



**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

*«Σχεδιασμός και εγκατάσταση ηλεκτρολογικού  
εξοπλισμού και διερεύνηση της  
αυτοματοποίησης μονάδας οικιακής  
τριπαραγωγής»*

**Της Μεταπτυχιακής Φοιτήτριας**

Κουγιουμτζή Σοφίας

**Επιβλέπων**

Καρέλλας Σωτήριος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Σχολή  
Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ





## ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»

---

*«Σχεδιασμός και εγκατάσταση ηλεκτρολογικού εξοπλισμού και διερεύνηση της αυτοματοποίησης μονάδας οικιακής τριπαραγωγής»*

### ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Της Μεταπτυχιακής Φοιτήτριας**

Κουγιουμτζή Σοφίας

### Επιβλέπων

Καρέλλας Σωτήριος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Σχολή Μηχανολόγων  
Μηχανικών, ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30ή Σεπτεμβρίου 2016.

.....  
κ. Καρέλλας Σωτήριος  
Αναπ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
κ.Κακαράς Εμμανουήλ  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
κ.Προυσαλίδης Ιωάννης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

---

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2016

.....  
Κουγιουμτζή Σοφία

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών

Copyright © Κουγιουμτζή Σοφία 2016

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 στη 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.

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: «Σχεδιασμός και εγκατάσταση ηλεκτρολογικού  
εξοπλισμού και διερεύνηση της αυτοματοποίησης  
μονάδας οικιακής τριπαραγωγής»**

**ΦΟΙΤΗΤΡΙΑ:** Κουγιουμτζή Σοφία

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:** Καρέλλας Σωτήριος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Σχολή Μηχανολόγων  
Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

**ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ:** 2015-16

## **Σύνοψη**

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει σε πρώτη φάση την υλοποίηση μιας μονάδας τριπαραγωγής. Πιο συγκεκριμένα, τον εξοπλισμό που εγκαταστάθηκε, καθώς και το σύστημα ελέγχου και εποπτείας της μονάδας τριπαραγωγής με υπερκρίσιμο ORC, η οποία έχει κατασκευαστεί στο εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Σε δεύτερη φάση, λαμβάνοντας στοιχεία από την διεθνή βιβλιογραφία, προτάθηκε ένας εναλλακτικός τρόπος για τον αυτοματοποιημένο έλεγχο του ψυκτικού κύκλου της μονάδας τριπαραγωγής.

## **Περίληψη**

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται μια εισαγωγική αναφορά στις σύγχρονες ανάγκες που δύναται να καλύψει η τεχνολογία ORC, στις έννοιες της συμπαραγωγής και τριπαραγωγής.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται η θεωρητική περιγραφή των θερμοδυναμικών κύκλων στους οποίους στηρίζεται η λειτουργία της εγκατάστασης τριπαραγωγής BioTRIC, η οποία αποτελεί και το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται η περιγραφή της εγκατάστασης BioTRIC. Συγκεκριμένα παρατίθεται η αρχή λειτουργίας της, σε όλες τις δυνατές καταστάσεις, και παρουσιάζονται τα επιμέρους συστήματα από τα οποία αποτελείται, με τον μηχανολογικό και ηλεκτρολογικό εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε, καθώς επίσης και ο τρόπος ελέγχου και εποπτείας της μονάδας.

Στο κεφάλαιο 4 παρατίθενται κάποιοι μέθοδοι αυτοματοποιημένου ελέγχου των αντλιών θερμότητας και προτίνεται ένας εναλλακτικός τρόπος ελέγχου του ψυκτικού κύκλου της μονάδας τριπαραγωγής BioTRIC.

Στο κεφάλαιο 5 παρατίθενται τα συμπεράσματα και οι μελλοντικές προοπτικές επέκτασης του ελέγχου στις αντλίες θερμότητας.

Τέλος σε καθένα από τα δύο παραρτήματα παρατίθενται αντίστοιχα οι αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν στον κώδικα του προγράμματος της εφαρμογής διεπαφής ανθρώπου-μηχανής (Human Machine Interface , HMI) και του προγράμματος ελέγχου του προγραμματιζόμενου λογικού ελεγκτή (Programmable logic controller, PLC) και τα προτεινόμενα ηλεκτρολογικά σχέδια της εγκατάστασης.

#### **Λέξεις – Κλειδιά**

Υπερκρίσιμος Οργανικός Κύκλος Rankine (ORC), Αντλίες θερμότητας, Τριπαραγωγή, Έλεγχος αντλιών θερμότητας, PID έλεγχος.

**POST-GRADUATE THESIS: «Design and installation of electrical equipment and research in automation of a domestic trigeneration plant»**

**STUDENT:** Kougiousmtzi Sofia

**SUPERVISOR:** Sotirios Karellas, Associate Professor, School of Mechanical

Engineering, Laboratory of Steam Boilers and Thermal Plants, N.T.U.A.

**ACADEMIC YEAR:** 2015-16

**Abstract**

This thesis presents the implementation of a trigeneration plant, which is manufactured in the laboratory steam engines and boilers of the School of Mechanical Engineering of NTUA. More specifically, the equipment that was installed and the control and supervision of trigeneration unit are presented.

Additionally, taking data from the literature, an alternative way for the automated control of the cooling cycle of the trigeneration plant was suggested.

**Summary**

Chapter 1 is an introduction to the promising role of the ORC technology and the concepts of cogeneration and trigeneration.

In Chapter 2 the theoretical description of thermodynamic cycles underlying the operation of the trigeneration plant is presented.

In chapter 3, a description of BioTRIC plant is presented. In particular, the individual systems of the plant are described, along with the mechanical and electrical equipment used, as well as the method of control and supervision of the plant.

In chapter 4, some methods of automatic control of heat pumps are listed and an alternative way of controlling the trigeneration BioTRIC's refrigerant cycle is suggested.

Chapter 5 presents the conclusions and future prospects of extending the control in heat pumps.

Finally, in each of the two appentix are respectively set out the changes made to the code of the Human Machine Interface (HMI) application program and the Programmable Logic Controller's (PLC) control program and the proposed electrical designs of the trigeneration plant.

**Key Words**

Supercritical cycle Organic Rankine (ORC), heat pumps, trigeneration, heat pumps Control, Proportional-Integral-Derivative Control.

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Σωτήριο Καρέλλα του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, ο οποίος μου έδωσαν την ευκαιρία να συνδυάσω και να εφαρμόσω γνώσεις πάνω σε δυο διαφορετικά γνωστικά αντικείμενα, γεγονός που αποτέλεσε ένα σημαντικό βήμα εξέλιξης στην ολοκλήρωση της αντίληψής μου ως μηχανικός. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Κωνσταντίνο Μπραϊμάκη και τον συνάδελφο Ηλεκτρολόγο Μηχανικό Στέφανο Κωστούλα, οι οποίοι ήταν πάντοτε διαθέσιμοι για την επίλυση αποριών και διευκρίνιση ζητημάτων μηχανολογικής φύσεως, αλλά και για την βοήθεια τους στο ξεκίνημα της παρούσας εργασίας.

Τέλος, οι μεγαλύτερες ευχαριστίες ανήκουν στην οικογένειά μου για την συνολική στήριξη που μου παρείχε κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου.

**Κουγιουμτζή Σοφία**

**Αθήνα, 2016**



# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	13
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	13
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	14
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ .....	15
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ .....	16
NOMENCLATURE .....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....	19
ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....	21
ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΙ ΚΥΚΛΟΙ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ BIOTRIC .....	21
2.1 Οργανικός Κύκλος Rankine – Organic Rankine Cycle (ORC) .....	21
2.1.1 Θερμοδυναμικός Κύκλος Clausius-Rankine .....	21
2.1.2 Οργανικός Κύκλος Rankine – Organic Rankine Cycle (ORC) .....	22
2.2 Ψυκτικός κύκλος μηχανικής συμπίεσης (Vapor Compression Cycle-VCC).....	27
2.2.1 Περιγραφή ψυκτικού κύκλου VCC .....	27
2.2.2 Αντλίες θερμότητας .....	28
2.2.2.1. Αντλίες θερμότητας αέρος-αέρος .....	30
2.2.2.2 Αντλίες θερμότητας αέρος-νερού. ....	31
2.2.2.3 Αντλίες θερμότητας νερού-νερού. ....	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....	33
Η ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΡΙΠΑΡΑΓΩΓΗΣ BIOTRIC .....	33
3.1 Περιγραφή της αρχής λειτουργίας και περιγραφή της εγκατάστασης.....	33
3.1.1 Κύκλωμα θερμικού ελαίου .....	39
3.1.2 Κύκλωμα ψυκτικού νερού .....	39
3.1.3 Κύκλωμα ORC.....	40
3.1.4 Κύκλωμα VCC.....	40
3.2 Περιγραφή επιμέρους συστημάτων .....	41
3.2.1 Αντλία κυκλοφορίας οργανικού ρευστού .....	41
3.2.1.1 Κινητήρας και Inverter αντλίας .....	45
3.2.2 Εκτονωτής.....	50
3.2.2.1 Αρχή λειτουργίας ελικοειδή εκτονωτή .....	51
3.2.2.2 Γεννήτριες και ρυθμιστές στροφών τους (Inverters) .....	55

3.2.3 Συμπιεστής Ψυκτικού Κύκλου.....	60
3.2.3.1 Συμπίεστες τύπου scroll .....	61
3.2.3.2 Μηχανή συμπίεστη και ομαλός εκκινητής .....	63
3.2.4 Μηχανική σύμπλεξη και αποσύμπλεξη των εκτονωτών και του συμπίεστη της εγκατάστασης.....	64
3.2.5 Εναλλάκτες Θερμότητας.....	67
3.2.6 Μετρητικά όργανα .....	70
3.2.7 Ηλεκτρολογικός Πίνακας.....	72
3.3 Αυτόματος και εποπτικός έλεγχος της εγκατάστασης.....	77
3.3.1 Ο Προγραμματιζόμενος Λογικός Ελεγκτής της εγκατάστασης .....	77
3.3.1.1 Περιγραφή του υλικού (hardware).....	77
3.3.2 Εποπτικός Έλεγχος Εγκατάστασης μέσω Human Machine .....	87
Interface (HMI) .....	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....	97
Ο ΑΥΤΟΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΤΙΣ ΑΝΤΛΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	97
4.1 Γενικά.....	97
4.2 Μέθοδοι ελέγχου σε HVAC συστήματα.....	101
4.3 Αναλογικός-Ολοκληρωτικός-Διαφορικός Έλεγχος (Proportional-Intergral-Derivative Cotrnl, PID).....	104
4.4 Εφαρμογή PID ελέγχου στον VCC κύκλο της εγκατάστασης BioTRIC.....	113
4.4.1 Διασυνδεσιμότητα στις σχέσεις εισόδου–εξόδου σε έναν ψυκτικό κύκλο VCC .....	119
4.4.2 Μέθοδος Μοντέλου Πρόβλεψης (Model Predictive Control Method –MPC Method) ..	120
4.5 Παράδειγμα ανάπτυξης μοντέλου ενός HVAC Συστήματος.....	122
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 .....	131
5. Συμπεράσματα .....	131
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	135
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	139
-Μετατροπές στον κώδικα του LabVIEW και του STEP 7.....	139
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β .....	147
- Ηλεκτρολογικά σχέδια.....	147

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

**Πίνακας 2.1.2-1:** Ενδεικτικά οργανικά ρευστά [33].

**Πίνακα 3.2.1-1:** Τεχνικά χαρακτηριστικά της αντλίας Hydra Cell D/G-10-X [31].

**Πίνακας 3.2.1.1-1:** Ονομαστικά χαρακτηριστικά κινητήρα αντλίας.

**Πίνακας 3.2.2.2-1:** Ονομαστικά χαρακτηριστικά γεννήτριας 1.

**Πίνακας 3.2.2.2-2:** Ονομαστικά χαρακτηριστικά γεννήτριας 2.

**Πίνακας 3.2.3.2-1:** Ονομαστικά χαρακτηριστικά μηχανής συμπιεστή.

**Πίνακας 3.3.1.1-1:** Ψηφιακές είσοδοι.

**Πίνακας 3.3.1.1-2:** Ψηφιακές έξοδοι.

**Πίνακας 3.3.1.1-3:** Αναλογικές είσοδοι.

**Πίνακας 3.3.1.1-4:** Αναλογικές έξοδοι.

**Πίνακας 4.3-1:** Μέθοδοι ρύθμισης PID ελεγκτών [24].

**Πίνακας 4.4.1-1:** Στρατηγικές χειροκίνητου και αυτοματοποιημένου ελέγχου.

**Πίνακας 4.5-1:** Παράμετροι PID ελεγκτή θερμοκρασίας [26].

**Πίνακας 4.5-2:** Παράμετροι PID ελεγκτή υγρασίας [26].

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

**Εικόνα 3.2.1-1:** Αντλία Hydra Cell D/G-10-X.

**Εικόνα 3.2.1.1-1:** Σύστημα αντλία-κινητήρα.

**Εικόνα 3.2.1.1-2:** Ρυθμιστή στροφών Sinamics V20 της Siemens.

**Εικόνα 3.2.2.1-1:** Σταθερό και κινητό τοίχωμα ελικοειδούς συμπιεστή.

**Εικόνα 3.2.2.1-2:** Εκτονωτής εγκατάστασης.

**Εικόνα 3.2.2.1-3:** Μηχανική σύμπλεξη επαγωγικής μηχανής και εκτονωτή.

**Εικόνα 3.2.2.2-1:** Επαγωγική μηχανή.

**Εικόνα 3.2.2.2-2:** Σύστημα εκτονωτή-γεννήτριας.

**Εικόνα 3.2.2.2-3:** Inverter Sinamics G120 της εταιρίας Siemens.

**Εικόνα 3.2.4-1:** Ελικοειδής συμπιεστής της σειράς TRSA της εταιρείας Sanden.

**Εικόνα 3.2.4-2:** Μηχανική σύμπλεξη scroll συμπιεστή-μηχανής.

**Εικόνα 3.2.5-1:** Επίπεδος πλακοειδής εναλλάκτης θερμότητας της εταιρείας Alfa Laval.

**Εικόνα 3.2.6-1:** Μετρητικό πίεσης.

**Εικόνα 3.2.6-2:** Μετρητικό θερμοκρασίας.

**Εικόνα 3.2.6-3:** Ψηφιακό μετρητικό πίεσεως.

**Εικόνα 3.2.7-1:** Ηλεκτρολογικός πίνακας.

**Εικόνα 3.2.7-2:** Αναλυτής ενέργειας SENTRON PAC3200 της εταιρίας Siemens.

**Εικόνα 3.2.7-3:** Λεπτομέρεια από το κύκλωμα ισχύος του ηλεκτρολογικού πίνακα.

**Εικόνα 3.2.7-4:** Λεπτομέρεια Προγραμματιζόμενου Λογικού Ελεγκτή και ρελέ ελέγχου.

## **ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ**

**Σχήμα 2.1.1-1:** Αρχή λειτουργίας κύκλου Clausius-Rankine.

**Σχήμα 2.1.2-1:** Οργανικός κύκλος Rankine- ORC.

**Σχήμα 2.2.2-1:** Διάγραμμα τυπικής ψυκτικής εγκατάστασης με μηχανική συμπίεση.

**Σχήμα 2.2.2.1-1:** Αντλίες θερμότητας αέρος-αέρος.

**Σχήμα 2.2.2.2-1:** Αντλίες θερμότητας αέρος-νερού.

**Σχήμα 2.2.2.3-1:** Αντλίες θερμότητας νερού-νερού.

**Σχήμα 3.1-1:** Απλοποιημένο σχήμα συνδυασμού κύκλων ORC και VCC.

**Σχήμα 3.1-2:** Μονογραμμικό σχέδιο εγκατάστασης τριπαραγωγής (BioTRIC).

**Σχήμα 3.2.1-1:** Αντλία διαφράγματος με μηχανική οδήγηση.

**Σχήμα 3.2.1.1-1:** Συνδεσμολογία κυκλώματος ελέγχου για λειτουργία με την μακροεντολή Cn002 [6].

**Σχήμα 3.2.2.1-1:** Λειτουργία ελικοειδούς συμπιεστή.

**Σχήμα 3.2.2.1-2:** Λειτουργία ελικοειδούς εκτονωτή.

**Σχήμα 3.2.3-1:** Κατηγοριοποίηση συμπιεστών.

**Σχήμα 3.2.3.1-1:** Τομή συμπιεστή τύπου scroll.

**Σχήμα 3.2.4-1:** Τομή ελικοειδούς συμπιεστή της σειράς TRSA.

**Σχήμα 3.2.5-1:** Πλακωειδής Εναλλάκτης θερμότητας [17].

**Σχήμα 3.3.1.1-1:** α) Εξωτερική και β) εσωτερική όψη της CPU314C-2PN/DP [18].

**Σχήμα 3.3.1.1-2:** Εξωτερική όψη της SM331.

**Σχήμα 3.3.1.1-3:** Εξωτερική όψη της SM332.

**Σχήμα 3.3.1.1-4:** Διάγραμμα καλωδίωσης και εξωτερική όψη τροφοδοτικού PS307 24V/5A [19].

**Σχήμα 3.3.2-1:** Αρχιτεκτονική τύπου Client/Server του προτύπου OPC.

**Σχήμα 3.3.2-2:** Διασύνδεση HMI εφαρμογής και PLC μέσω της αρχιτεκτονικής PLC Client/Server [20].

**Σχήμα 3.3.2-3:** Εποπτική περιγραφή λειτουργίας OPC Client.

**Σχήμα 3.3.2-4:** Εποπτική περιγραφή λειτουργίας OPC Server.

**Σχήμα 3.3.2-5:** Δομή συστήματος SCADA της εγκατάστασης τριπαραγωγής.

**Σχήμα 3.3.2.1-1:** Το Front Panel της εγκατάστασης BioTRIC.

**Σχήμα 3.3.2.1-2:** Το Block Diagram του VI για προστασία κατά την τριπαραγωγή στην μονάδα BioTRIC.

**Σχήμα 4.1-1:** Σύστημα ελέγχου εγκατάστασης οικιακής θέρμανσης.

**Σχήμα 4.1-2:** Απλός ηλεκτρομηχανικός θερμοστάτης.

**Σχήμα 4.1-3:** Έλεγχος συστήματος ψύξης.

**Σχήμα 4.2-1:** Κατηγοριοποίηση μεθόδων ελέγχου HVAC συστημάτων [23].

**Σχήμα 4.3-1:** Σύστημα έλεγχου κλειστού βρόχου.

**Σχήμα 4.3-2:** Σχεδιάγραμμα ενός βρόχου SISO ελέγχου.

**Σχήμα 4.3-3:** Σχεδιάγραμμα ενός βρόχου MIMO ελέγχου.

**Σχήμα 4.4-1:** Μέθοδος ελέγχου σε συστήματα VCC με έναν SISO PID ελεγκτή για τον έλεγχο του inverter του συμπιεστή.

**Σχήμα 4.4-2:** Μέθοδος ελέγχου σε συστήματα VCC με έναν SISO PID ελεγκτή για τον έλεγχο της ηλεκτρομηχανολογικής αναλογικής βαλβίδας.

**Σχήμα 4.4-3:** Μέθοδος ελέγχου σε συστήματα VCC με δύο SISO PID ελεγκτές[25].

**Σχήμα 4.4.1-1:** Εναλλακτική διαμόρφωση ανατροφοδότησης στο σύστημα ελέγχου [25].

**Σχήμα 4.5-1:** Κλιματιστική μονάδα , AHU.

**Σχήμα 4.5-2:** Δομή του συστήματος ψύξης μιας θερμικής ζώνης.

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

**Διάγραμμα 2.1.2-1:** Τυπικές περιπτώσεις υπερκρίσιμου (πράσινο) και υποκρίσιμου (κόκκινο) κύκλου ORC με εργαζόμενο μέσο το R1234yf [3].

**Διάγραμμα 2.2-1:** Ποιοτικό διάγραμμα P-h μιας ψυκτικής εγκατάστασης με μηχανική συμπίεση.

**Διάγραμμα 3.1-1:** Διάγραμμα T-s εγκατάστασης τριπαραγωγής.

**Διάγραμμα 3.1-2:** Διάγραμμα T-h εγκατάστασης τριπαραγωγής.

**Διάγραμμα 3.2.1-1:** Χαρακτηριστική καμπύλη παροχής-στροφών της αντλίας της εγκατάστασης BioTRIC.

**Διάγραμμα 3.2.1.1-1:** Διάγραμμα κυκλώματος ελέγχου του ρυθμιστή στροφών Sinamics V20 της Siemens [6].

**Διάγραμμα 3.2.5-1:** Εύρος λειτουργίας διαφόρων τύπων εναλλακτών θερμότητας.

**Διάγραμμα 4.3-1:** Διάγραμμα μεταβολής του PV στον χρόνο για τρεις τιμές του αναλογικού κέρδους  $K_p$  ( $K_i$  και  $K_d$  παραμένουν σταθερά) [24].

**Διάγραμμα 4.3-2:** Διάγραμμα μεταβολής του PV στον χρόνο για τρεις τιμές του αναλογικού κέρδους  $K_i$  ( $K_p$  και  $K_d$  παραμένουν σταθερά) [24].

**Διάγραμμα 4.3-3:** Διάγραμμα μεταβολής του PV στον χρόνο για τρεις τιμές του αναλογικού κέρδους  $K_d$  ( $K_p$  και  $K_i$  παραμένουν σταθερά) [24].

**Διάγραμμα 4.4-1:** Διάγραμμα P-V ψυκτικού κύκλου VCC.

**Διάγραμμα 4.5-1:** Προφίλ εξωτερικής θερμοκρασίας και θερμικών φορτίων [26].

**Διάγραμμα 4.5-2:** Αποτελέσματα προσομοίωσης κλασικού PID ελεγκτή [26].

**Διάγραμμα 4.5-3:** Αποτελέσματα προσομοίωσης τροποποιημένου PID ελεγκτή [26].

**Διάγραμμα 4.5-4:** Μεταβλητό σημείο λειτουργίας/αναφοράς [26].

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ

**Σχήμα 4:** Μετατροπές στον κώδικα ενημέρωσης κατάστασης σφάλματος σε λειτουργία ψυκτικού κύκλου.

**Σχήμα 3:** Μετατροπές στον κώδικα ενημέρωσης κατάστασης σφάλματος σε λειτουργία τριπαραγωγής.

**Σχήμα 2:** Μετατροπές στον κώδικα ενημέρωσης κατάστασης σφάλματος σε λειτουργία συμπαραγωγής.

**Σχήμα 1:** Μετατροπές στον κώδικα απεικόνισης κατάστασης ελεγχόμενων συστημάτων.

## NOMENCLATURE

$n_{th}$  = θερμικός βαθμός απόδοσης κύκλου Rnakine

$q_{in}$  = θερμότητα εισόδου

$q_{out}$  = θερμότητα εξόδου

$W_{turb,out}$  = παραγώμενο έργο στροβίλου

$W_{pump,in}$  = καταναλισκόμενο έργο αντλίας

**COP** = Βαθμός απόδοσης ενός ψυκτικού κύκλου, αφορά την αποδοτικότητα της αντλίας θερμότητας σε τυπικές συνθήκες λειτουργίας

$Q_{cool}$  = Θερμική ενέργεια που παράγεται στην αντλία θερμότητας

$P_{el,comp}$  = Ηλεκτρική ισχύς που καταναλώνεται στον συμπιεστή για την λειτουργία της αντλίας θερμότητας

$e(t)$  = Σφάλμα παρακολούθησης της μονάδας

$R$  = Επιθυμητό σημείο αναφοράς της μονάδας

$Y$  = Ανατροφοδοτούμενη έξοδος της μονάδας

$u$  = Συνάρτηση ελέγχου αναλογικού – ολοκληρωτικού – διαφορικού ελεγκτή

$P_{out}$  = Έξοδος αναλογικού - ολοκληρωτικού - διαφορικού ελεγκτή

$k_p$  = Σταθερά αναλογικού κέρδους

$k_i$  = Σταθερά ολοκληρωτικού κέρδους

$k_d$  = Σταθερά διαφορικού κέρδους

$C$  = Συνολική θερμική ικανότητα του ψυχόμενου χώρου (kJ/K)

$\alpha$  = Ολικός συντελεστής μετάδοσης της περιοχής (kJ/minK)

$qL$  = Θερμικό φορτίο από εσωτερική παραγόμενη θερμότητα (kJ/min)

$w_s$  = θερμότητα του αέρα παροχής (kJ/minK)

$\rho_a$  = Πυκνότητα αέρα (kg/m<sup>3</sup>)

$c_p$  = Ειδική θερμότητα αέρα (kJ/kgK)

$f_s$  = Παροχή αέρα (m<sup>3</sup>/min)

$fso(t)$  = Χειροκίνητη επαναφορά

$fs(t)$  = Συνάρτηση του PID ελεγκτή

$T_p$  = Σταθερά χρόνου

$L_p$  = Νεκρός χρόνος

$\theta_s$  = Θερμοκρασία αέρα παροχής

$\theta_o$  = Εξωτερική θερμοκρασία

$\theta_r$  = Σημείο αναφοράς θερμοκρασίας

$f_{so}(t)$  = Χειροκίνητη επαναφορά

$f_s(t)$  = Συνάρτηση του PID ελεγκτή

$T_p$  = Σταθερά χρόνου

$L_p$  = Νεκρός χρόνος

$\theta_s$  = Θερμοκρασία αέρα παροχής

$\theta_o$  = Εξωτερική θερμοκρασία

$\theta_r$  = Σημείο αναφοράς θερμοκρασίας

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις μέρες μας, η παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση έχει αυξηθεί, αποτελώντας έναν δείκτη της τάσης για άνοδο της οικονομικής ανάπτυξης. Παράλληλα όμως, οι συμβατικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στην διαδικασία παραγωγής ενέργειας, έχουν σαν αποτέλεσμα την απελευθέρωση στην ατμόσφαιρα τεράστιων ποσοτήτων CO<sub>2</sub>, γεγονός το οποίο επιδρά σημαντικά στις κλιματολογικές συνθήκες του πλανήτη. Οι τρέχουσες ανησυχίες για την κλιματική αλλαγή δημιουργούν κατευθύνσεις προς τροποποίηση του υπάρχοντος ενεργειακού συστήματος για την επίτευξη της μείωσης των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου (Green House Gases, GHG). Ορισμένες από αυτές τις κατευθυντήριες γραμμές αποτελούν [1]:

- Η αξιοποίηση της απορριπτόμενης θερμότητας (waste heat) για παραγωγή ηλεκτρισμού.
- Η ενεργειακή εξοικονόμηση στον κτιριακό και βιομηχανικό τομέα
- Η μετακίνηση από την χρήση ορυκτών καυσίμων προς την χρήση ηλεκτρικής ενέργειας στον τομέα των μεταφορών και την θέρμανσης χώρων
- Η σημαντική αύξηση παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, οι οποίες έχουν και μηδενικές εκπομπές CO<sub>2</sub>, όπως αιολικά συστήματα, φωτοβολταϊκά, υδροηλεκτρικά συστήματα, βιομάζα, γεωθερμία και ηλιακούς συλλέκτες
- Η συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού λόγω του υψηλού βαθμού αξιοποίησης της πρωτογενούς ενέργειας. Μια από τις υποσχόμενες τεχνολογίες, που δύναται να παίξει σημαντικό ρόλο στην υλοποίηση ορισμένων από τις παραπάνω κατευθύνσεις, αποτελεί αυτή του οργανικού κύκλου Rankine (Organic Rankine Cycle, ORC). Ο ORC είναι παρόμοιος με το κύκλο Clausius-Rankine (κύκλος νερού-ατμού) που χρησιμοποιείται στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η βασική του διαφορά είναι ως προς το εργαζόμενο μέσο, το οποίο είναι ένα οργανικό ρευστό με χαμηλότερη θερμοκρασία ατμοποίησης από αυτή του νερού, κάνοντας έτσι εφικτή την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από πηγές θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας.

Με την τεχνολογία ORC μπορεί να γίνει ανάκτηση της απορριπτόμενης θερμότητας (Waste Heat Recovery-WHR) σε μία βιομηχανία και αξιοποίησή της για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία μπορεί είτε να καταναλωθεί τοπικά για τις ανάγκες της βιομηχανίας είτε να τροφοδοτηθεί στο δίκτυο. Το αποτέλεσμα είναι η πιο αποδοτική λειτουργία της βιομηχανίας, με θετικό αντίκτυπο στα οικονομικά της οφέλη τόσο λόγω της εξοικονόμησης καυσίμου που μπορεί να πετύχει όσο και λόγω των μειωμένων εκπομπών ρύπων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα βιομηχανιών που παρουσιάζουν υψηλή δυναμικότητα για ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας αποτελούν οι βιομηχανίες τσιμέντου, χάλυβα, τα διωλιστήρια καθώς και η βιομηχανία χημικών. Το δυναμικό

ηλεκτροπαραγωγής από βιομηχανική απορριπτόμενη θερμότητα έχει εκτιμηθεί στα 750 MWe στις ΗΠΑ, 500 MWe στην Γερμανία και 3000 MWe στην Ευρώπη [2].

Αντίστοιχα ελκυστική επιλογή αποτελεί η τεχνολογία ORC και για εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως είναι η βιομάζα, η γεωθερμία και οι ηλιακοί συλλέκτες, οι οποίες εν γένει αποτελούν πηγές θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας σε σχέση με τους συμβατικούς θερμικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η διαθεσιμότητα αυτών των πηγών ενέργειας χαρακτηρίζεται από έναν τοπικό χαρακτήρα, δίνοντάς τους ένα συγκριτικό πλεονέκτημα όσον αφορά την επιλογή τους σε εφαρμογές, αποκεντρωμένης και μικρής κλίμακας, παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο σε αρκετές περιπτώσεις το κόστος επένδυσης είναι αρκετά μεγάλο οδηγώντας σε ένα κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μη ανταγωνιστικό. Για τον λόγο αυτό, η αποδοτικότερη αξιοποίηση των παραπάνω πηγών ενέργειας, που τις καθιστά ταυτόχρονα βιώσιμες επιλογές, οδηγεί στην συμπαραγωγή ηλεκτρισμού-θερμότητας.

Στο εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων της Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου έχει σχεδιασθεί και κατασκευαστεί πειραματική διάταξης συστήματος τριπαραγωγής για οικιακή χρήση, που συνδυάζει υπερκρίσιμο οργανικό κύκλο Rankine για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θέρμανσης, με ένα ψυκτικό κύκλο μηχανικής συμπίεσης, για παραγωγή ψύξης. Η συγκεκριμένη μονάδα τριπαραγωγής πέραν της υψηλής ολικής απόδοσης που παρουσιάζει λόγω τριπαραγωγής, είναι και ένα καινοτόμο σύστημα, καθώς για την παραγωγή θερμικής ισχύος πραγματοποιείται καύση βιομάζας, η οποία θεωρείται ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, ενώ είναι μικρής κλίμακας.

Πολύ σημαντικό ρόλο, ωστόσο, στην ορθή λειτουργία τέτοιων συστημάτων παίζει η αυτοματοποίηση τους προκειμένου να λειτουργούν αποδοτικά και να καλύπτουν κάθε φορά τις ανάγκες του χρήστη. Αναγκαίο κομμάτι αποτελεί, τέλος και ο αυτοματοποιημένος έλεγχος της λειτουργίας του ψυκτικού κύκλου της εγκατάστασης, ώστε η λειτουργία του να προσαρμόζεται κάθε φορά στις απαιτήσεις του ψυχόμενου χώρου.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η παρουσίαση του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε στην εγκατάσταση BioTRIC, της λειτουργίας των επιμέρους συστημάτων που την αποτελούν, αλλά και η μελέτη ενός συστήματος αυτοματοποιημένου ελέγχου του ψυκτικού κύκλου, ο οποίος θα μπορούσε να εφαρμοστεί στην μονάδα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΙ ΚΥΚΛΟΙ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ BIOTRIC

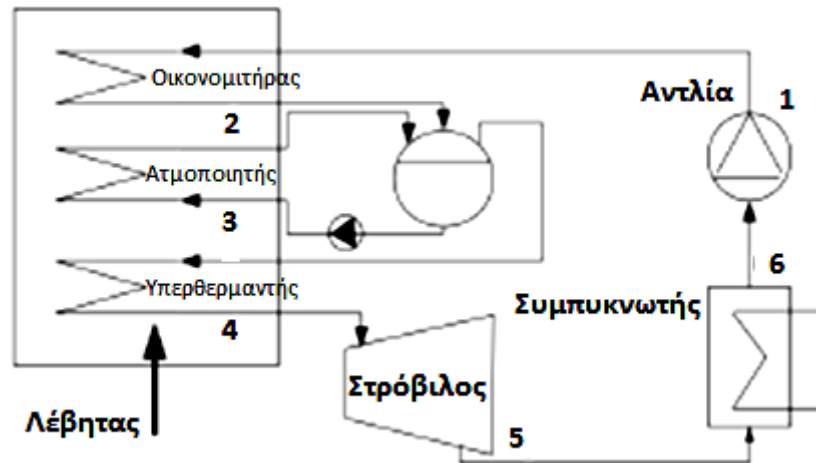
Όπως έχει αναφερθεί ήδη, η μονάδα ριπαραγωγής BioTRIC συνδυάζει έναν υπερκρίσιμο οργανικό κύκλο Rankine για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θέρμανσης, με ένα ψυκτικό κύκλο μηχανικής συμπίεσης, για παραγωγή ψύξης. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζονται οι θεωρητικές αρχές λειτουργίας των θερμοδυναμικών κύκλων που βρίσκουν εφαρμογή στην παρούσα μονάδα.

#### 2.1 Οργανικός Κύκλος Rankine – Organic Rankine Cycle (ORC)

##### 2.1.1 Θερμοδυναμικός Κύκλος Clausius-Rankine

Ο υποκρίσιμος κύκλος Clausius-Rankine είναι αυτός που χρησιμοποιείται συνηθέστερα στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και στον οποίο εργαζόμενο μέσο αποτελεί το νερό. Η αρχή λειτουργίας του φαίνεται στο Σχήμα 2.1.1-1.

Το κορεσμένο νερό σε χαμηλή πίεση στην έξοδο του συμπυκνωτή (σημείο 6) συμπιέζεται με την βοήθεια της αντλίας (μεταβολή 6-1), στη συνέχεια προθερμαίνεται στον οικονομητήρα (Economiser) μέχρι την θερμοκρασία ατμοποίησης του (μεταβολή 1-2) και ακολούθως ατμοποιείται στον ατμοποιητή (Vaporizer, μεταβολή 2-3) και υπερθερμαίνεται στον υπερθερμαντήρα (Superheater, μεταβολή 3-4). Ο υπέρθερμος ατμός υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας εκτονώνεται στον στρόβιλο μέχρι την χαμηλή πίεση συμπύκνωσης (μεταβολή 4-5). Με την διαδικασία της εκτόνωσης παράγεται μηχανική ισχύς η οποία αξιοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω γεννήτριας.



*Σχήμα 2.1.1-1: Αρχή λειτουργίας κύκλου Clausius-Rankine*

Συγκεκριμένα έχουμε τις εξής μεταβολές:

- **6-1:** Συμπίεση του κορεσμένου νερού στην αντλία. Τα σημεία 1 και 6 σχεδόν συμπίπτουν στο διάγραμμα καθώς το νερό είναι ασυμπίεστο ρευστό. Η εντροπία και θερμοκρασία του μεταβάλλονται ελάχιστα.
- **1-2:** Προθέρμανση του νερού μέχρι την θερμοκρασία ατμοποίησής του στον οικονομητήρα, ιδανικά υπό σταθερή πίεση. Η θερμοκρασία και η εντροπία του αυξάνονται.
- **2-3:** Το νερό έχει φτάσει στην θερμοκρασία κορεσμού του και αρχίζει να ατμοποιείται. Ξεκινώντας από την φάση του κορεσμένου νερού στο σημείο 2, περνά μέσα από την διφασική περιοχή (όπου νερό και ατμός συνυπάρχουν) και καταλήγει στη φάση του κορεσμένου ατμού στο σημείο 3. Η θερμοκρασία και η πίεση παραμένουν σταθερές ενώ η εντροπία αυξάνεται.
- **3-4:** Ο ατμός θερμαίνεται, υπό σταθερή πίεση, στον υπερθερμαντήρα μέχρι το σημείο 4. Η θερμοκρασία και η εντροπία του αυξάνονται.
- **4-5:** Ο υπέρθερμος ατμός εκτονώνεται στον στρόβιλο παράγοντας μηχανική ισχύ. Στην πραγματική διαδικασία η εντροπία του ρευστού αυξάνεται, ενώ η θερμοκρασία και η πίεσή του πέφτουν τόσο ώστε το ρευστό να καταλήγει σε κατάσταση διφασικού μίγματος.
- **5-6:** Το ρευστό σε κατάσταση διφασικού μίγματος συμπυκνώνεται, υπό σταθερή πίεση και θερμοκρασία, στον συμπυκνωτή μέχρι να έρθει στην κατάσταση κορεσμένου νερού στο σημείο 6, ενώ παράλληλα μειώνεται η εντροπία του.

## 2.1.2 Οργανικός Κύκλος Rankine – Organic Rankine Cycle (ORC)

Ο ORC είναι ένας κύκλος παρόμοιος με τον κύκλο Clausius-Rankine, με βασική διαφορά ότι το εργαζόμενο μέσο είναι κάποιο οργανικό ρευστό, αντί του νερού-ατμού. Διάφορα οργανικά

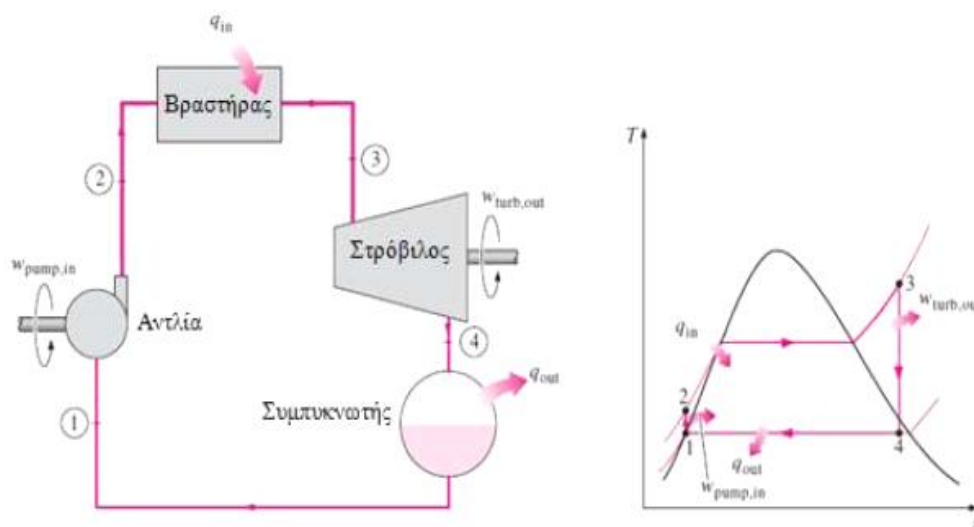
ρευστά αλλά και τύποι μιγμάτων πολλών συστατικών έχουν μελετηθεί [27], αποτελούμενων κυρίως από υδρογονάνθρακες, υδροφθοράνθρακες και σιλοξάνες. Μίγματα σιλοξανών και υδρογονανθράκων [28] έχουν προταθεί για ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας από κυψέλες καυσίμου τετιγμένου ανθρακίτη μέσω ORC. Ο ORC συνίσταται στην ατμοποίηση του οργανικού μέσου και κατόπιν την εκτόνωσή του σε εκτονωτή προς παραγωγή μηχανικού έργου. Το χαμηλής πίεσης ρεύμα που εξέρχεται από το στρόβιλο συμπυκνώνεται και μετά επανέρχεται με τη βοήθεια αντλίας στην υψηλή πίεση του κύκλου. Βάσει των παραπάνω είναι εύκολα κατανοητό ότι τα κύρια στοιχεία μιας τέτοιας εγκατάστασης είναι παρόμοια με μίας συμβατικής ατμοηλεκτρικής εγκατάστασης.

Η επιλογή του καταλληλότερου οργανικού ρευστού για την εγκατάσταση είναι ο πρώτος στόχος της θερμοδυναμικής βελτιστοποίησης ενός οργανικού κύκλου Rankine. Ακολουθως δίνονται κάποια οραγανικά ρευστά και τα βασικά χαρακτηριστικά τους.

Μία μηχανή που βασίζεται στον οργανικό κύκλο Rankine είναι η κατάλληλη τεχνολογία για ανάκτηση θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας, ακόμα και 80-100°C, εφόσον το εργαζόμενο μέσο είναι δυνατόν να ατμοποιείται στις θερμοκρασίες αυτές [22]. Μηχανές βασισμένες στην αρχή του κύκλου αυτού μπορούν να κατασκευαστούν ακόμα και σε πολύ μικρή κλίμακα, για παραγόμενη ισχύ έως 1 kWe [22], αλλά το κόστος τους είναι σχετικά υψηλό. Οι συνηθέστερες πηγές θερμότητας τέτοιων διατάξεων είναι από ηλιοθερμική ενέργεια, βιομάζα, γεωθερμία, απορριπτόμενη θερμότητα από βιομηχανικές διεργασίες και συστήματα συμπαραγωγής μικρής κλίμακας, ενώ το γεγονός ότι μπορούν πλέον να ανακτηθούν και ποσά θερμότητας αρκετά χαμηλής θερμοκρασίας (ακόμα και 80°C) αυξάνει κατακόρυφα τις πιθανές εφαρμογές της τεχνολογίας αυτής (οικιακά συστήματα συμπαραγωγής) [22]. Ο συμβατικός κύκλος Rankine νερού-ατμού, ο οποίος βρίσκει εφαρμογή στους παραδοσιακούς θερμικούς σταθμούς υψηλής θερμοκρασίας δεν προτείνεται για εφαρμογές χαμηλής θερμοκρασίας και μικρής κλίμακας. Για αυτού του είδους τις εφαρμογές, ο ORC παρουσιάζει πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τον κύκλο νερού-ατμού, όπως η δυνατότητα ανάκτησης θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας λόγω του χαμηλού σημείου βρασμού των οργανικών εργαζόμενων μέσων, το μικρότερο μέγεθος και συνεπώς το χαμηλότερο κόστος του εξοπλισμού καθώς και τη χρησιμοποίηση μηχανών εκτόνωσης που μπορούν να λειτουργούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Επιπλέον, λόγω της θετικής κλίσης της καμπύλης κορεσμένου ατμού στο διάγραμμα T-s μεγάλου πλήθους οργανικών ουσιών, είναι δυνατή η χρήση τους χωρίς να είναι αναγκαία η υπερθέρμανσή τους, καθώς η εκτόνωσή τους διεξάγεται στη μονοφασική περιοχή του υπέρθερμου ατμού [29].

Εργαζόμεν ο μέσο	Κρίσιμη θερμοκρασία (°C)	Κρίσιμη η πίεση (bar)	ODP (United States Environmental Protection Agency)	GWP (United States Environmental Protection Agency)	Κατηγορία ασφάλεια κατά ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers,2000)
<b>R 125</b>	66.02	36.18	0	3500	A1
<b>R 134a</b>	101.06	40.59	0	1430	A1
<b>R 143a</b>	72.71	37.61	0	4470	A2L
<b>R 1234yf</b>	94.70	33.82	0	4	A2L
<b>R 227ea</b>	101.75	29.25	0	3220	A1
<b>Propylene</b>	92.42	46.65	0	1.8	A3
<b>R 41</b>	44.13	58.97	0	92	---
<b>N-propane</b>	96.70	42.48	0	3.3	A3
<b>R 161</b>	102.22	47.02	0	12	---
<b>R 410a</b>	72.80	48.60	0	2088	A1
<b>R 404a</b>	72.07	37.32	0	3300	A1

**Πίνακας 2.1.2-1:** Ενδεικτικά οργανικά ρευστά [33].



**Σχήμα 2.1.2-1:** Οργανικός κύκλος Rankine- ORC.

Το ρευστό εισέρχεται στην αντλία [κατάσταση 1] ως κορεσμένο υγρό και συμπίεζεται ισεντροπικά στην πίεση λειτουργίας του ατμοποιητή. Η θερμοκρασία του υγρού αυξάνει ελάχιστα κατά την διάρκεια αυτής της ισεντροπικής συμπίεσης εξαιτίας της μικρής μείωσης στον ειδικό όγκο του υγρού.

Το ρευστό εισέρχεται στον ατμοποιητή ως συμπιεσμένο υγρό [κατάσταση 2] και εξέρχεται ως υπέρθερμος ατμός [κατάσταση 3]. Ο ατμοποιητής είναι ένας μεγάλος εναλλάκτης θερμότητας στον οποίο η θερμότητα προέρχεται από αέρια καύσης, ή άλλες πηγές, όπως βιομάζα, γεωθερμία, κύκλωμα ηλιακών συλλεκτών, και μεταφέρεται στο εργαζόμενο μέσο ιδανικά σε σταθερή πίεση.

Ο υπέρθερμος ατμός [κατάσταση 3], ή και υπερκρίσιμος, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας, εισέρχεται στον στρόβιλο, όπου εκτονώνεται μη ισεντροπικά (μόνο θεωρητικά η μεταβολή είναι ισεντοπική) και παράγει έργο περιστρέφοντας την άτρακτο η οποία είναι συνήθως συνδεδεμένη με ηλεκτρογεννήτρια. Κατά την διεργασία αυτή η πίεση και η θερμοκρασία του ατμού μειώνονται [κατάσταση 4] και στην συνέχεια οι ατμοί εισέρχονται στον συμπυκνωτή. Ο ατμός συμπυκνώνεται σε σταθερή πίεση στον συμπυκνωτή ο οποίος είναι ένας μεγάλος εναλλάκτης θερμότητας, απορρίπτοντας θερμότητα σε ένα ψυκτικό μέσο όπως ένα ποτάμι, μία λίμνη και έναν πύργο ψύξης. Ο ατμός αφήνει τον συμπυκνωτή σε κατάσταση κορεσμένου ή στην πράξη υπόψυκτου υγρού και έπειτα εισέρχεται στην αντλία ολοκληρώνοντας τον κύκλο.

Σε περιοχές όπου το νερό είναι πολύτιμο οι εγκαταστάσεις παραγωγής ισχύος ψύχονται με αέρα αντί για νερό. Αυτή η μέθοδος ψύξης που χρησιμοποιείται και στις μηχανές των αυτοκινήτων καλείται ξηρή ψύξη (dry cooling). Αρκετά εργοστάσια παραγωγής ισχύος ανά τον κόσμο χρησιμοποιούν αυτόν τον τρόπο ψύξης για την προστασία και διατήρηση των υδάτινων πόρων.

Η επιφάνεια κάτω από την γραμμή διεργασίας στο διάγραμμα T-s αντιπροσωπεύει την μεταφορά θερμότητας για εσωτερικά αντιστρεπτές διεργασίες. Τότε η περιοχή κάτω από την γραμμή διεργασίας 2-3 αντιπροσωπεύει την θερμότητα που μεταφέρθηκε στο νερό μέσα στον ατμοποιητή, ενώ η περιοχή κάτω από την γραμμή διεργασίας 4-1 αντιπροσωπεύει την θερμότητα που απορρίφθηκε στον συμπυκνωτή. Η διαφορά μεταξύ των δύο (η περιοχή που περιβάλλεται από τον κύκλο) είναι το καθαρό έργο που παράχθηκε κατά την διάρκεια του κύκλου.

Βασικό στοιχείο κατά το σχεδιασμό μιας εγκατάστασης ORC είναι η εκλογή του οργανικού μέσου και ο θερμοδυναμικός σχεδιασμός του κύκλου για μεγιστοποίηση της απόδοσης της εγκατάστασης, βάσει διαφόρων κριτηρίων αξιολόγησής της όπως ο θερμικός βαθμός απόδοσης. Η επιλογή αυτή καθορίζεται κυρίως από τη θερμοκρασία πρόσδοσης θερμότητας στον κύκλο, τη διαθεσιμότητα αυτού στο εμπόριο, καθώς επίσης και από παράγοντες όπως η ασφάλεια, η οποία εξαρτάται από την αναφλεξιμότητα και την τοξικότητα του οργανικού ρευστού.

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου Rankine ορίζεται ως:

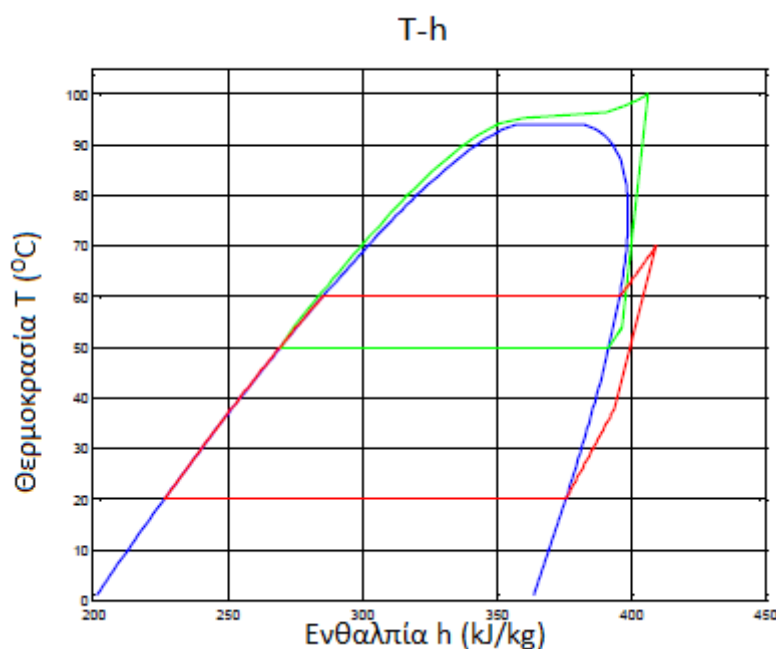
$$\bullet \quad \eta = \frac{W_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}}, \text{ όπου } W_{net} = q_{in} - q_{out} = W_{turb,out} - W_{pump,in}. \quad (2.1)$$

όπου,  $q_{in}$  είναι η θερμότητα που δίνεται στο σύστημα κατά την καύση κάποιου καυσίμου ή από κάποια άλλη πηγή θερμότητας, όπως είναι οι ηλιακοί συλλέκτες, και  $q_{out}$  το ποσό της ενέργειας που μετατρέπεται σε ωφέλιμο έργο. Στην ουσία εκφράζει το ποσό της θερμικής ενέργειας ( $q_{in}$ ) που μετατρέπεται σε ωφέλιμη ενέργεια ( $q_{out}$ ).

Πέρα από τον υποκρίσιμο ORC, έντονο ενδιαφέρον συγκεντρώνει και ο υπερκρίσιμος κύκλος ORC, ο οποίος σε κάποιες περιπτώσεις υπερτερεί έναντι του υποκρίσιμου λόγω πιο αποδοτική αξιοποίηση της θερμότητας.

Ο υπερκρίσιμος κύκλος είναι περισσότερο εφικτός στα οργανικά ρευστά σε σύγκριση με τον κύκλο νερού ατμού, καθώς το κρίσιμο σημείο επιτυγχάνεται σε χαμηλότερες πιέσεις και θερμοκρασίες. Η βασική διαφοροποίηση υπερκρίσιμου έναντι του υποκρίσιμου κύκλου, όπως είναι προφανές, είναι ότι μετά την αντλία το οργανικό μέσο έχει αποκτήσει αρκετά υψηλότερη πίεση ώστε η θέρμανση από τον εναλλάκτη να το μετατρέψει άμεσα σε υπερκρίσιμο ρευστό, δηλαδή χωρίς να μεσολαβεί διφασική περιοχή ατμοποίησης όπως στον υποκρίσιμο κύκλο.

Ο σχεδιασμός και η λειτουργία ενός τέτοιου κύκλου (supercritical ORC) έχει ορισμένα πλεονεκτήματα, όπως η υψηλότερη θερμική απόδοση και η μεγαλύτερη εκμετάλλευση της διαθέσιμης θερμότητας. Τα δύο αυτά χαρακτηριστικά επιτρέπουν στον κύκλο αυτόν να παρουσιάζει υψηλότερη συνολική απόδοση κατά περίπου 10-20% σε σχέση με έναν αντίστοιχο σε υποκρίσιμη λειτουργία, γεγονός που τον καθιστούν υποψήφιο γι' αρκετές εφαρμογές [29]. Από την άλλη, ένα από τα κυριότερα μειονεκτήματά του είναι η υψηλή πίεση λειτουργίας, ώστε να μπορεί να λειτουργεί σε υπερκρίσιμες συνθήκες (συνήθως μεγαλύτερη από 30-35 bar). Η τιμή της πίεσης αυτής εξαρτάται από την υπερκρίσιμη θερμοκρασία λειτουργίας και το οργανικό ρευστό [29].



**Διάγραμμα 2.1.2-1:** Τυπικές περιπτώσεις υπερκρίσιμου (πράσινο) και υποκρίσιμου (κόκκινο) κύκλου ORC με εργαζόμενο μέσο το R1234yf [3].

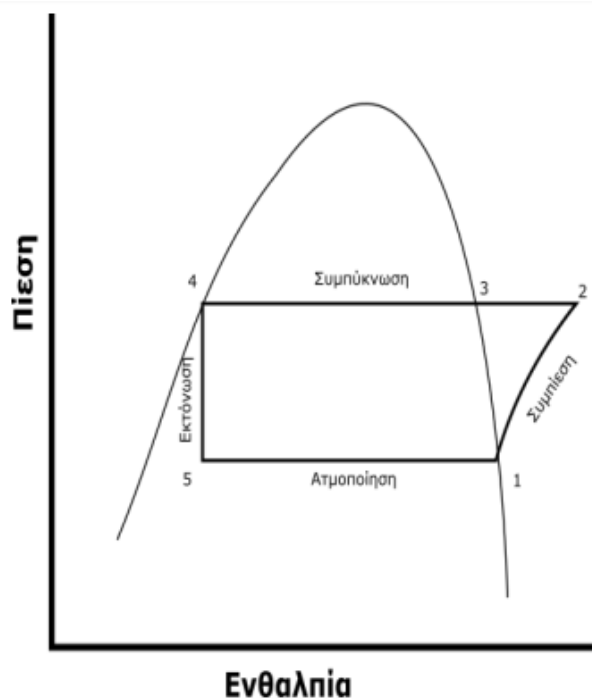
## 2.2 Ψυκτικός κύκλος μηχανικής συμπίεσης (Vapor Compression Cycle-VCC)

### 2.2.1 Περιγραφή ψυκτικού κύκλου VCC

Σκοπός κάθε ψυκτικής εφαρμογής είναι να μεταφέρει η μεταφορά θερμότητας από μια περιοχή χαμηλής θερμοκρασίας προς μία περιοχή υψηλής θερμοκρασίας, ενάντια στην αυθόρμητη τάση ροής της θερμότητας. Το ποσό ενέργειας και ισχύος που πρέπει να μεταφερθεί εξαρτάται από την επιθυμητή θερμοκρασία του ψυχόμενου χώρου, τις επικρατούσες συνθήκες και το ποσό της εσωτερικής παραγόμενης θερμότητας στον χώρο ψύξης.

Η πιο διαδεδομένη τεχνολογία που χρησιμοποιείται σε ψυκτικές εφαρμογές είναι αυτή που βασίζεται στον κύκλο συμπίεσης ατμού (Vapor Compression Cycle (VCC)). Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο φαινόμενο της αλλαγής φάσης ενός μέσου και των θερμικών συναλλαγών στα πλαίσια της μεταβολής αυτής. Κατά αυτό τον τρόπο, αξιοποιείται η θερμότητα που λαμβάνεται κατά την ατμοποίηση του μέσου .

Το διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας μιας τυπικής εγκατάστασης ψυκτικού κύκλου με μηχανική συμπίεση (Vapor Compression Cycle-VCC) φαίνεται στο στο Διάγραμμα 2.2-1.



*Διάγραμμα 2.2-1: Ποιοτικό διάγραμμα P-h μιας ψυκτικής εγκατάστασης με μηχανική συμπίεση.*

Στο σημείο 1 του διαγράμματος, το κυκλοφορούν ψυκτικό μέσο εισέρχεται στον συμπιεστή σε φάση κορεσμένου ατμού. Κατά την μεταβολή 1-2, ο ατμός συμπιέζεται (θεωρητικά ισηντροπικά) και εξέρχεται από τον συμπιεστή ως υπέρθερμος ατμός.

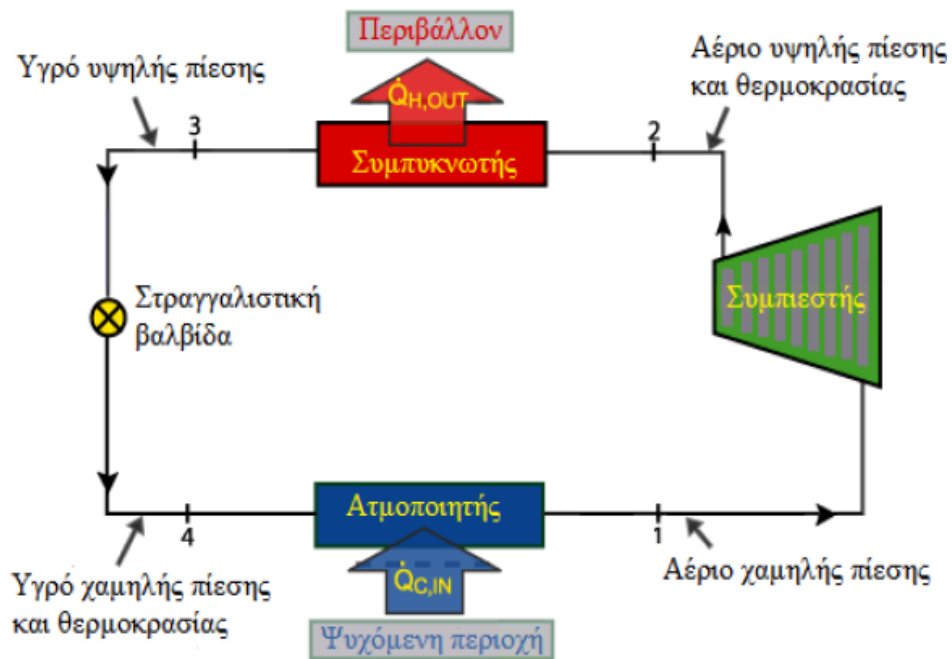
Στην μεταβολή 2-3, ο υπέρθερμος ατμός περνά από τον συμπυκνωτή, όπου και ψύχεται μέχρι να συμπυκνωθεί σε κορεσμένο υγρό (μεταβολή 3-4). Η διαδικασία συμπύκνωσης πραγματοποιείται σε σταθερή πίεση (ιδανικά). Ακολούθως, στην μεταβολή 4-5 το ψυκτικό μέσο σε φάση κορεσμένου υγρού περνά από την βαλβίδα εκτόνωσης, όπου και δέχεται μια απότομη μείωση πίεσης. Αυτή η διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα την αδιαβατική και ισενθαλπική μερική ατμοποίηση του υγρού, το οποίο ψύχεται ταυτόχρονα.

Τέλος, κατά την μεταβολή 5-1 το κρύο και μερικώς ατμοποιημένο ψυκτικό μέσο εισέρχεται στον ατμοποιητή όπου και ατμοποιείται πλήρως από τον ζεστό αέρα του ψυχόμενου χώρου αφαιρώντας θερμότητα από αυτό και άρα ψυχοντάς τον. Ο ατμοποιητής λειτουργεί σε σταθερή πίεση και ατμοποιεί το ψυκτικό μέσο αυξάνοντας την θερμοκρασία του κατά 4-5 K, εξασφαλίζοντας έτσι ότι θα εισέλθει στον συμπιεστή σε μορφή ατμού. Σε αντίθετη περίπτωση, πιθανή συνύπαρξη των δύο φάσεων (υγρής και αέριας) στο μέσο θα μείωνε τον βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης, ενώ θα καταπονούσε μηχανικά τον συμπιεστή οδηγώντας στην φθορά του. Το ψυκτικό μέσο εξέρχεται από τον ατμοποιητή σε φάση ατμού και εισέρχεται στον συμπιεστή ξεκινώντας έτσι ο ψυκτικός κύκλος.

### 2.2.2 Αντλίες θερμότητας

Με δεδομένο ότι σε πρακτικές εφαρμογές απαιτείται η αδιάλειπτη παροχή ψύξης, η λειτουργία του απλού ψυκτικού κύκλου μηχανικής συμπίεσης βασίζεται στις θερμοδυναμικές διεργασίες που περιγράφηκαν και άρα αποτελείται από την συμπίεση του μέσου, τη συμπύκνωση, τον στραγγαλισμό της πίεσης και την ατμοποίηση του, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2.2-1. Μηχανολογικές διατάξεις σαν κι αυτές που μας επιτρέπει να μεταφέρουμε ενέργεια από έναν χώρο χαμηλής θερμοκρασίας, σε έναν χώρο υψηλότερης θερμοκρασίας καλούνται αντλίες θερμότητας.

Πιο αναλυτικά, σε αυτό τον κύκλο, το ψυκτικό ρευστό βρισκόμενο σε αέρια φάση χαμηλής πίεσης (σημείο 1) συμπιέζεται σε έναν συμπιεστή που προκαλεί τη θέρμανση του, ώστε η θερμοκρασία του να ξεπερνά την αποθήκη υψηλής θερμοκρασίας. Το θερμό σε υψηλή πίεση αέριο (σημείο 2) κυκλοφορεί μέσα από εναλλάκτη θερμότητας (συμπυκνωτής) όπου ψύχεται απορρίπτοντας θερμότητα στο περιβάλλον. Μετά την έξοδο από τον συμπυκνωτή (σημείο 3), όπου συχνά το ρευστό είναι ελαφρώς υπόψυκτο, ακολουθεί βαλβίδα στραγγαλισμού ώστε να ελαττωθεί η πίεση και η θερμοκρασία πριν την είσοδο του (σημείο 4) στον δεύτερο εναλλάκτη της εγκατάστασης, τον ατμοποιητή, του οποίου την λαμβανόμενη θερμότητα εκμεταλλευόμαστε για την παραγωγή της ζητούμενης ψύξης.



**Σχήμα 2.2.2-1:** Διάγραμμα τυπικής ψυκτικής εγκατάστασης με μηχανική συμπίεση.

Η διάταξη μηχανικής συμπίεσης που περιγράφηκε παραπάνω χρησιμοποιείται ευρύτατα στην πράξη και καλύπτει απαιτήσεις για ψύξη που ξεκινούν από μερικές δεκάδες W μέχρι αρκετές δεκάδες MW ανά μονάδα [3].

Ήδη από τον ορισμό, γίνεται φανερό ότι οι αντλίες θερμότητας σχεδιάζονται για να μεταφέρουν θερμότητα (θερμική ενέργεια) με φορά αντίθετη από αυτήν της

φυσικής ροής. Για την μεταφορά αυτή, απαιτείται κατανάλωση ενέργειας για τη μηχανική συμπίεση του αέρα και, επομένως, η εκλογή και χρήση των ψυκτικών διατάξεων προϋποθέτει την ύπαρξη επαρκούς μηχανικής ενέργειας για την κίνηση του μηχανικού συμπιεστή. Βασικός παράγοντας στον προσδιορισμό της πίεσης και της θερμοκρασίας συμπίκνωσης, που καθορίζει εν γένει και την απόδοση του κύκλου, αποτελεί η θερμοκρασία περιβάλλοντος, στο οποίο απορρίπτεται η θερμότητα που απελευθερώνεται κατά την συμπίκνωση.

Ο βαθμός απόδοσης ενός ψυκτικού κύκλου καθορίζεται από την σχέση

$$COP = \frac{Q_{cool}}{P_{el,comp}} \quad (2.2)$$

Όπου  $Q_{cool}$  είναι η θερμική ενέργεια που παράγεται στην αντλία θερμότητας και  $P_{el,comp}$  είναι η ηλεκτρική ισχύς που καταναλώνεται στον συμπιεστή για την λειτουργία της αντλίας θερμότητας.

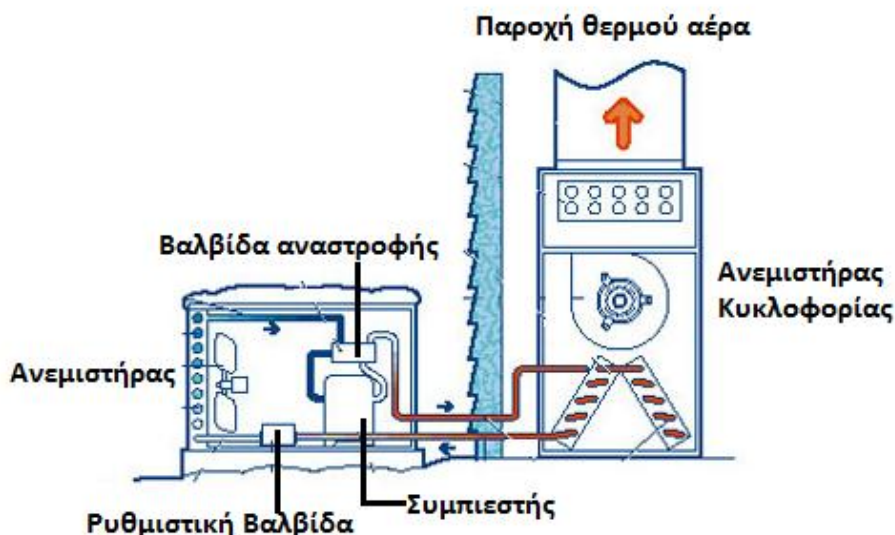
Ο βαθμός απόδοσης COP είναι ένα μέτρο της αποδοτικότητας της αντλίας θερμότητας σε τυπικές συνθήκες λειτουργίας. Μία αντλία θερμότητας που λειτουργεί με COP 4 σημαίνει ότι παρέχει 4 kWh θερμικής ενέργειας, καταναλώνοντας 1 kWh ηλεκτρικής ενέργειας.

Ανάλογα με το ρευστό στο οποίο αποβάλλει (ή από το οποίο προσλαμβάνει) την ενέργεια η αντλία στα σημεία 4-1 και 2-3 του ψυκτικού κύκλου, οι αντλίες θερμότητας ταξινομούνται σε:

- Αντλίες θερμότητας αέρος-αέρος
- Αντλίες θερμότητας αέρος-νερού
- Αντλίες θερμότητας νερού-νερού

#### 2.2.2.1. Αντλίες θερμότητας αέρος-αέρος

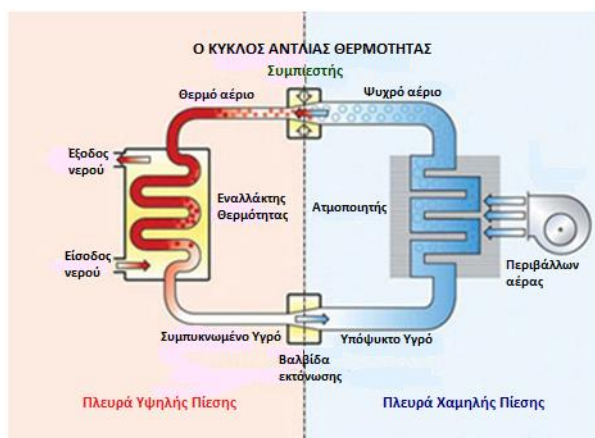
Είναι αντλίες που διαθέτουν και στο σημείο 4-1 και στο σημείο 2-3 εναλλάκτη θερμότητας αέρα-ψυκτικού. Είναι τα γνωστά σε όλους μας κλιματιστικά μηχανήματα διαιρούμενου τύπου (split type). Ειδικά στον διαιρούμενο τύπο το ένα στοιχείο (εναλλάκτης στη θέση 4-1) βρίσκεται μέσα στο σπίτι μας και προσλαμβάνει ενέργεια (αφαιρεί θερμότητα και ψύχει τον χώρο), και το άλλο σημείο 2-3 είναι επίσης εναλλάκτης ψυκτικού μέσου-αέρα και αποβάλλει θερμότητα έξω από το σπίτι.



Σχήμα 2.2.2.1-1: Αντλίες θερμότητας αέρος-αέρος

### 2.2.2.2 Αντλίες θερμότητας αέρος-νερού.

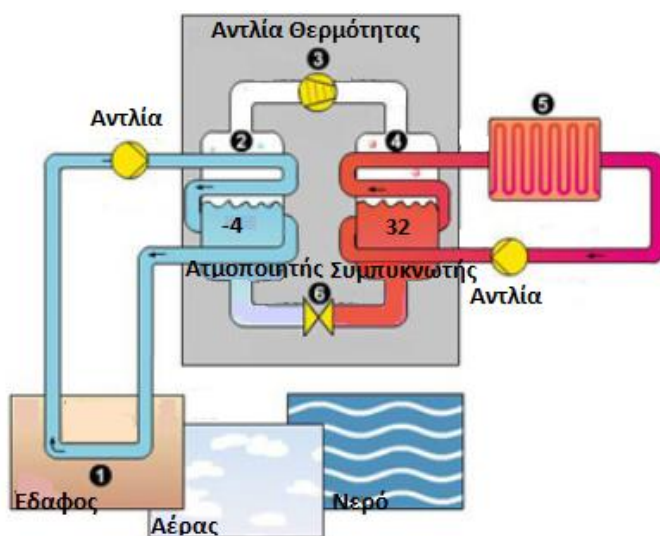
Οι αντλίες αυτές στην μια πλευρά (σημείο 4-1) αντί για στοιχείο έχουν εναλλάκτη ψυκτικού μέσου-νερού και αφαιρούν θερμότητα (ψύχουν νερό) αντί για αέρα. Με τις αντλίες αυτές δηλαδή, μπορούμε να αντλούμε θερμότητα (και άρα να ψύχουμε νερό) και να την αποβάλλουμε στο περιβάλλον (όπως γίνεται και στα κλιματιστικά μηχανήματα της προηγούμενης κατηγορίας).



Σχήμα 2.2.2.2-1: Αντλίες θερμότητας αέρος-νερού.

### 2.2.2.3 Αντλίες θερμότητας νερού-νερού.

Στις αντλίες αυτές και οι δύο εναλλάκτες είναι εναλλάκτες νερού, και το ψυκτικό μέσο μεταφέρει θερμότητα από τη μια μάζα νερού στην άλλη. Τέτοιες αντλίες, είναι οι υδρόψυκτες αντλίες θερμότητας με πύργο ψύξης και οι αντλίες νερού-νερού που χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις με γεωεναλλάκτη (γεωθερμικές).



Σχήμα 2.2.2.3-1: Αντλίες θερμότητας νερού-νερού.

Επίσης, ανάλογα με τη θέση των διαφόρων στοιχείων τους, οι αντλίες θερμότητας ταξινομούνται σε:

- Ενιαίες ή αυτόνομες (Compact) όπου όλοι οι μηχανισμοί βρίσκονται σε κοινό κέλυφος.
- Διαιρούμενες ή διμερούς τύπου (Split units). Ο ατμοποιητής (ή ο συμπυκνωτής) είναι ανεξάρτητος του υπολοίπου συστήματος.

Τέλος, ανάλογα με το είδος της κινητήριας μηχανής, οι αντλίες θερμότητας ταξινομούνται σε:

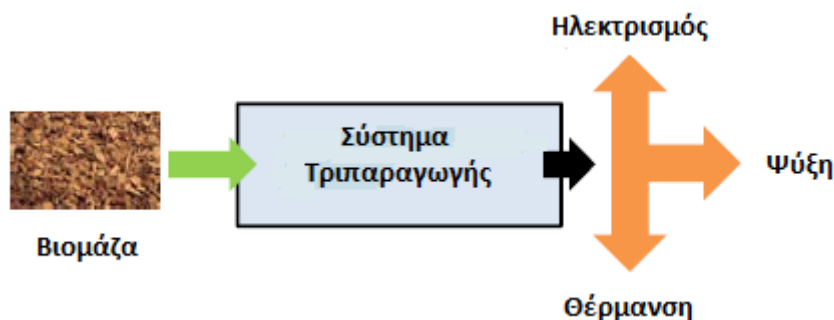
- Αντλίες με ηλεκτροκίνητους συμπιεστές.
- Αντλίες με συμπιεστές κινούμενους από μηχανές εσωτερικής καύσης (πετρέλαιο, ατμός, αέριο κλπ).
- Αντλίες με συμπιεστές απορρόφησης και προσρόφησης (θερμική ενέργεια χαμηλής και μέσης θερμοκρασίας).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### Η ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΡΙΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΤRIC

#### 3.1 Περιγραφή της αρχής λειτουργίας και περιγραφή της εγκατάστασης

Στα πλαίσια της μονάδας τριπαραγωγής BioTRIC, η οποία έχει κατασκευαστεί σε πειραματικό στάδιο στο εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων της Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, πραγματοποιήθηκε σύζευξη του οργανικού κύκλου Rankine (ORC) και του κύκλου συμπίεσης ατμού (VCC) με στόχο την εκμετάλλευση της θερμότητας που προέρχεται από αύση βιομάζας για συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρισμού, θερμότητας και ψύξης. Η κατασκευή και μελέτη μιας τέτοιας εγκατάστασης αποσκοπεί στην χρήση και λειτουργία της σε οικιακές εφαρμογές, με έμφαση σε αποκεντρωμένα συστήματα.



**Σχήμα 3.1-1:** Απλοποιημένο σχήμα συνδυασμού κύκλων ORC και VCC.

Ένα από τα πλεονεκτήματα τέτοιου τύπου εγκαταστάσεων είναι η συνολικά αποδοτικότερη αξιοποίηση της ενέργειας των καυσίμων σε σύγκριση με την διακριτή παραγωγή θέρμανσης, ψύξης και ηλεκτρικής ενέργειας.

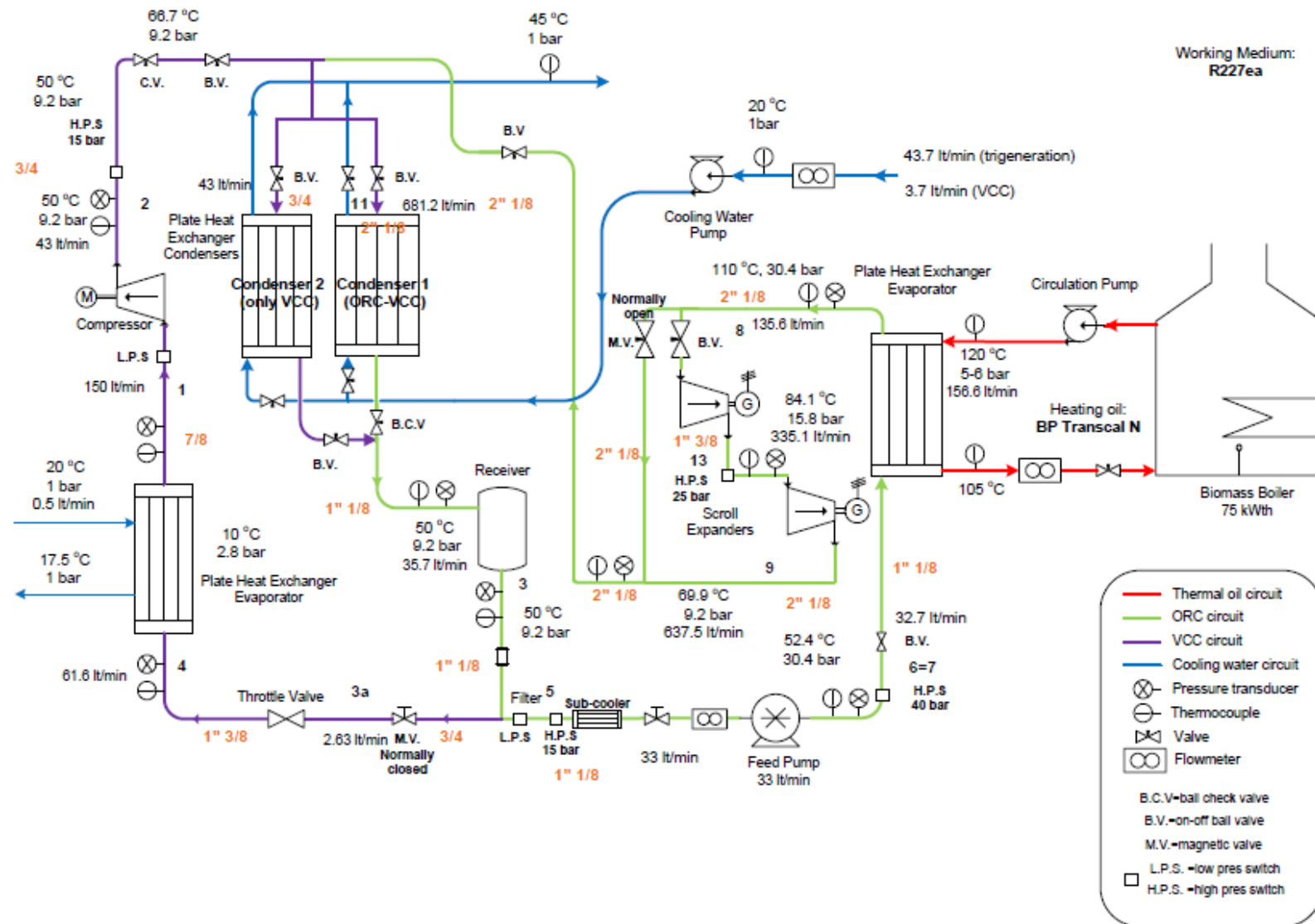
Σύμφωνα με την μελέτη των F.Al-Sulaiman, I.Dincer και F.Hamdullahpur [4], ο μέγιστος ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του συστήματος είναι 14%, ο μέγιστος βαθμός απόδοσης για την συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ψύξης ήταν 17%, ενώ για τη συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θέρμανσης ο βαθμός απόδοσης ανερχόταν στο 87%. Τέλος, για την τριπαραγωγή ο βαθμός απόδοσης ανερχόταν περί το 89%.

Η μονάδα BioTRIC που έχει σχεδιασθεί και κατασκευαστεί αποτελεί ένα σύστημα τριπαραγωγής που συνδυάζει υπερκρίσιμο οργανικό κύκλο Rankine για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θέρμανσης, με ένα ψυκτικό κύκλο μηχανικής συμπίεσης, για παραγωγή ψύξης. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το μονογραμμικό διάγραμμα της υπό κατασκευή εγκατάστασης.

Η πρόσδοση θερμότητας στον ORC γίνεται μέσω της καύσης βιομάζας. Ο λέβητας βιομάζας συνδέεται με ένα ελαιόθερμο κύκλωμα. Το θερμικό έλαιο παραλαμβάνει τη θερμότητα από την καύση της βιομάζας και τα παραγόμενα θερμά καυσαέρια και στη συνέχεια την προσδίδει στο εργαζόμενο μέσο του ORC δια μέσω του υπερκρίσιμου εναλλάκτη θερμότητας. Στη συνέχεια, το ψυχρό θερμικό έλαιο επιστρέφει στο λέβητα για να αυξηθεί και πάλι η θερμοκρασία του και να επανεκκινήσει ο κύκλος [33]. Το οργανικό ρευστό το οποίο επιλέχθηκε και θα χρησιμοποιηθεί είναι το R227ea, με τα χαρακτηριστικά θερμοδυναμικά μεγέθη του (θερμοκρασία, πίεση, ογκομετρική παροχή) στα διάφορα σημεία λειτουργίας, όπως υπολογίστηκαν και βελτιστοποιήθηκαν για λειτουργία στο ονομαστικό φορτίο [3].

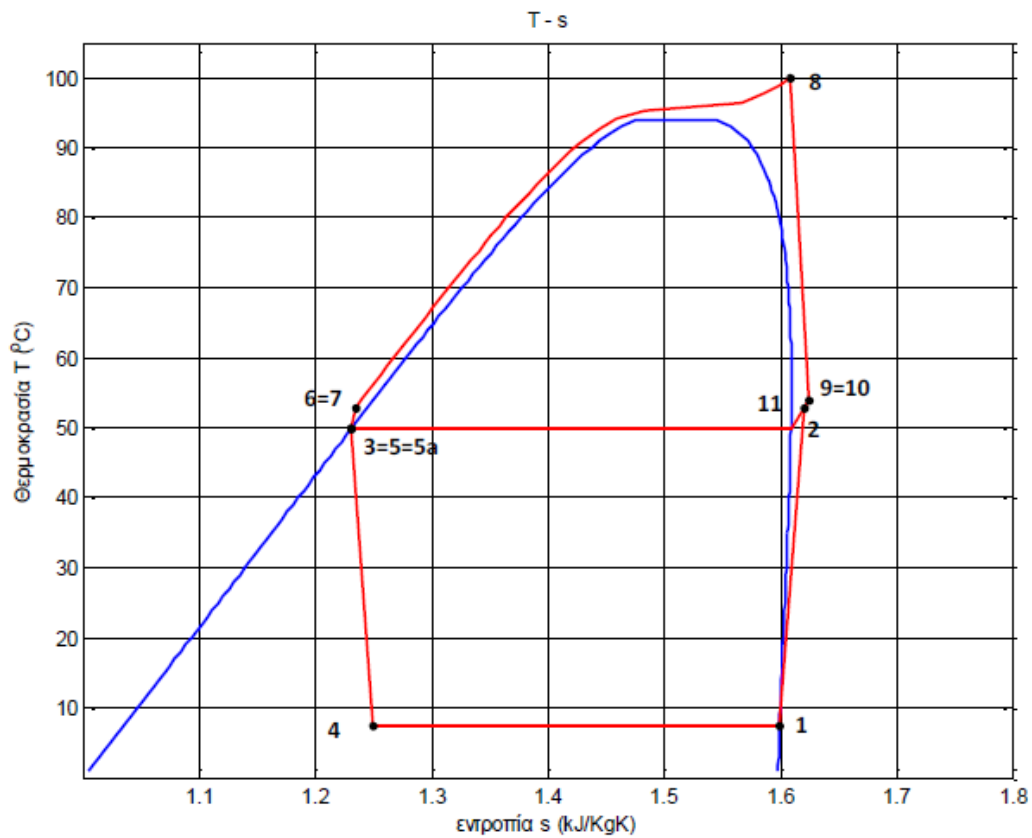
Το σύστημα διακρίνεται στα εξής διαφορετικά κυκλώματα:

- το κύκλωμα του υπερκρίσιμου ORC κύκλου.
- το κύκλωμα του VCC κύκλου.
- το κύκλωμα θερμικού ελαίου.
- το κύκλωμα ψυκτικού νερού.

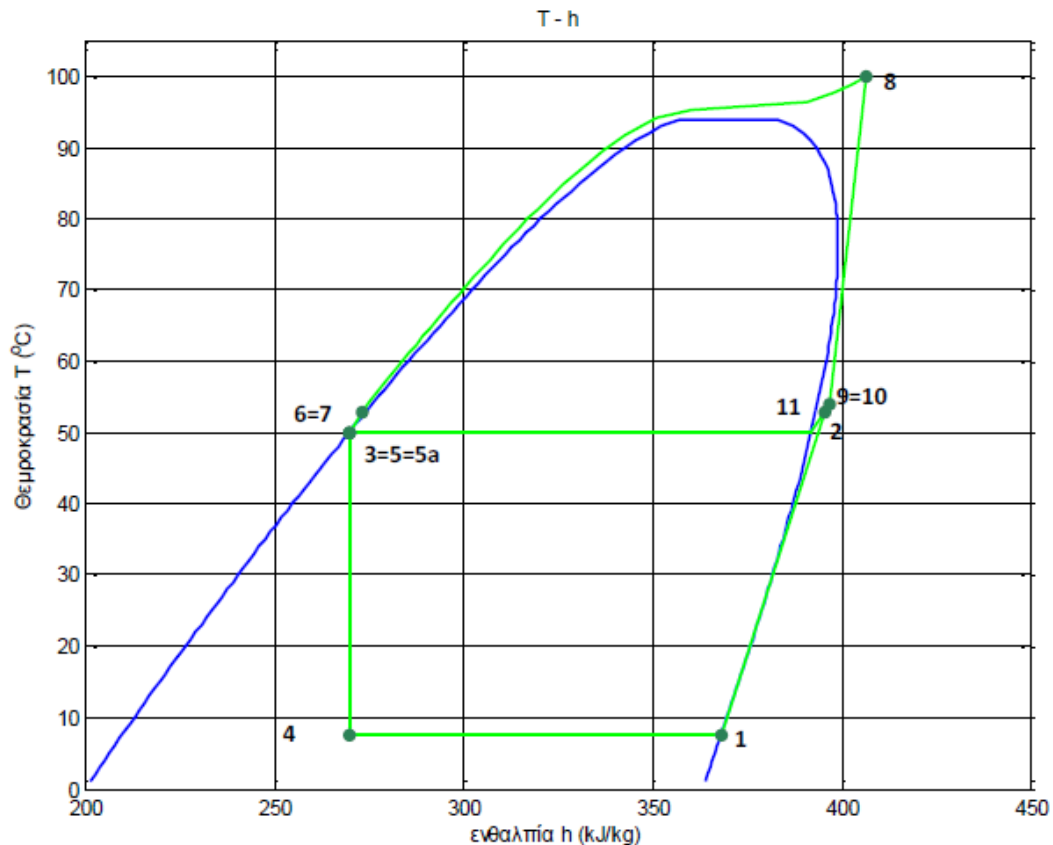


Σχήμα 3.1-2: Μονογραμμικό σχέδιο εγκατάστασης τριπαραγωγής (BioTRIC).

Ακολούθως, δίνονται τα διαγράμματα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s) και θερμοκρασίας-ενθαλπίας (T-h) της εγκατάστασης, όπως προκύπτουν από την μελέτη σχεδιασμού του συστήματος, που συμπεριλαμβάνουν τόσο τον υπερκρίσιμο ORC όσο και τον VCC κύκλο.



*Διάγραμμα 3.1-1: Διάγραμμα T-s εγκατάστασης τριπαρογωγής.*



*Διάγραμμα 3.1-2: Διάγραμμα T-h εγκατάστασης τριπαγωγής.*

Σημαντικό κομμάτι, ωστόσο, στην ορθή λειτουργία της εγκατάστασης παίζει και η δυνατότητα ελέγχου, εποπτείας και αυτοματοποίησης αυτής, ώστε η λειτουργία της να είναι πιο ομαλή σε οικιακή χρήση και να μπορεί να καλύπτει τα μεταβαλλόμενα ψυκτικά και θερμικά φορτία.

Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί με ένα άτι τέτο Εποπτικού Ελέγχου και Ανάτησης Δεδομένων (Supervision Control And Data Acquisition, SCADA), το οποίο συλλέγει πληροφορίες από διάφορες διεργασίες και χρησιμοποιείται για τον εποπτικό έλεγχο αυτών, δηλαδή είναι υπεύθυνο για την παρακολούθηση, την καταγραφή και τον έλεγχο ενός πλήθους βασικών μεταβλητών και παραμέτρων τους [30]. Οι μεταβλητές μπορεί να είναι η ροή ενός υγρού, η πίεση ενός αερίου καθώς και θερμοκρασίες, τάσεις, ρεύματα, σημάνσεις και στάθμες υγρών. Η χρήση ενός συστήματος SCADA επιτρέπει στους χειριστές του να ελέγχουν και να παρατηρούν διαδικασίες με μεγάλη τοπολογική διανομή, από μια κεντρική τοποθεσία. Η διαδικασία λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος είναι η συλλογή των δεδομένων, η αποστολή τους σε ένα κεντρικό σημείο επεξεργασίας, η εκτέλεση της απαραίτητης ανάλυσης και ελέγχου, και τέλος η παρουσίαση της πληροφορίας σε διάφορες οθόνες χειρισμού και εποπτείας, σε πραγματικό χρόνο.

Τα δεδομένα, υπό την μορφή αναλογικού ή ψηφιακού σήματος, προκύπτουν με την χρήση των κατάλληλων αισθητηρίων και μορφομετατροπών. Η συλλογή γίνεται από ένα Προγραμματιζόμενο Λογικό Ελεγκτή (Programmable Logic Controller, PLC) για τοπικό έλεγχο, ενώ η προβολή τους γίνεται μέσω κατάλληλης εφαρμογής Διεπαφής Μηχανής-Ανθρώπου (Human Machine Interface, HMI).

Στην μονάδα που έχει κατασκευαστεί έχει αναπτυχθεί ένα κατάλληλο πρόγραμμα ελέγχου μέσω PLC και εποπτείας μέσω της HMI εφαρμογής LabVIEW στη φάση της μελέτης της εγκατάστασης. Στην παρούσα εργασία δίνονται οι αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν σε αυτά τα προγράμματα λόγω αλλαγών στην συνδεσμολογία του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού της εγκατάστασης κατά την φάση της κατασκευής της. Στόχος της ορθής λειτουργίας των προγραμμάτων ελέγχου και εποπτείας είναι η δυνατότητα διεξαγωγής πειραματικών μετρήσεων και η συλλογή και καταγραφή δεδομένων κατά την λειτουργία της μονάδας τριπαραγωγής.

Η εγκατάσταση τριπαραγωγής σχεδιάστηκε κατά τέτοιον τρόπο ώστε με τον έλεγχο των κατάλληλων βαλβίδων να είναι δυνατή τόσο η ταυτόχρονη όσο και η ξεχωριστή λειτουργία του υπερκρίσιμου ORC και του VCC κύκλου. Έτσι, το καλοκαίρι το σύστημα μπορεί να παράγει τη μέγιστη ψυκτική ισχύ του ενώ το χειμώνα που δεν υπάρχει ανάγκη ψύξης να απομονώνεται το ψυκτικό κύκλωμα και να λειτουργεί μόνο το τμήμα της θέρμανσης με ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την περίσσεια της ισχύος που θα υπάρχει (συμπαραγωγή). Για τον λόγο αυτό στην εγκατάσταση υπάρχουν συνολικά τέσσερις εναλλάκτες θερμότητας και συγκεκριμένα ο ατμοποιητής του ORC κύκλου, ο ατμοποιητής του VCC κύκλου, ο κοινός συμπυκνωτής των δύο κύκλων και ο συμπυκνωτής του VCC κύκλου.

Έτσι, διακρίνονται οι εξής καταστάσεις λειτουργίας στην εγκατάσταση:

- Λειτουργία μόνο του υπερκρίσιμου ORC κύκλου, όπου το VCC κύκλωμα απομονώνεται μέσω βαλβίδων αντεπιστροφής (B.C.V) και της ηλεκτρομαγνητικής βαλβίδας (M.V.). Το ρευστό κυκλοφορεί μόνο στον ORC κύκλο, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια και θέρμανση, και συμπυκνώνεται μέσω του κοινού συμπυκνωτή ORC-VCC (Condenser 1).

- Λειτουργία μόνο του VCC κύκλου, όπου το ORC κύκλωμα απομονώνεται μέσω βαλβίδων αντεπιστροφής (B.C.V) και της χειροκίνητης βαλβίδας (B.V.). Το ρευστό κυκλοφορεί μόνο στο VCC κύκλωμα παρέχοντας ψύξη και συμπυκνώνεται μέσω του αποκλειστικού για αυτόν τον κύκλο συμπυκνωτή (Condenser 2).

- Ταυτόχρονη λειτουργία των δύο κύκλων, δηλαδή τριπαραγωγή, όπου η λειτουργία του VCC κύκλου καθορίζεται από την ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα, ενώ ο Condenser 2 βγαίνει εκτός λειτουργίας μέσω της χειροκίνητης βάνας (B.V.). Η

συμπύκνωση και για τους δύο κύκλους γίνεται μέσω του κοινού συμπυκνωτή (Condenser 1).

### **3.1.1 Κύκλωμα θερμικού ελαίου**

Στο κύκλωμα θερμικού ελαίου πραγματοποιείται η παραγωγή θερμότητας που είναι αναγκαία για τη λειτουργία του ORC και την πρόσδοσή της στο εργαζόμενο μέσο του. Αυτό αποτελείται από τον λέβητα στον οποίο υπάρχουν καυστήρες pellet και φυσικού αερίου, όπου πραγματοποιείται η καύση, με αποτέλεσμα την θέρμανση του ελαίου. Ο συγκεκριμένος λέβητας είναι αποσπώμενου τύπου, δηλαδή ο καυστήρας pellet θα μπορεί να αντικατασταθεί από καυστήρα φυσικού αερίου, παρέχοντας έτσι την δυνατότητα λειτουργίας με διαφορετικό καύσιμο. Η συνεχής κυκλοφορία του θερμικού ελαίου στον ατμοποιητή, για την πρόσδοση θερμότητας στο οργανικό ρευστό και την ατμοποίησή του, γίνεται μέσω του κυκλοφορητή (circulation pump).

Το σύστημα λέβητας-κυκλοφορητής αποτελεί ενιαίο και αυτόνομο σύστημα, με δικό του ηλεκτρολογικό πίνακα και σύστημα αυτόματου ελέγχου, έτσι ώστε με την κατάλληλη επιλογή από ενσωματωμένο ηλεκτρονικό panel να είναι δυνατή η επιλογή της θερμοκρασίας του θερμικού ελαίου, η οποία και διατηρείται σταθερή. Επομένως ο έλεγχος του κυκλώματος θερμικού ελαίου θα γίνεται τοπικά και χειροκίνητα, οπότε στο πλαίσιο της εφαρμογής SCADA της παρούσας εργασίας θα μας απασχολήσει μόνο η συλλογή των δεδομένων των θερμοκρασιών του ελαίου, στην είσοδο και έξοδο του λέβητα, καθώς και η παροχή του, από τα αντίστοιχα μετρητικά που φαίνονται στο μονογραμμικό διάγραμμα.

### **3.1.2 Κύκλωμα ψυκτικού νερού**

Το κύκλωμα ψυκτικού νερού αποτελεί επί της ουσίας το κύκλωμα ψύξης του ORC κύκλου (λειτουργία θέρμανσης) και ατμοποίησης-συμπύκνωσης του VCC κύκλου (λειτουργία ψύξης-θέρμανσης αντίστοιχα). Στην περίπτωση του ORC κυκλοφορεί νερό στους 20°C από το δίκτυο ύδρευσης, παραλαμβάνοντας θερμότητα από τον κοινό συμπυκνωτή ORC-VCC (Condenser 1) κατά την συμπύκνωση του οργανικού ρευστού, με αποτέλεσμα στην έξοδό του να προκύπτει ζεστό νερό θερμοκρασίας 45°C.

Αντίστοιχα στην περίπτωση του VCC κύκλου, νερό στους 20°C φτάνει στην είσοδο του ατμοποιητή, προσδίδοντάς του θερμότητα για την ατμοποίηση του οργανικού ρευστού, οπότε επιτυγχάνεται η ψύξη του νερού στους 17.5°C. Κατά την λειτουργία μόνο του VCC κύκλου, ο κοινός συμπυκνωτής ORC-VCC βγαίνει εκτός λειτουργίας με την ρύθμιση χειροκίνητων βαλβίδων, οπότε η συμπύκνωση του ρευστού πραγματοποιείται στον συμπυκνωτή του VCC κύκλου (Condenser 2). Το νερό που φτάνει στη είσοδο του συμπυκνωτή στους 20°C ζεσταίνεται μέχρι τους 45°C στην έξοδό του, ψύχοντας το οργανικό ρευστό. Το κύκλωμα ψυκτικού νερού ελέγχεται τοπικά από χειροκίνητες βάνες και για τον συγκεκριμένο τρόπο σχεδιασμού της μονάδας δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί απομακρυσμένος έλεγχος του ψυκτικού κύκλου.

### **3.1.3 Κύκλωμα ORC**

Το οργανικό ρευστό στην έξοδο του ατμοποιητή με αυξημένη πίεση, λόγω της αντλίας, και θερμοκρασία, λόγω του ατμοποιητή, βρίσκεται στην φάση είτε του υπέρθερμου ατμού, είτε σε κατάσταση υπερκρίσιμου ρευστού, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας της μονάδας. Ο δρόμος που ακολουθεί είναι αυτός με την χαμηλότερη αντίσταση που συναντά στην πορεία του και εξαρτάται από την θέση (ON/OFF) της ηλεκτρομαγνητικής βαλβίδας (M.V.). Όταν η βαλβίδα είναι ανοιχτή το ρευστό συναντά μικρή αντίσταση μέσω των σωληνώσεων αυτής και ουσιαστικά παρακάμπτει το τμήμα των εκτονωτών, συνεπώς και της ηλεκτροπαραγωγής. Όταν είναι κλειστή το ρευστό οδηγείται προς τους εκτονωτές αποδίδοντας μηχανική ισχύ.

Ακολουθώς το ρευστό οδηγείται στον κοινό συμπυκνωτή των κύκλων ORC και VCC όπου αποδίδει την θερμότητά του στο κύκλωμα ψύξης, προτού καταλήξει στο τροφοδοτικό δοχείο.

### **3.1.4 Κύκλωμα VCC**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το κύκλωμα VCC είναι δυνατό να λειτουργεί είτε παράλληλα με το ORC κύκλωμα σε κατάσταση τριπαραγωγής είτε απομονωμένα από αυτό σε κατάσταση παραγωγής μόνο ψύξης. Η κατάσταση του VCC κύκλου ελέγχεται από την θέση της ηλεκτρομαγνητικής βάνας πριν την στραγγαλιστική βαλβίδα, όπως φαίνεται στο μονογραμμικό διάγραμμα, καθώς και από την λειτουργία

του συμπιεστή. Με την λειτουργία μόνο του ORC κύκλου το σύστημα βρίσκεται σε λειτουργία συμπαραγωγής. Όταν ανοίξει η ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα του VCC κυκλώματος (Normally Closed) και τεθεί σε λειτουργία ο συμπιεστής, το σύστημα μπαίνει σε λειτουργία τριπαραγωγής. Μια ποσότητα του οργανικού ρευστού διέρχεται μέσω της στραγγαλιστικής βαλβίδας, όπου μειώνεται η πίεση και η θερμοκρασία του, και στη συνέχεια εισέρχεται στον ατμοποιητή του VCC κύκλου. Εκεί παραλαμβάνει θερμότητα από το κύκλωμα νερού (παραγωγή ψύξης) και ατμοποιείται πριν οδηγηθεί στον μηχανικό συμπιεστή. Ο συμπιεστής αυξάνει την πίεση και θερμοκρασία του ατμοποιημένου ρευστού, το οποίο ακολούθως αναμιγνύεται με το ρευστό που επιστρέφει από το ORC κύκλωμα, πριν καταλήξει στον κοινό εναλλάκτη ORC-VCC για την συμπύκνωσή του (παραγωγή θέρμανσης). Στην περίπτωση αυτή ο συμπυκνωτής μόνο του VCC κύκλου (Condenser 2) έχει τεθεί εκτός λειτουργίας μέσω χειροκίνητων βανών.

Η κατάσταση λειτουργίας μόνο του VCC κύκλου προϋποθέτει την απομόνωση του ORC κυκλώματος και του κοινού συμπυκνωτή ORC-VCC, μέσω των κατάλληλων χειροκίνητων βαλβίδων, και την προσθήκη του συμπυκνωτή VCC. Με το άνοιγμα της ηλεκτρομαγνητικής βαλβίδας του VCC και την ενεργοποίηση του συμπιεστή επιτυγχάνεται η λειτουργία του ψυκτικού κύκλου όπως περιγράφηκε προηγουμένως.

## **3.2 Περιγραφή επιμέρους συστημάτων**

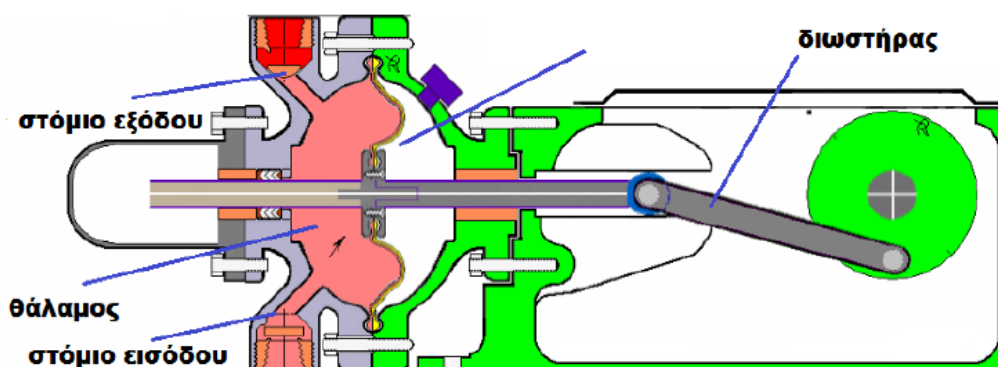
### **3.2.1 Αντλία κυκλοφορίας οργανικού ρευστού**

Ως αντλίες ορίζονται οι μηχανές που χρησιμεύουν για τη μετακίνηση υγρών και την προσθήκη ενέργειας σε αυτά, μετατρέποντας τη μηχανική ενέργεια που παρέχεται σε αυτές μέσω ενός κινητήρα σε δυναμική, κινητική και θερμική ενέργεια του υγρού [5]. Ο πιο βασικός διαχωρισμός των αντλιών έγκειται στην αρχή λειτουργίας τους και με αυτόν τον τρόπο διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τις δυναμικές αντλίες (dynamic pumps) και τις αντλίες θετικής μετατόπισης (positive displacement pumps).

Η αντλία της εγκατάστασης ανήκει στην κατηγορία αντλιών θετικής μετατόπισης και είναι τύπου υδραυλικού διαφράγματος. Οι αντλίες θετικής μετατόπισης παραλαμβάνουν το υγρό από το σωλήνα αναρρόφησης και το μετατοπίζουν προς το σωλήνα κατάθλιψης με κάποιο κινούμενο στερεό σώμα που

κινείται μέσα σε ειδικό περίβλημα. Στην περίπτωση μας το κινούμενο στερεό σώμα είναι το διάφραγμα, το οποίο είναι μια ελαστική μεμβράνη πακτωμένη περιφερειακά σε σταθερό περίβλημα για λόγους στεγανότητας. Το διάφραγμα είναι αυτό που έρχεται σε απευθείας επαφή με το υγρό και παίρνει κίνηση μηχανικά.

Πιο συγκεκριμένα, μία αντλία τύπου διαφράγματος αποτελείται από το διάφραγμα, τον θάλαμο, τις βαλβίδες εξαγωγής και εισαγωγής και το μηχανισμό που κινεί το διάφραγμα. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, το διάφραγμα συνδέεται με τον θάλαμο στον οποίο υπάρχουν η βαλβίδα εισαγωγής και η βαλβίδα εξαγωγής.



**Σχήμα 3.2.1-1:** Αντλία διαφράγματος με μηχανική οδήγηση.

Καθώς το διάφραγμα κινείται προς τα δεξιά, κλείνει η βαλβίδα κατάθλιψης (εξαγωγής) φράσσοντας το στόμιο εξόδου, οπότε ο όγκος του θαλάμου αυξάνεται και γεμίζει με υγρό μέσα από την ανοιχτή βαλβίδα αναρρόφησης (εισαγωγής). Όταν το διάφραγμα κινείται προς τα αριστερά κλείνει η βαλβίδα αναρρόφησης, ανοίγει η βαλβίδα κατάθλιψης και το υγρό εκτοπίζεται προς το στόμιο εξόδου. Το διάφραγμα κινείται παλινδρομικά από τον δωστήρα, που παίρνει κίνηση από τον κινητήρα μέσω στροφάλου. Μεταβάλλοντας την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα πετυχαίνουμε αντίστοιχη μεταβολή της παροχής μάζας του ρευστού. Για παράδειγμα με την αύξηση των στροφών του κινητήρα, πετυχαίνουμε περισσότερες παλινδρομικές κινήσεις του διαφράγματος στην μονάδα του χρόνου, αυξάνοντας την παροχή του ρευστού στην έξοδο της αντλίας.

Η αντλία που χρησιμοποιείται στην εγκατάσταση είναι το μοντέλο D-10-X της Εταιρείας Hydra Cell και δίνεται στην Εικόνα 3.2.1-1. Από τον κατασκευαστή δίνονται η χαρακτηριστική καμπύλη παροχής-στροφών που φαίνεται στο Διάγραμμα

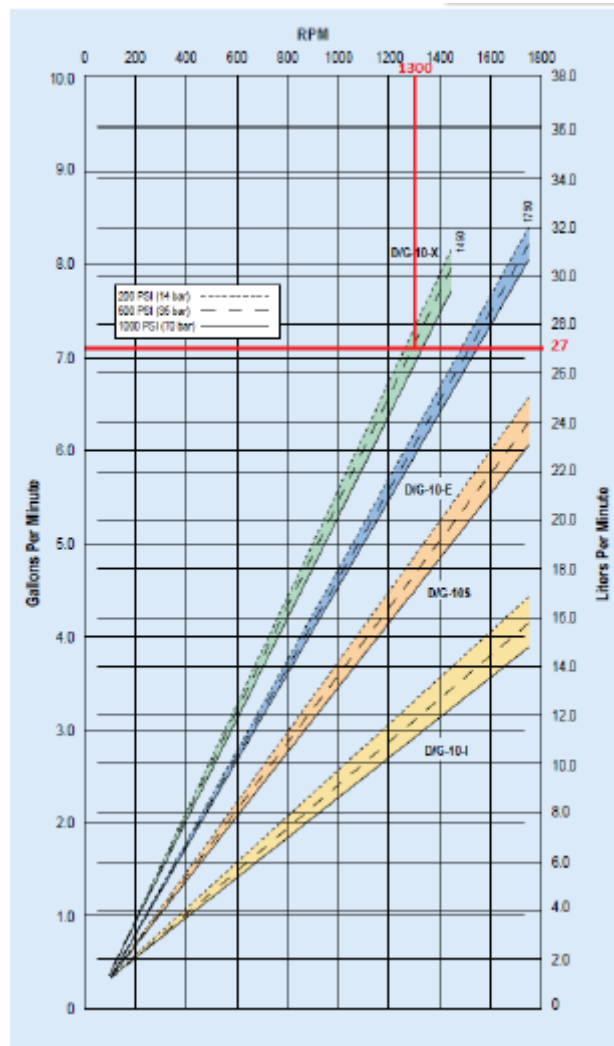
3.2.1-1, καθώς και ορισμένα τεχνικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου μοντέλου τα οποία δίνονται στον Πίνακα 3.2.1-1.



**Εικόνα 3.2.1-1:** Αντλία Hydra Cell D/G-10-X.

Χαρακτηριστικά	Hydra Cell D/G-10-X
Μέγιστη πίεση εισόδου (bar)	17
Μέγιστη θερμοκρασία ροής (C°)	121
Διάμετρος στομίου εισόδου (in)	1
Διάμετρος στομίου εξόδου (in)	3/4
Διάμετρος άξονα (in)	7/8
Βάρος (kg)	22
Περιστροφή άξονα	Διπλής κατεύθυνσης

**Πίνακα 3.2.1-1:** Τεχνικά χαρακτηριστικά της αντλίας Hydra Cell D/G-10-X [31].



**Διάγραμμα 3.2.1-1:** Χαρακτηριστική καμπύλη παροχής-στροφών της αντλίας της εγκατάστασης BioTRIC.

Η παροχή της αντλίας ελέγχεται με ρυθμιστή στροφών (Inverter) που αλλάζει την συχνότητα λειτουργίας του κινητήρα της. Η μεταβολή της πίεσης του ρευστού στην έξοδο της αντλίας, σχετίζεται με την αντίσταση που βρίσκει στην έξοδο αυτής. Έτσι, με ανοιχτή την bypass βαλβίδα, αυξάνοντας την συχνότητα λειτουργίας του κινητήρα αναμένουμε αύξηση της παροχής, με σχετικά μικρή αύξηση της πίεσής του ρευστού, ενώ με κλειστή την bypass, η πίεση του εξαρτάται από την αντίσταση που δημιουργούν οι εκτονωτές και σχετίζεται με την ταχύτητα περιστροφής των μηχανών με τις οποίες είναι συνδεδεμένοι.

Για την προστασία της αντλίας από υποπίεση και υπερπίεση στην είσοδό της και υπερπίεση στην έξοδό της, θα τοποθετηθούν αισθητήρες ψυχρής επαφής όπως φαίνεται στο μονογραμμικό διάγραμμα (Low Pressure Switch L.P.S. , High Pressure Switch H.P.S) στις αντίστοιχες θέσεις.

Οι αισθητήρες αυτοί είναι κατάστασης ON/OFF και αποτελούν ψηφιακές εισόδους στο σύστημα συλλογής των δεδομένων, δηλαδή στο PLC της εγκατάστασης, στο οποίο λαμβάνονται και οι αποφάσεις για την περαιτέρω συμπεριφορά του συστήματος σε περίπτωση που φτάσει κάποιο σήμα υποπίεσης / υπερπίεσης (κατάσταση ON).

### 3.2.1.1 Κινητήρας και Inverter αντλίας

Για την κίνηση της αντλίας του ORC κυκλώματος θα χρησιμοποιηθεί τριφασικός επαγωγικός κινητήρας. Τα ονομαστικά χαρακτηριστικά του κινητήρα φαίνονται στον Πίνακα 3.2.1.1-1, ενώ στην Εικόνα 3.2.1.1-2 φαίνεται το σύστημα αντλίας-κινητήρα.

Χαρακτηριστικά μηχανής		Τιμές
Τάση	(Volt)	230-Δ / 400-Y
Ισχύς	(KW)	3
Ρεύμα	(A)	6.5
Βαθμός απόδοσης	(%)	81.5
Συντελεστής ισχύος	(cosφ)	0.82
Αριθμός πόλων		4
Ταχύτητα περιστροφής	(rpm)	1410
Ολίσθηση	(%)	5.095
Ροπή	(Nm)	20

*Πίνακας 3.2.1.1-1: Ονομαστικά χαρακτηριστικά κινητήρα αντλίας.*



*Εικόνα 3.2.1.1-1: Σύστημα αντλία-κινητήρα.*

### **Inverter αντλίας**

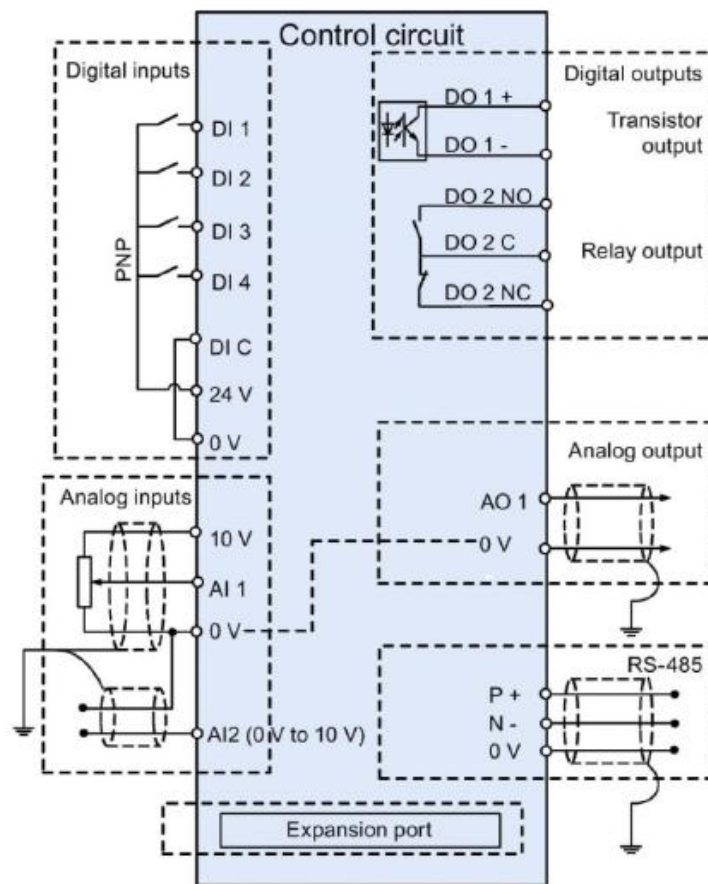
Για την ρύθμιση των στροφών του κινητήρα της αντλίας επιλέχθηκε το μοντέλο Sinamics V20 της εταιρίας Siemens. Αυτοί οι ρυθμιστές είναι κατάλληλοι για τυπικά φορτία (αντλίες, μεταφορικές ταινίες, συμπιεστές κλπ.), έχουν μικρό χρόνο απόκρισης, μέγιστη απόδοση σε κάθε επίπεδο στροφών και παρέχουν την δυνατότητα ελέγχου της λειτουργίας τους τόσο τοπικά, από ενσωματωμένο πάνελ, όσο και απομακρυσμένα από κάποιο κεντρικό σύστημα ελέγχου.

Ορισμένα από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου Inverter είναι:

- Τάση εισόδου 3AC 380 V - 480 V (+10 % / -15 %)
- Ονομαστική ισχύς εξόδου 3 KW
- Ονομαστικό ρεύμα εξόδου 7.3 A
- Υπερφόρτιση στο 150% του ονομαστικού ρεύματος εξόδου για 60 sec
- 4 ψηφιακές εισοδοι
- 2 ψηφιακές έξοδοι
- 2 αναλογικές εισοδοι
- 1 αναλογική έξοδος
- Δυνατότητα επικοινωνίας με τα πρωτόκολλα USS και Modbus RTU μέσω RS485.

Ο Sinamics V20 φέρει ενσωματωμένο κύκλωμα ελέγχου στο οποίο γίνεται η βασική παραμετροποίηση για την επίτευξη της ορθής και ασφαλούς λειτουργίας της μηχανής της εφαρμογής μας. Η παραμετροποίηση περιλαμβάνει την εισαγωγή των

ονομαστικών χαρακτηριστικών της μηχανής καθώς και την επιλογή του τρόπου διεπαφής με τον inverter, μέσα από ένα σετ προεπιλεγμένων ρυθμίσεων (Connection macros). Με την επιλογή της κατάλληλης μακροεντολής πετυχαίνουμε τον επιθυμητό τρόπο ελέγχου καθώς και την προστασία του κινητήρα. Για το συγκεκριμένο μοντέλο υπάρχει και η δυνατότητα επιλογής μέσα από ένα επιπλέον σετ προεπιλεγμένων ρυθμίσεων, που σχετίζονται με την εφαρμογή στην οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθεί (Application macro). Οποιαδήποτε στιγμή υπάρχει η δυνατότητα εναλλαγής μεταξύ αυτόματης (μέσω Connection macro) και χειροκίνητης τοπικής λειτουργίας του inverter από το πάνελ χειρισμού του (Basic Operation Panel, BOP) με το πάτημα των κατάλληλων κουμπιών του (ταυτόχρονο πάτημα M+OK δύο φορές). Το διάγραμμα του κυκλώματος ελέγχου του ρυθμιστή φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



**Διάγραμμα 3.2.1.1-1:** Διάγραμμα κυκλώματος ελέγχου του ρυθμιστή στροφών Sinamics V20 της Siemens [6].



Η συγκεκριμένη μακροεντολή μας παρέχει τις παρακάτω λειτουργικές δυνατότητες:

- Εκκίνηση/σταμάτημα της λειτουργίας του inverter μέσω της ψηφιακής εισόδου του DI1.
- Ένδειξη ότι ο inverter, συνεπώς και ο κινητήρας, βρίσκεται σε κατάσταση λειτουργίας μέσω της ψηφιακής εξόδου του DO1.
- Ένδειξη παρουσίας σφάλματος μέσω της NO επαφής της ψηφιακής εξόδου του DO2.
- Ρύθμιση της συχνότητας λειτουργίας του κινητήρα μέσω της αναλογικής εισόδου του AI1.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι λειτουργίες ελέγχου του κινητήρα της αντλίας, μέσω του κυκλώματος ελέγχου του inverter της, θα είναι οι εξής:

- **Εκκίνηση/Σταμάτημα:** η λειτουργία εκκίνησης/σταματήματος του κινητήρα γίνεται με το πάτημα του αντίστοιχου μπουτόν στο γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής SCADA, το οποίο οδηγεί στην ενεργοποίηση/απενεργοποίηση μιας ψηφιακής εξόδου του PLC, συνεπώς στον οπλισμό ή μη ενός μικροελέ που καθορίζει την θέση της διακοπτικής επαφής στην ψηφιακή είσοδο DI1 του inverter.

- **Ενημέρωση κατάστασης λειτουργίας:** το σήμα από την ψηφιακή έξοδο DO1 εισέρχεται σαν ψηφιακή είσοδος στο PLC και αξιοποιείται σαν πληροφορία για την εποπτεία λειτουργίας της αντλίας από το γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής SCADA.

- **Προστασία του κινητήρα:** το σήμα από την NO επαφή της ψηφιακής εξόδου DO2 ελέγχει τον οπλισμό ενός μικροελέ. Οι βοηθητικές επαφές του μικροελέ χρησιμοποιούνται για άμεση διακοπή της λειτουργίας του κινητήρα (NC επαφή) και ενημέρωση (NO επαφή οδηγούμενη σε ψηφιακή είσοδο του PLC) της κατάστασης σφάλματος.

- **Ρύθμιση συχνότητας:** η επιθυμητή τιμή της συχνότητας καθορίζεται από το γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής SCADA και φτάνει σαν πληροφορία στο PLC της εγκατάστασης. Από εκεί μέσω μιας αναλογικής εξόδου και υπό την μορφή κατάλληλου σήματος (0-10 Volt) η πληροφορία φτάνει στον inverter, ο οποίος πλέον τροφοδοτεί τον κινητήρα της αντλίας με την τάση της επιθυμητής συχνότητας.

Όλες οι απαραίτητες συνδεσμολογίες για το κύκλωμα αυτοματισμού του κινητήρα της αντλίας φαίνονται στην σελίδα 4 των προτεινόμενων ηλεκτρολογικών σχεδίων, στο Παράρτημα Β.

Η παραμετροποίηση του κυκλώματος ελέγχου του inverter περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα [7]:

- Κατά την πρώτη τροφοδότηση του inverter ή μετά από επαναφορά στις εργοστασιακές ρυθμίσεις επιλέγουμε την βασική συχνότητα της μηχανής στα 50 Hz.
- Ακολούθως από το SETUP MENU ξεκινάμε την διαδικασία γρήγορης εκκίνησης (quick commissioning) του inverter:
  - Εισαγωγή ονομαστικών χαρακτηριστικών επαγωγικής μηχανής, όπως αναγράφονται στο ταμπελάκι του, στις εξής παραμέτρους
    - P304[0]=400 (Ονομαστική τάση)
    - P305[0]=6.5 (Ονομαστικό ρεύμα)
    - P307[0]=3 (Ονομαστική ισχύς)
    - P308[0]=0.82 (Ονομαστικός συντελεστής ισχύος  $\cos\phi$ )
    - P309[0]=81.3 (Ονομαστικός βαθμός απόδοσης)
    - P310[0]=50 (Ονομαστική συχνότητα)
    - P311[0]=1410 (Ονομαστική ταχύτητα περιστροφής)
  - Επιλογή της επιθυμητής Connection macro: **Cn002**
  - Επιλογή της επιθυμητής Application macro: **AP010** (Simple pump applications).

### 3.2.2 Εκτονωτής

Οι δύο κύριες κατηγορίες μηχανών για την παραγωγή έργου σε ένα κύκλο Rankine είναι οι στροβιλομηχανές και η μηχανές θετικής εκτόπισης. Βασική διαφοροποίηση των δύο κατηγοριών είναι ότι στις μηχανές θετικής εκτόπισης η συναλλαγή έργου γίνεται μέσω αλλαγών κατάστασης μιας συγκεκριμένης ποσότητας ρευστού, οι οποίες λαμβάνουν χώρα περιοδικά, μέσα σε κλειστούς χώρους της μηχανής, ενώ ως στροβιλομηχανές (turbomachines) χαρακτηρίζονται οι μηχανές που συναλλάσσουν ενέργεια με το ρευστό το οποίο ρέει συνεχώς μέσα σε αυτές, η δε μεταφορά ενέργεια πραγματοποιείται με την δυναμική αλληλεπίδραση του ρευστού και μιας ή περισσότερων σειρών στρεφόμενων πτερυγίων [8].

Για συστήματα ORC μικρής κλίμακας, όπως η εγκατάσταση τριπαραγωγής, οι μηχανές θετικής εκτόπισης (positive displacement machines) αποτελούν πιο ενδεδειγμένη επιλογή, καθότι δεν παρουσιάζουν προβλήματα από την παρουσία διαφασικής ροής στο εσωτερικό τους ενώ χαρακτηρίζονται από χαμηλές παροχές και πολύ μικρότερες στροφές από τις στροβιλομηχανές.

Από τους εκτονωτές θετικής εκτόπισης οι πιο διαδεδομένοι είναι ο ελικοειδής εκτονωτής (scroll expander), ο εκτονωτής με κοχλία (screw expander), ο εκτονωτής με έμβολο (piston expander) και ο εκτονωτής με πτερύγια (vane expander).

Όλοι οι τύποι εκτονωτών θετικής εκτόπισης είναι κατάλληλοι για εφαρμογές σε οργανικούς κύκλους Rankine. Είναι μικροί σε διαστάσεις, απλοί στην λειτουργία τους, χωρίς πολλά κινητά μέρη, εύκολοι στην συντήρηση και μπορούν να λειτουργήσουν σε σχετικά μεγάλα εύρη θερμοκρασίας και πίεσης.

Στην εγκατάσταση τριπαραγωγής θα χρησιμοποιηθούν ελικοειδείς εκτονωτές οι οποίοι περιγράφονται στην ακόλουθη ενότητα.

### 3.2.2.1 Αρχή λειτουργίας ελικοειδή εκτονωτή

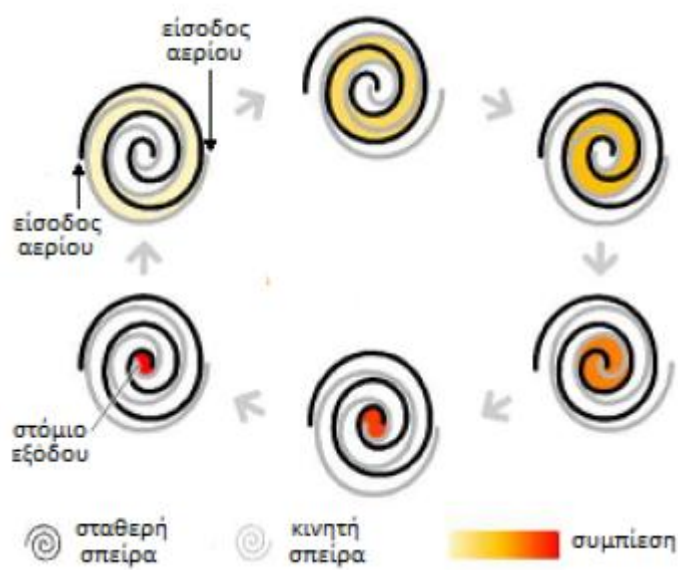
Οι ελικοειδείς εκτονωτές (expanders) είναι συνήθως ελικοειδείς συμπιεστές (scroll compressors) σε ανάστροφη λειτουργία, μέσω κατάλληλων μετατροπών. Για τον λόγο αυτό θα γίνει μια σύντομη περιγραφή της λειτουργίας συμπίεσης. Οι συμπιεστές αυτού του τύπου βασίζονται στη σύζευξη και τη σχετική κίνηση δύο τοιχωμάτων ελικοειδούς γεωμετρίας για την συμπίεση τόσο υγρών όσο και αερίων.

Συνήθως, το ένα από τα δύο τοιχώματα είναι σταθερό, ενώ το άλλο, το οποίο είναι συνδεδεμένο με τον άξονα της κινητήριας μηχανής, ακολουθεί μία ελλειπτική τροχιά χωρίς όμως να περιστρέφεται, παγιδεύοντας κατά αυτόν τον τρόπο και συμπιέζοντας το αέριο ανάμεσα στα δύο τοιχώματα. Η Εικόνα 3.2.2.1 δείχνει μια όψη των δύο τοιχωμάτων, με το κινητό τοίχωμα να βρίσκεται στα δεξιά και το σταθερό στα αριστερά.



*Εικόνα 3.2.2.1-1: Σταθερό και κινητό τοίχωμα ελικοειδούς συμπιεστή.*

Η είσοδος του αερίου γίνεται από την περιφέρεια των τοιχωμάτων και η έξοδος γίνεται από το στόμιο εξόδου του συμπιεστή που βρίσκεται στο κέντρο του σταθερού περυγίου [9]. Τα δύο τοιχώματα είναι συνεχώς σε επαφή, ωστόσο το σημείο επαφής μετακινείται συνεχώς, λόγω της περιστροφής του κινητήρα που δημιουργεί την έκκεντρη τροχιά του κινητού τοιχώματος, οδηγώντας το αέριο από την είσοδο προς το στόμιο εξόδου του συμπιεστή, ενώ παράλληλα ο όγκος του κενού ανάμεσα στα δύο τοιχώματα μειώνεται συνεχώς με αποτέλεσμα να αυξάνεται η πίεση του αερίου. Η λειτουργία συμπίεσης φαίνεται στην Σχήμα 3.2.2.1-1.



**Σχήμα 3.2.2.1-1:** Λειτουργία ελικοειδούς συμπιεστή.

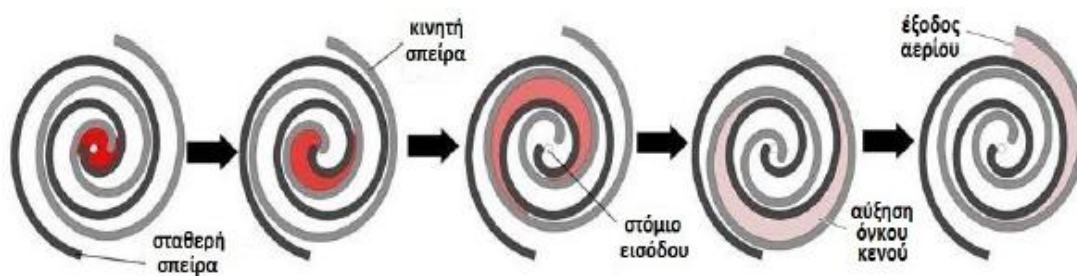
Οι ελικοειδείς συμπιεστές έχουν σταθερό λόγο όγκου ο οποίος εξαρτάται από την γεωμετρία τους, ενώ χάρη στον πολύ μικρό όγκο ανάμεσα στο σταθερό και στο κινούμενο τοίχωμα παρουσιάζουν πολύ μεγάλο ογκομετρικό βαθμό απόδοσης.

Βασικά πλεονεκτήματα των συγκεκριμένων συμπιεστών έναντι των λοιπών περιστρεφόμενων συμπιεστών είναι ότι:

- Έχουν λιγότερα κινούμενα μέρη και επομένως λιγότερες τριβές και φθορές, άρα μεγαλύτερη αξιοπιστία και μακροζωία
- Επηρεάζονται σε μικρότερο βαθμό από την παρουσία σταγόνων ψυκτικού υγρού που μπορεί να επιστρέψει στο συμπιεστή, καθώς και από την παρουσία ξένων σωματιδίων
- Λειτουργούν αθόρυβα και χωρίς κραδασμούς
- Ο βαθμός απόδοσής τους παρουσιάζει μικρότερη ευαισθησία σε μεταβολές του φορτίου

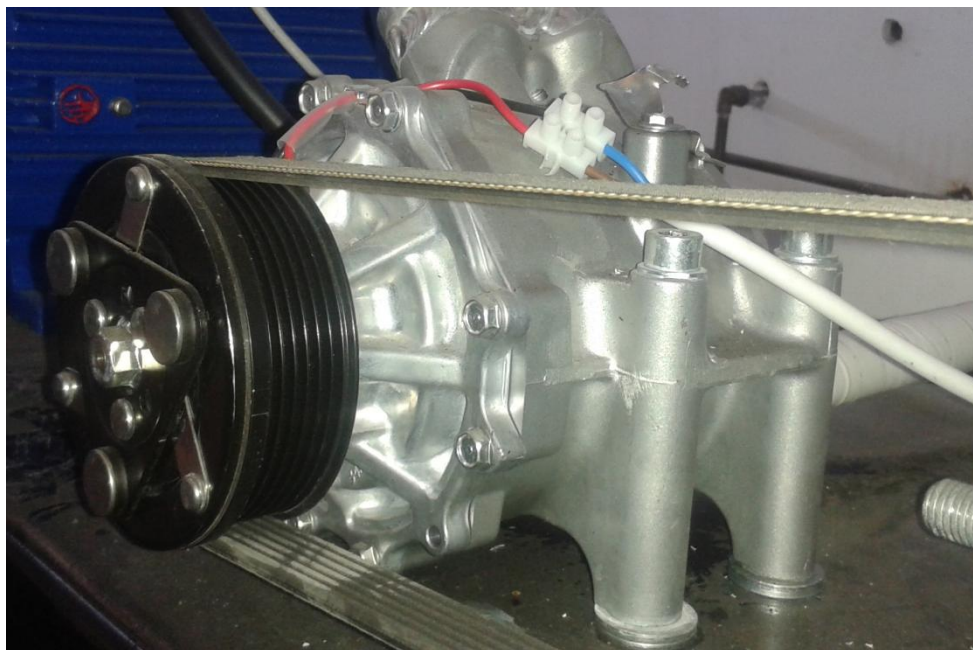
- Στους ελικοειδείς συμπιεστές, δημιουργείται ταυτόχρονη είσοδος ψυκτικού αερίου (αναρρόφιση), συμπίεση, και εξαγωγή του συμπιεσμένου αερίου. Αυτό σημαίνει πολύ μεγαλύτερη απόδοση, σε σύγκριση με τους συμπιεστές παλινδρομικού τύπου, αφού δεν υπάρχουν «νεκροί χρόνοι».

Όπως αναφέρθηκε η λειτουργία του ελικοειδούς εκτονωτή προκύπτει από την ανεστραμμένη λειτουργία ενός συμπιεστή, εφόσον γίνουν οι κατάλληλες μετατροπές, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.2.2.1-2.



**Σχήμα 3.2.2.1-2:** Λειτουργία ελικοειδούς εκτονωτή.

Πλέον το θερμό και υπό αυξημένη πίεση αέριο εισέρχεται από το στόμιο εισόδου που βρίσκεται στο κέντρο του ακίνητου τοιχώματος και κινείται προς τη έξοδο του εκτονωτή που είναι στην περιφέρεια του κινητού τοιχώματος. Αντίστοιχα με την λειτουργία συμπίεσης τα δυο τοιχώματα παραμένουν συνεχώς σε επαφή, με το σημείο επαφής να μετακινείται συνεχώς, πλέον λόγω της δύναμης που ασκείται λόγω της αυξημένης πίεσης του αερίου. Καθώς το αέριο οδηγείται από το στόμιο εισόδου προς την έξοδο του εκτονωτή, ο όγκος του κενού ανάμεσα στα δύο τοιχώματα αυξάνεται συνεχώς με αποτέλεσμα να μειώνεται η πίεση του αερίου, αποδίδοντας ταυτόχρονα μηχανική ισχύ στον άξονα με τον οποίο είναι συνδεδεμένο το κινητό τοίχωμα.



**Εικόνα 3.2.2.1-2:** Εκτονωτής εγκατάσταση.

Ο άξονας αυτός είναι συνδεδεμένος με τον άξονα μιας επαγωγικής μηχανής, η οποία σε λειτουργία γεννήτριας μετατρέπει την μηχανική ισχύ στην είσοδό της σε ηλεκτρική ισχύ στην έξοδό της.



**Εικόνα 3.2.2.1-3:** Μηχανική σύμπλεξη επαγωγικής μηχανής και εκτονωτή.

### 3.2.2.2 Γεννήτριες και ρυθμιστές στροφών τους (Inverters)

Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας θα χρησιμοποιηθούν δύο τριφασικές επαγωγικές μηχανές, σε λειτουργία γεννήτριας. Σύμφωνα με το μονογραμμικό διάγραμμα του Σχήματος 3-1 οι δύο μηχανές είναι συνδεδεμένες σε σειρά, με την γεννήτρια 2 να ακολουθεί την γεννήτρια 1.



*Εικόνα 3.2.2.2-1: Επαγωγική μηχανή.*

Τα ονομαστικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας 1 φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Χαρακτηριστικά μηχανής		Τιμές
Τάση	(Volt)	400-Δ / 690-Y
Ισχύς	(KW)	4
Ρεύμα	(A)	8.31
Βαθμός απόδοσης	(%)	84
Συντελεστής ισχύος	(cosφ)	0.82
Αριθμός πόλων		4
Ταχύτητα περιστροφής	(rpm)	1441
Ολίσθηση	(%)	4.081
Ροπή	(Nm)	26.53

*Πίνακας 3.2.2.2-1: Ονομαστικά χαρακτηριστικά γεννήτριας 1.*

Η γεννήτρια 2 επιλέχθηκε να είναι διπολική, με αυξημένη ταχύτητα περιστροφής, καθώς η αύξηση του όγκου του ρευστού στη έξοδο του 1ου εκτονωτή οδηγεί σε αυξημένη απαίτηση ογκομετρικής παροχής στον 2ο εκτονωτή. Συνεπώς ο 2ος εκτονωτής θα περιστρέφεται με μεγαλύτερο αριθμό στροφών, ομοίως και η γεννήτρια στην οποία θα αποδίδει μηχανική ισχύ.

Τα ονομαστικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας 2 φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Χαρακτηριστικά μηχανής		Τιμές
Τάση	(Volt)	400-Δ / 690-Y
Ισχύς	(KW)	4
Ρεύμα	(A)	7.31
Βαθμός απόδοσης	(%)	85
Συντελεστής ισχύος	(cosφ)	0.93
Αριθμός πόλων		2
Ταχύτητα περιστροφής	(rpm)	2868
Ολίσθηση	(%)	4.406
Ροπή	(Nm)	13.33

*Πίνακας 3.2.2.2-2: Ονομαστικά χαρακτηριστικά γεννήτριας 2.*



*Εικόνα 3.2.2.2-2: Σύστημα εκτονωτή-γεννήτριας.*

## Inverters γεννητριών

Η σύνδεση της κάθε γεννήτριας με το δίκτυο τροφοδοσίας γίνεται με την χρήση regenerative inverter, ο οποίος, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, είναι κατάλληλος για εφαρμογές που περιλαμβάνουν την επιστροφή παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο.

Συγκεκριμένα επιλέχθηκε το μοντέλο Sinamics G120 της εταιρίας Siemens. Η συγκεκριμένη σειρά αποτελείται από "built-up" inverters, δηλαδή δίνει την δυνατότητα επιλογής των επιμέρους εξαρτημάτων (μονάδα ισχύος, μονάδα ελέγχου, πάνελ χειρισμών) ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή. Στην περίπτωση μας επιλέχθηκε ως μονάδα ισχύος το module PM250 που δίνει την δυνατότητα regeneration, ως μονάδα ελέγχου το CU240E-2 και ως μονάδα τοπικού χειρισμού, με την χρήση του οποίου γίνεται και η βασική παραμετροποίηση της μονάδας ελέγχου, το βασικό χειριστήριο Sinamics BOP-2.



*Εικόνα 3.2.2.2-3: Inverter Sinamics G120 της εταιρίας Siemens.*

Ο έλεγχος του inverter γίνεται μέσω της μονάδας ελέγχου, ορισμένα από τα χαρακτηριστικά της οποίας είναι:

- 6 ψηφιακές εισοδοι
- 3 ψηφιακές εξοδοι
- 2 αναλογικές εισοδοι
- 2 αναλογικές εξοδοι
- Δυνατότητα επικοινωνίας με τα πρωτόκολλα USS και Modbus RTU μέσω RS485

Καθώς οι συγκεκριμένοι inverter είναι της ίδιας εταιρίας με τον inverter της αντλίας, η διαδικασία της παραμετροποίησης είναι παρόμοια. Έτσι, η παραμετροποίηση περιλαμβάνει την εισαγωγή των ονομαστικών χαρακτηριστικών των μηχανών, με κάποιες πρόσθετες πληροφορίες, καθώς και την επιλογή του τρόπου διεπαφής με τον inverter μέσα από ένα σετ προεπιλεγμένων ρυθμίσεων (Connection macros). Αντίστοιχα υπάρχει η δυνατότητα εναλλαγής μεταξύ αυτόματης (μέσω Connection macro) και χειροκίνητης τοπικής λειτουργίας των inverter από το πάνελ χειρισμού τους (BOP-2) με το πάτημα του κουμπιού AUTO/MANUAL.

### **Παραμετροποίηση Inverters γεννητριών**

Από το σετ των διαθέσιμων προεπιλεγμένων ρυθμίσεων θα χρησιμοποιηθεί η μακροεντολή 12 (Macro 12: Two wire control with method 1).

Η συγκεκριμένη μακροεντολή μας παρέχει τις παρακάτω λειτουργικές δυνατότητες, τις οποίες θα αξιοποιήσουμε στην εφαρμογή μας:

- Εκκίνηση/σταμάτημα της λειτουργίας του inverter μέσω της ψηφιακής εισόδου του DI0.
- Ένδειξη παρουσίας σφάλματος μέσω της NO επαφής της ψηφιακής εξόδου του DO0
- Ρύθμιση της συχνότητας λειτουργίας του κινητήρα μέσω της αναλογικής εισόδου του AI0.

Η ένδειξη λειτουργίας του inverter δεν καλύπτεται από την συγκεκριμένη μακροεντολή, επομένως γίνεται ξεχωριστή ρύθμιση, κατά την διαδικασία της

παραμετροποίησης που περιγράφεται στην συνέχεια, έτσι ώστε να λαμβάνουμε αυτή την πληροφορία μέσω της NO επαφής της ψηφιακής εξόδου DO2.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι λειτουργίες ελέγχου για καθεμία από τις 2 γεννήτριες, μέσω της μονάδας ελέγχου του inverter της, θα είναι οι εξής:

- **Εκκίνηση/Σταμάτημα:** η λειτουργία εκκίνησης/σταματήματος της μηχανής γίνεται με το πάτημα του αντίστοιχου μπουτόν στο γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής SCADA, το οποίο οδηγεί στην ενεργοποίηση/απενεργοποίηση μιας ψηφιακής εξόδου του PLC, συνεπώς στον οπλισμό ή μη ενός μικροελέ που καθορίζει την θέση της διακοπτικής επαφής στην ψηφιακή είσοδο DI0 του inverter.

- **Ενημέρωση κατάστασης λειτουργίας:** το σήμα από την ψηφιακή έξοδο DO2 εισέρχεται σαν ψηφιακή είσοδος στο PLC και αξιοποιείται σαν πληροφορία για την εποπτεία λειτουργίας της μηχανής από το γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής SCADA.

- **Προστασία του κινητήρα:** το σήμα από την NO επαφή της ψηφιακής εξόδου DO1 ελέγχει τον οπλισμό ενός μικροελέ. Οι βοηθητικές επαφές του μικροελέ χρησιμοποιούνται για άμεση διακοπή της λειτουργίας της γεννήτριας (NC επαφή) και ενημέρωση (NO επαφή οδηγούμενη σε ψηφιακή είσοδο του PLC) της κατάστασης σφάλματος.

- **Ρύθμιση συχνότητας:** η επιθυμητή τιμή της συχνότητας καθορίζεται από το γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής SCADA και φτάνει σαν πληροφορία στο PLC της εγκατάστασης. Από εκεί μέσω μιας αναλογικής εξόδου και υπό την μορφή κατάλληλου σήματος (0-10 Volt) η πληροφορία φτάνει στον inverter, ο οποίος πλέον τροφοδοτεί την γεννήτρια με την τάση της επιθυμητής συχνότητας.

Όλες οι απαραίτητες συνδεσμολογίες για το κύκλωμα αυτοματισμού των δυο γεννητριών φαίνονται στην σελίδα 5 των προτεινόμενων ηλεκτρολογικών σχεδίων, στο Παράρτημα Β.

Η παραμετροποίηση της μονάδας ελέγχου CU240E-2 για κάθε inverter περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

- Κατά την πρώτη τροφοδότηση του inverter ή μετά από επαναφορά στις εργοστασιακές ρυθμίσεις επιλέγεται η βασική συχνότητα της μηχανής στα 50 Hz

- Ακολούθως επιλέγεται η συνδεσμολογία της μηχανής (Αστέρας/Τρίγωνο). Οι γεννήτριες θα συνδεθούν σε συνδεσμολογία τριγώνου, οπότε επιλέγουμε: **delta**

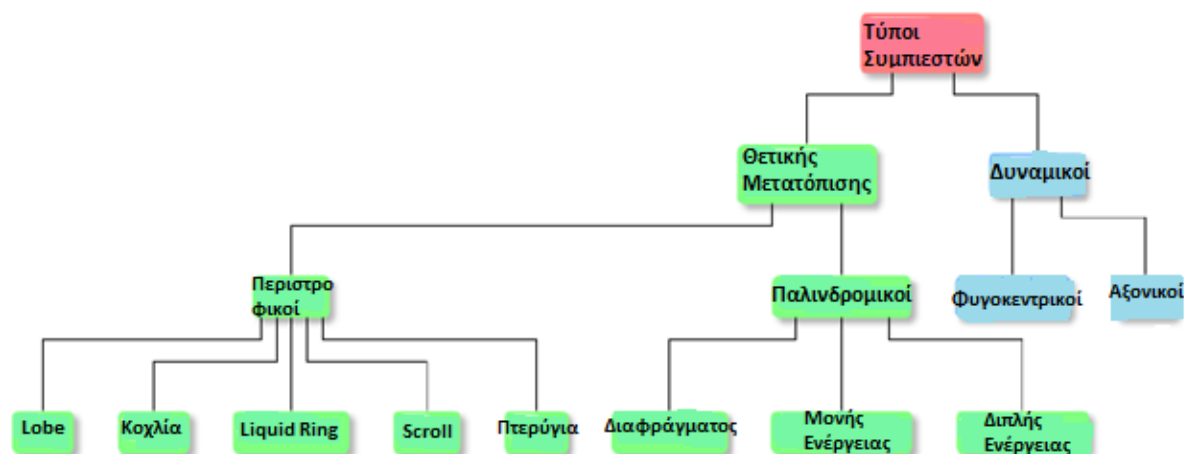
- Από το SETUP MENU ξεκινάμε την διαδικασία βασικής εκκίνησης (basic commissioning) του inverter:

- Επιλογή του τρόπου ελέγχου της μηχανής. Ο inverter θα ελέγχει την μηχανή με γραμμικό V/f έλεγχο, διατηρώντας δηλαδή τον λόγο της τάσης προς την συχνότητα σταθερό:
  - P1300=0 (VF LIN)
- Εισαγωγή ονομαστικών χαρακτηριστικών επαγωγικής μηχανής, όπως αναγράφονται στο ταμπελάκι του, στις εξής παραμέτρους:
  - P304[0]=400 (Ονομαστική τάση).
  - P305[0]=8.31/7.31 (Ονομαστικό ρεύμα γεννήτριας 1/2).
  - P307[0]=4 (Ονομαστική ισχύς γεννήτριας 1/2).
  - P308[0]=0.82/0.93 (Ονομαστικός συντελεστής ισχύος γεννήτριας 1/2).
  - P309[0]=84/85 (Ονομαστικός βαθμός απόδοσης γεννήτριας 1/2).
  - P310[0]=50 (Ονομαστική συχνότητα γεννήτριας 1/2).
  - P311[0]=1441/2868 (Ονομαστική ταχύτητα περιστροφής γεννήτριας 1/2).
- Επιλογή της επιθυμητής μακροεντολής:
  - P0015=12 (Macro 12: Two wire control with method 1)
- Επιλογή ώστε η ένδειξη λειτουργίας του inverter να βγαίνει σαν ψηφιακό σήμα στην ψηφιακή έξοδο DO2:
  - 0732=52.2 (Operation enabled).

### 3.2.3 Συμπιεστής Ψυκτικού Κύκλου

Ως συμπιεστής ορίζεται μία μηχανή που χρησιμοποιείται για την αύξηση της πίεσης ενός αερίου, μέσω της μείωσης του όγκου του. Η αρχή λειτουργίας του συμπιεστή είναι παρεμφερής με αυτή της αντλίας καθώς και οι δύο αυξάνουν την πίεση του διακινούμενου μέσου, με τη διαφορά ότι η αντλία χρησιμοποιείται για υγρά ενώ ο συμπιεστής για αέρια.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι συμπιεστών, βάσει της αρχής λειτουργίας τους. Μια βασική κατηγοριοποίηση παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί.



*Σχήμα 3.2.3-1: Κατηγοριοποίηση συμπιεστών.*

Οι συμπιεστές θετικής μετατόπισης (positive displacement) αυξάνουν την πίεση του αερίου μέσω μείωσης του όγκου του θαλάμου συμπίεσης, με τη βοήθεια έργου που προσδίδεται στο μηχανισμό του συμπιεστή. Κύριες υποκατηγορίες συμπιεστών θετικής μετατόπισης είναι οι παλινδρομικοί συμπιεστές (reciprocating compressors), οι συμπιεστές με πτερύγια (rotary vane compressors), οι συμπιεστές scroll -όπως αυτός που θα χρησιμοποιηθεί στην συγκεκριμένη εγκατάσταση- και οι συμπιεστές με κοχλία (screw compressors).

Οι δυναμικοί συμπιεστές αυξάνουν την πίεση του αερίου μέσω της συνεχούς μετάδοσης στροφορμής από το περιστρεφόμενο μέλος προς το αέριο, η οποία ακολουθείται από τη μετατροπή αυτής της στροφορμής σε αύξηση της πίεσης του αερίου [10].

### 3.2.3.1 Συμπιεστές τύπου scroll

Οι συμπιεστές αυτού του τύπου χρησιμοποιούν δύο πτερύγια ελικοειδούς σχήματος για την συμπίεση τόσο υγρών όσο και αερίων. Είναι πιο αξιόπιστοι και λιγότεροι θορυβώδεις από άλλους τύπους συμπιεστών για λειτουργίες σε χαμηλές παροχές.

Συνήθως, το ένα από τα δύο πτερύγια είναι σταθερό -το άνω πτερύγιο- ενώ το δεύτερο -το κάτω-, το οποίο είναι συνδεδεμένο με τον άξονα της κινητήριας μηχανής,

ακολουθεί μία ελλειπτική τροχιά, χωρίς όμως να περιστρέφεται, παγιδεύοντας κατά αυτόν τον τρόπο και συμπιέζοντας το αέριο ανάμεσα στις δύο έλικες. Οι δύο έλικες είναι συνεχώς σε επαφή, ωστόσο το σημείο επαφής μετακινείται συνεχώς οδηγώντας το αέριο από την είσοδο προς την έξοδο του συμπιεστή, ενώ παράλληλα ο όγκος του κενού ανάμεσα στις δύο έλικες μειώνεται συνεχώς με αποτέλεσμα να αυξάνεται η πίεση του αερίου. Η είσοδος του αερίου γίνεται από την περιφέρεια των πτερυγίων και η έξοδος γίνεται από το κέντρο του σταθερού πτερυγίου που φέρει το στόμιο εξόδου του συμπιεστή [11]. Για την ολοκλήρωση μίας πλήρους συμπίεσης απαιτούνται τρεις πλήρεις περιστροφές του άξονα της κινητήριας μηχανής.

Χάρη στον πολύ μικρό όγκο ανάμεσα στο σταθερό και στο κινούμενο πτερύγιο, οι συγκεκριμένοι συμπιεστές έχουν πολύ μεγάλο ογκομετρικό βαθμό απόδοσης [12]. Οι ισχείς των συμπιεστών τύπου scroll κυμαίνεται από 0,5 μέχρι 50 kW. Βασικά πλεονεκτήματα των συγκεκριμένων συμπιεστών έναντι των λοιπών περιστρεφόμενων συμπιεστών είναι ότι έχουν συνολικά καλύτερο βαθμό απόδοσης τόσο σε πλήρες όσο και σε μερικό φορτίο, ότι έχουν πολύ λίγα κινούμενα μέρη, με συνέπεια να φθείρονται πολύ λιγότερο, απαιτούν πολύ μικρή ποσότητα ελαίου για την στεγάνωσή τους ενώ δεν εμφανίζουν και έντονους κραδασμούς. Από την άλλη πλευρά, το κύριο μειονέκτημά τους είναι ότι είναι αδύνατο να «λυθούν» στο χώρο όπου χρησιμοποιούνται για λόγους συντήρησης [13].



**Σχήμα 3.2.3.1-1:** Τομή συμπιεστή τύπου scroll.

### 3.2.3.2 Μηχανή συμπιεστή και ομαλός εκκινητής

Για την κίνηση του συμπιεστή του VCC κυκλώματος θα χρησιμοποιηθεί τριφασικός επαγωγικός κινητήρας με τα παρακάτω ονομαστικά χαρακτηριστικά:

Χαρακτηριστικά μηχανής		Τιμές
Τάση	(Volt)	230-Δ / 400-Y
Ισχύς	(KW)	2.2
Ρεύμα	(A)	4.57
Βαθμός απόδοσης	(%)	81.3
Συντελεστής ισχύος	(cosφ)	0.85
Αριθμός πόλων		2
Ταχύτητα περιστροφής	(rpm)	2823
Ολίσθηση	(%)	5.914
Ροπή	(Nm)	7.45

*Πίνακας 3.2.3.2-1: Ονομαστικά χαρακτηριστικά μηχανής συμπιεστή.*

#### Ομαλός εκκινητής συμπιεστή (Soft Starter)

Στον συμπιεστή δεν θα γίνεται ρύθμιση στροφών, συνεπώς θα λειτουργεί κοντά στην ονομαστική του ταχύτητα. Όπως έχει ήδη αναφερθεί κατά την εκκίνηση του κινητήρα, με απευθείας ζεύξη στο δίκτυο τροφοδοσίας, αυτός παρουσιάζει αυξημένη ροπή (τυπικά 2-4 φορές την ονομαστική) και αυξημένο ρεύμα (τυπικά 5-7 φορές το ονομαστικό). Σύμφωνα με τα δεδομένα του κατασκευαστή, ο λόγος της ροπής εκκίνησης προς την ονομαστική ροπή (Locked rotor torque / Full load torque) του κινητήρα του συμπιεστή είναι 3.4 , ενώ ο λόγος του ρεύματος εκκίνησης προς το ονομαστικό ρεύμα (Locked rotor current / Full load current) του είναι 6.9.

Τα αυξημένα μεγέθη ρεύματος και ροπής εκκίνησης μπορεί να οδηγήσουν αντίστοιχα σε:

- βύθιση τάσης στο δίκτυο τροφοδοσίας του κινητήρα με ανεπιθύμητες επιδράσεις στον υπόλοιπο εξοπλισμό
- αυξημένες καταπονήσεις στα μηχανικά μέρη του κινητήρα που οδηγούν σε αυξημένες απαιτήσεις συντήρησής.

Για να πετύχουμε την εκκίνηση του κινητήρα με μειωμένα μεγέθη ροπής και ρεύματος εκκίνησης, η ζεύξη του κινητήρα με το δίκτυο τροφοδοσίας θα γίνει μέσω

ομαλού εκκινητή (soft starter). Συγκεκριμένα θα χρησιμοποιηθεί το μοντέλο SIRIUS 3RW30 της εταιρίας Siemens. Τα βασικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου μοντέλου είναι:

- 1 ψηφιακή είσοδος για το σήμα εκκίνησης/σταματήματος λειτουργίας
- 1 NO επαφή για ένδειξη λειτουργίας
- Ρύθμιση της αρχικής τιμής της τάσης (40% - 100%)
- Ρύθμιση χρονικού διαστήματος αύξησης της τάσης, από την αρχική μέχρι την ονομαστική τιμή (0 – 20 sec).

Οι λειτουργίες ελέγχου του κινητήρα του συμπιεστή είναι οι εξής:

- **Εκκίνηση/Σταμάτημα:** η λειτουργία εκκίνησης/σταματήματος του κινητήρα γίνεται με το πάτημα του αντίστοιχου μπουτόν στο γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής SCADA, το οποίο οδηγεί στην ενεργοποίηση/απενεργοποίηση μιας ψηφιακής εξόδου του PLC, συνεπώς στον οπλισμό ή μη ενός μικρορέλέ που καθορίζει την θέση της διακοπτικής επαφής στην ψηφιακή είσοδο του ομαλού εκκινητή.

- **Ενημέρωση κατάστασης λειτουργίας:** το σήμα από την NO επαφή του ομαλού εκκινητή εισέρχεται σαν ψηφιακή είσοδος στο PLC και αξιοποιείται σαν πληροφορία για την εποπτεία λειτουργίας του κινητήρα από το γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής SCADA.

- **Προστασία του κινητήρα:** ο κινητήρας φέρει ενσωματωμένο thermistor τύπου PTC, για την προστασία των τυλιγμάτων του από υπερθέρμανση, το οποίο συνδέεται με αντίστοιχο ρελέ ειδικού σκοπού (PTC relay). Οι βοηθητικές επαφές του ρελέ χρησιμοποιούνται για άμεση διακοπή της λειτουργίας του κινητήρα (NC επαφή) και ενημέρωση (NO επαφή οδηγούμενη σε ψηφιακή είσοδο του PLC) της κατάστασης σφάλματος.

Όλες οι απαραίτητες συνδεσμολογίες για το κύκλωμα αυτοματισμού του κινητήρα του συμπιεστή φαίνονται στην σελίδα 4 των προτεινόμενων ηλεκτρολογικών σχεδίων, στο Παράρτημα Β.

### 3.2.4 Μηχανική σύμπλεξη και αποσύμπλεξη των εκτονωτών και του συμπιεστή της εγκατάστασης

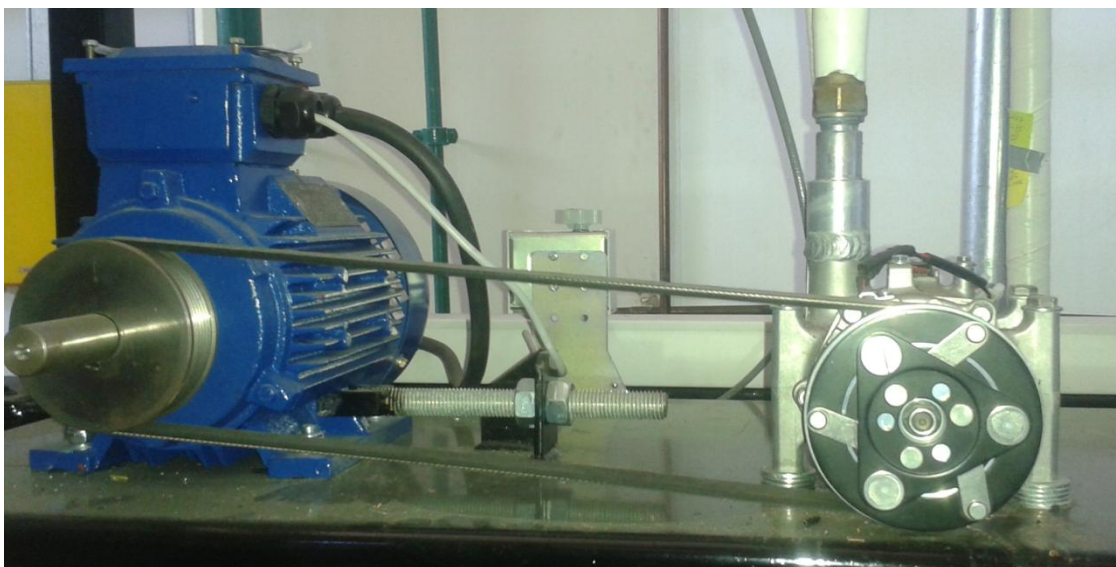
Σύμφωνα και με το μονογραμμικό διάγραμμα στην εγκατάσταση θα υπάρχουν δύο εκτονωτές για τον ORC κύκλο και ένας συμπιεστής για τον VCC κύκλο, οι οποίοι θα είναι όλοι ελικοειδούς τύπου. Επιλέχθηκαν και θα χρησιμοποιηθούν

ελικοειδείς συμπιεστές της σειράς TRSA της εταιρίας Sanden και συγκεκριμένα το μοντέλο TRSA05 για τον συμπιεστή και το μοντέλο TRSA12, σε ανάστροφη λειτουργία, για τους εκτονωτές.



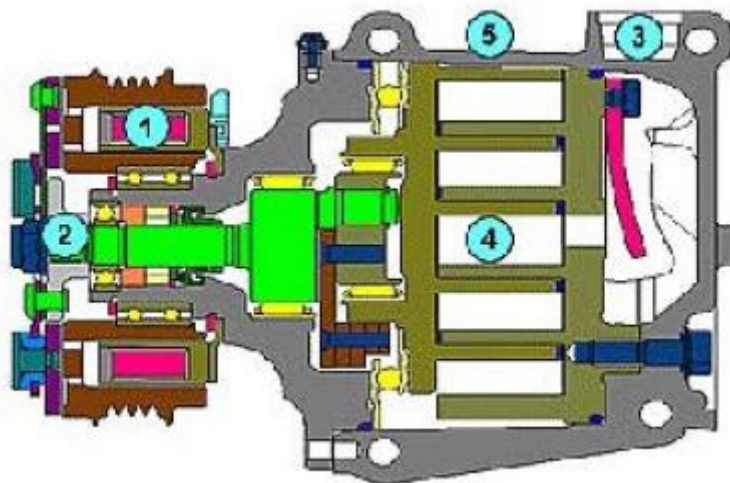
**Εικόνα 3.2.4-1:** Ελικοειδής συμπιεστής της σειράς TRSA της εταιρείας Sanden.

Η μεταφορά της μηχανικής ισχύος από (λειτουργία κινητήρα) και προς (λειτουργία γεννήτριας) την αντίστοιχη επαγωγική μηχανή προϋποθέτει κάποιον μηχανισμό σύμπλεξης. Ο μηχανισμός των συγκεκριμένων μοντέλων περιλαμβάνει δύο είδη σύμπλεξης: μηχανική και ηλεκτρομαγνητική σύμπλεξη. Η μηχανική σύμπλεξη γίνεται με ιμάντα που συνδέει τον άξονα του scroll με τον άξονα της επαγωγικής μηχανής, με μια αναλογία στροφών 1:1, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3.2.4-2.



**Εικόνα 3.2.4-2:** Μηχανική σύμπλεξη scroll συμπιεστή-μηχανής.

Η ηλεκτρομαγνητική σύμπλεξη λαμβάνει χώρα στο εσωτερικό του scroll. Σύμφωνα με την τομή του, που φαίνεται στο Σχήμα 3.2.4-1 στον άξονά του φέρει πηνίο (σημείο 1) το οποίο όταν τροφοδοτηθεί με συνεχή τάση 12 Volt δημιουργεί μαγνητικό πεδίο. Το πεδίο αυτό συμπλέκει μαγνητικά τον άξονα με τον εσωτερικό οπλισμό (σημείο 2), ο οποίος είναι συνδεδεμένος με την κινητή σπείρα.



**Σχήμα 3.2.4-1:** Τομή ελικοειδούς συμπιεστή της σειράς TRSA.

Σε λειτουργία συμπίεσης ο άξονας δέχεται μηχανική ισχύ μέσω του ιμάντα από τον επαγωγικό κινητήρα και μέσω της ηλεκτρομαγνητικής σύμπλεξης περιστρέφει τον εσωτερικό οπλισμό ο οποίος οδηγεί την κινητή σπείρα. Το ρευστό εισέρχεται (σημείο 3) στον χώρο ανάμεσα στις δύο σπείρες (σημείο 4) όπου συμπιέζεται με την αρχή που είδαμε προηγουμένως και εξέρχεται (σημείο 5) υπό αυξημένη πίεση. Στην ανάστροφη λειτουργία, κατά την εκτόνωση του ρευστού αποδίδεται μηχανική ισχύς στην κινητή σπείρα η οποία πλέον οδηγεί τον οπλισμό. Μέσω της ηλεκτρομαγνητικής σύμπλεξης περιστρέφεται ο άξονας του scroll ο οποίος αποδίδει την μηχανική ισχύ στον άξονα της επαγωγικής γεννήτριας.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η ηλεκτρομαγνητική σύμπλεξη αποτελεί έναν μηχανισμό ελέγχου που επιτρέπει είτε την ανεξάρτητη είτε την συζευγμένη λειτουργία του ζεύγους επαγωγική μηχανή-scroll. Γίνεται εφικτό με αυτό τον τρόπο, κατά την εκκίνηση λειτουργίας της εγκατάστασης οι εκτονωτές του κυκλώματος ORC να δουλεύουν απομονωμένα από τις επαγωγικές γεννήτριες, μέχρι το εργαζόμενο μέσο να αποκτήσει τα κατάλληλα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά που θα του επιτρέψουν να αποδώσει ωφέλιμη μηχανική ισχύ, και όταν επικρατήσουν οι κατάλληλες συνθήκες με την εφαρμογή της ηλεκτρομαγνητικής σύμπλεξης να αρχίσει η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Όπως φαίνεται στο μονογραμμικό διάγραμμα οι εκτονωτές είναι συνδεδεμένοι σε σειρά. Για την προστασία του 2ου εκτονωτή από υπερπίεση στην είσοδό του υπάρχει αισθητήρας ψυχρής επαφής (H.P.S) μεταξύ των 2 εκτονωτών. Αισθητήρες ψυχρής επαφής υπάρχουν και στον VCC κύκλο και συγκεκριμένα αισθητήρες υποπίεσης (L.P.S) και υπερπίεσης πριν και μετά τον ελικοειδή συμπιεστή αντίστοιχα, για την προστασία τόσο του συμπιεστή όσο και του συμπυκνωτή του ψυκτικού κύκλου. Όλοι οι παραπάνω αισθητήρες ψυχρής επαφής είναι αντίστοιχοι με αυτούς του κυκλώματος ORC δηλαδή είναι κατάστασης ON/OFF και αποτελούν ψηφιακές εισόδους στο PLC της εγκατάστασης.

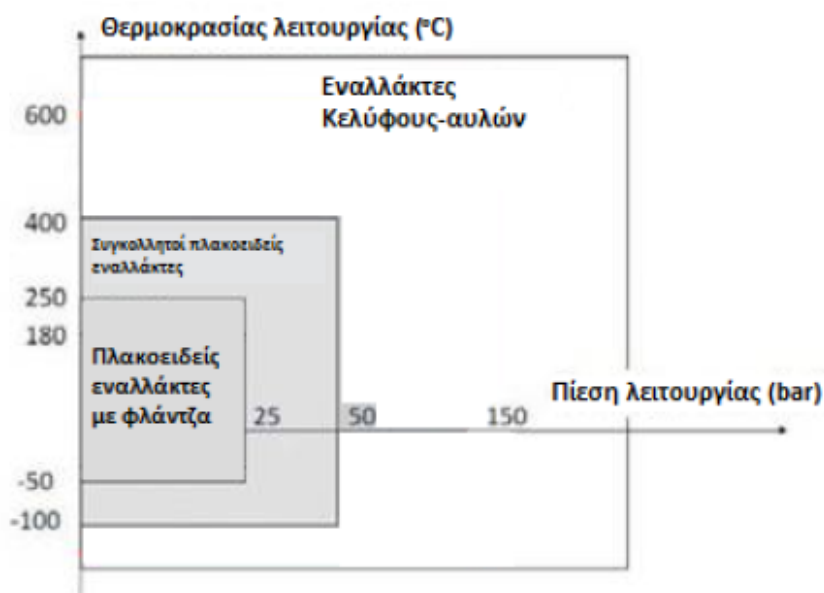
### 3.2.5 Εναλλάκτες Θερμότητας

Ο εναλλάκτης θερμότητας είναι μια συσκευή η οποία διαρρέεται από δύο ρευστά διαφορετικής θερμοκρασίας και διευκολύνει τη μεταφορά θερμότητας από το θερμότερο ρευστό προς το ψυχρότερο [14]. Η μεταφορά θερμότητας στους εναλλάκτες πραγματοποιείται μέσω της διαχωριστικής επιφάνειας: ανάμεσα στη διαχωριστική επιφάνεια και τα ρευστά έχουμε μεταφορά θερμότητας δια συναγωγής και δια μέσου της διαχωριστικής επιφάνειας η μεταφορά θερμότητας γίνεται με αγωγή. Ανάλογα με την κατεύθυνση της ροής, οι εναλλάκτες διαχωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες: τους εναλλάκτες ομοροής (co-current heat exchangers) , τους εναλλάκτες αντιροής (counter-current heat exchangers) και τους εναλλάκτες σταυροροής (cross-flow heat exchangers). Άλλοι τρόποι κατηγοριοποίησης των εναλλακτών είναι ο αριθμός των διαδρομών των ρευμάτων εντός του εναλλάκτη, η λειτουργία του εναλλάκτη, ο τρόπος κατασκευής και η γεωμετρία του κλπ.

Η πιο διαδεδομένη κατηγορία εναλλακτών, βάσει της κατασκευής και της γεωμετρίας τους, είναι οι εναλλάκτες κελύφους-αυλών (shell and tube heat exchangers), οι οποίοι αποτελούνται από αυλούς κυλινδρικής διατομής ενσωματωμένους σε κυλινδρικό κέλυφος με τους άξονες του κελύφους και των αυλών να είναι παράλληλοι μεταξύ τους. Οι διαφοροποιήσεις που υπάρχουν ανάμεσα στους διάφορους εναλλάκτες αυτού του τύπου έγκεινται κυρίως στον διαφορετικό τρόπο κατασκευής και στις τροποποιήσεις που έχουν υποστεί για να διαχειριστούν τη διαφορετική θερμική διαστολή που υφίστανται οι αυλοί και το κέλυφος [15].

Η δεύτερη πιο διαδεδομένη κατηγορία εναλλακτών είναι οι πλακοειδείς εναλλάκτες (plate heat exchangers). Ένας πλακοειδής εναλλάκτης συνίσταται σε ένα σύνολο από πλάκες με ραβδώσεις -για καλύτερη μεταφορά θερμότητας- που είναι

συνενωμένες, καθεμία εκ των οποίων διαθέτει τέσσερα στόμια για την επικοινωνία μεταξύ των πλακών, τα οποία είναι στεγανωμένα με φλάντζες ώστε να εξασφαλίζεται η κυκλοφορία των ρευστών ανάμεσα στις πλάκες κατά τον τρόπο που προβλέπεται να λειτουργεί ο εκάστοτε εναλλάκτης [16]. Η περιφέρεια των πλακών στεγανώνεται είτε με φλάντζες είτε με συγκόλληση, με αποτέλεσμα οι συγκεκριμένοι εναλλάκτες να λειτουργούν σε μικρότερες πιέσεις από τους εναλλάκτες κελύφους-αυλών. Ενδεικτικά, παρουσιάζεται το διάγραμμα που ακολουθεί για να καταστήσει πιο σαφές το εύρος λειτουργίας των δύο ειδών εναλλακτών. Από την άλλη πλευρά, το μεγάλο πλεονέκτημα των πλακοειδών εναλλακτών είναι ότι έχουν αισθητά μεγαλύτερο συντελεστή μεταφορά θερμότητας από τους εναλλάκτες κελύφους-αυλών, με αποτέλεσμα να απαιτούν πολύ μικρότερο χώρο για να επιτύχουν την ίδια μεταφορά θερμότητας με τους ογκώδεις εναλλάκτες κελύφους-αυλών.



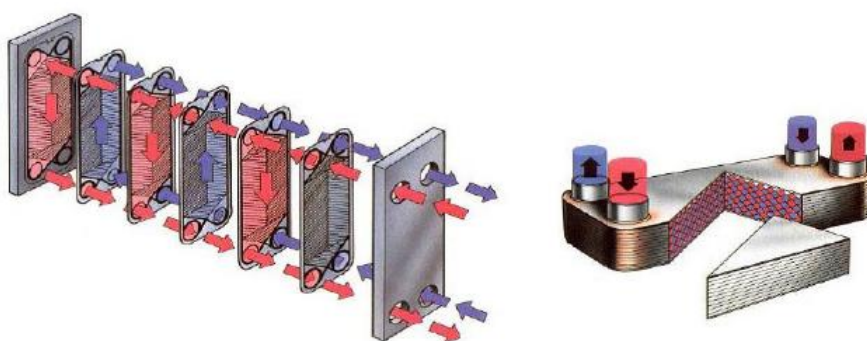
**Διάγραμμα 3.2.5-1:** Εύρος λειτουργίας διαφόρων τύπων εναλλακτών θερμότητας.

Για την λειτουργία της εγκατάστασης απαιτούνται οι εξής εναλλάκτες θερμότητας:

1. Ένας ατμοποιητής
2. Δύο συμπυκνωτές, ένας για λειτουργία μόνο του ψυκτικού κύκλου και ένας για λειτουργία του ORC ή/και του VCC κυκλώματος.
3. Και ένας εναλλάκτης θερμότητας που θα μετατρέπει το οργανικό μέσο από υπόψυκτο υγρό σε υπερκρίσιμο υγρό

Το σύνολο των εναλλακτών θερμότητας της εγκατάστασης είναι πλακοειδείς εναλλάκτες, οι οποίοι παρουσιάζουν πολύ καλές ιδιότητες τόσο ως ατμοποιητές όσο και ως συμπυκνωτές. Συνοπτικά τα πλεονεκτήματά τους είναι:

- Μικρό μέγεθος.
- Χαμηλή τιμή.
- Μικρότερη αντίσταση ακαθαρσιών σε σχέση με τους κλασσικούς Εναλλάκτες.
- Εύκολη συντήρηση και καθαρισμός.
- Δυνατότητα μεταβολής της επιφάνειας συναλλαγής εκ των υστέρων με προσθήκη ή αφαίρεση πλακών.



**Σχήμα 3.2.5-1:** Πλακοειδής Εναλλάκτης θερμότητας [17].

Για την εξοικονόμηση χώρου και εφόσον το επέτρεπαν οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας της εγκατάστασης αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν τρεις πλακοειδείς εναλλάκτες θερμότητας της εταιρείας Alfa laval και συγκεκριμένα της κατηγορίας συγκολλητών πλακοειδών εναλλακτών CB. Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκάστοτε λειτουργία προσδιορίστηκαν βάσει και των δεδομένων που υπήρχαν από προηγούμενη αγορά που έγινε από το Εργαστήριο από την εν λόγω εταιρεία. Η επιβεβαίωση ότι εκλέχτηκαν τα σωστά μοντέλα καθώς και ο προσδιορισμός του ακριβή αριθμού πλακών και κατ' επέκταση των συνολικών διαστάσεων του ατμοποιητή και του συμπυκνωτή έγινε με τη χρήση μοντέλων προσομοίωσης [3].



*Εικόνα 3.2.5-1: Επίπεδος πλακοειδής εναλλάκτης θερμότητας της εταιρείας Alfa Laval.*

### **3.2.6 Μετρητικά όργανα**

Για τον έλεγχο της εγκατάστασης από το πρόγραμμα SCADA χρησιμοποιούνται όπως φαίνεται και στο μονογραμμικό σχέδιο αναλογικά μετρητικά θερμοκρασίας και πίεσης για την παρακολούθηση αυτών των δύο μεγεθών στα διάφορα σημεία της εγκατάστασης.



**Εικόνα 3.2.6-1: Μετρητικό πίεσης.**



*Εικόνα 3.2.6-2: Μετρητικό θερμοκρασίας.*

Οι δύο τύποι μετρητικών, πίεσεως και θερμοκρασίας, κάνουν μετρήσεις εντός συγκεκριμένων ορίων, τα οποία για κάθε μετρητικό είναι διαφορετικά ανάλογα με την θέση στην οποία βρίσκονται πάνω στην μονάδα ( 0-100°C, 0-140°C, 0-50°C). Τα όρια αυτά παίζουν σημαντικό ρόλο για το scaling και το unscaling των μετρούμενων τιμών μέσω του αντίστοιχου Function Block του PLC, και κατ'έκταση για την ορθή απεικόνιση τους μέσω του PLC στην εφαρμογή HMI (LabVIEW).

Τα μετρητικά θερμοκρασία είναι της εταιρείας UTECO ABEE, μοντέλο 1XPT100 CLASS B 3 WIRE SYSTEM TO DIN EN 60751. Έχουν την δυνατότητα μέτρησης σε σωλήνες διαμέτρου από 19.05mm έως 53.975mm και στήριξη με σφιγκτήρες προσαρμογής στους σωλήνες. Η θερμοκρασίες λειτουργίας τους είναι - 50+260oC με ενσωματωμένο μεταδότης κεφαλής 4-20mA. Τα μετρητικά πίεσης είναι της εταιρείας KROHNE, μοντέλο OPTIBAR P 1010 C. Εχουν εύρος μετρησης 0.1-250 bar/4-3750psi με ακρίβεια  $\pm 0.25\%$  και μεγάλη θερμοκρασιακή ευστάθεια.

Τέλος, για τον έλεγχο και την προστασία της εγκατάστασης από υπερπίεσης και υποπίεσης χρησιμοποιούνται πρεσοστάτες σε κατάλληλα σημεία ελέγχου της εγκατάστασης. Οι πρεσοστάτες είναι της εταιρείας Ranco, μοντέλο RANCO 016-6751 Πιεσοστάτης Υψηλής Πίεσης με χειροκίνητη επαναφορά, περιοχή ρύθμισης bar/psi: 7-30/100-430 και διαφορικό bar/psi: 3.2 fix / 45 fix. Σε περίπτωση που εμφανιστεί κάποιο πρόβλημα πίεσεως ο αντίστοιχος διακόπτης πίεσεως θα δώσει ψηφιακό σήμα σε μία από της ειδόσου του PLC ενεργοποιώντας με αυτόν τον τρόπο το κατάλληλο πρόγραμμα προστασίας της εγκατάστασης. Κάθε πρεσοστάτης διαθέτει

NO και NC επαφή. Όλες οι συνδέσεις έχουν γίνει στην NC επαφή των πρεσοστατών, ώστε σε περίπτωση σφάλματος να δοθεί το ψηφιακό μηδέν (0) σαν είσοδος στο PLC, αλλά και σε περίπτωση βλάβης του ίδιου του ψηφιακού μετρητικού να δοθεί σήμα σφάλματος και να διακοπεί η λειτουργία της μονάδας, ώστε να αποφευχθεί βλάβη αυτής από αδυναμία ανίχνευσης σφάλματος πίεσης. Η αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν στον κώδικα του προγράμματος προστασίας του PLC και στο αντίστοιχο VI του LabVIEW λόγω αυτής της συνδεσμολογίας δίνονται στο Παράρτημα Α.



*Εικόνα 3.2.6-3: Ψηφιακό μετρητικό πίεσεως.*

### **3.2.7 Ηλεκτρολογικός Πίνακας**

Στο Παράρτημα Β δίνονται τα ηλεκτρολογικά σχέδια της μονάδας όπου και φαίνεται η συνδεσμολογία του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού όπως αυτή έγινε κατά την εγκατάσταση του.

Ο ηλεκτρολογικός πίνακας περιλαμβάνει όλα τα απαιτούμενα μέσα προστασίας, χειρισμού, ελέγχου και ενδείξεων, απαραίτητων για την λειτουργία της μονάδας. Είναι μεταλλικός στεγανός τύπου πεδίου, επισκέψιμος από την εμπρόσθια πλευρά για την επιθεώρηση των οργάνων και του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού και κλειστός στις υπόλοιπες πλευρές του.

Το καλώδιο κεντρικής τροφοδοσίας, το οποίο προέρχεται από υποπίνακα του εργαστηρίου με τον κατάλληλο διακόπτη προστασίας και ασφάλεια, εισήλθε στον

πίνακα από την βάση αυτού από την οποία εξέρχονται και τα υπόλοιπα καλώδια τροφοδοσίας του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού που έχει εγκατασταθεί στην μονάδα. Εντός του ηλεκτρολογικού πίνακα έχουν εγκατασταθεί ο Προγραμματιζόμενος Λογικός Ελεγκτής, οι inverters των γεννητριών και της αντλίας και ο ομαλός εκκινητής (soft-starter) του συμπιεστή του ψυκτικού κύκλου.



**Εικόνα 3.2.7-1:** Ηλεκτρολογικός πίνακας.

Ο ηλεκτρολογικός πίνακας διαχωρίζεται σε δύο τμήματα. Στην αριστερή στήλη και πρώτη σειρά του πίνακα είναι εγκατεστημένο το κύκλωμα ισχύος. Όπως εισέρχεται το καλώδιο παροχής στην κλεμμοσειρά X1 από τον υποπίνακα είναι εγκατεστημένος αποζεύκτης 25A, ασφαλειοαποζεύκτης 25A και ηλεκτρονόμος διαφυγής έντασης 40A/30mA, ενώ παράλληλα είναι συνδεδεμένος ο αναλυτής ενέργειας. Ο αναλυτής ενέργειας SENTRON PAC3200 της εταιρίας Siemens, για την μέτρηση της καταναλισκόμενης/παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος. Ο συγκεκριμένος αναλυτής είναι ένα όργανο μέτρησης πρόσοψης πίνακα που μας παρέχει μια σειρά από ποσοτικές (ενεργός/άεργος/φαινόμενη ισχύς, πολική/φασική τάση, πολικό/φασικό ρεύμα) και ποιοτικές (αρμονικό περιεχόμενο τάσης/ρεύματος, συντελεστής ισχύος) πληροφορίες, τόσο τοπικά, από το ενσωματωμένο πάνελ του,

όσο και απομακρυσμένα μέσω της εφαρμογής διεπαφής Ανθρώπου-Επαφής (Human Machine Interface, HMI).



**Εικόνα 3.2.7-2:** Αναλυτής ενέργειας SENTRON PAC3200 της εταιρίας Siemens.

Στη συνέχεια οι τρεις φάσεις της παροχής διαχωρίζονται στο κουτί διακλάδωσης, ώστε να ισομοιραστούν τα φορτία που τροφοδοτούν. Τριφασική παροχή δίνεται στην κλεμμοσειρά X2 για την τροφοδοσία των γεννητριών, της αντλίας και του συμπιεστή μέσω των μέσων ελέγχου τους (inverters και soft-starter), ενώ μονοφασική παροχή δίνεται στην κλεμμοσειρά X3 για την τροφοδοσία των βαλβίδων bypass και VCC , των στροφομέτρων κα του ανεμιστήρα του πίνακα για ψύξη. Τέλος, μονοφασική παροχή τροφοδοτεί μετατροπείς από εναλλασσόμενη σε συνεχή τάση 12V και 24V για την σύμπλεξη των scroll των γεννητριών και του συμπιεστή, αλλά και το τροφοδοτικό του Προγραμματιζόμενου Λογικού Ελεγκτή. Όλες οι τριφασικές και μονοφασικές παροχές ασφαρίζονται με την κατάλληλη ασφάλεια για προστασίας του εξοπλισμού , όπως φαίνεται και στα ηλεκτρολογικά σχέδια.



*Εικόνα 3.2.7-3: Λεπτομέρεια από το κύκλωμα ισχύος του ηλεκτρολογικού πίνακα.*

Το δεύτερο τμήμα του πίνακα είναι το κύκλωμα ελέγχου της εγκατάστασης που αποτελείται από τα ρελέ στα οποία οδηγούνται οι έξοδοι του Προγραμματιζόμενου Λογικού Ελεγκτή για τον έλεγχο λειτουργίας και την προστασία κατά την εκδήλωση σφάλματος του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού της εγκατάστασης με παράλληλη τροφοδότη της αντίστοιχης ενδεικτικής λυχνίας.



*Εικόνα 3.2.7-4: Λεπτομέρεια Προγραμματιζόμενου Λογικού Ελεγκτή και ρελέ ελέγχου.*

Τα μέσα προστασίας που χρησιμοποιούνται και η αναλυτική συνδεσμολογία του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού δίνονται αναλυτικά στο Παράρτημα Β.

### **3.3 Αυτόματος και εποπτικός έλεγχος της εγκατάστασης**

#### **3.3.1 Ο Προγραμματιζόμενος Λογικός Ελεγκτής της εγκατάστασης**

Στην εγκατάσταση τριπαραγωγής θα χρησιμοποιηθεί Προγραμματιζόμενος Λογικός Ελεγκτής (Programmable Logic Controller, PLC) ο οποίος θα εκτελεί την λειτουργία συλλογής των δεδομένων, ψηφιακών και αναλογικών, από τα επιμέρους στοιχεία της εγκατάστασης και θα επενεργεί στα διάφορα στοιχεία του εξοπλισμού της εγκατάστασης για έλεγχο της λειτουργίας αυτών και για προστασία της μονάδας. Τα δεδομένα που θα φτάνουν στο PLC, αφού υποστούν την απαραίτητη επεξεργασία, θα αποστέλλονται μέσω σύνδεσης Ethernet σε υπολογιστή ο οποίος εκτελεί το HMI λογισμικό της εφαρμογής SCADA. Μέσα από το γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής μπορούμε ελέγχουμε την λειτουργία των επιμέρους στοιχείων της εγκατάστασης, ενώ, σε συνεργασία με το PLC, μας παρέχεται και η δυνατότητα εποπτείας της λειτουργίας της καθώς και καταγραφής των επιθυμητών δεδομένων.

##### **3.3.1.1 Περιγραφή του υλικού (hardware)**

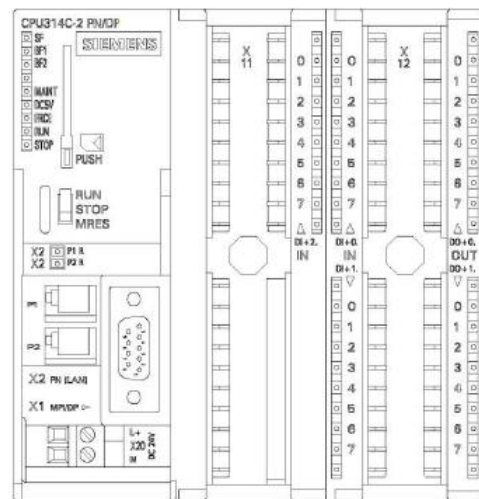
Το PLC που επιλέχθηκε για την εγκατάσταση ανήκει στη σειρά SIMATIC S7-300 της εταιρείας Siemens. Η συγκεκριμένη σειρά χαρακτηρίζεται από συμπαγείς (compact) ελεγκτές με αρθρωτή (modular) δομή που επιτρέπει την βελτιστοποίηση την επιθυμητή λειτουργίας (I/O, επικοινωνία, έλεγχος, επεκτασιμότητα) με την τελική επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού μέσα από μια πληθώρα καρτών (modules) γενικού και ειδικού σκοπού. Είναι κατάλληλοι για μικρού και μεσαίου μεγέθους βιομηχανικές εφαρμογές και παρουσιάζουν ευελιξία ως προς την επεκτασιμότητα τους, όταν αυξάνουν οι απαιτήσεις της εφαρμογής. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα επιμέρους υποσυστήματα που θα αποτελέσουν το hardware του ελεγκτή μας.

##### **Κεντρική μονάδα Επεξεργασίας**

Η κεντρική μονάδα επεξεργασίας που επιλέχθηκε είναι η CPU314C-2PN/DP (κωδικός προϊόντος 6ES7314-6EH04-0AB0) που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



(α)



(β)

**Σχήμα 3.3.1.1-1:** α) Εξωτερική και β) εσωτερική όψη της CPU314C-2PN/DP [18].

Τα κύρια χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης CPU είναι [18]:

- Ενσωματωμένη μνήμη 192 KB με μη-πτητική μνήμη για διατήρηση της πληροφορίας (retentivity) των data blocks στα 64KB
- 256 timers με εύρος μέτρησης χρόνου από 10 msec έως 9990 sec
- 256 counters με εύρος απαρίθμησης από 0 έως 999
- 24 κανάλια ενσωματωμένων ψηφιακών εισόδων
- 16 κανάλια ενσωματωμένων ψηφιακών εξόδων
- 5 κανάλια ενσωματωμένων αναλογικών εισόδων (4 τάσης/ρεύματος, 1 αντίστασης PT100)
- 2 κανάλια ενσωματωμένων αναλογικών εξόδων
- Δυνατότητα επικοινωνίας με Profibus μέσω 1 υποδοχής RS485
- Δυνατότητα επικοινωνίας μέσω δικτύου Ethernet (πρωτόκολλο TCP/IP) μέσω ενός switch 2 θυρών RJ45.

Στις ψηφιακές εισόδους εισέρχονται τα σήματα κατάστασης λειτουργίας και σφάλματος των επιμέρους συστημάτων της εγκατάστασης καθώς και τα σήματα από του αισθητήρες υποπίεσης/υπερπίεσης και αξιοποιούνται για την εποπτεία λειτουργίας της εγκατάστασης από την HMI εφαρμογή και την προστασία της από το πρόγραμμα ελέγχου του PLC. Στις ψηφιακές εξόδους συνδέονται μικροελέκτρικά που καθορίζουν την λειτουργία των επιμέρους συστημάτων της εγκατάστασης καθώς και λυχνίες ένδειξης σφάλματος υποπίεσης/ υπερπίεσης.

Στις 4 ενσωματωμένες αναλογικές εισόδους τάσης/ρεύματος εισέρχονται τα σήματα από τους μορφομετατροπείς μετρητικών θερμοκρασίας, τα οποία μετά την κατάλληλη επεξεργασία (scaling) στέλνονται στην HMI εφαρμογή όπου γίνεται εφικτή η online και σε πραγματικό χρόνο παρακολούθηση και καταγραφή των μεταβολών των μεγεθών. Στις 2 ενσωματωμένες αναλογικές εξόδους στέλνουμε τα σήματα ρύθμισης της συχνότητας της αντλίας και της γεννήτριας 1, προς τους αντίστοιχους inverter. Η τιμή της συχνότητας επιλέγεται από τον χρήστη στο γραφικό περιβάλλον και στέλνεται στο PLC, όπου μετά την κατάλληλη επεξεργασία (unscaling) μεταφράζεται σε μορφή σήματος (0-10 V) κατανοητή από το κύκλωμα ελέγχου του inverter.

Όλες οι απαραίτητες συνδεσμολογίες, σύμφωνα και με τα παραπάνω κυκλωματικά διαγράμματα, για τις ενσωματωμένες ψηφιακές και αναλογικές εισόδους/εξόδους της CPU φαίνονται στην σελίδα 6 των προτεινόμενων ηλεκτρολογικών σχεδίων του παράρτημα Β.

### **Κάρτες αναλογικών εισόδων**

Σύμφωνα με το μονογραμμικό διάγραμμα, στην εγκατάσταση τριπαραγωγής υπάρχουν συνολικά 28 μετρητικά με τα οποία πετυχαίνουμε την συλλογή, παρακολούθηση και καταγραφή των δεδομένων για τις μεταβλητές του συστήματος (θερμοκρασία, πίεση, παροχή και αριθμό στροφών). Όπως αναφέραμε από τις ενσωματωμένες αναλογικές εισόδους της CPU θα χρησιμοποιηθούν οι 4 για την συλλογή δεδομένων θερμοκρασίας. Για τις υπόλοιπες 20 μεταβλητές θα χρειαστούν επιπλέον 3 κάρτες αναλογικών εισόδων με 8 εισόδους η κάθε μία. Επιλέχθηκε το μοντέλο SIMATIC S7-300 ANALOG INPUT SM331 (κωδικό προϊόντος 6ES7331-1KF02-0AB0).

Τα κύρια χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης κάρτας είναι [19]:

- 8 κανάλια εισόδου
- Προγραμματιζόμενη ακρίβεια σε κάθε κανάλι (12 bits + πρόσημο)
- Προγραμματιζόμενη μορφή τύπου και εύρους μέτρησης δεδομένων ανά κανάλι:
  - Τάση ( $\pm 50\text{mV}$ ,  $\pm 500\text{mV}$ ,  $\pm 1\text{V}$ ,  $\pm 5\text{V}$ ,  $\pm 10\text{V}$ , 1-5V, 0-10V)
  - Ρεύμα (0-20mA, 4-20mA,  $\pm 20\text{mA}$ )
  - Αντίσταση (0-600  $\Omega$ , 0-6 K $\Omega$ , PTC)
  - Θερμοκρασία



*Σχήμα 3.3.1.1-2: Εξωτερική όψη της SM331.*

Οι απαραίτητες συνδεσμολογίες για τις κάρτες αναλογικών εισόδων μαζί με το αντίστοιχο σήμα σε κάθε κανάλι εισόδου φαίνονται στις σελίδες 9 και 10 των προτεινόμενων ηλεκτρολογικών σχεδίων του Παραρτήματος Β. Σε προηγούμενη ενότητα αναφέρθηκε ότι κατά την κυκλική επεξεργασία του προγράμματος, οι τιμές των σημάτων στις κλέμμες των μονάδων εισόδου μεταφέρονται στην μνήμη απεικόνισης εισόδων στην αρχή του κύκλου και παραμένουν σταθερές μέχρι την αρχή του επόμενου κύκλου. Συνεπώς κατά την διάρκεια του κύκλου επεξεργασίας οι τιμές στην μνήμη, τις οποίες λαμβάνει υπόψη το πρόγραμμα ελέγχου, δεν αντιστοιχούν στις πραγματικές τιμές των εισόδων αλλά στις τιμές της τελευταίας ενημέρωσης της μνήμης. Το γεγονός αυτό δεν είναι επιθυμητό όσον αφορά τα αναλογικά σήματα όπου μας ενδιαφέρει η ορθή και ακριβής καταγραφή των μεγεθών σε πραγματικό χρόνο.

Για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος, υπάρχει η δυνατότητα αξιοποίησης της τεχνικής της περιφερειακής διευθυνσιοδότησης (Peripheral addressing). Με την τεχνική αυτή, μπορούμε να έχουμε απευθείας πρόσβαση στον αντίστοιχο καταχωρητή της μονάδας εισόδου από τον οποίο θέλουμε να διαβάσουμε την επιθυμητή πληροφορία, παρακάμπτοντας έτσι την μνήμη απεικόνισης εισόδων. Την πρόσβαση την αποκτούμε μέσα από την κατάλληλη διευθυνσιοδότηση στο πρόγραμμά μας, οπότε εξασφαλίζεται ότι κατά την διάρκεια του κύκλου επεξεργασίας του προγράμματος μπορούμε να διαβάζουμε την πραγματική, εκείνη την χρονική στιγμή, τιμή του μεγέθους στην αναλογική είσοδο της μονάδας. Η

περιφερειακή διευθυνσιοδότηση επιτυγχάνεται με την προσθήκη του γράμματος “P” σαν πρόθεμα στην θέση μνήμης στην οποία απευθύνεται το πρόγραμμα. Συνεπώς ανάλογα τον τύπο δεδομένων που βρίσκεται στην συγκεκριμένη θέση μνήμης προκύπτουν οι παρακάτω τύποι διευθυνσιοδότησης:

- **PIB → Peripheral Input Byte**
- **PIW → Peripheral Input Word**
- **PID → Peripheral Input Double-word**

### **Κάρτα αναλογικών εξόδων**

Σύμφωνα με τις ανάγκες της εγκατάστασης, όπως έχουν περιγραφεί σε προηγούμενες ενότητες, θα γίνεται ρύθμιση στην συχνότητα 3 μηχανών (αντλία και δυο γεννήτριες). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, από τις 2 ενσωματωμένες αναλογικές εξόδους της CPU θα γίνεται η ρύθμιση συχνότητας της αντλίας και της γεννήτριας 1. Για να πετύχουμε την ρύθμιση συχνότητας της γεννήτριας 2 θα χρησιμοποιηθεί μια επιπλέον κάρτα αναλογικών εξόδων με 2 κανάλια εξόδου.

Επιλέχθηκε το μοντέλο SIMATIC S7-300 ANALOG OUTPUT SM332 (κωδικό προϊόντος 6ES73325HB010AB0).

Τα κύρια χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης κάρτας είναι [19]:

- 2 κανάλια εξόδου
- Ακρίβεια σε κάθε κανάλι εξόδου 12 bits
- Προγραμματιζόμενος τύπος και εύρος μέτρησης δεδομένων ανά κανάλι
  - Τάση ( $\pm 10V$ , 1-5V, 0-10V)
  - Ρεύμα (0-20mA, 4-20mA,  $\pm 20mA$ )



*Σχήμα 3.3.1.1-3: Εξωτερική όψη της SM332.*

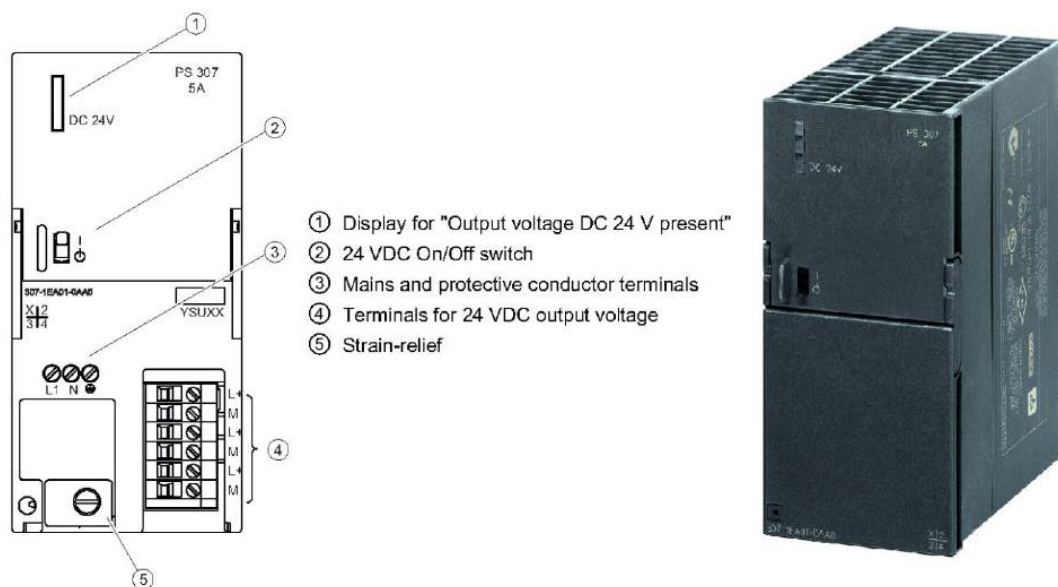
Οι απαραίτητες συνδεσμολογίες για την κάρτα αναλογικών εξόδων φαίνονται στην σελίδα 10 των προτεινόμενων ηλεκτρολογικών σχεδίων του Παραρτήματος Β. Κατά την κυκλική επεξεργασία του προγράμματος, οι τιμές των σημάτων στις κλέμμες των μονάδων εξόδου μεταφέρονται μαζικά από την μνήμη απεικόνισης εξόδων στο τέλος του κύκλου και παραμένουν σταθερές μέχρι την τέλος του επόμενου κύκλου. Συνεπώς κατά την διάρκεια του κύκλου επεξεργασίας οι τιμές στις μονάδες εξόδου, που φτάνουν στις οδηγούμενες συσκευές, δεν αντιστοιχούν στις πραγματικές τιμές που προκύπτουν κάθε στιγμή από το πρόγραμμα ελέγχου, αλλά στις τιμές της τελευταίας ενημέρωσης της μνήμης απεικόνισης εξόδων.

Αντίστοιχα με την περίπτωση των αναλογικών εισόδων μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την τεχνική της περιφερειακής διευθυνσιοδότησης και στην περίπτωση των αναλογικών εξόδων. Με αυτόν τον τρόπο πετυχαίνουμε απευθείας πρόσβαση στον αντίστοιχο καταχωρητή της μονάδας εξόδου στον οποίο θέλουμε να φτάνει η πληροφορία από το πρόγραμμα ελέγχου, παρακάμπτοντας έτσι την μνήμη απεικόνισης εξόδων και εξασφαλίζοντας την, σε πραγματικό χρόνο, άμεση ενημέρωση της κάθε αναλογικής εξόδου. Η περιφερειακή διευθυνσιοδότηση για τις αναλογικές εξόδους επιτυγχάνεται με τον ίδιο τρόπο όπως και στις αναλογικές εισόδους, οπότε τελικά προκύπτουν οι παρακάτω τύποι διευθυνσιοδότησης:

- **PQB** → **P**eripheral **Q**(output) **B**yte
- **PQW** → **P**eripheral **Q**(output)**W**ord
- **PQD** → **P**eripheral **Q**(output) **D**ouble-word

## Μονάδα τροφοδοσίας

Για την τροφοδοσία του κυκλώματος αυτοματισμού καθώς και ορισμένων μετρητικών οργάνων θα χρησιμοποιηθεί DC τροφοδοτικό και συγκεκριμένα το SIMATIC S7-300 PS 307 (κωδικό προϊόντος 6ES7307-1EA01-0AA0) το οποίο βλέπουμε στην παρακάτω εικόνα μαζί με κυκλωματικό διάγραμμα καλωδίωσής του.



**Σχήμα 3.3.1.1-4:** Διάγραμμα καλωδίωσης και εξωτερική όψη τροφοδοτικού PS307 24V/5A [19].

Τα κύρια χαρακτηριστικά συγκεκριμένου τροφοδοτικού είναι:

- Μονοφασική τροφοδοσία με ονομαστική τάση εισόδου 230/120 VAC στα 50/60 Hz αντίστοιχα
- Ονομαστική τάση εξόδου 24 VDC
- Ονομαστικό ρεύμα εξόδου 5 A
- Προστασία από υπερτάσεις και βραχυκυκλώματα

Το πρόγραμμα ελέγχου του PLC για τον έλεγχο τη εγκατάστασης δίνεται αναλυτικά στην βιβλιογραφία [22]. Ακολουθώς δίνονται οι πίνακες με τις αναλογικές και ψηφιακές εισόδους και εξόδους της εγκατάστασης, ενώ στο Παράρτημα Α δίνονται οι αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν στον κώδικα προγραμματισμού του PLC.

ΚΛΕΜΜΑ -X7		ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΕΙΣΟΔΟΥ PLC		ΣΗΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
-	I1	DI2.0	%I138.0	GEN_1_FAULT	Ένδειξη σφάλματος inverter γεννήτριας 1
-	I2	DI2.1	%I138.1	GEN_2_FAULT	Ένδειξη σφάλματος inverter γεννήτριας 2
-	I3	DI2.2	%I138.2	ORC_PUMP_FAULT	Ένδειξη σφάλματος inverter αντλίας ORC
-	I4	DI2.3	%I138.3	E-STOP	Emergency stop
1	IN5	DI2.4	%I138.4	GEN_1_OPER	Ένδειξη κατάστασης λειτουργίας γεννήτριας 1
2	IN6	DI2.5	%I138.5	GEN_2_OPER	Ένδειξη κατάστασης λειτουργίας γεννήτριας 2
3	IN7	DI2.6	%I138.6	ORC_PUMP_OPER	Ένδειξη λειτουργίας αντλίας ORC
4	IN8	DI2.7	%I138.7	COMPR_OPER	Ένδειξη κατάστασης λειτουργίας κινητήρα συμπιεστή
5	IN9	DI0.0	%I136.0	BYPASS_VALVE_STATE	Ένδειξη κατάστασης θέσης βαλβίδας bybass (ανοικτή/κλειστή)
6	IN10	DI0.1	%I136.1	VCC_VALVE_STATE	Ένδειξη κατάστασης θέσης βαλβίδας VCC κύκλου (ανοικτή/κλειστή)
7	IN11	DI0.2	%I136.2	GEN_1_ENGAGEMENT	Ένδειξη κατάστασης σύμπλεξης/αποσύμπλεξης εκτονωτή-γεννήτριας 1
8	IN12	DI0.3	%I136.3	GEN_2_ENGAGEMENT	Ένδειξη κατάστασης σύμπλεξης/αποσύμπλεξης εκτονωτή-γεννήτριας 2
9	IN13	DI0.4	%I136.4	COMPR_ENGAGEMENT	Ένδειξη σύμπλεξης/αποσύμπλεξης συμπιεστή-κινητήρα
10	IN14	DI0.5	%I136.5	COMPR_FAULT	Ένδειξη θερμικού κινητήρα συμπιεστή (PTC)
11	IN15	DI0.6	%I136.6	LOW_PRESS_BEF_ORC_PUMP	Σήμα από τον αισθητήρα υποπίεσης πριν την αντλία ORC
12	IN16	DI0.7	%I136.7	HIGH_PRESS_BEF_ORC_PUMP	Σήμα από τον αισθητήρα υπερπίεσης πριν την αντλία ORC
13	IN17	DI1.0	%I137.0	HIGH_PRESS_AFT_ORC_PUMP	Σήμα από τον αισθητήρα υπερπίεσης μετά την αντλία ORC
14	IN18	DI1.1	%I137.1	HIGH_PRESS_AFT_EXPAND	Σήμα από τον αισθητήρα υπερπίεσης μεταξύ των εκτονωτή στο ORC
15	IN19	DI1.2	%I137.2	LOW_PRESS_BEF_VCC_COMPR	Σήμα από τον αισθητήρα υποπίεσης πριν τον συμπιεστή
16	IN20	DI1.3	%I137.3	HIGH_PRESS_AFT_VCC_COMPR	Σήμα από τον αισθητήρα υπερπίεσης μετά τον συμπιεστή

**Πίνακας 3.3.1.1-1: Ψηφιακές είσοδοι.**

ΡΕΛΕ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΕΞΟΔΟΣ PLC			ΣΗΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
K1	Q1	D00.0	%Q136.0	GEN_1_START/STOP	Ξεκίνημα/Σταμάτημα της Γεννήτριας 1 του ORC κύκλου
K2	Q2	D00.1	%Q136.1	GEN_2_START/STOP	Ξεκίνημα/Σταμάτημα της Γεννήτριας 2 του ORC κύκλου
K3	Q3	D00.2	%Q136.2	ORC_PUMP_START/STOP	Ξεκίνημα/Σταμάτημα της αντλίας του ORC κύκλου
K4	Q4	D00.3	%Q136.3	COMPR_START/STOP	Ξεκίνημα/Σταμάτημα του συμπιεστή του VCC κύκλου
K5	Q5	D00.4	%Q136.4	BYPASS_VALVE_OPEN/CLOSE	Άνοιγμα/κλείσιμο της ηλεκτρικής βάνας του bypass
K6	Q6	D00.5	%Q136.5	VCC_VALVE_OPEN/CLOSE	Άνοιγμα/κλείσιμο της ηλεκτρικής βάνας των scroll
K7	Q7	D00.6	%Q136.6	GEN_1_ENG/DISENG	Σύμπλεξη /Αποσύμπλεξη Scroll Γεννήτριας 1
K8	Q8	D00.7	%Q136.7	GEN_2_ENG/DISENG	Σύμπλεξη /Αποσύμπλεξη Scroll Γεννήτριας 2
K9	Q9	DO1.0	%Q137.0	COMPR_ENG/DISENG	Σύμπλεξη /Αποσύμπλεξη Scroll Συμπιεστή
K10	Q10	DO1.1	%Q137.1	PUMP_HIGH_PRES_FAULT	Ένδειξη κατάστασης υπερπίεσης στο κύκλωμα ORC πριν ή μετά την αντλία
K11	Q11	DO1.2	%Q137.2	PUMP_LOW_PRES_FAULT	Ένδειξη κατάστασης υποπίεσης στο κύκλωμα ORC πριν την αντλία
K12	Q12	DO1.3	%Q137.3	EXPANDER_HIGH_PRES_FAULT	Ένδειξη κατάστασης υπερπίεσης στο κύκλωμα ORC μετά τον expander
K13	Q13	DO1.4	%Q137.4	COMPR_HIGH_PRESSURE_FAULT	Ένδειξη κατάστασης υπερπίεσης στο κύκλωμα VCC μετά τον συμπιεστή
K14	Q14	DO1.5	%Q137.5	COMPR_LOW_PRESSURE_FAULT	Ένδειξη κατάστασης υποπίεσης στο κύκλωμα VCC πριν τον συμπιεστή
K15	Q15	DO1.6	%Q137.6	ORC_PUMP_FAULT	Ένδειξη σφάλματος inverter αντλίας ORC
K16	Q16	DO1.7	%Q137.7	G1_FAULT	Ένδειξη σφάλματος inverter γεννήτριας 1
K17	Q17	DO2.0	%Q138.0	G2_FAULT	Ένδειξη σφάλματος inverter γεννήτριας 2
K18	Q18	DO2.1	%Q138.1	EMERGENCY_STOP	
K19	Q19	DO2.2	%Q138.2	COMPR_FAULT	Ένδειξη θερμικού κινητήρα συμπιεστή(PTC)

**Πίνακας 3.3.1.1-2: Ψηφιακές έξοδοι.**

ΚΛΕΜΜΑ - X5		ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΕΙΣΟΔΟΥ PLC		ΣΗΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
1	AI0	AI0	%IW800	TEMP_BEF_RECEIV	Σήμα μετρητικού θερμοκρασίας (4-20 mA) πριν τον receiver στο κύκλωμα ORC
2	AI1	AI1	%IW802	TEMP_AFT_RECEIV	Σήμα μετρητικού θερμοκρασίας (4-20 mA) μετά τον receiver στο κύκλωμα ORC
3	AI2	AI2	%IW804	TEMP_AFT_ORC_PUMP	Σήμα μετρητικού θερμοκρασίας (4-20 mA) μετά την αντλία στο κύκλωμα ORC
4	AI3	AI3	%IW806	TEMP_OUT_BOILER	Σήμα μετρητικού θερμοκρασίας (4-20 mA) πριν τον evaporator στο κύκλωμα θερμικού ελαίου
5	AI4	1:CH 0	%IW256	TEMP_IN_BOILER	Σήμα μετρητικού θερμοκρασίας (4-20 mA) μετά τον evaporator στο κύκλωμα θερμικού ελαίου
6	AI5	CH1	%IW258	TEMP_BEF_EXPANDER_1	Σήμα μετρητικού θερμοκρασίας (4-20 mA) πριν τον expander 1 στο κύκλωμα ORC
7	AI6	CH2	%IW260	TEMP_BEF_EXPANDER_2	Σήμα μετρητικού θερμοκρασίας (4-20 mA) πριν τον expander 2 στο κύκλωμα ORC
8	AI7	CH3	%IW262	TEMP_AFT_EXPANDERS	Σήμα μετρητικού θερμοκρασίας (4-20 mA) μετά τους expander στο κύκλωμα ORC
9	AI8	CH4	%IW264	TEMP_BEF_VCC_EVAP	Σήμα μετρητικού θερμοκρασίας (4-20 mA) πριν τον evaporator στο κύκλωμα VCC
10	AI9	CH5	%IW266	TEMP_BEF_COMPR	Σήμα μετρητικού θερμοκρασίας (4-20 mA) πριν τον compressor στο κύκλωμα VCC
11	AI10	CH6	%IW268	TEMP_AFT_COMPR	Σήμα μετρητικού θερμοκρασίας (4-20 mA) μετά τον compressor στο κύκλωμα VCC
12	AI11	CH7	%IW270	PRESS_BEF_RECEIV	Σήμα μετρητικού πίεσης (4-20 mA) πριν τον receiver στο κύκλωμα ORC
13	AI12	2:CH 0	%IW272	PRESS_AFT_RECEIV	Σήμα μετρητικού πίεσης (4-20 mA) μετά τον receiver στο κύκλωμα ORC
14	AI13	CH1	%IW274	PRESS_AFT_ORC_PUMP	Σήμα μετρητικού πίεσης (4-20 mA) μετά την αντλία στο κύκλωμα ORC
15	AI14	CH2	%IW276	PRESS_BEF_EXPANDER_1	Σήμα μετρητικού πίεσης (4-20 mA) πριν τον expander 1 στο κύκλωμα ORC
16	AI15	CH3	%IW278	PRESS_BEF_EXPANDER_2	Σήμα μετρητικού πίεσης (4-20 mA) πριν τον expander 2 στο κύκλωμα ORC
17	AI16	CH4	%IW280	PRESS_AFT_EXPANDERS	Σήμα μετρητικού πίεσης (4-20 mA) μετά τους expander στο κύκλωμα ORC
18	AI17	CH5	%IW282	PRESS_BEF_VCC_EVAP	Σήμα μετρητικού πίεσης (4-20 mA) πριν τον evaporator στο κύκλωμα VCC
19	AI18	CH6	%IW284	PRESS_BEF_COMPR	Σήμα μετρητικού πίεσης (4-20 mA) πριν τον compressor στο κύκλωμα VCC
20	AI19	CH7	%IW286	PRESS_AFT_COMPR	Σήμα μετρητικού πίεσης (4-20 mA) μετά τον compressor στο κύκλωμα VCC
21	AI20	3:CH 0	%IW288	FLOW_BEF_ORC_PUMP	Σήμα μετρητικού ροής (4-20 mA) πριν την αντλία στο κύκλωμα ORC
22	AI21	CH1	%IW290	FLOW_IN_BOILER	Σήμα μετρητικού ροής (4-20 mA) μετά τον evaporator στο κύκλωμα θερμικού ελαίου
23	AI22	CH2	%IW292	SPEED_GEN_1	Σήμα μετρητικού ταχύτητας (4-20 mA) του άξονα της Γεννήτριας 1

ΚΛΕΜΜΑ - X5		ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΕΙΣΟΔΟΥ PLC		ΣΗΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
24	AI23	CH3	%IW294	SPEED_GEN_2	Σήμα μετρητικού ταχύτητας (4-20 mA) του άξονα της Γεννήτριας 2
25	AI24	CH4	%IW296	TEMP_BEF_ORC_PUMP	Σήμα μετρητικού θερμοκρασίας (4-20 mA) πριν την αντλία στο κύκλωμα ORC
26	AI25	CH5	%IW298	TEMP_BEF_CONDENSE R	Σήμα μετρητικού θερμοκρασίας (4-20 mA) πριν τον συμπυκνωτή στον κύκλο VCC
27	AI26	CH6	%IW300	PRESS_BEF_ORC_PUMP	Σήμα μετρητικού πίεσης (4-20 mA) πριν την αντλία στο κύκλωμα ORC
28	AI27	CH7	%IW302	PRESS_BEF_CONDENSE R	Σήμα μετρητικού πίεσης (4-20 mA) πριν τον συμπυκνωτή στον κύκλο VCC

*Πίνακας 3.3.1.1-3: Αναλογικές εισόδους.*

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΕΞΟΔΟΥ PLC		ΣΗΜΑ ΕΞΟΔΟΥ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
CH0	%QW304	PUMP_SETPOINT	Σήμα ελέγχου της συχνότητας (0-10 V) του inverter της αντλίας
AO0	%QW800	GEN_1_SETPOINT	Σήμα ελέγχου της συχνότητας (0-10 V) του inverter της γεννήτριας 1
AO1	%QW802	GEN_2_SETPOINT	Σήμα ελέγχου της συχνότητας (0-10 V) του inverter της γεννήτριας 2

*Πίνακας 3.3.1.1-4: Αναλογικές εξόδους.*

### 3.3.2 Εποπτικός Έλεγχος Εγκατάστασης μέσω Human Machine

#### Interface (HMI)

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται η διαδικασία υλοποίησης της HMI εφαρμογής η οποία, μέσω της συνεργασίας της με το PLC, θα παρέχει την δυνατότητα εποπτικού ελέγχου της εγκατάστασης και καταγραφής των δεδομένων.

Το γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής αναπτύσσεται στο πρόγραμμα LabVIEW της εταιρίας National Instruments (NI), με την επιπρόσθετη χρήση του πακέτου DSC module (Datalogging and Supervisory Control) της ίδιας εταιρίας. Το DSC module παρέχει στο LabVIEW έτοιμα προγραμματιστικά εργαλεία τα οποία το καθιστούν ιδανική επιλογή για την εύκολη και σε σύντομο χρονικό διάστημα ανάπτυξη εφαρμογών SCADA.

Η επίτευξη της συνεργασίας μεταξύ HMI εφαρμογής και PLC γίνεται μέσω του προτύπου OPC (Open Platform Communications). Το OPC αποτελεί ένα πρότυπο, κατά βάση για βιομηχανικές εφαρμογές, το οποίο είναι σχεδιασμένο ώστε να εξασφαλίζει την επικοινωνία και διαλειτουργικότητα (Interoperability) μεταξύ συσκευών (π.χ. αισθητήρες, ενεργοποιητές), συστημάτων ελέγχου (π.χ. PLC, DCS ) και λογισμικού ανάπτυξης εφαρμογών (HMI, Historian, Report Writer) τα οποία αποτελούν προϊόντα διαφορετικών κατασκευαστών. Ιστορικά το πρότυπο OPC ήρθε ως λύση σε μια σειρά προβλημάτων δικτύωσης , με χαρακτηριστικότερα [20]:

- **Ιδιότητα πρωτόκολλα:** οι διάφοροι κατασκευαστές χρησιμοποιούν τα δικά τους πρωτόκολλα επικοινωνίας τα οποία επιτρέπουν στα προϊόντα τους να επικοινωνούν μεταξύ τους, ωστόσο απαιτούνται ειδικά προγράμματα οδήγησης (drivers) προκειμένου να μπορέσουν να επικοινωνήσουν με προϊόντα άλλων κατασκευαστών

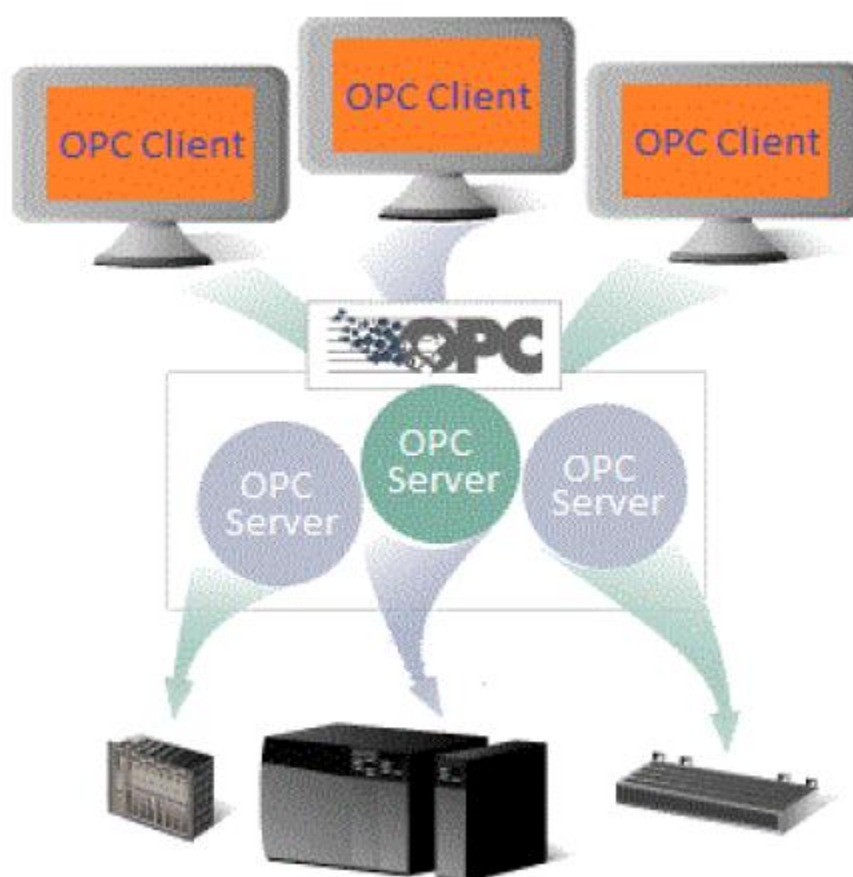
- **Πολλαπλοί drivers:** σε μια σύνδεση μεταξύ ενός υπολογιστή και μιας συσκευής, χρειάζεται η ύπαρξη ξεχωριστού driver για κάθε εφαρμογή (π.χ. HMI, καταγραφής ιστορικού → Historian) που εκτελείται στον υπολογιστή και επιθυμεί να επικοινωνήσει με την συγκεκριμένη συσκευή

- **Πολυπλοκότητα συντήρησης:** η ανάγκη για πολλαπλούς drivers σε κάθε σύνδεση σημαίνει ότι ακόμα και για σχετικά μικρό αριθμό συσκευών και εφαρμογών, που πρέπει να επικοινωνήσουν μεταξύ τους, αυξάνονται σημαντικά οι απαιτήσεις συντήρησης. Για παράδειγμα η επικοινωνία με μια συσκευή μέσω μιας HMI εφαρμογής που εκτελείται σε πολλούς υπολογιστές επιβάλλει την εγκατάσταση και ρύθμιση του απαραίτητου driver σε κάθε έναν από αυτούς. Όταν η HMI εφαρμογή πρέπει να επικοινωνήσει με περισσότερες από μια συσκευές αυξάνεται δραματικά ο αριθμός των απαιτούμενων drivers κάνοντας την διαδικασία εγκατάστασης και συντήρησης ιδιαίτερα επίπονη και χρονοβόρα.

Το πρότυπο OPC είναι μια σειρά προδιαγραφών που στοχεύουν στην διευκόλυνση διασύνδεσης συσκευών, ελεγκτών και προγραμμάτων ανάπτυξης εφαρμογών διάφορων κατασκευαστών, έτσι ώστε στο πλαίσιο ανάπτυξης ενός ευρύτερου συστήματος να μπορεί να υιοθετηθεί μια προσέγγιση επιλογής εξοπλισμού που δεν λαμβάνει υπόψιν τους περιορισμούς του κάθε προμηθευτή (vendor-independent). Η βασική ιδέα διασύνδεσης είναι ότι το OPC λειτουργεί ως ο «μεσάζοντας» μεταξύ πηγής δεδομένων (Data Source → συσκευή, ελεγκτής) και προορισμού δεδομένων (Data Sink → εφαρμογή), ο οποίος επιτρέπει την μεταξύ τους

επικοινωνία και ανταλλαγή δεδομένων χωρίς να είναι απαραίτητη η λεπτομερής γνώση του πρωτοκόλλου επικοινωνίας και της εσωτερικής οργάνωσης δεδομένων της μιας πλευράς από την άλλη.

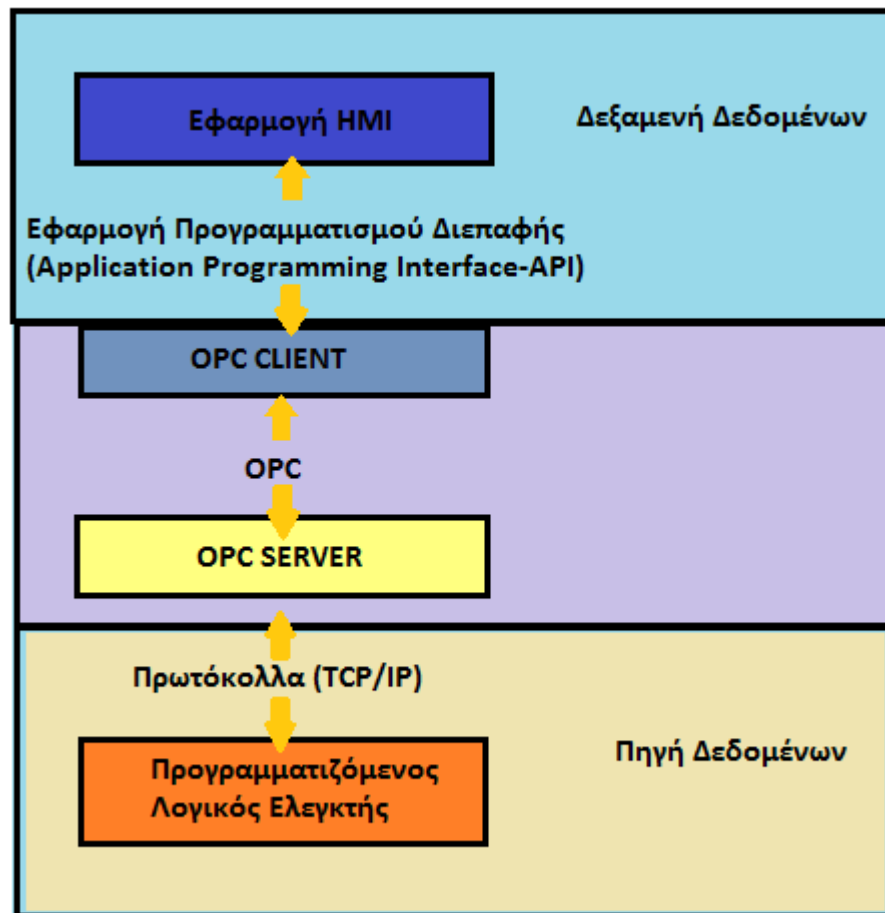
Το πρότυπο OPC είναι βασισμένο στην αρχιτεκτονική Client/Server. Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική παρέχει διάφορες δυνατότητες δικτύωσης, για παράδειγμα μέσα από μία εφαρμογή (ένας Client) μπορούμε να επικοινωνήσουμε με ένα πλήθος συσκευών και ελεγκτών διάφορων κατασκευαστών (πολλοί Servers) που αποτελούν επιμέρους συστατικά ενός ολοκληρωμένου συστήματος. Άλλη μια δυνατότητα είναι ότι η ίδια εφαρμογή μπορεί να εκτελείται σε περισσότερα από έναν τερματικά (πολλοί Clients) από τα οποία είναι δυνατή η επικοινωνία και ο έλεγχος μίας συγκεκριμένης συσκευής/ελεγκτή (ενός Server).



**Σχήμα 3.3.2-1:** Αρχιτεκτονική τύπου Client/Server του προτύπου OPC.

Στην περίπτωση μας η παρουσία του OPC αποτελεί το ενδιάμεσο στάδιο επικοινωνίας μεταξύ της HMI εφαρμογής (Data Sink) και του PLC (Data Source). Σύμφωνα με την αρχιτεκτονική Client/ Server η φιλοσοφία λειτουργίας είναι η εξής:

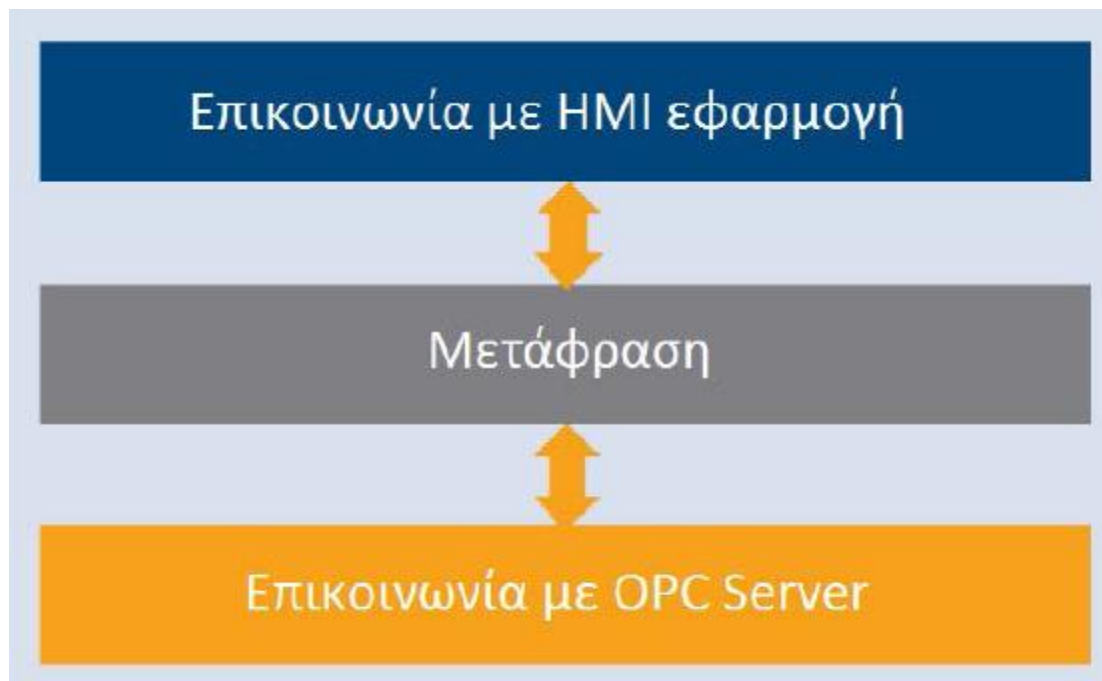
- η HMI εφαρμογή επικοινωνεί με τον OPC Client
- το PLC επικοινωνεί με τον OPC Server
- Ο OPC Client επικοινωνεί με τον OPC Server σχηματίζοντας το τελικό κανάλι που επιτρέπει στα δεδομένα να φτάσουν από την HMI εφαρμογή στο PLC και αντίστροφα, χωρίς οι δυο μεριές να «μιλάνε» απευθείας μεταξύ τους.



**Σχήμα 3.3.2-2:** Διασύνδεση HMI εφαρμογής και PLC μέσω της αρχιτεκτονικής PLC Client/Server [20].

Ο OPC Client είναι ουσιαστικά ένα πακέτο λογισμικού που χρησιμοποιείται από την HMI εφαρμογή προκειμένου να της παρέχει την δυνατότητα επικοινωνίας με τον OPC Server.

Εννοιολογικά η συνολική λειτουργία του OPC Client μπορεί να χωριστεί στις τρεις επιμέρους υπολειτουργίες που φαίνονται στο Σχήμα 3.3.2-3.



**Σχήμα 3.3.2-3:** Εποπτική περιγραφή λειτουργίας OPC Client.

Συγκεκριμένα, τα αιτήματα (requests) ανάγνωσης/εγγραφής δεδομένων που γίνονται από την HMI εφαρμογή, με τελικό πάντα αποδέκτη το PLC, μεταφράζονται από τον OPC Client σε ισοδύναμα συμβατά OPC αιτήματα και αποστέλλονται προς το OPC Server για περαιτέρω επεξεργασία και προώθηση. Αντίστοιχα όταν OPC δεδομένα καταφθάνουν από τον OPC Server, ο OPC Client τα μεταφράζει σε συμβατή, με την HMI εφαρμογή, μορφή, έτσι ώστε να είναι δυνατή η απεικόνιση και καταγραφή τους. Μεταξύ OPC Client και OPC Server υπάρχει μια σχέση Master/Slave, όπου ο Client (Master) δεχόμενος αιτήματα από την HMI εφαρμογή συνδέεται με τον OPC Server (Slave), ανταλλάσει δεδομένα μαζί του και αποσυνδέεται από αυτόν, έχοντας συνολικά τον πλήρη έλεγχο της μεταξύ τους επικοινωνίας.

Ο OPC Server είναι αντίστοιχα το πρόγραμμα που συνδέει το PLC με τον OPC Client και λειτουργεί ως μεταφραστής του πρωτοκόλλου επικοινωνίας του ελεγκτή. Εννοιολογικά η συνολική λειτουργία του OPC Server μπορεί να χωριστεί στις τρεις επιμέρους υπολειτουργίες που φαίνονται στο Σχήμα 3.3.2-4.

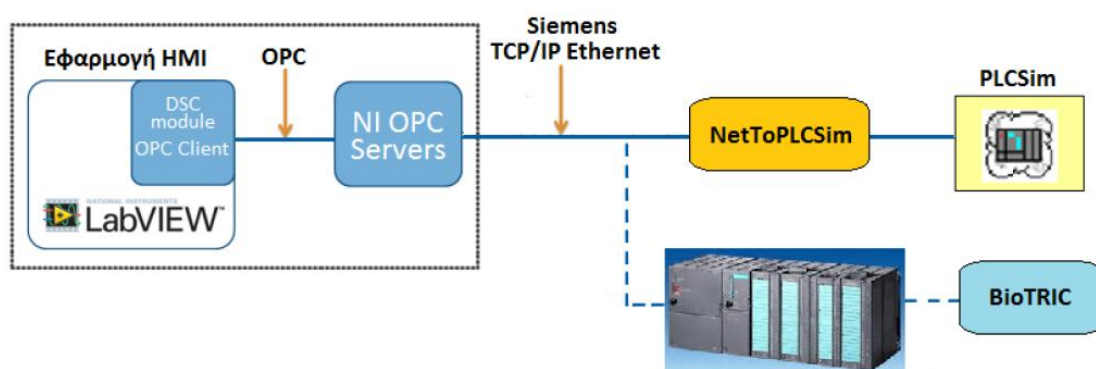


**Σχήμα 3.3.2-4:** Εποπτική περιγραφή λειτουργίας OPC Server.

Ο OPC Server δέχεται αιτήματα ανάγνωσης/εγγραφής δεδομένων από τον OPC Client και τα μεταφράζει ώστε να είναι συμβατά με το πρωτόκολλο επικοινωνίας του PLC. Ακολούθως αποστέλλει τα αιτήματα στον ελεγκτή ο οποίος απαντά με την κατάλληλη απόκριση (π.χ. δεδομένα, μήνυμα επιβεβαίωσης). Η επικοινωνία ολοκληρώνεται με την μετάφραση της απόκρισης, από τον OPC Server, ώστε να είναι συμβατή κατά OPC και η αποστολή της στον OPC Client για περαιτέρω επεξεργασία και προώθηση. Όπως γίνεται φανερό, λόγω της Master/Slave σχέσης, οποιαδήποτε αλληλεπίδραση μεταξύ OPC Server και PLC λαμβάνει χώρα μόνο κατόπιν «εντολής» του OPC Client, δηλαδή επί της ουσίας της HMI εφαρμογής.

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω στο Σχήμα 3.3.2-5 παρουσιάζεται η γενική εικόνα διασύνδεσης των επιμέρους στοιχείων του υλοποιούμενου συστήματος SCADA της παρούσας εργασίας. Συγκεκριμένα μέσω του προγράμματος LabVIEW υλοποιούμε το γραφικό περιβάλλον (Graphical User Interface – GUI) μέσα από το οποίο ο χειριστής θα έχει τον έλεγχο και την εποπτεία λειτουργίας της εγκατάστασης τριπαραγωγής. Με την χρήση του DSC module παρέχεται η δυνατότητα χρήσης του προτύπου OPC και επιτρέπεται η ενσωμάτωση του OPC Client στην HMI εφαρμογή. Ο OPC Server για το PLC της εγκατάστασης δημιουργείται και παραμετροποιείται στο συνεργαζόμενο πρόγραμμα NI OPC Servers της National Instruments. Κατά την

παραμετροποίησή του, όπως θα δούμε στην επόμενη ενότητα, ορίζεται ότι η επικοινωνία του με το PLC θα γίνεται με το πρωτόκολλο TCP/IP Ethernet.



*Σχήμα 3.3.2-5: Δομή συστήματος SCADA της εγκατάστασης τριπαραγωγής.*

Με την ολοκλήρωση της κατασκευής του ηλεκτρολογικού πίνακα, βάσει των προτεινόμενων ηλεκτρολογικών σχεδίων του Παραρτήματος Β, αρκεί η φόρτωση του προγράμματος ελέγχου στο PLC και η φυσική σύνδεση του, μέσω καλωδίου Ethernet, με τον υπολογιστή στον οποίο εκτελείται η HMI εφαρμογή, προκειμένου να καταστεί εφικτός ο έλεγχος και η εποπτεία της εγκατάστασης τριπαραγωγής.

### 3.3.2.1. Βασική περιγραφή του περιβάλλοντος LabVIEW

Το LabVIEW είναι ένα περιβάλλον ανάπτυξης εφαρμογών το οποίο ακολουθεί την αντικειμενοστραφή προσέγγιση και βασίζεται στον γραφικό προγραμματισμό. Θεμελιώδης διαφορά σε σχέση με άλλα περιβάλλοντα ανάπτυξης του εμπορίου, τα οποία χρησιμοποιούν γλώσσες προγραμματισμού βασισμένες σε κείμενο (text-based language), είναι ότι χρησιμοποιεί την γραφική γλώσσα προγραμματισμού G με την οποία δημιουργούνται προγράμματα σε μορφή μπλοκ διαγραμμάτων. Τα προγράμματα αυτά ονομάζονται « Εικονικά Όργανα» ( Virtual Instruments – VI).

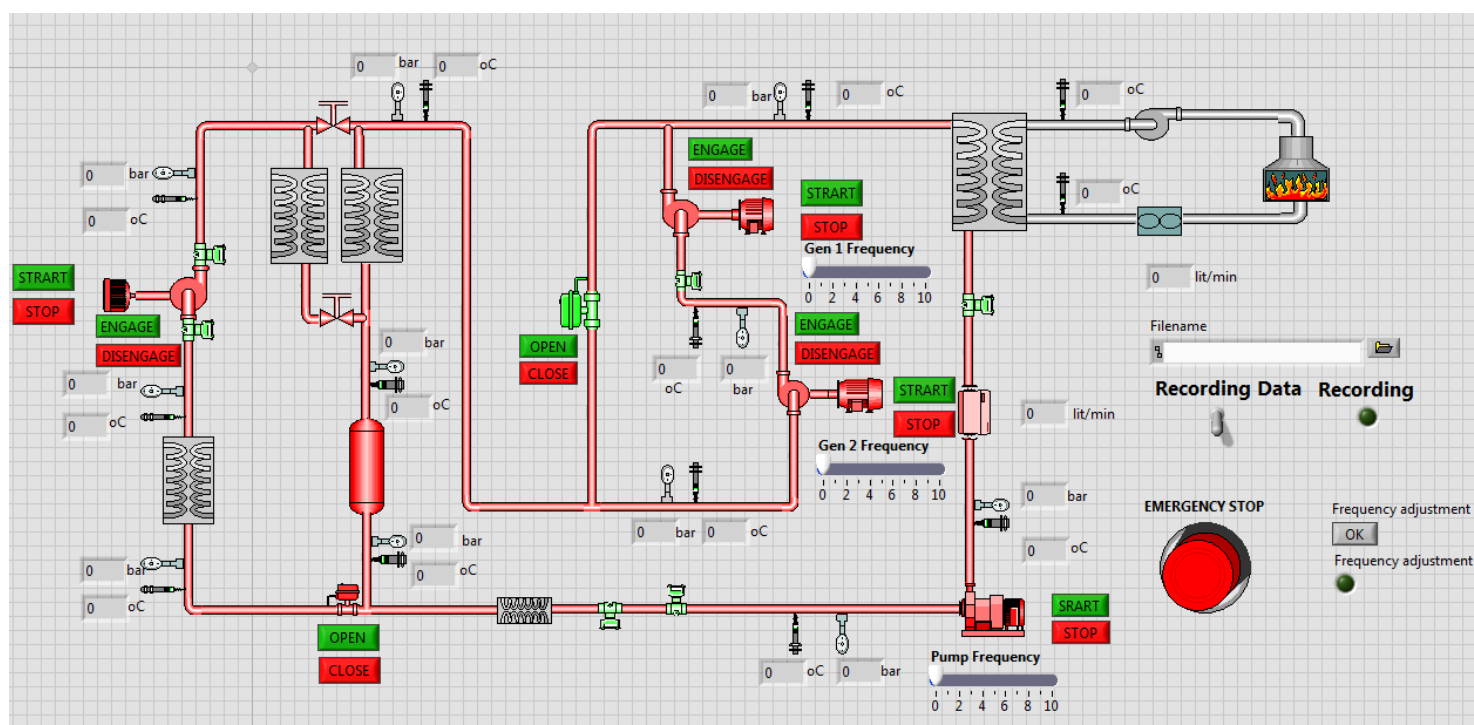
Η προσέγγιση ανάπτυξης κώδικα στο LabVIEW στηρίζεται στην ιδέα του αρθρωτού προγραμματισμού (modular programming). Η γενική ιδέα πίσω από τον αρθρωτό προγραμματισμό είναι πως διαιρούμε την κύρια εφαρμογή μας σε μια σειρά

από μικρότερες εφαρμογές, έτσι ώστε τελικά μια πολύπλοκη εφαρμογή να μετατραπεί σε μια σειρά από απλές υποεφαρμογές.

Ξεκινώντας με την κατασκευή VI's για κάθε υποεφαρμογή, ακολουθεί η ένωση όλων αυτών σε ένα κύριο μπλοκ διάγραμμα. Τελικά, έχουμε ένα VI υψηλού επιπέδου, το οποίο περιέχει μια συλλογή από VI's τα οποία αντιπροσωπεύουν τις επιμέρους λειτουργίες της εφαρμογής.

Τα προγράμματα που δημιουργούνται με την βοήθεια του LabVIEW ονομάζονται εικονικά όργανα (Virtual Instruments ή VIs), διότι η εμφάνιση και η λειτουργία τους μοιάζουν με αυτές των πραγματικών οργάνων και συστημάτων. Ένα VI αποτελείται από δυο τμήματα [21]:

- **Παράθυρο γραφικών ( Front Panel )** : πρόκειται ουσιαστικά για το γραφικό περιβάλλον αλληλεπίδρασης (GUI) με τον χρήστη. Το Front panel κατασκευάζεται από στοιχεία ελέγχου (**controls**) και στοιχεία ένδειξης (**indicators**). Τα στοιχεία ελέγχου (διακόπτες, κουμπιά, sliders κλπ) αποτελούν τις γραφικές εισόδους του VI ενώ τα στοιχεία ένδειξης (λαμπάκια, γραφήματα, αριθμητικές ενδείξεις κλπ) τις γραφικές εξόδους του.

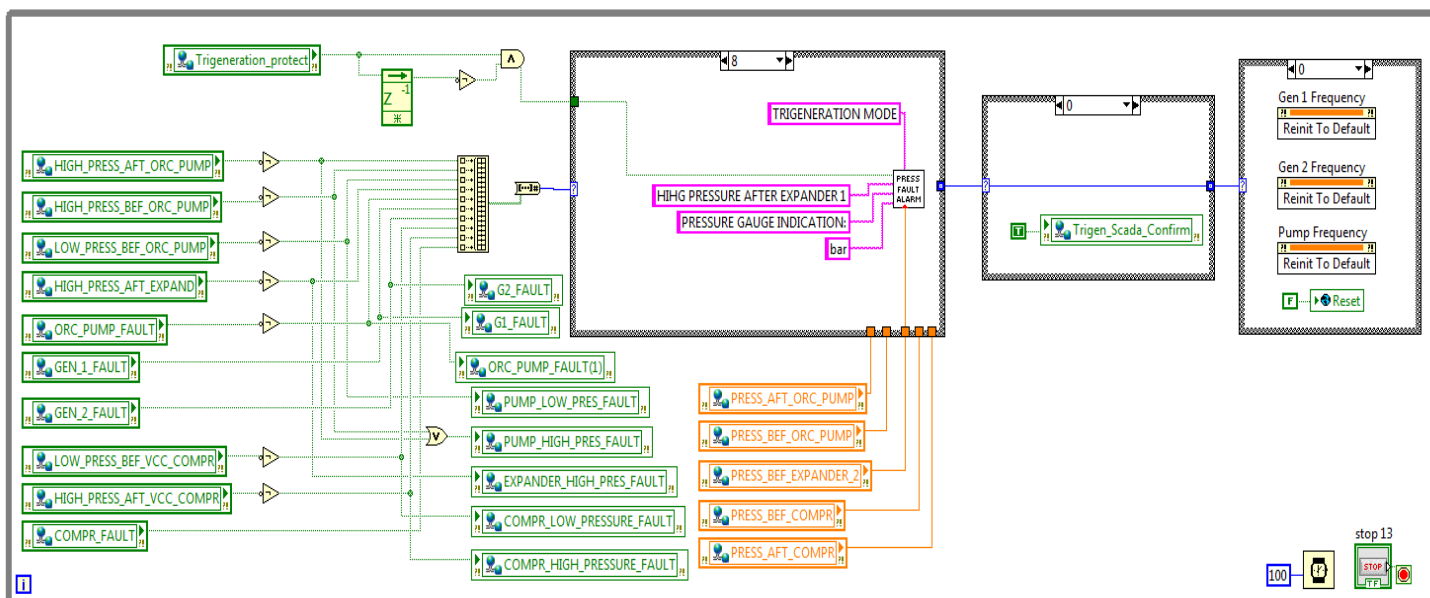


Σχήμα 3.3.2.1-1: Το Front Panel της εγκατάστασης BioTRIC.

Ο χρήστης αλληλεπιδρά με τα controls, χρησιμοποιώντας το ποντίκι ή το πληκτρολόγιο, προκειμένου να εισάγει δεδομένα ή να ορίσει καταστάσεις στο VI.

Ακολουθως παρακολουθεί μέσω των indicators τα δεδομένα που δημιουργεί ή συλλέγει το VI κατά την εκτέλεσή του. Το LabVIEW διαθέτει βιβλιοθήκες με έτοιμα γραφικά στοιχεία που παρέχουν σημαντική ευελιξία κατά το «χτίσιμο» του Front Panel ώστε να είναι ευπροσάρμοστο στην εκάστοτε εφαρμογή.

• **Μπλοκ διάγραμμα (Block Diagram) :** πρόκειται ουσιαστικά για το περιβάλλον προγραμματισμού του VI. Το μπλοκ διάγραμμα περιλαμβάνει τον γραφικό κώδικα, γνωστό ως G code, που καθορίζει την λειτουργία του συγκεκριμένου VI. Ο κώδικας αυτός χρησιμοποιεί γραφικές απεικονίσεις, υπό την μορφή μπλοκ, των συναρτήσεων και λειτουργιών που καθορίζουν την συμπεριφορά του VI.



**Σχήμα 3.3.2.1-2:** Το Block Diagram του VI για προστασία κατά την τριπαραγωγή στην μονάδα BioTRIC.

Τα στοιχεία ελέγχου και ένδειξης του Front Panel εμφανίζονται σαν εικονίδια στο μπλοκ διάγραμμα και συνδέονται διαμέσου των μπλοκ συναρτήσεων με έναν γραφικό τρόπο καλωδίωσης (wiring connection). Η ροή των δεδομένων μέσα από την λογική καλωδίωσης μπορεί να γίνει ως εξής:

- από στοιχεία ελέγχου προς συναρτήσεις ή άλλα VI
- από συναρτήσεις ή άλλα VI προς στοιχεία ένδειξης

- από VI και συναρτήσεις προς άλλα VI και άλλες συναρτήσεις

Η κίνηση των δεδομένων μεταξύ των σχηματιζόμενων, λόγω καλωδιώσεων, κόμβων εντός του μπλοκ διαγράμματος καθορίζει την σειρά εκτέλεσης των επιμέρους συναρτήσεων και VI's που αποτελούν το κύριο VI της εκάστοτε εφαρμογής. Η προγραμματιστική αυτή αντίληψη αναφέρεται ως προγραμματισμός ροής δεδομένων (data flow programming).

Η ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης εφαρμογής στο περιβάλλον του LabVIEW ακολουθεί μια ιεραρχημένη δομή. Ξεκινώντας από το ανώτερο επίπεδο, που είναι η δημιουργία ενός νέου Project, προχωρούμε σε χαμηλότερα επίπεδα με την προσθήκη επιμέρους συστατικών όπως VI's, βιβλιοθήκες και προσαρμοσμένα controls και indicators. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να οργανώσουμε την δομή του συνολικού Project έτσι ώστε οποιαδήποτε εργασία αναβάθμισης ή συντήρησης να αποτελεί μια εύκολη, γρήγορη και άμεσα κατανοητή διαδικασία.

Το πρόγραμμα εποπτικού ελέγχου της εγκατάστασης μέσω του LabVIEW δίνεται αναλυτικά στην βιβλιογραφία [22], ενώ στο Παράρτημα Α δίνονται οι αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν στον κώδικα προγραμματισμού του LabVIEW.

Κλείνοντας, λοιπόν, σκοπός του αυτόματου και εποπτικού ελέγχου είναι η παρακολούθηση της μονάδας σε λειτουργία μεταβαλλόμενων φορτίων με σκοπό την κάλυψη των αναγκών την επίτευξη ευσταθούς λειτουργίας της μονάδας με άμεση ανταπόκριση σε μεταβαλλόμενες συνθήκες.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

# Ο ΑΥΤΟΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΤΙΣ ΑΝΤΑΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

### 4.1 Γενικά

Τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί μεγάλη έμφαση στην ανάπτυξη συστημάτων ελέγχου των εγκαταστάσεων Θέρμανσης, Εξαερισμού και Ψύξης ενός χώρου (Heat-Ventilation-Airconditioning Systems, HVAC Systems) τόσο σε ερευνητικό επίπεδο όσο και σε πρακτικό για εμπορική εφαρμογή αυτών. Στόχος του ελέγχου HVAC συστημάτων είναι αφενός η επίτευξη άνετων συνθηκών θερμοκρασίας και υγρασίας σε έναν χώρο με την ελάχιστη παρέμβαση των χρηστών του χώρου, κοινώς η αυτοματοποίηση λειτουργίας των συστημάτων αυτών, αλλά και η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας, η μείωση των δαπανών και των εκπομπών CO<sub>2</sub>, μέσα από την αποδοτική λειτουργία τους.

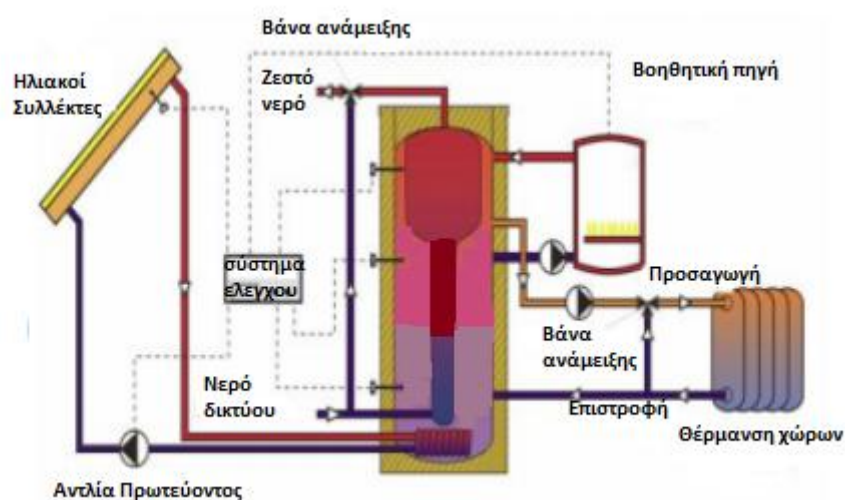
#### Ιστορική αναδρομή

Όπως είναι φυσικό, οι πρώτοι ελεγκτές HVAC συστημάτων ήταν πνευματικοί. Τα πνευματικά συστήματα είναι μηχανισμοί που χρησιμοποιούν ως ενεργειακό μέσο τον πεπιεσμένο αέρα και έχουν τελικό αποτέλεσμα μηχανική κίνηση, όπως παραδείγματος χάριν την παλινδρομική κίνηση ενός εμβόλου ή την περιστροφή ενός άξονα. Η χρήση πνευματικών διακοπών στον αυτόματο έλεγχο είναι οικονομική και εύκολη, καθώς ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι διαθέσιμος οπουδήποτε και σε ανεξάντλητες ποσότητες, ενώ επίσης δεν παρουσιάζει επικινδυνότητα έκρηξης ή πυρκαγιάς και σε περίπτωση διαφυγής από τις σωληνώσεις δεν μολύνει το περιβάλλον. Έχουν, ωστόσο, το μειονέκτημα ότι το σήμα τους μεταδίδεται βραδύτερα από ότι το ηλεκτρικό σήμα. Τα ηλεκτρικά συστήματα αυτοματισμού χρησιμοποιούν ηλεκτρικά σήματα που προκαλούν μετατοπίσεις και κινήσεις. Οι δυνατότητες τους σε δυνάμεις, ιδίως στατικές δυνάμεις, υπόκεινται σε πολλούς περιορισμούς γιατί θέλουν ειδικές προφυλάξεις κατά υπερφορτίσεων. Μπορούν όμως να κινούν, με πολύ μεγάλη αξιοπιστία και πολύ μεγαλύτερη από τους πνευματικούς αυτοματισμούς ταχύτητα, περίπλοκα συστήματα σε πολύ μεγάλες αποστάσεις. Τα ηλεκτρονικά συστήματα αυτοματισμού χρησιμοποιούν και αυτά το

ηλεκτρικό ρεύμα σαν φορέα σημάτων, αλλά σε εντάσεις πολύ χαμηλότερες από τα ηλεκτρικά, με συνέπεια να συνδυάζουν την ταχύτητα με πολύ μικρό όγκο. Από πλευράς κόστους υπερέχουν απόλυτα των άλλων συστημάτων, όταν χρειάζονται περίπλοκοι αυτοματισμοί, ιδίως προγραμματιζόμενα συστήματα με μνήμη. Είναι τα μόνα πρακτικά εφαρμόσιμα συστήματα στους έξυπνους αυτοματισμούς. Δεν έχουν όμως τη δυνατότητα να μεταφέρουν δυνάμεις και οι ικανότητές τους να μεταφέρουν ηλεκτρική ισχύ είναι πολύ περιορισμένες. Γι' αυτό στη βιομηχανία τα συναντάμε περισσότερο σαν κέντρα μεγαλύτερων μικτών αυτοματισμών [34].

Καθώς, λοιπόν, ο έλεγχος της παροχής αέρα και της θερμοκρασίας τυποποιήθηκε, η χρήση ηλεκτρομηχανολογικών ρελέ καθιερώθηκε. αλλά εν τέλει τα ρελέ αντικαταστάθηκαν από ηλεκτρονικούς διακόπτες, καθώς τα τρανζίστορ έχουν ακόμα πιο γρήγορη απόκριση. Μέχρι το 1985, οι πνευματικοί ελεγκτές δεν μπορούσαν να ανταγωνιστούν τις νέες τεχνολογίες ελέγχου, παρ'όλο που οι πνευματικοί ελεγκτές χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα σε παλαιές κτιριακές εγκαταστάσεις [32]. Μέχρι το 2000 η χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή για την πραγματοποίηση ελέγχου έγινε ευρέως διαδεδομένη, ενώ πλέον είναι δυνατός ο απομακρισμένος έλεγχος ενός συστήματος HVAC μέσω πρόσβασης σε ορισμένους ελεγκτές με την χρήση κάποιου προγράμματος περιήγησης.

Γενικά, η αρχή λειτουργίας των θερμοστατών χώρου στηρίζεται στην ανίχνευση της θερμοκρασίας μέσω μιας κατάλληλης διάταξης. Η συγκεκριμένη διάταξη δίνει την πληροφορία της επικρατούσας θερμοκρασίας στον χώρο και ανάλογα ο θερμοστάτης ελέγχει μέσω κατάλληλης επαφής τον επιθυμητό μηχανισμό για ρύθμιση της θερμοκρασίας (π.χ. ηλεκτροβάννα, κυκλοφορητή, καυστήρα κ.τ.λ.).



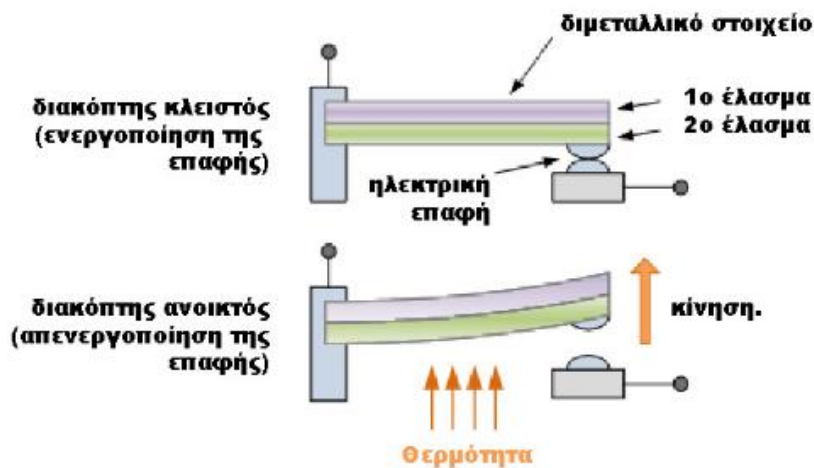
**Σχήμα 4.1-1:** Σύστημα ελέγχου εγκατάστασης οικιακής θέρμανσης.

Οι θερμοστάτες χώρου διακρίνονται σε:

- ψύξης ή/και θέρμανσης
- αναλογικούς και ψηφιακούς (με αναλογικό ή ηλεκτρονικό θερμοστοιχείο)
- με εντολή ζεστού νερού χρήσης,
- με ηλεκτρονικό έλεγχο, δηλαδή με Αναλογικό-Ολοκληρωτικό-Διαφορικό Ελεγκτή (Proportional-Integral-Derivative Controller, PID Controller) ΚΟΚ.

Ένας ηλεκτρομηχανικός θερμοστάτης απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1-2.

Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος υλοποίησης ελέγχου είναι η μέθοδος ON/OFF, κατά την οποία όταν η θερμοκρασία χώρου φτάσει κι ξεπεράσει την επιθυμητή θερμοκρασία αναφοράς (setpoint) διακόπτεται ο ελεγχόμενος μηχανισμός, ενώ αντιστρόφως όταν πέσει κάτω από αυτήν ενεργοποιείται πάλι η λειτουργία αυτού.



**Σχήμα 4.1-2:** Απλός ηλεκτρομηχανικός θερμοστάτης

Όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο ψυκτικός κύκλος της μονάδας που εξετάζουμε δεν αποτελεί σύστημα κλειστού βρόχου, ενώ η λειτουργία του ελέγχεται από τον χρήστη χειροκίνητα, καθώς η μονάδα βρίσκεται σε πειραματικό στάδιο και εμφανίζει μειονεκτήματα κατά την λειτουργία της. Η μόνη μη ανθρώπινη παρέμβαση που εφαρμόζεται στην παρούσα διάταξη είναι η προστασία του κύκλου από τον Προγραμματιζόμενο Λογικό Ελεγκτή (PLC), ο οποίος όταν δεχτεί σαν είσοδο το σήμα καποιού από τους αισθητήρες υποπίεσης ή υπερπίεσης πριν και μετά τον

συμπιεστή αντίστοιχα, διακόπτει την λειτουργία αυτού και άρα του ψυκτικού κύκλου. Επομένως, δεν υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου για την σταθεροποίηση της λειτουργίας του κύκλου σε μία θερμοκρασία αναφοράς, αλλά και η λειτουργία ON/OFF της αντλίας θερμότητας γίνεται χειροκίνητα από τον χρήστη μέσω των αντίστοιχων διακοπών.

Ένας εναλλακτικός τρόπος ρύθμισης του ψυκτικού κύκλου είναι η χρήση ενός inverter για την λειτουργία του συμπιεστή του κύκλου. Ο inverter ελέγχει την ταχύτητα του συμπιεστή προκειμένου αυτός να οδηγεί το μεταβλητής ροής ψυκτικό μέσο σε έναν ψυκτικό κύκλο, ελέγχοντας με αυτόν τον τρόπο την θερμοκρασία εξόδου. Σκοπός είναι ο έλεγχος των στροφών του συμπιεστή μέσω του inverter, ώστε αυτός να λειτουργεί και σε ενδιάμεσα στάδια και όχι μόνο σε κατάσταση ON ή OFF.

Στην περίπτωση εφαρμογής συστήματος αυτομάτου ελέγχου, ανάλογα , , με την θερμοκρασία δωματίου ένας μικροελεγκτής ρυθμίζει τις στροφές του συμπιεστή κατάλληλα, ώστε η θερμοκρασία να κλίνει όσο το δυνατόν προς το επιθυμητό setpoint. Στις αντλίες θερμότητας την θερμοκρασία αναφοράς αποτελεί η θερμοκρασία μετά τον ατμοποιητή σε κατάσταση ψύξης και η οποία πρέπει να διατηρείται συνήθως γύρω στους 6°C.



**Σχήμα 4.1-3:** Έλεγχος συστήματος ψύξης.

## 4.2 Μέθοδοι ελέγχου σε HVAC συστήματα

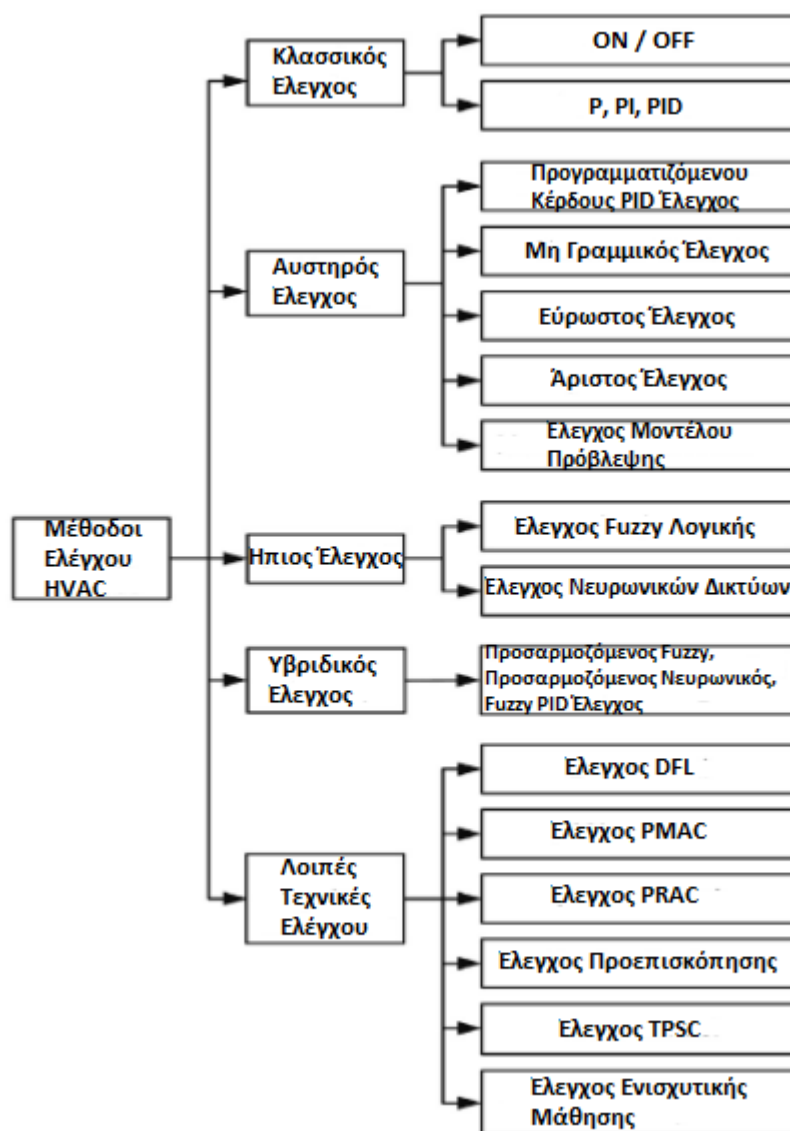
Μολονότι, τα HVAC συστήματα ελέγχου παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες με άλλα συστήματα ως προς την διαδικασία ελέγχου, ξεχωρίζουν ως προς κάποια χαρακτηριστικά τους. Τέτοιου είδους χαρακτηριστικά παρατίθενται ακολούθως:

- Μη γραμμική δυναμική συστήματος, μεταβλητή στον χρόνο.
- Μεταβλητές στον χρόνο διαταραχές.
- Ελλιπή δεδομένα εξαιτίας της κακής ανάλυσης των μετατροπών από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα, του χρόνου δειγματοληψίας, την ακρίβεια των αισθητήρων και την έλλειψη πρόσβασης σε δίκτυα πρόβλεψης καιρού και περιβαλλοντικών πληροφοριών.
- Αλληλεπίδραση και σύγκρουση βρόχων ελέγχου.
- Έλλειψη εποπτικού ελέγχου.

Πολλές μέθοδοι ελέγχου έχουν αναπτυχθεί ή προταθεί για συστήματα HVAC. Ωστόσο, εξ αιτίας της απλότητάς τους, οι ON/OFF και PID έλεγχοι συνεχίζουν να βρίσκουν εφαρμογή στα συστήματα HVAC, ενώ με την δεδομένη πρόοδο στην αποθήκευση δεδομένων και στην χρήση υπολογιστών και συσκευών τηλεπικοινωνίας είναι εφικτή η υλοποίηση ενός ορθού ελέγχου για την υπερπήδηση των προβλημάτων που παρουσιάζουν τα HVAC συστήματα.

Στην διεθνή βιβλιογραφία και σε ερευνητικό επίπεδο υπάρχουν διάφορες μέθοδοι ελέγχου σε συστήματα HVAC, κάποιο από τους οποίους δίνονται διαγραμματικά ακολούθως.

Μια κατηγοριοποίηση των μεθόδων ελέγχου στα συστήματα HVAC απεικονίζεται στο Διάγραμμα 1. Οι επιμέρους μέθοδοι ελέγχου διαχωρίζονται στον κλασσικό έλεγχο (Classical Control), στον «αυστηρό» έλεγχο (Hard Control), στον «ήπιο» έλεγχο (Soft Control), στον υβριδικό έλεγχο (Hybrid Control) και τέλος σε άλλες τεχνικές μεθόδους ελέγχου [23].



**Σχήμα 4.2-1:** Κατηγοριοποίηση μεθόδων ελέγχου HVAC συστημάτων [23].

Οι κλασσικοί ελεγκτές (**Classical controllers**) αποτελούνται από τις πιο κοινώς χρησιμοποιούμενες τεχνικές μεθόδους ελέγχου, όπως παραδείγματος χάριν τον ON/OFF έλεγχο και τους Αναλογικός (Proportional, P), Αναλογικό-Ολοκληρωτικό (Proportional-Integral, PI), και Αναλογικό-Ολοκληρωτικό- Διαφορικό (Proportional-Integral-Derivative, PID) ελέγχους. Ο ελεγκτής ON/OFF χρησιμοποιεί το ανώτερο και κατώτερο όριο για να ρυθμίζει την διαδικασία εντός αυτών. Οι P, PI και PID ελεγκτές χρησιμοποιούν τον υπολογισμό του σφάλματος και μεταβάλλουν τις μεταβλητές ελέγχου για να επιτευχθεί ο ακριβής έλεγχος της διαδικασίας.

Μολονότι ο ON/OFF ελεγκτής είναι πιο εύκολα κατανοητός από άποψη λειτουργίας και ευκολότερος να εφαρμοστεί, είναι αδύνατον ωστόσο να ελέγξει διαδικασίες οι οποίες παρουσιάζουν μεγάλες καθυστερήσεις προσαρμογής σε

μεταβολές των παραμέτρων λειτουργίας τους. Εξαιτίας της υψηλής θερμικής αδράνειας, λοιπόν, πολλών HVAC διαδικασιών, οι οποίες οφείλονται στην αποθήκευση θερμότητας στα στοιχεία του εξοπλισμού της εγκατάστασης, όπως στο μέταλλο των εναλλακτών ή των σωληνώσεων, ή σε στοιχίαμε αδράνεια, όπως τα τροφοδοτικά δοχεία, μια διαδικασία η οποία χρησιμοποιεί έναν ON/OFF ελεγκτή παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις από τα επιθυμητά όρια. Ο PID ελεγκτής παρουσιάζει υποσχόμενα αποτελέσματα, αλλά η ρύθμιση των παραμέτρων ελέγχου είναι μια επίπονη διαδικασία και η απόδοση του ελεγκτή μειώνεται αν οι συνθήκες λειτουργίας διαφέρουν από τις συνθήκες ρύθμισης.

Οι «αυστηροί» ελεγκτές (**Hard controllers**) βασίζονται σε μια θεωρία ελέγχου συστημάτων αποτελούμενη από έλεγχο «προγραμματισμού κέρδους» (gain scheduling), «μη γραμμικό» έλεγχο, ισχυρό έλεγχο, άριστο έλεγχο και από την μέθοδο Μοντέλου Πρόβλεψης (Model Predictive Control, MPC). Στον έλεγχο προγραμματιζόμενου κέρδους (gain scheduling), το μη γραμμικό σύστημα διαιρείται σε μικρότερες γραμμικές περιοχές, όπου για την καθεμία σχεδιάζεται ένας γραμμικός PI ή PID ελεγκτής με διαφορετικά κέρδη (αναλογικό κέρδος, κέρδος ολοκλήρωσης, διαφορικό έλεγχος).

Οι τεχνικές «ηπίου» ελέγχου (**Soft control techniques**) όπως αυτές που βασίζονται στην Fuzzy λογική και στα νευρωνικά δίκτυα είναι συγκριτικά νέες τεχνικές και αποτελούν πρόδρομο των ψηφιακών ελεγκτών.

Σε έναν ελεγκτή fuzzy λογικής οι ενέργειες ελέγχου υλοποιούνται με την μορφή if-then-else εντολών. Η fuzzy λογική μπορεί να ενσωματωθεί στην αυτόματη ρύθμιση (auto-tuning) των κερδών ενός PID ελεγκτή, ο οποίος εκτελεί τοπικό έλεγχο, ενώ η fuzzy λογική βελτιστοποιεί την απόκριση του συστήματος σε ευρύτερη του συστήματος κλίμακα.

Τα νευρωνικά δίκτυα εκπαιδεύονται στα δεδομένα απόδοσης του συστήματος και προσαρμόζουν ένα μη-γραμμικό μαθηματικό μοντέλο βάσει αυτών. Ο χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος δεν απαιτεί την κατανόηση της φυσικής του συστήματος. Τα νευρωνικά δίκτυα εφαρμόζονται συνήθως σε feed-forward έλεγχο και μπορούν να εκπαιδευτούν στις εισόδους και εξόδους του ελεγκτή σε μια προσπάθεια να αντικαταστήσουν έναν παραδοσιακό ελεγκτή σε αυτή την εφαρμογή.

Υβριδικοί ελεγκτές (**Hybrid controllers**) παράγονται από τον συνδυασμό «ισχυρών» και «ήπιων» τεχνικών ελέγχου. Διάφοροι ελεγκτές, συμπεριλαμβανομένου των quasi-adaptive fuzzy control, adaptive-neuro control και fuzzy-PID control έχουν προταθεί για τον έλεγχο των HVAC συστημάτων .

### 4.3 Αναλογικός-Ολοκληρωτικός-Διαφορικός Έλεγχος (Proportional-Integral-Derivative Control, PID)

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ένας από τους πιο διαδεδομένους τρόπους ελέγχου συστημάτων HVAC είναι ο Αναλογικός-Ολοκληρωτικός-Διαφορικός Έλεγχος με την χρήση PID ελεγκτών, οι οποίοι παρουσιάζουν υποσχόμενα αποτελέσματα στο πεδίο του ελέγχου ψύξης και θέρμανσης. Εδώ λίγο παραπάνω χρειάζεται να εξηγήσεις γιατί εστιάζουμε στον PID ελεγκτή.

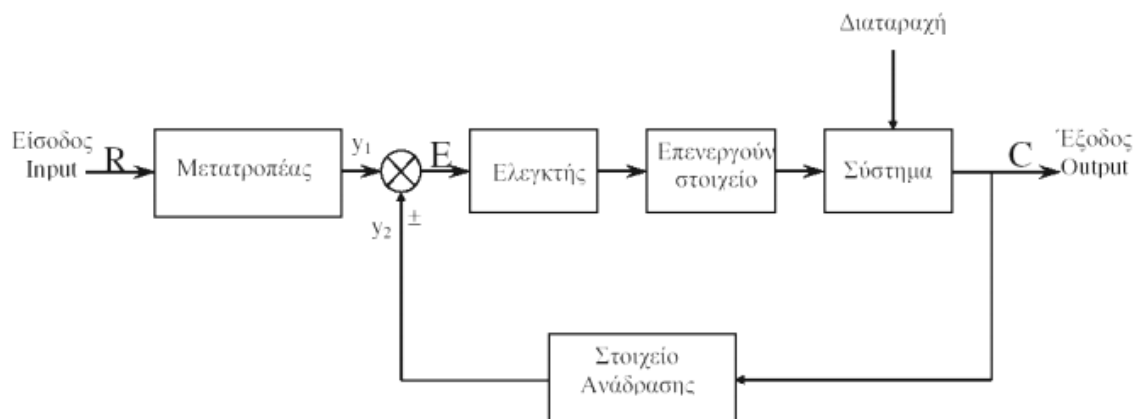
Ένας αναλογικός-ολοκληρωτικός-διαφορικός ελεγκτής (proportional–integral–derivative, PID controller) είναι ένας μηχανισμός ελέγχου με βρόγχο ανατροφοδότησης που χρησιμοποιείται στα συστήματα βιομηχανικού ελέγχου. Σκοπός του PID ελέγχου είναι να διατηρεί ορισμένες λειτουργίες κοντά σε κάποιο σημείο αναφοράς (setpoint), μέσω ενεργειών ελέγχου αναλογικών (P), ολοκληρωτικών (I) και παραγωγικής (D).

Μερικές εφαρμογές ενδεχομένως να απαιτούν την χρήση μόνο ενός ή δυο όρων για να παρέχουν το κατάλληλο σύστημα ελέγχου. Αυτό επιτυγχάνεται μηδενίζοντας όλες τις άλλες παράμετρους. Ένας PID ελεγκτής αποκαλείται PI, PD, P ή I ελεγκτής σε περίπτωση απουσίας των αντίστοιχων ενεργειών ελέγχου. Οι PI ελεγκτές είναι αρκετά συνηθισμένοι πλέον στην βιομηχανία, δεδομένου ότι η δράση παραγωγικής είναι ευαίσθητη στο θόρυβο, λαμβάνοντας υπόψη ότι η απουσία ενός ολοκληρωτικού όρου μπορεί να αποτρέψει στο σύστημα να λάβει την επιθυμητή τιμή.

Σε σύστημα κλειστού βρόχου το  $e$  αποτελεί το σφάλμα παρακολούθησης:  $e=R-Y$ , όπου  $R$  είναι το επιθυμητό σημείο αναφοράς και  $Y$  η ανατροφοδοτούμενη έξοδος της μονάδας, την οποία και θέλουμε να ελέγξουμε. Ο PID ελεγκτής στην συνέχεια παράγει την έξοδο  $u = Kp * e + Ki * \int e dt + Kd * \frac{de}{dt}$ , η οποία θα σταλεί για έλεγχο στην μονάδα. Η νέα έξοδος  $Y$  θα ανατροφοδοτηθεί εκ νέου για τον υπολογισμό του νέου σφάλματος και η διαδικασία επαναλαμβάνεται με σκοπό τον μηδενισμό του  $e$ .

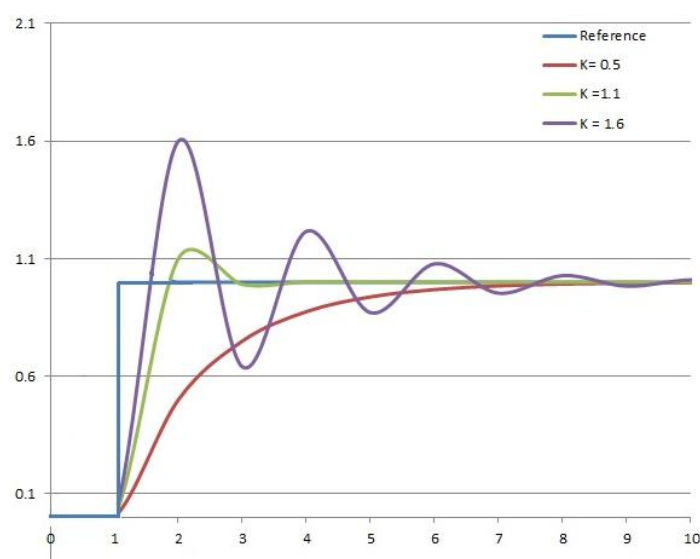
Η αντίδραση της εξόδου  $Y$  σε σχέση με την συνάρτηση ελέγχου εξαρτάται από τις διεργασίες της μονάδας. Διακρίνονται δύο απλοποιημένοι τρόποι αντίδρασης, οι οποίοι θα καθορίσουν και τον τρόπο λειτουργίας του ελέγχου:

- Direct manner: Όταν υπάρχει αύξηση του  $u$  η οποία οδηγεί σε αύξηση  $Y$ , τότε θα έχουμε reverse action στον έλεγχο, δηλαδή σε τυχόν αύξηση του  $Y$  θα πρέπει να γίνει μείωση  $u$ .
- Inverse Manner: Όταν υπάρχει αύξηση του  $u$  η οποία οδηγεί σε μείωση του  $Y$ , τότε θα έχουμε direct action στον έλεγχο, δηλαδή σε τυχόν αύξηση του  $Y$  θα πρέπει να γίνει αύξηση  $u$ .



**Σχήμα 4.3-1:** Σύστημα έλεγχου κλειστού βρόχου.

### Αναλογικός Όρος

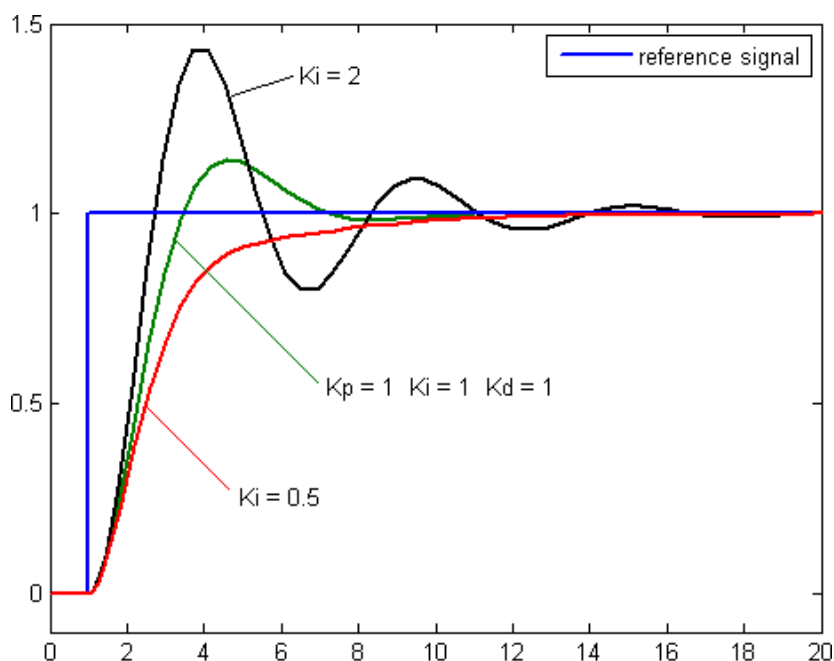


**Διάγραμμα 4.3-1:** Διάγραμμα μεταβολής του PV στον χρόνο για τρεις τιμές του αναλογικού κέρδους  $K_p$  ( $K_i$  και  $K_d$  παραμένουν σταθερά) [24].

Ο αναλογικός όρος παράγει μια τιμή εξόδου η οποία να είναι ανάλογη της τρέχουσας τιμής σφάλματος. Η αναλογική απόκριση μπορεί να προσαρμοστεί πολλαπλασιάζοντας το σφάλμα με μια σταθερά  $K_p$ , η οποία αποκαλείται σταθερά αναλογικού κέρδους. Λαμβάνεται από την σχέση  $P_{out} = K_p * \int e dt$ .

Ένα υψηλό αναλογικό κέρδος έχει ως αποτέλεσμα μια μεγάλη αλλαγής της εξόδου για μια δεδομένη αλλαγή του σφάλματος. Στην περίπτωση που το αναλογικό κέρδος είναι ιδιαιτέρως υψηλό, το σύστημα μπορεί να παρουσιάσει μεγάλη αστάθεια. Εν αντιθέτως, η περίπτωση μικρού κέρδους έχει ως αποτέλεσμα μια μικρή απόκριση εξόδου σε ένα μεγάλο σφάλμα εισόδου και έναν λιγότερο ευαίσθητο ελεγκτή. Εάν το αναλογικό κέρδος είναι πολύ χαμηλό, η ενέργεια ελέγχου μπορεί να είναι πολύ μικρή όταν ανταποκρίνεται σε διαταραχές του συστήματος. Στην πράξη έχει διαπιστωθεί ότι το αναλογικό κέρδος επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό την μεταβολή της εξόδου σε σύγκριση με το ολοκληρωτικό και το διαφορικό κέρδος. Ο αναλογικός ελεγκτής ( $K_p$ ), λοιπόν, έχει σαν αποτέλεσμα την ελάττωση του χρόνου ανύψωσης και την μείωση του σφάλματος, αλλά όχι την εξάλειψή του και ασχολείται με της παροντικές τιμές του σφάλματος.

### Όρος ολοκλήρωσης

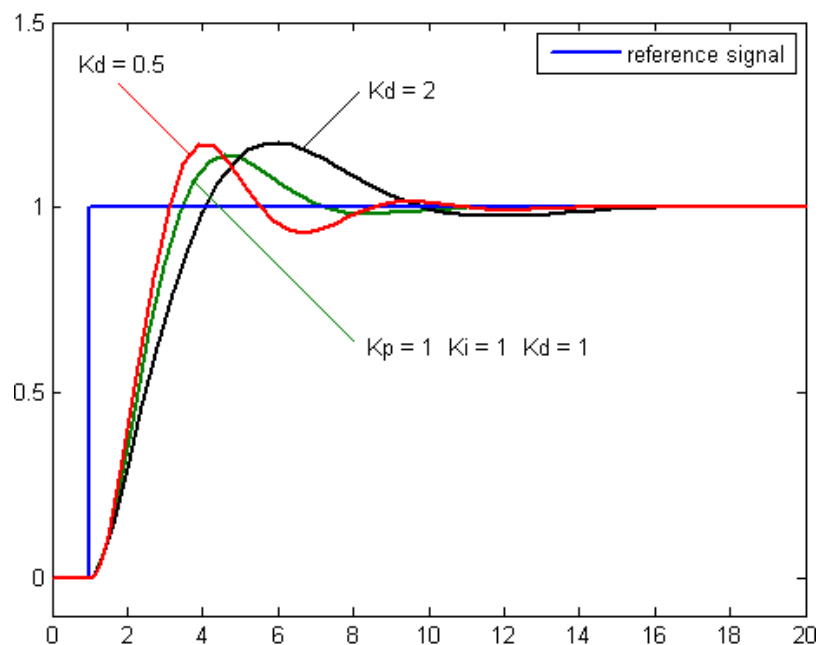


**Διάγραμμα 4.3-2:** Διάγραμμα μεταβολής του PV στον χρόνο για τρεις τιμές του αναλογικού κέρδους  $K_i$  ( $K_p$  και  $K_d$  παραμένουν σταθερά) [24].

Η συνεισφορά του όρου ολοκλήρωσης είναι ανάλογη τόσο του μεγέθους του σφάλματος όσο και της διάρκειας αυτού. Η ολοκλήρωση σε έναν PID ελεγκτή είναι το άθροισμα των στιγμιαίων σφαλμάτων στην διάρκεια του χρόνου και δίνει τις συσσωρευμένες αντισταθμίσεις που έπρεπε να είχαν εφαρμοστεί πρωτότερα. Τα συσσωρευμένα σφάλματα ακολούθως πολλαπλασιάζονται με το ολοκληρωτικό κέρδος ( $K_i$ ) και προστίθενται στην έξοδο του ελεγκτή. Ο όρος ολοκλήρωσης δίνεται από τον τύπο  $P_{out} = K_i * \int e dt$ .

Ο όρος ολοκλήρωσης ωθεί την μονάδα ταχύτερα προς το σημείο αναφοράς (setpoint) και εξαλείφει το σφάλμα σταθερής κατάστασης που σημειώνεται σε έναν καθαρά αναλογικό ελεγκτή. Ωστόσο, επειδή ο όρος ολοκλήρωσης ανταποκρίνεται σε συσσωρευμένα παρελθοντικά σφάλματα μπορεί να προκαλέσει την μεγαλύτερη απόκλιση της παρούσας τιμής από το σημείο αναφοράς, επιδεινώνοντας την μεταβατική απόκριση (ο αριθμός ταλαντώσεων μέχρι την τελική ισορροπία του συστήματος).

### Όρος παραγωγίσιμης



**Διάγραμμα 4.3-3:** Διάγραμμα μεταβολής του PV στον χρόνο για τρεις τιμές του αναλογικού κέρδους  $K_d$  ( $K_p$  και  $K_i$  παραμένουν σταθερά) [24].

Η παράγωγος του σφάλματος της διαδικασίας υπολογίζεται καθορίζοντας την κλίση του σφάλματος στον χρόνο και πολλαπλασιάζοντας αυτόν τον ρυθμό μεταβολής με το διαφορικό κέρδος  $K_d$ . Το πλάτος συνεισφοράς του διαφορικού όρου στην συνολική ενέργεια ελέγχου αποτελεί το διαφορικό κέρδος  $K_d$ . Ο όρος παραγωγίσης δίνεται από την σχέση  $P_{out} = K_d * \frac{de}{dt}$ .

Η ενέργεια παραγωγίσης προβλέπει την συμπεριφορά του συστήματος και με τον τρόπο αυτό βελτιώνει τον χρόνο αποκατάστασης στο σημείο ισορροπίας και την ευστάθεια του συστήματος. Ιδανικά η ενέργεια παραγωγίσης δεν είναι τυχαία, έτσι ώστε η υλοποίηση των PID ελεγκτών να περιλαμβάνει ένα επιπρόσθετο φίλτρο ώστε ο όρος παραγωγίσης να ελαττώνει το κέρδος υψηλών συχνοτήτων και τον θόρυβο. Ο διαφορικός έλεγχος ( $K_d$ ), λοιπόν, έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της σταθερότητας του συστήματος, μειώνοντας την υπερύψωση και βελτιώνοντας την μεταβατική απόκριση. Ασχολείται με τι μελλοντικές τιμές του σφάλματος βάση του ρυθμού μεταβολής του σφάλματος. Παρόλα αυτά η ενέργεια παραγωγίσης χρησιμοποιείται σπάνια στην πράξη (μόλις το 25% των αναπτυχθέντων ελεγκτών) εξ αιτίας των μεταβλητών επιπτώσεων στην ευστάθεια του συστήματος σε πραγματικές εφαρμογές.

Σε έναν PID ελεγκτή τα κέρδη  $K_p$ ,  $K_i$  και  $K_d$  εξαρτώνται μεταξύ τους. Η αλλαγή μίας εξ αυτών των μεταβλητών μπορεί να μεταβάλλει και τις άλλες δύο. Γενικά, ο προσδιορισμός των κερδών σε έναν PID ελεγκτή εξαρτάται από τις διεργασίες που γίνονται στην προς έλεγχο μονάδα και δεν είναι εύκολο να επιτευχθεί.

Το κούρδισμα (tuning) ενός βρόχου ελέγχου είναι η προσαρμογή των παραμέτρων του  $K_p$ ,  $K_i$  και  $K_d$  στις βέλτιστες τιμές για την επίτευξη του επιθυμητού ελέγχου. Βασικός στόχος είναι η ευστάθεια σε συστήματα με διαφορετική συμπεριφορά το καθένα, τα οποία αλληλεπιδρούν και των οποίων οι απαιτήσεις μπορεί να συγκρούονται μεταξύ τους.

Υπάρχουν ποικίλες μέθοδοι για την ρύθμιση των παραμέτρων του PID ελεγκτή, ένα πρόβλημα αρκετά δύσκολο, καθώς πρέπει να ικανοποιούνται πολύπλοκα κριτήρια σε συνδυασμό με τους περιορισμούς του PID ελέγχου.

Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι ρύθμισης έναν PID βρόχο. Τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους συνοψίζονται στον Πίνακα 4.3-1. Οι πιο αποτελεσματικές γενικά μέθοδοι περιλαμβάνουν την ανάπτυξη ορισμένων μορφών μοντέλων της διαδικασίας, και εν συνεχεία την επιλογή των P, I και D βασισμένα σε

παραμέτρους δυναμικών μοντέλων. Οι μέθοδοι χειροκίνητης ρύθμισης μπορεί να είναι σχετικά χρονοβόρες, ιδιαίτερα για συστήματα με μεγάλο χρόνο βρόχου.

<b>Μέθοδοι Ρύθμισης Παραμέτρων</b>		
<b>Μέθοδοι</b>	<b>Πλεονεκτήματα</b>	<b>Μειονεκτήματα</b>
<b>Χειροκίνητη Ρύθμιση</b>	Δεν απαιτούνται μαθηματικές σχέσεις για να πραγματοποιηθεί, Εντός σύνδεσης ρύθμιση	Απαιτείται Εξειδικευμένο Προσωπικό
<b>Ziegler–Nichols</b>	Αποδεδειγμένη Μέθοδος Ρύθμισης από τους Ziegler–Nichols, Εντός σύνδεσης ρύθμιση	Διαταραχές στην διεργασία, Απαιτούνται δοκιμές για εύρεσης και διόρθωση σφαλμάτων, Πολύ ακραία ρύθμιση
<b>Tyresus Luyben</b>	Αποδεδειγμένη Μέθοδος Ρύθμισης από τους Tyreus Luyben, Εντός σύνδεσης ρύθμιση	Διαταραχές στην διεργασία, Απαιτούνται δοκιμές για εύρεσης και διόρθωση σφαλμάτων, Πολύ ακραία ρύθμιση
<b>Εργαλεία Λογισμικού</b>	Συνεπής ρύθμιση, online ή offline – μπορεί να γίνει με την χρήση υπολογιστή αυτοματοποιημένου σε τεχνικές σχεδιασμού συστημάτων ελέγχου, Επιτρέπει την προσομοίωση της διεργασίας	Υψηλό κόστος, Απαιτείται εκπαίδευση προσωπικού
<b>Cohen–Coon</b>	Απαιτείται προσδιορισμό ενός καλού μοντέλου της διεργασίας	Αποδειχθεί μαθηματικές Σχέσεις, Εκτός σύνδεσης ρύθμιση, Κατάλληλες για πρώτης τάξης διεργασίες
<b>Åström–Hägglund</b>	Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αυτορρύθμιση, Το εύρος είναι το ελάχιστο ώστε η διεργασία να έχει τις λιγότερες δυνατές διαταραχές	Η διαδικασία από μόνη της παρουσιάζει εγγενώς ταλαντώσεις

*Πίνακας 4.3-1: Μέθοδοι ρύθμισης PID ελεγκτών [24].*

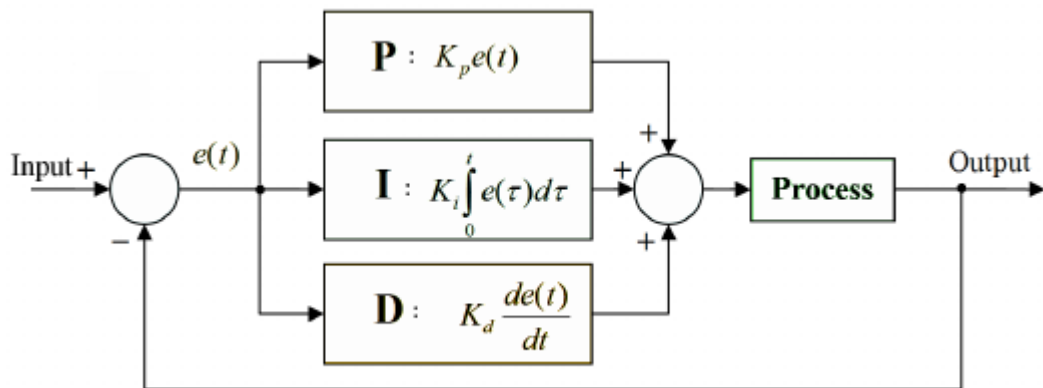
Ο σχεδιασμός και η ρύθμιση ενός PID ελεγκτή αποτελεί μια διαδικασία δύσκολη στην πράξη, καθώς η γρήγορη μεταβατική απόκριση (μικρές ταλαντώσεις γύρω από το σημείο ισορροπίας) αλλά και η ευστάθεια, είναι οι στόχοι. Ένας ελεγκτής μπορεί να λειτουργήσει με καλή απόδοση με προεπιλεγμένες ρυθμίσεις, αν και η απόδοση του μπορεί να αυξηθεί μέσω μιας πιο προσεκτικής ρύθμισης (tuning). Για αυτό προτιμάται ο αρχικός σχεδιασμός να προσαρμόζεται συνεχώς μέσω προσομοιώσεων μέχρι το σύστημα κλειστού βρόχου ελέγχου να αποκτήσει την επιθυμητή απόδοση.

Κάποιες διαδικασίες παρουσιάζουν σε μεγάλο βαθμό μη γραμμικότητα με αποτέλεσμα παράμετροι που δίνουν καλή απόδοση σε πλήρες φορτίο να μην αποδίδουν σε συνθήκες μηδενικού φορτίου. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος προτιμάται ο έλεγχος προγραμματιζόμενου κέρδους ( gain scheduling control), δηλαδή η χρήση διαφορετικών παραμέτρων/κερδών σε διαφορετικές περιοχές λειτουργίας.

Επίσης, ανάλογα με την διεργασία στην οποία εφαρμόζεται ο PID έλεγχος, είναι δυνατόν να έχουμε σαν είσοδο στον ελεγκτή μία παράμετρο της μονάδας, ενώ η έξοδος του ελεγκτή ελέγχει ένα μόνο στοιχείο της εγκατάστασης. Τότε γίνεται λόγος για ελεγκτές Μίας-Εισόδου-Μίας-Εξόδου (Simple-Input-Simple-Output, SISO). Αντίστοιχα, μπορεί σαν είσοδο να δέχεται πολλές παραμετρους σαν εισόδους ο ελεγκτής και να ελέγχει περισσότερα από ένα στοιχεία της εγκατάστασης. Έτσι, γίνεται λόγος για ελεγκτή Πολλαπλών-Εισόδων-Πολλαπλών-εξόδων (Multiple-Input-Multiple-Output, MIMO).

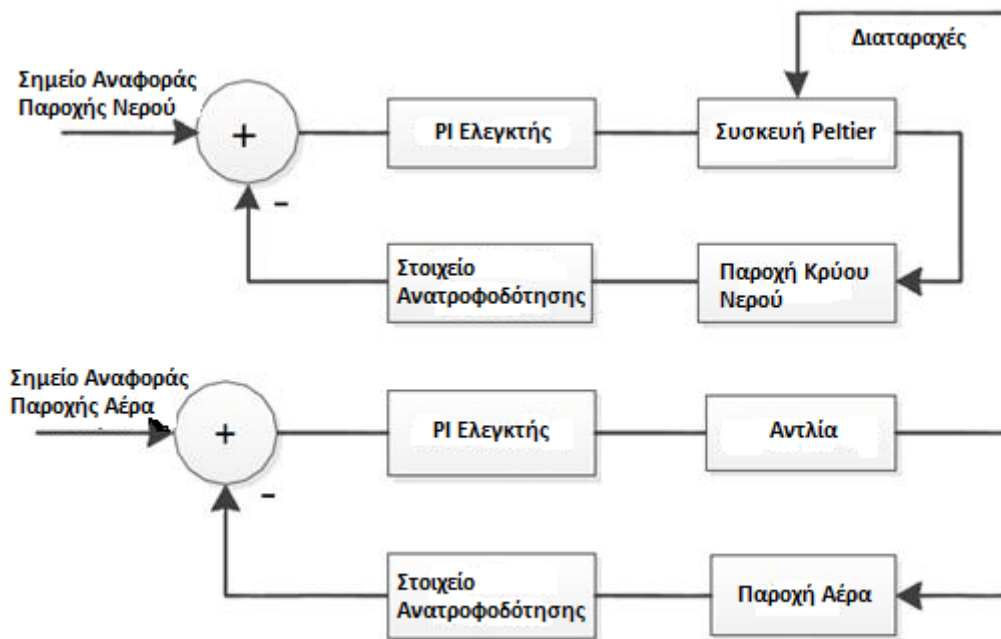
## **SISO και MIMO PID Ελεγκτές**

Οι Μίας-Εισόδου-Μίας-Εξόδου PID ελεγκτές (Single-Input-Single-Output, SISO) είναι ένα σχήμα αυτόματου ελέγχου που χρησιμοποιείται ευρέως στην πράξη. Απαιτεί την ρύθμιση μόνο τριών παραμέτρων (αναλογικό, ολοκληρωτικό και διαφορικό κέρδος) και επιτυγχάνει καλή απόδοση σε ένα εύρος βιομηχανικών μονάδων. Επίσης, η διαδικασία ρύθμισης των παραμέτρων σε έναν κλειστό βρόχο ελέγχου είναι σε μεγάλο βαθμό κατανοητή και υπάρχουν απλοί κανόνες για την ρύθμιση αυτών, και για αυτό συστήματα για την αυτόματη ρύθμιση των SISO PID ελεγκτών έχουν αναπτυχθεί και είναι διαθέσιμα σε εμπορικούς ελεγκτές.



**Σχήμα 4.3-2:** Σχεδιάγραμμα ενός βρόχου SISO ελέγχου.

Οι SISO PID ελεγκτές χρησιμοποιούνται και σε μονάδες με έλεγχο Πολλαπλών-Εισόδων-Πολλαπλών –Εξόδων (Multiple-Input-Multiple-Output, MIMO). Αυτό, γενικά, πραγματοποιείται από την αντιστοίχιση εισόδων (ενεργοποιητές) και εκροών (αισθητήρες), και τη σύνδεσή τους με SISO PID ελεγκτές, οι οποίοι ρυθμίζονται ένας την φορά με την χρήση κοινών μεθόδων ρύθμισης. Για μονάδες MIMO οι οποίες αποτελούνται από μη διασυνδεδεμένες μεταξύ τους διεργασίες, οι πολλαπλοί βρόχοι SISO PID ελέγχου μπορούν να έχουν πολλοί καλά αποτελέσματα. Σε αντίθεση με τον σχεδιασμό SISO PID ελέγχου, ο σχεδιασμός MIMO PID ελέγχου είναι πολύ πιο σύνθετος. Οι βρόχοι SISO πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά και μετά να ρυθμίζονται με τον σωστό τρόπο και με την σωστή σειρά.



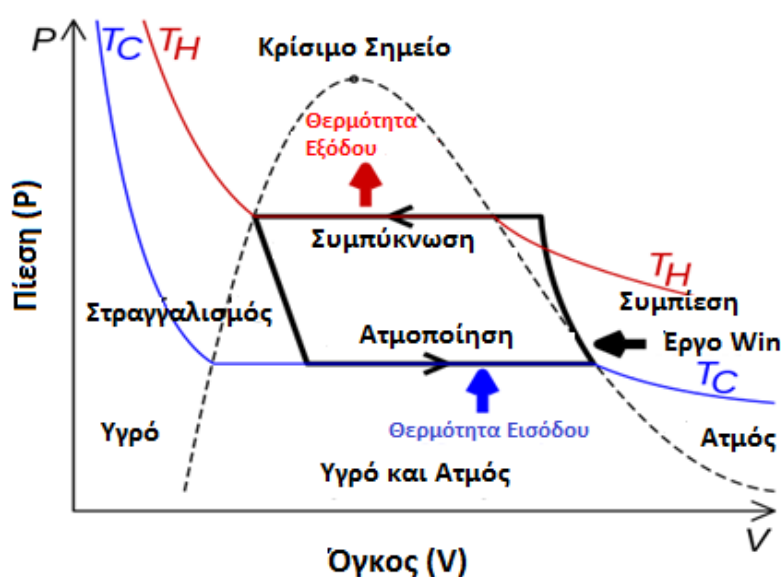
**Σχήμα 4.3-3:** Σχεδιάγραμμα ενός βρόχου MIMO ελέγχου.

Στη πράξη, ο πιο διαδεδομένος εμπορικά τρόπος ελέγχου μιας αντλίας θερμότητας για οικιακή ψύξη είναι η χρήση inverter, προκειμένου να επιτευχθεί τόσο ο ON/OFF έλεγχος της αντλίας, ώστε αυτή να λειτουργεί εντός του επιθυμητού εύρους θερμοκρασίας, αλλά και η λειτουργία της στα ενδιάμεσα σημεία του εύρους να είναι δυνατή. Έχοντας την δυνατότητα, λοιπόν, να μεταβάλλουμε τις στροφές του συμπιεστή μέσω του inverter μπορούμε να μεταβάλλουμε και την θερμοκρασία μετά τον ατμοποιητή ή οποία είναι και ενδεικτική για το ψυκτικό φορτίο που θέλουμε να καλύψουμε.

Τα τελευταία χρόνια, στον έλεγχο ψύξης σε βιομηχανικό, όμως, επίπεδο έχουν χρησιμοποιηθεί εμπορικά και οι PID ελεγκτές, οι οποίοι παρέχουν την δυνατότητα αυτοματοποίησης του συστήματος ψύξης και την επαναφορά του στο επιθυμητό σημείο λειτουργίας βάση των μεταβαλλόμενων αναγκών ψύξης χωρίς την παρέμβαση του χρήστη.

#### 4.4 Εφαρμογή PID ελέγχου στον VCC κύκλο της εγκατάστασης BioTRIC

Σε έναν ψυκτικό κύκλο VCC, το ποσό της ενέργειας που πρέπει να απορροφηθεί εξαρτάται όχι μόνο από την επιθυμητή θερμοκρασία του ψυχόμενου χώρου, αλλά και από τις επικρατούσες συνθήκες και το επίπεδο της εσωτερικής παραγόμενης ενέργειας. Επομένως, στόχος του αυτόματου ελέγχου ενός συστήματος ψύξης είναι η κάλυψη των αναγκών σε ψυκτικό φορτίο το οποίο μεταβάλλεται ανάλογα με τις εξωτερικές συνθήκες που επικρατούν, αλλά και από την χρήση του χώρου. Στόχος είναι η διατήρηση της θερμοκρασίας σε ένα επιθυμητό σημείο που θα εξασφαλίζει την άνεση του χώρου με την ελάχιστη και ιδανικά μηδενική παρέμβαση του χρήστη, η ελάχιστη ενεργειακή κατανάλωση για παροχή ψύξης και άρα η μείωση του κόστους τόσο οικονομικά όσο και περιβαλλοντικά. Επιπρόσθετα, θα πρέπει να εξασφαλίζεται ότι το ενδιάμεσο μέσο όταν εισέρχεται στον συμπιεστή είναι σε κατάσταση ατμού, ώστε να μην προκληθούν προβλήματα στο σύστημα (μείωση της απόδοσης, μηχανική καταπόνηση του συμπιεστή κτλ). Έτσι, τα συστήματα VCC είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν ως ένα βαθμό με υπερθέρμανση του ψυκτικού μέσου, ώστε η θερμοκρασία αυτού όταν εξέρχεται από τον ατμοποιητή να είναι πάνω από την θερμοκρασία κορεσμού.



Διάγραμμα 4.4-1: Διάγραμμα P-V ψυκτικού κύκλου VCC

Στην εγκατάσταση BioTRIC δεν έχει εφαρμοστεί κανένας έλεγχος στον ψυκτικό κύκλο, αλλά η λειτουργία του ρυθμίζεται χειροκίνητα από τον χρήστη. Στην ουσία, λοιπόν, με την παρούσα συνδεσμολογία της εγκατάστασης, στον ψυκτικό κύκλο η μόνη παρέμβαση που υπάρχει είναι η προστασία της εγκατάστασης από ακραίες μη επιθυμητές συνθήκες από το πρόγραμμα προστασίας του PLC, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν ζημιά στην μονάδα, και η παρέμβαση του χρήστη για λειτουργία ή μη του ψυκτικού κύκλου.

Αρχικά, η χρήση ενός inverter για την λειτουργία του συμπιεστή του κύκλου θα παρέχει την δυνατότητα στο χρήστη να ρυθμίζει την λειτουργία του και σε ενδιάμεσα σημεία. Ο inverter ελέγχει την ταχύτητα του συμπιεστή προκειμένου αυτός να οδηγεί το μεταβλητής ροής ψυκτικό μέσο στον ψυκτικό κύκλο, ελέγχοντας με αυτόν τον τρόπο την θερμοκρασία εξόδου. Σκοπός είναι ο έλεγχος των στροφών του συμπιεστή μέσω του inverter, ώστε αυτός να λειτουργεί και σε ενδιάμεσα στάδια και όχι μόνο σε κατάσταση ON ή OFF. Παρ'όλα αυτά, η προσθήκη του inverter δεν παρέχει την δυνατότητα αυτοματοποιημένου ελέγχου του κύκλου χωρίς την παρέμβαση του χρήστη.

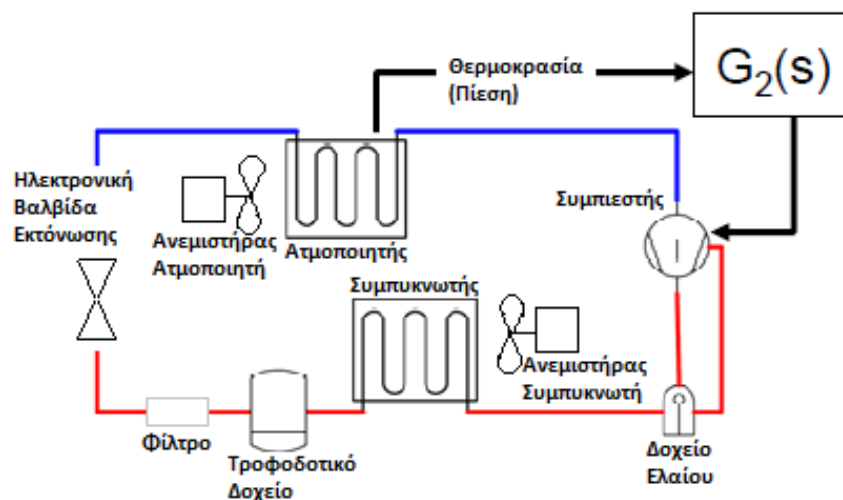
Ένας τρόπος ρύθμιση της θερμοκρασίας μετά τον ατμοποιητή, ώστε να προσαρμόζεται αυτή στις εκάστοτε ανάγκες ψυκτικού φορτίου, παρέχει επίσης και η τοποθέτηση μια ηλεκτρομηχανολογικής αναλογικής βαλβίδας για τον έλεγχο της παροχής του οργανικού μέσου από τον χειριστή μέσω HMI εφαρμογής. Και αυτή η προσθήκη, ωστόσο, δεν παρέχει την δυνατότητα αυτοματοποιημένου ελέγχου, καθώς απαιτείται η παρέμβαση του χρήστη.

Ο συνδυασμός inverter και ηλεκτρομηχανολογικής αναλογικής βαλβίδας παρέχει επίσης την δυνατότητα ελέγχου της εγκατάστασης και λειτουργίας της σε ενδιάμεσα σημεία για καλύτερη προσαρμογή στο ψυκτικό φορτίο, αλλά με την παρέμβαση του χρήστη πάλι, γεγονός που στερεί την δυνατότητα αυτοματοποιημένου ελέγχου. Και οι τρεις προτάσεις που έγιναν για βελτίωση των δυνατοτήτων ελέγχου της μονάδας από τον χρήστη αποτελούν συστήματα ανοικτού βρόχου.

Για την πραγματοποίηση αυτοματοποιημένου ελέγχου απαιτείται η ύπαρξη ενός συστήματος κλειστού βρόχου ελέγχου με κάποιο στοιχείο ανατροφοδότησης. Στην προκειμένη περίπτωση, η θερμοκρασία στον ατμοποιητή μετράται από έναν αισθητήρα θερμοκρασίας και ανατροφοδοτείται σε ένα στοιχείο ελέγχου, όπως παραδείγματος χάριν σε έναν θερμοστάστη και ανάλογα με την ρύθμιση που έχει δοθεί στο στοιχείο ελέγχου για το εύρος λειτουργίας της μονάδας επενεργεί σε ένα

στοιχείο λειτουργίας και διακόπτει την λειτουργία της μονάδας ή την επανακινεί. Ο ON/OFF αυτόματος έλεγχος αποτελεί την πρώτη λύση αυτομάτου ελέγχου στην ιστορία του αυτοματοποιημένου ελέγχου.

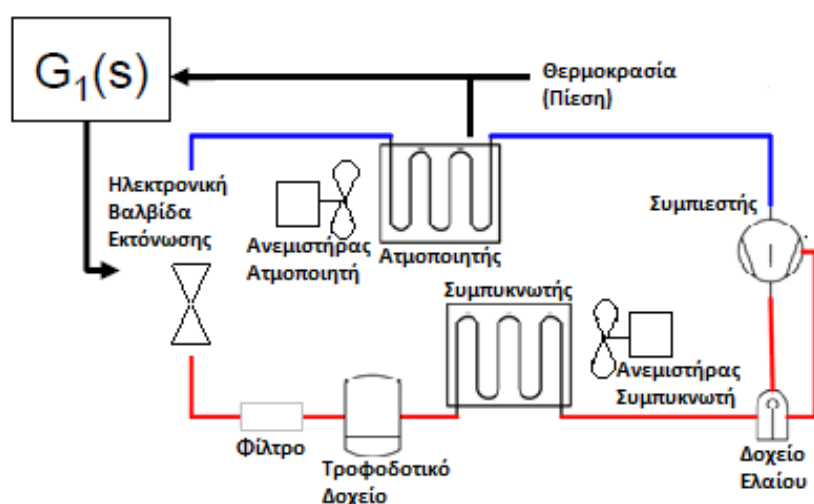
Ακολουθώς, μια πρόταση για αυτοματοποιημένο έλεγχο μαζί με την εγκατάσταση του inverter αποτελεί και η τοποθέτηση ενός SISO PID ελεγκτή. Σαν είσοδος στον PID ελεγκτή θα ανατροφοδοτηθεί η θερμοκρασία στον ατμοποιητή. Η μέτρηση αυτή θα συγκριθεί με το σημείο αναφοράς θερμοκρασίας ατμοποίησης, το οποίο κάθε φορά είναι επιθυμητό να παραμένει σταθερό και στην πράξη κοντά στους 6°C, και αφού υπολογιστεί το σφάλμα ο ελεγκτής, ρυθμισμένος ανάλογα για να εκμηδενίσει το σφάλμα, επενεργεί στον inverter του συμπιεστή διορθώνοντας τις στροφές του και κατ'έπεται την θερμοκρασία ατμοποίησης. Έτσι, σε περίπτωση που παρατηρηθεί αύξηση του ψυκτικού φορτίου, θα πρέπει το οργανικό ρευστό να παραλάβει μεγαλύτερο ποσό θερμότητα από τον ψυχόμενο χώρο και άρα παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασία στον ατμοποιητή. Υπολογίζοντας ο ελεγκτής αυτήν την διαφορά ελέγχει ανάλογα με την έξοδο του τον inverter αυξάνοντας τις στροφές του συμπιεστή προκειμένου να περιοριστεί αυτή η αύξηση και να ισορροπήσει εν τέλη η θερμοκρασία πάλι κοντά στους 6°C.



**Σχήμα 4.4-1:** Μέθοδος ελέγχου σε συστήματα VCC με έναν SISO PID ελεγκτή για τον έλεγχο του inverter του συμπιεστή.

Ανάλογη συνδεσμολογία με έναν SISO ελεγκτή θα μπορούσε να εφαρμοστεί και στην περίπτωση εγκατάστασης ηλεκτρομηχανολογικής αναλογικής βαλβίδας στην μονάδα. Ανατροφοδοτώντας την θερμοκρασία στον ατμοποιητή στην είσοδο

του ελεγκτή υπολογίζεται το σφάλμα από το σημείο αναφοράς και ο ελεγκτής με την έξοδο του επενεργεί στην βαλβίδα ανοίγοντας ή κλείνοντας την ώστε να επιτύχει το επιθυμητό αποτέλεσμα για την εξάλειψη του σφάλματος. Σε αντίστοιχη, λοιπόν, περίπτωση που υπάρχει αύξηση του ψυκτικού φορτίου θα πρέπει να αυξηθεί η παροχή του ψυκτικού μέσου ώστε αυτό να απορροφήσει μεγαλύτερο ποσό θερμότητας και να επαναφέρει την θερμοκρασία στον ατμοποιητή στο σημείο αναφοράς. Υπολογίζοντας, λοιπόν, ο ελεγκτής αυτήν την απόκλιση από το σημείο αναφοράς ελέγχει ανάλογα με την έξοδο του την βαλβίδα, επενεργώντας σε αυτήν ώστε να αυξηθεί η παροχή του εργαζόμενου μέσου.

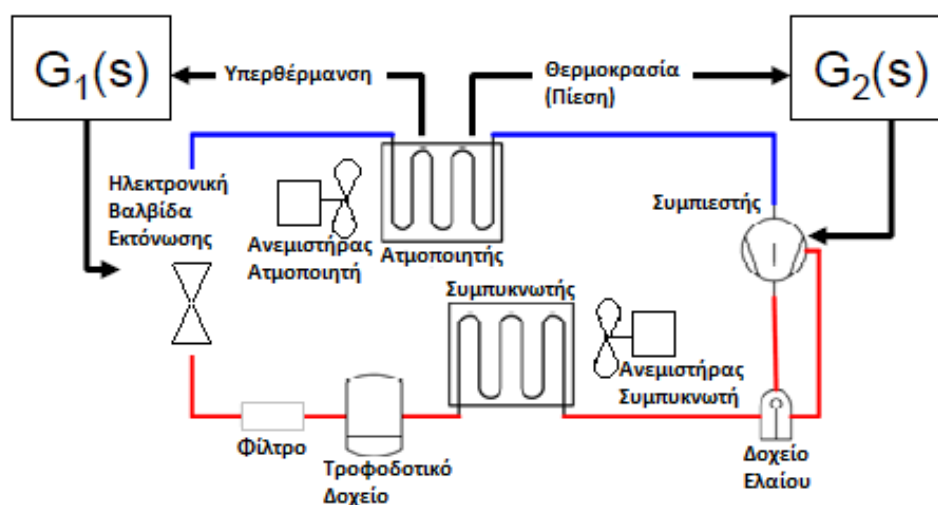


**Σχήμα 4.4-2:** Μέθοδος ελέγχου σε συστήματα VCC με έναν SISO PID ελεγκτή για τον έλεγχο της ηλεκτρομηχανολογικής αναλογικής βαλβίδας.

Τέλος, με την χρήση ενός inverter για την λειτουργία του συμπιεστή, αλλά και ταυτόχρονα την χρήση μιας ηλεκτρομηχανολογικής βαλβίδας για τον έλεγχο της ροής του ψυκτικού μέσου μπορεί να επιτευχθεί καλύτερος έλεγχος του ψυκτικού κύκλου με την χρήση δύο ελεγκτών SISO PID. Ο ένας θα δέχεται σαν είσοδο την θερμοκρασία στον ατμοποιητή και η έξοδος του θα ελέγχει τον inverter του συμπιεστή και άρα τις στροφές τους, ενώ ο δεύτερος θα δέχεται σαν είσοδο την θερμοκρασία ατμοποίησης του ρευστού και η έξοδος του θα ελέγχει την βαλβίδα και άρα την ροή του ψυκτικού μέσου, ώστε η θερμοκρασία αυτού να μην ελλατώνεται από την θερμοκρασία ατμοποίησης. Ο συνδυασμός της προσαρμογής στο φορτίο με τον εσωτερικό περιορισμό για την φάση του ψυκτικού μέσου οδηγεί σε έλεγχο

πολλών αντικειμένων ταυτόχρονα (συναρτήσεις  $G_1$ ,  $G_2$ ) και άρα σε δύο αλγορίθμους ελέγχου SISO (Simple Input Simple Output), οι οποίοι αναπτύσσονται ανεξάρτητα μεταξύ τους, παρ'όλα αυτά είναι εμφανές ότι υπάρχει αλληλοσχέτιση των μεγεθών που ελέγχουν οι δύο ανεξάρτητοι ελεγκτές [25].

Αν και κοινό τρόπο ελέγχου αποτελεί η ρύθμιση της θερμοκρασίας στον ατμοποιητή, μπορεί να αντικατασταθεί αυτή με την πίεση στον ατμοποιητή, η οποία και μπορεί ακολούθως να συσχετιστεί εύκολα με την θερμοκρασία αυτού, καθώς η πίεση ανταποκρίνεται πιο γρήγορα σε μεταβολές (feedback response) [25].



**Σχήμα 4.4-3:** Μέθοδος ελέγχου σε συστήματα VCC με δύο SISO PID ελεγκτές[25].

Και στις τρεις τελευταίες προτάσεις που δόθηκαν πιο πάνω ο αυτόματος έλεγχος δίνει την δυνατότητα προσαρμογής του συστήματος σε μεταβαλλόμενο φορτίο προσαρμόζοντας κάθε φορά το σημείο λειτουργίας του στις μεταβολές αυτού χωρίς την παρέμβαση του χρήστη. Για την ρύθμιση, ωστόσο, των ελεγκτών, ώστε να είναι ορθή η διόρθωση του σφάλματος, είναι απαραίτητος αρχικά ο προσδιορισμός των σχέσεων που συνδέουν την ροή του ψυκτικού μέσου και την ταχύτητα του συμπιεστή με την θερμοκρασία μετά τον ατμοποιητή για την μονάδα BioTRIC και η αντίδραση αυτών των μεγεθών σε μεταβολές των συνθηκών λειτουργίας.

ΕΛΕΓΧΟΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
ON / OFF	Χειροκίνητος, Σύστημα Ανοικτού Βρόχου		Έλλειψη Αυτοματοποιημένου Ελέγχου, Παρέμβαση χρήστη
Χρήση Ηλεκτρομηχανολογικής Αναλογικής Βαλβίδας	Χειροκίνητος, Σύστημα Ανοικτού Βρόχου	Δυνατότητα λειτουργίας και σε ενδιάμεσα σημεία	Έλλειψη Αυτοματοποιημένου Ελέγχου, Παρέμβαση χρήστη
Χρήση Inverter	Χειροκίνητος, Σύστημα Ανοικτού Βρόχου	Δυνατότητα λειτουργίας και σε ενδιάμεσα σημεία, Γρήγορη απόκριση	Έλλειψη Αυτοματοποιημένου Ελέγχου, Παρέμβαση χρήστη
Χρήση Inverter και Ηλεκτρομηχανολογικής Αναλογικής Βαλβίδας	Χειροκίνητος, Σύστημα Ανοικτού Βρόχου	Δυνατότητα λειτουργίας και σε ενδιάμεσα σημεία	Έλλειψη Αυτοματοποιημένου Ελέγχου, Παρέμβαση χρήστη
ON / OFF	Αυτοματοποιημένος έλεγχος, Σύστημα κλειστού βρόχου	Αυτοματοποιημένος Έλεγχος	Αδυναμία λειτουργίας και σε ενδιάμεσα σημεία
Χρήση Ηλεκτρομηχανολογικής Αναλογικής Βαλβίδας και PID ελεγκτή	Αυτοματοποιημένος έλεγχος, Σύστημα κλειστού βρόχου	Αυτοματοποιημένος Έλεγχος, Εξοικονόμηση ενέργειας	Ρύθμιση PID Ελεγκτή
Χρήση Inverter και PID ελεγκτή	Αυτοματοποιημένος έλεγχος, Σύστημα κλειστού βρόχου	Αυτοματοποιημένος Έλεγχος, Εξοικονόμηση ενέργειας, Γρήγορη απόκριση	Υψηλό κόστος, ρύθμιση PID Ελεγκτή
Χρήση Inverter, Ηλεκτρομηχανολογικής Αναλογικής Βαλβίδας PID ελεγκτή	Αυτοματοποιημένος έλεγχος, Σύστημα κλειστού βρόχου	Αυτοματοποιημένος Έλεγχος, Γρήγορη απόκριση, Εξοικονόμηση ενέργειας	Υψηλό κόστος, Διασυνδεσιμότητα στοιχείων ελέγχου, ρύθμιση PID Ελεγκτή

**Πίνακας 4.4.1-1:** Στρατηγικές χειροκίνητου και αυτοματοποιημένου ελέγχου.

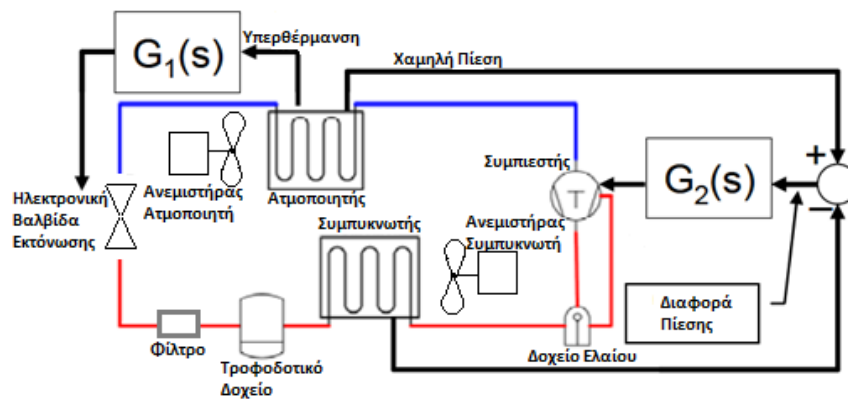
Οι διάφορες μέθοδοι ρύθμισης και αυτομάτου ελέγχου της λειτουργίας του κύκλου VCC συνοψίζονται στον Πίνακα 4.4.-1

#### 4.4.1 Διασυνδεσιμότητα στις σχέσεις εισόδου–εξόδου σε έναν ψυκτικό κύκλο VCC

Κατά την λειτουργία ενός ψυκτικού κύκλου VCC η θερμοκρασία μετά τον ατμοποιητή μπορεί να μεταβληθεί τόσο με μεταβολή των στροφών του συμπιεστή όσο και με μεταβολή της θέσης της αναλογικής βαλβίδας. Μεταβολή, λοιπόν, της θερμοκρασίας με μεταβολή των στροφών του συμπιεστή πρέπει να συνοδεύεται και από μια μεταβολή στην θέση της αναλογικής βαλβίδας, προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι το ρευστό είναι υπέρθερμο μετά την έξοδο του από τον ατμοποιητή. Υπάρχει, λοιπόν, μια διασυνδεσιμότητα μεταξύ των μεγεθών στα οποία επενεργούν οι PID ελεγκτές. Η διασυνδεσιμότητα αυτή πρέπει να μελετηθεί μέσω της μοντελοποίησης του συστήματος προκειμένου να προσδιοριστεί πιο σωστά η ανατροφοδότηση στα μέσα ελέγχου, την ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα και τον inverter στην προκειμενη περίπτωση [25].

Παρατηρείται ότι είναι δύσκολος ο έλεγχος δύο εξόδων ( ταχύτητα του συμπιεστή και θέση της αναλογικής βαλβίδας, παροχή ρευστού) με δύο ανεξάρτητους βρόχους SISO, λόγω της φυσικής σύνδεσης των δύο εξόδων, καθώς και οι δύο επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την πίεση/θερμοκρασία του ατμοποιητή. Χρειάζεται, λοιπόν, μια τεχνική ελέγχου πολλών μεταβλητών.

Εναλλακτικά, μπορεί αν μελετηθεί ο έλεγχος μέσω ανατροφοδότησης της διαφοράς πίεσης μεταξύ του συμπυκνωτή και του ατμοποιητή,  $\Delta P = P_{\text{condenser}} - P_{\text{evaporator}}$ , ώστε να αποφευχθεί η συσχέτιση των δύο εξόδων. Η διαφορά  $\Delta P$  οδηγεί τον ελεγκτή του συμπιεστή, ενώ ανταποκρίνεται και η ίδια ακόμα πιο γρήγορα στην αλλαγή της ταχύτητας του συμπιεστή, πράγμα το οποίο είναι λογικό, αφού σκοπός του συμπιεστή είναι εξ αρχής η μεταβολή της πίεσης μεταξύ συμπυκνωτή και ατμοποιητή.



**Σχήμα 4.4.1-1:** Εναλλακτική διαμόρφωση ανατροφοδότησης στο σύστημα ελέγχου [25].

#### 4.4.2 Μέθοδος Μοντέλου Πρόβλεψης (Model Predictive Control Method –MPC Method)

Όπως προαναφέρθηκε, για την παραμεντροποίηση και την ορθή εγκατάσταση των PID ελεγκτών είναι προαπαιτούμενος ο προσδιορισμός των σχέσεων που συνδέουν την ροή του ψυκτικού μέσου και την ταχύτητα του συμπιεστή με την θερμοκρασία μετά τον ατμοποιητή για την μονάδα BioTRIC και η αντίδραση αυτών των μεγεθών σε μεταβολές των συνθηκών λειτουργίας. Κάτι τέτοιο απαιτεί την ανάπτυξη ενός μοντέλου που να προσομοιώνει την λειτουργία του ψυκτικού κύκλου της εγκατάστασης BioTRIC, ώστε να μπορεί να προβλεφθεί η συμπεριφορά αυτής σε μεταβολές του ψυκτικού φορτίου.

Η MPC μέθοδος χρησιμοποιεί ένα μοντέλο του συστήματος για να προβλέψει την μελλοντική κατάσταση αυτού και να δημιουργήσει ένα διάνυσμα ελέγχου, το οποίο ελαχιστοποιεί μια συγκεκριμένη συνάρτηση κόστους επί του προβλεπόμενου ορίου κατά την παρουσία διαταραχών και περιορισμών. Το πρώτο στοιχείο του υπολογιζόμενου συστήματος ελέγχου σε κάθε δειγματοληπτικό έλεγχο εφαρμόζεται στην είσοδο του συστήματος, και το υπόλοιπο απορρίπτεται. Ολόκληρη η διαδικασία επαναλαμβάνεται στον επόμενο κύκλο λειτουργίας [23].

Η συνάρτηση κόστους μπορεί να λάβει την μορφή συνάρτησης εντοπισμού σφάλματος, ελέγχου, ενεργειακού κόστους, κόστους ζήτησης, κατανάλωσης ενέργειας, ή ενός συνδυασμού αυτών των παραγόντων. Οι περιορισμοί μπορούν να εντοπιστούν εντός του εύρους ορίων των ενεργοποιητών και των μεταβλητών ελέγχου (π.χ. άνω και κάτω όριο της θερμοκρασιακής ζώνης, των ορίων

τροφοδοτούμενης ροής του αέρα, και το εύρος και τα όρια ταχύτητας του υγραντήρα). Εξωτερικές και εσωτερικές διαταραχές οι οποίες επενεργούν πάνω στο σύστημα εξαιτίας του καιρού, των δραστηριοτήτων των ενοίκων, την χρήση του εξοπλισμού, μοντελοποιούνται επίσης και η προβλεπόμενη επιρροή τους στο σύστημα χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό του διανύσματος ελέγχου. Αυτή η προσπάθεια έχει σαν αποτέλεσμα έναν εύρωστο ελεγκτή σε μεταβλητές στον χρόνο διαταραχές και παραμέτρους του συστήματος και ρυθμίζει την διεργασία αυστηρά εντός των επιθυμητών ορίων.

Η MPC μέθοδος ελέγχου χρησιμοποιείται εξίσου σε εποπτικά όσο και σε τοπικά επίπεδα ελέγχου στα HVAC συστήματα ελέγχου.

Πολλά πλεονεκτήματα τα οποία απορρέουν από την συγκεκριμένη μέθοδο παρατίθενται ακολούθως:

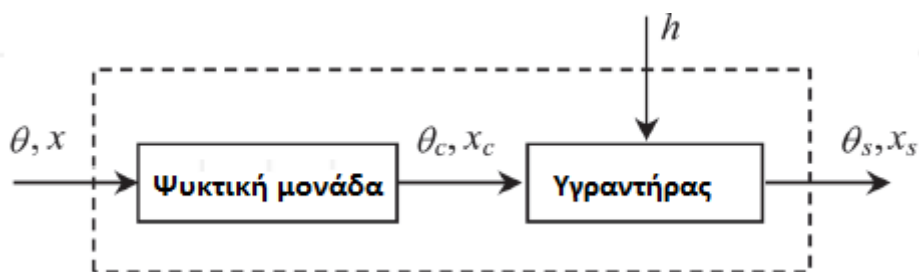
- Χρήση ενός μοντέλου συστήματος για προνοητικές ενέργειες ελέγχου παρά διορθωτικές ενέργειες ελέγχου.
- Ενσωμάτωση ενός μοντέλου διαταραχών για τις απαλοιφή αυτών.
- Ικανότητα να διαχειριστεί περιορισμούς και ανακρίβειες.
- Ικανότητα να χειριστεί μια χρονικά μεταβαλλόμενη δυναμική του συστήματος και ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας.
- Ικανότητα να ανταπεξέλθουν σε διαδικασίες αργής απόκρισης με χρονικές καθυστερήσεις.
- Ενσωμάτωση των στρατηγικών εξοικονόμησης της ενέργειας στην διαμόρφωση του ελεγκτή.
- Χρήση μιας συνάρτησης κόστους για την επίτευξη πολλαπλών στόχων.
- Χρήση προχωρημένων αλγορίθμων βελτιστοποίησης για τον υπολογισμό διανύσματος ελέγχου.
- Ικανότητα να ελέγχει το σύστημα εξίσου σε εποπτικό και τοπικό επίπεδο ελέγχου.

Συμπερασματικά, η μέθοδο MPC παρουσιάζεται ως η καταλληλότερη για καλύτερη επίδοση στην εξοικονόμηση ενέργειας, μεγαλύτερη ευστάθεια σε διακυμάνσεις και σταθερή απόδοση υπό διαφορετικές συνθήκες σε σύγκριση με τις υπόλοιπες [23] και μπορεί να συνδυαστεί με την χρήση PID ελεγκτών για την εφαρμογή του διανύσματος ελέγχου που προκύπτει κατά την πρόβλεψη της μελλοντικής συμπεριφοράς του συστήματος.

## 4.5 Παράδειγμα ανάπτυξης μοντέλου ενός HVAC Συστήματος

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ρύθμιση των παραμέτρων του PID ελεγκτή για πιο αποδοτικό έλεγχο της θερμοκρασίας ενός ψυχόμενου χώρου. Καθώς το επιθυμητό σημείο λειτουργίας επηρεάζεται από διάφορες διαταραχές, όπως οι εξωτερικές συνθήκες, αλλά και το θερμικό φορτίο, ιδανικό θα ήταν να καθορίζεται κάθε φορά εκ νέου το σημείο λειτουργίας και να προσαρμόζεται αντίστοιχα η επαναφορά σε αυτό. Για την σωστή ρύθμιση, ωστόσο, ενός PID ελεγκτή απαραίτητη είναι η μοντελοποίηση του χώρου που ψύχεται, ώστε να μπορεί να καθοριστεί η αντίδραση της θερμοκρασίας αυτού με την επίδραση της εκάστοτε εξόδου του ελεγκτή.

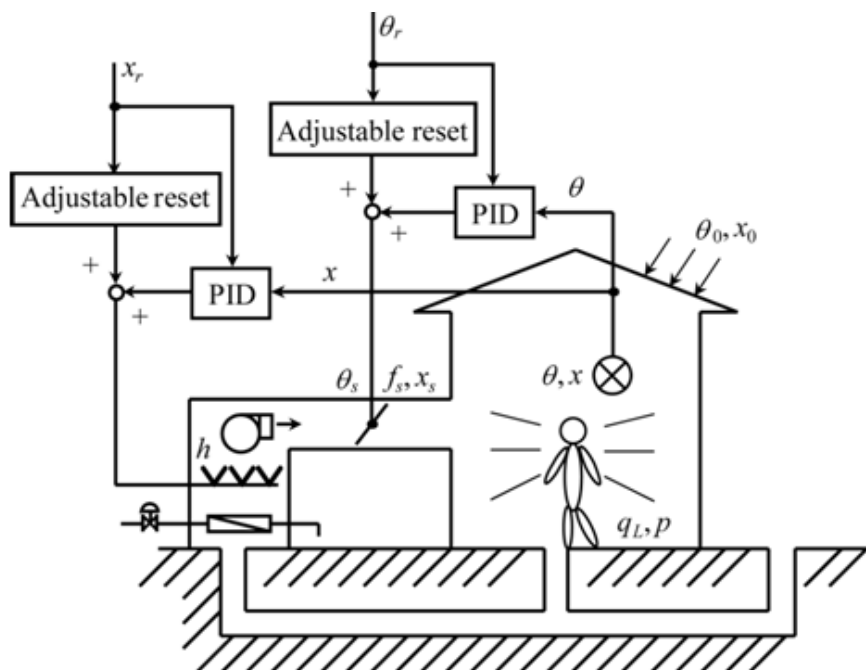
Η μεθοδολογία που περιγράφεται ακολούθως μπορεί να εφαρμοστεί για την ανάπτυξη μοντέλων χώρων για τους οποίους μελετάται κάποιο σύστημα ελέγχου ψύξης. Στην προκειμένη περίπτωση θεωρείται ένα σύστημα ψύξης μίας θερμικής ζώνης και ο χώρος ελέγχου είναι ένα δωμάτιο 10mx10mx2.7m επιπλωμένο με μια ψυκτική μονάδα και έναν υγραντήρα, τα οποία αποτελούν την κλιματιστική μονάδα (Μονάδα διαχείρισης αέρα, Air-Handling Unit, AHU). Για τον προσδιορισμό της θερμικής ζώνης είναι σημαντική η δυνατότητα χωροθέτησης των λειτουργιών του υπό μελέτη χώρου ανάλογα με τις ενεργειακές τους απαιτήσεις, οι οποίες εξαρτώνται από τη λειτουργία και χρήση του κτιρίου και τις αντίστοιχες απαιτήσεις σε θερμικές και άλλες συνθήκες (θερμοκρασία, ποιότητα αέρα, φωτισμό, κ.ά.), τα εσωτερικά θερμικά κέρδη, τα ωράρια λειτουργίας και τον προσανατολισμό του χώρου για την έκθεση του στην ηλιακή ακτινοβολία.



Σχήμα 4.5-1: Κλιματιστική μονάδα, AHU.

Η θερμοκρασία σωματίου  $\theta$  μετράται με ένα θερμόμετρο και η σχετική υγρασία  $\phi$  με ένα υγρόμετρο, οι έξοδοι των οποίων ενισχύονται και οδηγούνται σε έναν PID ελεγκτή για τον υπολογισμό των σφαλμάτων, της απόκλιση των  $\theta$  και  $\phi$ ,

δηλαδή, από τα σημεία αναφοράς  $\theta_r$  και  $\varphi_r$  αντίστοιχα. Ο ελεγκτής παράγει τα κατάλληλα σήματα εισόδου για έλεγχο στην μονάδα ενεργοποιώντας τα κατάλληλα μέρη αυτής (διάφραγμα παροχής αέρα και υγραντήρας) έτσι ώστε η AHU να δώσει την απαιτούμενη θερμική ισχύ και υγρασία για εκμηδενισμό του σφάλματος [26].



**Σχήμα 4.5-2:** Δομή του συστήματος ψύξης μιας θερμικής ζώνης.

Το θερμοκρασιακό μοντέλο του δωματίου μπορεί να δομηθεί εφαρμόζοντας τις αρχές ενεργειακής ισορροπίας [26]:

$$C \frac{d\theta}{dt} = w_s(\theta_s - \theta) + \alpha(\theta_0 - \theta) + q_L \quad (4.1)$$

$C$ = Συνολική θερμική ικανότητα του ψυχόμενου χώρου (Kj/K)

$\alpha$ = Ολικός συντελεστής μετάδοσης της περιοχής(kJ/minK)

$q_L$ = Θερμικό φορτίο από εσωτερική παραγόμενη θερμότητα (kJ/min)

$w_s = \rho_a c_p f_s$  (kJ/minK), θερμότητα του αέρα παροχής

$\rho_a$ = Πυκνότητα αέρα (kg/m<sup>3</sup>)

$c_p$ = Ειδική θερμότητα αέρα (kJ/kgK)

$f_s$ = Παροχή αέρα (m<sup>3</sup>/min)

Η φυσική ερμηνεία της πιο πάνω εξίσωσης είναι ότι ο ρυθμός μεταβολής της ενέργειας στον χώρο είναι ίσος με τη διαφορά μεταξύ της προσφερόμενης ενέργειας και της απορριπτόμενης ενέργειας από αυτόν. Ο πρώτος όρος στο δεξιό τμήμα της

εξίσωσης είναι η απώλεια θερμότητας η οποία ελέγχεται από την ροή του τροφοδοτούμενου αέρα. Ο δεύτερος όρος είναι η θερμότητα που εισέρχεται στον χώρο από διείσδυσης εξωτερικού αέρα λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς εσωτερικού-εξωτερικού αέρα. Ο τρίτος όρος αποτελεί τα θερμικά φορτία λόγω εσωτερικής παραγωγής ενέργειας και διείσδυσης.

Κατά την λειτουργία ενός ψηφιακού ελεγκτή υπάρχει κάποιος νεκρός χρόνος μεταξύ της δειγματοληψίας και την εφαρμογή του σήματος ελέγχου στην μονάδα. Έτσι, στον όρο  $ws$  υπάρχει και ένας νεκρός χρόνο  $Lp$ .

Οι παράμετροι της συγκεκριμένης μονάδας και το δυναμικό μοντέλο αυτής έχουν αποκτηθεί από πειραματικά αποτελέσματα και προσεγγίζονται από ένα σύστημα πρώτης τάξης καθυστέρησης συν κάποιον νεκρό χρόνο. Έτσι, η μονάδα (AUA) μαζί με τους αισθητήρες μπορούν να περιγραφούν από την συνάρτηση μεταφοράς:

$$P(s) = \frac{Kp}{Tp*s+1} e^{-Lp*s} = \frac{0.64}{18s+1} e^{-2.4s} \quad (4.2)$$

Το κέρδος  $Kp$ , η σταθερά χρόνο  $Tr$  και ο νεκρός χρόνος  $Lp$  δίνονται από τις σχέσεις:

$$Kp = \frac{\theta s}{ws + \alpha} \quad (4.3), \quad Tp = \frac{C}{ws + \alpha} \quad (4.4), \quad Lp = \frac{Lpo}{ws + \alpha} \quad (4.5)$$

Το γραμμικό σύστημα που περιγράφεται στην εξίσωση (4.2) είναι ένα φανταστικό σύστημα, το οποίο ωστόσο πλησιάζει σε μεγάλο βαθμό το διαφορικό σύστημα που περιγράφεται στην εξίσωση (4.1).

Το σύστημα ελέγχου της μονάδας περιγράφεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$fs(t) = kp * e(t) + ki * \int_0^t e(\tau) d\tau + kd * \frac{de(t)}{dt} + fso(t) \quad (4.6)$$

$$e(t) = \tau = \theta(t - Lp) - \theta r \quad (4.7)$$

όπου  $fso(t)$  είναι η χειροκίνητη επαναφορά και  $e(t)$  το σφάλμα παρακολούθησης και επομένως η συνάρτηση  $fs(t)$  εκφράζει την συνάρτηση του PID ελεγκτή. Δηλαδή έχοντας σαν είσοδο την θερμοκρασία ή την υγρασία ελέγχου, υπολογίζει το σφάλμα  $e(t)$  το οποίο στην συνέχεια πολλαπλασιάζεται με τον αναλογικό παράγοντα  $Kp$ , ολοκληρώνεται και πολλαπλασιάζεται με τον

ολοκληρωτικό παράγοντα  $K_i$  και τέλος υπολογίζεται η παράγωγός του στον χρόνο και πολλαπλασιάζεται με τον διαφορικό παράγοντα  $K_d$ . Το άθροισμα αυτών των μεγεθών μαζί με την χειροκίνητη επαναφορά από τον χρήστη αποτελούν την έξοδο του ελεγκτή PID και επενεργούν ανάλογα στο κατάλληλο μέσο για διόρθωση του σφάλματος. Οι παράμετροι του PID ελεγκτή μπορούν να προσδιοριστούν μέσω κάποιας μεθόδου ρύθμισης ( tuning method).

Η εξίσωση (4.6) μπορεί να δοθεί και σε σύστημα διακριτού χρόνου θεωρώντας  $T$  την περίοδο δειγματοληψίας.

$$f_s(k) = k_p * e(k) + k_i * T * \sum_{j=0}^k \frac{e(j-1) + e(j)}{2} + \frac{k_d}{T} * [e(k) - e(k-1)] + f_{so}(t) \quad (4.8)$$

Από την εξίσωση (4.1) το σημείο λειτουργίας είναι:  $ws(\theta_s - \theta) + \alpha(\theta_o - \theta) + q_L + Q = 0$  (4.9), ενώ το  $f_{so}$  (επαναφορά της ροής του αέρα παροχής) δίνεται από την σχέση:

$$f_{so}(t) = \frac{q_L(t) + q_{th}(t) + \alpha(\theta_o(t) - \theta_r(t))}{c_p * \rho_a * (\theta_r(t) - \theta_s(t))} \quad (4.10)$$

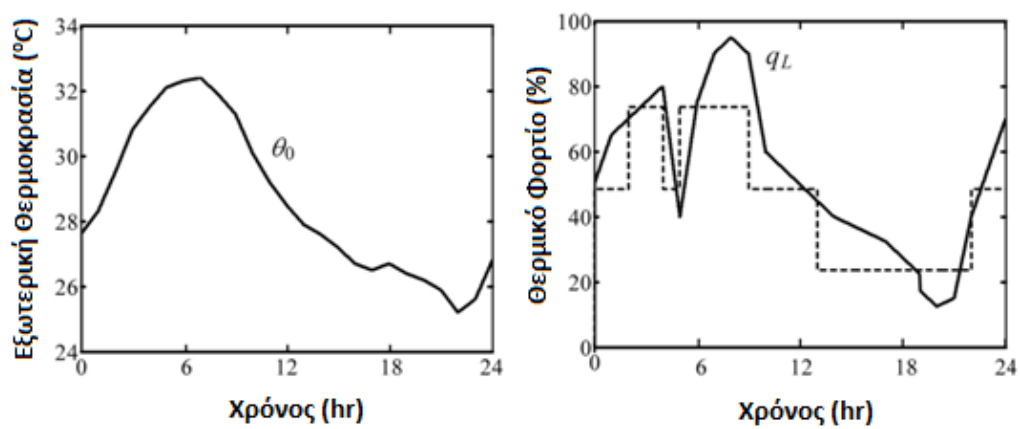
Τα προφίλ της εξωτερικής θερμοκρασίας και του θερμικού φορτίου βασίζονται σε πειραματικά δεδομένα από το National Institute for Environmental Studies in Tsukuba, Japan [26] και δίνονται διαγραμματικά ακολούθως, μαζί με τις ρυθμίσεις των παραμέτρων των PID ελεγκτών που χρησιμοποιήθηκαν δίνονται ακολούθως και βασίζονται στην επίλυση των εξισώσεων που παρατέθηκαν προηγουμένως. Στο παρόν παράδειγμα πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων μιας συμβατικής μεθόδου ρύθμισης των παραμέτρων του PID ελεγκτή και μιας τροποποιημένης μεθόδου που αναπτύχθηκε εμπειρικά [26] για την βελτίωση του χρόνου απόκρισης του συστήματος ελέγχου, καθώς το ψυκτικό φορτίο και οι συνθήκες λειτουργίας μεταβάλλονται συνεχώς στα HVAC συστήματα.

Έλεγχος Θερμοκρασίας	$k_p$	$k_i (T_i)$	$k_d (T_d)$
Συμβατική μέθοδος ρύθμισης	11.65	2.55 (4.57)	13.26 (1.16)
Τροποποιημένη μέθοδος	8.73	0.8 (10.9)	10 (1.15)

**Πίνακας 4.5-1:** Παράμετροι PID ελεγκτή θερμοκρασίας [26].

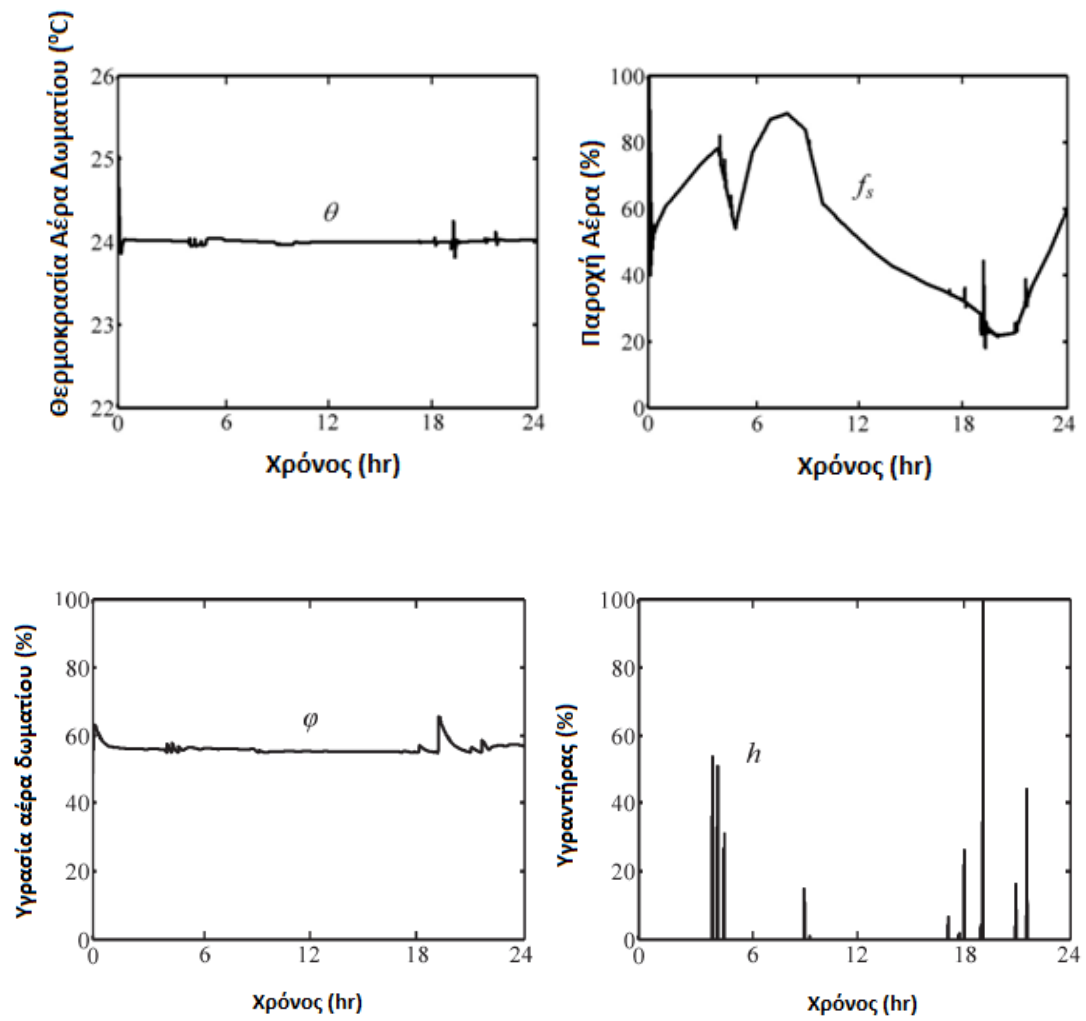
Έλεγχος Υγρασίας		
$K_{ph}$	$K_{ih}(T_{ih})$	$K_{dh}(T_{dh})$
1.22	0.26 (4.65)	1.41(1.16)

**Πίνακας 4.5-2:** Παράμετροι PID ελεγκτή υγρασίας [26].

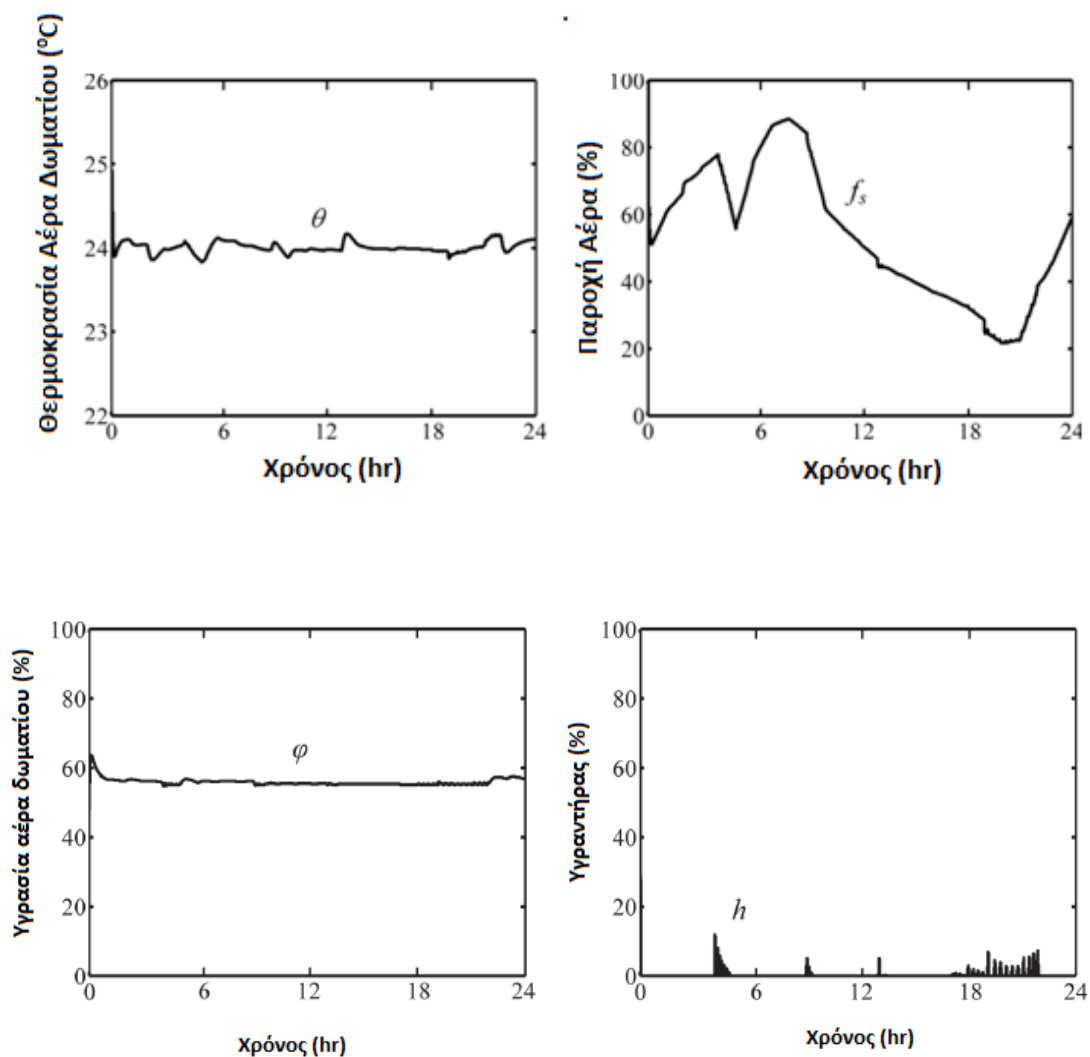


**Διάγραμμα 4.5-1:** Προφίλ εξωτερικής θερμοκρασίας και θερμικών φορτίων [26].

Τα αποτελέσματα για την λειτουργία των PID ελεγκτών δίνονται μετά από προσομοίωση στην συνέχεια:

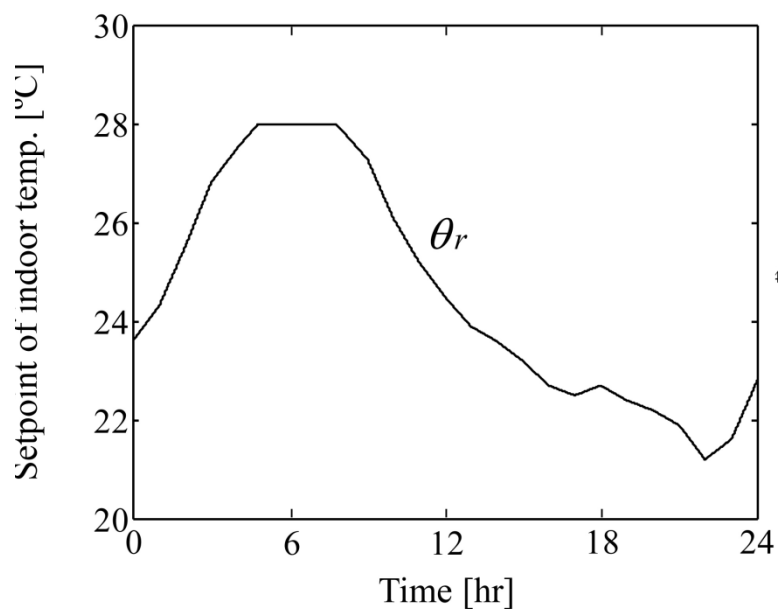


*Διάγραμμα 4.5-2: Αποτελέσματα προσομοίωσης κλασικού PID ελεγκτή [26].*



**Διάγραμμα 4.5-3:** Αποτελέσματα προσομοίωσης τροποποιημένου PID ελεγκτή [26].

Παρατηρείται στον τροποποιημένο PID ελεγκτή ότι επειδή το σημείο αναφοράς αναπροσαρμόζεται συχνά είναι δύσκολο να παραμείνει η θερμοκρασία σταθερή κοντά στο setpoint και αυτό οφίλεται στο συνεχώς μεταβαλλόμενο σημείο αναφοράς λόγω μεταβολής των συνθηκών λειτουργίας και του ψυκτικού φορτίου.



**Διάγραμμα 4.5-4:** Μεταβλητό σημείο λειτουργίας/αναφοράς [26].

Στο παρόν παράδειγμα συμπεραίνεται ότι με τον τροποποιημένο PID ελεγκτή ο έλεγχος εμφανίζει μεγαλύτερη απόδοση , εφόσον βελτιωθεί η τόσο συχνή εναλλαγή του σημείου αναφοράς μέσω αλλαγής της περιόδου υπολογισμού αυτού [26].

Κατά αντιστοιχία, για την μελέτη της εγκατάστασης BioTRIC θα χρησιμοποιηθούν οι πίνακες θερμοημερών ψύξης ανά περιοχή της Ελλάδος, όπως αυτές δίνονται στους κανονισμούς του TOTEE.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### 5. Συμπεράσματα

Η χρησιμοποίηση μικρής, οικιακής κλίμακας συστημάτων τριπαραγωγής αποκτά ολοένα μεγαλύτερη δυναμική σε εμπορικές εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, όπως η βιομάζα και οι ηλιακοί συλλέκτες, καθώς και σε εφαρμογές αξιοποίησης απορριπτόμενης θερμότητας κυρίως στην βιομηχανία, με σημαντική συμβολή όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας και το αντίστοιχο οικονομικό όφελος στο σύγχρονο πλαίσιο που θέτει το εμπόριο ρύπων. Η κατασκευή ενός τέτοιου συστήματος και η λειτουργία του σε εργαστηριακό περιβάλλον αφήνει πολλά περιθώρια πειραματισμού και μελέτης της συμπεριφοράς του, με απώτερο στόχο την κατανόηση τεχνικών ζητημάτων, που προκύπτουν κατά την μετάβαση από την θεωρία στην πράξη, καθώς και την διερεύνηση των συνθηκών που οδηγούν στην βελτιστοποίηση του βαθμού απόδοσης.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκαν όλα τα επιμέρους συστήματα και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στην εγκατάσταση BioTRIC του εργαστηρίου Ατμοκινητήρων και Λεβήτων της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, η οποία αποτελεί ένα σύστημα τριπαραγωγής που συνδυάζει υπερκρίσιμο οργανικό κύκλο Rankine για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θέρμανσης, με ένα ψυκτικό κύκλο μηχανικής συμπίεσης, για παραγωγή ψύξης. Το συγκεκριμένο σύστημα προβλέπεται να λειτουργήσει κατά κανόνα κάτω από έντονα μεταβαλλόμενες συνθήκες, εξαιτίας της χρονικής μεταβλητότητας του θερμικού, ηλεκτρικού και ψυκτικού φορτίου στα οποία θα πρέπει να ανταποκρίνεται ανά πάσα στιγμή. Αυτό συμβαίνει διότι το σύστημα είναι σχεδιασμένο για να καλύψει ανάγκες, σε μικρής κλίμακας εφαρμογές, με χρονικά μεταβαλλόμενο χαρακτήρα (π.χ. οικίες). Για παράδειγμα, τις νυχτερινές ώρες ελαχιστοποιείται η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία και μεγιστοποιείται τις μεσημβρινές ώρες. Η απόδοση των διαφόρων συνιστωσών του συστήματος ξεχωριστά (αντλίες, εναλλάκτες θερμότητας, εκτονωτές) όπως και η γενικότερη συμπεριφορά του επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις μεταβαλλόμενες παραμέτρους (στροφές, θερμοκρασίες, πιέσεις, παροχές) που αντιστοιχούν στις διάφορες συνθήκες. Ως αποτέλεσμα του εποπτικού ελέγχου του συστήματος καθίσταται δυνατή η παρακολούθηση της ανταπόκρισής του στις μεταβαλλόμενες συνθήκες, καθώς και η

αναγνώριση του βέλτιστου (ή βέλτιστων) σημείου λειτουργίας, κάτω από το οποίο ο βαθμός απόδοσής του μεγιστοποιείται σε αυτές.

Τα ηλεκτρολογικά σχέδια που παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β αφορούν την τελική συδεσμολογία του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού της μονάδας τριπαραγωγής BioTRIC, η οποία πραγματοποιήθηκε κατά την συναρμολόγηση του ηλεκτρολογικού πίνακα και την σύνδεση των μετρητικών οργάνων. Οι αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν σε αυτά σε σχέση με τα προτεινόμενα βάση μελέτης οδήγησαν και σε αντίστοιχες μεταβολές του προγράμματος προστασίας της μονάδας από τον Προγραμματιζόμενο Λογικό Ελεγκτή (PLC), αλλά και του προγράμματος εποπτείας από την εφαρμογή Διεπαφής Ανθρώπου-Μηχανής (HMI), δηλαδή του προγράμματος του LabVIEW. Οι αλλαγές αυτές δίνονται στο Παράρτημα Α και έχουν εφαρμοστεί ήδη στα προγράμματα παρακολούθησης της μονάδας, ώστε να είναι δυνατή η διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων σε αυτήν με ταυτόχρονη προστασίας της από ακραίες μη επιθυμητές συνθήκες.

Στην παρούσα εργασία δόθηκε έμφαση επίσης και στον έλεγχο που εφαρμόζεται σε συστήματα ψύξης. Στην παρούσα μονάδα τριπαραγωγής δεν υφίσταται κάποιος έλεγχος του VCC κύκλου, καθώς ακόμα και η έναρξη και παύσης λειτουργίας της αντλίας θερμότητας πραγματοποιείται με παρέμβαση του χρήστη. Η μόνη παρέμβαση που πραγματοποιείται στον ψυκτικό κύκλο και δεν προέρχεται από τον χρήστη είναι η προστασία του κατά την παρουσία κάποιου σφάλματος πίεσης. Δεν υπάρχει, επομένως, η δυνατότητα αυτοματοποίησης της λειτουργίας του ψυκτικού κύκλου για την προσαρμογή αυτής στις εκάστοτε επικρατούσες εξωτερικές συνθήκες και άρα η δυνατότητα κάλυψης του μεταβαλλόμενου ψυκτικού φορτίου.

Εναλλακτικά, ένας τρόπος να επιτευχθεί καλύτερη λειτουργία της αντλίας θερμότητας είναι σε πρώτη φάση η χρήση ενός inverter για τον έλεγχο της ταχύτητας του συμπιεστή πράγμα το οποίο επιτρέπει την λειτουργία του ψυκτικού κύκλου σε ενδιάμεσα σημεία. Αυτό θα δώσει στον χρήστη την δυνατότητα να ρυθμίζει χειροκίνητα το επιθυμητό σημείο λειτουργίας αλλά δεν θα αυτοματοποιήσει πλήρως την λειτουργία του κύκλου ώστε αυτός να προσαρμόζεται στο επιθυμητό σημείο αναφοράς.

Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση PID ελέγχου. Σε δεύτερη φάση, λοιπόν, θα μπορούσε μαζί με τον inverter να εγκατασταθεί και ένας PID ελεγκτής στην μονάδα, ο οποίος έχοντας σαν είσοδο το πραγματικό σημείο λειτουργίας του ψυκτικού κύκλου (θερμοκρασίας ατμοποιητή) συγκρίνει με το

επιθυμητό σημείο λειτουργίας (setpoint), το οποίο στην πράξη είναι γύρω στους 6°C, και προσαρμόζει τις στροφές του συμπιεστή. Εναλλακτικά, σε περίπτωση χρήσης PID ελεγκτή πιο οικονομική θα ήταν η χρήση μιας ηλεκτρομηχανολογικής αναλογικής βαλβίδας την οποία και θα ελέγχει ο ελεγκτής για αντιστάθμιση της απόκλισης από το επιθυμητό σημείο λειτουργίας αντί του inverter, ο οποίος αποτελεί και πιο ακριβό εξοπλισμό.

Επομένως, με την εγκατάσταση ενός PID ελεγκτή και μιας αναλογικής βαλβίδας μπορεί με μικρό κόστος να επιτευχθεί αυτοματοποιημένος έλεγχος του ψυκτικού κύκλου. Ιδανική περίπτωση πλήρως αυτοματοποιημένου ελέγχου θα ήταν βέβαια η χρήση δύο PID ελεγκτών όπου ο ένας θα ελέγχει την βαλβίδα και ο δεύτερος τον inverter του συμπιεστή. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορούσε να επιτευχθεί άμεση απόκριση της μονάδας σε μεταβολές του ψυκτικού φορτίου με γρήγορη διόρθωση του σφάλματος, αλλά και με ταυτόχρονη εξασφάλιση ότι το ψυκτικό μέσο θερμαίνεται στην θερμοκρασία υπερθέρμανσης. Παρ'όλα αυτά μια τέτοια λύση είναι οικονομικά πιο απαιτητική και απαιτεί τον ακριβή προσδιορισμό της συμπεριφοράς της εγκατάστασης σε μεταβολές των συνθηκών λειτουργία αυτής, πράγμα το οποίο δεν δικαιολογείται σε μονάδες τέτοιας κλίμακα, όπως είναι μια μονάδα τριπαραγωγής οικιακής χρήσης.

Πέρα από την επιλογή της κατάλληλης στρατηγικής ελέγχου, ένα δύσκολο, ωστόσο, κομμάτι στην χρήση του PID ελέγχου είναι η ορθή ρύθμιση του ελεγκτή, ώστε να ανταποκρίνεται στην συμπεριφορά και τις απαιτήσεις της εκάστοτε μονάδας. Στην προκειμένη περίπτωση, λοιπόν, η μελέτη για την εγκατάσταση PID ελεγκτών στην μονάδα τριπαραγωγής BioTRIC θα απαιτούσε σε αρχικό στάδιο τον προσδιορισμό της συσχέτισης της θερμοκρασίας του ατμοποιητή με την λειτουργία του συμπιεστή και την ροή του ψυκτικού μέσου στον κύκλο (και επομένως, την θέση της βαλβίδας), καθώς επίσης, και την μεταβολή της πρώτης σε αλλαγή της λειτουργίας των δύο στοιχείων ελέγχου. Συμπερασματικά, η ανάπτυξη ενός μοντέλου που θα προσομοιώνει την λειτουργία του ψυκτικού κύκλου είναι προαπαιτούμενη για την ορθή επιλογή της στρατηγικής που θα ακολουθηθεί ώστε να επιτευχθεί αυτοματοποιημένος έλεγχος της μονάδας, αλλά και για την αποτελεσματική ρύθμιση του PID ελεγκτή, λαμβάνοντας πάντα υπόψη και το κόστος κτήσης, εγκατάστασης και συντήρησης του εξοπλισμού που θα επιλεγεί.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. European Climate Foundation, 2010, EURoadmap2050 (<http://www.roadmap2050.euS>)
2. Bailey O, Worrell E. Clean energy technologies: a preliminary inventory of the potential for electricity generation, 2005.
3. Ρουμπεδάκης Τρύφων, Μελέτη της λειτουργίας και σχεδιασμός συστήματος τριπαραγωγής μικρής κλίμακας με χρήση υπερκρίσιμου κύκλου ORC, Αθήνα 2014.
4. Al-Sulaiman F., Dincer I., Hamdullahpur F., Energy and exergy analysis of a biomass trigeneration system using an organic Rankine cycle, Energy 2012, 45 (1), pg.975-985.
5. Μαυρουδής Ι.Μ., Αντλίες και σωληνώσεις, Εκδόσεις Επτάλοφος, Αθήνα 1994.
6. Sinamics V20 Inverter: Operating Instructions, Siemens, 03/2015.
7. Παπαστεργίου Αικατερίνη, Σχεδιασμός και υλοποίηση συστήματος αυτόματου ελέγχου για εγκατάσταση αξιοποίησης απορριπτόμενης θερμότητας από μηχανές πλοίων με τεχνολογία ORC, Αθήνα 2014.
8. Παπαηλιού Κ.Δ., Μαθιουδάκης Κ.Μ., Γιαννάκογλου Κ.Χ., Εισαγωγή στις Θερμικές Στροβιλομηχανές, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2000, σελ.1.1-1.5, 8.1-8.4.
9. <http://www.pneumofore.com/technology/innovation/rotary-vane>
10. <http://www.emersonclimate.com/Documents/FlowControls/pdf/systemprotectors/catalog/ADK-Core-Style-Liquid-Line-Filter-Drier.pdf>
11. <http://www.pneumofore.com/technology/innovation/rotary-vane>
12. <http://www.njatc.org/downloads/trc004en.pdf>
13. [http://en.wikipedia.org/wiki/Gas\\_compressor](http://en.wikipedia.org/wiki/Gas_compressor)
14. Κακάτσιος Ξ., Αρχές Μεταφοράς Θερμότητας και Μάζης, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2006, σελ. 381-2.
15. Bejan A., Kraus A.D., Heat Transfer Handbook, John Wiley & Sons, New Jersey 2003, pg. 798-847.
16. Kuppan T., Heat exchanger design handbook, Marcel Dekker Inc, New York 2000, pg.347-351.

17. Alfa Laval Handbook for plate heat exchangers, The theory behind heat transfer.
18. SIMATIC S7-300 CPU31xC and CPU31x: Technical specifications, Siemens, 03/2011.
19. SIMATIC S7-300 Module data, Siemens, 02/2013.
20. Guide to OPC, MatrikonOPC, 2009.
21. Getting Started with LabVIEW, National Instruments, 2013.
22. ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΕΠΟΠΤΕΙΑΣ ΓΙΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΡΙΠΑΡΑΓΩΓΗΣ, Κωστούλα Στέφανου, Αθήνα 2015.
23. Theory and application of HVAC systems-A review of model predictive control (MPC), Abdul Afram, Farrokh Janabi-Sharifi, 2013.
24. [https://en.wikipedia.org/wiki/PID\\_controller](https://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller)
25. Feedback Structure for Vapor Compression Cycle Systems, Michael C. Keir, Andrew G. Alleyne, 2007.
26. Air- Conditioning PID Control System with Adjustable Reset to Offset Thermal Load Upsets, Takanori Yamazaki, Yuji Yamakawa, Kazuyuki Kamimura and Shigeru Kurosu, 2011.
27. G. Angelino, P.C. Di Paliano, «Multicomponent working fluids for organic rankine cycles (ORCs)», Energy 23 (1998), 449-463
28. O.J. Demuth, R.J. Kochan, «Analyses of mixed hydrocarbon binary thermodynamic cycles for moderate temperature geothermal resources using regeneration techniques», Technical report, Idaho National Engineering Lab, 56 Idaho Falls (USA), 1981. Last accessed on Nov. 13 2012 at: [www.osti.gov/geothermal/servlets/purl/5281969\\_D6H9jj/native/5281696.pdf](http://www.osti.gov/geothermal/servlets/purl/5281969_D6H9jj/native/5281696.pdf)
29. Ανάπτυξη μιας μηχανής οργανικού κύκλου Rankine σε υπερκρίσιμη λειτουργία για ανάκτηση θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας, Ε. Ντάβου Γ. Κοσμάδης Δ. Μανωλάκος, Γ. Παπαδάκης, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
30. Κορρές Γ., Εποπτεία και διαχείριση ενεργειακών συστημάτων, εκδόσεις ΕΜΠ, 2008
31. <http://www.hydra-cell.com/product/D10-hydracell-pump.html>
32. KMC Controls. "Pneumatic to Digital: Open System Conversions", Retrieved 5 October 2015.
33. Σχεδιασμός και κατασκευή συστήματος τριπαραγωγής με αξιοποίηση βιομάζας και εφαρμογή των τεχνολογιών ORC και VCC, Κωνσταντίνος Μπραϊμάκης, Τρύφων Ρουμπεδάκης, Στέφανος Κωστούλας,

Σωτήριος Καρέλλας, Εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων,  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

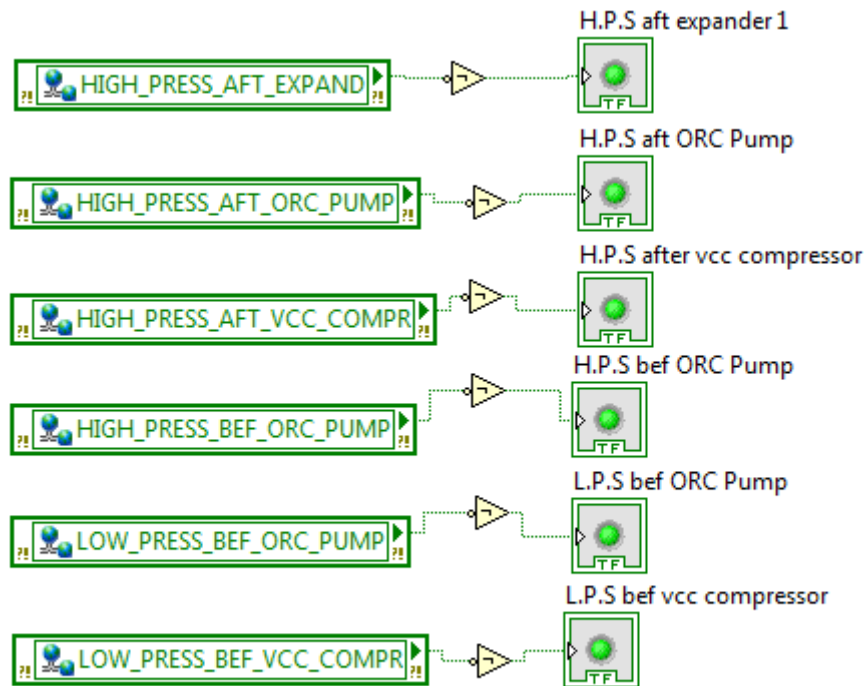
34. Έλεγχος Κινήσεων στα πνευματικά συστήματα, Θεμελής Νικόλαος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τομέας Μηχανολογιών Κατασκευών και αυτόματου ελέγχου , Υδραυλικά και πνευματικά Συστήματα, Σεπτέμβριος 2007.



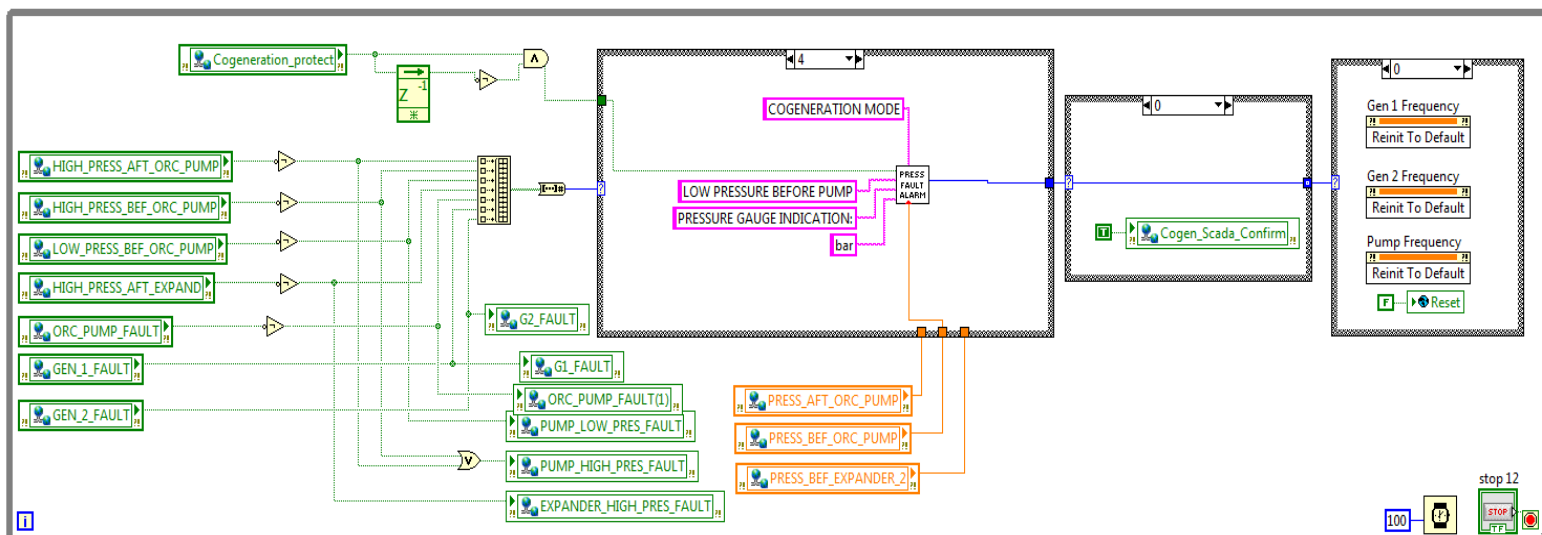
## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α**

**-Μετατροπές στον κώδικα του LabVIEW και  
του STEP 7.**

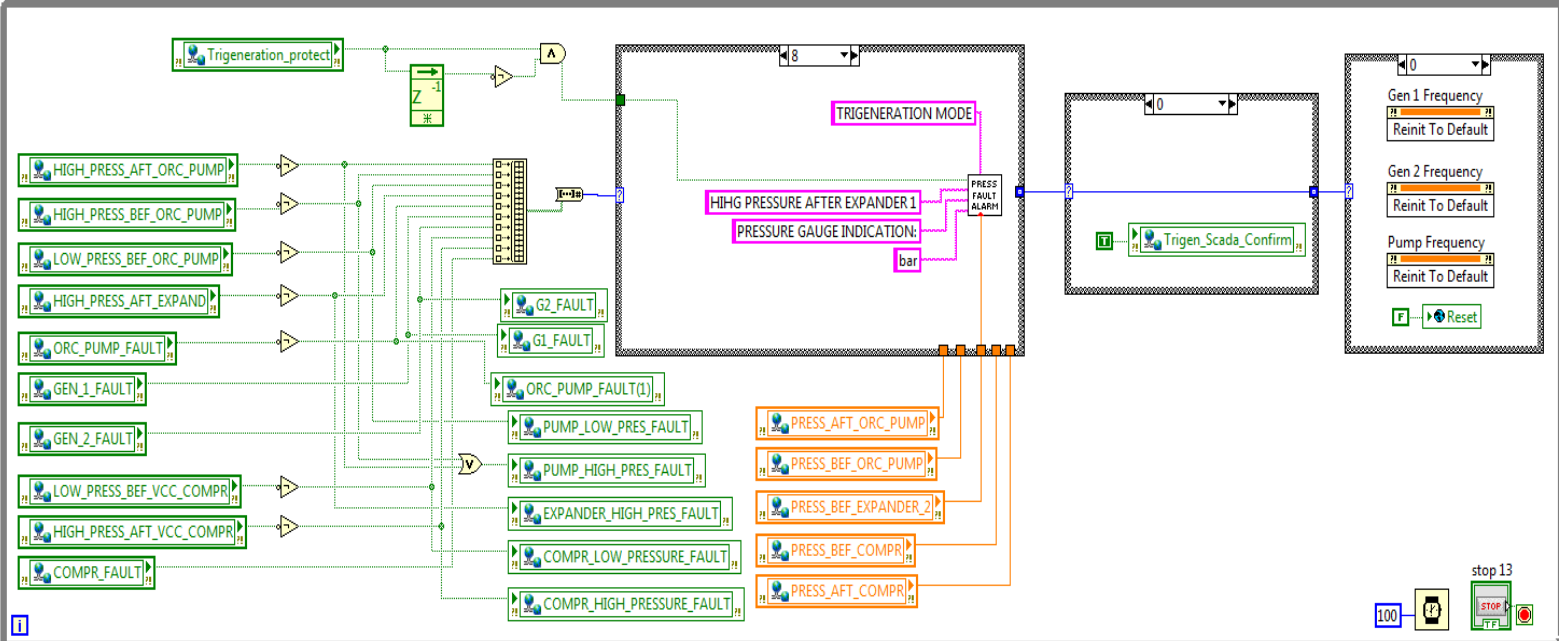
## Μετατροπές στον κώδικα του LabVIEW



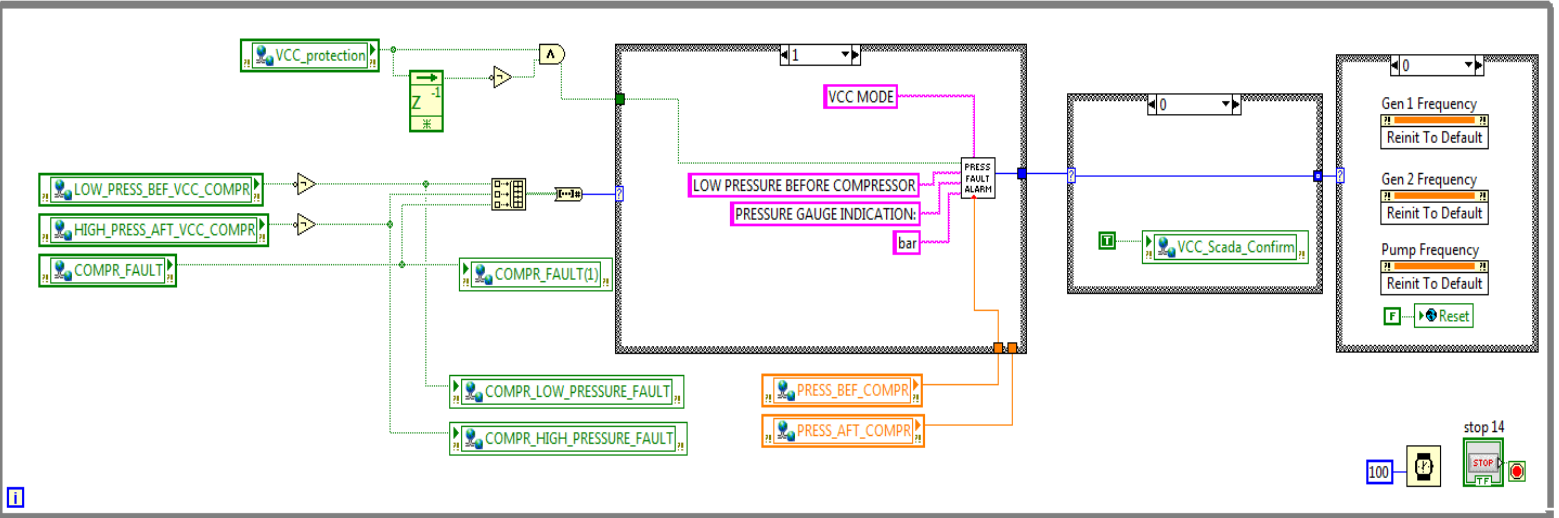
**Σχήμα 1:** Μετατροπές στον κώδικα απεικόνισης κατάστασης ελεγχόμενων συστημάτων.



**Σχήμα 2:** Μετατροπές στον κώδικα ενημέρωσης κατάστασης σφάλματος σε λειτουργία συμπαραγωγής.



*Σχήμα 3: Μετατροπές στον κώδικα ενημέρωσης κατάστασης σφάλματος σε λειτουργία τριπααραγωγής.*



*Σχήμα 4: Μετατροπές στον κώδικα ενημέρωσης κατάστασης σφάλματος σε λειτουργία ψυκτικού κύκλου.*

## Μετατροπές στον κώδικα του STEP 7

FUNCTION "FC3" : Void

TITLE = COGENERATION PROTECTION

{ S7\_Optimized\_Access := 'FALSE' }

VERSION : 0.1

//Συνάρτηση προστασίας της εγκατάστασης και ενημέρωσης χρήστη HMI εφαρμογής  
όταν

//σε λειτουργία συμπαραγωγής εμφανιστεί:

//ή σφάλμα υποπίεσης/υπερπίεσης στην αντλία

//ή σφάλμα υπερπίεσης μεταξύ των εκτονωτών

//ή σφάλμα στον inverter της αντλίας

//ή σφάλμα στους inverter των γεννητριών

BEGIN

NETWORK

TITLE =

ON "LOW\_PRESS\_BEF\_ORC\_PUMP";

ON "HIGH\_PRESS\_BEF\_ORC\_PUMP";

ON "HIGH\_PRESS\_AFT\_ORC\_PUMP";

ON "HIGH\_PRESS\_AFT\_EXPAND";

ON "ORC\_PUMP\_FAULT";

O "GEN\_1\_FAULT";

O "GEN\_2\_FAULT";

S "DB2".Cogeneration\_protect;

A "DB2".Cogeneration\_protect;

R "ORC\_PUMP\_START/STOP";

R "BYPASS\_VALVE\_OPEN/CLOSE";

R "GEN\_1\_START/STOP";

```

R "GEN_2_START/STOP";

R "GEN_1_ENG/DISENG";

R "GEN_2_ENG/DISENG";

S "VCC_VALVE_OPEN/CLOSE";

END_FUNCTION

```

```

FUNCTION "FC4" : Void

```

```

TITLE = TRIGENERATION PROTECTION FUNCTION

```

```

{ S7_Optimized_Access := 'FALSE' }

```

```

VERSION : 0.1

```

```

//Πρόγραμμα προστασίας της εγκατάστασης και ενημέρωσης χρήστη HMI
εφαρμογής όταν

```

```

//σε λειτουργία τριπαραγωγής εμφανιστεί:

```

```

//ή σφάλμα υποπίεσης/υπερπίεσης στην αντλία

```

```

//ή σφάλμα υπερπίεσης μεταξύ των εκτονωτών

```

```

//ή σφάλμα υποπίεσης/υπερπίεσης στον συμπιεστή

```

```

//ή σφάλμα στον inverter της αντλίας

```

```

//ή σφάλμα στους inverter των γεννητριών

```

```

//ή σφάλμα στον soft starter του συμπιεστή (θερμικό κινητήρα)

```

```

BEGIN

```

```

NETWORK

```

```

TITLE =

```

```

ON "LOW_PRESS_BEF_ORC_PUMP";

```

```

ON "HIGH_PRESS_BEF_ORC_PUMP";

```

```

ON "HIGH_PRESS_AFT_ORC_PUMP";

```

```

ON "HIGH_PRESS_AFT_EXPAND";

```

```

ON "LOW_PRESS_BEF_VCC_COMPR";

```

```

ON "HIGH_PRESS_AFT_VCC_COMPR";

ON "ORC_PUMP_FAULT";

O "GEN_1_FAULT";

O "GEN_2_FAULT";

O "COMPR_FAULT";

S "DB2".Trigeneration_protect;

A "DB2".Trigeneration_protect;

R "ORC_PUMP_START/STOP";

R "BYPASS_VALVE_OPEN/CLOSE";

R "GEN_1_START/STOP";

R "GEN_2_START/STOP";

R "GEN_1_ENG/DISENG";

R "GEN_2_ENG/DISENG";

R "COMPR_START/STOP";

R "COMPR_ENG/DISENG";

END_FUNCTION

```

```

FUNCTION "FC5" : Void

```

```

TITLE = VCC PROTECTION FUNCTION

```

```

{ S7_Optimized_Access := 'FALSE' }

```

```

VERSION : 0.1

```

```

//Πρόγραμμα προστασίας της εγκατάστασης και ενημέρωσης χρήστη HMI
εφαρμογής όταν

```

```

//σε λειτουργία μόνο του ψυκτικού κύκλου εμφανιστεί:

```

```

//ή σφάλμα υποπίεσης πριν τον συμπιεστή

```

```

//ή σφάλμα υπερπίεσης μετά τον συμπιεστή

```

```

//ή σφάλμα στον soft starter του συμπιεστή (θερμικό κινητήρα)

```

```
BEGIN
NETWORK
TITLE =
    ON "LOW_PRESS_BEF_VCC_COMPR";
    ON "HIGH_PRESS_AFT_VCC_COMPR";
    O "COMPR_FAULT";
    S "DB2".VCC_protection;
    A "DB2".VCC_protection;
    R "COMPR_START/STOP";
    R "COMPR_ENG/DISENG";
END_FUNCTION
```



## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β**

### **- Ηλεκτρολογικά σχέδια**