιλο η πτώση αυτή προκαλεί μείωση της ροής του αέρα και του καυσίμου, σε αντίθεση με τον αεριοστρόβιλο διπλού άξονα όπου η παροχή αέρα είναι ανεξάρτητη της συχνότητας.

Τελικά το μοντέλο αεριοστροβίλου διπλού άξονα που αναπτύξαμε και υλοποιήσαμε λειτουργεί ικανοποιητικά μετά τις κατάλληλες τροποποιήσεις. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του φάνηκαν κατά την προσομοίωση της λειτουργίας και συνοψίστηκαν παραπάνω. Το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της λειτουργίας ενός αεριοστροβίλου διπλού άξονα σε απομονωμένη λειτουργία ή σε ένα σύστημα προσομοίωσης περισσότερων μονάδων.

7.2 Προοπτικές για περαιτέρω έρευνα

Τα μοντέλα που αναπτύξαμε μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μοντελοποίηση αεριοστροβίλων διπλού άξονα ή απλού άξονα με χρήση αεροφυλακίου κατά τη μελέτη ευστάθειας συχνότητας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Στην εργασία αυτή εξετάσαμε μόνο την απομονωμένη λειτουργία μονάδων. Τα μοντέλα είναι εύκολο να χρησιμοποιηθούν σε μελέτες συστημάτων.

Στο μοντέλο του αεροφυλακίου κάναμε δύο παραδοχές. Η μια έχει να κάνει με την παραδοχή ότι η ροή του αέρα που εξέρχεται από αυτό είναι ανάλογη της υπερπίεσης, δηλαδή της ποσότητας του αέρα στο αεροφυλάκιο. Στην πραγματικότητα η ροή είναι ανάλογη της διαφοράς πίεσης μεταξύ του αέρα στο αεροφυλάκιο και στην έξοδο του συμπιεστή όπου η επιπλέον ροή αέρα εγχέεται. Εμείς θεωρήσαμε ότι με κάποιο τρόπο (για παράδειγμα με μεταβλητό άνοιγμα της βαλβίδας του αεροφυλακίου) η πίεση του αέρα του αεροφυλακίου προσαρμόζεται στην πίεση της εξόδου του συμπιεστή. Μια πιθανή προοπτική είναι να διερευνηθεί ο τρόπος με τον οποίο υλοποιείται στην πράξη η εξάρτηση αυτή, δηλαδή με ποιο τρόπο οι πιέσεις προσαρμόζονται (μειώνεται η πίεση του αεροφυλακίου με άνοιγμα της βαλβίδας) ώστε να είναι ίσες.

Ένα ακόμα θέμα προς διερεύνηση είναι η μελέτη του ρυθμού μεταβολής της ροής αέρα από το αεροφυλάκιο. Όπως έχουμε αναφέρει η ροή του αέρα πρέπει να μεταβάλλεται με ρυθμό εντός κάποιου ορίου και εμείς θεωρήσαμε ότι λόγω της μικρής ροής αέρα από το αεροφυλάκιο δεν δημιουργούνται προβλήματα. Μπορεί να εξεταστεί η επίδραση περιορισμών στο ρυθμό αυξομείωσης της ροής μέσω της αύξησης της χρονικής σταθεράς του μηχανισμού του αεροφυλακίου ή της χρήσης ενός περιοριστή στο ρυθμό μεταβολής της εξόδου του αεροφυλακίου.

Επίσης, μια πιθανή βελτίωση του μοντέλου θα μπορούσε να προέλθει από την πρόβλεψη για ομαλότερο κλείσιμο του αεροφυλακίου. Το αεροφυλάκιο χρειάζεται να αποδίδει άμεσα ροή αέρα κατά την απότομη αύξηση του φορτίου αλλά όταν εξαλείφονται

οι διαταραχές ή όταν το αεροφυλάκιο εξαντλείται το σύστημα ελέγχου μπορεί να βελτιωθεί ώστε να αποφεύγονται οι μεγάλες και απότομες αυξήσεις της συχνότητας λόγω της μείωσης του φορτίου.

Στο μοντέλο του αεριοστροβίλου διπλού άξονα μπορεί να αναπτυχθεί ένα πιο λεπτομερές μοντέλο που θα περιγράφει την ενεργειακή μετατροπή. Η χρήση εξισώσεων είναι η πιο απλή μέθοδος για εύκολη, γρήγορη και καθολική προσομοίωση αεριοστροβίλων διπλού άξονα αλλά μπορεί να μελετηθεί η ανάπτυξη μοντέλων με τη χρήση look-up tables και χαρτών χαρακτηριστικών συμπιεστών και στροβίλων. Επίσης μπορεί να γίνει μια λεπτομερέστερη σχεδίαση του ρυθμιστή στροφών αλλά και του τρόπου ρύθμισης των πτερυγίων εισόδου-ταχύτητας αεριογόνου.

Τέλος, όπως προαναφέρθηκε μια ακόμα προοπτική είναι η χρησιμοποίηση των μοντέλων αυτών σε ένα σύστημα περισσότερων μονάδων για να μελετηθεί η συμπεριφορά τους και η ευστάθεια συχνότητας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Βιβλιογραφία

- [1] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, “Εισαγωγή στα ΣΗΕ”, Αθήνα 2001
- [2] Β. Παπαδιάς, Κ. Βουρνάς, “Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας και Έλεγχος Συχνότητας και Τάσεως”, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1991
- [3] Κ. Μαθιουδάκης, “Λειτουργία αεριοστροβίλων και ατμοστροβίλων”, Αθήνα 1997
- [4] Κ. Βουρνάς, “Ευστάθεια Μονίμου Καταστάσεως”, Αθήνα 2004
- [5] Β. Νομικός, “Συστηματική Σχεδίαση Σταθεροποιητών σε Συστήματα με Σύγχρονες και Ασύγχρονες Μηχανές”, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 2005
- [6] Ι. Μάντζαρης, “Ανάλυση δυναμικής συμπεριφοράς σταθμού συνδυασμένου κύκλου”, Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2005
- [7] W. I. Rowen, “Simplified Mathematical Representations of Heavy Duty Gas Turbines”, Transactions ASME, vol. 105, pp.865-869, Oct 1983
- [8] N. Kakimoto, K. Baba, “Performance of Gas Turbine-Based Plants During Frequency Drops”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 18, No 3, August 2003
- [9] Κ. Παπαηλιού, Κ. Μαθιουδάκης, Κ. Γιαννάκογλου “Εισαγωγή στις θερμικές στροβιλομηχανές”, Αθήνα 2000
- [10] Κ. Ντελκίς, “Σημειώσεις Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας”
- [11] Στοιχεία θερμικών μονάδων ΔΕΗ ΑΕ, Διεύθυνση εκμετάλλευσης παραγωγής ΑΗΣ Χανίων
- [12] H Cohen, GFC Rogers, HHH Saravanamuttoo “Gas Turbine Theory” 4th edition 1995
- [13] “Ανάπτυξη μοντέλων για τη δυναμική προσομοίωση αυτόνομων νησιωτικών συστημάτων με παρουσία μονάδων ΑΠΕ και την εκτίμηση του ορίου ασφαλούς αιολικής διείσδυσης”, Ερευνητικό έργο για τη ΔΕΗ ΑΕ, 2008
- [14] Anthony Giampaolo “Gas Turbine Handbook: Principles and Practices” 3rd edition 2006
- [15] US Patent : 6.519.944 B2, 18/2/2003 “Method of generating a transient plant power boost in a gas turbine apparatus”
- [16] “Modeling of Gas Turbines and Steam Turbines in Combined-Cycle Power Plants”, CIGRE Technical Brochure, April 2003
- [17] GE Power Systems Brochure “GE Aeroderivative Gas Turbines - Design and Operating Features”
- [18] K. Karoui, “Simulation and Testing of the Dynamic Behavior of a 40MW Aeroderivative Gas Turbine Genset in Islanding Situation”, paper presented at Power-Gen Europe, Brussels, Belgium, May 29-31, 2001
- [19] Meherwan P. Boyce “Gas Turbine Engineering Handbook” 2nd edition 2002
- [20] Quasi Z. Al-Hamdani, Munzer S. Y. Ebaid, “Modeling and Simulation of a Gas Turbine Engine for Power Generation”, Journal of engineering for gas turbines and power, vol 128/311, April 2006

Παράρτημα Α: Αρχεία για την αρχικοποίηση του μοντέλου αεριοστροβίλου με αεροφυλάκιο

beginch.m

```
Pe=0.8;

nt=0.86;
nc=0.82;
Pr=11.5;
Tf0=1350;

T3=15;
T4=2.5;
T5=3.3;
Tt=0.4699;
K4=0.8;
K5=0.2;

H=6;
T_cd=0.2;
T_g=0.1;
R=0.06;
T_igv=1;
Fd_max=1.1;
Fd_min=0;
T_v=0.05;
T_f=0.4;

Tr1=0.939;
Ti=288;
Tc_max=1.1;
Tc_min=0;

Tcap=60;
Kch=0.6;
Tch=0.1;
Parx=0.05;
e=0.02;
nrf=-0.004;
nrc=0.004;
Nr=1.001;
Per=1.03;

gmax=1;
gmin=0.7333;

a=1+(Pr^0.2857-1)/nc;
b=1-(1-1/(Pr^0.2857))*nt;
K=1/(Tf0*(1-b)+Ti*(1-a));

Td0=a*Ti;
Te0=Tf0*b;
```

```

initch(Pe);

Td_pu=ans(1);
Tf_pu=ans(2);
Te_pu=ans(3);
Wf_pu=ans(4);
W_pu=ans(5);
g_pu=ans(5);

```

initch.m

```

function [arx]=initch(Pe)

nt=0.86;
nc=0.82;
Pr=11.5;

Ti=288;
R=0.06;
Tf0=1350;

a=1+(Pr^0.2857-1)/nc;
b=1-(1-1/(Pr^0.2857))*nt;
K=1/(Tf0*(1-b)+Ti*(1-a));

Td0=a*Ti;
Te0=Tf0*b;

e=Pe;

if (e>=0.85)

x0=[Td0/2;Tf0/2;Te0/2;0.7];
[Y]=fsolve('funch',x0,[],Ti,nc,nt,Pr,Tf0,Td0,K,e);

[arx]=[Y(1)/Td0 ; Y(2)/Tf0 ; Y(3)/Te0 ; Y(4) ; 1];

end

if (e<0.85)

x0=[Td0;Tf0;1;1];
[Y]=fsolve('funch2',x0,[],Ti,nc,nt,Pr,Tf0,Td0,K,Te0,e);

[arx]=[Y(1)/Td0 ; Y(2)/Tf0 ; 0.939 ; Y(4) ; Y(3)];

end

if (e<0.55)

x0=[Td0;Tf0;1;1];
[Y]=fsolve('funch1',x0,[],Ti,nc,nt,Pr,Tf0,Td0,K,e);

[arx]=[Y(1)/Td0 ; Y(2)/Tf0 ; Y(3)/Te0 ; Y(4) ; 0.7333];

```

```
end
function F=funch(x,Ti,nc,nt,Pr,Tf0,Td0,K,e)
```

funch.m

```
Td=x(1);
Tf=x(2);
Te=x(3);
Wf=x(4);
```

```
F = [Td-Ti*(1+((Pr*1)^0.2857-1)/nc);
Tf-Td-(Tf0-Td0)*(Wf/1);
(e/K)-1*(Tf-Te-Td+Ti);
Te-Tf*(1-(1-1/((Pr*1)^0.2857))*nt)];
```

funch1.m

```
function F=funch1(x,Ti,nc,nt,Pr,Tf0,Td0,K,e)
```

```
Td=x(1);
Tf=x(2);
Te=x(3);
Wf=x(4);
```

```
F = [Td-Ti*(1+((Pr*0.7333)^0.2857-1)/nc);
Tf-Td-(Tf0-Td0)*(Wf/0.7333);
(e/K)-0.7333*(Tf-Te-Td+Ti);
Te-Tf*(1-(1-1/((Pr*0.7333)^0.2857))*nt)];
```

funch2.m

```
function F=funch2(x,Ti,nc,nt,Pr,Tf0,Td0,K,Te0,e)
```

```
Td=x(1);
Tf=x(2);
W=x(3);
Wf=x(4);
```

```
F = [Td-Ti*(1+((Pr*W)^0.2857-1)/nc);
Tf-Td-(Tf0-Td0)*(Wf/W);
(e/K)-W*(Tf-0.939*Te0-Td+Ti);
0.939*Te0-Tf*(1-(1-1/((Pr*W)^0.2857))*nt)];
```

Παράρτημα Β: Αρχεία για την αρχικοποίηση μοντέλου αεριοστροβίλου διπλού άξονα

beginc.m

```
Pe=0.8;

nt1=0.88;
nt2=0.88;
nc=0.81;
Pt1=4.5;
Pt2=4;
Pc=18;
Ti=288;
R=0.03;
Ra=0.287;
Cpa=1.03;
Cpt=1.18;
Cpg=1.12;
n_tc=0.99;
n_gt=0.99;

T3=15;
T4=2.5;
T5=2.3;
K4=0.8;
K5=0.2;

H1=3.5;
H2=4.2;

gmax=1;
gmin=0.87;

T_cd=0.2;
T_g=0.1;
Tt=0.4699;
T_igv=1;
Fd_max=1.3;
Fd_min=0;
T_v=0.05;
T_f=0.1;
Tr=1.01;
K_igv=0.8;

a=1+((Pc)^(Ra/Cpa)-1)/nc;
b=1-nt1*(1-(1/Pt1)^(Ra/Cpt));
c=1-nt2*(1-(1/Pt2)^(Ra/Cpg));

T_e1=(Cpa/Cpt)*b*(a-1)*Ti/(n_tc*(1-b));
Tf0=(Cpa/Cpt)*(a-1)*Ti/(n_tc*(1-b));
Td0=a*Ti;
T_e2=(Cpa/Cpt)*b*c*(a-1)*Ti/(n_tc*(1-b));
```

```

Klp=1/(T_e1-T_e2);
Khp=1/(Cpg*n_gt*(T_e1-T_e2));

initc(Pe);

Td_pu=ans(1);
Tf_pu=ans(2);
T_e1_pu=ans(3);
T_e2_pu=ans(4);
Wf_pu=ans(5);
W_pu=ans(6);
Nl_pu=ans(7);
g_pu=ans(8);

```

initc.m

```

function [arx]=initc(Pe)

nt1=0.88;
nt2=0.88;
nc=0.81;
Pt1=4.5;
Pt2=4;
Pc=18;
Ti=288;
Ra=0.287;
Cpa=1.03;
Cpt=1.18;
Cpg=1.12;
n_tc=0.99;
n_gt=0.99;

K_igv=0.8;
R=0.03;

a=1+((Pc)^(Ra/Cpa)-1)/nc;
b=1-nt1*(1-(1/Pt1)^(Ra/Cpt));
c=1-nt2*(1-(1/Pt2)^(Ra/Cpg));

T_e1=(Cpa/Cpt)*b*(a-1)*Ti/(n_tc*(1-b));
Tf0=(Cpa/Cpt)*(a-1)*Ti/(n_tc*(1-b));
Td0=a*Ti;
T_e2=(Cpa/Cpt)*b*c*(a-1)*Ti/(n_tc*(1-b));

Klp=1/(T_e1-T_e2);
Khp=1/(Cpg*n_gt*(T_e1-T_e2));

e=Pe;

if (e>1)

x0=[Td0;Tf0;T_e1;T_e2;1;1];
[Y]=fsolve('func',x0,[],Ti,nc,nt1,nt2,Pc,Pt1,Pt2,Tf0,Td0,Klp,e);

```

```

g_pu=1;
N1_pu=Y(6);
[arx]=[Y(1)/Td0 ; Y(2)/Tf0 ; Y(3)/T_e1 ; Y(4)/T_e2 ; Y(5) ; Y(6) ; N1_pu
; g_pu];

elseif (e<=1)

x0=[Td0/2;Tf0/2;T_e1/2;T_e2/2;0.7;0.7];
[Y]=fsolve('func',x0,[],Ti,nc,nt1,nt2,Pc,Pt1,Pt2,Tf0,Td0,Klp,Ra,Cpt,Cpa,
Cpg,n_tc,e);

if (Y(6)<0.73)

x0=[Td0/2;Tf0/2;T_e1/2;T_e2/2;0.5];
[Y]=fsolve('func',x0,[],Ti,nc,nt1,nt2,Pc,Pt1,Pt2,Tf0,Td0,Klp,Ra,Cpt,Cpa,
Cpg,n_tc,e);

N1_pu=(K_igv-1+((K_igv-1)^2+4*K_igv*0.73)^0.5)/(2*K_igv);
g_pu=0.73/N1_pu;
[arx]=[Y(1)/Td0 ; Y(2)/Tf0 ; Y(3)/T_e1 ; Y(4)/T_e2 ; Y(5) ; 0.73 ; N1_pu
; g_pu];

else

N1_pu=(K_igv-1+((K_igv-1)^2+4*K_igv*Y(6))^0.5)/(2*K_igv);
g_pu=Y(6)/N1_pu;
[arx]=[Y(1)/Td0 ; Y(2)/Tf0 ; Y(3)/T_e1 ; Y(4)/T_e2 ; Y(5) ; Y(6) ; N1_pu
; g_pu];

end

end

```

func.m

```

function
F=func(x,Ti,nc,nt1,nt2,Pc,Pt1,Pt2,Tf0,Td0,Klp,Ra,Cpt,Cpa,Cpg,n_tc,e)

Td=x(1);
Tf=x(2);
Te1=x(3);
Te2=x(4);
Wf=x(5);
W=x(6);

F = [Td-Ti*(1+((Pc*W)^(Ra/Cpa)-1)/(nc));
Tf-Td-(Tf0-Td0)*(Wf/W);
n_tc*Cpt*(Tf-Te1)-Cpa*(Td-Ti);
(e/Klp)-W*(Te1-Te2);
Te1-Tf*(1-nt1*(1-(1/(Pt1))^(Ra/Cpt)));
Te2-Te1*(1-nt2*(1-(1/(Pt2*W))^(Ra/Cpg)))]];

```

fun1c.m

```
function
F=fun1c(x,Ti,nc,nt1,nt2,Pc,Pt1,Pt2,Tf0,Td0,Klp,Ra,Cpt,Cpa,Cpg,n_tc,e)

Td=x(1);
Tf=x(2);
Te1=x(3);
Te2=x(4);
Wf=x(5);

F = [Td-Ti*(1+((Pc*0.73)^(Ra/Cpa)-1)/(nc));
Tf-Td-(Tf0-Td0)*(Wf/0.73);
n_tc*Cpt*(Tf-Te1)-Cpa*(Td-Ti);
(e/Klp)-0.73*(Te1-Te2);
Te1-Tf*(1-nt1*(1-(1/(Pt1))^(Ra/Cpt)));
Te2-Te1*(1-nt2*(1-(1/(Pt2*0.73))^(Ra/Cpg)))];
```