



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Μελέτη, ανάλυση, προσομοίωση υβριδικού συστήματος
ανανεώσιμων πηγών ενέργειας διαχείρισης ηλεκτρικής ισχύος για
μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανδρέας Ν. Δαύρος

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Μελέτη, ανάλυση, προσομοίωση υβριδικού συστήματος
ανανεώσιμων πηγών ενέργειας διαχείρισης ηλεκτρικής ισχύος για
μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανδρέας Ν. Δαύρος

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ...^η Ιουλίου 2017

.....
Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σταύρος Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Πάυλος Γεωργιλιάκης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2017

.....

ΔΑΥΡΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ

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

Copyright © Ανδρέας Ν. Δαύρος, 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2016-2017 στον τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Υπεύθυνος κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας ήταν ο Καθηγητής κ. Νικόλαος Χατζηαργυρίου, τον οποίο ευχαριστώ ιδιαιτέρως για την ανάθεσή της καθώς και για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Δρ. κ. Γεώργιο Κιόκε μέλος ΕΕΔΙΠ της σχολής Ικάρων και συνεργάτη ερευνητή του εργαστηρίου ΣΗΕ και την κ. Εριέττα Ζουντουρίδου, Υποψήφια Διδάκτορα ΕΜΠ για την άψογη συνεργασία μας, την υποστήριξη, τις πολύτιμες συμβουλές και την καθοδήγηση που μου παρείχαν καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά την οικογένειά μου και τους φίλους μου, ιδιαιτέρως τους Χρήστο και Κωνσταντίνο Λυκούργο, για τη στήριξη και τη βοήθειά τους σε όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο τη μελέτη, ανάλυση και προσομοίωση υβριδικού συστήματος ανανεώσιμων πηγών ηλεκτρικής ενέργειας σε μη επανδρωμένα αεροσκάφη (uav), σε περιβάλλον Matlab/Simulink. Συγκεκριμένα, αναφερόμαστε στην προσομοίωση ενός dc μικροδικτύου, τροφοδοτούμενο από ΑΠΕ, ικανό να ανταπεξέλθει στις ενεργειακές απαιτήσεις πτήσεως ενός μη επανδρωμένου αεροσκάφους μικρού μεγέθους.

Κύριοι στοχοι ενός τέτοιου τύπου αεροσκάφους είναι η μείωση εκπομπών ρύπων, η βελτιωμένη αυτονομία καθώς και η αθόρυβη λειτουργία κατά την πτήση. Με βάση τα παραπάνω, τα ακόλουθα δύο σενάρια αναφοράς, επιλέχθηκαν προς προσομοίωση. Στο σενάριο ένα εξετάζουμε την παράλληλη χρήση ενός ηλεκτρικού συσσωρευτή με ένα σύνολο φωτοβολταϊκών στοιχείων, ενώ στο δεύτερο σενάριο τα φωτοβολταϊκά αντικαθίστανται από μία συστοιχία κυψελών καυσίμου.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας, που περιλαμβάνει τα κεφάλαια 1 έως 5, παρέχεται το θεωρητικό υπόβαθρο σχετικά με τις πηγές τροφοδοσίας που προαναφέρθηκαν, καθώς και μία σύντομη αναφορά στη χρήση των uav. Αναλυτικότερα, στα κεφάλαια 2 έως 4 παρουσιάζονται οι βασικές πληροφορίες σχετικά με τις κυψέλες καυσίμου, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και τις μπαταρίες αντίστοιχα, ενώ το κεφάλαιο 1 αναφέρεται στα μη επανδρωμένα αεροσκάφη και τα συστήματα πρόωσης αυτών. Το κεφάλαιο 5 αφορά αποκλειστικά τα dc μικροδίκτυα.

Στη συνέχεια ακολουθεί το κύριο μέρος της παρούσας εργασίας, που απαρτίζεται από τα κεφάλαια 6, 7 και 8. Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται αναλυτικά ο υπολογισμός των ενεργειακών απαιτήσεων πτήσης του αεροσκάφους ενώ στο κεφάλαιο 7 παρουσιάζεται η μοντελοποίηση του συνολικού συστήματος για τα δύο σενάρια προσομοίωσης σε περιβάλλον Matlab/Simulink. Ακολούθως, στο κεφάλαιο 8 παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα της μελέτης, τα συμπεράσματα που προέκυψαν καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Λέξεις Κλειδιά: <<Μη επανδρωμένα αεροσκάφη, Μη επανδρωμένα οχήματα, Μη επανδρωμένα εναέρια συστήματα, υβριδικό σύστημα τροφοδοσίας, Matlab/Simulink, dc μικροδύκτιο, προσομοίωση, κυψέλη καυσίμου, φωτοβολταϊκά, ηλεκτρικοί συσσωρευτές, μπαταρίες>>

Abstract

The present thesis aims at the study, analysis and simulation of a hybrid system of renewable energy sources in unmanned aerial vehicles (uav) in Matlab/Simulink environment. Specifically, we refer to the simulation of a dc microgrid, powered by RES, capable of coping with the energy requirements of a small unmanned aircraft.

The main objectives of this type of aircraft are the reduction of pollutant emissions, the improvement of autonomy as well as the in-flight silent operation. Based on the above, the following two reference scenarios were selected for simulation. In the first scenario we examine the parallel use of an electric accumulator with a set of photovoltaic cells, while in the second scenario the photovoltaics are replaced by a fuel cell stack

In the first part of the thesis, which includes chapters 1 to 5, the theoretical background regarding the electrical power sources is provided, as well as a brief reference regarding the use of uavs. More specifically, in chapters 2 to 4 the basic information on fuel cells, photovoltaic cells and batteries are presented, while chapter 1 refers to unmanned aircrafts and their propulsion systems. Chapter 5 deals exclusively with dc micro-networks.

Following up comes the main part of this thesis, which consists of chapters 6, 7 and 8. In chapter 6 the detailed calculation of the aircraft's energy requirements is presented, while chapter 7 presents the modelling of the overall energy system regarding the two simulation scenarios in Matlab/Simulink environment. Subsequently, in chapter 8 the final results of this study are presented, as well as the conclusions reached, with proposals for future research.

Keywords: <<Unmanned aircraft, Unmanned vehicles, Unmanned aerial systems, Hybrid power system, Matlab/Simulink, dc microgrid, simulation, fuel cell, photovoltaics, electric accumulators, batteries>>

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Μη επανδρωμένα αεροσκάφη	17
1.1 Εισαγωγή.....	17
1.2 Ιστορική αναδρομή της πτήσης.....	19
1.3 Ύαν.....	20
1.3.1 Ιστορικά στοιχεία.....	20
1.3.2 Συστατικά μέρη ενός υαν σταθερού εκπετάσματος.....	22
1.3.3 Κατηγορίες μη επανδρωμένων αεροσκαφών σταθερού εκπετάσματος.....	23
1.4 Συστήματα πρόωσης αεροχημάτων.....	24
1.4.1 Συστήματα πρόωσης καυσίμου.....	24
1.4.2 Ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης.....	26
1.4.3 Υβριδικά συστήματα ηλεκτρικής ισχύος.....	30
Κεφάλαιο 2: Κυψέλες καυσίμου	33
2.1 Γενικά στοιχεία.....	33
2.1.1 Εισαγωγή.....	33
2.1.2 Συστατικά Μέρη.....	35
2.1.3 Αρχή Λειτουργίας.....	36
2.2 Τύποι κυψελών καυσίμου.....	37
2.2.1 Αλκαλικές Κυψέλες Καυσίμου (Alcaline Fuel Cells/AFC).....	37
2.2.2 Κυψέλες Καυσίμου Φωσφορικού Οξέως (Phosphoric Acid Fuel Cells/PAFC).....	38
2.2.3 Κυψέλες Καυσίμου Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEMFC).....	39
2.2.4 Κυψέλες Άμεσης μεθανόλης (Direct Methanol Fuel Cells/DM).....	40
2.3 Υδρογόνο.....	43
2.3.1 Γενικά στοιχεία.....	43
2.3.2 Μέθοδοι Παραγωγής Υδρογόνου.....	44
2.3.3 Αποθήκευση, Μεταφορά και Διανομή.....	46
2.4 Κυψέλες Καυσίμου και υαν.....	48
Κεφάλαιο 3: Φωτοβολταϊκά Στοιχεία	51
3.1 Γενικά Στοιχεία.....	51
3.1.1 Εισαγωγή.....	51
3.1.2 Ηλιακή Ενέργεια.....	53

3.1.3 Αξιοποίηση Ηλιακής Ενέργειας και Εφαρμογές	55
3.2 Φωτοβολταϊκά Συστήματα	56
3.2.1 Αρχή Λειτουργίας - Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο	56
3.2.2 Συστατικά Μέρη ενός Φωτοβολταϊκού Συστήματος.....	58
3.3 Ηλιακή Πτήση.....	63
3.3.1 Ιστορική Αναδρομή.....	63
3.3.2 Πλεονεκτήματα και Χρήσεις Ηλιακών Uav.....	65
Κεφάλαιο 4: Ηλεκτρικοί Συσσωρευτές – Μπαταρίες.....	67
4.1 Γενικά στοιχεία	67
4.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη.....	69
4.2.1 Τάση	69
4.2.2 Ρεύμα	69
4.2.3 Εσωτερική Αντίσταση	70
4.2.4 Χωρητικότητα και Ρυθμός Εκφόρτισης	70
4.2.5 Κατάσταση/Στάθμη φόρτισης	70
4.2.6 Βάθος Εκφόρτισης	71
4.2.7 Κατάσταση υγείας.....	71
4.2.8 Αυτοεκφόρτιση και Διάρκεια Ζωής Ραφίου	71
4.2.9 Κύκλος Φόρτισης/Εκφόρτισης και Διάρκεια Ζωής.....	72
4.2.10 Ειδική Ενέργεια/Ενεργειακή Πυκνότητα και Ειδική Ισχύς	72
4.2.11 Ειδική Ισχύς.....	73
4.3 Κατηγορίες ηλεκτρικών συσσωρευτών	73
4.3.1 Πρωτεύουσες Μπαταρίες.....	73
4.3.2 Μπαταρίες εφεδρείας	74
4.3.3 Δευτερεύουσες Μπαταρίες.....	74
4.4 Χρήση ηλεκτρικών συσσωρευτών στην αεροπλοΐα	80
Κεφάλαιο 5: DC Μικροδίκτυα.....	83
5.1 Ηλεκτρικά Δίκτυα.....	83
5.2 Κατηγορίες Ηλεκτρικών δικτύων.....	86
5.2.1 Έξυπνα Δίκτυα.....	87
5.2.2 Μικροδίκτυα	88

5.3 Γενικά στοιχεία ενός DC μικροδικτύου.....	90
5.3.1 Συστατικά Μέρη.....	90
5.3.2 Τάση Λειτουργίας	91
5.4 Ηλεκτρονικά Ισχύος	91
5.4.1 Γενικά Στοιχεία.....	91
5.4.2 DC/DC μετατροπείς.....	92
5.5 Εφαρμογές DC Μικροδικτύων (DCMG)	96
5.5.1 Τηλεπικοινωνιακές Εφαρμογές/Κέντρα Δεδομένων.....	96
5.5.2 Τροφοδοσία κτιρίων	97
5.5.3 Τομέας μεταφορών.....	97
5.5.4 DC μικροδίκτυα σε εναέριες πλατφόρμες.....	98
Κεφάλαιο 6: Ενεργειακές Απαιτήσεις Πτήσεως/Επιλογή Uav.....	101
6.1 Επιλογή UAV	101
6.2 Προσδιορισμός σημαντικών μεγεθών στην αεροπλοΐα.....	103
6.3 Ενεργειακές Απαιτήσεις Πτήσεως	105
6.3.1 Γενικά Χαρακτηριστικά Αποστολής	105
6.3.2 Προσδιορισμός Ενεργειακών Απαιτήσεων.....	106
6.4 Συνοπτική Παρουσίαση	111
Κεφάλαιο 7: Μοντελοποίηση σε περιβάλλον Matlab/Simulink	113
7.1 Σενάρια Προσομοίωσης.....	113
7.2 Παρουσίαση μοντέλων προσομοίωσης	114
7.2.1 Πηγές παραγωγής.....	114
7.2.2 Μετατροπείς DC-DC.....	125
7.2.3 PID Έλεγχος	127
7.2.4 Κεντρικός ζυγός διανομής (DC BUS)	131
7.3.2 Προσδιορισμός επί μέρους παραμέτρων.....	133
7.3.2.1 Σενάριο 2.....	133
7.3.2.2 Σενάριο 1.....	134
7.4 Άλλα στοιχεία του συστήματος και συνολική λειτουργία.....	136
Κεφάλαιο 8: Αποτελέσματα Προσομοιώσεων και Προτάσεις για Μελέτη.....	141
8.1 Αποτελέσματα Προσομοίωσης: Σενάριο 1	141

8.1.1 Συμμετοχή φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	141
8.1.2 Μη Συμμετοχή φωτοβολταϊκών στοιχείων	151
8.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης: Σενάριο 2	156
8.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα	166
8.4 Προτάσεις για μελλοντικές έρευνες	169
Βιβλιογραφία.....	171
Παραρτήματα	177

Περιεχόμενα Εικόνων

Κεφάλαιο 1

ΕΙΚΟΝΑ 1.1: SILENT FALCON / UAV ΜΕ ΧΡΗΣΗ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	18
ΕΙΚΟΝΑ 1.2: ΟΙ ΤΕΣΣΕΡΙΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΠΟΥ ΕΠΙΔΡΟΥΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΤΗΣΗ.....	20
ΕΙΚΟΝΑ 1.3: ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΑΓΟΡΑ UAV (ΔΙΣΕΚΑΤΟΜΜΥΡΙΑ \$)	21
ΕΙΚΟΝΑ 1.4: ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΟΨΗ ΕΝΟΣ UAV	22
ΕΙΚΟΝΑ 1.5: ΤΕΣΣΕΡΑ ΣΤΑΔΙΑ ΕΜΒΟΛΟΦΟΡΑΣ ΜΕΚ	25
ΕΙΚΟΝΑ 1.6: ΤΟΥΡΜΠΙΝΑ ΑΕΡΙΟΥ.....	26
ΕΙΚΟΝΑ 1.7: ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΑΝΑΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (ΔΕΞΙΑ).....	28
ΕΙΚΟΝΑ 1.8: ΓΩΝΙΑ ΠΡΟΣΒΟΛΗΣ ΚΑΙ ΓΩΝΙΑ ΚΛΙΣΕΩΣ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ	30
ΕΙΚΟΝΑ 1.9: ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ	31

Κεφάλαιο 2

ΕΙΚΟΝΑ 2.1: ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	33
ΕΙΚΟΝΑ 2.2: ΜW ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΠΟΥ ΜΕΤΑΦΕΡΘΗΣΑΝ ΚΑΤΑ ΤΑ ΕΤΗ 2008-2015	35
ΕΙΚΟΝΑ 2.3: ΑΛΚΑΛΙΚΗ ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	37
ΕΙΚΟΝΑ 2.4: ΚΥΨΕΛΗ ΦΩΣΦΟΡΙΚΟΥ ΟΞΕΩΣ	38
ΕΙΚΟΝΑ 2.5: ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ	39
ΕΙΚΟΝΑ 2.6: ΚΥΨΕΛΗ ΑΜΕΣΗΣ ΜΕΘΑΝΟΛΗΣ	40
ΕΙΚΟΝΑ 2.7: ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.....	48
ΕΙΚΟΝΑ 2.8: ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ UAV	50
ΕΙΚΟΝΑ 2.9: GLOBAL OBSERVER.....	50

Κεφάλαιο 3

ΕΙΚΟΝΑ 3.1: ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ	51
ΕΙΚΟΝΑ 3.2: ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΔΥΝΑΜΙΚΟΤΗΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ (GW)	52
ΕΙΚΟΝΑ 3.3: ΣΧΕΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΓΗΣ-ΗΛΙΟΥ	53
ΕΙΚΟΝΑ 3.4: ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ	55
ΕΙΚΟΝΑ 3.5: ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΚΑΙ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΟ.....	58
ΕΙΚΟΝΑ 3.6: ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΣΕ SIMULINK/SIMPOWERSYSTEMS.....	59
ΕΙΚΟΝΑ 3.7: ΜΟΡΦΗ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΤΑΣΗΣ-ΙΣΧΥΟΣ/ΡΕΥΜΑΤΟΣ	62
ΕΙΚΟΝΑ 3.8: ΜΟΝΤΕΛΑ SOLAR IMPULSE 2 (ΕΠΑΝΩ) ΖΕΡΗΥΡ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ HELIOS	65
ΕΙΚΟΝΑ 3.9: SOLARA 50.....	66

Κεφάλαιο 4

ΕΙΚΟΝΑ 4.1: ΡΟΗ ΙΟΝΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ	68
ΕΙΚΟΝΑ 4.2: ΠΑΛΜΟΙ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	76
ΕΙΚΟΝΑ 4.3: ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ / ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΛΙΘΙΟΥ / ΛΙΘΙΟΥ ΘΕΙΟΥ	79
ΕΙΚΟΝΑ 4.4: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΜΕΤΑΞΥ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ	81

Κεφάλαιο 5

ΕΙΚΟΝΑ 5.1: ΚΕΝΤΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΚΑΙ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ	84
ΕΙΚΟΝΑ 5.2: ΈΝΑ ΕΞΥΠΝΟ ΔΙΚΤΥΟ	88
ΕΙΚΟΝΑ 5.3: DC ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟ	90
ΕΙΚΟΝΑ 5.4: ΚΥΚΛΩΜΑΤΙΚΟ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΑΝΥΨΩΣΗΣ	93
ΕΙΚΟΝΑ 5.5: ΚΥΚΛΩΜΑΤΙΚΟ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΥΠΟΒΙΒΑΣΜΟΥ	94
ΕΙΚΟΝΑ 5.6: ΚΥΚΛΩΜΑΤΙΚΟ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΥΠΟΒΙΒΑΣΜΟΥ-ΑΝΥΨΩΣΗΣ	95
ΕΙΚΟΝΑ 5.7: ΔΙΕΘΝΗΣ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ (ISS)	99

Κεφάλαιο 6

ΕΙΚΟΝΑ 6.1: ΑΠΟΓΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ	108
---	-----

Κεφάλαιο 7

ΕΙΚΟΝΑ 7.1: ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ	114
ΕΙΚΟΝΑ 7.2: ΜΟΝΤΕΛΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΜΑΤLAB/SIMULINK	115
ΕΙΚΟΝΑ 7.3: ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΙΜΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ	118
ΕΙΚΟΝΑ 7.4: ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΜΑΤLAB/SIMULINK	118
ΕΙΚΟΝΑ 7.5: ΜΠΛΟΚ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) / ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΜΠΛΟΚ (ΔΕΞΙΑ)	119
ΕΙΚΟΝΑ 7.6: ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΜΠΛΟΚ SUBSYSTEM1	120
ΕΙΚΟΝΑ 7.7: ΚΩΔΙΚΑΣ ΣΕ ΜΑΤLAB ΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	123
ΕΙΚΟΝΑ 7.8: ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΤΗΣΗ ΓΙΑ ΥΨΟΜΕΤΡΑ 1KM ΚΑΙ 0.3KM	124
ΕΙΚΟΝΑ 7.9: ΚΥΚΛΩΜΑΤΙΚΟ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΑΝΥΨΩΣΗΣ	125
ΕΙΚΟΝΑ 7.10: ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΑΝΥΨΩΣΗΣ ΤΑΣΗΣ DC/DC ΑΠΟ ΜΙΑ ΑΛΛΗ ΣΚΟΠΙΑ	125
ΕΙΚΟΝΑ 7.11: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ PWM ΔΙΑΚΟΠΤΗ	126
ΕΙΚΟΝΑ 7.12: ΚΥΚΛΩΜΑΤΙΚΟ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΥΠΟΒΙΒΑΣΜΟΥ/ΑΝΥΨΩΣΗΣ	126
ΕΙΚΟΝΑ 7.13: ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΕΝΟΣ PI ΕΛΕΓΚΤΗ	129
ΕΙΚΟΝΑ 7.14: ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ DC/DC BUCK-BOOST / BOOST	130
ΕΙΚΟΝΑ 7.15: Π-ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΜΟΝΤΕΛΟ (ΕΠΑΝΩ) ΚΑΙ Τ-ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΜΟΝΤΕΛΟ (ΚΑΤΩ)	132
ΕΙΚΟΝΑ 7.16: ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΦΟΡΤΙΟΥ	136
ΕΙΚΟΝΑ 7.17: ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΜΠΛΟΚ FLIGHT_PHASE	137
ΕΙΚΟΝΑ 7.18: (ΜΗ) ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΤΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	138
ΕΙΚΟΝΑ 7.19: ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ 2 - ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	138
ΕΙΚΟΝΑ 7.20: ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ 1 - ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	139
ΕΙΚΟΝΑ 7.21: ΜΠΛΟΚ PV_IN_OUT	140

Κεφάλαιο 8

ΕΙΚΟΝΑ 8.1: ΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ Φ/Β	142
ΕΙΚΟΝΑ 8.2: ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟ ΡΕΥΜΑ ΑΠΟ Φ/Β	142
ΕΙΚΟΝΑ 8.3: ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΑΠΟ Φ/Β	142
ΕΙΚΟΝΑ 8.4: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ DC/DC CONVERTER	144
ΕΙΚΟΝΑ 8.5: ΡΕΥΜΑ ΕΞΟΔΟΥ DC/DC CONVERTER	144

ΕΙΚΟΝΑ 8.6: ΙΣΧΥΣ ΣΤΗΝ ΕΞΟΔΟ ΤΟΥ DC/DC CONVERTER	144
ΕΙΚΟΝΑ 8.7: ΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ (36V/25AH)	145
ΕΙΚΟΝΑ 8.9: ΡΕΥΜΑ ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ (36V/25AH)	146
ΕΙΚΟΝΑ 8.10: ΕΞΑΓΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΑΠΟ ΤΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑ (36V/25AH)	146
ΕΙΚΟΝΑ 8.11: ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΣΤΑΘΜΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ	146
ΕΙΚΟΝΑ 8.12: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ DC/DC CONVERTER.....	148
ΕΙΚΟΝΑ 8.13: ΡΕΥΜΑ ΕΞΟΔΟΥ DC/DC CONVERTER.....	148
ΕΙΚΟΝΑ 8.14: ΙΣΧΥΣ ΣΤΗΝ ΕΞΟΔΟ ΤΟΥ DC/DC CONVERTER	148
ΕΙΚΟΝΑ 8.15: ΑΠΕΙΚΟΝΗΣΗ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΚΑΙ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	151
ΕΙΚΟΝΑ 8.16: ΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ (36V/25AH)	152
ΕΙΚΟΝΑ 8.17: ΡΕΥΜΑ ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ (36V/25AH)	152
ΕΙΚΟΝΑ 8.18: ΕΞΑΓΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΑΠΟ ΤΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑ (36V/25AH)	152
ΕΙΚΟΝΑ 8.19: ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΣΤΑΘΜΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ	153
ΕΙΚΟΝΑ 8.20: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ DC/DC CONVERTER.....	154
ΕΙΚΟΝΑ 8.21: ΡΕΥΜΑ ΕΞΟΔΟΥ DC/DC CONVERTER.....	154
ΕΙΚΟΝΑ 8.22: ΙΣΧΥΣ ΣΤΗΝ ΕΞΟΔΟ ΤΟΥ DC/DC CONVERTER	155
ΕΙΚΟΝΑ 8.23: ΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ FC.....	156
ΕΙΚΟΝΑ 8.24: ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟ ΡΕΥΜΑ ΑΠΟ FC	157
ΕΙΚΟΝΑ 8.25: ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΑΠΟ FC	157
ΕΙΚΟΝΑ 8.26: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ DC/DC CONVERTER.....	158
ΕΙΚΟΝΑ 8.27: ΡΕΥΜΑ ΕΞΟΔΟΥ DC/DC CONVERTER.....	159
ΕΙΚΟΝΑ 8.28: ΙΣΧΥΣ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ DC/DC CONVERTER	159
ΕΙΚΟΝΑ 8.29: ΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ (25V/9AH)	160
ΕΙΚΟΝΑ 8.30: ΡΕΥΜΑ ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ (25V/9AH).....	160
ΕΙΚΟΝΑ 8.31: ΕΞΑΓΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΑΠΟ ΤΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑ (25V/9AH)	161
ΕΙΚΟΝΑ 8.32: ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΣΤΑΘΜΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ	161

Περιεχόμενα Πινάκων

Κεφάλαιο 6

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1: ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΒΑΡΟΣ UAV ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	107
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2: ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΡΟΦΙΛ ΠΤΗΣΕΩΣ.....	112

Κεφάλαιο 7

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.1: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ (Α)	117
ΠΙΝΑΚΑΣ 7.2: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ (Β).....	117
ΠΙΝΑΚΑΣ 7.3: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ	122
ΠΙΝΑΚΑΣ 7.4: ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΤΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΟΡΩΝ.....	129
ΠΙΝΑΚΑΣ 7.5: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ DC BUS	131
ΠΙΝΑΚΑΣ 7.6: ΤΙΜΕΣ ΕΠΙ ΜΕΡΟΥΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ	136

Κεφάλαιο 8

ΠΙΝΑΚΑΣ 8.1: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ Φ/Β	143
ΠΙΝΑΚΑΣ 8.2: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
ΠΙΝΑΚΑΣ 8.3: ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ	147
ΠΙΝΑΚΑΣ 8.4: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΣΤΗΝ ΕΞΟΔΟ ΤΟΥ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ	149
ΠΙΝΑΚΑΣ 8.5: ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΠΗΓΩΝ ΣΤΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ.....	150
ΠΙΝΑΚΑΣ 8.6: ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ	153
ΠΙΝΑΚΑΣ 8.7: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΣΤΗΝ ΕΞΟΔΟ ΤΟΥ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ	155
ΠΙΝΑΚΑΣ 8.8: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ FC	158
ΠΙΝΑΚΑΣ 8.9: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ.....	159
ΠΙΝΑΚΑΣ 8.10: ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ	162
ΠΙΝΑΚΑΣ 8.11: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΣΤΗΝ ΕΞΟΔΟ ΤΟΥ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ	164
ΠΙΝΑΚΑΣ 8.12: ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΠΗΓΩΝ ΣΤΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ.....	165
ΠΙΝΑΚΑΣ 8.13: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΚΑΙ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΦΟΡΤΙΟΥ	166

Διαγράμματα

Κεφάλαιο 6

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6.1: ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΣ ΧΡΟΝΟ ΠΤΗΣΗΣ	106
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6.2: ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΠΤΗΣΗΣ	112

Κεφάλαιο 1: Μη επανδρωμένα αεροσκάφη

1.1 Εισαγωγή

Με τον όρο μη επανδρωμένα αεροσκάφη (κοινώς γνωστά ως uav ή drone), αναφερόμαστε σε αεροχήματα, τα οποία διαθέτουν τη δυνατότητα πτήσεως, χωρίς να είναι απαραίτητη η φυσική παρουσία κάποιου χειριστή εντός του αεροσκάφους. Αντιθέτως, ο χειριστής μπορεί να βρίσκεται στο έδαφος, πολλές φορές χιλιόμετρα μακριά. Αποτελούν το σημαντικότερο υποσύστημα του όρου uas (μη επανδρωμένα εναέρια συστήματα), που περιλαμβάνει το σύνολο των στοιχείων, που είναι απαραίτητα για την επιτυχή πραγματοποίηση μίας μη επανδρωμένης πτήσης. Τα στοιχεία αυτά αποτελούν ο επίγειος σταθμός ελέγχου, τα συστήματα επικοινωνιών, το σύστημα προσγείωσης/απογείωσης, το σύστημα πλοήγησης κ.α. Εξωτερικά, ένα uav μπορεί να μοιάζει προς ένα συμβατικό αεροσκάφος σχετικά μικρού μεγέθους, ή με ένα ελικόπτερο. Πιο συγκεκριμένα, έχουμε τρεις τύπους uav.

Τα uav «**πολλών στροφείων**», αποτελούν τη φθηνότερη επιλογή για λήψη φωτογραφιών και βίντεο. Χρησιμοποιούν δύο ή περισσότερους έλικες τοποθετημένους στο εσωτερικό ενός άδειου σωλήνα, ως προωθητικό μηχανισμό, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα καθέτου προσγείωσης/απογείωσης και αιώρησης πάνω από ένα σταθερό σημείο. Χαρακτηρίζονται από περιορισμένη ταχύτητα και αντοχή πτήσης που συνήθως κυμαίνεται από 20 έως 30 λεπτά, έχοντας ως αποκλειστικό φορτίο την κάμερα παρακολούθησης. Λόγω του μικρού μεγέθους τους, η απαραίτητη ενέργεια εξασφαλίζεται από μπαταρίες.

Τα uav «**σταθερού εκπετάσματος**» διαθέτουν φτερά, όπως τα συμβατικά αεροσκάφη, για την εξασφάλιση δυνάμεων άντωσης. Για το λόγο αυτό διαθέτουν πολύ μεγαλύτερη αυτονομία πτήσης και είναι ικανά να καλύψουν μεγάλες αποστάσεις, χωρίς να χρειαστούν ανεφοδιασμό ή επαναφόρτιση των μπαταριών τους. Χρησιμοποιούν κινητήρες καυσίμου ή ηλεκτρικούς κινητήρες, αναλόγως το φορτίο μεταφοράς, το μέγεθος και γενικότερα τις απαιτήσεις πτήσεως. Το βασικό τους μειονέκτημα είναι η δυσκολία στο χειρισμό. Συνήθως διατίθεται ειδικός εξοπλισμός για τις φάσεις απογείωσης και προσγείωσης, όπως ένας καταπέλτης εκτόξευσης, και ένα αλεξίπτωτο αντίστοιχα. Το κόστος τους είναι ιδιαίτερα υψηλό, συγκριτικά με τα uav πολλών στροφείων. Σε αυτή την κατηγορία θα αναφερθούμε εκτενέστερα στη συνέχεια.

Τέλος, εκτός από τα uav πολλών στροφείων, διατίθενται επίσης μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα «**ενός στροφείου**». Ο μηχανισμός πτήσης τους είναι ακριβώς όπως ενός συμβατικού ελικοπτέρου. Δεν έχουν ιδιαίτερη απήχηση στην αγορά, λόγω του υψηλού κόστους αγοράς, της ηχορύπανσης που δημιουργούν και της δυσκολίας στο χειρισμό τους.

Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη βρίσκουν εφαρμογή σε πάρα πολλούς τομείς της ζωής μας. Αρχικά δημιουργήθηκαν για στρατιωτικούς σκοπούς, όπου χρησιμοποιούνται κατά κόρον ακόμα και σήμερα. Αναλαμβάνουν συνήθως αποστολές με υψηλό βαθμό επικινδυνότητας, όπως επιτήρηση του εχθρού, καθώς και αποστολές κατασκοπείας ή εξάλειψης πιθανών απειλών[1]. Τα τελευταία χρόνια, χρησιμοποιούνται επίσης από τους απλούς πολίτες, και από διάφορους κοινωνικούς φορείς. Ιδιαίτερα, σε εφαρμογές ανίχνευσης, αποτελούν τη συνηθέστερη επιλογή, λόγω του χαμηλού κατασκευαστικού αλλά και λειτουργικού κόστους που τα χαρακτηρίζει, συγκριτικά με ένα μικρό συμβατικό αεροσκάφος. Αναφέρουμε ενδεικτικά κάποιες από αυτές τις εφαρμογές, όπως είναι η εξασφάλιση υλικού σχετικά με την ενημέρωση, η ανίχνευση περιβαλλοντικών φαινομένων, η επιτήρηση καλλιεργειών, η παρακολούθηση γραμμών μεταφοράς/αγωγών, η αστυνόμευση καθώς και αποστολές εύρεσης και διάσωσης[2]. Τέλος, χρησιμοποιούνται και στον αρχαιολογικό τομέα. Ένα σημαντικό ζήτημα που έχει αναδειχθεί προσφάτως είναι η ελλιπής νομοθεσία σχετικά με τους κανονισμούς που αφορούν την πτήση UAV από ιδιώτες, γεγονός που οφείλεται κυρίως στο μεγάλο αριθμό των εμπλεκόμενων οργανισμών. Το πρόβλημα αυτό αναμένεται να επιλυθεί εντός των επόμενων ετών.

Μερικά από τα θετικότερα στοιχεία των μη επανδρωμένων αεροσκαφών είναι η βελτιωμένη αυτονομία πτήσης, καθώς και η ευκολία χειρισμού. Υπό την προϋπόθεση ότι το UAV είναι ηλεκτροκίνητο, με χρήση κατάλληλων πηγών τροφοδοσίας, έχουμε σχεδόν μηδαμινές εκπομπές ρύπων, ενώ εξασφαλίζεται και η αθόρυβη λειτουργία κατά την πτήση[3]. Για τους λόγους αυτούς η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αποτελεί μία ιδιαίτερα ελκυστική επιλογή. Βέβαια, λόγω του στοχαστικού χαρακτήρα των ΑΠΕ αλλά και της μεγάλης απόκλισης των ενεργειακών απαιτήσεων του αεροσκάφους κατά τις διάφορες φάσεις της πτήσης, κρίνεται απαραίτητη η παρουσία καποιου τύπου ηλεκτρικού συσσωρευτή, για κάλυψη του επιπρόσθετου φορτίου.



Εικόνα 1.1: Silent Falcon / UAV με χρήση φ/β στοιχείων

1.2 Ιστορική αναδρομή της πτήσης

Η επιθυμία του ανθρώπου να πετάξει χρονολογείται στα αρχαία χρόνια. Πολλοί μύθοι σχετίζονται με αυτή την προσπάθεια, όπως αυτός του Ικάρου, ενώ χιλιάδες απόπειρες επέφεραν θανατηφόρα ή μη αποτελέσματα. Σύμφωνα με τον Αύλο Γέλλιο (130-180 μ.Χ.) ο αρχαίος Έλληνας φιλόσοφος Αρχύτας (430-350 π.Χ) σχεδίασε και κατασκεύασε την πρώτη ιπτάμενη αυτοπροωθούμενη μηχανή, την αποκαλούμενη ως περιστερά[4]. Αποτελούνταν από ένα ελαφρύ αλλά ισχυρό κέλυφος που είχε τη μορφή περιστεριού και έφερε εσωτερικά τη κύστη ενός μεγάλου ζώου. Η αεροδυναμική περιστερά ήταν τοποθετημένη με το άνοιγμα της κύστης προσαρμοσμένο στο ανοικτό άκρο ενός θερμαινόμενου στεγανού λέβητα (ή μιας ισχυρής εμβολοφόρας αεραντλίας). Όταν η πίεση του ατμού ή του αέρα υπερέβαινε τη μηχανική αντοχή της σύνδεσης, η περιστερά εκτοξευόταν και συνέχιζε την πτήση της για μερικές εκατοντάδες μέτρα.

Την ίδια περίπου χρονική περίοδο, χιλιάδες χιλιόμετρα μακριά, στην αρχαία Κίνα οι άνθρωποι πειραματίζονταν με τη χρήση χαρταετών. Εκτός από ψυχαγωγικούς σκοπούς, κάποια είδη εκλεπτυσμένων χαρταετών χρησιμοποιήθηκαν για την παρατήρηση καιρικών συνθηκών, τη μέτρηση αποστάσεων καθώς και για επικοινωνία και αποστολή μηνυμάτων.

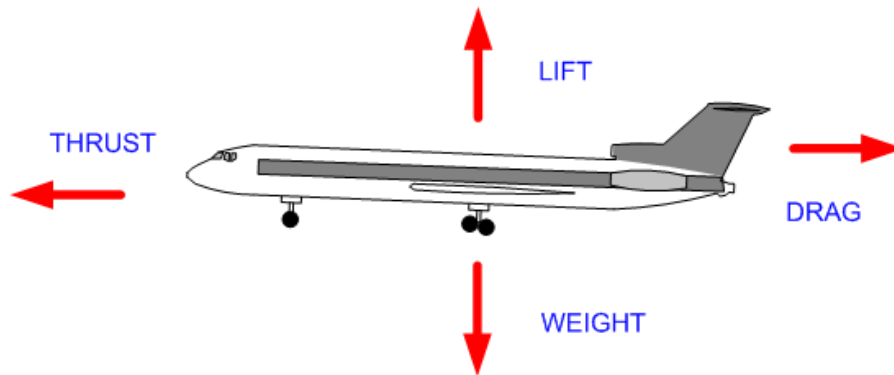
Πολλά χρόνια αργότερα, ο Leonardo Da Vinci (1452-1519 μ.Χ.) θα σχεδιάσει ένα θεωρητικό μοντέλο (ορνιθόπτερο), το οποίο δεν κατασκευάστηκε τότε λόγω των περιορισμένων τεχνολογικών μέσων της εποχής. Πρόκειται για μία μηχανή, που μιμούνταν το μηχανισμό πτήσης, καθώς και το σχήμα των πουλιών. Ο «πιλότος» ξάπλωνε στο εσωτερικό της μηχανής, συγκρατούμενος από ένα δακτύλιο, ενώ τα χέρια του προσαρμόζονταν σε τεχνητά φτερά, για έλεγχο της κατεύθυνσης πτήσης. Η απαιτούμενη ώση θα παρέχονταν από τα πόδια του αναβάτη τα οποία τοποθετούνταν σε δύο κατάλληλα προσαρμοσμένα σπιρούνια.

Το 1853 ο μηχανικός Sir **George Cayley** συνέλαβε και παρουσίασε την ιδέα ενός ανεμόπλανου, προσδιορίζοντας τις τέσσερις δυνάμεις που δρουν κατά την πτήση. Στον κατακόρυφο άξονα έχουμε το βάρος (Weight) και την άνοση (Lift), ενώ στον οριζόντιο άξονα κίνησης επιδρούν η οπισθέλκουσα (Drag), και η ώση (Thrust). Εισηγάγε επίσης σχέδια σχετικά με την άτρακτο, τα φτερά, και τα υπόλοιπα τμήματα του αεροσκάφους, και πώς αυτά σχετίζονται με τη σταθερή και ελεγχόμενη πτήση. Θεωρείται από πολλούς ως το σημαντικότερο πρόσωπο στην ιστορία της αεροναυπηγικής[4].

Έκτοτε, ακολούθησαν πολλές προσπάθειες κατασκευής ιπτάμενων μηχανών, βασισμένων στα προηγούμενα μοντέλα. Οι προσπάθειες αυτές καρποφόρησαν τελικώς το έτος 1903 όταν οι αδελφοί Orville και Wilbur Wright πραγματοποίησαν την πρώτη ελεγχόμενη, μηχανικά προωθούμενη, βαρύτερη του αέρα πτήση. Το σκάφος που κατασκευάστηκε, γνωστό ως διπλάνο Φλάιερ, κατόρθωσε να διασχίσει απόσταση 260 μέτρων σε χρόνο 59 δευτερολέπτων.

Κατά τα επόμενα χρόνια η πρόοδος στον τομέα της αεροναυπηγικής ήταν ραγδαία. Η χρονική περίοδος 1903-1914 χαρακτηρίζεται ως η εποχή πρωτοπορίας στον τομέα της αεροπλοΐας, ενώ από το έτος 1909 η αεροναυπηγική θεωρείται ως ένας σημαντικός κλάδος της μηχανολογίας.

Το έτος 1908 ο αμερικανός εφευρέτης και επιχειρηματίας Elmer Sperry (1860-1930) κατασκεύασε την πρώτη γυροπυξίδα, ένα μηχανισμό προσανατολισμού βασισμένο στο γυροσκόπιο, με δυνατότητα προσαρμογής σε εναέρια πλατφόρμα. Το γεγονός αυτό ήταν το έναυσμα για τη δημιουργία ερευνητικών προγραμμάτων, σχετικά με μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα, αφού πλέον ήταν δυνατός ο προσανατολισμός τους, χωρίς την ανάγκη εξωτερικής παρέμβασης.



Εικόνα 1.2: Οι τέσσερις δυνάμεις που επιδρούν κατά την πτήση

1.3 UAV

1.3.1 Ιστορικά στοιχεία

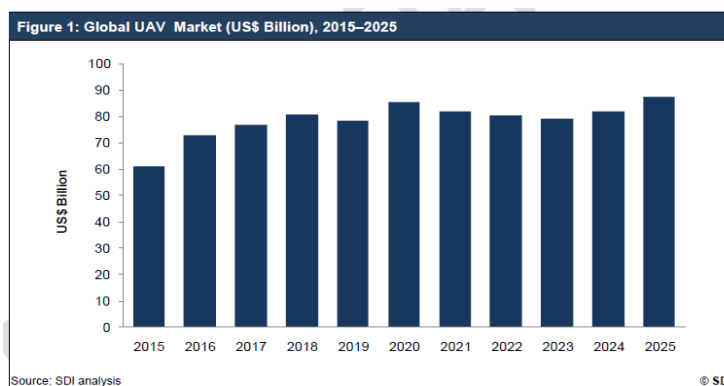
Η ανάπτυξη των μη επανδρωμένων αεροσκαφών είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με το ξέσπασμα των δύο παγκόσμιων πολέμων. Το ενδιαφέρον για την κατασκευή τους εντάθηκε κατά την περίοδο 1914-1918, οπότε και παρουσιάστηκαν τα πρώτα μοντέλα. Χαρακτηρίστηκαν ως «ιπτάμενες βόμβες» και αποτέλεσαν μία πρώιμη μορφή των σημερινών τηλεκτευθυνόμενων πυραύλων. Κατά τη διάρκεια του μεσοπολέμου πραγματοποιείται η κατασκευή ραδιοελεγχόμενων αεροσκαφών, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν τόσο από τις δυνάμεις του Άξονα όσο και από τους Συμμάχους με το ξέσπασμα του δεύτερου παγκοσμίου πολέμου. Κύριος στόχος τους ήταν η παρακολούθηση και εξάλειψη απειλών. Η γνωστότερη σειρά αεροσκαφών (OQ-Radioplane) διατέθηκε από την εταιρία Radioplane Company, με κατασκευή και διάθεση 9000 αεροχημάτων κατά την πενταετία 1940-1945[5]. Πρόκειται για την πρώτη μαζική παραγωγή UAV, με τη σημερινή έννοια, δηλαδή με στόχο διαφορετικό της αυτοκαταστροφής.

Στο διάστημα που ακολούθησε η βιομηχανία παραγωγής μη επανδρωμένων αεροσκαφών κέρδιζε συνεχώς έδαφος καθώς το γενικότερο ψυχροπολεμικό κλίμα της εποχής ανάγκαζε τα στρατιωτικά επιτελεία να δαπανούν μεγάλα ποσά για ερευνητικούς σκοπούς. Τη δεκαετία 1950-1960 αναπτύχθηκαν πολλά προγράμματα, τα οποία όμως δεν κατέληξαν σε μαζική παραγωγή αεροσκαφών, λόγω οικονομικών περιορισμών. Παρόλα αυτά πολλές από τις αρχές κατασκευής που διατυπώθηκαν κατά τα χρόνια αυτά, διατηρούνται έως τις μέρες μας.

Με το ξέσπασμα του πολέμου στο Βιετνάμ (1955–1975), πραγματοποιήθηκαν οι πρώτες επιτυχείς αποστολές αναγνώρισης από υαν, σε περιβάλλον μάχης. Παρά τα πλεονεκτήματα που προσέφερε η χρήση τους, λίγες από τις αρχικές αποστολές κατέληξαν σε επιτυχία. Πολλά από αυτά συνετρίβησαν, ενώ άλλα ακολούθησαν αυθαίρετη πορεία, με αποτέλεσμα να μην επιστρέψουν ποτέ. Επίσης ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα ήταν η ασφαλής και ακριβής προσγείωση του αεροσκάφους. Προς τα τέλη του 1964, τα περισσότερα από αυτά τα προβλήματα είχαν επιλυθεί. Ως απολογισμός των τελευταίων χρόνων του πολέμου αναφέρεται χαρακτηριστικά: 1016 συνολικά υαν AQM-34 Lightning Bugs/Firebees ανέλαβαν περί τις 3435 πτήσεις, κατά τις οποίες μόλις 544 εξ αυτών εξαφανίστηκαν, δίνοντας έτσι ένα συνολικό ποσοστό επιτυχίας περί το 84%[6].

Πρωτοπόροι στην κατασκευή και διάθεση μη επανδρωμένων αεροσκαφών, κατά τα πρώτα χρόνια κυκλοφορίας τους, ήταν το Ηνωμένο Βασίλειο, καθώς και οι Ηνωμένες Πολιτείες, ενώ από το 1970 και μετά το Ισραήλ μπήκε δυναμικά στη βιομηχανία, κατασκευάζοντας κάποια από τα καλύτερα μοντέλα της εποχής συνεχίζοντας κατά τα επόμενα χρόνια, με πυρετώδεις ρυθμούς. Ως αποτέλεσμα, το έτος 1986 παραδόθηκε στο ναυτικό των ΗΠΑ το μοντέλο Pioneer, ένα από τα πιο αξιόπιστα υαν που έχουν κατασκευαστεί ποτέ, το οποίο διατηρήθηκε σε χρήση έως το 2002.

Με το πέρασμα των χρόνων, τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη άρχισαν να χρησιμοποιούνται σε ποικίλους τομείς. Ήδη από το 1986 η οι Ιάπωνες ήταν οι πρώτοι που εφάρμοσαν αυτή την τεχνολογία στον αγροτικό τομέα, κυρίως για ψεκασμό καλλιεργειών. Η παρακολούθηση περιοχών ευαίσθητων σε πυρκαγιές, ήταν η αμέσως επόμενη αποστολή που ανέλαβαν τα υαν. Σώζοντας πολλά χρήματα, και πιθανώς ανθρώπινες ζωές η αγορά ήταν πλέον αρκετά ώριμη, ώστε μεγάλες εταιρίες να ενδιαφέρονται για την απόκτηση υαν συγκεκριμένων προδιαγραφών. Οι τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα των ηλεκτρονικών ελέγχου, καθώς και των ηλεκτρονικών κινητήρων κατέστησαν την έρευνα στο συγκεκριμένο τομέα πιο ανοιχτή. Αρχικά υπήρξε έντονο ακαδημαϊκό ενδιαφέρον, το οποίο με το πέρασμα των χρόνων, οξύνθηκε ακόμη περισσότερο. Επίσης, πολλοί ερασιτέχνες ξεκίνησαν να ασχολούνται με την κατασκευή αυτόνομων πρωτοποριακών κατασκευών, προσθέτοντας συνεχώς δυνατότητες σε ήδη υπάρχουσες πλατφόρμες. Ως αποτέλεσμα η αγορά αναπτύχθηκε ταχύτατα, ενώ προβλέπεται μέχρι το έτος 2025 να έχει ξεπεράσει τα 80 δισεκατομμύρια δολάρια[7].



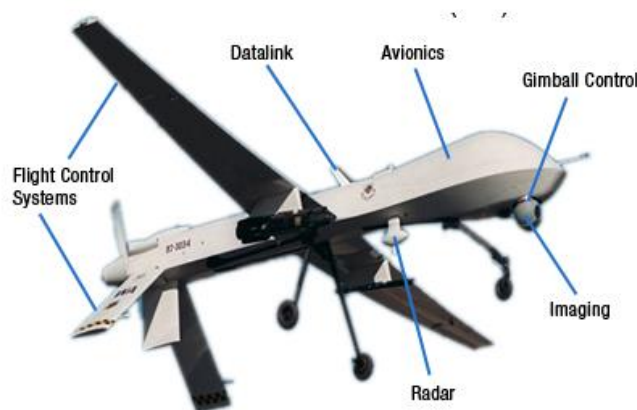
Εικόνα 1.3: Παγκόσμια αγορά UAV (Δισεκατομμύρια \$)

1.3.2 Συστατικά μέρη ενός υαν σταθερού εκπετάσματος

Εξωτερικά, ένα υαν σταθερού εκπετάσματος ομοιάζει προς ένα συμβατικό αεροσκάφος. Εκτός από την άτρακτο και το εκπέτασμα, διακρίνουμε όλα τα επι μέρους στοιχεία τα οποία βοηθούν στη σταθερή και ελεγχόμενη πτήση του, όπως τα πτερύγια, τον εξοπλισμό προσγείωσης, την ουρά, την προπέλλα/έλικα ώθησης και φυσικά την άτρακτο. Στο εσωτερικό αυτής τοποθετείται το βασικό μέρος του συστήματος πρόωσης, το οποίο αποτελείται από τις πηγές τροφοδοσίας και έναν ή περισσότερους κινητήρες.

Αναλόγως τον τύπο του κινητήρα που χρησιμοποιείται μπορεί να έχουμε ηλεκτρικό σύστημα πρόωσης ή σύστημα πρόωσης καυσίμου. Στα ηλεκτροκίνητα υαν συναντάμε επίσης συσκευές για ρύθμιση τάσης και ρεύματος, καθώς και τις απαραίτητες καλωδιώσεις. Μία κεραία, συνήθως στο επάνω μέρος του αεροσκάφους, φροντίζει για το σύστημα ζεύξης δεδομένων. Έτσι έχουμε επικοινωνία μεταξύ του χειριστή, που βρίσκεται στον επίγειο σταθμό ελέγχου και του ελεγκτή πτήσης, ο οποίος αποτελεί τον «εγκέφαλο» του υαν και βρίσκεται συνήθως στην καμπίνα του πιλότου. Αφού λάβει το σήμα, ο ελεγκτής πτήσης, μέσω ενός ηλεκτρονικού ελεγκτή ταχύτητας(ESC) φροντίζει για τη ρύθμιση των στροφών του κινητήρα και την παραγωγή ισχύος από τις διάφορες πηγές τροφοδοσίας. Πλήθος αισθητήρων περιλαμβάνονται επίσης, όπως γυροπυξίδες, AHRS(Attitude Heading Reference Systems), GPS(Global Positioning System) κ.α.

Όσον αφορά το καθαρό φορτίο ενός τέτοιου τύπου αεροσκάφους, αυτό ποικίλλει αναλόγως τη χρήση του. Στη μεγαλύτερη πλειοψηφία τους, τα υαν φέρουν μία υψηλής ανάλυσης κάμερα, προσαρτημένη σε ένα μηχανισμό σταθεροποίησης. Διάφορα οπλικά συστήματα απαντώνται επίσης συχνά σε υαν στρατιωτικής χρήσεως, ενώ ψεκαστήρες και δεξαμενές αγροτικών φαρμάκων περιλαμβάνονται σε αποστολές αγροτικού σκοπού.



Εικόνα 1.4: Εξωτερική όψη ενός UAV

1.3.3 Κατηγορίες μη επανδρωμένων αεροσκαφών σταθερού εκπετάσματος

Ο αριθμός των υαν σε κυκλοφορία, αυξάνεται συνεχώς κατά τα τελευταία χρόνια. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τους ποικίλους τομείς που εξυπηρετεί η χρήση τους, καθιστούν δύσκολη την καθιέρωση ενός καθολικού συστήματος κατηγοριοποίησης. Συνήθως ένα υαν διακρίνεται αναλόγως με φύση των αποστολών που εκτελεί, αλλά και σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του, όπως το βάρος, την αυτονομία πτήσης, το μέγιστο φορτίο απογείωσης, το σύστημα προώθησης κ.α.

Αναλόγως το βάρος του, ένα υαν χαρακτηρίζεται ως «υπέρβαρο», εάν ζυγίζει συνολικά περισσότερο από δύο τόνους. Εάν το βάρος του κυμαίνεται από 200 έως 2000 κιλά, αποκαλείται «βαρύ». Στη συνέχεια ακολουθούν τα «μεσαίου βάρους» υαν, από 50 έως 200 κιλά, ενώ αμέσως μετά έρχονται τα «χαμηλού βάρους», από 5 έως 50 κιλά. Τέλος έχουμε τα «μικρο-υαν» τα οποία ζυγίζουν λιγότερο από 5 κιλά.

Συχνά πολλοί κατασκευαστές επιλέγουν να αναφέρονται στα υαν σύμφωνα με την αυτονομία πτήσης. Εδώ έχουμε τα «μεγάλης αντοχής» υαν, που έχουν δυνατοτητα πτήσης περισσότερο από 24 ώρες, χωρίς ανεφοδιασμό. Ακολουθούν τα «μεσαίας αντοχής», από 5 έως 24 ώρες, ενώ στην τελευταία κατηγορία υπάγονται αυτά με αυτονομία μικρότερη των 5 ωρών, χαρακτηριζόμενα ως «μικρής αντοχής».

Αναφορικά με το μέγιστο υψόμετρο πτήσης ενός αεροσκάφους, διακρίνουμε τα υαν «μεγάλου υψόμετρου», τα οποία πετούν σε ύψος μεγαλύτερο των 10 χιλιομέτρων, ενώ τα «μεσαίου υψόμετρου» μπορούν να εκτελέσουν πτήσεις από 1 έως 10 χιλιόμετρα. Τα μικρότερα από αυτά, χαρακτηρίζονται ως υαν «χαμηλού υψόμετρου», με μέγιστο ύψος αιώρησης το 1 χιλιόμετρο. Η κατάταξη αυτή αναφέρεται κυρίως σε στρατιωτικά υαν[8].

Μία πιο ιδιαίτερη κατηγοριοποίηση γίνεται λαμβάνοντας υπ όψιν το μέγεθος, σε συνδυασμό με τις δυνατότητες του αεροσκάφους. Έτσι έχουμε τις ακόλουθες κατηγορίες[9]:

- **HALE – (High Altitude Long Endurance)**

Αφορά αεροσκάφη που πετούν σε υψόμετρο άνω των 15 χιλιομέτρων, με αυτονομία που ξεπερνάει τις 24 ώρες

- **MALE – (Medium Altitude Long Endurance)**

Το υψόμετρο πτήσης κυμαίνεται μεταξύ 5 και 15 χιλιομέτρων, ενώ η αυτονομία παραμένει υψηλή.

- **TUAV – (Medium Range/Tactical UAV).**

Έχουν αυτονομία πτήσης μεταξύ 100 και 300 χιλιομέτρων και είναι συνήθως μικρότερα και χρησιμοποιούν απλούστερα συστήματα από τα HALE και MALE.

- **Close- Range UAV**

Η αυτονομία τους συνήθως φτάνει μέχρι τα 100 χιλιόμετρα και βρίσκουν μεγάλο εύρος εφαρμογών, ίσως το μεγαλύτερο από όλες τις άλλες κατηγορίες.

- **MUAV – (Mini UAV)**

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει τα μικρότερα uav, με αυτονομία έως 30 χιλιόμετρα

- **MAV – (Micro UAV)**

Πολύ μικρά UAV με εκπέτασμα που δεν ξεπερνάει τα 150 χιλιοστά. Η χρησιμότητά τους έγκειται σε χρήσεις εντός αστικού περιβάλλοντος.

1.4 Συστήματα πρόωσης αεροχημάτων

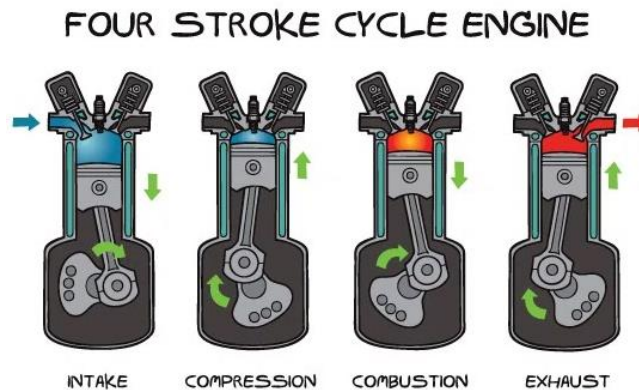
Ένα σύστημα πρόωσης έχει ως στόχο τη μετατροπή της ενέργειας σε μορφή κατάλληλη, ώστε να επιτρέπεται η κίνηση ενός μηχανισμού και κατ'επέκταση ενός οχήματος. Στην περίπτωση των αεροσκαφών, το σύστημα πρέπει να φροντίζει για την παραγωγή δυνάμεων ικανών να υπερνικήσουν την αντίσταση του αέρα και το βάρος τους. Τα επι μέρους στοιχεία ενός τέτοιου συστήματος αποτελούν μία πηγή παραγωγής κάποιας μορφής ενέργειας, ένα μέσο μετατροπής της ενέργειας αυτής σε μηχανικό έργο και ένα μηχανισμό υπεύθυνο για την αξιοποίηση του έργου αυτού προς παραγωγή δυνάμεων πρόωσης και άντωσης. Απαραίτητη είναι επίσης η παρουσία ενός συστήματος ελέγχου, το οποίο φροντίζει για τη διαχείριση της παραγόμενης ισχύος. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.3.2 τα συστήματα αυτά διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: Τα ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης και τα συστήματα πρόωσης καυσίμου.

1.4.1 Συστήματα πρόωσης καυσίμου

Η πλειοψηφία των οχημάτων σήμερα, βασίζεται σε συστήματα αυτής της κατηγορίας. Εδώ η χημική ενέργεια ενός καυσίμου, μέσω της ανάφλεξης αυτού, μετατρέπεται σε μορφή αξιοποιήσιμη από κάποιο μηχανισμό κίνησης. Το καύσιμο είναι συνήθως βενζίνη ή ντίζελ, προϊόντα που προέρχονται από την επεξεργασία πετρελαίου, μία μη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Η καύση τους συνεπάγεται την εκπομπή CO₂ και άλλων παραπροϊόντων που εκκρίνουν στην κατηγορία των αερίων του θερμοκηπίου.

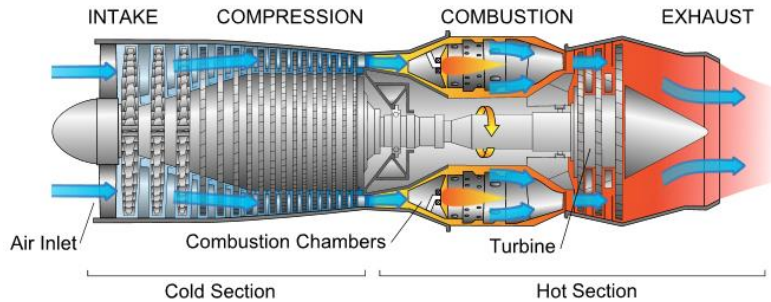
Όσον αφορά τα αεροχήματα και πιο συγκεκριμένα τα αεροσκάφη, κατά κύριο λόγο συναντούμε Μηχανές Εσωτερικής Κάυσης. Μία ΜΕΚ ορίζεται ως μία θερμική μηχανή στο εσωτερικό της οποίας η ανάφλεξη ενός καυσίμου αντιδρά, σε πρώτο στάδιο, με το οξυγόνο που περιέχεται στο θάλαμο καύσης. Δημιουργούνται έτσι θερμά αέρια, η εκτόνωση των οποίων ασκεί την απαραίτητη δύναμη στα κινητά μέρη της μηχανής (συνήθως έμβολα ή πτερύγια). Οι ΜΕΚ διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες, ανάλογα τον τρόπο μετατροπής της θερμικής ενέργειας σε μηχανικό έργο.

Στην πρώτη κατηγορία έχουμε τις εμβολοφόρες μηχανές, που διακρίνονται ανάλογα με τα χρονικά στάδια λειτουργίας τους σε δίχρονες, τετράχρονες και εξάχρονες. Λαμβάνοντας ως παράδειγμα έναν τετράχρονο κινητήρα εσωτερικής κάυσης, συναντάμε τέσσερις φάσεις λειτουργίας. Αρχικά, κατά τη φάση της εισαγωγής, το καύσιμο εισέρχεται στο θάλαμο καύσης, ελεγχόμενο μέσω μίας βαλβίδας. Στη συνέχεια, κατά τη συμπίεση, το έμβολο κινείται προς το άνω νεκρό σημείο (εικόνα 1.5), συμπιέζοντας το μείγμα προς καύση. Ακολουθεί η φάση της ανάφλεξης, όπου με χρήση ενός ηλεκτρικού σπινθήρα έχουμε ανάφλεξη του μείγματος, και παραγωγή ωφέλιμου έργου. Τέλος το έμβολο, που εξ' αιτίας της πίεσης των αερίων καύσης έχει φτάσει στο κάτω νεκρό σημείο, λόγω της αδράνειας του συστήματος αρχίζει να κινείται προς τα άνω, σπρώχνοντας τα αέρια προς την ανοιχτή βαλβίδα εξαγωγής. Ο θερμοδυναμικός κύκλος που περιγράφει την παραπάνω διαδικασία είναι γνωστός ως κύκλος Otto (Nikolaus August Otto/1832-1891). Οι εμβολοφόρες μηχανές αποτελούν τη συχνότερη επιλογή ως μηχανισμός προώθησης των αυτοκινήτων, ενώ απαντώνται επίσης σε μη επανδρωμένα αεροσκάφη μεγάλου μεγέθους.



Εικόνα 1.5: Τέσσερα στάδια εμβολοφόρας MEK

Στη δεύτερη κατηγορία τοποθετούνται οι λεγόμενες περιστροφικές μηχανές ή στρόβιλοι. Κοινώς γνωστές ως τουρμπίνες αερίου, η αρχή λειτουργίας τους είναι ίδια με αυτή ενός ατμοηλεκτρικού σταθμού παραγωγής, με χρήση ατμοσφαιρικού αέρα αντί για νερό. Με τη βοήθεια ενός συμπιεστή, αυξάνεται αρχικά η πίεση του εισερχόμενου αέρα, ενώ στη συνέχεια πραγματοποιείται η ανάμιξη αυτού με κάποιο καύσιμο. Ακολουθεί η ανάφλεξη (combustion) του μίγματος, κατά την οποία δημιουργείται ροή αερίων υψηλής θερμοκρασίας. Τα αέρια αυτά εισέρχονται στην τουρμπίνα, όπου η εκτόνωση τους έως την πίεση εξάτμισης παράγει μηχανικό έργο στον άξονα του στρόβιλου. Το παραγόμενο έργο αξιοποιείται επίσης προς κίνηση του συμπιεστή αλλά και άλλων μηχανισμών. Η ενέργεια που δε χρησιμοποιείται αποβάλλεται υπό τη μορφή καυσαερίων υψηλής θερμοκρασίας και ταχύτητας. Αναλόγως την εφαρμογή του στρόβιλου, καθορίζεται ο βαθμός αξιοποίησης της ενέργειας αυτής, ώστε να μεγιστοποιείται η απόδοση του συστήματος. Από θερμοδυναμικής σκοπιάς, η διαδικασία περιγράφεται από τον κύκλο Brayton (George Brayton/1830-1892)[10]. Στην κατηγορία αυτή υπάγονται πολλές από τις γνωστότερες τεχνολογίες προώθησης αεροσκαφών, όπως οι κινητήρες turboprop και οι Jet κινητήρες.



Εικόνα 1.6: Τουρμπίνα αερίου

Το μεγάλο μειονέκτημα των μηχανών εσωτερικής καύσης, παρά τη μεγάλη ισχύ που παρέχουν, είναι ο συνολικός βαθμός απόδοσης τις χαρακτηρίζει, ο οποίος δεν ξεπερνά το 35%. Εκτός αυτού, η λειτουργία τους συνεπάγεται άμεσα την εκπομπή αερίων βλαβερών προς το περιβάλλον. Οι παράγοντες αυτοί, σε συνδυασμό με τη ραγδαία αύξηση του κόστους καυσίμου, οδήγησαν τους κατασκευαστές στην αναζήτηση εναλλακτικών τεχνολογιών πρόωσης οχημάτων[11]. Ιδιαίτερα, όσον αφορά τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη μικρού αλλά και μεσαίου μεγέθους, εξετάστηκε εξ αρχής η δυνατότητα ενσωμάτωσης τεχνολογιών ηλεκτρικής πρόωσης, με στόχο μία πιο οικονομική και φιλική προς το περιβάλλον πτήση.

1.4.2 Ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης

1.4.2.1 Γενικά στοιχεία

Τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης, παρουσιάζουν διαφορές συγκριτικά με τα συστήματα πρόωσης καυσίμου. Ενώ η γενική αρχή λειτουργίας ομοιάζει, από τη σκοπιά πως έχουμε χρήση ενός κινητήρα και μετατροπή ενέργειας από μία μορφή (χημική/ηλεκτρική) σε μία άλλη (μηχανική), κάθε σύστημα παρουσιάζει θετικά και αρνητικά στοιχεία. Σε ένα ηλεκτροκίνητο όχημα δε θα συναντήσουμε κάποιο χώρο προς αποθήκευση καυσίμου (με εξαίρεση την τροφοδοσία από κυψέλες καυσίμου, στις οποίες θα αναφερθούμε εκτενέστερα στη συνέχεια). Σε συνδυασμό με χρήση ηλεκτρικών κινητήρων, αντί των ΜΕΚ, το βάρος ενός ηλεκτροκίνητου οχήματος μειώνεται σημαντικά. Επίσης, η μετατροπή ενέργειας από ηλεκτρική σε μηχανική μορφή είναι μια διαδικασία πιο φιλική προς το περιβάλλον και ασφαλέστερη από την καύση ορυκτών καυσίμων. Από την άλλη πλευρά, η χρήση πετρελαϊκών προϊόντων υψηλής ενεργειακής πυκνότητας παρέχει υψηλές ποσότητες ενέργειας στο σύστημα για μεγάλα χρονικά διαστήματα, ενώ επιταγχύνονται κατά πολύ και οι διαδικασίες ανεφοδιασμού του οχήματος.

Ένα ηλεκτρικό σύστημα πρόωσης αποτελείται από τα κάτωθι βασικά στοιχεία. Αρχικά, μία πηγή ρεύματος ή τάσης φροντίζει για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Το ρόλο αυτό αναλαμβάνουν συνήθως μπαταρίες, υπερπυκνωτές, φωτοβολταϊκά πάνελ, κυψέλες καυσίμου

ή κάποιας άλλης μορφής ΑΠΕ, όπως οι ανεμογεννήτριες. Συνήθως η τάση και το ρεύμα που παράγονται από την πηγή χρειάζονται κάποια προσαρμογή, για τη μεταφορά τους μέσω ενός κεντρικού ζυγού κατάλληλων προδιαγραφών, προς τροφοδοσία του φορτίου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται διαφόρων ειδών μετατροπείς. Τέτοιοι μπορεί να είναι: μετατροπείς συνεχούς/συνεχούς, ανορθωτές ή αντιστροφείς. Προς επικοινωνία των επι μέρους στοιχείων, περιλαμβάνονται οι απαραίτητες καλωδιώσεις, οι οποίες καταλήγουν στον πίνακα ελέγχου του συστήματος. Ένας κεντρικός ελεγκτής (κύκλωμα βασισμένο σε έναν μικροεπεξεργαστή) συνδέεται επίσης στον πίνακα και αναλαμβάνει την εποπτεία του συνολικού συστήματος, δηλαδή παρακολουθεί τα διάφορα μεγέθη, που λαμβάνονται από αισθητήρες (συνθήκες πίεσης, θερμοκρασίας κλπ) και φροντίζει για τη διατήρησή τους εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Μέσω αυτού είναι δυνατή η αποστολή εντολών στο σύστημα (αύξηση του επιπέδου παραγωγής των πηγών, ή μεταβολή της συνεισφοράς αυτών στο συνολικό φορτίο κλπ). Τέλος, η παραγόμενη ισχύς καταλήγει σε κάποιου τύπου ηλεκτρικό κινητήρα, ο οποίος φροντίζει για την κίνηση του μηχανισμού πρόωσης. Φυσικά υπάρχει επικοινωνία μεταξύ του κεντρικού ελεγκτή και του ελεγκτή που περιλαμβάνεται στο σύστημα ρύθμισης στροφών του κινητήρα.

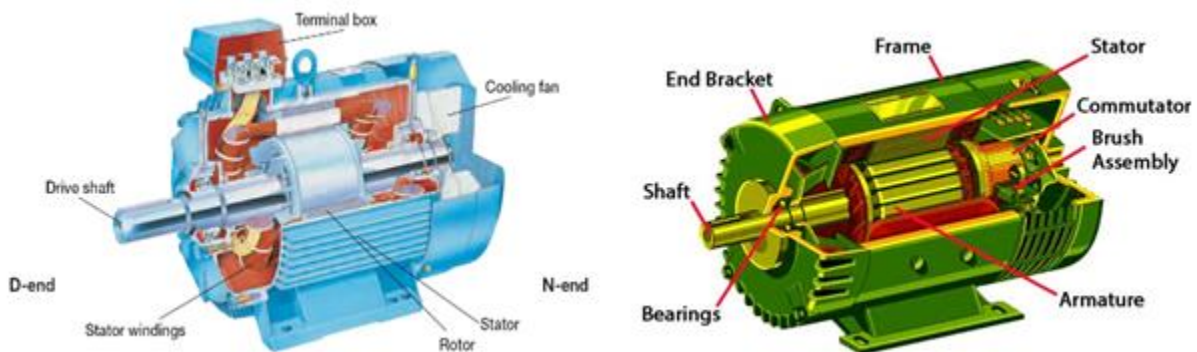
1.4.2.2 Ηλεκτρικοί κινητήρες και μηχανισμοί πρόωσης

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες αποτελούν υποκατηγορία των στρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών και χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία περιστροφικής κίνησης, από ηλεκτρική ενέργεια. Η βασική αρχή στην οποία στηρίζεται η λειτουργία τους συνοψίζεται ως εξής: όταν ένας αγωγός διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, ενώ βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο, αναπτύσσεται σε αυτόν δύναμη που τείνει να τον κινήσει προς ορισμένη κατεύθυνση. Χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τους κινητήρες εναλασσόμενου ρεύματος (ac) και τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος (dc).

Οι κινητήρες εναλασσόμενου ρεύματος αποτελούνται από δύο βασικά στοιχεία: ένα σταθερό κοίλο κύλινδρο (στάτη) και ένα στρεφόμενο κύλινδρο (δρομέα) τοποθετημένο στο εσωτερικό του στάτη. Οι δύο κύλινδροι διαχωρίζονται μεταξύ τους από ένα μικρό διάκενο αέρα. Η ηλεκτρική ενέργεια τροφοδοσίας ενός κινητήρα τέτοιου τύπου παρέχεται στο κύριο τύλιγμα της μηχανής (τύλιγμα τυμπάνου), το οποίο μπορεί να βρίσκεται είτε στο στάτη είτε στο δρομέα. Το μαγνητικό κύκλωμα συμπληρώνεται μέσα από το σιδηρομαγνητικό υλικό του άλλου βασικού στοιχείου. Εκεί τοποθετείται το τύλιγμα διέγερσης ή πεδίου. Τα τυλίγματα τυμπάνου και διέγερσης αποτελούνται από σύρματα χαλκού μονωμένα με βερνίκι. Όσον αφορά το υλικό κατασκευής του στάτη και του δρομέα προτιμάται η χρήση κάποιου σιδηρομαγνητικού υλικού, ώστε να καθίσταται επαρκώς μικρή η μαγνητική αντίσταση των δρόμων της μαγνητικής ροής. Κλείνοντας με το φυσικό κομμάτι, το εσωτερικό του στάτη κατασκευάζεται σε μορφή μονωμένων μεταξύ τους ελασμάτων, προς ελάττωση των απωλειών δινορευμάτων[12]. Περιγράφοντας εν συντομία τα γενικά χαρακτηριστικά λειτουργίας της μηχανής, καθώς τροφοδοτούμε το τύλιγμα του στάτη με εναλασσόμενο ρεύμα, παρατηρείται μεταβολή του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του, όπου και οφείλεται η άσκηση ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων στο τύλιγμα του δρομέα, οι οποίες οδηγούν στην περιστροφική κίνηση αυτού. Αν η μέση ταχύτητα περιστροφής είναι ευθέως ανάλογη της συχνότητας της

εφαρμοζόμενης εναλασσόμενης τάσης ο κινητήρας χαρακτηρίζεται ως σύγχρονος, ενώ στην αντίθετη περίπτωση ως ασύγχρονος.

Στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος, ο στάτης αποτελείται από το ζύγωμα, δηλαδή το εξωτερικό προστατευτικό τμήμα της μηχανής και τους μαγνητικούς πόλους, οι οποίοι στερεώνονται στο ζύγωμα και κατασκευάζονται από ελατό σίδηρο ή χάλυβα. Το υλικό κατασκευής τους εξαρτάται από το αν έχουμε κινητήρα με τυλίγματα στους πόλους, ή μονίμων μαγνητών. Βασική διαφορά με τους κινητήρες εναλασσόμενου ρεύματος, είναι η παρουσία του συλλέκτη και των ψυκτρών. Αναφορικά με το συλλέκτη, πρόκειται περί μίας κυλινδρική διάταξης μονωμένων μεταλλικών επιφανειών, η οποία τοποθετείται στον άξονα της μηχανής, ενώ από τις δύο επιφάνειες αυτού, ξεκινούν τα δύο άκρα του τυλίγματος του δρομέα. Βρίσκεται σε επαφή με τις ψύκτρες, που φροντίζουν ώστε ο δρομέας να τροφοδοτείται με ρεύμα κατάλληλης πολικότητας από την πηγή. Πιο συγκεκριμένα, ο ρόλος του συστήματος συλλέκτη-ψυκτρών είναι η περιοδική αντιστροφή του ρεύματος τροφοδοσίας. Το ρεύμα αυτό μεταφέρεται στο τύλιγμα του δρομέα και ακολουθείται η ίδια διαδικασία με αυτή των κινητήρων εναλασσόμενου ρεύματος.



Εικόνα 1.7: Κινητήρας αναλασσόμενου ρεύματος (αριστερά) και συνεχούς ρεύματος (δεξιά)

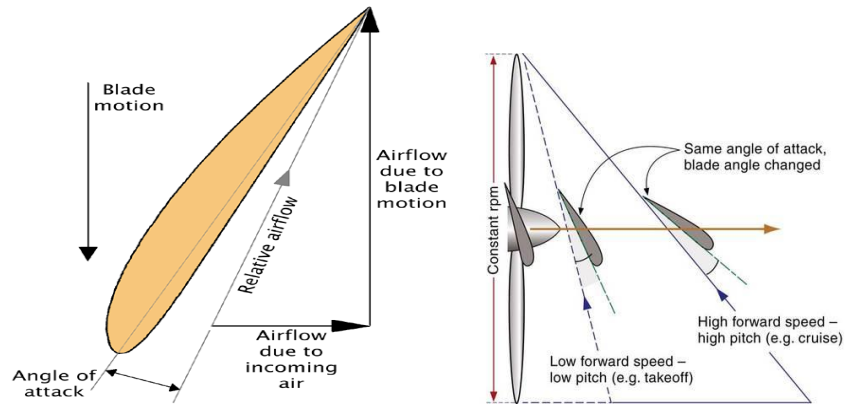
Παρά την ευρεία αποδοχή των κινητήρων συνεχούς ρεύματος κατά τα πρώτα χρόνια κυκλοφορίας τους στην αγορά, γεγονός που οφειλόταν κατά κύριο λόγο στην απλότητα της διαδικασίας κατασκευής τους, οι ac κινητήρες έχουν ανέλθει δυναμικά στο προσκήνιο τις τελευταίες δεκαετίες. Το γεγονός αυτό οφείλεται αφενός στα θέματα που ανακύπτουν σχετικά με τις διαδικασίες συντήρησης των DC κινητήρων (κυρίως λόγω της παρουσίας ψυκτρών), αφετέρου δε στην αξιόπιστη λειτουργία, την υψηλή πυκνότητα ισχύος που παρέχουν και τον υψηλό βαθμό απόδοσης που χαρακτηρίζει τους AC κινητήρες[13]. Έτσι, με την ανάπτυξη στην τεχνολογία των κινητήρων εναλασσόμενου ρεύματος, οι dc κινητήρες έχουν περιοριστεί κατά τα τελευταία χρόνια σε εφαρμογές μικρής κλίμακας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η αυτοκινητοβιομηχανία, όπου οι μεγαλύτερες εταιρίες παραγωγής ηλεκτρικών/υβριδικών οχημάτων, όπως η Tesla ή η Nissan, χρησιμοποιούν κατά βάση κινητήρες εναλασσόμενου ρεύματος.

Μία νέα τεχνολογία, αυτή των brushless dc κινητήρων έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια και βρίσκει ευρεία αποδοχή σε πλήθος εφαρμογών. Πρόκειται ουσιαστικά περί κινητήρων

συνεχούς ρεύματος μονίμων μαγνητών. Το σύστημα ελέγχου αυτού του τύπου κινητήρα αποτελείται από ένα μικροεπεξεργαστή, με την ενσωμάτωση ενός αντιστροφέα, ο οποίος καθιστά περιττή την παρουσία ψυκτρών και συλλέκτη με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο χρόνος λειτουργίας/διάρκεια ζωής της μηχανής. Χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης, που κυμαίνεται από 85%~95%. Τα στοιχεία αυτά σε συνδυασμό με τον υψηλό λόγο ισχύος-βάρους, καθιστούν τους brushless dc κινητήρες τη δημοφιλέστερη επιλογή σε αεροχήματα. Σε εφαρμογές αυτού του τύπου, ανεξαρτήτως της τεχνολογίας του κινητήρα που επιλέγεται, ο άξονάς του συνδέεται στη συνέχεια με τον εναλλάκτη του συστήματος δημιουργώντας έτσι μία ανεξέλεγκτη ισχύ, η οποία περνάει από ένα ρυθμιστή ανορθωτή και τροφοδοτεί το μηχανισμό προώθησης του αεροσκάφους. Ο μηχανισμός περιλαμβάνει συνήθως έλικες/προπέλλες, δηλαδή δύο ή περισσότερα πτερύγια συνδεδεμένα σε έναν κοινό κόμβο περιστροφής. Η διατομή των πτερυγίων ομοιάζει σχηματικά προς αυτή των φτερών, με τις δύο πλευρές τους να είναι καμπυλωτές, ενώ το πλάτος τους παρατηρείται μεγαλύτερο προς το κέντρο από ότι στα άκρα.

Η αρχή λειτουργίας ενός συστήματος κίνησης, με χρήση έλικα βασίζεται στον τρίτο νόμο του Νεύτωνα, γνωστό και ως νόμο κίνησης των σωμάτων. Αναλύοντας περισσότερο, με την περιστροφική κίνηση των πτερυγίων, δημιουργείται διαφορά πίεσης μεταξύ των ρευμάτων αέρα στο εμπρόσθιο και το πίσω μέρος του έλικα. Η διαφορά αυτή εξαρτάται από το υλικό κατασκευής, τον αριθμό, το σχήμα και τη γωνία κλίσης των πτερυγίων. Στην άνω πλευρά του πτερυγίου δημιουργείται θετική πίεση, που έχει ως αποτέλεσμα το «τραβηγμα» του αέρα, ενώ στην κάτω πλευρά του πτερυγίου έχουμε τη δημιουργία αρνητικής πίεσης, ή αλλιώς «σπρώξιμο» του αέρα προς τα πίσω. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει ταυτοχρόνως σε όλα τα πτερύγια, ενώ η ροή του αέρα αυξάνεται με την άυξηση της ταχύτητας περιστροφής. Έτσι επιτυγχάνεται η κίνηση του αεροσκάφους.

Τόσο η **γωνία προσβολής (Angle Of Attack)** όσο και η γωνία κλίσης των πτερυγίων (**Pitch**) παίζουν σημαντικό ρόλο στην απόδοση του συστήματος. Ως γωνία προσβολής ορίζεται η γωνία μεταξύ της γραμμής αναφοράς ενός σώματος (π.χ. τη χορδή μίας αεροτομής) και του διανύσματος που αντιπροσωπεύει τη σχετική κίνηση μεταξύ του σώματος αυτού και του ρευστού/αερίου μέσα στο οποίο κινείται. Με αύξηση της γωνίας προσβολής αυξάνονται οι τιμές των δυνάμεων άντωσης και οπισθέλκουσας έως την κρίσιμη τιμή της γωνίας, οπότε και επέρχεται απώλεια στήριξης του αεροσκάφους. Διατηρώντας την προπέλλα στην κατάλληλη γωνία προσβολής, εξασφαλίζεται η μέγιστη ώση του αεροσκάφους για την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. Η γωνία αυτή ρυθμίζεται μέσω της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα. Όσον αφορά τη γωνία κλίσης των πτερυγίων, μία προπέλλα εκπίπτει σε μία εκ των κάτωθι κατηγοριών. Στις προπέλλες σταθερής κλίσης (fixed-pitch), τα πτερύγια είναι μονίμως συνδεδεμένα στον κόμβο σύνδεσης (hub), και η γωνία τους δεν μπορεί να μεταβληθεί. Αντιθέτως, στις προπέλλες ελεγχόμενης κλίσης (controllable pitch) είναι δυνατή η κίνηση των πτερυγίων περί τον κατακόρυφο άξονα, κατά τη διάρκεια της πτήσης, και έτσι η μεταβολή της γωνίας κλίσεως. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια μηχανικών και υδραυλικών διατάξεων και οδηγεί σε αύξηση του βαθμού απόδοσης του συνολικού συστήματος. Τέλος διατίθενται και προπέλλες ρυθμιζόμενες στο έδαφος, όπου η γωνία κλίσης μπορεί να αλλάξει υπό την πρϋπόθεση ότι το αεροσκάφος είναι προσεδαφισμένο[14].



Εικόνα 1.8: Γωνία προσβολής και γωνία κλίσεως πτερυγίων

Ένας ακόμη προωθητικός μηχανισμός, που συναντάμε κυρίως σε ηλεκτροκίνητα υαν μικρού μεγέθους, είναι αυτός των ducted fans. Κάθε μονάδα του μηχανισμού αυτού αποτελείται από έναν έλικα, στο εσωτερικό ενός άδειου σωλήνα, όπως αναφέρθηκε πρωτίτερα. Με κατάλληλη τοποθέτηση αυτών στο αερόχημα παρέχεται η δυνατότητα καθέτου προσγείωσης και απογείωσης αυτού. Συγκριτικά με τη χρήση μίας συμβατικής προπέλλας, η τεχνολογία αυτή είναι περισσότερο αποδοτική και λιγότερο θορυβώδης. Βέβαια πρόκειται περί μίας πιο περίπλοκης κατασκευής, που αυξάνει επιπλέον το κόστος και το βάρος του οχήματος. Η τεχνολογία των ducted fans χρησιμοποιείται και σε αεροσκάφη μεγαλύτερου μεγέθους, όπου τοποθετείται επιπλέον μία άτρακτος στο κέντρο του σωλήνα και ένας μηχανισμός σταθεροποίησης της ροής του αέρα.

1.4.3 Υβριδικά συστήματα ηλεκτρικής ισχύος

Κατά τα τελευταία χρόνια, παρατηρείται αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας όλων των μορφών, σε παγκόσμιο επίπεδο. Το γεγονός αυτό οδηγεί στη σταδιακή εξάντληση των αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων καθώς και σε αύξηση των τιμών τους. Ως αποτέλεσμα, το ενδιαφέρον σχετικά με την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές αυξάνεται συνεχώς[15]. Παρά τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, απαραίτητη προϋπόθεση για τη διασύνδεσή τους σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ισχύος είναι η παρουσία κάποιου τύπου ηλεκτρικού συσσωρευτή. Το γεγονός αυτό καθίσταται αναγκαίο λόγω της στοχαστικής συμπεριφοράς των ΑΠΕ, γεγονός που προκύπτει από την άμεση συσχέτιση μεταξύ της παραγόμενης ισχύος και των καιρικών συνθηκών. Έτσι έχουμε τη δημιουργία ενός υβριδικού συστήματος ηλεκτρικής ισχύος.

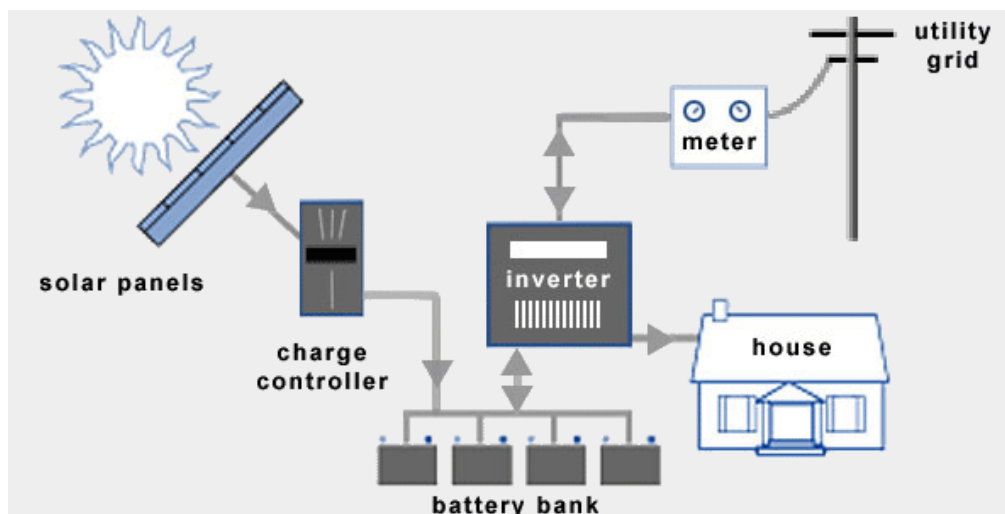
Τα συστήματα αυτά συμπεριλαμβάνουν τη χρήση δύο ή περισσότερων πηγών παραγωγής ενέργειας, ενώ παράλληλα ρυθμίζουν την ομαλή λειτουργία αυτών προς ικανοποίηση των απαιτήσεων φορτίου. Ένας άλλος ορισμός, όπως δίνεται στην [16] αναφέρει πως ένα σύστημα ισχύος, με χρήση ΑΠΕ, χαρακτηρίζεται ως υβριδικό εφόσον περιλαμβάνει τη χρήση μίας ανανεώσιμης πηγής ενέργειας και μίας συμβατικής πηγής, ή περισσότερων ανανεώσιμων, ή καμίας συμβατικής ενεργειακής πηγής. Τα συστήματα αυτά κατατάσσονται σε πολλές κατηγορίες με βάση κάποια χαρακτηριστικά τους, όπως είναι ο αριθμός των πηγών που χρησιμοποιούνται, η μέγιστη τιμή της παραγόμενης ισχύος ή η δυνατότητα τους να

αποθηκεύουν μέρος της περισσευούμενης ενέργειας υπό οποιαδήποτε μορφή. Η σημαντικότερη διάκριση γίνεται με βάση τον τρόπο διασύνδεσης των πηγών στο σύστημα. Έτσι διακρίνουμε τη σειριακή και την παράλληλη σύνδεση.

Κατά τη **σειριακή σύνδεση** μία κύρια πηγή παραγωγής ενέργειας, τροφοδοτεί μία συστοιχία μπαταριών. Οι ενεργειακές απαιτήσεις καλύπτονται αποκλειστικά από τις μπαταρίες, ενώ όταν η στάθμη φόρτισής τους πέσει κάτω από μία συγκεκριμένη τιμή, η κύρια πηγή ενεργοποιείται προς φόρτιση αυτών. Η κατασκευαστική υλοποίηση είναι απλή, όμως λόγω της χαμηλής αποδοτικότητας και του αυξημένου βάρους, η σύνδεση αυτή απορρίπτεται για εφαρμογές αεροπλοΐας.

Στην **παράλληλη σύνδεση**, υπάρχει επικοινωνία μεταξύ των πηγών τροφοδοσίας ενώ παρέχεται ξανά η δυνατότητα φόρτισης των μπαταριών από την κύρια πηγή τροφοδοσίας. Φυσικά κρίνεται αναγκαία η ύπαρξη ενός συστήματος αυτομάτου ελέγχου προς συντονισμό της «συμπεριφοράς» των επι μέρους στοιχείων. Έτσι καταλήγουμε σε μπαταρίες μικρότερου μεγέθους, καθώς παρέχεται η δυνατότητα εκφόρτισης και επαναφόρτισης αυτών, καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος.

Ανεξαρτήτως των πηγών που χρησιμοποιούνται και την επικοινωνία ή όχι μεταξύ αυτών, ένα υβριδικό σύστημα ηλεκτρικής ισχύος μπορεί να λειτουργήσει είτε αυτοδύναμα, είτε συνδεδεμένο σε κάποιο κεντρικό δίκτυο. Η αυτοδύναμη λειτουργία αξιοποιείται συνήθως σε εφαρμογές κίνησης, ή προς τροφοδοσία απομακρυσμένων περιοχών, με δυσκολία διασύνδεσής τους στο δίκτυο. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι καλωδιώσεις είναι μικρές, και υπάρχει αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας. Τα υβριδικά συστήματα τα οποία σχεδιάζονται με στόχο τη διασύνδεσή τους σε κάποιο κεντρικό δίκτυο τροφοδοτούνται συνήθως από διατάξεις υψηλής δυναμικότητας παραγωγής ενέργειας (πχ φωτοβολταϊκά πάρκα) που φροντίζουν για την τροφοδότηση του δικτύου με μεγάλες ποσότητες πράσινης ενέργειας, χωρίς αυτό να εμποδίζει τη συμμετοχή μικρών ευέλικτων μονάδων.



Εικόνα 1.9: Υβριδικό σύστημα ηλεκτρικής ισχύος

Κεφάλαιο 2: Κυψέλες καυσίμου

2.1 Γενικά στοιχεία

2.1.1 Εισαγωγή



Εικόνα 2.1: Συστοιχία κυψελών καυσίμου

Η κυψέλη καυσίμου αποτελεί μία συσκευή, η οποία φροντίζει για τη μετατροπή της χημικής ενέργειας που περιέχεται σε κάποιο καύσιμο σε ηλεκτρική μορφή. Η λειτουργία της μπορεί να παρομοιαστεί με τη λειτουργία ενός ηλεκτρικού συσσωρευτή, με τη διαφορά ότι η κυψέλη μπορεί να παράγει συνεχώς ηλεκτρική ενέργεια, εφόσον φυσικά τροφοδοτείται με καύσιμο, ενώ η ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν οι μπαταρίες περιορίζεται από το υλικό κατασκευής των ακροδεκτών τους. Από μία άλλη σκοπιά οι κυψέλες καυσίμου ομοιάζουν προς τις συμβατικές μηχανές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (πχ μία γεννήτρια diesel ή έναν αεριοστρόβιλο), αφού η αποτελεσματική λειτουργία τους απαιτεί τη συνεχή κατανάλωση καυσίμου και συνεπάγεται την παραγωγή θερμότητας. Βασική διαφορά αποτελεί η φύση του παρεχόμενου καυσίμου, καθώς στις κυψέλες χρησιμοποιούνται αποκλειστικά υδρογονάνθρακες, φυσικό αέριο ή καθαρό υδρογόνο. Στην τελευταία περίπτωση, η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι 100% φιλική προς το περιβάλλον, καθώς το μόνο υποπροϊόν που παράγεται είναι το νερό. Επίσης σημαντική διαφορά παρατηρείται στο βαθμό απόδοσης των συστημάτων, με τις κυψέλες καυσίμου να παρουσιάζουν τιμές της τάξεως του 60% με 80%, σε εφαρμογές συμπαραγωγής ηλεκτρισμού θερμότητας, σε αντίθεση τις συμβατικές μονάδες, των οποίων η αποδοτικότητα, στην καλύτερη περίπτωση, αγγίζει το 40%[17].

Η περιγραφή της αρχής λειτουργίας των κυψελών καυσίμου χρονολογείται στο 1839 και πραγματοποιήθηκε από το Γερμανό Christian Friedrich Schönbein (1799-1868) και το Βρετανό William Grove (1811-1896), ενώ η πρώτη κυψέλη κατασκευάστηκε λίγα χρόνια αργότερα, το έτος 1842 και επρόκειτο περί μίας πρώιμης μορφής της σημερινής κυψέλης φωσφορικού οξέως. Μία εκατονταετία αργότερα, περί το 1954 παρουσιάστηκε η πρώτη λειτουργική συσκευή. Τη νέα αυτή τεχνολογία επέλεξε να συμπεριλάβει η NASA σε διάφορα διαστημικά προγράμματα που αναπτύχθηκαν κατά την εποχή εκείνη (Gemini, Apollo κ.α), γεγονός επέφερε την ανάπτυξη πλήθους ερευνητικών προγραμμάτων, τόσο από την πανεπιστημιακή

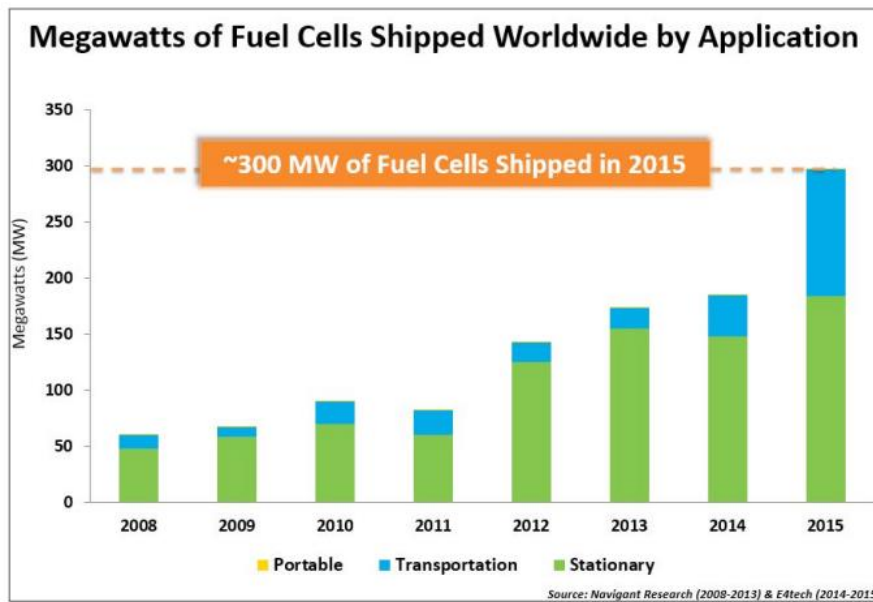
κοινότητα, όσο και από ιδιωτικές εταιρίες, γύρω από τον τομέα αυτό. Παρόλα αυτά, ο αρχικός ενθουσιασμός εξασθένησε σύντομα, λόγω του υψηλού κόστους εξαγωγής του υδρογόνου από τα διάφορα καύσιμα που εμπεριέχεται, καθώς και της δυσκολίας μετατροπής αυτού σε κατάλληλη μορφή, για την ασφαλή και αποδοτική μεταφορά του. Η παροχή χρηματοδότησης από διάφορους οργανισμούς (DOE, ERPI, GRI) στις Ηνωμένες Πολιτείες είχε ως αποτέλεσμα την αναπέρωση του αρχικού ενδιαφέροντος κατά τη δεκαετία του '70, ενώ έντονη ερευνητική δραστηριότητα αναπτύχθηκε και στην Ιαπωνία. Οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούνταν κατά την περίοδο αυτή αποκλειστικά σε σταθερές εγκαταστάσεις.

Κατά πρώτα χρόνια της δεκαετίας του 1990 παρουσιάστηκαν οι πρώτες σημαντικές έρευνες σχετικά με τους κινδύνους που επιφύλλασε για το περιβάλλον η συνεχώς αυξανόμενη κατανάλωση ορυκτών καυσίμων. Ως αποτέλεσμα οι κυψέλες καυσίμου παρουσιάστηκαν ως μία ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα εναλλακτική πηγή ενέργειας, για την αυτοκινητοβιομηχανία, λόγω της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας του υδρογόνου καθώς και των μηδαμινών εκπομπών ρύπων που συνεπάγεται η λειτουργία τους. Πιο συγκεκριμένα, το έτος 1991 ο Αμερικανός επιστήμονας Roger Billings μετέτρεψε ένα συμβατικό αυτοκίνητο στο πρώτο, κατ' αυτόν, όχημα κινούμενο αποκλειστικά υπό την τροφοδοσία κυψελών καυσίμου, ενώ το έτος 1993 κυκλοφόρησε το πρώτο λεωφορείο που ενσωμάτωσε την τεχνολογία αυτή. Με το πέρασμα των χρόνων, μεγάλες εταιρίες-κολοσσοί (Honda, Ford, Toyota) ασχολήθηκαν με την παραγωγή υβριδικών οχημάτων, όπου συμπεριλάμβαναν τη χρήση κυψελών καυσίμου, παράλληλα με κάποια άλλη πηγή τροφοδοσίας. Έντονο ενδιαφέρον παρουσιάστηκε και από την εταιρία κατασκευής αεροσκαφών Boeing, όπου εκτιμήθηκε πως λόγω του χαμηλού βάρους και του υψηλού βαθμού απόδοσης, οι κυψέλες καυσίμου είναι ικανές να συνεισφέρουν στην πραγματοποίηση φιλικών προς το περιβάλλον πτήσεων, μεγάλης διάρκειας.

Στις μέρες μας, έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι κυψελών καυσίμου, στους οποίους θα αναφερθούμε εκτενέστερα στη συνέχεια. Όσον αφορά τη χρήση τους στους διάφορους τομείς της αγοράς, οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούνται προς τροφοδοσία:

- **Σταθερών εγκαταστάσεων ισχύος.** Εδώ περιλαμβάνονται όλες οι εφαρμογές, όπου η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί σε μία σταθερή τοποθεσία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και συμπαραγωγής ηλεκτρισμού-θερμότητας.
- **Οχημάτων μεταφοράς,** όπου περιλαμβάνονται ηλεκτρικά αυτοκίνητα, λεωφορεία ή και οχήματα ειδικού σκοπού.
- **Φορητών συσκευών,** όπου η κυψέλη δεν είναι μόνιμα εγκατεστημένη εντός της συσκευής, ή εφόσον αυτό συμβαίνει, η συσκευή είναι φορητή.

Σχετικά με το συνολικό μέγεθος της αγοράς κυψελών καυσίμου, το μεγαλύτερο μέρος αυτής, αποτελούν εφαρμογές σταθερών εγκαταστάσεων ισχύος. Ένα σημαντικό ποσοστό καταλαμβάνεται επίσης από εφαρμογές μεταφοράς, ενώ η χρήση κυψελών καυσίμου σε φορητές συσκευές είναι ιδιαίτερα περιορισμένη[18].



Εικόνα 2.2: MW κυψελών καυσίμου που μεταφέρθηκαν κατά τα έτη 2008-2015

2.1.2 Συστατικά Μέρη

Στην απλούστερη μορφή της, μία κυψέλη καυσίμου αποτελείται από ένα **θετικό** και ένα **αρνητικό ηλεκτρόδιο** (κάθοδο και άνοδο αντίστοιχα), ενώ απαραίτητη κρίνεται και η παρουσία ενός ηλεκτρολύτη. Όπως και στους ηλεκτρικούς συσσωρευτές, έτσι και εδώ, ο **ηλεκτρολύτης** δρα ως μονωτής για τα ηλεκτρόνια του συστήματος, ενώ ως αγωγός προς διευκόλυνση της ροής των θετικά φορτισμένων ιόντων από την άνοδο προς την κάθοδο. Η επιλογή του κατάλληλου ηλεκτρολύτη αποτελεί μία εξαιρετικά σημαντική διαδικασία, καθώς από αυτόν προσδιορίζονται κάποιες από τις συνθήκες λειτουργίας της κυψέλης, όπως η θερμοκρασία. Έτσι, κατά την επιλογή υδατικού ηλεκτρολύτη, η θερμοκρασία λειτουργίας δεν πρέπει να ξεπερνά τους 250°C, αφού αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα την αλοίωση των χαρακτηριστικών του λόγω εξάτμισης. Αντίθετα, κατά την παρουσία στερεού ηλεκτρολύτη, η θερμοκρασία μπορεί να λαβεί υψηλές τιμές, περί τους 650°C.

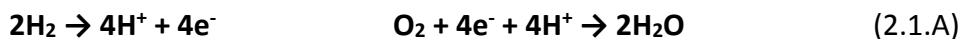
Στα συστατικά μέρη της κυψέλης περιλαμβάνεται επίσης το **στρώμα διάχυσης αερίων**. Αυτό μπορεί να αποτελεί μέρος της ανόδου ή της καθόδου, ή ένα ξεχωριστό στρώμα. Φροντίζει για τη διάχυση και ισοκατανομή των αερίων στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων, καθώς και για την απομάκρυνση του παραγόμενου νερού από την επιφάνεια του ηλεκτρολύτη.

Μία μεμονωμένη κυψέλη καυσίμου μπορεί να παράγει περιορισμένη ποσότητα ηλεκτρικής τάσης, στις περισσότερες περιπτώσεις έως 0.7 Volt. Φυσικά αυτή η τιμή είναι εξαιρετικά μικρή, και απαιτείται η σύνδεση πολλών μονάδων, προς εξασφάλιση του επιθυμητού επιπέδου τάσης. Η σύνδεση αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση **διπολικών πλακών**. Οι διπολικές πλάκες συνδέουν την επιφάνεια της καθόδου μίας κυψέλης με την επιφάνεια ανόδου της

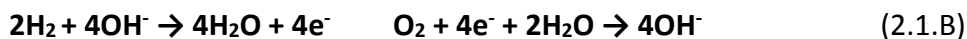
επόμενης κυψέλης (δικαιολογώντας έτσι το χαρακτηρισμό τους ως διπολικές). Ταυτόχρονα, φροντίζουν για την παροχή οξυγόνου στην κάθοδο και υδρογόνου στην άνοδο, μέσω ειδικά διαμορφωμένων καναλιών στην επιφάνειά τους, ενώ βρίσκονται σε αγώγιμη επαφή με την επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Ως αποτέλεσμα, το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται ρέει από τη μία κυψέλη στην άλλη, μέσω των αγώγιμων πλακών, και όχι μέσω των ηλεκτροδίων, με άμεση συνέπεια την εξάλειψη φαινομένων πτώσης τάσης. Οι διπολικές πλάκες κατασκευάζονται συνήθως από γραφίτη, ή ανοξείδωτο ατσάλι και αποτελούν το βέλτιστο τρόπο σύνδεσης των μονάδων, προς δημιουργία μίας **συστοιχίας κυψελών καυσίμου**[19].

2.1.3 Αρχή Λειτουργίας

Η βασική αρχή λειτουργίας μίας κυψέλης καυσίμου ομοιάζει προς τη διαδικασία ηλεκτρόλυσης του νερού, ή για να είμαστε πιο ακριβείς, αποτελεί την αντίστροφη διαδικασία αυτής. Αναλύοντας περισσότερο, κατά την εκκίνηση της κυψέλης, έχουμε ροή υδρογόνου προς την επιφάνεια της ανόδου ενώ, ταυτόχρονα, το οξυγόνο που περιέχεται στον ατμοσφαιρικό αέρα έρχεται σε επαφή με την κάθοδο. Έτσι, με τη μεσολάβηση του ηλεκτρολύτη, τα θετικά ιόντα υδρογόνου που ρεουν στο σύστημα ενώνονται με τα άτομα οξυγόνου, παράγοντας ως υποπροϊόν μία ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος (προς τροφοδοσία του συνδεδεμένου φορτίου) νερό και θερμότητα (εξώθερμη διάταξη). Πιο συγκεκριμένα, κατά την παρουσία όξινου ηλεκτρολύτη, υπό τροφοδοσία καθαρού υδρογόνου, συμβαίνουν οι ακόλουθες αντιδράσεις στην άνοδο και την κάθοδο αντίστοιχα:



Στην περίπτωση χρήσης αλκαλικού ηλεκτρολύτη, οι σχέσεις (1) αντικαθίστανται από τις ακόλουθες:

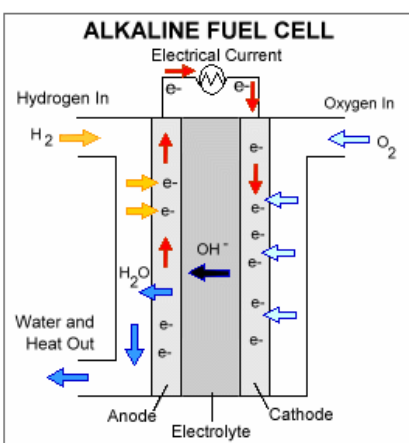


Όπως αναφέρθηκε, κύριο υποπροϊόν της διαδικασίας αποτελεί το νερό, το οποίο μάλιστα σε συγκεκριμένες εφαρμογές μπορεί ηλεκτρολυθεί, για την παραγωγή επιπλέον ποσότητας υδρογόνου. Επίσης, οι μικρές ποσότητες θερμότητας που παράγονται, μπορούν να αξιοποιηθούν σε εφαρμογές συμπαραγωγής. Τέλος, ιδιαίτερα σημαντικό είναι το γεγονός πως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μία κυψέλη καυσίμου, δεν περιλαμβάνει την κάυση του υδρογόνου αλλά μάλλον την εκμετάλλευση της χημικής συμπεριφοράς του, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα, η απόδοση του συνολικού συστήματος να μην περιορίζεται από το μέγιστο βαθμό απόδοσης του κύκλου Carnot. Λαμβάνοντας υπ όψιν όλα τα παραπάνω, δεν προξενεί ιδιαίτερη εντύπωση το γεγονός πως ο θεωρητικός βαθμός απόδοσης της συνολικής διαδικασίας λαμβάνει πολύ υψηλές τιμές, μεγαλύτερες του 90%.

2.2 Τύποι κυψελών καυσίμου

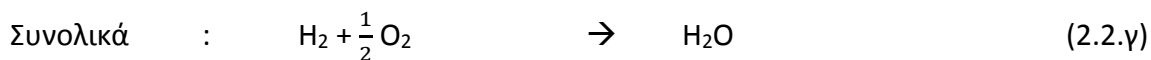
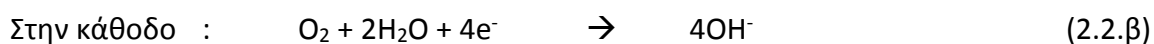
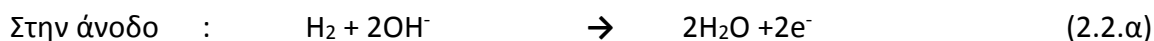
Οι κυψέλες καυσίμου κατατάσσονται σε διάφορες κατηγορίες αναλόγως το είδος του ηλεκτρολύτη που συμπεριλαμβάνουν. Έτσι παρατηρούνται σημαντικές διαφορές μεταξύ κυψελών που εκπίπτουν σε διαφορετικές κατηγορίες, σχετικά με τις ακριβείς ηλεκτροχημικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό τους, το είδος του καταλύτη που χρησιμοποιείται στα ηλεκτρόδια, το εύρος της θερμοκρασίας λειτουργίας, το παρεχόμενο καύσιμο κ.α. Φυσικά κάθε τύπος κυψέλης παρουσιάζει ξεχωριστά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

2.2.1 Αλκαλικές Κυψέλες Καυσίμου (Alkaline Fuel Cells/AFC)



Εικόνα 2.3: Αλκαλική κυψέλη καυσίμου

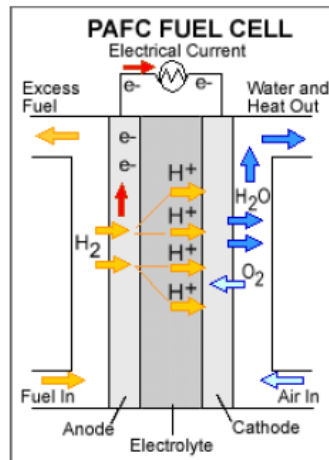
Σε μία αλκαλική κυψέλη καυσίμου, λαμβάνουν χώρα οι κάτωθι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις:



Το χαρακτηριστικό των κυψελών αυτού του τύπου είναι η παρουσία ενός αλκαλικού διαλύματος στο ρόλο του ηλεκτρολύτη. Η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, συνοψίζεται ως εξής: Στην κάθοδο εισέρχεται οξυγόνο, το οποίο, διερχόμενο μέσω του ηλεκτρολύτη, τροφοδοτεί την άνοδο με ανιόντα υδροξειλίου. Τα ιόντα αυτά αντιδρούν με ποσότητα καθαρού υδρογόνου που εισάγεται στην άνοδο, σχηματίζοντας νερό και παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα και θερμότητα. Τον ηλεκτρολύτη του συστήματος αποτελεί ένα διάλυμα υδροξειδίου του καλίου σε νερό, ενώ ως καταλύτης στα ηλεκτρόδια της διάταξης, χρησιμοποιείται κάποιο μέταλλο, συνήθως νικέλιο (Ni) ή κάποιο οξειδίο του νικελίου.

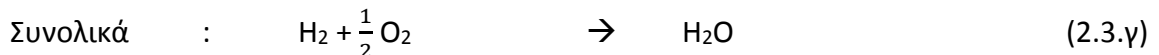
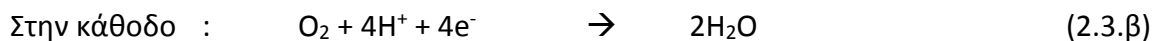
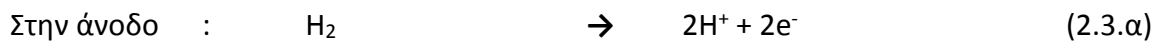
Πρόκειται για μία από τις πρώτες τεχνολογίες κυψελών καυσίμου που αναπτύχθηκαν, με παρουσία ήδη από το 1960 στο διαστημικό πρόγραμμα της NASA Apollo, αλλά και σε κάποιες στρατιωτικές εφαρμογές. Οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου επιλέγονται συνήθως λόγω της υψηλής τάσης λειτουργίας τους, (0.875V/κυψέλη), συγκριτικά με κυψέλες διαφορετικών τεχνολογιών, όπου η τιμή αυτή δεν ξεπερνά τα 0.7V. Η κυκλοφορία τους στην αγορά είναι ιδιαίτερα περιορισμένη, λόγω του υψηλού κόστους κατασκευής τους. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην ευαισθησία που παρουσιάζει η λειτουργία μίας αλκαλικής κυψέλης καυσίμου, στο διοξείδιο του άνθρακα. Έτσι, ακόμα και η παρουσία μικρών ποσοτήτων CO₂ στο εσωτερικό της, έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό ανθρακικών ενώσεων, γεγονός που μειώνει σημαντικά τη διάρκεια ζωής της. Προς αποφυγή του φαινομένου αυτού, κρίνεται απαραίτητη η παρουσία ενός συστήματος εξαγωγής καθαρού οξυγόνου από τον ατμοσφαιρικό αέρα για την τροφοδοσία της καθόδου.

2.2.2 Κυψέλες Καυσίμου Φωσφορικού Οξέως (Phosphoric Acid Fuel Cells/PAFC)



Εικόνα 2.4: Κυψέλη φωσφορικού οξέως

Οι ηλεκτροχημικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα σε μία PAFC είναι:

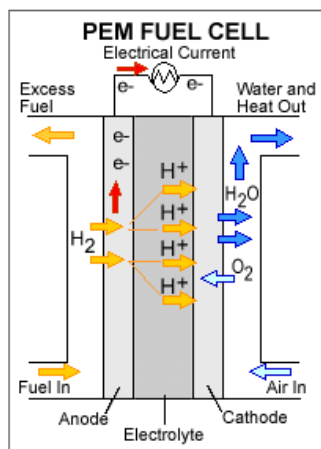


Στις κυψέλες φωσφορικού οξέως ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται υγρό φωσφορικό οξύ, το οποίο περιέχεται σε ένα καλούπι αποτελούμενο από μόρια καρβιδίου του πυριτίου, που συγκρατούνται μεταξύ τους με μία μικρή ποσότητα πολυτετραφθοροαιθυλενίου (Teflon). Αναφερόμενοι στις σχέσεις (2.3), έχουμε εισαγωγή υδρογόνου στην άνοδο της κυψέλης και διαχωρισμό των ατόμων αυτού σε κατιόντα υδρογόνου και ηλεκτρόνια. Τα πρώτα ρέουν με τη

βοήθεια του ηλεκτρολύτη προς την κάθοδο, ενώ τα ηλεκτρόνια καταλήγουν εκεί διερχόμενα μέσω του εξωτερικού φορτίου, προς τροφοδοσία αυτού. Στην κάθοδο τα άτομα του οξυγόνου ενώνονται με τα σωματίδια υδρογόνου, προς σχηματισμό μορίων νερού και έκλιση θερμότητας. Ως υλικό κατασκευής των ηλεκτροδίων χρησιμοποιείται άνθρακας, με το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειάς του να καλύπτεται από λευκόχρυσο, που παίζει το ρόλο του καταλύτη. Ο συνδυασμός των δύο αυτών στοιχείων, αυξάνει σημαντικά την ηλεκτρική αγωγιμότητα των ακροδεκτών[20].

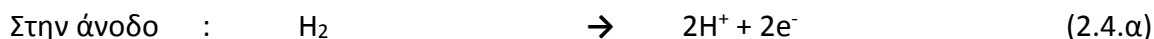
Οι κυψέλες φωσφορικού οξέως ήταν οι πρώτες που κυκλοφόρησαν στην αγορά. Ως αποτέλεσμα της τριακονταετούς χρήσης τους, αποτελούν πλέον μια ώριμη και αξιόπιστη τεχνολογία. Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό των κυψελών αυτού του τύπου είναι η δυνατότητα λειτουργίας τους υπό καύσιμο που περιλαμβάνει ακαθαρσίες, δηλαδή όχι 100% καθαρό υδρογόνο. Ως αποτέλεσμα η διαδικασία αναμόρφωσης των υδρογονανθράκων δεν χρειάζεται να είναι απόλυτα ενδελεχής, γεγονός που επιτρέπει την ενσωμάτωση ενός φθηνότερου αναμορφωτή. Βέβαια το συνολικό κόστος της κυψέλης παραμένει υψηλό, λόγω της απαραίτητης παρουσίας του λευκόχρυσου στο ρόλο του καταλύτη. Οι PAFC χαρακτηρίζονται από μεγάλο μέγεθος και του αυξημένο βάρος, έτσι χρησιμοποιούνται κυρίως προς τροφοδοσία σταθερών εγκαταστάσεων, όπως ξενοδοχεία ή σχολεία, και σε μεγάλα οχήματα όπως λεωφορεία. Η απόδοσή τους κυμαίνεται σε ποσοστά του 35% με 45% για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ποσοστό που μπορεί να φτάσει έως το 70% σε εφαρμογές συμπαραγωγής ηλεκτρισμού - θερμότητας.

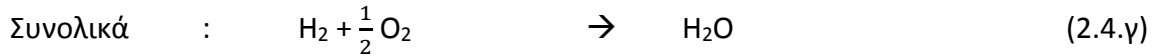
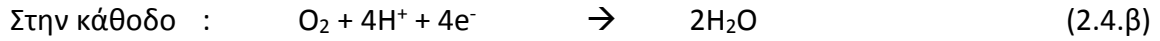
2.2.3 Κυψέλες Καυσίμου Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEMFC)



Εικόνα 2.5: Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων

Οι χημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν μεταξύ των στοιχείων κατά τη λειτουργία μίας PEMFC συνοψίζονται παρακάτω:

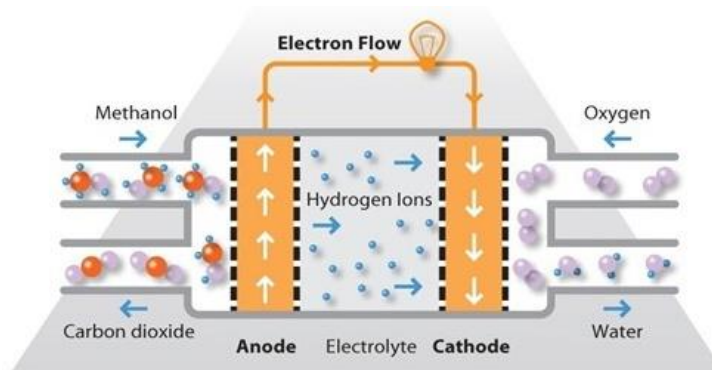




Στις κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων χρησιμοποιείται μία στερεή πολυμερής μεμβράνη, ως ηλεκτρολύτης. Η ηλεκτροχημική συμπεριφορά του συστήματος παρουσιάζεται στις εξισώσεις (2.4), οι οποίες είναι ταυτόσμιες με τις σχέσεις (2.3) κάτι που φαντάζει λογικό, αφού και στις δύο περιπτώσεις έχουμε χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο, ενώ τον καταλύτη στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων αποτελεί μία στρώση λευκόχρυσου. Συνεπώς μία εκ νέου αναλυτική παρουσίαση των αντιδράσεων αυτών κρίνεται περιττή.

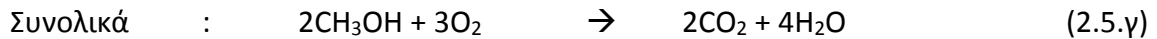
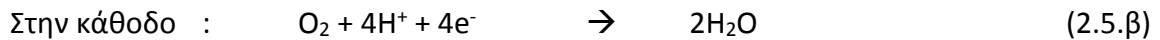
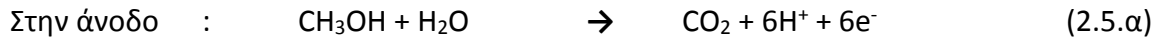
Η συγκεκριμένη τεχνολογία αναπτύχθηκε παράλληλα με τις αλκαλικές κυψέλες καυσίμου για χρήση σε διαστημικά προγράμματα από τη NASA[21]. Παρόλα αυτά, οι αλκαλικές κυψέλες προτιμήθηκαν, λόγω της αυξημένης αξιοπιστίας και του χαμηλότερου κόστους κατασκευής. Σε μία PEMFC το κόστος ανά κιλοβατόρα είναι αρκετά υψηλό (200\$/kWh), λόγω της απαραίτητης τροφοδότησής της με καθαρό υδρογόνο και τη χρήση λευκόχρυσου ως καταλύτη στα ηλεκτρόδια. Επίσης, ο λευκόχρυσος είναι εξαιρετικά ευαίσθητος σε φαινόμενα «δηλητηρίασης» από το μονοξείδιο του άνθρακα, γεγονός που καθιστά αναγκαία την ύπαρξη ενός πρόσθετου αντιδραστήρα προς μείωση του στοιχείου αυτού στο παρεχόμενο καύσιμο[20]. Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των PEMFC είναι η δυνατότητα λειτουργίας τους σε αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες, περί τους 80°C. Έτσι επιταγχύνεται σημαντικά η διαδικασία εκκίνησης της κυψέλης, καθώς δεν απαιτείται ιδιαίτερος χρόνος για την προθέρμανση του συστήματος. Επίσης οι PEMFC είναι ιδιαίτερα αποδοτικές κατά τη λειτουργία τους, με το βαθμό απόδοσης να αγγίζει το 70%. Έτσι, κατά τα τελευταία χρόνια έχουν επανέλθει δυναμικά στην αγορά, και αποτελούν την υπ' αριθμόν ένα επιλογή σε ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα.

2.2.4 Κυψέλες Άμεσης μεθανόλης (Direct Methanol Fuel Cells/DM)



Εικόνα 2.6: Κυψέλη άμεσης μεθανόλης

Κατά τη λειτουργία μίας DMFC συμβαίνουν οι κάτωθι χημικές αντιδράσεις:



Στις κυψέλες άμεσης μεθανόλης τον ηλεκτρολύτη αποτελεί μία πολυμερής μεμβράνη, όπως και στις PEMFC. Η σημαντική διαφορά που παρουσιάζουν οι κυψέλες αυτής της κατηγορίας συγκριτικά τις υπόλοιπες είναι άμεση τροφοδοσία της ανόδου με ένα διάλυμα νερού-μεθανόλης, χωρίς να απαιτείται η παρουσία κάποιου αναμορφωτή καυσίμου. Πρέπει να διευκρινιστεί πως για τη διατήρηση της ενεργειακής πυκνότητας της μεθανόλης, το νερό περιέχεται εντός της κυψέλης, οπότε η τροφοδοσία αυτής γίνεται πρακτικά με καθαρή μεθανόλη. Το γεγονός αυτό συμβάλλει σημαντικά στην πολυπλοκότητα του συστήματος. Όπως παρατηρείται από τις εξισώσεις (2.5) στην άνοδο εισάγεται μεθανόλη με νερό και η αντίδραση που πραγματοποιείται μεταξύ αυτών παράγει διοξείδιο του άνθρακα, ηλεκτρόνια και κατιόντα υδρογόνου. Το διοξείδιο του άνθρακα αποβάλεται προς την ατμόσφαιρα, ενώ τα ηλεκτρόνια και τα κατιόντα ρέουν μέσο του εξωτερικού φορτίου και του ηλεκτρολύτη αντίστοιχα, από την άνοδο προς την κάθοδο. Εκεί ενώνονται με τα άτομα οξυγόνου που εισέρχονται από το περιβάλλον, παράγοντας νερό. Και σε αυτή την περίπτωση, ως καταλύτης στην επιφάνεια της καθόδου χρησιμοποιείται λευκόχρυσος, ενώ στην άνοδο ένα μίγμα αυτού με ρουθίνιο.

Όπως προαναφέρθηκε, η παρουσία ενός αναμορφωτή καυσίμου κρίνεται περιττή, στις κυψέλες αυτής της κατηγορίας. Η μεθανόλη είναι ένα καύσιμο που διατηρείται υπό υγρή μορφή, με αποτέλεσμα να είναι εύκολη η αποθήκευση και η μεταφορά της, ενώ η διαδικασία παραγωγής της από υδρογονάνθρακες είναι απλή, χωρίς ιδιαίτερη οικονομική επιβάρυνση. Όλα τα παραπάνω συντελούν στη σημαντική μείωση του λειτουργικού κόστους μία κυψέλης άμεσης μεθανόλης. Παρόλο που το καύσιμο αυτό χαρακτηρίζεται από υψηλή ειδική ενέργεια (~5472 Wh/kg) και ενεργειακή πυκνότητα (~4333 Wh/l) η τροφοδοσία της υπό μορφή διαλύματος, μειώνει σημαντικά την παραγόμενη ισχύ. Ως αποτέλεσμα, η χρήση των DMFC περιορίζεται σε μικρές φορητές συσκευές, όπως κινητά τηλέφωνα ή φορητούς ηλεκτρονικούς υπολογιστές προς αντικατάσταση των μπαταριών εξελιγμένης τεχνολογίας, όπως τις μπαταρίες λιθίου, ή λιθίου πολυμερών. Βέβαια, συνιστάται προσοχή κατά τη χρήση της κυψέλης, καθώς η μεθανόλη αποτελεί ένα άκρως εύφλεκτο και τοξικό καύσιμο.

Προς καλύτερη εποπτεία των σημαντικότερων στοιχείων των τύπων κυψελών καυσίμου που παρουσιάστηκαν, παρέχεται ο παρακάτω πίνακας [17].

ΤΥΠΟΣ ΚΥΨΕΛΗΣ				
	AFC	PAFC	PEMFC	DMFC
Ηλεκτρολύτης	Υδροξείδιο του καλίου	Φωσφορικό Οξύ	Πολυμερές	Πολυμερές
Θερμοκρασία Λειτουργίας (°C)	60-90	70-100	70-100	90
Καταλύτης				
Άνοδος	Ni / Pt	Pt	Pt	Μίγμα Pt-Ru
Κάθοδος	Ni / Pt	Pt	Pt	Pt
Βαθμός Απόδοσης	50-70%	40-50%	25-40%	40-45%
Καύσιμο	H ₂	H ₂	H ₂	Διάλυμα νερού-μεθανόλης
Παραγωγή Θερμότητας από Συμπαγωγή	-----	Χαμηλής Ποιότητας	-----	Ικανοποιητική
Ισχύς	Έως 20 kW	Έως 250 kW	Έως 10 kW	Μεγαλύτερη των 50 kW

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1: ΣΥΝΟΨΗ ΣΗΜΑΝΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ

2.3 Υδρογόνο

2.3.1 Γενικά στοιχεία

Το υδρογόνο αποτελεί το 90% όλων των ατόμων και αντιστοιχεί στα τρία τέταρτα της συνολικής μάζας του σύμπαντος. Η παρουσία του είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς αντιδρά με το ήλιο (αστρική διαδικασία σύντηξης του υδρογόνου), παράγοντας τεράστιες ποσότητες ενέργειας. Παρόλο που υπό ατμοσφαιρικές συνθήκες, συναντάται σε αέρια μορφή, ελάχιστες ποσότητες καθαρού υδρογόνου εμπεριέχονται ανά πάσα στιγμή στην ατμόσφαιρα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μάζα του στοιχείου, η τιμή της οποίας είναι 1,00794 amu (1 amu = $1.66 \cdot 10^{-27}$ kg). Η τιμή αυτή είναι ιδιαίτερα χαμηλή, συνεπώς αν το υδρογόνο δεν αποτελεί μέρος κάποιας χημικής ένωσης, αποβάλεται ταχύτατα από την ατμόσφαιρα, λόγω της σύγκρουσής του με άλλα βαρύτερα αέρια. Το γεγονός αυτό καθιστά τη χρήση του σε εξωτερικές εφαρμογές ιδιαίτερα επικίνδυνη, καθώς σε περίπτωση διαρροής διασκορπίζεται ταχύτατα στο περιβάλλον.

Όσον αφορά τη θερμική συμπεριφορά του, χαρακτηρίζεται από υψηλή θερμοκρασία αυτοανάφλεξης, μεγαλύτερη των 500°C[22]. Αποτελεί ένα εύφλεκτο συστατικό μέρος του ατμοσφαιρικού αέρα, για συγκέντρωση σε όγκο από 4% έως 75%. Ιδιαίτερη προσοχή, συνίσταται κατά την καύση του, καθώς εκπέμπεται πολύ χαμηλή υπέρυθρη θερμότητα, αλλά πολύ υψηλή υπεριώδης ακτινοβολία. Εκτός αυτού, η φλόγα που παράγεται είναι πρακτικά αόρατη υπό το φως τη ημέρας. Έτσι είναι πολύ πιθανή η ακούσια επαφή κάποιου με μία εστία καύσης. Για του λόγους αυτούς, συμπεριλαμβάνονται αισθητήρες ανίχνευσης στα συστήματα που χρησιμοποιούν υδρογόνο, ώστε να εντοπίζονται άμεσα οποιουδήποτε τύπου διαρροές.

Από ενεργειακής σκοπιάς, το υδρογόνο, αποτελεί μία ιδιάζουσα περίπτωση. Διαθέτει πολύ υψηλή ειδική ενέργεια (33 kWh/kg), μέγεθος το οποίο αποτελεί τον πιο σημαντικό παράγοντα σε εφαρμογές κίνησης. Λόγω της ιδιαίτερα χαμηλής πυκνότητας που το χαρακτηρίζει (0.07 kg/m³), η ενεργειακή πυκνότητά του δεν ξεπερνά τις 0.53kWh/l. Το μειονέκτημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί, με τη συμπίεση του αερίου υδρογόνου και μετατροπή του σε υγρή μορφή.

Ενεργειακός Φορέας	Μορφή	Ειδική Ενέργεια (kWh/kg)	Ενεργειακή Πυκνότητα (kWh/l)
Υδρογόνο	Αέρια	33.6	0.53
Φυσικό Αέριο	Αέρια	13.5	2.6
Βενζίνη	Υγρή	12.8	9

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΜΕ ΑΛΛΟΥΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥΣ ΦΟΡΕΙΣ

Στις μέρες μας, το σύνολο του παραγόμενου υδρογόνου χρησιμοποιείται κυρίως στη βιομηχανία, με το μεγαλύτερο ποσοστό να καταναλώνεται για την παραγωγή αμμωνίας. Περιλαμβάνεται επίσης στην κατασκευή λιπασμάτων, καθώς και στα λεγόμενα «μετεωρολογικά μπαλόνια» που χρησιμοποιούνται επί σειρά ετών προς παρατήρηση καιρικών φαινομένων. Η παρουσία του είναι έντονη και στη βιομηχανία τροφίμων, προς παραγωγή υδρογονομένων φυτικών ελαίων, όπως η μαργαρίνη ή το βούτυρο. Οι ενεργειακές χρήσεις του είναι αρκετά περιορισμένες, προς το παρόν, και περιλαμβάνουν κατά κύριο την τροφοδοσία κυψέλων καυσίμου για διαστημικές εφαρμογές. Λόγω της έλλειψης σταθμών ανεφοδιασμού, η χρήση του στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας πρακτικά δεν υφίσταται, αφού κατά το έτος 2017 στις ΗΠΑ καταγράφηκαν μόλις 500 οχήματα τροφοδοτούμενα με υδρογόνο[23]. Παρόλα αυτά η έρευνα από μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες συνεχίζεται, με κύριο στόχο την κυκλοφορία υβριδικών οχημάτων, ενώ έντονο ενδιαφέρον έχει εκφραστεί και από εταιρίες κατασκευής αεροσκαφών, αφού σε εφαρμογές αεροπλοΐας η υψηλή ειδική ενέργεια του υδρογόνου αποτελεί παράγοντα κομβικής σημασίας.

2.3.2 Μέθοδοι Παραγωγής Υδρογόνου

Όπως προαναφέρθηκε, το υδρογόνο δεν υπάρχει ως ελεύθερο στοιχείο στη φύση. Έτσι καθίσταται αναγκαία η διαδικασία εξαγωγής αυτού από κάποια χημική ένωση όπου περιέχεται, όπως είναι το νερό ή οι υδρογονάνθρακες. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία κάποιας κυψέλης καυσίμου, προς μετατροπή της χημική ενέργειας που περιέχει σε ηλεκτρική. Συχνά οι κυψέλες καυσίμου αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως πηγές ηλεκτρικής ενέργειας 100% φιλικές προς το περιβάλλον. Φυσικά αυτό ισχύει μόνο στις περιπτώσεις όπου η εξαγωγή του υδρογόνου αποτελεί μία επίσης «πράσινη» διαδικασία, ενώ ακόμα και τότε, η λειτουργία της κυψέλης μπορεί από μόνη της να συνεπάγεται την εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου, όπως στην περίπτωση των DMFC. Συνεπώς, η συμπερίληψη τους στην κατηγορία των ΑΠΕ δικαιολογείται εν μέρη, λόγω της αφθονίας του υδρογόνου στο σύμπαν, αλλά χρήζει ιδιαίτερης προσοχής, καθώς είναι εσφαλμένη σε περίπτωση που το υδρογόνο έχει εξασφαλιστεί μέσω μίας μη φιλικής προς το περιβάλλον διαδικασίας. Ακολουθεί μία σύντομη περιγραφή των κυριότερων μηχανισμών εξαγωγής του υδρογόνου από τις χημικές ενώσεις στις οποίες περιέχεται.

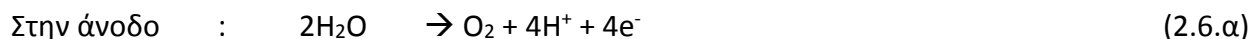
- **Αναμόρφωση υδρογονανθράκων**

Η μεγαλύτερη ποσότητα υδρογόνου που καταναλώνεται παγκοσμίως εξασφαλίζεται μέσω της διαδικασίας αναμόρφωσης υδρογονανθράκων, ή όπως αποκαλείται αλλιώς αναμόρφωση με ατμό (steam reforming). Περίπου το 95% της συνολικής ποσότητας προέρχεται από το φυσικό αέριο, με τη μέθοδο αναμόρφωσης ατμού μεθανίου[24]. Κατά τη διαδικασία αυτή, ατμός υψηλής θερμοκρασίας (περί τους 1000°C) χρησιμοποιείται για την παραγωγή υδρογόνου από κάποια πηγή μεθανίου. Η όλη διαδικασία πραγματοποιείται υπό πίεση 3-25 bar, ενώ

απαραίτητη κρίνεται η παρουσία ενός καταλύτη. Ως αποτέλεσμα παράγεται υδρογόνο (H₂), μία μικρή ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και κάποια ποσότητα μονοξειδίου του άνθρακα (CO). Στη συνέχεια, το H₂ αντιδρά με το CO (αντίδραση μετατόπισης νερού-αερίου), προς παραγωγή CO₂ και περισσότερου υδρογόνου. Ακολουθεί η απομάκρυνση των ακάθαρτων ουσιών, αφού οι κυψέλες λειτουργούν στη μεγάλη πλειοψηφία τους υπό καθαρό υδρογόνο. Η μέθοδος αυτή δεν είναι ιδιαίτερα φιλική προς το περιβάλλον, αφού έχουμε παραγωγή ποσοτήτων CO₂. Βέβαια η επεξεργασία του υδρογόνου, και όχι κάποιου άλλου καυσίμου (πχ βενζίνη) οδηγεί σε σημαντική μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Το συνολικό κόστος αυτής της μεθόδου ποικίλει από 2\$/kg έως 5\$/kg παραγόμενου υδρογόνου.

- **Ηλεκτρόλυση**

Κατά την ηλεκτρόλυση, το νερό διασπάται σε άτομα υδρογόνου και οξυγόνου, με χρήση ηλεκτρικού ρεύματος. Αναφερόμενοι εν συντομία στη μέθοδο αυτή, η διάταξη περιλαμβάνει δύο ηλεκτρόδια (άνοδο/κάθοδο), και έναν ηλεκτρολύτη, βυθισμένα σε νερό. Το νερό αντιδρά με το ηλεκτρικό ρεύμα στην άνοδο, προς σχηματισμό οξυγόνου και κατιόντων υδρογόνου. Τα κατιόντα ρέουν μέσω του ηλεκτρολύτη προς την κάθοδο, ενώ τα ηλεκτρόνια μέσω του εξωτερικού κυκλώματος. Εκεί ενώνονται, παράγοντας αέριο υδρογόνο. Συνοπτικά:



Αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο παραγωγής υδρογόνου, μετά την αναμόρφωση υδρογονανθράκων (περί το 5% της παγκόσμιας παραγωγής). Η μέθοδος της ηλεκτρόλυσης παρουσιάζει μεγάλη δυναμική, καθώς μπορεί να είναι 100% φιλική προς το περιβάλλον. Αυτό εξαρτάται από τη διαδικασία παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται προς διάσπαση των μορίων του νερού. Έτσι, αν αυτή προέρχεται, για παράδειγμα, από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ή γεννήτριες diesel, η διαδικασία αφήνει κάποιο ενεργειακό αποτύπωμα. Στην περίπτωση που η παραγωγή γίνεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τόσο η ηλεκτρόλυση όσο και η συνολική χρήση της κυψέλης καυσίμου, δε συνεπάγεται κάποια περιβαλλοντική επιβάρυνση. Το κόστος μπορεί να μεταβάλλεται σημαντικά, αναλόγως και πάλι την προέλευση της ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι ενώ η συνολική διαδικασία κοστολογείται στα (6-7)\$/kg, αν η ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από ανεμογεννήτριες το κόστος αυτό αυξάνεται στα (7-11)\$/kg ενώ σε περίπτωση χρήσης ηλιακής ενέργειας έχουμε περεταίρω αύξηση αυτού στα (10-30)\$/kg.[25]

Εκτός από τις βασικές μεθόδους που προαναφέρθηκαν και χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα για την παραγωγή υδρογόνου, ένα πλήθος άλλων μεθόδων είναι υπό μελέτη, ή χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μικρής έκτασης. Μία από αυτές αποτελεί η **παραγωγή**

υδρογόνου από βιομάζα. Η επεξεργασία της βιομάζας μπορεί να γίνεται είτε υπό θερμοχημικές διεργασίες (αεριοποίηση ή πυρόλυση της βιομάζας), είτε υπό βιοχημικές (παρουσία συγκεκριμένων ενζύμων προς επεξεργασία της βιομάζας), προς εξαγωγή ποσότητας υδρογόνου. Οι θερμοχημικές διεργασίες συνεπάγονται μικρότερη οικονομική επιβάρυνση, καθώς πραγματοποιούνται υπό υψηλή θερμοκρασία με αποτέλεσμα την επίσπευση των χημικών αντιδράσεων. Μία μέθοδος πολλά υποσχόμενη για μελλοντικές εφαρμογές αποτελεί η **φωτοηλεκτροχημική διάσπαση του νερού**, που αναφέρεται στην παραγωγή υδρογόνου από νερό, με άμεση χρήση της ηλιακής ενέργειας. Το γεγονός αυτό καθίσταται δυνατό μόνο υπο την παρουσία φωτοηλεκτροχημικών υλικών, που κατασκευάζονται από πρώτες ύλες παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Τέλος, στις αποκαλούμενες **φυτοβιολογικές** μεθόδους, η διάσπαση του νερού γίνεται και πάλι με αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας, μέσω της διαδικασίας φωτοσύνθεσης μικροβίων.

2.3.3 Αποθήκευση, Μεταφορά και Διανομή

Το ζήτημα της αποθήκευσης του υδρογόνου, προβλημάτισε εξ αρχής την επιστημονική κοινότητα, ενώ ακόμα και στις μέρες μας αναζητούνται όλο και πιο αποδοτικές λύσεις. Όπως φαίνεται στον πίνακα (2.2), το υδρογόνο παρουσιάζει ενεργειακή πυκνότητα 17 φορές χαμηλότερη από τη βενζίνη και περίπου 5 φορές μικρότερη από το φυσικό αέριο. Η αποθήκευσή του υπό ατμοσφαιρικές συνθήκες θα απαιτούσε την κατασκευή τεράστιων δεξαμενών, με ιδιαίτερα αυξημένο βάρος. Μία τέτοια δεξαμενή δε θα μπορούσε, φυσικά, να συμπεριληφθεί σε εφαρμογές ηλεκτρικής κίνησης, ενώ ακόμα και σε σταθερές βιομηχανικές μονάδες, η κατασκευή της θα επέφερε μεγάλη οικονομική επιβάρυνση.

Το υδρογόνο αποθηκεύεται κατά κύριο λόγο σε αέρια μορφή, υπό υψηλή πίεση. Κατά τα προηγούμενα χρόνια η μέγιστη τιμή της δεν ξεπερνούσε τα 20 bar, ενώ στις μέρες μας οι κύλινδροι υψηλής πίεσης είναι ικανοί να αντέξουν έως 800 bar. Το πάχος του υλικού κατασκευής του κυλίνδρου, προσδιορίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (2.7):

$$\frac{d_w}{d_o} = \frac{\Delta p}{2\sigma_v + \Delta p} \quad (2.7)$$

Όπου

- d_w : το πάχος του υλικού
- d_o : η εξωτερική διάμετρος του κυλίνδρου
- Δp : η υπερπίεση

σ_v : αντοχή σε εφελκυσμό του υλικού που χρησιμοποιείται. Το μέγεθος αυτό κυμαίνεται από 50 MPa σε υλικά όπως το αλουμίνιο έως 1100 MPa σε ατσάλινα υλικά υψηλής ποιότητας.

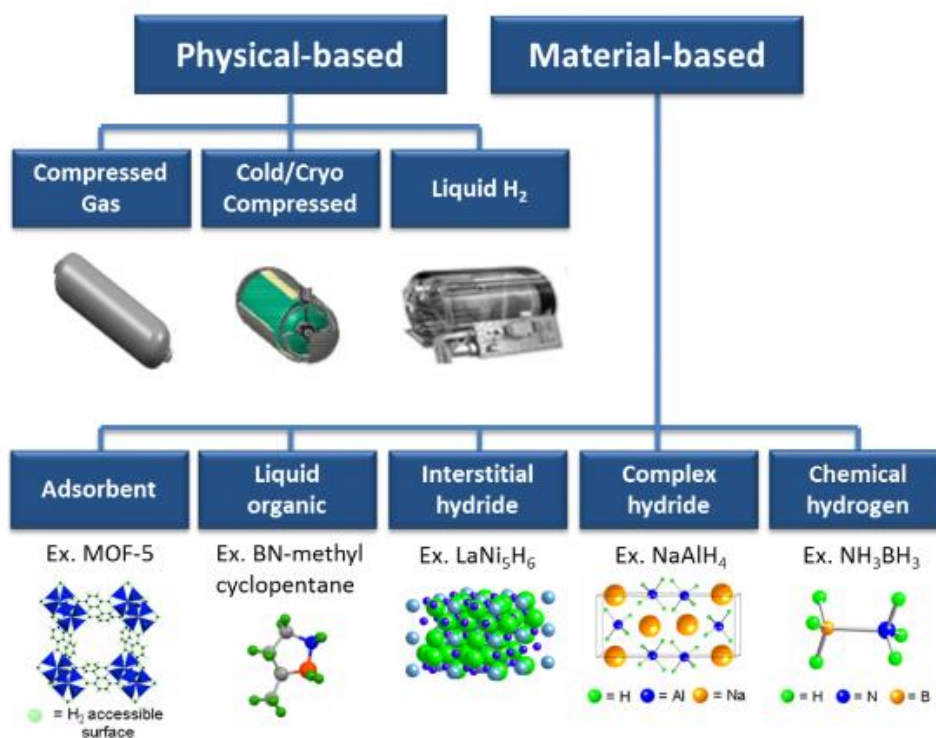
Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται εδώ και αρκετά χρόνια, και αποτελεί την πλέον αξιόπιστη και αποτελεσματική λύση για εφαρμογές σε οχήματα όπου χρησιμοποιείται υδρογόνο. Ένα σημαντικό μειονέκτημα αυτής είναι ο περιορισμός ογκομετρικής πυκνότητας (έως $40 \text{ kgH}_2/\text{m}^3$) που επιβάλλει η μέγιστη τιμή της πίεσης αποθήκευσης.

Προς ακόμα μεγαλύτερη αύξηση της ποσότητας του περιεχόμενου υδρογόνου σε μία δεξαμενή, είναι απαραίτητη η μετατροπή αυτού σε υγρή μορφή. Η **υγροποίηση του υδρογόνου** αποτελεί μία επίσης πολύ διαδεδομένη μέθοδο αποθήκευσης, που χρησιμοποιείται διαχρονικά από τη NASA προς τροφοδοσία διαστημικών αεροσκαφών, ενώ επιλέγεται επίσης για μεταφορά σημαντικών ποσοτήτων υδρογόνου. Η θερμοκρασία της δεξαμενής αποθήκευσης είναι κοντά στους -253°C , υπό ατμοσφαιρική πίεση. Η ογκομετρική πυκνότητα σε αυτή την περίπτωση, αυξάνεται έως τα $70.8 \text{ kg}/\text{m}^3$. Δύο σημαντικά θέματα που προκύπτουν κατά την αποθήκευση υδρογόνου υπό υγρή μορφή, αποτελούν η αποδοτικότητα της διαδικασίας υγροποίησης, καθώς και η καλή θερμική μόνωση της δεξαμενής[26].

Πέραν από τις φυσικές μεθόδους που προαναφέρθηκαν, η αποθήκευση του υδρογόνου μπορεί να γίνει μέσω της ένωσης αυτού με κάποιο υλικό, είτε ως υδρίδιο, είτε με προσρόφηση. Το υδρογόνο αντιδρά, υπό συνθήκες αυξημένης θερμοκρασίας, με κάποια από τα μέταλλα μετάπτωσης καθώς και με κράματα αυτών, για το σχηματισμό υδριδίων. Τα ηλεκτροθετικά στοιχεία είναι τα πιο αντιδραστικά, όπως οι λανθανίδες, οι ακτινίδες και το τιτάνιο. Έτσι τα απλούστερα από τα σχηματιζόμενα μεταλλικά υδρίδια έχουν χημικό τύπο της μορφής AB_xH_n , όπου στη θέση του A βρίσκεται κάποια αλκαλική γαία, ενώ στο B έχουμε κάποιο μέταλλο μετάπτωσης. Πρέπει να σημειωθεί πως κάποια μέταλλα, όπως ο λευκόχρυσος και το ρουθένιο έχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης σημαντικών ποσοτήτων υδρογόνου, χωρίς το σχηματισμό υδριδίων. Η ογκομετρική πυκνότητα των σύνθετων μεταλλικών υδριδίων μπορεί να φτάσει έως τα $253 \text{ kg}/\text{m}^3$, γεγονός που δίνει στη μέθοδο αυτή ένα σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των προηγούμενων. Η προσρόφηση υδρογόνου σε ίνες άνθρακα αποτελεί την πιο πρόσφατη μέθοδο αποθήκευσης υδρογόνου και υπερτερεί από το σχηματισμό υδριδίων, λόγω της σημαντικής μείωσης του συνολικού βάρους, περίπου στο μισό[17].

Ένα ακόμα εμπόδιο που πρέπει να ξεπεραστεί, ώστε να υπάρξει μαζική κατανάλωση του υδρογόνου σε μεγάλες κλίμακες, αποτελεί η έλλειψη υποδομών μεταφοράς και διανομής προς τους καταναλωτές. Ακόμα και σε φορητή μορφή, η μεταφορά του υδρογόνου δεν αποτελεί απλή υπόθεση. Προς το παρόν το καύσιμο αυτό παρέχεται με χρήση βυτιοφόρων από τις μονάδες παραγωγής προς τα σημεία κατανάλωσης, κάτι που συνεπάγεται υψηλά κόστη μεταφοράς. Μία πιο πρακτική λύση, για τροφοδοσία περιοχών που απέχουν πολλά χιλιόμετρα

από τα σημεία παραγωγής αποτελεί η κατασκευή αγωγών μεταφοράς υδρογόνου. Φυσικά, η εκ νέου κατασκευή ενός δικτύου αγωγών αποκλειστικά για τη μεταφορά υδρογόνου, συνεπάγεται τεράστιο αρχικό κόστος επένδυσης. Ιδιαίτερα συμφαίρουσα κρίνεται η μεταφορά του μέσω αγωγών φυσικού αερίου, όπου δεν απαιτούνται ιδιαίτερες μετατροπές στο ήδη υπάρχον δίκτυο. Μία εναλλακτική λύση που παρατηρείται στις μέρες μας είναι η παρουσία μικρών μονάδων παραγωγής υδρογόνου κοντά στα σημεία κατανάλωσης, οπότε και δεν τίθεται θέμα μεταφοράς του. Κλείνοντας, το σημαντικότερο πρόβλημα σχετικά με τη διανομή του υδρογόνου αντιμετωπίζει η βιομηχανία κατασκευής υβριδικών οχημάτων. Λόγω της απουσίας σταθμών ανεφοδιασμού, η αγορά πρακτικά δεν υφίσταται. Από την άλλη πλευρά δεν προβλέπεται η άμεση κατασκευή σταθμών ανεφοδιασμού, εφόσον δεν υπάρχει ιδιαίτερη ζήτηση. Ενδεικτικά αναφέρεται το γεγονός πως κατά το έτος 2017 οι σταθμοί ανεφοδιασμού στις Ηνωμένες Πολιτείες ήταν μόλις 55.



Εικόνα 2.7: Μέθοδοι αποθήκευσης υδρογόνου

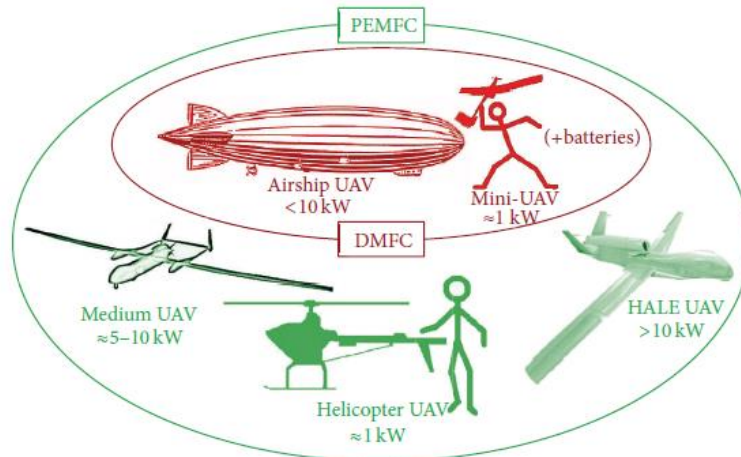
2.4 Κυψέλες Καυσίμου και ιαν

Τα τελευταία χρόνια, η χρήση αμιγώς ηλεκτρικών πηγών ενέργειας σε υβριδικά ή ηλεκτρικά μη επανδρωμένα αεροσκάφη αντιμετωπίζει ένα σημαντικό πρόβλημα, που δεν είναι άλλο από τη χαμηλή ειδική ενέργεια που χαρακτηρίζει τις μπαταρίες. Έτσι στα ιαν μεγαλύτερου βάρους, οι μπαταρίες δεν μπορούν να ανταπεξέλθουν στις ενεργειακές απαιτήσεις πτήσεως του αεροσκάφους, καθιστώντας έτσι αναγκαία την παρουσία κάποιας άλλης πηγής τροφοδοσίας.

Το ρόλο αυτό μπορεί να αναλάβει μία κυψέλη καυσίμου. Με την ενσωμάτωση της τεχνολογίας αυτής, καθίσταται περιττή η παρουσία οποιουδήποτε τύπου μηχανής εσωτερικής καύσης, με αποτέλεσμα να διατηρούνται τα πλεονεκτήματα που συνεπάγεται η ηλεκτρική πρόωση αεροχημάτων, όπως είναι οι μηδαμινές εκπομπές αερίων ρύπων και η αθόρυβη λειτουργία κατά την πτήση. Επίσης, έχουμε αύξηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος, αφού σε συστήματα πρόωσης καυσίμου, η ενέργεια που παριέχεται στα καύσιμα αξιοποιείται σε βαθμό 18-25%, ενώ με τη χρήση κυψελών καυσίμου, η απόδοση αυξάνεται έως και 45%. Επιπροσθέτως, η μείωση του βάρους που συνεπάγεται η χρήση ηλεκτρικών κινητήρων/ελίκων έναντι άλλων μηχανισμών, είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς σε ένα uαν τα καύσιμα και το σύστημα πρόωσης αποτελούν περί το ένα τρίτο του συνολικού βάρους[27]. Φυσικά, η υψηλή ειδική ενέργεια που χαρακτηρίζει το υδρογόνο, δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να αξιοποιηθεί προς τροφοδοσία μεγάλων επιβατικών αεροσκαφών, καθώς το κόστος παραγωγής και αποθήκευσης του αερίου αυτού, είναι ιδιαίτερα υψηλό.

Διάφοροι τύποι κυψελών καυσίμου κυκλοφορούν σήμερα στην αγορά, με κάθε έναν εξ αυτών να παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά (θερμοκρασία λειτουργίας, είδος του ηλεκτρολύτη, καθαρότητα του παρεχόμενου υδρογόνου κ.α.). Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά αυτά, μία κατηγορία κυψελών καυσίμου μπορεί να υπερτερεί ή να μειονεκτεί έναντι μίας άλλης, για χρήση σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Στα μη επανδρωμένα αεροσκάφη, οι κυψέλες που λειτουργούν υπό υψηλή θερμοκρασία, κρίνονται ακατάλληλες, λόγω του μεγάλου μεγέθους/βάρους τους και του υψηλού χρόνου εκκίνησης. Μία ιδιαίτερα ελκυστική επιλογή αποτελούν οι κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC), καθώς λειτουργούν υπό χαμηλή θερμοκρασία (50-70°C) με συνέπεια να χρειάζονται πολύ μικρό χρόνο για την εκκίνησή τους. Ο συνδυασμός υψηλής ενεργειακής πυκνότητας και χαμηλής πυκνότητας ισχύος που τις χαρακτηρίζει (250 W/kg σε εφαρμογές ισχύος 1kW), τις καθιστά ιδανικές για χρήση σε uαν μεγάλης αντοχής, τα οποία αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος της αγοράς μη επανδρωμένων αεροσκαφών. Επίσης η τεχνολογία των PEMFC είναι πλέον σε ένα αρκετά ώριμο στάδιο, ικανή να ανταπεξέλθει στις καταναλωτικές απαιτήσεις.

Οι κυψέλες καυσίμου άμεση μεθανόλης (DMFC) μελετούνται επίσης για χρήση σε μη επανδρωμένα αεροσκάφη, λόγω της υψηλότερης ενεργειακής πυκνότητας που παρουσιάζουν, συγκριτικά με τις PEMFC καθώς και του χαμηλότερου κόστους λειτουργίας που συνεπάγεται η ευκολία παραγωγής και αποθήκευσης της μεθανόλης. Στον αντίποδα, η απόδοσή τους είναι περίπου στο μισό της απόδοσης των PEMFC, ενώ το ίδιο ισχύει και για την πυκνότητα ισχύος. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, οι DMFC χρησιμοποιούνται κυρίως σε μικρά uαν, καθώς και σε αερόπλοια.



Εικόνα 2.8: Κυψέλες καυσίμου και UAV

Συνοψίζοντας, η ενσωμάτωση κυψελών καυσίμου σε μη επανδρωμένα ηλεκτρικά αεροσκάφη κρίνεται απαραίτητη για την πραγματοποίηση πτήσεων μεγάλης διάρκειας, με αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις. Η χρήση τους παραμένει ιδιαίτερα περιορισμένη, λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής και αποθήκευσης του υδρογόνου, καθώς και της περιορισμένης κινητικότητας της αγοράς. Πάντως κάποια μοντέλα έχουν είδη κατασκευαστεί, στηριζόμενα αποκλειστικά σε υβριδικά συστήματα τροφοδοσίας PEMFC-μπαταριών, όπως το Global Observer, ένα HALE uav με αντοχή πτήσης από 5-7 ημέρες μέγιστο υψόμετρο πτήσης τα 20km, ικανό να σηκώσει βάρος έως 180kg. Διάφορα άλλα μοντέλα είναι υπό κατασκευή (Boeing Phantom Eye, Ion Tiger). Σε uav μικρού μεγέθους, με συστήματα προώθησης πολλών στροφειών, η канаδική εταιρία Energyor χρησιμοποίησε για πρώτη φορά μία PEMFC ως πηγή τροφοδοσίας, με αποτέλεσμα να σημειώσει παγκόσμιο ρεκόρ στη διάρκεια πτήσης uav αυτής της κατηγορίας (3:43'28'').



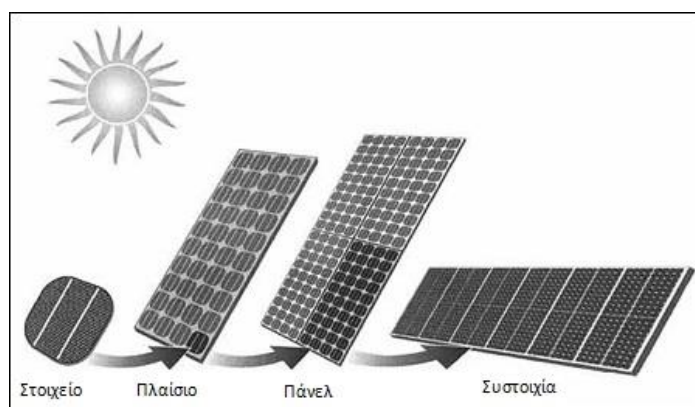
Εικόνα 2.9: Global Observer

Κεφάλαιο 3: Φωτοβολταϊκά Στοιχεία

3.1 Γενικά Στοιχεία

3.1.1 Εισαγωγή

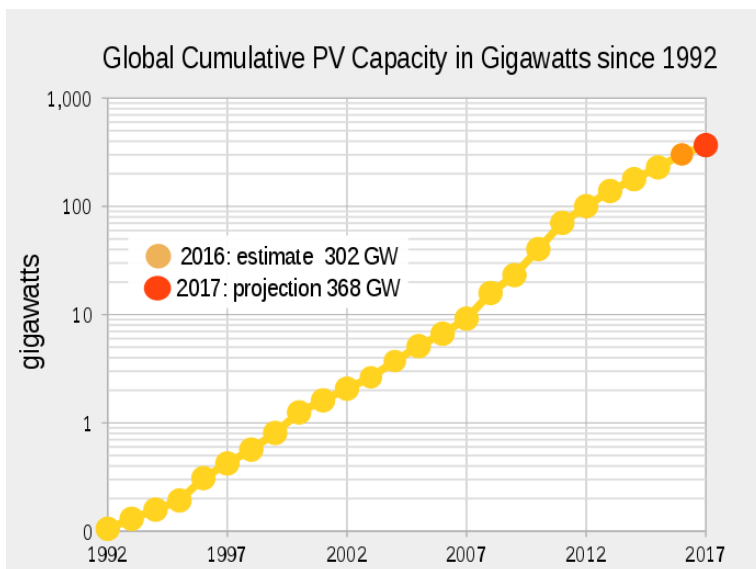
Το φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελεί μία συσκευή μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, ή αλλιώς την ικανότητα που διαθέτουν κάποια υλικά (ημιαγωγοί) να χρησιμοποιούν την ηλιακή ακτινοβολία, δηλαδή τα φωτόνια, προς μεταφορά μέρους των ηλεκτρονίων τους σε ένα εξωτερικό κύκλωμα. Μία ομάδα φωτοβολταϊκών στοιχείων, συνδεδεμένων μεταξύ τους, αποτελεί ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο, ενώ πολλά φωτοβολταϊκά πλαίσια στηριζόμενα στην ίδια μεταλλική κατασκευή ορίζονται ως ένα φωτοβολταϊκό πάνελ. Κατ' επέκταση το σύνολο πολλών φωτοβολταϊκών πάνελ, ονομάζεται φωτοβολταϊκή συστοιχία. Τέλος, ως φωτοβολταϊκό σύστημα, ορίζεται ένα σύστημα ισχύος, το οποίο αποτελείται από πολλές συστοιχίες συνδεδεμένες μεταξύ τους, ένα μετατροπέα συνεχούς/συνεχούς ή συνεχούς/εναλασσόμενου, καλώδια, και οποιαδήποτε άλλα επί μέρους στοιχεία απαιτούνται ώστε να καθίσταται το συνολικό σύστημα λειτουργικό. Το μέγεθος του συστήματος μπορεί να κυμαίνεται από μικρές μονάδες παραγωγής μερικών watt έως μεγάλες εγκαταστάσεις εκατοντάδων MW. Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα μπορεί να λειτουργεί αυτόνομα, ή να είναι συνδεδεμένο σε κάποιο κεντρικό δίκτυο προς απορρόφηση ή τροφοδοσία ηλεκτρικής ισχύος, αναλόγα με τις απαιτήσεις. Τα αυτόνομα συστήματα αποτελούν ένα μικρό μέρος της αγοράς, και χρησιμοποιούνται κυρίως ως επί μέρους τμήματα υβριδικών συστημάτων ισχύος για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων κινητών μονάδων, απομονωμένων περιοχών, και γενικότερα ηλεκτρικών φορτίων με δυσκολία διασύνδεσης στο κεντρικό δίκτυο.



Εικόνα 3.1: Φωτοβολταϊκές διατάξεις

Από ιστορικής σκοπιάς, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο καταγράφηκε για πρώτη φορά από το Γάλλο φυσικό Edmund Becquerel (1820-1891) το έτος 1839, ο οποίος παρατήρησε την παραγωγή μικρών ποσοτήτων ηλεκτρικού ρεύματος από συγκεκριμένα υλικά, όταν αυτά εξετίθεντο υπό το ηλιακό φως. Κατά τα επόμενα χρόνια δε σημειώθηκε σημαντική πρόοδος στο συγκεκριμένο τομέα, πέραν της καθιέρωσης του πρώτου ηλιακού στοιχείου ως πατέντα στον Αμερικανό Edward Weston (1850-1936 / πατέντα US 389124 A) το έτος 1888. Το 1905

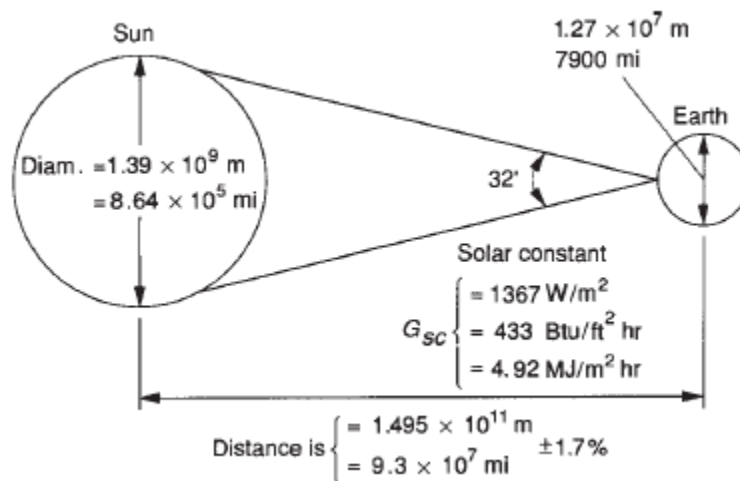
αποτελεί έτος αναφοράς για την τεχνολογία φωτοβολταϊκών συστημάτων. Ο Albert Einstein θα περιγράψει αναλυτικά το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο στο άρθρο του "On a heuristic Viewpoint Concerning the Production and Transformation of Light" (μία διερευνητική ματιά στην παραγωγή και μεταποίηση του φωτός) για το οποίο μάλιστα τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ το έτος 1921. Το άρθρο αυτό παρουσιάστηκε μαζί με άλλα τρία άρθρα στην εργασία του με τίτλο Annus Mirabilis (εξαιρετική χρονιά). Οι θεωρητικές μελέτες του Γερμανού φυσικού αποδείχτηκαν πειραματικά το 1916 από τον Αμερικανό Robert Millikan (1868-1953), οπότε και άνοιξε ο δρόμος για τις πρώτες πρακτικές κατασκευές. Η εταιρία Bell κατασκεύασε το πρώτο φωτοβολταϊκό πάνελ (1954) το οποίο ήταν υπερβολικά ακριβό για ευρεία χρήση, ενώ η απόδοσή του δεν ξεπερνούσε το 6%. Όπως και στην τεχνολογία κυψελών καυσίμου, έτσι και εδώ η ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών στοιχείων οφείλεται κατά μεγάλο βαθμό στην ενσωμάτωσή τους σε διαστημικά προγράμματα (Vanguard I). Κατά τη δεκαετία 1960-1970 τόσο οι Ηνωμένες Πολιτείες όσο και η Σοβιετική Ένωση συνέβαλαν σημαντικά στη βελτίωση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων, ενώ η πετρελαϊκή κρίση που ακολούθησε αύξησε ιδιαίτερα το ενδιαφέρον σχετικά με τις ανανεώσιμες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας. Με τις αρχές του 1990 τα φωτοβολταϊκά συστήματα ξεκίνησαν να ενσωματώνονται σταδιακά σε διάφορες τεχνολογικές εφαρμογές, με την ποιότητα των υλικών κατασκευής τους να βελτιώνεται συνεχώς. Σήμερα έχουν επιτευχθεί υψηλές αποδόσεις στα κρυσταλλικά κυρίως υλικά και αρκετές χώρες, με πρωτοπόρες την Γερμανία, την Ιαπωνία και την Κίνα, έχουν ήδη επενδύσει τεράστια κονδύλια με σκοπό την ευρύτερη εκμετάλλευση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας. Σχετικά με την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε παγκόσμια κλίμακα, η Ελλάδα τοποθετείται στη 13^η θέση ως προς τη μέγιστη δυναμικότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά στοιχεία, με εγκατεστημένη δυναμικότητα 2613 MW κατά το έτος 2015. Επίσης, το 7.4% της συνολικής εγχώριας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας καλύπτεται αποκλειστικά από φωτοβολταϊκά συστήματα, τοποθετώντας την χώρα μας στη 2^η θέση στη σχετική κατηγορία [38].



Εικόνα 3.2: Παγκόσμια δυναμικότητα φωτοβολταϊκών (GW)

3.1.2 Ηλιακή Ενέργεια

Για να γίνει ευκολότερα κατανοητή η έννοια της ηλιακής ενέργειας, παρατίθεται αρχικά μία περιγραφή του ουράνιου σώματος, που αποκαλούμε ήλιο. Ο ήλιος, λοιπόν είναι μία σφαίρα που αποτελείται από πυρακτωμένη αέρια ύλη, με διάμετρο 1.39×10^9 m και βρίσκεται σε απόσταση 1.5×10^{11} m, κατά μέσο όρο, από τον πλανήτη μας. Όπως παρατηρείται από τη γη, ο ήλιος εκτελεί μία πλήρη περιστροφή γύρω από τον άξονά του κάθε τέσσερις εβδομάδες. Ωστόσο δεν περιστρέφεται ως στερεό σώμα, καθώς η περιστροφή του ισημερινού διαρκεί περίπου 27 ημέρες, ενώ των πολικών περιοχών περίπου 30 ημέρες. Από ενεργειακής σκοπιάς, μπορεί να παρομοιαστεί με έναν αντιδραστήρα σύντηξης, τροφοδοτούμενο από αέρια (κυρίως υδρογόνο και ήλιο) που διατηρούνται εντός μίας νοητής σφαίρας και συγκρατούνται μέσω βαρυτικών δυνάμεων. Η ακτινοβολία που εκπέμπεται, λόγω της σύντηξης του υδρογόνου στον πυρήνα του ηλίου, τοποθετείται στο φάσμα ακτινών Χ (μήκος κύματος: 10nm-20pm) και Γάμμα (μήκος κύματος μικρότερο των 10pm). Η ενέργεια που παράγεται, μεταφέρεται σταδιακά στην επιφάνεια της σφαίρας και στη συνέχεια ακτινοβολείται στο διάστημα. Έτσι, μακροσκοπικά, ο ήλιος μπορεί να θεωρηθεί ως μία τέλεια πηγής ακτινοβολίας (μέλαν σώμα) υπό θερμοκρασία περί τους 5700°K (5427 °C). Λόγο της εκκεντρότητας που χαρακτηρίζει την τροχιά μεταξύ δύο ουράνιων σωμάτων, η απόσταση μεταξύ ηλίου και γης μεταβάλλεται κατά 1.7%, κατά τη διάρκεια περιστροφής τους. Σε απόσταση μίας αστρονομικής μονάδας (1.495×10^{11} m), δηλαδή τη μέση απόσταση γης-ηλίου, οι πόλοι ηλίου σχηματίζουν γωνία 32°, με κορυφή το κέντρο της γης. Λαμβάνοντας υπ όψιν τα παραπάνω ορίζεται ένα ιδιαίτερα σημαντικό μέγεθος, η **ηλιακή σταθερά (1367 W/m^2)** ως η εκπεμπόμενη ενέργεια ανά μονάδα χρόνου που προσπίπτει κάθετα σε επιφάνεια ενός τετραγωνικού μέτρου, έξω από την ατμόσφαιρα της γης. Σημειώνεται πως η τιμή της σταθεράς μεταβάλλεται κατά τις διάφορες ημέρες του έτους[29].



Εικόνα 3.3: Σχέσεις μεταξύ γης-ηλίου

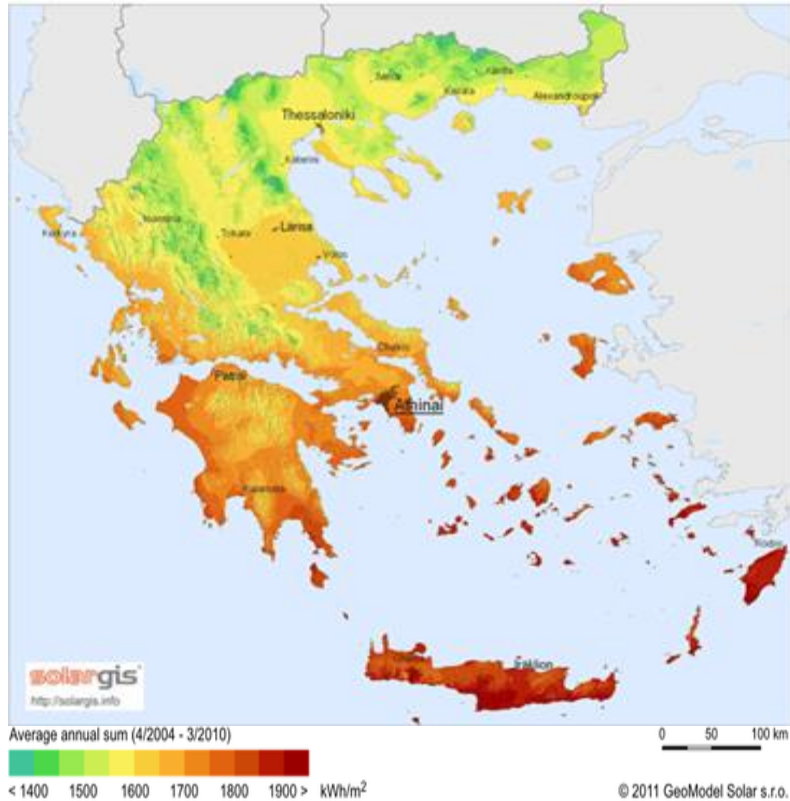
Μία ηλιακή ακτίνα αποτελεί ουσιαστικά μία δέσμη φωτονίων. Όπως είναι λογικό, η ένταση των ηλιακών ακτινών ελαττώνεται, κατά τη διέλευση τους μέσα από την ατμόσφαιρα της γης, αφού τα φωτόνια, συγκρούονται με διάφορα σωματίδια (σκόνης, καπνού, υδρατμών κλπ), με

αποτέλεσμα να διασκορπίζονται κατά ένα μέρος. Επίσης ένα ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται από διάφορα συστατικά μέρη της ατμόσφαιρας, όπως το όζον, μειώνοντας ακόμα περισσότερο τη μεταφερόμενη ενέργεια. Προκειμένου να ληφθούν υπόψη τα παραπάνω, ορίζεται το μέγεθος της Μάζας Αέρα (Air Mass), το οποίο αναφέρεται στο μονοπάτι που ακολουθεί το φως, καθώς διέρχεται μέσα από την ατμόσφαιρα, με αναφορά το ζενίθ (ακριβώς κάθετη διεύθυνση/ θ_z). Από μαθηματικής σκοπιάς έχουμε $AM = 1/\cos(\theta_z)$. Έτσι, ανά πάσα στιγμή, στην επιφάνεια της γης φτάνουν δύο συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας:

- Η **διάχυτη ακτινοβολία (Diffuse Radiation)** ισούται με το τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας στο εξωτερικό της ατμόσφαιρας που διασκορπίζεται κατά τη διέλευση μέσω αυτής.
- Η **άμεση ακτινοβολία (Beam Radiation)** ισούται με το υπόλοιπο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας.

Για διατάξεις που βρίσκονται στο έδαφος, ή σε κάποιο υψόμετρο χαμηλότερο από το ύψος των νεφών, πρέπει να ληφθεί υπ όψιν και η **ανακλώμενη ακτινοβολία**. Το μέγεθος αυτό εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη μορφολογία του εδάφους και την πυκνότητα των νεφών[30]. Έχοντας αναφερθεί στα επί μέρους τμήματα από τα οποία αποτελείται η συνολικά προσπιπτουσα ακτινοβολία, μπορούμε να εξετάσουμε τους παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν άμεσα το μέγεθος αυτό. Έτσι η τιμή της διαφέρει σημαντικά μεταξύ περιοχών διαφορετικού γεωγραφικού πλάτους, λόγω της διαφοράς στη γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών. Επίσης, ακόμα και σε κοντινές περιοχές, η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να μεταβάλλεται σημαντικά αναλόγως τις καιρικές συνθήκες, την ώρα της ημέρας και το ύψος της επιφάνειας συλλογής.

Όσον αφορά την Ελλάδα, σε γενικές γραμμές παρουσιάζει υψηλές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας, ιδιαίτερα στο κεντρικό και νότιο τμήμα της, καθώς και στα νησιά. Η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων στα μέρη αυτά είναι μία πολύ καλή επιλογή καθώς εξασφαλίζονται μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας καθόλη τη διάρκεια του έτους. Ιδιαίτερα στα νησιά, η διεύθυνση διαφόρων μορφών ΑΠΕ αποτελεί ένα φλέγον ζήτημα κατά τα τελευταία χρόνια, μιας και έτσι μπορεί να υπάρξει περιορισμός της χρήσης των γεννητριών ντήζελ, με μεγάλα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.



Εικόνα 3.4: Ηλιακή ακτινοβολία στην Ελλάδα

3.1.3 Αξιοποίηση Ηλιακής Ενέργειας και Εφαρμογές

Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί για την κάλυψη ποικίλων ενεργειακών αναγκών, κατά κύριο λόγο ηλεκτρισμού και θερμότητας. Έτσι, εκτός της εκμετάλλευσης του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, στο οποίο θα αναφερθούμε αναλυτικότερα στη συνέχεια, είναι δυνατή η μετατροπή τεράστιων ποσοτήτων ηλιακής ενέργειας σε θερμότητα, γεγονός που προϋποθέτει την παρουσία ενός ηλιακού θερμικού συστήματος. Το βασικότερο στοιχείο αυτού, αποτελεί ένας ηλιακός θερμικός συλλέκτης, όπου πρόκειται για μία διάταξη αποτελούμενη από μία σκούρα/μαύρη επιφάνεια, τον απορροφητή, και ένα διαφανές κάλυμμα τοποθετημένα επί μίας μεταλλικής βάσης. Ο απορροφητής έχει την ικανότητα να απορροφά ένα ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας, προς αύξηση της θερμοκρασίας του. Το κάλυμμα φροντίζει ώστε η δεσμευόμενη ακτινοβολία να «παγιδεύεται» μεταξύ αυτού και του απορροφητή, ώστε να αποφεύγονται οι διαρροές προς το περιβάλλον. Στους χαρακτηριζόμενους ως ακάλυπτους συλλέκτες το κάλυμμα παραλείπεται, ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα αντανάκλασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

Ως γνωστόν, κατά την επαφή δύο σωμάτων παρατηρείται ροή θερμότητας από το θερμότερο στο ψυχρότερο σώμα. Προς αξιοποίηση του φαινομένου αυτού, ο συλλέκτης βρίσκεται σε άμεση επαφή με κάποια υγρή ή στερεή μάζα, η οποία θερμένεται συνεχώς, ή αλλιώς αποθηκεύει την παραγόμενη ενέργεια. Η μάζα αυτή, εκτός της αποθήκευσης, φροντίζει επίσης

για τη μεταφορά της ενέργειας έως το σημείο κατανάλωσης. Στους ηλεκτρικούς θερμοσίφωνες, το μέσο μεταφοράς αποτελεί το νερό, ενώ η κατανάλωση της παραγόμενης θερμικής ενέργειας είναι άμεση. Σε εφαρμογές ηλιακού κλιματισμού, το θερμαινόμενο μέσο φροντίζει για την παροχή ενέργειας στο συμπιεστή.

Ιδιαίτερης αναφοράς χρήζουν τα συστήματα συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας (Concentrated Solar Energy/CSP). Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται από τα πολύ παλιά χρόνια, κυρίως για άντληση νερού. Εφαρμογές μεγάλης ισχύος παρατηρούνται από τη δεκαετία 1980-1990, ενώ στις μέρες μας έχουμε συστήματα παραγωγής έως και 80MW. Ένα σύστημα CSP, φροντίζει για την απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας, υπό μορφή θερμότητας. Σε πρώτο στάδιο, η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει σε ένα σύνολο κατόπτρων, τα οποία την κατευθύνουν σε έναν ειδικά διαμορφωμένο συλλέκτη. Μέσω αυτού θερμαίνεται μία συγκεκριμένη ποσότητα νερού, ενώ ένας λέβητας αναλαμβάνει το ρόλο του εναλλάκτη θερμότητας, μεταξύ του νερού και της μίας θερμικής μηχανής, όπου πρόκειται συνήθως για μία ατμομηχανή. Με τη θέρμανση του νερού έως την κατάλληλη θερμοκρασία, έχουμε μετατροπή σε ατμό και εκτόνωση αυτού, προς αξιοποίηση της θερμικής ενέργειας υπό μορφή μηχανικού έργου. Η ατμομηχανή μπορεί στη συνέχεια να κινεί μία γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή έναν κινητήρα. Το μεγάλο μειονέκτημα των συστημάτων αυτών είναι η μείωση του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη με την αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας, με αποτέλεσμα η συνολική απόδοση του συστήματος να κυμαίνεται συνήθως περί το 30%[31].

3.2 Φωτοβολταϊκά Συστήματα

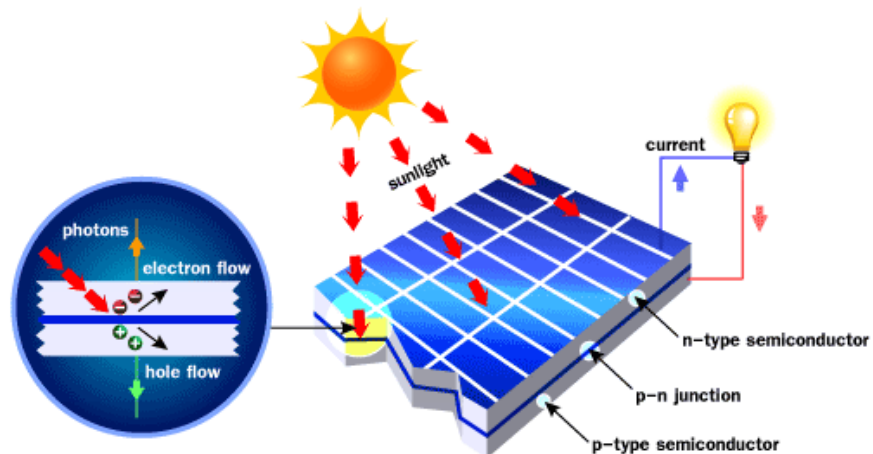
3.2.1 Αρχή Λειτουργίας - Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

Η αρχή λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου στηρίζεται στο αποκαλούμενο ως φωτοηλεκτρικό, ή αλλιώς φωτοβολταϊκό, φαινόμενο. Το φαινόμενο αυτό περιγράφει τη διαδικασία μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Όπως είναι γνωστό, όταν το ηλιακό φως προσπίπτει πάνω σε μία επιφάνεια, ένα μέρος αυτού ανακλάται, ένα άλλο τη διαπερνά, ενώ το υπόλοιπο απορροφάται, συνήθως υπό μορφή θερμότητας. Εάν η επιφάνεια αυτή αποτελείται από μία συγκεκριμένη κατηγορία υλικών, τους ημιαγωγούς, μπορεί να παρατηρηθεί μεταβολή των ηλεκτρικών ιδιοτήτων αυτών, αναλόγως την ένταση του φωτός (ή αλλιώς την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας). Έτσι υπό χαμηλή ακτινοβολία, τα άτομα ενός ημιαγωγού δονούνται και συστρέφονται γύρω από τις προκαθορισμένες θέσεις τους, χωρίς να είναι δυνατή η διάσπαση των δεσμών στο εσωτερικό τους. Τα ηλεκτρόνια αποκτούν αρκετή ενέργεια ώστε να επιτύχουν αύξηση της ενεργειακής στάθμης τους. Φυσικά η κατάσταση αυτή δεν αποτελεί την ισορροπία του συστήματος, οπότε τα ηλεκτρόνια επιστρέφουν σύντομα στην αρχική τροχιά τους, εκλύοντας θερμότητα κατά τη διαδικασία αυτή. Σε περίπτωση αύξησης

της ακτινοβολίας πάνω από μία συγκεκριμένη τιμή (ενεργειακό διάκενο ημιαγωγού), τα ηλεκτρόνια αποκτούν αρκετή ενέργεια ώστε να ελευθερωθούν από την προκαθορισμένη τροχιά τους εντός του κρυσταλλικού πλέγματος. Ως αποτέλεσμα, δημιουργούνται δεσμοί που παρουσιάζουν έλλειψη ηλεκτρονίων ή αλλιώς **οπές**, καθώς και **ελεύθερα ηλεκτρόνια**, συνθέτοντας έτσι ζεύγη οπών-ηλεκτρονίων.

Φυσικά, η αποκλειστική παρουσία οπών και ελεύθερων ηλεκτρονίων εντός του ημιαγωγικού υλικού κατασκευής του φωτοβολταϊκού στοιχείου δεν αρκεί ώστε να έχουμε παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, αφού η ανεξέλεκτη κίνηση τους θα έχει ως αποτέλεσμα την αποβολή της ενέργειας που έλαβαν, υπό μορφή θερμότητας, και επιστροφή της ισορροπίας στο σύστημα. Για να αποφευχθεί αυτό, ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο πρέπει να χαρακτηρίζεται από ένα **φράγμα δυναμικού**, ώστε να φροντίζει για το μόνιμο διαχωρισμό οπών-ηλεκτρονίων, (αφού α δημιουργηθούν από την πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας) εμποδίζοντας την επανένωσή τους. Η απλούστερη μέθοδος για την επίτευξη του σκοπού αυτού είναι η ενσωμάτωση των αποκαλούμενων **p-n ενώσεων** στο εσωτερικό του στοιχείου. Η δημιουργία της p (positive carrier) «πλευράς» της ένωσης, προϋποθέτει τη νόθευση του ημιαγωγικού υλικού κατασκευής με άτομα κάποιας χημικής ένωσης, τα οποία φέρουν λιγότερα ηλεκτρόνια σθένους. Ως αποτέλεσμα παρουσιάζεται ουδέτερο συνολικό ηλεκτρικό φορτίο, με τάση πρόσληψης ηλεκτρονίων. Εντελώς αντίστοιχα, για το n τμήμα της ένωσης, το ημιαγωγικό υλικό νοθεύεται με άτομα που περιέχουν περισσότερα ηλεκτρόνια σθένους. Έτσι σε μία ένωση p-n, ηλεκτρόνια μεταφέρονται αυθόρμητα από το n προς το p τμήμα, με αποτέλεσμα τη συσσώρευση θετικού και αρνητικού φορτίου αντίστοιχα[32]. Συνεπώς μπορεί να εξασφαλιστεί η διαφορά δυναμικού που επιθυμούμε, επιλέγοντας κατάλληλα το ποσοστό και τα στοιχεία νόθευσης του ημιαγωγού. Ως συνέπεια της ύπαρξης του φράγματος δυναμικού, οι οπές και οι ελεύθεροι φορείς δεν εξουδετερώνονται, αλλά συγκεντρώνονται στα δύο διαχωριστέα τμήματα. Με τη σύνδεση ενός ηλεκτρικού φορτίου μεταξύ των δύο τμημάτων τα ηλεκτρόνια ρέουν αυθόρμητα μέσω αυτού, προς εξουδετέρωση του συνολικού φορτίου, παρέχοντας έτσι μία ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος.

Συνοψίζοντας το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο: Κατά την πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας σε έναν ημιαγωγό, ηλεκτρόνια αποσπώνται από κάποια άτομα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία οπών-ελεύθερων φορέων που διαχωρίζονται μέσω ενός φράγματος δυναμικού, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να επέλθει εξουδετέρωση του συνολικού φορτίου. Με τη σύνδεση ενός αγωγού-φορτίου, παρατηρείται ροή των ηλεκτρονίων μέσω αυτού και επαναφορά του συστήματος σε κατάσταση ισορροπίας. Το φαινόμενο επαναλαμβάνεται για όσο χρόνο ηλιακό φως προσπίπτει επί του ημιαγωγού.



Εικόνα 3.5: Φωτοβολταϊκό φαινόμενο και φ/β στοιχείο

3.2.2 Συστατικά Μέρη ενός Φωτοβολταϊκού Συστήματος

Όπως αναφέρθηκε στο εισαγωγικό μέρος, ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από διάφορα επί μέρους στοιχεία, καθένα εκ των οποίων επιτελεί κάποια ξεχωριστή λειτουργία. Παρακάτω αναφερόμαστε τα συστατικά μέρη που απαντώνται συχνότερα σε ένα τέτοιο σύστημα.

3.2.2.1 Φωτοβολταϊκό στοιχείο/κύτταρο/κυψέλη

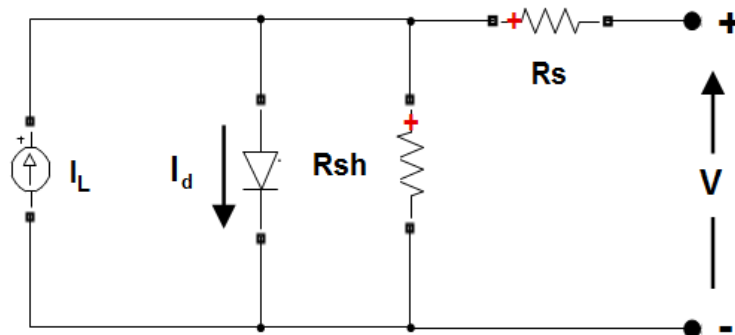
- **Γενικά Στοιχεία**

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούν την καρδιά του συνολικού συστήματος, καθώς μέσω αυτών καθίσταται δυνατή η εκμετάλλευση του φωτοβολταϊκού φαινομένου και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελεί μία δίοδο ημιαγωγικών ενώσεων τύπου p-n, υπό τη μορφή επίπεδης πλάκας (εικόνα 3.5). Τα ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται, μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, κατευθύνονται προς το τμήμα τύπου-n ενώ οι οπές προς το τμήμα τύπου-p. Έτσι δημιουργείται διαφορά δυναμικού, μεταξύ των δύο τμημάτων (ακροδεκτών) της διόδου, που αντιστοιχεί στην ορθή πόλωση αυτής[30]. Η δυναμικότητα της τάσης παραγωγής ενός φ/β στοιχείου μπορεί να κυμαίνεται από 0.5 έως 1.5V, αναλόγως το υλικό κατασκευής του. Κατά κύριο λόγο, ως ημιαγωγός χρησιμοποιείται το πυρίτιο, υπό κρυσταλλική μορφή, ή υπό μορφή λεπτού υποστρώματος. Από ενεργειακής σκοπιάς, δεν αποτελεί τη βέλτιστη επιλογή, καθώς το ενεργειακό διάκενο του πυριτίου είναι 1.1eV, τιμή χαμηλότερη από άλλα ημιαγωγικά υλικά, όπως το αρσενιούχο γάλλιο (1.4eV). Η χρήση πυριτίου ωφείλεται κυρίως στην εξάπλωση του υλικού αυτού σε πολλούς τομείς της τεχνολογίας κατά τα τελευταία χρόνια (υπολογιστές, τηλεπικοινωνίες, ηλεκτρονική κ.α.). Έτσι το κόστος παραγωγής του είναι αρκετά μειωμένο, συγκριτικά με άλλα υλικά, ενώ υπάρχει και

η κατάλληλη υποδομή προς την παραγωγή ενώσεων πυριτίου υψηλής καθαρότητας. Επίσης μπορεί να ανακυκλωθεί μετά το περας της χρήσης του.

Ανεξαρτήτως υλικού κατασκευής, πολύ σημαντικό ρόλο κατά τη διαδικασία μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική, παίζει η θερμοκρασία λειτουργίας του φ/β στοιχείου. Με την άνοδο της θερμοκρασίας, τμήμα των παραγόμενων φορέων αποκτά αρκετή ενέργεια ώστε να μπορεί να διαπεράσει το φράγμα δυναμικού της ένωσης p-n, με αποτέλεσμα την εξουδετέρωση μέρους του φορτίου. Επίσης αν η θερμοκρασία λειτουργίας είναι πολύ χαμηλή είναι πιθανόν η ποσότητα της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας να μην αρκεί για την παραγωγή οπών-ελεύθερων ηλεκτρονίων εντος του ημιαγωγού. Ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο πυριτίου παράγει περίπου 3W (0-5 Watt peak), υπό ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας (25°C). Ο θεωρητικός βαθμός απόδοσης εκτιμάται στο 22%, αλλά σε πρακτικές εφαρμογές κυμαίνεται μεταξύ 12%-18%. Φυσικά για την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ισχύος, πραγματοποιείται παράλληλη ή εν σειρά σύνδεση πολλών φ/β κυψελών, προς σύνθεση φ/β πλαισίων, πανελ και συστοιχιών (εικόνα 3.1).

- **Ισοδύναμο Κύκλωμα**



Εικόνα 3.6: Ισοδύναμο κύκλωμα φ/β στοιχείου σε Simulink/Simpowersystems

Στην εικόνα (3.6) παρουσιάζεται το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου. Στην ιδανική του μορφή, αποτελείται από μία πηγή ρεύματος (I_L), συνδεδεμένη παράλληλα με μία δίοδο. Το μέτρο του παραγόμενου ρεύματος εξαρτάται από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, ενώ η φορά της διόδου είναι τέτοια, ώστε η ροή του ρεύματος διαμέσου αυτής να γίνεται κατά τη φορά ορθής πόλωσης. Στη συνέχεια ακολουθεί το μη ιδανικό τμήμα του στοιχείου, που συμβολίζει τις απώλειες ενέργειας που παρατηρούνται (όπως είπαμε η απόδοση δεν ξεπερνά το 22%). Έτσι η αντίσταση R_{sh} είναι τοποθετημένη παράλληλα στη δίοδο και συμβολίζει τις απώλειες, λόγω της παρουσίας ρευμάτων διαρροής. Η συμπερίληψή της στο ισοδύναμο κύκλωμα οφείλεται κατά κύριο λόγο σε κατασκευαστικές ατέλειες του φ/β στοιχείου, παρά σε λάθη κατά το σχεδιασμό του. Η αντίσταση R_s αποκαλείται αντίσταση σειράς και συμβολίζει τις απώλειες που οφείλονται στην

κίνηση του ρεύματος μέσω της διόδου, στην αντίσταση επαφής μεταξύ ακροδέκτη-επιφάνειας πυριτίου και στην αντίσταση κατά μήκος των ακροδεκτών.

3.2.2.2 Κατασκευή στήριξης

Πρόκειται για μία μεταλλική κατασκευή, επί της οποίας τοποθετούνται τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Στα σταθερά φωτοβολταϊκά συστήματα η κατασκευή στήριξης αποτελείται από μεταλλικές δοκούς, κατάλληλα τοποθετημένες ώστε να εξασφαλίζεται η ασφαλής και αποδοτική λειτουργία των φ/β στοιχείων καθόλη τη διάρκεια του έτους. Τα σταθερά συστήματα είναι συνήθως χαμηλής ισχύος και τοποθετούνται, ως επί το πλείστον, σε οροφές κτιρίων ώστε να αποφεύγεται η σκίαση. Αντίθετα, στα φωτοβολταϊκά συστήματα εντοπισμού (Solar Tracking Systems) η κατασκευή στήριξης περιστρέφεται καθόλη τη διάρκεια της ημέρας, ακολουθώντας την πορεία του ηλίου. Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να διαθέτει έναν ή δύο βαθμούς ελευθερίας, αυξάνοντας την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατά ένα ποσοστό 30% - 40%. Οι απαιτούμενες διαδικασίες συντήρησης των συστημάτων αυτών είναι ελάχιστες, ενώ η διάρκεια ζωής τους μπορεί να ξεπεράσει τα είκοσι έτη. Φυσικά το κόστος τους είναι αυξημένο συγκριτικά με τα σταθερά συστήματα, αφού περιλαμβάνουν κάποιο μηχανισμό κίνησης (12/24/36V dc κινητήρα) καθώς και ενσωματωμένα ηλεκτρικά συστήματα με αισθητήρες (Hall ή ποτενσιόμετρα)[33]. Έτσι επιλέγονται κυρίως σε εφαρμογές μεγάλης ισχύος, δηλαδή φωτοβολταϊκά πάρκα.

3.2.2.3 Μετατροπέας/Ρυθμιστής Ισχύος

Ο μετατροπέας (DC/DC ή DC/AC) αποτελεί τον εγκέφαλο του φ/β συστήματος και φροντίζει, μεταξύ άλλων, για τη μετατροπή της παραγόμενης ενέργειας στην κατάλληλη μορφή. Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελεί στην ουσία μία πηγή παραγωγής συνεχούς (DC) ρεύματος. Για να μπορεί να γίνει η σύνδεση του συστήματος με ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, ή κάποιο φορτίο εναλλασσόμενου ρεύματος, θα πρέπει να υπάρξει μετατροπή της παραγόμενης ισχύος από DC σε AC μορφή κατάλληλης συχνότητας. Το ρόλο αυτό επιτελεί ένας μονοφασικός ή τριφασικός αντιστροφέας (inverter). Γενικά οι αντιστροφείς συνίσταται να τοποθετούνται κοντά στην πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, προς αποφυγή περιττών καλωδιώσεων. Έτσι συχνά περιβάλλονται από ένα στεγανό περίβλημα (υπό προστατευτικό πρότυπο IP65), όταν πρέπει να τοποθετηθούν σε εξωτερικούς χώρους. Χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης, περί το 95%, που εξαρτάται σημαντικά από την παρουσία ή όχι ενός μετασχηματιστή στο εσωτερικό του αντιστροφέα. Εκτός της μετατροπής DC/AC, σε ένα φ/β σύστημα, ο μετατροπέας ισχύος αναλαμβάνει τους παρακάτω ρόλους:

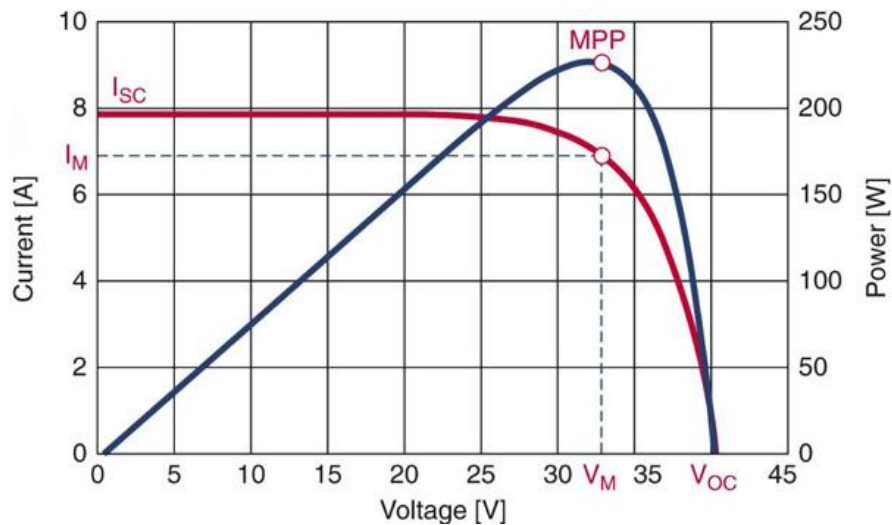
1) Παρακολούθηση του σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking/MPPT)

Όπως φαίνεται από την εικόνα (3.7) η ισχύς που παράγει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο και κατ' επέκταση μία ϕ/β συστοιχία δε διατηρεί μία σταθερή τιμή, αλλά εξαρτάται από την τάση λειτουργίας. Αναφερόμενοι εν συντομία στα μεγέθη που εικονίζονται, κατά τη βραχυκύκλωση του στοιχείου, το ρεύμα που παρουσιάζεται ορίζεται ως ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc}) ενώ, κατά την ανοιχτοκύκλωση των άκρων του, η τάση λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της και χαρακτηρίζεται ως τάση ανοιχτοκύκλωσης (V_{oc}). Και στις δύο περιπτώσεις η συνολικά παραγόμενη ενέργεια είναι μηδενική. Το σημείο μέγιστης ισχύος αντιστοιχεί στις τιμές V_m I_m και αποτελεί το βέλτιστο σημείο λειτουργίας. Έτσι, ανεξαρτήτως του ρεύματος και της τάσης του φορτίου/δικτύου που καλείται να εξυπηρετήσει το φωτοβολταϊκό σύστημα, η τάση λειτουργίας πρέπει να παραμένει σταθερή, στην τιμή V_m . Προς εντοπισμό του σημείου αυτού, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες, οι οποίες χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- **Έμμεσες Μέθοδοι:** Περιλαμβάνονται οι μέθοδοι σταθερής τάσης (constant voltage), και κλασματικής τάσης ανοιχτοκύκλωσης (fractional open circuit voltage). Στην μέθοδο σταθερής τάσης, επιλέγονται αρχικά δύο τάσεις λειτουργίας, μία μέγιστη τιμή κατά το χειμώνα και μία ελάχιστη τιμή κατά το καλοκαίρι. Στη συνέχεια τα φωτοβολταϊκά στοιχεία λειτουργούν αποκλειστικά επί αυτών των τιμών, αναλόγως την περίοδο το έτους. Η μέθοδος της κλασματικής τάσης ανοιχτοκύκλωσης βασίζεται στην παρατήρηση πως η βέλτιστη τάση λειτουργίας V_m αποτελεί ένα ποσοστό (70% έως 82%) της τάσεως ανοιχτοκύκλωσης. Έτσι, με τη χρήση ενός διακόπτη, η συστοιχία ϕ/β αποσυνδέεται περιοδικά από το δίκτυο, προς μέτρηση της τιμής της V_{oc} και λειτουργία της συστοιχίας περίπου στο 76% της μετρούμενης τιμής. Εναλλακτικά, μπορεί να έχουμε περιοδική αποσύνδεση ενός ϕ/β στοιχείου οδηγού (pinot) και ρύθμιση της τάσης λειτουργίας με βάση τη συμπεριφορά του[34].
- **Άμεσες Μέθοδοι:** Οι δύο κυριότερες μέθοδοι αυτής της κατηγορίας είναι η μέθοδος Διατάραξης και Παρατήρησης (Perturb and Observe/P&O) και η μέθοδος Σταδιακής Αγωγιμότητας (Incremental Conductance). Ονομάζονται άμεσες καθώς η εφαρμογή τους περιλαμβάνει τη μέτρηση της τάσης και του ρεύματος λειτουργίας και αξιοποίηση των μετρήσεων αυτών, μέσω κάποιου αλγορίθμου, προς εντοπισμό του MPP. Κατά την εφαρμογή τους η τιμή της τάσης μεταβάλλεται ελάχιστα και αναλόγως την επίδραση που έχει η μεταβολή αυτή στο ρεύμα λειτουργίας αντιλαμβανόμεστε σε ποιο σημείο της καμπύλης V-P βρισκόμαστε, οπότε και προς ποιά κατεύθυνση πρέπει να γίνει η επόμενη μεταβολή/διατάραξη της τάσης.

Οι άμεσες μέθοδοι είναι πολύ πιο αποτελεσματικές από τις έμμεσες, κατά τη μεταβολή των καιρικών συνθηκών και της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς φροντίζουν ώστε τα ϕ/β στοιχεία να λειτουργούν περί το MPP. Βέβαια αυτό δεν είναι πάντα εφικτό καθώς, σε ταχύτητα

μεταβαλλόμενες συνθήκες, μπορεί να μη διατίθεται ο απαιτούμενος χρόνος προσαρμογής του αλγορίθμου. Σε κάθε περίπτωση, ο βαθμός απόδοσης του συστήματος αυξάνεται σημαντικά. Τόσο στις άμεσες όσο και στις έμμεσες μεθόδους χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικά ισχύος προς μεταβολή της τάσης και του ρεύματος λειτουργίας, όπως ένα κύκλωμα μετατροπέα DC/DC, στους οποίους θα αναφερθούμε εκτενέστερα σε επόμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 3.7: Μορφή καμπύλης τάσης-ισχύος/ρεύματος

2) Επιτήρηση του συστήματος και προστασία αντι-νησιδοποίησης

Το φαινόμενο της νησιδοποίησης μπορεί να εμφανιστεί όταν δύο ή περισσότερες πηγές συμβάλουν στην τροφοδοσία ενός κεντρικού δικτύου. Η νησιδοποίηση αποτελεί μία κατάσταση κατά την οποία μία εκ των πηγών συνεχίζει να παράγει ηλεκτρική ενέργεια και να τροφοδοτεί το δίκτυο, ενώ δεν υπάρχει η παρουσία του κεντρικού πάροχου ενέργειας. Το φαινόμενο αυτό εμπεριέχει πολλούς κινδύνους, ιδιαίτερα για το εργατικό προσωπικό, που μπορεί να μην αντιληφθεί ότι το δίκτυο εξακολουθεί να βρίσκεται υπό τάση και να έχουμε φαινόμενα εγκαύματος, ακόμα και ηλεκτροπληξίας. Επίσης, λόγω της απότομης μεταβολής της παρεχόμενης τάσης του δικτύου, είναι πολύ πιθανό να παρουσιαστεί ενδεχόμενη βλάβη σε κάποια από τις συνδεδεμένες συσκευές. Η παρουσία ΑΠΕ (όπως ένα σύστημα φωτοβολταϊκών ή αναμογεννητριών) στο δίκτυο περιπλέκει ακόμα περισσότερο την κατάσταση, αφού η παραγωγή των μονάδων αυτών δεν εξαρτάται άμεσα από τη ζήτηση του δικτύου αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες. Το ρόλο αποσύνδεσης και ρύθμισης της παραγωγής των μονάδων αναλαμβάνουν συνήθως αντιστροφείς ή μετατροπείς συνεχούς-συνεχούς, που παρεμβάλλονται μεταξύ αυτών και του δικτύου. Οι διατάξεις αυτές φροντίζουν επίσης για τη γενικότερη επιτήρηση του συστήματος. Τα δεδομένα που συγκεντρώνονται αποστέλλονται στο σύστημα SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) του δικτύου με κάποιο ενσύρματο ή ασύρματο μέσο, προς βελτιστοποίηση της συνολικής λειτουργίας του.

3.2.2.4 Σύστημα Αποθήκευσης Ενέργειας

Η παρουσία ΑΠΕ πρέπει να συνοδεύεται παντά από κάποιο σύστημα αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας. Λαμβάνοντας ως παράδειγμα τα φωτοβολταϊκά συστήματα, η παραγωγή τους περιορίζεται από τις ώρες ηλιοφάνειας κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ τη νύχτα η ενέργεια που παράγεται είναι μηδενική. Προς τροφοδοσία λοιπόν του συνόλου των φορτίων είναι απαραίτητη η αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας κατά τις ώρες αιχμής, και διάθεσή της κατά τις ώρες μηδενικής παραγωγής. Συνεπώς κρίνεται απαραίτητη η παρουσία, τουλάχιστον ενός, επαναφορτιζόμενου ηλεκτρικού συσσωρευτή. Η τεχνολογία και τα χαρακτηριστικά αυτού, διαφέρουν αναλόγως τις απαιτήσεις του συστήματος. Συνήθως σε σταθερές διατάξεις επιλέγονται μπαταρίες μολύβδου-οξέως, ενώ για την τροφοδοσία ηλιακών οχημάτων μπαταρίες τεχνολογίας λιθίου.

3.2.2.5 Συστήματα Ελεγχου και Λοιπά Στοιχεία

Το φωτοβολταϊκό σύστημα συμπληρώνουν διάφορες διατάξεις προστασίας (ασφάλειες, ηλεκτρονόμοι κλπ), η γείωση, ένας μετρητής της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και οι απαραίτητες καλωδιώσεις μεταξύ αυτών. Στην περίπτωση αυτόνομης λειτουργίας απαιτείται επιπλέον κάποιο ξεχωριστό σύστημα επιτήρησης και συλλογής δεδομένων.

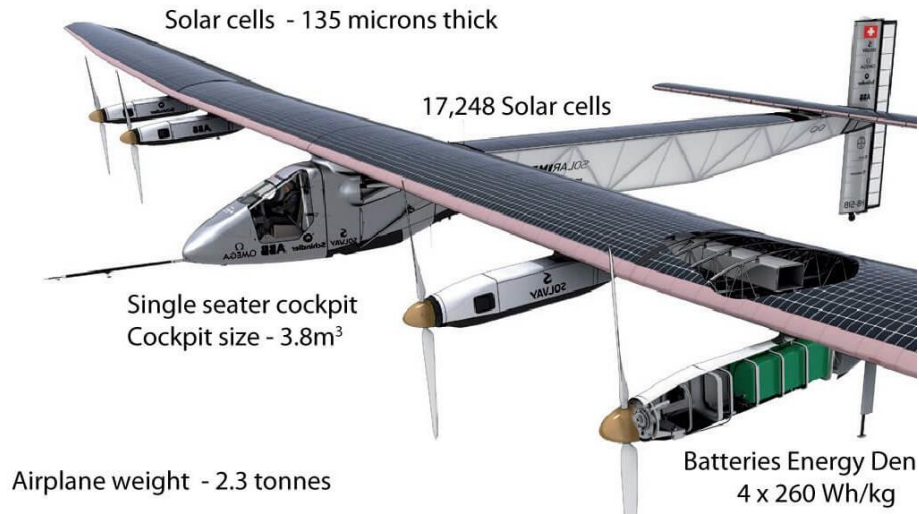
3.3 Ηλιακή Πτήση

3.3.1 Ιστορική Αναδρομή

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, η εταιρία Bell, το έτος 1954, κατασκεύασε τις πρώτες λειτουργικές ηλιακές κυψέλες. Η ηλεκτρική κίνηση στον τομέα της αεροπλοΐας επιχειρήθηκε λίγα χρόνια αργότερα, το 1957, με τον συνταγματάρχη H.J. Tarlin να πιστώνεται την κατασκευή του πρώτου ηλεκτροκίνητου τηλεκατευθυνόμενου μοντέλου πτήσης (Radio Queen). Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιούσε έναν κινητήρα μονίμων μαγνητών, τροφοδοτούμενο από μπαταρίες αργύρου-ψευδαργύρου, ενώ το βάρος του ήταν 8lbs (3.5 kg). Οι δύο αυτές τεχνολογίες συνδυάστηκαν λίγα χρόνια αργότερα, το Νοέμβριο του 1974, στη μη επανδρωμένη πλατφόρμα Sunrise 1, όπου επρόκειτο για το πρώτο ηλιακό αεροσκάφος. Παρουσίαζε μήκος εκπετάσματος 9.76 μέτρα και βάρος 12.25 κιλά [35] ενώ χρησιμοποιούσε 4480 ηλιακές κυψέλες, με δυνατότητα παραγωγής έως 450Wp. Η διάρκεια της πρώτης πτήσης του ήταν μόλις 20 λεπτά, ενώ καταγράφηκαν τελικώς πτήσεις έως τρεις με τέσσερις ώρες. Ακολούθησε η κατασκευή του μοντέλου Sunrise II κατά το επόμενο έτος με μείωση του συνολικού βάρους στα 10.21 κιλά και βελτίωση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων, με αποτέλεσμα τη δυνατότητα παραγωγής έως 600Wp ηλεκτρικής ισχύος. Κατά τα επόμενα χρόνια το ενδιαφέρον σχετικά με την κατασκευή επανδρωμένων αεροσκαφών τροφοδοτούμενων αποκλειστικά από φωτοβολταϊκά στοιχεία εντάθηκε ιδιαίτερα. Η πρώτη

καταγεγραμμένη επανδρωμένη πτήση ηλιακού αεροσκάφους πραγματοποιήθηκε το 1980 με το μοντέλο Gossamer Penguin. Το Penguin ζύγιζε περί τα 31 κιλά, χωρίς το βάρος του πιλότου, ενώ το εκπέτασμά του ήταν 21.5 περίπου μέτρα, καλυμμένο από φωτοβολταϊκά στοιχεία συνολικής ισχύος 600Wp. Διάφορα μοντέλα, βασισμένα σε αυτά που προαναφέρθησαν, αναπτύχθηκαν στη συνέχεια, με χώρες όπως τη Γερμανία, την Αγγλία και τις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής να αναλαμβάνουν την κατασκευή και τη χρηματοδότησή τους. Το Solar Challenger αποτελούσε ουσιαστικά μία βελτιωμένη έκδοση του Penguin, με δυναμικότητα παραγωγής 2500Wp σε μηδενικό υψόμετρο πτήσης. Άλλα σημαντικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν κατά την εποχή εκείνη αποτελούν το Sunseeker (ΗΠΑ 1990) καθώς το Solair I.

Με το τέλος της δεκαετίας 1980-1990, η βιομηχανία κατασκευής ηλιακών αεροσκαφών προσανατολίστηκε προς τη δημιουργία μοντέλων μεγάλου υψομέτρου και μεγάλης αυτονομίας πτήσης. Το πρώτο μοντέλο αυτής της κατηγορίας (HALSOL) αναπτύχθηκε από την εταιρία AeroVironment και αφού ενσωματώθηκε στο πρόγραμμα ERAST (Environmental Research Aircraft and Sensor Technology) της NASA, μετονομάστηκε στο γνωστό Pathfinder. Το αεροσκάφος ήταν αρκετά εντυπωσιακό για την εποχή, αφού παρουσίαζε εκπέτασμα 30 μέτρων και βάρος περί τα 250 κιλά. Πραγματοποίησε την παρθενική του πτήση το 1993 στο Οντάριο του Καναδά ενώ το 1995 αναρριχήθηκε έως τα 15.4, περίπου, χιλιόμετρα. Συνεχείς βελτιώσεις οδήγησαν στην παραγωγή του Pathfinder Plus, το οποίο κατόρθωσε την πραγματοποίηση πτήσης σε ύψος 24 χιλιομέτρων[35]. Το μοντέλο Helios (NASA / 1994) αναπτύχθηκε με στόχο το υψόμετρο πτήσης των 30 χιλιομέτρων, ενώ η αυτονομία του στόχευε να ξεπεράσει τις 24 ώρες. Ο πρώτος στόχος επιτεύχθηκε, όμως το αεροσκάφος καταστράφηκε το 2003, με πτώση στον Ειρηνικό Ωκεανό. Στην Ευρώπη, την κατασκευή μη επανδρωμένων ηλιακών αεροσκαφών έχει αναλάβει, κατά κύριο λόγο, η βρετανική εταιρία Qinetiq, με πολύ μεγάλη επιτυχία. Συγκεκριμένα, το μοντέλο Zephyr 7 σημείωσε παγκόσμιο ρεκόρ αντοχής πτήσεως στον τομέα των μη επανδρωμένων αεροσκαφών (3 ώρες 22 λεπτά και 8 δευτερόλεπτα) το έτος 2010. Το υψόμετρο πτήσης του είναι 21 χιλιόμετρα, ενώ εκτός των φωτοβολταϊκών στοιχείων, χρησιμοποιούνται μπαταρίες τεχνολογίας λιθίου-θείου προς τροφοδοσία του προωθητικού μηχανισμού κατά τις νυχτερινές ώρες. Αρκετά πρόσφατα, το Μάρτιο του 2016, το επανδρωμένο ηλιακό αεροσκάφος Solar Impulse 2 ολοκλήρωσε το γύρο του κόσμου, ένα εγχείρημα που ξεκίνησε το Μάρτιο του 2015.



Εικόνα 3.8: Μοντέλα Solar Impulse 2 (επάνω) Zephyr (αριστερά) και Helios

3.3.2 Πλεονεκτήματα και Χρήσεις Ηλιακών Ύαν

Η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών στοιχείων σε μη επανδρωμένα αεροσκάφη παρέχει πλήθος πλεονεκτημάτων, για αυτό και μελετήθηκε αμέσως, με την ανάπτυξη της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας. Αρχικά, η ενέργεια που παρέχεται από ένα φωτοβολταϊκό πάνελ, μπορεί να χαρακτηριστεί ως «πράσινη», καθώς η διαδικασία παραγωγής της δεν συνεπάγεται αρνητικές επιπτώσεις για το περιβάλλον. Επίσης η ηλιακή ενέργεια διατίθεται σε αφθονία και η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς σε μεγάλα υψόμετρα πτήσεως εξαρτάται αποκλειστικά από την απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Το μέγεθος αυτό βελτιώνεται σημαντικά υπό χαμηλές θερμοκρασίες και με την απουσία νεφώσεων. Η όλο και αυξανόμενη χρήση φωτοβολταϊκών προς τροφοδοσία υβριδικών, διασυνδεδεμένων ή και αυτόνομων συστημάτων έχει οδηγήσει στη δημιουργία μεγάλης ζήτησης στην αγορά, κατά τα τελευταία χρόνια, καθώς και στην αυτοματοποίηση της διαδικασίας κατασκευής και συντήρησής τους. Ως αποτέλεσμα πολλές εταιρίες έχουν δραστηριοποιηθεί στο συγκεκριμένο τομέα, με άμεση

συνέπεια την αύξηση του ανταγωνισμού και τη σημαντική μείωση της τιμής των φ/β. Επιπροσθέτως, τα φ/β πάνελ λειτουργούν εντελώς αθόρυβα, καθιστώντας τα μια ιδανική επιλογή για αποστολές επιτήρησης στο στρατιωτικό τομέα ή σε αστικό περιβάλλον, όπου η ηχορύπανση αποτελεί ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα. Αναφέρουμε επίσης πως η ενσωμάτωση φ/β στοιχείων στο εκπέτασμα του αεροσκάφους δεν αποτελεί πλέον κάποιο ιδιαίτερο ζήτημα, αφού διατίθενται στην αγορά πάνελ με δυνατότητα κάμψης, αποτελούμενα από φωτοβολταϊκά κύτταρα μονοκρυσταλλικού πυριτίου με βαθμό απόδοσης μεγαλύτερο του 22.5%[9].

Κάποια από τα ηλιακά υαν, όπως το Zephyr, υπάγονται στην κατηγορία των HAPS (High Altitude Pseudo Satellites), μία υποκατηγορία των HALE (High Altitude Long Endurance). Τα αεροσκάφη αυτά χαρακτηρίζονται από πολύ μεγάλο υψόμετρο πτήσης, μεγαλύτερο των 20 χιλιομέτρων. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές τηλεπικοινωνιών, καθώς και παρακολούθησης μεγάλων περιοχών. Γενικά στόχος των HAPS είναι η υποκατάσταση μέρους των λειτουργιών των δορυφόρων. Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη προτιμούνται έναντι των αερόπλοιων στο συγκεκριμένο τομέα, λόγω της μεγαλύτερης ευελιξίας τους και της δυνατότητας πραγματοποίησης ελιγμών κατά την πτήση. Αρχικά παρουσιάστηκε μεγάλος ενθουσιασμός όσον αφορά τη χρήση των υαν ως HAPS. Εταιρίες κολοσσοί όπως το Facebook ανακοίνωσαν το ενδιαφέρον τους για την κατασκευή ενός τέτοιου τύπου αεροσκάφους, ενώ η Google εξαγόρασε την εταιρία Titan Aerospace προς ολοκλήρωση της κατασκευής του μοντέλου Solara 50, με στόχο την παροχή πρόσβασης στο διαδίκτυο απομακρυσμένων περιοχών. Δυστυχώς, η επιλογή αυτή δεν αποδείχτηκε ιδιαίτερα σωστή, καθώς κατά την πτήση του αεροσκάφους εμφανίστηκαν προβλήματα σταθεροποίησης. Αρχικά παρουσιάστηκε δυσκολία στον έλεγχο αυτού, και υπερβολική αύξηση της ταχύτητας πτήσης που οδήγησε σε αστοχία της αριστερής πτέρυγας. Στη συνέχεια το αεροσκάφος ακολούθησε μία ακανόνιστη καθοδική πορεία υψηλής ταχύτητας, με αποτέλεσμα να συντριβεί μετά από μόλις τέσσερα λεπτά πτήσης.



Εικόνα 3.9: Solara 50

Κεφάλαιο 4: Ηλεκτρικοί Συσσωρευτές – Μπαταρίες

4.1 Γενικά στοιχεία

Ένας ηλεκτρικός συσσωρευτής, ή αλλιώς μία μπαταρία, παρέχει τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας υπό χημική μορφή και μετατροπή αυτής σε ηλεκτρική μορφή, μέσω μίας διαδικασίας οξειδωσης-αναγωγής (redox). Η πρώτη μορφή ηλεκτρικού συσσωρευτή κατασκευάστηκε περί το έτος 1800 από τον Alessandro Volta (1745-1827), καθηγητή στο πανεπιστήμιο της Ραβία στην Ιταλία, ενώ ο όρος μπαταρία χρησιμοποιήθηκε αρχικά από τον Benjamin Franklin (1706-1790) το έτος 1748 προς περιγραφή μίας διάταξης αποτελούμενης από πυκνωτές. Ο κλάδος αυτός αναπτύχθηκε ταχύτατα κατά το 19^ο αιώνα, ενώ από το δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα η αγορά μπαταριών εκτοξεύθηκε, με αποτέλεσμα ήδη από το έτος 1991 να κοστολογείται στα 21 δισεκατομμύρια δολάρια[36].

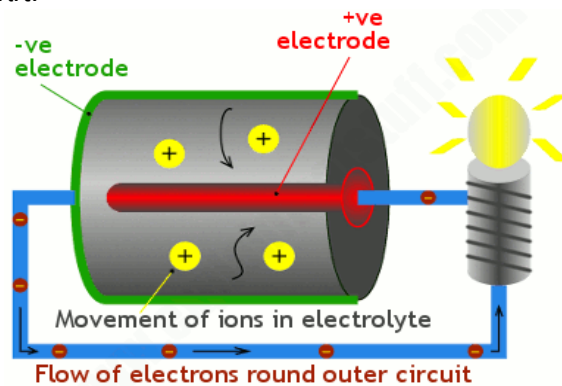
Μία μπαταρία αποτελείται από τη σειριακή ή παράλληλη σύνδεση πολλών **ηλεκτροχημικών στοιχείων**, τοποθετημένων εντός ενός, ατσάλινου συνήθως, δοχείου. Καθένα από αυτά τα στοιχεία συνιστά μία συσκευή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αποτελείται από τρία συστατικά μέρη:

- Το αρνητικό ηλεκτρόδιο ή **άνοδο**, το οποίο παραχωρεί ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα και οξειδώνεται κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής διαδικασίας.
- Το θετικό ηλεκτρόδιο ή **κάθοδο**, το οποίο δέχεται ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής διαδικασίας.
- Τον **ηλεκτρολύτη**, ο οποίος έχει διπλό ρόλο: Αφενός λειτουργεί ως μονωτής, όσον αφορά την κίνηση των ηλεκτρονίων μεταξύ των ηλεκτροδίων, ώστε να μην έχουμε φαινόμενα βραχυκυκλώσεως κατά τη κατάσταση ηρεμίας της μπαταρίας. Αφετέρου διευκολύνει τη ροή των θετικά φορτισμένων ιόντων, κατά τη λειτουργία υπό φορτίο, ώστε να μεταφέρονται μέσω αυτού από την άνοδο στην κάθοδο και όχι μέσω του συνδεδεμένου φορτίου.

Η αυθόρμητη ροή των ηλεκτρονίων από την άνοδο προς την κάθοδο οφείλεται στα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των ηλεκτροδίων, τα οποία είναι συνήθως μέταλλα με διαφορετική ηλεκτραρνητικότητα. Όταν δύο άτομα συνδεονται με έναν ομοιοπολικό δεσμό, το άτομο με τη μεγαλύτερη ηλεκτραρνητικότητα έλκει προς το μέρος του τα ηλεκτρόνια από το άτομο με χαμηλότερη ηλεκτραρνητικότητα. Στην περίπτωση των ηλεκτρικών συσσωρευτών παρουσιάζεται πλεόνασμα ηλεκτρονίων στην άνοδο, προσδίδοντας σε αυτήν αρνητικό φορτίο. Ως αποτέλεσμα, κατά τη σύνδεση ενός φορτίου-καταναλωτή μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, τα ηλεκτρόνια βρίσκουν αγώγιμο δρόμο, που επιτρέπει τη ροή τους από το ηλεκτρόδιο μικρότερης ηλεκτραρνητικότητας προς το ηλεκτρόδιο μεγαλύτερης ηλεκτραρνητικότητας. Τα ηλεκτρόνια αυτά συνιστούν το ηλεκτρικό ρεύμα που τροφοδοτεί το φορτίο. Ταυτόχρονα, τα θετικά ιόντα ακολουθούν τη ροή των ηλεκτρονίων, μέσω του ηλεκτρολύτη, που διευκολύνει τη διέλευσή τους. Πρέπει να σημειωθεί πως τα προαναφερθέντα ισχύουν κατά τη διαδικασία

εκφόρτισης μίας μπαταρίας. Κατά τη φόρτιση αυτής, ο χαρακτηρίσμός των ηλεκτροδίων ως άνοδος/κάθοδος αντιστρέφεται.

Συνήθως προς κατασκευή του αρνητικού ηλεκτροδίου χρησιμοποιούνται μέταλλα όπως ο ψευδάργυρος (Zn) το κάδμιο (Cd) ο μόλυβδος (Pb) και το λίθιο (Li). Στο ρόλο του θετικού ηλεκτροδίου συναντάμε κάποιο οξείδιο του μαγνησίου (MnO_2) νικελίου ($NiOOH$) ή μολύβδου (PbO_2), ή κάποιο αλογόνο. Με βάση αυτά τα υλικά καθορίζεται η χημεία των στοιχείων της μπαταρίας και οι ακριβείς ηλεκτροχημικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα κατά τη φόρτιση/εκφόρτιση. Η επιλογή αυτών των στοιχείων γίνεται με στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού βάρους και την αποθήκευση μέγιστης ποσότητας ενέργειας. Βέβαια και άλλοι παράγοντες λαμβάνονται υπόψιν, όπως η αντιδραστικότητα τους με άλλα στοιχεία, το κόστος, η δυσκολία κατασκευής κλπ.



Εικόνα 4.1: Ροή ιόντων κατά την εκφόρτιση της μπαταρίας

Όσον αφορά τον ηλεκτρολύτη, αυτός μπορεί να χαρακτηριστεί επίσης ως αγωγός ιόντων. Περιέχει κάποιο άλας (θετικά και αρνητικά ιόντα) εντός ενός διαλύτη, ο οποίος μπορεί να είναι σε υγρή μορφή ή μορφή γέλης (gel). Διακρίνεται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- **Οργανικός Ηλεκτρολύτης:** Συνήθως αποτελείται από ένα ανόργανο μίγμα εντός ενός οργανικού διαλύτη πολύ χαμηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Επιλέγεται για μπαταρίες που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε αρκετά μεγάλο εύρος τάσης, δηλαδή αρκετά υψηλότερα της ονομαστικής τιμής, και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Πρόκειται περί τοξικού και εύφλεκτου μίγματος, για το λόγο αυτό απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά την ενσωμάτωσή του στα στοιχεία της μπαταρίας[37].
- **Υδατικός Ηλεκτρολύτης:** Εδώ ο διαλύτης είναι το νερό. Μπορεί να παρουσιάζει ουδέτερη όξινη ή αλκαλική συμπεριφορά. Χρησιμοποιείται στις γνωστές μας αλκαλικές μπαταρίες (υδροξείδιο του καλίου). Πρόκειται για μη εύφλεκτο μίγμα, ενώ το κόστος παρασκευής του είναι μικρότερο από αυτό ενός οργανικού ηλεκτρολύτη. Επίσης η χρήση του νερού ως διαλύτη προσδίδει υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα στο μίγμα, καθιστώντας τον υδατικό ηλεκτρολύτη μία ιδιαίτερα ελκυστική επιλογή για εφαρμογές μεγάλης ισχύος. Η τάση λειτουργίας του είναι μικρότερη από αυτή του οργανικού ηλεκτρολύτη, ενώ παρουσιάζει πιο ευαίσθητη συμπεριφορά σε φαινόμενα διάβρωσης, με αποτέλεσμα να μειώνεται η συνολική διάρκεια ζωής της μπαταρίας

- **Στερεός Ηλεκτρολύτης:** Χρησιμοποιείται σε μπαταρίες όπου τα ηλεκτρόδια βρίσκονται σε στερεά κατάσταση. Αποτελεί καλό αγωγό ιόντων, ενώ δρα ως μονωτής για τα ηλεκτρόνια. Είναι μη εύφλεκτος, ικανός να λειτουργήσει σε υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης δεν παρουσιάζονται προβλήματα σχετικά με τη διαρροή ποσότητας ηλεκτρολύτη προς το περιβάλλον. Προς το παρόν οι πρακτικές εφαρμογές είναι αρκετά περιορισμένες, λόγω της υψηλής τιμής αντίστασης του μίγματος, γεγονός που συνεπάγεται σημαντικές απώλειες ισχύος.

4.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη

4.2.1 Τάση

Η τάση αναφέρεται στη διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων της μπαταρίας και μετράται σε volt. Στους ηλεκτρικούς συσσωρευτές, η τάση μπορεί να χαρακτηριστεί ως[38]:

- **Ονομαστική τάση:** Η τιμή της εξαρτάται από τον αριθμό των ηλεκτροχημικών στοιχείων που είναι συνδεδεμένα εν σειρά, καθένα εκ των οποίων χαρακτηρίζεται από μία ονομαστική τιμή τάσης. Πρόκειται για ένα θεωρητικό μέγεθος καθώς, όταν η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη η τιμή της είναι λίγο μεγαλύτερη της ονομαστικής, ενώ όταν έχουμε πλήρη εκφόρτιση η τιμή της είναι λίγο μικρότερη.
- **Τάση αποκοπής:** Αποτελεί το κατώτατο όριο έως το οποίο επιτρέπεται να εκφορτιστεί η μπαταρία. Είναι το μέγεθος που καθορίζει την κατάσταση πλήρους εκφόρτισης.
- **Τάση ανοιχτοκυκλώσεως:** Αναφέρεται στην τάση μεταξύ των ακροδεκτών, υπό κενό φορτίο.
- **Τερματική τάση:** Είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδετών της μπαταρίας, όταν βρίσκεται υπό φορτίο.
- **Μέση τάση:** Είναι η μέση τιμή της τάσης κατά την εκφόρτιση.
- **Τάση φόρτισης:** Ορίζουμε την τάση στην οποία πρέπει να διατηρείται η μπαταρία κατά τη διαδικασία φόρτισης. Στα τελευταία στάδια φόρτισης, υπάρχει συνήθως μία μεταβολή στο μέγεθος αυτό αναλόγως το είδος της μπαταρίας που χρησιμοποιείται.

4.2.2 Ρεύμα

Όταν αναφερόμαστε στο ρεύμα μιας μπαταρίας, αυτό μπορεί να περιγράψει είτε τη διαδικασία φόρτισης είτε τη διαδικασία εκφόρτισης αυτής.

Έτσι ως **ρεύμα εκφόρτισης** ορίζεται η τιμή του ρεύματος φορτίου το οποίο καλείται να παρέχει η μπαταρία, υπό τερματική τάση. Η τιμή αυτή μπορεί να είναι κοντά στο ονομαστικό ρεύμα εκφόρτισης, ή πολλές φορές πολλαπλάσια ή υποπολλαπλάσια αυτού.

Ως **ρεύμα φόρτισης** ορίζεται η τιμή του ρεύματος υπό την οποία παραματοποιείται η φόρτιση της μπαταρίας. Η τιμή αυτή δεν επιτρέπεται να αποκλίνει σημαντικά από την ονομαστική.

4.2.3 Εσωτερική Αντίσταση

Το μέγεθος αυτό είναι συμβολικό, υπό την έννοια ότι δε θα συναντήσουμε κάποιον ωμικό αντιστάτη, στο εσωτερικό της μπαταρίας. Παρόλα αυτά, κατά τη μετατροπή της χημικής ενέργειας των ηλεκτροδίων σε ηλεκτρική, παρατηρούνται θεμικές απώλειες, οι οποίες οφείλονται στην ωμική συμπεριφορά μέρους των υλικών κατασκευής των ηλεκτροχημικών στοιχείων. Θεωρώντας ως ΔV τη διαφορά της τάσης ανοιχτοκυκλώσεως από την τερματική τάση και I το ρεύμα εκφόρτισης, ορίζεται η **εσωτερική αντίσταση** της μπαταρίας ως ο λόγος $\frac{\Delta V}{I}$. Φυσικά η τιμή της είναι μεταβλητή και εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το φορτίο, ενώ αυξάνεται κατά τη μακροχρόνια χρήση της μπαταρίας, αφού παρατηρείται σχηματισμός ανεπιθύμητων χημικών ενώσεων μειωμένης αγωγιμότητας στους ακροδέκτες.

4.2.4 Χωρητικότητα και Ρυθμός Εκφόρτισης

Η χωρητικότητα (capacity) ενός ηλεκτρικού συσσωρευτή αναφέρεται στο συνολικό περιεχόμενο φορτίο, ή αλλιώς τη συνολική ενέργεια που μπορεί αυτός να αποδώσει. Ως μονάδα μέτρησης της χωρητικότητας χρησιμοποιείται συνήθως ο όρος Ah (αμπερ-ώρες) ή κάποιες φορές ο όρος Wh (βατ-ώρες). Οι μονάδες αυτές αναφέρονται στα συνολικά αμπερ/βατ που είναι ικανή να παρέχει η μπαταρία για χρονικό διάστημα μίας ώρας, υπό ονομαστικές συνθήκες θερμοκρασίας και ονομαστικό ρυθμό εκφόρτισης. Ο **ρυθμός εκφόρτισης**, αποτελεί ένα μέγεθος αναφερόμενο στο ρεύμα που ζητείται από την μπαταρία. Έτσι αν έχουμε εκφόρτιση υπό το ονομαστικό ρεύμα ο ρυθμός εκφόρτισης αντιστοιχεί σε 1C, ενώ αν χρειαζόμαστε ρεύμα διπλάσιο του ονομαστικού, η μπαταρία λειτουργεί υπό 2C κ.ο.κ. Καθώς αυξάνεται ο ρυθμός εκφόρτισης, οδηγούμαστε σε όλο και χαμηλότερες τιμές χωρητικότητας. Κάποιες μπαταρίες έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν ακόμη και σε πολύ υψηλούς ρυθμούς εκφόρτισης, της τάξεως των 5C ή 7C ενώ άλλες συνίσταται να λειτουργούν το πολύ έως 2C. Η λειτουργία υπό υψηλούς ρυθμούς εκφόρτισης μπορεί να οδηγήσει σε σταδιακή μείωση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας, ενώ σε ηλεκτρικούς συσσωρευτές εξειδικευμένης τεχνολογίας μπορεί να έχουμε και φαινόμενα ανάφλεξης. Πρέπει να σημειωθεί πως η εκφόρτιση γίνεται έως μία συγκεκριμένη κατώτατη τιμή τάσης (τάση αποκοπής) και όχι ωστόσο αυτή μηδενιστεί. Γενικά το μέγεθος αυτό, καθώς και η χωρητικότητα της μπαταρίας εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από τη χημική σύσταση των υλικών κατασκευής των ηλεκτροδίων.

4.2.5 Κατάσταση/Στάθμη φόρτισης

Η **κατάσταση/στάθμη φόρτισης** (State of charge/SOC) μίας μπαταρίας συμβολίζει τη διαθέσιμη ενέργεια αυτής, ως ποσοστό της συνολικής ενέργειας που περιείχε, όταν ήταν πλήρως φορτισμένη. Πρόκειται δηλαδή για το κλάσμα:

$$\frac{\text{Διαθέσιμο Φορτίο}}{\text{Συνολικό Φορτίο}}$$

Η τιμή συνολικού φορτίου πρέπει να ορίζεται ανάλογα με τη χωρητικότητα αναφοράς κάθε στοιχείου(και όχι με τη μέγιστη χωρητικότητα) μετά από ένα μεγάλο διάστημα χρήσεως. Το

μέγεθος αυτό μπορεί να μετρηθεί με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι με χρήση ενός πυκνόμετρου, προς μέτρηση της πυκνότητας του ηλεκτρολύτη, ενώ κατά το δεύτερο τρόπο μετράται η τάση μεταξύ των ηλεκτροδίων. Αναλόγως την τεχνολογία της μπαταρίας, η κατάσταση φόρτισης μπορεί να κυμαίνεται από 100% έως 50%, ενώ, σε κάποιες περιπτώσεις, επιτρέπεται να λάβει τιμές έως το 30%. Περαιτέρω εκφόρτιση της μπαταρίας μειώνει σημαντικά τη διάρκεια ζωής της.

4.2.6 Βάθος Εκφόρτισης

Το **βάθος εκφόρτισης** (depth of discharge/DOD), δηλώνει την ποσότητα της ενέργειας που έχει αφαιρεθεί από την μπαταρία. Ο συσχετισμός του DOD με τη στάθμη φόρτισης είναι εμφανής, αφού πρόκειται κατά κάποιο τρόπο για δύο αντίθετα μεγέθη. Έτσι, όταν η κατάσταση φόρτισης βρίσκεται στο 100% το βάθος εκφόρτισης βρίσκεται στο 0%, ενώ η αντιστοιχία είναι πλήρης και για τα υπόλοιπα ποσοστά (πχ για SOC 70% έχουμε DOD 30%). Πρέπει να σημειωθεί πως το βάθος εκφόρτισης μπορεί να λάβει τιμές και μεγαλύτερες από τη μονάδα. Αυτό συμβαίνει συνήθως κατά τον πρώτο καιρό χρήσης μιας μπαταρίας, όπου η περιεχόμενη τάση παρουσιάζει τιμή υψηλότερη της ονομαστικής.

4.2.7 Κατάσταση υγείας

Η **κατάσταση υγείας** αποτελεί ένα μέτρο σύγκρισης μεταξύ της παρούσας απόδοσης μίας μπαταρίας και της απόδοσης που αυτή είχε κατά τον πρώτο καιρό χρήσης της. Λαμβάνοντας υπόψιν παράγοντες όπως η εσωτερική αντίσταση, η μέγιστη τιμή φορτίου και άλλα χαρακτηριστικά μεγέθη, η κατάσταση υγείας ενός ηλεκτρικού συσσωρευτή αποτελεί μία σημαντική ένδειξη ως προς την εναπομείνουσα διάρκεια ζωής του. Το μέγεθος αυτό ερμηνεύεται ανάλογα με τη φύση του συστήματος τροφοδοσίας. Έτσι, σε υβριδικά συστήματα, η μείωση της κατάστασης υγείας δε συνεπάγεται απαραίτητα την αντικατάσταση της μπαταρίας, αλλά την αύξηση του ποσοστού συμμετοχής των υπόλοιπων πηγών. Αντίθετα, σε ένα σύστημα το οποίο τροφοδοτείται αποκλειστικά από ηλεκτρικούς συσσωρευτές, η μείωση της κατάστασης υγείας τους κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο συνεπάγεται απαραίτητα την αντικατάσταση αυτών[39].

4.2.8 Αυτοεκφόρτιση και Διάρκεια Ζωής Ραφιού

Πρόκειται για ένα χαρακτηριστικό μέγεθος που απαντάται σε όλες τις κατηγορίες ηλεκτρικών συσσωρευτών. Όπως δηλώνει ο όρος, κατά τη διατήρηση μιας μπαταρίας σε κατάσταση αναμονής ή, πιο απλά, κατά την αποθήκευσή της, ένα ποσοστό του περιεχόμενου φορτίου διαφεύγει προς το περιβάλλον. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η κατάσταση πλήρους εκφόρτισης αποτελεί την κατάσταση ισοροπίας του συστήματος από θερμοδυναμικής σκοπιάς. Αναλόγως τον τύπο και την ηλεκτροχημική σύσταση των ηλεκτροδίων, το ποσοστό διαρροής μεταβάλλεται σημαντικά. Έτσι σε πρωτεύουσες μπαταρίες, ο **ρυθμός αυτοεκφόρτισης** είναι πολύ χαμηλός, με συνέπεια το σύνολικό φορτίο να διατηρείται για αρκετά χρόνια. Αντιθέτως, η αυτοεκφόρτιση των επαναφορτιζόμενων μπαταριών κυμαίνεται σε υψηλότερα επίπεδα. Ενδεικτικά αναφέρεται η συμπεριφορά των μπαταριών τεχνολογίας ιόντων-λιθίου, όπου ο ρυθμός αυτοεκφόρτισής τους εκτιμάται περί το

5% τις πρώτες 24 ώρες, ενώ στη συνέχεια μειώνεται περί το 1%-2% ανά μήνα. Με την αύξηση του χρόνου αποθήκευσης καθώς και τις επαναλαμβανόμενες χρήσεις της μπαταρίας, ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης μεταβάλλεται σημαντικά με αποτέλεσμα, ακόμα και σε συσσωρευτές εξελιγμένης τεχνολογίας, να λαμβάνει τιμές της τάξεως του 5% ανά μήνα[21].

Η αυτοεκφόρτιση μπορεί να διαφέρει σημαντικά, αναλόγως τις συνθήκες του περιβάλλοντος αποθήκευσης της μπαταρίας. Ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η θερμοκρασία. Ως ιδανική θερμοκρασία αποθήκευσης θεωρείται η τιμή των 20-25 βαθμών Κελσίου, ενώ με την άνοδο αυτής αυξάνεται και ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης. Ως γενικός κανόνας, θεωρείται πως για άνοδο της θερμοκρασίας κατά 10 βαθμούς Κελσίου, ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης διπλασιάζεται. Με βάση το μέγεθος αυτό ορίζεται η **διάρκεια ζωής ραφίου** της μπαταρίας, που αναφέρεται στο μέγιστο χρόνο αποθήκευσης αυτής, έως ότου η χωρητικότητά της μειωθεί σε ένα συγκεκριμένο ποσοστό της αρχικής τιμής της.

4.2.9 Κύκλος Φόρτισης/Εκφόρτισης και Διάρκεια Ζωής

Ένας **κύκλος φόρτισης/εκφόρτισης** αναφέρεται στην παρακάτω διαδικασία: Αρχικά πραγματοποιείται η σύνδεση ενός ηλεκτρικού φορτίου στους ακροδέκτες της μπαταρίας. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβίβαση μέρους της περιεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο φορτίο. Μετά την αποσύνδεση αυτού, ακολουθεί η σύνδεση της μπαταρίας με μία πηγή ηλεκτρικής ενέργειας προς αναπλήρωση της ποσότητας που καταναλώθηκε. Προκειμένου το μέγεθος αυτό να παρέχει πληροφορίες σχετικά με την απόδοση της μπαταρίας, πρέπει να προσδιορίζεται επιπλέον το μέγιστο βάθος εκφόρτισης καθώς και η μέγιστη τάση φόρτισης. Φυσικά στις πρωτεύουσες μπαταρίες έχουμε απλώς έναν κύκλο εκφόρτισης, αφού δεν παρέχεται η δυνατότητα επαναφόρτισής τους.

Μία δευτερεύουσα μπαταρία χαρακτηρίζεται ως λειτουργική έως ότου η μέγιστη διαθέσιμη χωρητικότητά της μειωθεί σε ένα συγκεκριμένο ποσοστό της αρχικής τιμής της. Το ποσοστό αυτό εξαρτάται από την τεχνολογία κατασκευής καθώς και από τον τομέα εφαρμογής. Συνήθως είναι της τάξεως του 70% με 80%. Ως **διάρκεια ζωής** μίας επαναφορτιζόμενης μπαταρίας ορίζεται το συνολικό χρονικό διάστημα κατά το οποίο επιτρέπεται ο χαρακτηρισμός της ως λειτουργική. Συνδέεται άμεσα με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης, καθώς και με μέγιστο επιτρεπόμενο DOD. Διακρίνεται από τη διάρκεια ζωής ραφίου καθώς, σε αυτή την περίπτωση, η μπαταρία δε βρίσκεται σε κατάσταση αποθήκευσης αλλά φορτίζεται και εκφορτίζεται κατ' επανάληψη, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του συστήματος.

4.2.10 Ειδική Ενέργεια/Ενεργειακή Πυκνότητα και Ειδική Ισχύς

Πολλές φορές, εκτός από τη συνολική ενέργεια που περιέχεται σε έναν ηλεκτρικό συσσωρευτή, ενδιαφέρει ιδιαίτερα το βάρος και ο όγκος του. Ιδιαίτερα σε εφαρμογές ηλεκτρικής κίνησης, οι παράγοντες αυτοί είναι κομβικής σημασίας. Προς διευκόλυνση του αγοραστικού κοινού, οι κατασκευαστές παρέχουν συνήθως δύο ιδιαίτερα σημαντικούς δείκτες, την **ειδική ενέργεια** και την **ενεργειακή πυκνότητα** του συσσωρευτή.

- Η ειδική ενέργεια μετράται σε Wh/kg και εκφράζει τη συνολική ενέργεια που περιέχεται στα ηλεκτρόδια της μπαταρίας, ως προς το συνολικό βάρος της.
- Η ενεργειακή πυκνότητα μετράται σε Wh/l και εκφράζει το ίδιο ποσό ενέργειας, ως προς τον όγκο της μπαταρίας.

Η ερμηνεία των δεικτών αυτών χρήζει ιδιαίτερης προσοχής, καθώς η συνολική ενέργεια που αναφέρθηκε παραπάνω αντιστοιχεί στη μέγιστη θεωρητική τιμή που μπορεί να είναι αποθηκευμένη στη μπαταρία. Στην πράξη η τιμή αυτή είναι αρκετά χαμηλότερη.

4.2.11 Ειδική Ισχύς

Το μέγεθος αυτό αποτελεί τη μέγιστη ποσότητα ισχύος ανά μονάδα βάρους, που μπορεί να παρέχει η μπαταρία σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή και μετράται σε W/kg. Εξαρτάται από την τερματική τάση, καθώς και από το μέγιστο ρυθμό εκφόρτισης του συσσωρευτή. Πολλές φορές η αρχική εκτίμηση του βάρους ενός συστήματος τροφοδοσίας, αποτελούμενου αμιγώς από ηλεκτρικούς συσσωρευτές, γίνεται σύμφωνα με την ειδική ισχύ που τους χαρακτηρίζει.

4.3 Κατηγορίες ηλεκτρικών συσσωρευτών

4.3.1 Πρωτεύουσες Μπαταρίες

Όπως προαναφέρθηκε, κατά την εκφόρτιση μίας μπαταρίας, η χημική ενέργεια που περιέχεται στα υλικά κατασκευής των ηλεκτροδίων μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω κάποιων ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Στις πρωτεύουσες μπαταρίες οι αντιδράσεις αυτές είναι μη αναστρέψιμες, με αποτέλεσμα να καθίσταται μη συμφαίρουσα η διαδικασία επαναφόρτισής τους. Για το λόγο αυτό, πολλές φορές χαρακτηρίζονται συχνά και ως «μπαταρίες μίας χρήσης». Κατά τα πρώτα χρόνια μαζικής κυκλοφορίας τους στην αγορά, η ειδική ενέργεια των ηλεκτρικών συσσωρευτών κυμαινόταν σε αρκετά χαμηλά επίπεδα, λαμβάνοντας τιμές της τάξεως των 50 Wh/kg. Η χρήση του ψευδαργύρου ως υλικού κατασκευής του αρνητικού ηλεκτροδίου ευθυνόταν κατά κύριο λόγο για τη συμπεριφορά αυτή. Στις μέρες μας, με χρήση υλικών όπως το διοξείδιο του μαγνησίου, η ειδική ενέργεια έχει αυξηθεί σημαντικά, ενώ σε εξειδικευμένα συστήματα, όπως οι μπαταρίες λιθίου-ιωδίου, το μέγεθος αυτό μπορεί να φτάσει έως και τις 200Wh/kg. Βέβαια οι τιμές που αναφέρονται είναι θεωρητικές, καθώς το βάθος εκφόρτισης δεν πρέπει ποτέ να ξεπερνά το 70%. Ανάλογη βελτίωση έχει σημειωθεί ως προς την ενεργειακή πυκνότητα και την πυκνότητα ισχύος.

Οι πρωτεύουσες μπαταρίες χαρακτηρίζονται από κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα, ένα εκ των οποίων είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής ραφίου, που μπορεί να φτάσει έως και τα δέκα χρόνια. Άλλα εξ αυτών αποτελούν η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα που παρουσιάζουν σε χαμηλούς ρυθμούς εκφόρτισης, η ευκολία στη χρήση τους, καθώς και η ελάχιστη μέριμνα για τη συντήρησή τους. Φυσικά κατά την ενσωμάτωση ενός πρωτεύοντος συσσωρευτή σε κάποιο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν ποικίλοι παράγοντες όπως το βάρος και οι διαστάσεις αυτού, η μέγιστη τάση κατά την εκφόρτιση, οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας κ.α.

Οι πρωτεύουσες μπαταρίες χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών, από ένα μικρό ηλεκτρικό φανό έως εξειδικευμένες διατάξεις τροφοδοσίας ρομποτικών συστημάτων. Μία γενικότερη κατηγοριοποίηση μπορεί να γίνει με βάση τα συστήματα στα οποία ενσωματώνονται, όπως προτείνεται στη [41]. Έτσι έχουμε εφαρμογές:

- Εξοπλισμού μικρού μεγέθους (που φοράται/φέρεται διακριτικά κατά τη χρήση, όπως ένα ηλεκτρικό ρολόι).
- Εξοπλισμού φορητού κατά τη χρήση
- Εξοπλισμού που έχει τη δυνατότητα μεταφοράς, αλλά δε μεταφέρεται συχνά. Στην κατηγορία αυτή υπάγονται τα συστήματα αδιάλειπτης παροχής ισχύος (UPS).

4.3.2 Μπαταρίες εφεδρείας

Πρόκειται ουσιαστικά για πρωτεύουσες μπαταρίες, με ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό: Ένα από τα κύρια συστατικά στοιχεία της μπαταρίας διαχωρίζεται από τα υπόλοιπα κατά την κατάσταση αναμονής. Ως αποτέλεσμα το φαινόμενο της αυτοεκφόρτισης πρακτικά εξαφανίζεται. Συνήθως το στοιχείο αυτό αποτελεί ο ηλεκτρολύτης, ενώ ο διαχωρισμός του μπορεί να γίνεται με μηχανικό ή κάποιο άλλο μέσο. Για παράδειγμα, σε μία θερμική μπαταρία, ο ηλεκτρολύτης διατηρείται σε στερεή μη αγώγιμη μορφή. Η θέρμανση της μπαταρίας οδηγεί στη μετάβασή του σε υγρή μορφή, όπου παρουσιάζει αγώγιμη συμπεριφορά. Σε πολλά συστήματα τροφοδοσίας επικρατούν ακραίες συνθήκες πίεσης ή θερμοκρασίας, όπως για παράδειγμα σε έναν πύραυλο, ή ένα υποβρύχιο. Εκεί χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές εφεδρείας, καθώς ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης μίας συμβατικής πρωτεύουσας μπαταρίας θα αυξανόταν σε πολύ μεγάλο βαθμό, καθιστώντας την πρακτικά άχρηστη για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

4.3.3 Δευτερεύουσες Μπαταρίες

4.3.2.1 Εισαγωγή

Οι μπαταρίες αυτής της κατηγορίας διαθέτουν τη δυνατότητα εκφόρτισης, και επαναφόρτισής τους από το χρήστη. Ο κύκλος αυτός μπορεί να επαναληφθεί πολλές φορές κατά τη διάρκεια ζωής τους. Η επαναφόρτιση μίας δευτερεύουσας μπαταρίας επιτυγχάνεται μέσω της σύνδεσής της σε κάποια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, από την οποία τροφοδοτείται με ρεύμα αντίθετης φοράς του ρεύματος εκφόρτισης. Ως αποτέλεσμα, παρατηρείται αντιστροφή μέρους των ηλεκτροχημικών διαδικασιών που συνέβησαν κατά την εκφόρτισή και αύξηση του περιεχόμενου φορτίου της. Λόγω αυτού του ιδιαίτερου χαρακτηριστικού τους, οι δευτερεύουσες μπαταρίες αποκαλούνται συχνά και επαναφορτιζόμενες. Το αρχικό κόστος αγοράς τους είναι υψηλότερο από αυτό των μπαταριών της προηγούμενης κατηγορίας, αλλά παρέχουν οικονομικό όφελος σε βάθος χρόνου, λόγω των πολλών κύκλων φορτίσεως-εκφορτίσεως που εκτελούν. Επίσης χαρακτηρίζονται από χαμηλότερη ειδική ενέργεια (Wh/kg) και υψηλότερους ρυθμούς αυτοεκφόρτισης. Στον αντίποδα, παρουσιάζουν υψηλές τιμές ειδικής ισχύος, ενώ η φόρτισή τους μπορεί να γίνει με αρκετά υψηλό ρεύμα, μειώνοντας έτσι σημαντικά τον απαιτούμενο χρόνο.

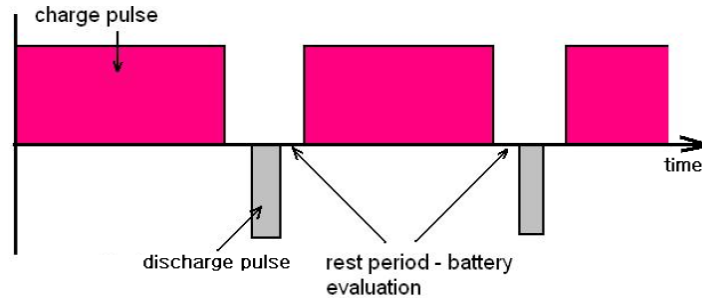
Η έρευνα στον τομέα των επαναφορτιζόμενων μπαταριών γνωρίζει ιδιαίτερη άνθηση τις τελευταίες δεκαετίες. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τον ανταγωνισμό που επικρατεί στην αγορά, είχε ως αποτέλεσμα τη σταδιακή μείωση της τιμής τους και κατ' επέκταση τη διεύρυσή τους σε πολλές εφαρμογές, όπου χρησιμοποιούνταν οι πρωτεύουσες μπαταρίες. Κάποιες φορές επιλέγονται ως η μοναδική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, γεγονός που σημαίνει πως υπόκεινται συνεχώς σε κύκλους φορτίσεως-εκφορτίσεως. Τέτοιες εφαρμογές περιλαμβάνουν ηλεκτρικές συσκευές, όπως φορητούς ηλεκτρονικούς υπολογιστές, ηλεκτρικά εργαλεία, κινητά τηλέφωνα κ.α. Άλλες φορές αναλαμβάνουν δευτερεύοντα ρόλο στην τροφοδοσία του συστήματος. Αυτό συμβαίνει συνήθως στα υβριδικά συστήματα ισχύος, όπου η μπαταρία εξυπηρετεί το φορτίο μόνο εφόσον οι κύριες πηγές τροφοδοσίας αδυνατούν. Στη συνέχεια επαναφορτίζεται από αυτές και τοποθετείται εκ νέου σε κατάσταση αναμονής.

Στην κατηγορία των επαναφορτιζόμενων μπαταριών συμπεριλαμβάνονται επίσης οι μπαταρίες χαρακτηριζόμενες ως «μηχανικά επαναφορτιζόμενες». Αυτή η μέθοδος επαναφόρτισης περιλαμβάνει την αντικατάσταση ενός εκφορτισμένου ηλεκτροδίου, με ένα νέο[38].

4.3.2.2 Μέθοδοι Φόρτισης

Ενα σημαντικό ζήτημα που προκύπτει σχετικά με τις δευτερεύουσες μπαταρίες είναι η ακριβής διαδικασία, σύμφωνα με την οποία πρόκειται να πραγματοποιηθεί η επαναφόρτιση τους. Κατά κανόνα ακολουθείται μία από τις παρακάτω μεθόδους[42]:

- 1. Γαλβανοστατική φόρτιση (Galvanostatic charging):** Αποτελεί τον απλούστερο τρόπο επαναφόρτισης. Με την εφαρμογή υψηλού δυναμικού μεταξύ των ακροδετών της μπαταρίας, παρατηρείται ροή ρεύματος προς το εσωτερικό της και αύξηση του περιεχόμενου φορτίου. Η τιμή του ρεύματος μπορεί να είναι σταθερή κατά τα πρώτα στάδια φόρτισης, όμως απαιτείται ρύθμιση αυτής καθώς η στάθμη φορτίου αυξάνεται. Στο σύστημα φόρτισης περιλαμβάνεται συνήθως ένας αυτόματος χρονοδιακόπτης προς κατάλληλη προσαρμογή του παρεχόμενου ρεύματος.
- 2. Παλμική φόρτιση (Pulse charging):** Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, το ρεύμα που οδηγείται προς την μπαταρία δεν έχει μία σταθερή τιμή. Αντιθέτως, στέλνεται υπό μορφή παλμών φόρτισης. Κάθε παλμός αποτελείται από μία σταθερή θετική τιμή ρεύματος και μία περίοδο ανάπαυσης (rest period/εικόνα 4.2). Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ομοιόμορφη φόρτιση των στοιχείων της μπαταρίας, αφού παρέχεται αρκετός χρόνος ώστε να επέλθει ισορροπία μετά την πραγματοποίηση των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων.
- 3. Burp charging:** Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε παράλληλα με την παλμική φόρτιση. Η βασική διαφορά μεταξύ τους είναι πως εδώ παρέχεται μία πολύ σύντομη στιγμή εκφόρτισης, εντός του παλμού φόρτισης. Έτσι παρατηρείται απομάκρυνση των αέριων που είναι υπεύθυνα για την οξείδωση των ηλεκτροδίων. Ως αποτέλεσμα επιτυγχάνεται αύξηση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας.



Εικόνα 4.2: Παλμοί φόρτισης

4.3.2.3 Τύποι επαναφορτιζόμενων μπαταριών

- **Μπαταρίες μολύβδου-οξέως**

Η πρώτη επαναφορτιζόμενη μπαταρία που δημιουργήθηκε ποτέ ήταν τεχνολογίας **μολύβδου-οξέως**. Η κατασκευή της χρονολογείται στο 1859 και πιστώνεται στο Γάλλο φυσικό Gaston Plante (1834–1889). Στις μπαταρίες αυτού του τύπου χρησιμοποιείται διοξείδιο του μολύβδου ως ενεργό υλικό του θετικού ηλεκτροδίου, ενώ κάποιο κράμα μολύβδου αποτελεί το υλικό κατασκευής του αρνητικού ηλεκτροδίου. Το ρόλο του ηλεκτρολύτη εξυπηρετεί ένα διάλυμα θεικού οξέως, περιεκτικότητας 37%. Κατά τη διαδικασία εκφόρτισης, πραγματοποιείται μεταφορά ιόντων διαμέσου του ηλεκτρολύτη, με αποτέλεσμα τη σταδιακή μείωση της περιεκτικότητας αυτού, και τη μετατροπή του, κατά κύριο λόγο, σε νερό. Τέλος κατά την κατάσταση πλήρους εκφόρτισης το υλικό των δύο ηλεκτροδίων έχει μεταβληθεί σε θεικό μόλυβδο.

Λόγο της μακροχρόνιας παρουσίας τους στην αγορά, οι μπαταρίες μολύβδου-οξέως θεωρούνται ως η πιο αξιόπιστη και ασφαλής επιλογή. Παρουσιάζουν καλή απόδοση σε υψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες ενώ ο μόλυβδος περιλαμβάνεται στα ανακυκλώσιμα στοιχεία, με αποτέλεσμα οι μπαταρίες αυτού του τύπου να αποτελούν μία πιο φιλική προς το περιβάλλον επιλογή, συγκριτικά με δευτερεύουσες μπαταρίες διαφορετικής τεχνολογίας (πχ τις μπαταρίες νικελίου-καδμίου). Η τάση ανοιχτοκυκλώσεως λαμβάνει τιμή 2 Volt/στοιχείο, και είναι η υψηλότερη τιμή που συναντάται σε ηλεκτρικούς συσσωρευτές με παρουσία υδατικού διαλύτη[38]. Από τη άλλη πλευρά, η χρήση τους παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα, όπως είναι η χαμηλή ειδική ενέργεια (συνήθως 30-40 Wh/kg) και η σχετικά μικρή διάρκεια ζωής τους (200-500 κύκλοι, για βάθος εκφόρτισης 50%). Χρησιμοποιούνται κυρίως στην αυτοκινητοβιομηχανία, τόσο σε συμβατικά όσο και σε ηλεκτρικά ή υβριδικά οχήματα. Συχνά, συναντώνται επίσης σε συστήματα αδιάλειπτης παροχής ισχύος μεγάλων βιομηχανικών εγκαταστάσεων, καθώς και σε γενικότερες εγκαταστάσεις αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Παρά το βάρος και τον όγκο που διαθέτουν, προτιμούνται έναντι άλλων τεχνολογιών, λόγω του χαμηλού κόστους και της αξιόπιστης λειτουργίας τους.

- **Μπαταρίες νικελίου-καδμίου**

Η πρώτη μπαταρία **νικελίου-καδμίου** κατασκευάστηκε περί το 1900, ενώ η διάθεσή τους στην αγορά καθυστέρησε αρκετά, έως την κυκλοφορία τους το έτος 1946. Αρχικά γνώρισαν ευρεία αποδοχή από το αγοραστικό κοινό, αφού υπερτερούσαν σε πολλά σημεία έναντι των βασικών ανταγωνιστών τους, δηλαδή τις μπαταρίες μολύβδου-οξέως. Πιο συγκεκριμένα, οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου χαρακτηρίζονται από υψηλότερη ειδική ενέργεια (40-60 Wh/kg), καθώς και ενεργειακή πυκνότητα (50-150 Wh/l). Η διάρκεια ζωής τους είναι επίσης αυξημένη, καθώς μπορούν να εκτελέσουν περί τους 500-1000 κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης υπό ικανοποιητικό βάθος εκφόρτισης. Τέλος η αποθήκευση τους είναι δυνατή υπό οποιαδήποτε στάθμη φόρτισης, χωρίς αυτό να συνεπάγεται αρνητικές επιπτώσεις στη λειτουργία τους, όπως στην περίπτωση των μπαταριών της προηγούμενης κατηγορίας[41].

Ως υλικό κατασκευής του θετικού ηλεκτροδίου χρησιμοποιείται υδροξείδιο του νικελίου, ενώ στο αρνητικό ηλεκτρόδιο, το τοξικό μέταλλο κάδμιο. Οι πλάκες στο εσωτερικό της μπαταρίας διαχωρίζονται από κάποιο πορώδες υλικό (συνήθως νάιλον ή πολυπροπυλένιο), νοτισμένο με τη απαραίτητη ποσότητα υδροξειδίου του καλίου, που αποτελεί τον ηλεκτρολύτη του συστήματος. Η ονομαστική τάση ενός ηλεκτροχημικού στοιχείου της μπαταρίας είναι 1.2V ενώ το ποσό αυτό μεταβάλλεται πολύ λίγο κατά την εκφόρτιση. Λόγο του χαρακτηριστικού αυτού, αποτελούν μία καλή επιλογή για τροφοδοσία ευαίσθητων ηλεκτρικών συσκευών. Χρησιμοποιούνται επίσης επί σειρά ετών ως μπαταρίες εκκίνησης αεροσκαφών, καθώς και προς αποθήκευση ενέργειας σε ηλεκτρικά δίκτυα.

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα που προαναφέρθηκαν, η αγορά των μπαταριών νικελίου-καδμίου έχει συρρικνωθεί αρκετά. Το κόστος προμήθειάς τους ήταν εξαρχής αρκετά υψηλό, λόγω της πολυπλοκότητας κατασκευής τους, ενώ η χρήση του καδμίου δημιουργεί αρκετά προβλήματα σχετικά με τη διαδικασία ανακύκλωσης των ηλεκτροχημικών στοιχείων, αφού πρόκειται περί ενός άκρως τοξικού μετάλλου. Μία νέα τεχνολογία που έχει αναπτυχθεί κατά τα τελευταία χρόνια, είναι αυτή των μπαταριών **νικελίου-υδριδίου μετάλλου**. Σε αυτή την κατηγορία ηλεκτρικών συσσωρευτών χρησιμοποιείται υδρογόνο, περιεχόμενο σε ένα κράμα μετάλλου, ως υλικό κατασκευής του αρνητικού ηλεκτροδίου. Αντικαθίσταται έτσι το κάδμιο, και η μπαταρία παρουσιάζει πιο φιλική προς το περιβάλλον συμπεριφορά. Η ειδική ενέργεια βελτιώνεται επίσης περί το 30%-40%, αλλά ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης καθώς και το κόστος κατασκευής αυξάνονται σημαντικά.

- **Μπαταρίες Λιθίου**

Το όνομά τους οφείλεται στο υλικό κατασκευής των ηλεκτροδίων τους, το λίθιο. Το στοιχείο αυτό παρουσιάζει τη χαμηλότερη πυκνότητα από όλα τα μέταλλα, και την υψηλότερη ηλεκτροχημική δυναμικότητα. Αναλόγως τη χημική σύσταση της καθόδου, μπορεί να επιτρέπεται ή όχι η επαναφόρτιση της μπαταρίας. Οι πρωτεύουσες μπαταρίες λιθίου εμφανίστηκαν περί το 1973 και απευθύνονταν αρχικά σε ένα μικρό αγοραστικό κοινό, κυρίως ιδιοκτήτες βιομηχανικών μονάδων, ενώ το έτος 1991 παρουσιάστηκαν οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες λιθίου, ή αλλιώς οι μπαταρίες **ιόντων-λιθίου**. Σε αυτές, ως υλικό κατασκευής του θετικού ηλεκτροδίου χρησιμοποιείται συνήθως κάποιο οξείδιο μετάλλου, όπως το οξείδιο λιθίου-κοβαλτίου (LiCoO₂), ενώ το αρνητικό ηλεκτρόδιο αποτελείται από γραφίτη. Η χρήση

ενός μη υδατικού ηλεκτρολύτη κρίνεται απαραίτητη, καθώς το λίθιο αντιδρά έντονα με το νερό σχηματίζοντας υδροξείδιο του λιθίου και αέριο υδρογόνο. Προς αποφυγή αυτού του φαινομένου, ως ηλεκτρολύτης επιλέγεται συνήθως ένα άλας λιθίου, εντός ενός οργανικού διαλύτη. Τα συστατικά αυτά τοποθετούνται εντός ενός ηλεκτροχημικού στοιχείου, το οποίο μπορεί να έχει κυλινδρικό ή πρισματικό σχήμα. Η φόρτιση πραγματοποιείται υπό σταθερή τάση ή σταθερό ρεύμα και περιλαμβάνει τη μετακίνηση ιόντων λιθίου από την άνοδο (σε αυτή την περίπτωση το θετικό ηλεκτρόδιο) προς την κάθοδο (αρνητικό ηλεκτρόδιο).

Το ενδιαφέρον σχετικά με τις μπαταρίες ιόντων-λιθίου ήταν έντονο από τα πρώτα χρόνια εισαγωγής τους στην αγορά. Παρουσιάζουν κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα σχετικά με τις κατηγορίες μπαταριών που προαναφέρθηκαν, ενώ βασικό αποθαρρυντικό παράγοντα για την ενσωμάτωσή τους σε κάποιο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί το υψηλό αρχικό κόστος προμήθειας. Η ειδική ενέργεια κυμαίνεται σε αρκετά υψηλά επίπεδα και είναι της τάξεως των 150 Wh/kg, ενώ η ενεργειακή πυκνότητα μπορεί να ξεπεράσει τις 400 Wh/l [38]. Ως αποτέλεσμα, οι μπαταρίες αυτές αποτελούν την ιδανικότερη επιλογή σε εφαρμογές όπου το βάρος και ο όγκος του συνολικού συστήματος διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο. Το κάθε ηλεκτροχημικό στοιχείο παρουσιάζει ονομαστική τάση 3.6V ενώ, λόγω του χαμηλού ρυθμού αυτοεκφόρτισης, επιτρέπεται η αποθήκευσή τους για ένα χρονικό διάστημα 1-2 μηνών, χωρίς σημαντική απώλεια φορτίου. Η εκφόρτισή τους μπορεί να γίνει υπό ρεύμα φορτίου πολύ υψηλότερο του ονομαστικού, για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Επίσης, μπορούν να λειτουργήσουν σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασίας (από -40 έως 65 βαθμούς Κελσίου κατά την εκφόρτιση). Παρόλο που οι μπαταρίες της συγκεκριμένης τεχνολογίας θεωρούνται τεχνολογικά ώριμες, υπάρχει μεγάλος προβληματισμός σχετικά με τους κινδύνους που συνεπάγεται η απρόσεκτη χρήση τους. Πιο συγκεκριμένα, η υπερφόρτιση ενός στοιχείου σε τάση υψηλότερη των 4.2V μπορεί να προκαλέσει ανάφλεξη και έκρηξη αυτού. Επίσης είναι ιδιαίτερα σημαντικό η παρεχόμενη τάση κατά τη φόρτιση να είναι ομοιόμορφα κατανομημένη μεταξύ των ηλεκτροχημικών στοιχείων της μπαταρίας, προς επιμήκυνση της διάρκειας ζωής της. Μεγάλη προσοχή συνίσταται και κατά τη διαδικασία εκφόρτισης αφού, αν η περιεχόμενη τάση λάβει τιμές κάτω από 3V ανά κελί, παρατηρείται μη αποδοχή τάσεων πλήρους φόρτισης στο μέλλον [42]. Για το λόγο αυτό η χρήση μπαταριών αυτού του τύπου συνοδεύεται από ένα κύκλωμα ελέγχου, που φροντίζει ώστε το επίπεδο φόρτισης/εκφόρτισης να μην ξεπερνά τις κρίσιμες τιμές που προαναφέρθηκαν.

Μία ξεχωριστή κατηγορία ηλεκτρικών συσσωρευτών, που συχνά δε διαχωρίζονται από τις μπαταρίες ιόντων-λιθίου, αποτελούν οι μπαταρίες **πολυμερών-λιθίου**, ή αλλιώς λιθίου-ιόντων πολυμερούς. Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο τεχνολογιών έγκειται στη φύση του ηλεκτρολύτη, ο οποίος αποτελείται πλέον από κάποιο πολυμερές, σε στερεή μορφή ή μορφή γέλης. Εξωτερικά διαφέρουν ως προς το σχήμα και το υλικό κατασκευής του κελύφους, όπου πλέον δεν πρόκειται για κάποιο βαρύ πλαστικό, αλλά ένα απαλό και εύκαμπτο περιτύλιγμα. Ως αποτέλεσμα το συνολικό βάρος της μπαταρίας μειώνεται σημαντικά, οδηγώντας σε υψηλότερες τιμές ειδικής ενέργειας κατά ένα ποσοστό που ξεπερνά το 20%. Μία ακόμα σημαντική διαφορά παρατηρείται στη διάρκεια ζωής των συσσωρευτών, όπου η τεχνολογία λιθίου-ιόντων υπερτερεί. Κατά τα άλλα, δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές, γεγονός που είναι λογικό αν αναλογιστούμε πως συμπεριλαμβάνονται στοιχεία με παρόμοια ή και ίδια

ηλεκτροχημική σύσταση. Αυτό βέβαια σημαίνει πως οι απαραίτητες προφυλάξεις πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν. Από οικονομικής σκοπιάς οι μπαταρίες πολυμερών-λιθίου είναι ακριβότερες.

Οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες λιθίου χρησιμοποιούνται σχεδόν σε όλους τους τομείς ως πρωτεύουσες ή δευτερεύουσες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας. Σε εφαρμογές ηλεκτρικής κίνησης συναντώνται όλο και συχνότερα, κερδίζοντας έδαφος έναντι των αξιόπιστων αλλά και σημαντικά βαρύτερων μπαταριών μολύβδου-οξέως. Η παρουσία τους είναι σχεδόν αποκλειστική σε φορητούς υπολογιστές και κινητά τηλέφωνα, αλλά και σε άλλες φορητές ηλεκτρικές συσκευές. Γενικότερα αποτελούν την αποδοτικότερη, αλλά όχι φθηνότερη, επιλογή για την τροφοδοσία συστημάτων όπου απαιτείται συνδυασμός υψηλού ρεύματος εκφόρτισης και ελαχιστοποίησης του συνολικού βάρους. Η συγκεκριμένη αγορά αναπτύχθηκε ταχύτατα, παρά την πολιτική υψηλών τιμών που εφαρμόστηκε από τις μεγάλες εταιρίες κατασκευής τους, κατά τη πρώτη δεκαετία του 21^{ου} αιώνα. Ήδη από το 1999, είχαν πωληθεί περισσότερες από τετρακόσια εκατομμύρια μονάδες με κοστολόγηση στα 1.86 δισεκατομμύρια δολάρια κατά την αλλαγή της χιλιετίας[38]. Η αξιόπιστη συμπεριφορά τους κατά τα χρόνια που ακολούθησαν είχε ως αποτέλεσμα τη γιγάντωση της αγοράς και την εκτίμησή της στα είκοσι με 30 δισεκατομμύρια δολάρια, μέχρι το 2020[44]. Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω ποσά, αντιλαμβάνεται κανείς έναν από τους λόγους για τους οποίους η έρευνα στο συγκεκριμένο τομέα, γνωρίζει ιδιαίτερη άνθηση.

Τα τελευταία χρόνια, ως φυσικό επακόλουθο των μεγάλων ερευνητικών προγραμμάτων που αναπτύχθηκαν, έχει εμφανιστεί μία νέα, πολλά υποσχόμενη κατηγορία επαναφορτιζόμενων μπαταριών λιθίου, γνωστές ως μπαταρίες **λιθίου-θείου**. Οι μπαταρίες αυτές παρουσιάζουν πολύ υψηλή ειδική ενέργεια (500-1000 Wh/kg) και εκτιμάται πως μπορεί να αντικαταστήσουν τους ηλεκτρικούς συσσωρευτές ιόντων-λιθίου στο μέλλον, λόγω του χαρακτηριστικού αυτού σε συνδυασμό με τη χαμηλή οικονομική επιβάρυνση που συνεπάγεται η διαδικασία παραγωγής του θείου. Η πυκνότητα ενέργειάς τους δεν αποτελεί πλέον μία θεωρητική τιμή, καθώς μπορεί να αξιοποιηθεί σε ποσοστό μεγαλύτερο του 80%[43]. Ανησυχίες έχουν εκφραστεί σχετικά με θέματα ασφάλειας, ενώ περιοριστικό παράγοντα προς την εξάπλωσή μπαταριών της συγκεκριμένης τεχνολογίας αποτελεί και ο μέγιστος αριθμός κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης που τις χαρακτηρίζει (~100).



Εικόνα 4.3: Μπαταρίες όντων λιθίου / πολυμερών λιθίου / λιθίου θείου

4.4 Χρήση ηλεκτρικών συσσωρευτών στην αεροπλοΐα

Όπως αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο, ένα αεροσκάφος χρησιμοποιεί είτε ένα ηλεκτρικό σύστημα πρόωσης είτε ένα σύστημα πρόωσης καυσίμου. Και στις δύο περιπτώσεις η ενσωμάτωση ενός συνόλου ηλεκτρικών συσσωρευτών κρίνεται απαραίτητη, για την ικανοποίηση των ενεργειακών απαιτήσεων των ηλεκτρικών φορτίων. Σε μεγάλα επιβατικά αεροσκάφη, όπου συναντούμε μηχανές εσωτερικής καύσης, περιλαμβάνονται συνήθως δύο μπαταρίες: η κύρια και η δευτερεύουσα. Η κύρια μπαταρία φροντίζει για την ενεργοποίηση των ηλεκτρικών συστημάτων του αεροσκάφους πριν την εκκίνηση των κινητήρων. Χρησιμοποιείται επίσης κατά τις λειτουργίες εδάφους, όπως είναι η τροφοδότηση του συστήματος πέδησης, ή η ικανοποίηση των ενεργειακών απαιτήσεων κατά τον ανεφοδιασμό. Τοποθετείται συνήθως κάτω από την κύρια καμπίνα, στο μπροστινό μέρος του αεροχήματος. Όσον αφορά τη δευτερεύουσα μπαταρία, αυτή φροντίζει για την εκκίνηση της Βοηθητικής Μονάδας Ισχύος (Auxiliary Power Unit/APU). Η βοηθητική μονάδα ισχύος αναλαμβάνει στη συνέχεια την εκίνηση των κεντρικών μηχανών του συστήματος πρόωσης και, στη σπάνια περίπτωση αστοχίας αυτών, την ικανοποίηση των ενεργειακών απαιτήσεων του αεροσκάφους έως την ασφαλή προσγείωσή του. Σημειώνεται επίσης πως κάποια εξειδικευμένα ηλεκτρικά φορτία, όπως ο πομπός εντοπισμού εκτάκτου ανάγκης και ο καταγραφέας δεδομένων πτήσης (γνωστός ως «μαύρο κουτί») χρησιμοποιούν ξεχωριστές μπαταρίες.

Όσον αφορά τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη, η εικόνα είναι αρκετά διαφορετική. Αρχικά, πρέπει να αναφέρουμε πως τα ηλεκτρικά υαν μπορεί να είναι μικρού ή μεσαίου βάρους, ενώ τροφοδοτούνται από ένα υβριδικό ή αμιγώς ηλεκτρικό σύστημα ισχύος. Το σύστημα αυτό αποτελείται από δύο κύρια μέρη: μία μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος, προς τροφοδοσία του μηχανισμού πρόωσης και των ηλεκτρικών φορτίων, και μία μονάδα κατανομής ενέργειας, που περιλαμβάνει τη μονάδα ελέγχου και διάφορες συσκευές κατανομής και ρύθμισης φορτίου. Μία συστοιχία ηλεκτρικών συσσωρευτών είναι ικανή να τροφοδοτήσει το συνολικό σύστημα για ένα σύντομο χρονικό διάστημα. Σε υαν που προορίζονται για ψυχαγωγικούς σκοπούς συναντούμε συνήθως μπαταρίες ιόντων-λιθίου ή πολυμερών-λιθίου, ικανές να παρέχουν αυτονομία πτήσης για μερικά λεπτά της ώρας. Φυσικά, δεν ισχύει το ίδιο σε μη επανδρωμένα αεροσκάφη που χρησιμοποιούνται για στρατιωτικό σκοπό και γενικότερα για εκτέλεση πτήσεων αυξημένων ενεργειακών απαιτήσεων. Σε αυτή την περίπτωση, η εξασφάλιση του συνόλου της ενέργειας από ηλεκτρικούς συσσωρευτές κρίνεται ιδιαίτερα ασύμφορη, καθώς θα οδηγούσε σε μπαταρίες πολύ μεγάλου μεγέθους και αυξημένου βάρους. Έτσι την τροφοδοσία του μεγαλύτερου μέρους του φορτίου αναλαμβάνει μία ξεχωριστή πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ ο ρόλος των μπαταριών περιορίζεται στην κάλυψη του επιπρόσθετου φορτίου κατά τις απαιτητικές φάσεις πτήσεως, καθώς και στην ασφαλή προσγείωση του αεροσκάφους σε περίπτωση βλάβης της πρωτεύουσας πηγής τροφοδοσίας.

Κατά τα πρώτα χρόνια εμφάνισης των σύγχρονων αεροσκαφών χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά πρωτεύουσες μπαταρίες, λόγω των περιορισμένων τεχνολογικών μέσων της εποχής. Με την πρόοδο στον τομέα των ηλεκτρικών συσσωρευτών, οι πρωτεύουσες μπαταρίες άρχισαν να αντικαθίστανται σταδιακά από επαναφορτιζόμενες, κυρίως λόγω της

σημαντικής διαφοράς στην τιμή κόστους της παραγόμενης ενέργειας (\$/kWh). Εκτός αυτού οι δευτερεύουσες μπαταρίες αποτελούν μία ιδιαίτερα ελκυστική επιλογή, αφού παρέχεται η δυνατότητα επαναφόρτισής τους κατά τη διάρκεια της πτήσης και η εξυπηρέτηση των ηλεκτρικών φορτίων για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Στα παλαιότερα μοντέλα αεροχημάτων επιλέγονταν ως επί το πλείστον μπαταρίες νικελίου-καδμίου, ενώ τα τελευταία χρόνια, χρησιμοποιούνται κυρίως μπαταρίες λιθίου-ιόντων ή λιθίου-ιόντων-πολυμερών, λόγω των πλεονεκτημάτων που αναφέρθηκαν προωτέρω. Στην εικόνα (4.4) παρουσιάζονται κάποια στοιχεία σχετικά με το κόστος μεταξύ διαφόρων τεχνολογιών πρωτεύουσών και επαναφορτιζόμενων μπαταριών. Πρέπει να σημειωθεί πως τα στοιχεία αυτά βασίζονται στο αρχικό κόστος αγοράς των συσσωρευτών και στο μέγιστο αριθμό κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης που μπορούν να υποβληθούν. Το κόστος επαναφόρτισης αυτών δεν έχει ληφθεί υπόψιν[45].

	AAA Cell	AA Cell	C Cell	D Cell	9 Volt
Capacity (alkaline)	1,100mAh	2,500mAh	7,000mAh	14,000mAh	600mAh
Energy (single cell)	1.4Wh	3Wh	9Wh	18Wh	4.2Wh
Cost per cell (US\$)	\$1.25	\$1.00	\$1.60	\$1.60	\$3.10
Cost per kWh (US\$)	\$890	\$330	\$180	\$90	\$730

	Lead Acid	NiCd	NiMH	Li-ion
Capacity	2,000mAh	600mAh	1,000mAh	1,200mAh
Battery voltage	12V	7.2V	7.2V	7.2V
Energy per cycle	24Wh	4.5Wh	7.5Wh	8.6Wh
Number of cycles	250	1,000*	500	500
Battery cost (est.)	\$50	\$50	\$70	\$100
Cost per kWh (\$US)	\$8.50	\$11.00	\$18.50	\$24.00

Εικόνα 4.4: Σύγκριση κόστους μεταξύ μπαταριών διαφορετικής τεχνολογίας

Κεφάλαιο 5: DC Μικροδίκτυα

5.1 Ηλεκτρικά Δίκτυα

Ένα ηλεκτρικό δίκτυο αποτελεί ένα διασυνδεδεμένο σύστημα, που φροντίζει για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από τους παραγωγούς/προμηθευτές στα σημεία κατανάλωσης. Αποτελείται από έναν ή περισσότερους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τις γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης (που μεταφέρουν την ενέργεια από τους σταθμούς παραγωγής στα κέντρα ζήτησης) και τις γραμμές διανομής, που συνδέουν τα κέντρα ζήτησης με τους ξεχωριστούς καταναλωτές[46]. Αναλόγως τη δυναμικότητα, το μέγεθος αλλά και την τοποθεσία των σταθμών παραγωγής, ένα ηλεκτρικό δίκτυο μπορεί να αποτελεί τμήμα ενός συνολικού συστήματος κεντροποιημένης ή αποκεντρωμένης παραγωγής.

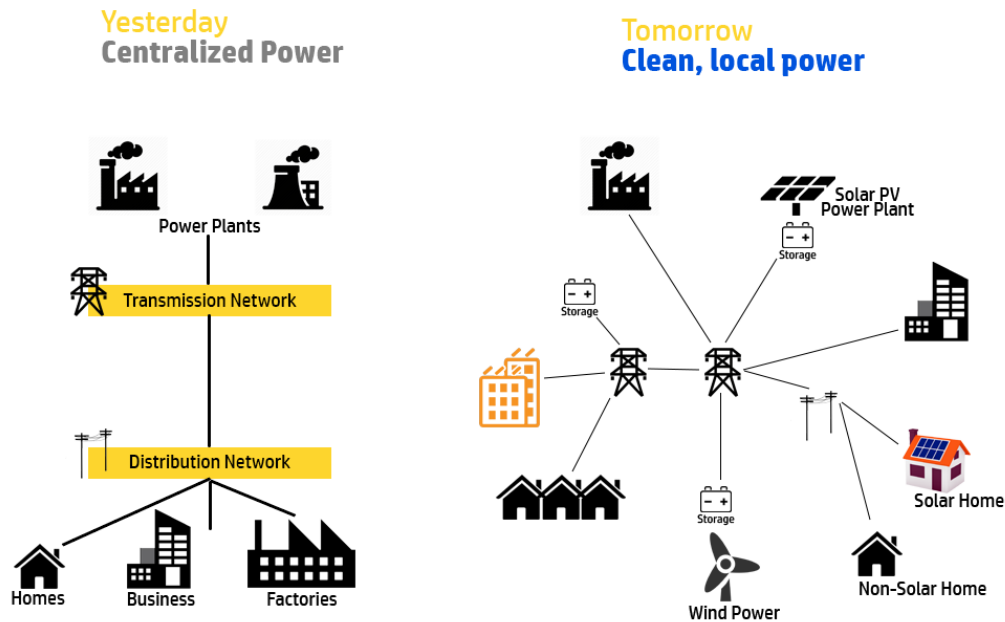
- **Κεντροποιημένη παραγωγή**

Οι σταθμοί παραγωγής κατασκευάζονται παραδοσιακά κοντά σε πηγές πρώτων υλών, η αξιοποίηση των οποίων συνεπάγεται την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, απαντώνται συνήθως σε περιοχές πλούσιες σε φυσικούς πόρους ή σε υδροηλεκτρικά φράγματα, μακριά από κατοικημένες ζώνες, καθώς και όπου είναι δυνατή η εκμετάλλευση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας υπό μεγάλη κλίμακα (όπως ένα φωτοβολταϊκό πάρκο). Συνήθως είναι ιδιαίτερα μεγάλοι σε μέγεθος και ισχύ, ενώ αποτελούνται από μία ή περισσότερες ξεχωριστές μονάδες. Στη χώρα μας το μεγαλύτερο εργοστάσιο αυτού του τύπου βρίσκεται στον Άγιο Δημήτριο Κοζάνης, όπου με κύριο καύσιμο το λιγνίτη, η συνολική δυναμικότητα αγγίζει τα 1,500 MWe. Σε παγκόσμια κλίμακα, τα πρωτεία κατέχουν τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια, με το Three Gorges Dam (Κίνα) να παρουσιάζει δυναμικότητα παραγωγής 22,500 MWe. Η παραγόμενη ενέργεια από τους σταθμούς, πρέπει στη συνέχεια να μεταφερθεί προς τα σημεία κατανάλωσης. Ένα σύνολο μετασχηματιστών φροντίζει ώστε η μεταφορά να γίνει υπό υψηλή τάση (ανύψωση τάσης στα 400kV και 150kV), προς μείωση των απωλειών μεταφοράς. Έτσι το μεγαλύτερο μέρος της παραγόμενης ενέργειας φτάνει στην άλλη πλευρά του δικτύου, όπου βρίσκεται ένας υποσταθμός διανομής. Εκεί, υπό την παρουσία μετασχηματιστών, το επίπεδο τάσης μεταβάλλεται εκ νέου, προς τροφοδοσία του δικτύου διανομής και των τελικών καταναλωτών. Σημειώνεται πως κάποιες βιομηχανικές μονάδες-καταναλωτές μπορεί να συνδέονται απευθείας στο δίκτυο μεταφοράς (μέσης τάσης), υπό την παρουσία «ατομικών» διατάξεων υποβιβασμού τάσης.

- **Αποκεντρωμένη Παραγωγή**

Σε αντίθεση με το μοντέλο που περιγράφηκε παραπάνω, κατά τα τελευταία χρόνια έχει παρουσιαστεί έντονο ενδιαφέρον σχετικά με την αποκαλούμενη αποκεντρωμένη ή αλλιώς διεσπαρμένη ή κατανεμημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ένας ακριβής ορισμός δίνεται

στη [47] και αναφέρει: Η κατακεντρωμένη παραγωγή συμπεριλαμβάνει οποιαδήποτε πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι συνδεδεμένη άμεσα στο δίκτυο διανομής ενώ παράλληλα είναι εγκατεστημένη πλησίον του σημείου κατανάλωσης. Οι πηγές αυτές είναι συνήθως μικρότερες του 1MW, με δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο μέσης τάσης.



Εικόνα 5.1: Κεντροποιημένη και Διεσπαρμένη παραγωγή

Ο πρώτος σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τέθηκε σε λειτουργία περί το 1882 και αποτελούσε μία μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής. Το όνομα του σταθμού ήταν Pearl Street Station, και χρησιμοποιούνταν προς τροφοδοσία ηλεκτρικών λαμπτήρων. Η εταιρία κατασκευής του ήταν η Edison Illuminating Company (Thomas Edison/1847-1931) με τον Αμερικανό επιχειρηματία να βασιζείται στην παραγωγή συνεχούς (DC) ρεύματος. Το γεγονός αυτό καθιστούσε τη μεταφορά της ενέργειας ιδιαίτερα δαπανηρή, με συνέπεια την ανάγκη εγκατάστασης των μονάδων παραγωγής πλησίον των σταθμών κατανάλωσης. Η εικόνα άλλαξε δραματικά με την ανάδειξη στο προσκήνιο του Σέρβου μηχανικού και εφευρέτη Νικόλα Τέσλα (1856-1943), τη χρηματοδότηση του οποίου ανέλαβε εταιρία Westinghouse (George Westinghouse/1846-1914). Ο Τέσλα ήταν εξαρχής πεπεισμένος για τα πλεονεκτήματα που μπορεί να παρέχει το εναλασσόμενο ρεύμα (AC), έναντι του συνεχούς, σε αντίθεση με τους ισχυρισμούς του Έντισον. Ως αποτέλεσμα, ακολούθησε ο γνωστός σε όλους μας «πόλεμος των ρευμάτων», που έληξε στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, με την οριστική επικράτηση του εναλασσόμενου ρεύματος και την απόσυρση του Thomas Edison από την ηλεκτροπαραγωγική βιομηχανία. Από την περίοδο εκείνη, τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας λειτούργησαν με βάση το μοντέλο της κεντροποιημένης παραγωγής. Οι κύριοι λόγοι επικράτησης ήταν τόσο οικονομικοί όσο και τεχνικοί, καθώς με την παρουσία μεγάλων εργοστασίων παραγωγής είναι

διασφαλισμένη η ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος ενώ η δυνατότητα μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας υπό υψηλή τάση μειώνει σημαντικά τις απώλειες του Ohm.

Με το πέρασμα των χρόνων, το καθιερωμένο αυτό μοντέλο άρχισε να αντιμετωπίζει σημαντικά προβλήματα. Οι αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις της εποχής μας έχουν καταστήσει την ηλεκτρική ενέργεια ως ένα βασικό αγαθό, γεγονός που επιβάλλει την ανανέωση της υπάρχουσας αρχιτεκτονικής του ηλεκτρικού δικτύου. Το κεντρικό δίκτυο κάθε χώρας έχει κατασκευαστεί πολλά χρόνια πριν, ενώ γίνονται συνέχεια προσθήκες νέων ηλεκτρικών γραμμών προς εξυπηρέτηση των αυξημένων ενεργειακών απαιτήσεων, γεγονός που οδηγεί σταδιακά στον κορεσμό του υπάρχοντος δικτύου. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται εν μέρει, με την προσθήκη πηγών διεσπαρμένης παραγωγής πλησίον των καταναλωτών προς άμεση εξυπηρέτηση των ενεργειακών τους αναγκών. Η τεχνολογία των μονάδων αυτών αναπτύσσεται ταχύτατα κατά τα τελευταία χρόνια, κυρίως υπό τη μορφή ΑΠΕ, προσφέροντας σημαντικά οικολογικά και οικονομικά οφέλη. Κατά κύριο λόγο, οι μονάδες κατανεμημένης παραγωγής λειτουργούν συμπληρωματικά προς τα μεγάλα εργοστάσια ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ συμπεριλαμβάνουν σχεδόν πάντα συστήματα αποθήκευσης, όπως διατάξεις ηλεκτρικών συσσωρευτών, υπερπυκνωτές κ.α. Έτσι παρέχεται μεγαλύτερη σταθερότητα στο δίκτυο, καθώς και ταχύτερη και πιο άμεση ανταπόκριση σε μεταβολή των απαιτήσεων ισχύος από την πλευρά των καταναλωτών. Ως αποτέλεσμα έχουμε αποφυγή επικίνδυνων φαινομένων κατά τη ζήτηση αιχμής φορτίου (όπως βυθίσεις τάσης ή υπερφόρτιση των γραμμών μεταφοράς) και τη δημιουργία ενός αξιόπιστου δικτύου. Στα πλεονεκτήματα των μονάδων αυτών συμπεριλαμβάνεται επίσης ο υψηλός βαθμό απόδοσης που τις χαρακτηρίζει, γεγονός που οφείλεται κατά κύριο λόγο σε εφαρμογές συμπαραγωγής ηλεκτρισμού-θερμότητας, καθώς και η δυνατότητα τροφοδοσίας απομακρυσμένων περιοχών με δυσκολία σύνδεσης στο κεντρικό δίκτυο.

Βέβαια, παρά τα πλεονεκτήματα που προαναφέρθηκαν, η συμπερίληψη μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε ένα ήδη υπάρχον δίκτυο δεν αποτελεί πάντα μία απλή υπόθεση, καθώς συνεπάγεται σημαντικές επιδράσεις στη δομή και λειτουργία του δικτύου. Οι επιδράσεις αυτές σχετίζονται κυρίως με την τάση λειτουργίας, καθώς και την ανάγκη δημιουργίας νέων συστημάτων προστασίας και γειώσεων. Επίσης, απαιτείται η δυνατότητα αμφίδρομης ροής ισχύος μεταξύ του δικτύου και των καταναλωτών, ενώ έναν επιπλέον ανασταλτικό παράγοντα προς την αποκεντροποίηση των ηλεκτρικών δικτύων, αποτελεί το κόστος κεφαλαίου των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Ιδιαίτερα, όσον αφορά τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και τις ανεμογεννήτριες (που αποτελούν τις πιο διαδεδομένες μορφές ΑΠΕ), το κόστος ανά εγκατεστημένο kW κυμαίνεται από 2000\$ έως 7500\$[48]. Τα προβλήματα αυτά μπορούν να λυθούν άμεσα, μέσω της θέσπισης ενός θεσμικού πλαισίου, όπου θα αναφέρονται ρητά οι προϋποθέσεις σύνδεσης των μονάδων αυτών, ενώ όσον αφορά το οικονομικό σκέλος, η ανάπτυξη της τεχνολογίας σε συνδυασμό με τον υψηλό ανταγωνισμό της

ελεύθερης αγοράς αναμένεται να συμβάλουν σημαντικά στη μείωση του κόστους κατασκευής πηγών πράσινης ενέργειας

Σε κάθε περίπτωση, η ενσωμάτωση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής δεν καθιστά περιττή την παρουσία ενός κεντρικού ηλεκτρικού δικτύου, καθώς οι μονάδες αυτές έχουν συνήθως εφεδρικό χαρακτήρα. Το κεντρικό δίκτυο φροντίζει πάντα για την παραγωγή του μεγαλύτερου μέρους της απαιτούμενης ενέργειας συγκεκριμένων προδιαγραφών καθώς και για την εποπτεία και τον έλεγχο του συνολικού συστήματος.

5.2 Κατηγορίες Ηλεκτρικών δικτύων

Η υπάρχουσα μορφή του ηλεκτρικού δικτύου καθιερώθηκε κατά τα τέλη του 19^{ου} αιώνα, οπότε και επικράτησε έναντι άλλων τεχνολογιών, ενώ αναμένεται να εξελιχθεί δραματικά κατά τα επόμενα χρόνια. Η δειξίωση πηγών διεσπαρμένης παραγωγής στο κεντρικό δίκτυο απαιτεί την αμφίδρομη ροή ισχύος μεταξύ παραγωγής-κατανάλωσης, με τον καταναλωτή να παίζει πολλές φορές το ρόλο του παραγωγού. Επίσης η προσαρμοστικότητα του συστήματος πρέπει να είναι άμεση καθώς και η ελεγχιμότητα αυτού μέσω ενός κεντρικού συστήματος επιτήρησης (SCADA). Ήδη, από τις αρχές του 21^{ου} αιώνα, αναζητούνται συνεχώς τρόποι βελτίωσης της συμπεριφοράς του ηλεκτρικού δικτύου. Σημαντικά βήματα έχουν γίνει προς αυτή την κατεύθυνση, αν αναλογιστούμε πως πριν από μερικά χρόνια λόγω τεχνολογικών περιορισμών, οι τιμές αιχμής της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ισχύος κατανέμονταν κατ' ανάγκη ισότιμα στο σύνολο των καταναλωτών. Βέβαια, επιβάλεται η δημιουργία πιο ανεπτυγμένων συστημάτων επικοινωνίας και ελέγχου, προς βέλτιστη εκμετάλλευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Η μετάβαση από την παραδοσιακή μορφή δικτύου, σε πιο «έξυπνες» εκδοχές, πρόκειται να αλλάξει ολόκληρο το επιχειρηματικό μοντέλο της βιομηχανίας και τη σχέση αυτού με τα ενδιαφερόμενα μέλη, όπως τις εταιρίες-παραγωγούς, του ρυθμιστές, τους πάροχους ενεργειακών υπηρεσιών, του προμηθευτές τεχνολογικού εξοπλισμού και τους καταναλωτές. Η μετάβαση είναι αναπόφευκτη, λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων που παρέχει αυτή η εκσυγχρονισμένη μορφή, τα σημαντικότερα εκ των οποίων αναφέρονται παρακάτω:

- **Βελτιωμένη Αξιοπιστία:** Μέσω των πληροφοριών που εξασφαλίζονται από έξυπνους μετρητές γίνεται ευκολότερη η διαδικασία εντοπισμού σφαλμάτων, καθώς και η αυτο-επισκευή του δικτύου, χωρίς να απαιτείται η παρουσία ανθρώπινου δυναμικού.
- **Αυτονομία/Ευφυής Λειτουργία:** Τα δίκτυα πρέπει να διαθέτουν ένα βαθμό αυτονομίας, προς βελτιστοποίηση της συνολικής λειτουργίας τους. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς κατά τη λειτουργία υπό δυσμενείς συνθήκες (πχ υπεφόρτωση του δικτύου), η αντίδραση των ηλεκτρονικών ισχύος, υπό την επίβλεψη πάντα του συστήματος

διαχείρισης, είναι άμεση, με αποτέλεσμα την επιστροφή του δικτύου στην ομαλή κατάσταση λειτουργίας.

- **Διευκόλυνση διαδικασιών αγοραπωλησίας ηλεκτρικής ενέργειας:** Ένα δίκτυο οφείλει να επιτρέπει τη συνεχή επικοινωνία μεταξύ προμηθευτών και καταναλωτών παρέχοντας ακριβείς πληροφορίες σχετικά με την ποσότητα και την τιμολόγηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι οι δύο πλευρές έχουν τη δυνατότητα άμεσης διαπραγμάτευσης, προς υποστήριξη του ατομικού τους οικονομικού συμφέροντος, με άμεση συνέπεια τη συνεχή διόγκωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.
- **Αυξημένη Ευελιξία και Αποτελεσματικότητα:** Η μελλοντική «εξυπνότερη» δομή του ηλεκτρικού δικτύου σχεδιάζεται με βάση τη δυνατότητα διαχείρισης αμφίδρομης ροής ισχύος, προς δυνείωση πηγών διεσπαρμένης παραγωγής. Επίσης, ο ανθρώπινος παράγοντας περιορίζεται σταδιακά, με στόχο την απόλυτα αυτοματοποιημένη λειτουργία των δικτύων[46].

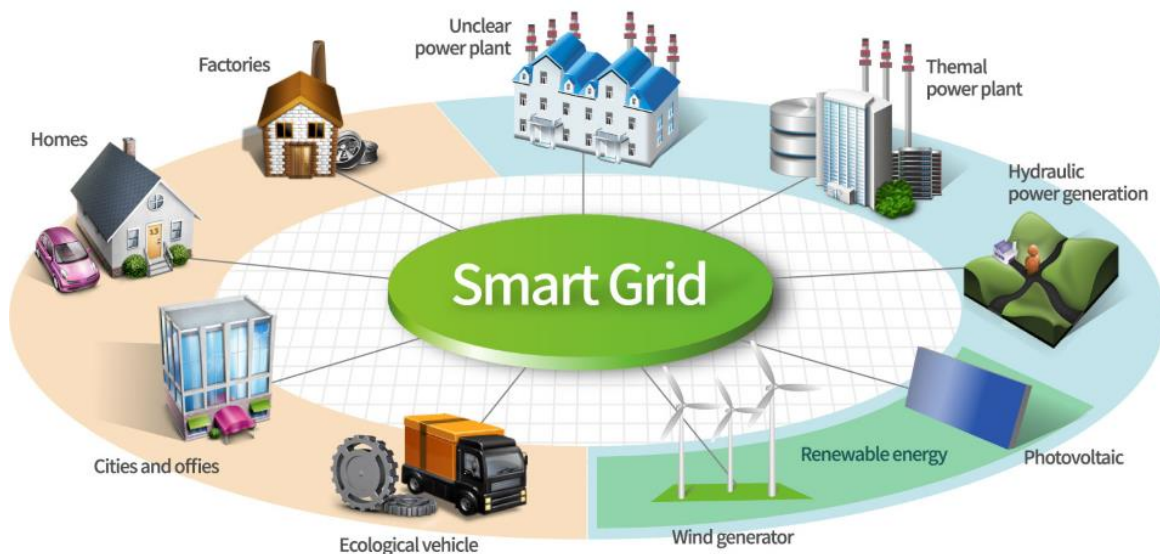
Τα ηλεκτρικά δίκτυα υπάγονται σε διάφορες κατηγορίες, αναλόγως του βαθμού ικανοποίησης των απαιτήσεων που αναφέρθηκαν, αλλά και άλλων χαρακτηριστικών όπως είναι το μέγεθος τους, ο βαθμός αυτονομίας, η ποσότητα μεταφερόμενης ισχύος κ.α. Στις περισσότερες περιπτώσεις η κατηγοριοποίηση είναι σαφής και οι όροι που χρησιμοποιούνται αρκούν προς περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών του δικτύου. Δύο κατηγορίες χρήζουν ιδιαίτερης αναφοράς, καθώς έχουν εξαπλωθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό κατά τα τελευταία χρόνια, ενώ αναμένεται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στο άμεσο μέλλον: τα **έξυπνα δίκτυα (smart grids)** και τα **μικροδίκτυα (microgrids)**.

5.2.1 Έξυπνα Δίκτυα

Τα **έξυπνα δίκτυα** αποτελούν μία εκσυγχρονισμένη μορφή των παραδοσιακών ηλεκτρικών δικτύων. Ουσιαστικά πρόκειται για μία τεχνολογία, η οποία παρέχει τη δυνατότητα τηλεχειρισμού αυτών μέσω ηλεκτρονικών υπολογιστών και αυτοματοποιημένων διαδικασιών[49]. Ένα έξυπνο δίκτυο φροντίζει για τη συλλογή αναλογικών και ψηφιακών πληροφοριών σχετικά με τη συμπεριφορά των προμηθευτών και των καταναλωτών ενώ, στη συνέχεια, αξιοποιεί τα στοιχεία αυτά με στόχο τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας, την αξιοπιστία, την οικονομία και τη βιωσιμότητα της διαδικασίας παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Θα μπορούσαμε να πούμε πως ροή δεδομένων και η συλλογή πληροφοριών είναι το επίκεντρο των λειτουργιών ενός έξυπνου δικτύου. Τα συστατικά μέρη του αποτελούν:

- Το **τμήμα υποδομών:** Πρόκειται ουσιαστικά για το ήδη υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο, όπου έχουν γίνει οι απαραίτητες τροποποιήσεις, για την εγκατάσταση μονάδων συλλογής πληροφοριών (smartmeters, PMU κλπ).

- Το **σύστημα διαχείρισης**: Αναφέρεται στην ανάπτυξη συγκεκριμένων αλγορίθμων, με στόχο τη βέλτιστη διαχείριση της εκχεόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο. Το σύστημα αυτό αποτελείται κατά κύριο λόγο από το αυτόματο σύστημα εποπτείας και ελέγχου του ηλεκτρικού δικτύου, ενώ επιτρέπεται και η ανθρώπινη παρέμβαση, σε περιπτώσεις ανάγκης.
- Το **σύστημα προστασίας**: Περιλαμβάνει όλες τις διατάξεις προστασίας (ασφάλειες, ηλεκτρονόμους, γειώσεις κλπ) οι οποίες φροντίζουν για την ασφάλεια του δικτύου και των καταναλωτών σε περίπτωση βλάβης.



Εικόνα 5.2: Ένα έξυπνο δίκτυο

5.2.2 Μικροδίκτυα

Ως **μικροδίκτυο** ορίζεται ένα σύνολο από διασυνδεδεμένα φορτία και πηγές κατανεμημένης παραγωγής (φωτοβολταϊκά στοιχεία, κυψέλες καυσίμου, γεννήτριες ντήζελ κλπ), το οποίο έχει ξεκάθαρα «ηλεκτρικά όρια» και λειτουργεί ως μία ξεχωριστή οντότητα, σε αρμονία με το υπόλοιπο δίκτυο. Το μικροδίκτυο μπορεί να συνδέεται και να αποσυνδέεται από το κεντρικό δίκτυο λειτουργώντας ως ένα διασυνδεδεμένο ή απομονωμένο σύστημα [47]. Στην ουσία, πρόκειται για μία μικρογραφία του κεντρικού ηλεκτρικού δικτύου, που περιλαμβάνει μονάδες κατανεμημένης παραγωγής μικρής ισχύος, καθώς και όλες τις απαραίτητες διατάξεις προστασίας από σφάλματα, βραχυκυκλώματα ή πιθανές διαρροές. Ανάλογα με τη δυναμικότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που το χαρακτηρίζει, ένα μικροδίκτυο μπορεί να φροντίζει για την καλύψη του συνόλου των φορτίων μεμονωμένων κτιρίων (νοσοκομεία/εμπορικά κέντρα κλπ) ή ολόκληρων περιοχών (όπως μία βιομηχανική ζώνη ή ένα νησί). Γενικά το μέγεθος των μονάδων παραγωγής καθορίζει την τάση λειτουργίας του

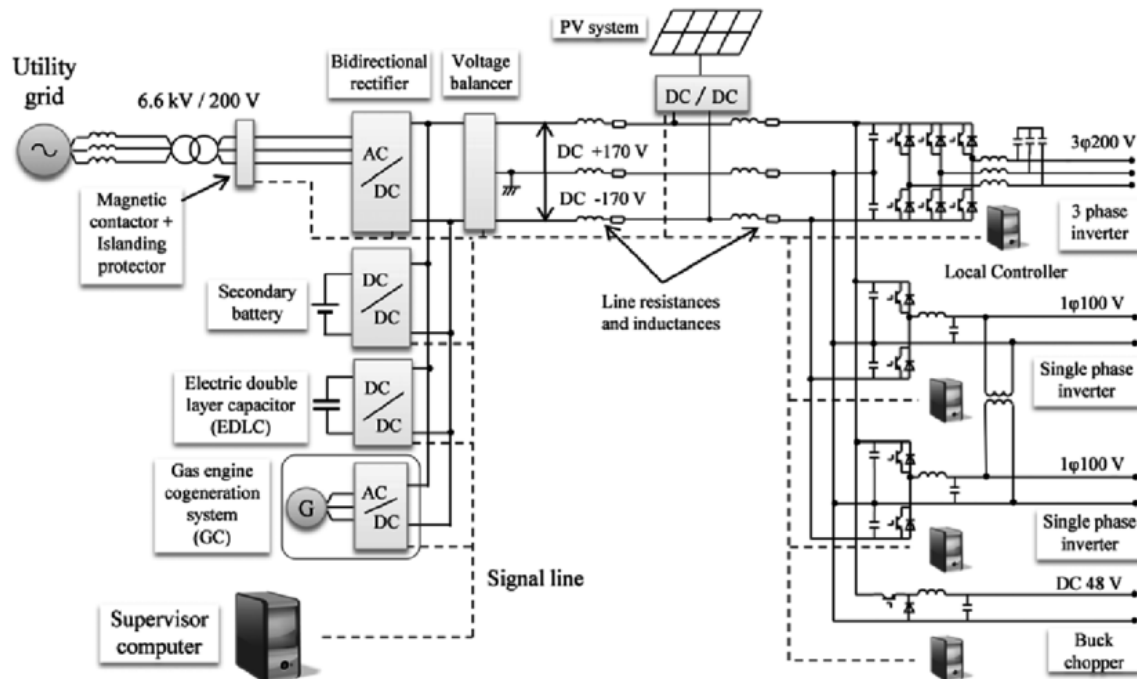
μικροδικτύου ενώ, σε συνδυασμό με τα συνδεδεμένα φορτία, προσδιορίζεται ο τρόπος διασύνδεσής του με άλλα δίκτυα χαμηλής ή μέσης τάσης. Συνεπώς, εάν συμπεριλαμβάνονται μονάδες χαμηλής δυναμικότητας, η παραγωγή και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι προτιμότερο να γίνεται στη χαμηλή τάση καθώς δεν απαιτείται η μεταφορά της σε μεγάλες αποστάσεις ενώ, σε εγκαταστάσεις μεγαλύτερης ισχύος, επιτρέπεται η διασύνδεση στη μέση τάση.

Όπως αναφέρθηκε, ένα μικροδίκτυο μπορεί να λειτουργεί είτε ως ένα ξεχωριστό σύστημα (stand alone/island mode), είτε διασυνδεδεμένο σε κάποιο μεγαλύτερο δίκτυο (Grid-connected mode). Στην πρώτη περίπτωση, δεν απαιτείται να πληρούνται ιδιαίτερες προδιαγραφές, πέραν της ικανοποίησης των ενεργειακών απαιτήσεων των ηλεκτρικών φορτίων καθώς και της αξιόπιστης και ασφαλούς λειτουργίας του μικροδικτύου. Αντιθέτως, κατά την παράλληλη λειτουργία, το μικροδίκτυο πρέπει να μη δημιουργεί προβλήματα στο συνολικό σύστημα. Η ποιότητα της παραγόμενης ισχύος πρέπει να ανταποκρίνεται στις προδιαγραφές του δικτύου, ενώ η επικοινωνία μεταξύ των δύο πρέπει να είναι συνεχής, ώστε να ρυθμίζεται κατάλληλα η απορρόφηση της διαθέσιμης ενέργειας. Φυσικά αυτό προϋποθέτει την ύπαρξη «έξυπνων μικροδικτύων/δικτύων» με την ενσωμάτωση πλήθους ηλεκτρονικών ισχύως προς ρύθμιση των επιμέρους λειτουργιών.

Πέραν της αυτόνομης ή διασυνδεδεμένης λειτουργίας του, ένα μικροδίκτυο χαρακτηρίζεται ως DC ή AC, αναλόγως αν βασίζεται σε κάποιο σύστημα συνεχούς (DC) ή εναλασσόμενου (AC) ρεύματος. Τα DC μικροδίκτυα, έχουν εξαπλωθεί ιδιαίτερα κατά τα τελευταία χρόνια, καθώς η λειτουργία και ο έλεγχός τους είναι ιδιαίτερα απλός. Πιο συγκεκριμένα, σε ένα DC δίκτυο, αρκεί ο έλεγχος της τάσης και του ρεύματος λειτουργίας, ενώ δεν υπεισέρχονται μεγέθη όπως η συχνότητα, η φάση ή η άεργος ισχύς. Επίσης, λαμβάνοντας υπ όψιν ότι πλήθος φορτίων καταναλώνουν συνεχές ρεύμα, αν η τροφοδοτήσή τους γίνεται μέσω ενός DC μικροδικτύου, δεν είναι απαραίτητη η παρουσία ανορθωτών (μετατροπείς AC/DC), με αποτέλεσμα τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του συστήματος. Από την άλλη πλευρά ένα σημαντικό μειονέκτημα των DC μικροδικτύων, έναντι των AC, αποτελεί η έλλειψη εξειδικευμένων διατάξεων προστασίας, με αποτέλεσμα να γίνεται ως επί το πλείστον χρήση ασφαλειών τήξεως ή απλών διακοπών ισχύος.

Κλείνοντας, αναφέρουμε πως το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη αυτόνομων μικροδικτύων είναι ιδιαίτερα αυξημένο κατά την τελευταία εικοσαετία, γεγονός που οφείλεται κατά κύριο λόγο στη διόγκωση της αγοράς μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Οι δύο αυτές τεχνολογίες είναι άμεσα συνδεδεμένες μεταξύ τους, και πρόκειται να αποτελέσουν τον κεντρικό άξονα γύρω από τον οποίο θα κινηθεί η ανάπτυξη και σχεδιασμός των ηλεκτρικών δικτύων του μέλλοντος.

5.3 Γενικά στοιχεία ενός DC μικροδικτύου



Εικόνα 5.3: DC μικροδίκτυο

5.3.1 Συστατικά Μέρη

Ένα DC μικροδίκτυο αποτελείται από τα κάτωθι επί μέρους στοιχεία:

- **Μία ή περισσότερες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας:** Οι πηγές αυτές μπορεί να παράγουν, σε πρώτο στάδιο, είτε συνεχή είτε εναλασσόμενη τάση/ρεύμα, ενώ με τη μεσολάβηση των ηλεκτρονικών ισχύος του συστήματος, όλα τα AC μεγέθη ανορθώνονται σε DC μορφή.
- **Διατάξεις αποθήκευσης:** Για την κάλυψη υψηλών τιμών ζήτησης και την αποθήκευση περίσσειας ενέργειας ένα DC μικροδίκτυο (ιδιαίτερα όταν βρίσκεται σε απομονωμένη λειτουργία) μπορεί να χρησιμοποιεί ενέργεια που αποθηκεύεται σε υπερπυκνωτές, υπεραγωγία πηνία, συσσωρευτές ή ακόμα και υπό δυναμική μορφή (μέσω αντλιών, συμπιεστών κλπ)
- **Ηλεκτρονικά Ισχύος:** Φροντίζουν για την μετατροπή της παραγόμενης ενέργειας στην κατάλληλη μορφή, προς τροφοδοσία του μικροδικτύου, ενώ μέσω αυτών καθίσταται δυνατή η αποτελεσματική ρύθμιση του ποσοστού συμμετοχής των πηγών τροφοδοσίας. Σε περίπτωση διασυνδεδεμένης λειτουργίας ο ρόλος τους αποκτά και άλλες διαστάσεις, όπως τον έλεγχο της της ροής ισχύος από και προς το μικροδίκτυο.

- **Σύστημα διανομής:** Πρόκειται περί καλωδιώσεων μεταξύ των επί μέρους στοιχείων του μικροδικτύου, με στόχο τη σύνθεση ενός ολοκληρωμένου ηλεκτρικού δικτύου. Συνήθως παρατηρείται η παρουσία ενός κεντρικού ζυγού (DC bus), στον οποίο συνδέονται οι πηγές τροφοδοσίας και τα ηλεκτρικά φορτία, μέσω ηλεκτρονικών ισχύος. Στην κατηγορία αυτή συμπεριλαμβάνονται επίσης οι διατάξεις προστασίας καθώς και οι διατάξεις ηλεκτρονικού ελέγχου.
- **Ηλεκτρικά φορτία:** Όπως σε όλα τα ηλεκτρικά (μικρο)δίκτυα, έτσι και εδώ, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μεταβιβάζεται σε κάποιον τελικό καταναλωτή, προς κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του.

5.3.2 Τάση Λειτουργίας

Ένα μικροδίκτυο μπορεί να λειτουργεί υπό υψηλή (High Voltage/HV) ή χαμηλή τάση (Low Voltage/LV), με το ενδιαφέρον της πλειοψηφίας των κατασκευαστών να επικεντρώνεται στη στα LVDC μικροδίκτυα. Η ανώτατη τιμή της τάσης λειτουργίας ενός τέτοιου δικτύου ορίζεται σύμφωνα με το πρότυπο της Διεθνούς Ηλεκτροτεχνικής Επιτροπής (International Electrotechnical Commission/IEC) 60634 στα 1500V, ενώ σε πρακτικές εφαρμογές δεν ξεπερνά το 1kV. Πιο συγκεκριμένα, σε εφαρμογές υπηρεσιών κτιρίων, καθώς και ηλεκτρικών συσκευών (πλυντήρια, κλιματιστικά κλπ), το δίκτυο βρίσκεται συνήθως υπό τάση 380V. Για την τροφοδοσία μικρότερων ηλεκτρικών φορτίων (φορτιστές φορητών υπολογιστών, τάμπλετ κλπ) η τάση του δικτύου μπορεί να κυμαίνεται από 5-100V DC, ενώ σε εφαρμογές τηλεπικοινωνιών και φωτισμού η λειτουργία υπό 48V είναι αποτελεσματικότερη. Γενικά, με την αύξηση της τάσης του μικροδικτύου, μειώνονται οι απώλειες μεταφοράς αλλά αυξάνεται ο κίνδυνος ηλεκτροπληξίας ενώ απαιτούνται διακόπτες αυξημένων δυνατοτήτων. Κατά τα επόμενα χρόνια θεωρείται πιθανή η επικράτηση δύο επιπέδων τάσεως λειτουργίας των DC μικροδικτύων[50]:

- **380V DC** για τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας και την τροφοδοσία βιομηχανικών μονάδων
- **48V DC** για την τροφοδοσία των καταναλωτών, αφού οι περισσότερες ηλεκτρικές συσκευές που χρησιμοποιούμε καθημερινά ανταποκρίνονται ικανοποιητικά στην τιμή αυτή.

5.4 Ηλεκτρονικά Ισχύος

5.4.1 Γενικά Στοιχεία

Η αποτελεσματική λειτουργία ενός DC μικροδικτύου δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την πρόοδο στον τομέα των ηλεκτρικών μετατροπέων ισχύος. Ο ρόλος τους είναι παρεμφερής με το ρόλο

των μετασηματιστών στα AC δίκτυα. Αναλόγως το είδος της μετατροπής που εκτελούν υπάγονται σε μία από τις ακόλουθες κατηγορίες:

- **Αντιστροφείς:** Μετατρέπουν τη DC τάση σε AC
- **Ανορθωτές:** Μετατρέπουν την AC τάση σε DC
- **Μετατροπείς Συνεχούς-Συνεχούς (DC-DC):** Διατηρούν τη DC τάση σε συνεχή μορφή, ενώ φροντίζουν για την ανύψωση ή τον υποβιβασμό της.

Στις περισσότερες εφαρμογές, η έξοδος του μετατροπέα δεν είναι σε ιδανική μορφή, αλλά παρατηρούνται φαινόμενα κυμάτωσης, ή παρουσία αρμονικών συχνοτήτων. Για το λόγο αυτό συνδέουμε εν σειρά φίλτρα, τα οποία αποτελούνται από τη συνδιαστική λειτουργία πηνίων και πυκνωτών (LC φίλτρα).

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, οι πηγές ηλεκτρικής ενέργειας φρόντιζαν για την παραγωγή ηλεκτρικής τάσης συνεχούς μορφής. Επίσης το σύστημα τροφοδοσίας μελετήθηκε έως τη σύνδεση των πηγών παραγωγής και των φορτίων σε έναν κεντρικό ζυγό DC. Η πλήρης απουσία AC μεγεθών από το μικροδίκτυο συνεπάγεται την αποκλειστική παρουσία μετατροπών DC-DC. Μία αναλυτικότερη περιγραφή της κυκλωματικής δομής, αλλά και της ακριβούς λειτουργίας τους κρίνεται απαραίτητη, ώστε να είναι ευκολότερη η κατανόηση των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση.

5.4.2 DC/DC μετατροπείς

Οι μετατροπείς DC/DC περιλαμβάνουν διάφορα κυκλωματικά στοιχεία, όπως αντιστάτες πηνία και πυκνωτές. Παρότι ο ρόλος των στοιχείων αυτών είναι αδιαμφισβήτητα σημαντικός, η πρόοδος στο συγκεκριμένο τομέα δε θα ήταν δυνατή χωρίς την ανάπτυξη της τεχνολογίας των ημιαγωγικών διακοπών (τρανζίστορ). Τα τρανζίστορ μπορεί να αποτελούν διακόπτες ρύθμισης τάσης ή ρεύματος, με τα γνωστότερα και αποτελεσματικότερα εξ αυτών (MOSFET, IGBT) να υπάγονται στη δεύτερη κατηγορία. Επιτελώντας το ρόλο του ηλεκτρικού διακόπτη, φροντίζουν για το ποσοστό της τάσης είσοδου που πρόκειται να μεταβεί στην έξοδο, είτε πρόκειται για διατάξεις ενίσχυσης είτε υποβιβασμού. Η συχνότητα λειτουργίας τους πρέπει να είναι της τάξης των kHz, ώστε να μειώνεται όσο δυνατόν περισσότερο η κυμάτωση της τάσης εξόδου και η παρεμβολή τους στα υπόλοιπα στοιχεία του δικτύου.

Οι μετατροπείς DC/DC διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τους μετατροπείς διαμόρφωσης εύρους παλμού (Pulse Width Modulated/PWM) και τους μετατροπείς απαλής μεταγωγής (Soft Switching/SS). Η διάκριση οφείλεται στη μέθοδο, σύμφωνα με την οποία πραγματοποιείται η μεταβολή του τρανζίστορ από την κατάσταση αγωγής στην κατάσταση μη αγωγής και αντίστροφα. Οι μετατροπείς PWM έχουν κατακτήσει την αγορά κατά τις τελευταίες τρεις δεκαετίες, λόγω του χαμηλότερου κόστους, της υψηλής απόδοσης και της απλότητας ελέγχου

του κυκλώματος. Αναλύοντας περισσότερο, η μεταγωγή του τρανζίστορ ρυθμίζεται μέσω της σύγκρισης ενός σήματος ελέγχου με μία προκαθορισμένη επαναλαμβανόμενη «πριονωτή» κυματομορφή (Sawtooth Waveform). Προκύπτει έτσι το ποσοστό της περιόδου κατά το οποίο το τρανζίστορ πρέπει να βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής (on-time interval) ή αλλιώς, η κατάλληλη τιμή του duty cycle ($D = \frac{On\ time}{Off\ time + On\ time}$). Οι μετατροπείς SS χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές με ηλεκτρικά ευαίσθητες συσκευές, όπου απαιτείται χαμηλή συχνότητα μεταγωγής των διακοπών-τρανζίστορ, προς μείωση της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής.

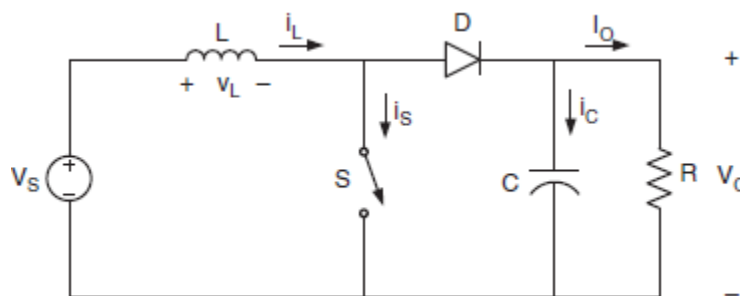
Προτού προβούμε σε μία λεπτομερέστερη περιγραφή του ηλεκτρικού κυκλώματος ενός μετατροπέα, πρέπει να αναφέρουμε πως η λειτουργία του χαρακτηρίζεται ως:

- Continuous Conduction Mode/CCM, όπου το ρεύμα του πηνίου είναι πάντα μεγαλύτερο του μηδενός.
- Discontinuous Conduction Mode/DCM, όπου το ρεύμα πηνίου λαμβάνει μηδενική τιμή κατά ένα τμήμα της περιόδου μεταγωγής

Η CCM προτιμάται, εξαιτίας της υψηλότερης απόδοσης και της βέλτιστης αξιοποίησης των διακοπών και των παθητικών στοιχείων του κυκλώματος. Η DCM χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου απαιτούνται αυστηρές διαδικασίες ελέγχου. Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω μεθόδων πρέπει να αποφεύγεται, ενώ τα όρια μετάβασης μεταξύ αυτών καθορίζονται από τις κρίσιμες τιμές των παθητικών στοιχείων.

Ακολουθεί μία σύντομη παρουσίαση τριών βασικών διατάξεων μετατροπέων DC/DC[51].

5.4.2.1 Μετατροπέας Ανύψωσης Τάσης (Boost Converter)



Εικόνα 5.4: Κυκλωματικό ισοδύναμο μετατροπέα ανύψωσης

Σύμφωνα με την εικόνα (5.4), ένας PWM μετατροπέας ανύψωσης αποτελείται από μία πηγή dc τάσης V_s , ένα πηνίο επαγωγικότητας L , ένα διακόπτη (S), μία δίοδο (D), ένα πυκνωτή-φίλτρο χωρητικότητας C και μία αντίσταση R , που συμβολίζει το συνδεδεμένο φορτίο στα άκρα του μετατροπέα. Σύμφωνα με τη διάταξη αυτή, όταν ο διακόπτης S (συνήθως MOSFET ή IGBT τρανζίστορ) βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής (on-state), το ρεύμα του πηνίου αυξάνεται

γραμμικά, ενώ η δίοδος του κυκλώματος είναι σε κατάσταση αποκοπής (off-state). Με τη μετάβαση του διακόπτη σε off-state, η ενέργεια που έχει αποθηκευτεί στο πηνίο απελευθερώνεται και, μέσω της διόδου, τροφοδοτεί το φορτίο. Φυσικά η τάση εισόδου V_s είναι πάντα μικρότερη από την τάση εξόδου V_o , ενώ το αντίθετο ισχύει για τα ρεύματα i_s , i_o . Για την ανάλυση σταθερής κατάστασης του κυκλώματος γίνονται δύο βασικές παραδοχές[52]:

1. Η μέση τιμή, ή αλλιώς η DC συνιστώσα, της τάσης που εφαρμόζεται κατά μήκος των τυλιγμάτων ενός ιδανικού επαγωγέα είναι μηδενική
2. Η μέση τιμή του ρεύματος που ρέει μέσω ενός ιδανικού πυκνωτή είναι επίσης μηδενική

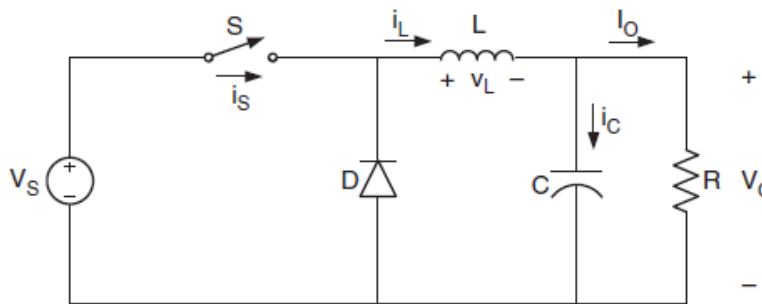
Λαμβάνοντας υπ όψιν τα παραπάνω, και ορίζοντας ως f τη συχνότητα λειτουργίας του διακόπτη ($T = \frac{1}{f}$) έχουμε:

$$\bullet \quad V_s D T = (V_o - V_s)(1-D)T \rightarrow \frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1-D} \quad (5.1)$$

Για τη λειτουργία του μετατροπέα ανύψωσης υπό CCM πρέπει να ικανοποιείται η ανίσωση (5.2.α) ενώ η επιθυμητή ποσοτιαία κυμάτωση της τάσης δίνεται από τη σχέση 5.2.β :

$$\bullet \quad L > (1-D)^2 \frac{DR}{2f} \quad (\alpha) \quad \frac{V_{ripple}}{V_o} = \frac{D}{CRf} \quad (\beta) \quad (5.2)$$

5.4.2.2 Μετατροπέας Υποβιβασμού Τάσης (Step-down/Buck Converter)



Εικόνα 5.5: Κυκλωματικό ισοδύναμο μετατροπέα υποβιβασμού

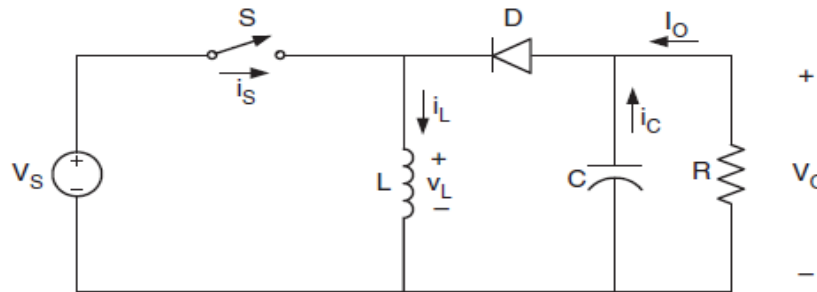
Με μία πρόχειρη ματιά, το κύκλωμα της εικόνας (5.5) δε φαίνεται να διαφέρει πολύ από αυτό της εικόνας (5.4). Παρόλο που έχουμε χρήση των ίδιων επι μέρους ηλεκτρικών στοιχείων, η διαφορετική συνδεσμολογία μεταξύ αυτών ευθύνεται για την ανύψωση ή τον υποβιβασμό της τάσης εισόδου V_s στην έξοδο. Σε ένα μετατροπέα υποβιβασμού, κατά την κατάσταση αγωγής του διακόπτη η δίοδος είναι ανάστροφα πολωμένη ενώ, όταν ο διακόπτης δεν άγει, η δίοδος παρέχει έναν αγωγίμο δρόμο προς τροφοδοσία του φορτίου μέσω της ενέργειας που έχει αποθηκευτεί στο πηνίο. Η τάση εξόδου είναι πάντα χαμηλότερη της τάσης εισόδου, σύμφωνα με τη σχέση:

- $(V_s - V_o) DT = V_o(D-1)T \rightarrow \frac{V_o}{V_s} = D$ (5.3)

Για λειτουργία του μετατροπέα υποβιβασμού υπό CCM πρέπει να ικανοποιείται η ανίσωση (5.4.α) ενώ η επιθυμητή ποσοστιαία κυμάτωση της τάσης, δίνεται από τη σχέση (5.4.β):

- $L > (1-D) \frac{R}{2f}$ **(α)** $\frac{V_{ripple}}{V_o} = \frac{(1-D)V_o}{8V_r L} f^{-2}$ **(β)** (5.4)

5.4.2.3 Μετατροπέας Υποβιβασμού-Ανύψωσης Τάσης (Buck-Boost Converter)



Εικόνα 5.6: Κυκλωματικό ισοδύναμο μετατροπέα υποβιβασμού-ανύψωσης

Τροποποιώντας ελαφρώς τη διάταξη ενός μετατροπέα υποβιβασμού, μπορούμε να του προσδώσουμε επιπλέον τη δυνατότητα ανύψωσης της τάσης εισόδου. Με τη γενική αρχή λειτουργίας να παραμένει ίδια (αφού και σε αυτή την περίπτωση κατά την αγωγή του διακόπτη έχουμε φόρτιση του πηνίου), ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αντιστροφή των θέσεων πηνίου-διόδου. Σύμφωνα με το κυκλωματικό ισοδύναμο, είναι εμφανές πως κατά την περίοδο μη αγωγής του τρανζίστορ, η διάοδος παρέχει μεν έναν αγωγίμο δρόμο για την κυκλοφορία του ρεύματος μεταξύ πηνίου-φορτίου, όμως με βάση την πολικότητά της, το ρεύμα προέρχεται από την έξοδο. Η συμπεριφορά του κυκλώματος ως μετατροπέας ανύψωσης ή υποβιβασμού εξαρτάται αποκλειστικά από το duty cycle του διακόπτη, όπως φαίνεται από πίνακα (5.1):

Υπόθεση	Τιμή Duty Cycle	Λειτουργία Κυκλώματος
1	$D > 0.5$	Boost Converter
2	$D < 0.5$	Buck Converter
3	$D = 0.5$	Καμία επίδραση στην τάση εισόδου

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1: ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΑΝΥΨΩΣΗΣ ΥΠΟΒΙΒΑΣΜΟΥ

Θεωρώντας και πάλι μηδενική μέση τιμή τάσεως του πηνίου και ρεύματος του πυκνωτή κατά τη σταθερή κατάσταση λειτουργίας ισχύει:

- $V_s DT = -V_o(1-D)T \rightarrow \frac{V_o}{V_s} = -\frac{D}{1-D}$ (5.5)

Για λειτουργία του μετατροπέα υποβιβασμού-ανύψωσης υπό CCM πρέπει να ικανοποιείται η ανίσωση 5.6 ενώ η επιθυμητή ποσοστιαία κυμάτωση της τάσης, εξαρτάται από τον τρόπο λειτουργίας:

- $L > (1-D)^2 \frac{R}{2f}$ (5.6)

Οι συνδεσμολογίες που παρουσιάστηκαν αποτελούν τις απλούστερες μορφές υλοποίησης των κυκλωμάτων μετατροπής. Η παρουσία ενός μετασχηματιστή κρίνεται απαραίτητη σε περίπτωση που απαιτείται γαλβανική απομόνωση μεταξύ εισόδου και εξόδου του μετατροπέα, ενώ, με την κατάλληλη συνδεσμολογία δύο ή περισσότερων μετασχηματιστών, καθίσταται δυνατή η παροχή τάσεως διαφορετικών επιπέδων στην έξοδο.

5.5 Εφαρμογές DC Μικροδικτύων (DCMG)

Η χρήση των DCMG έχει προταθεί για πλήθος διαφορετικών εφαρμογών στο μέλλον, που συμπεριλαμβάνουν από οικολογικά νοικοκυριά υψηλής ενεργειακής απόδοσης έως σταθμούς ταχείας φόρτισης οχημάτων[53]. Κάθε μία εξ αυτών των παρουσιάζει ιδιαίτερες απαιτήσεις, οπότε και μένει να αποδειχτεί αν είναι ή όχι δυνατή η ενσωμάτωση των DC μικροδικτύων υπό μεγάλη κλίμακα. Η DC βιομηχανία, στην παρούσα φάση, είναι επαρκώς εξοικειωμένη με συγκεκριμένους τομείς εφαρμογών, στους οποίους αναφερόμαστε παρακάτω.

5.5.1 Τηλεπικοινωνιακές Εφαρμογές/Κέντρα Δεδομένων

Παρόλο που στην πλειοψηφία τους βασίζονται σε AC δίκτυα διανομής, τα κέντρα δεδομένων έχουν αποτελέσει τον κύριο τομέα λειτουργίας των DC μικροδικτύων για εφαρμογές πέραν του ηλεκτρικού φωτισμού. Ουσιαστικά, πρόκειται για εγκαταστάσεις αποθήκευσης και μεταφοράς τεράστιου όγκου ψηφιακών δεδομένων που αφορούν το διαδίκτυο, την κινητή τηλεφωνία, καθώς και χρηματοπιστωτικές συναλλαγές. Έτσι, καθίσταται αναγκαία η τροφοδοσία τους από ένα αξιόπιστο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο με τη σειρά του καθιστά αναγκαία την παρουσία συστημάτων αδιάλειπτης παροχής ισχύος (UPS). Τα συστήματα UPS αποτελούνται κατά κύριο λόγο από ηλεκτρικούς συσσωρευτές, δηλαδή DC πηγές-φορτία. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τις υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις των εγκαταστάσεων, οδήγησαν στην εξάπλωση των DC μικροδικτύων ως μία πειραματική λύση μείωσης των απωλειών μετατροπής της μεταφερόμενης ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, σε πρακτικές εφαρμογές, η μετάβαση σε μικροδίκτυα αρχιτεκτονικής 380V DC, από την παραδοσιακή 480V AC μορφή, έχει οδηγήσει σε βελτίωση της απόδοσης του συνολικού συστήματος έως και 15%, ενώ η απόδοση αναμένεται να διπλασιαστεί κατά τα επόμενα χρόνια[53]. Η βελτίωση αυτή οφείλεται ως επί το πλείστον

στην αντικατάσταση των μετατροπέων AC/DC (βαθμός απόδοσης ~70%) με μετατροπείς DC/DC (απόδοση ~90%). Παρόμοια εικόνα παρατηρείται στον κλάδο των τηλεπικοινωνιών, αφού και εκεί απαιτείται η μετάφορα τεράστιου όγκου δεδομένων, υπό τη μέγιστη δυνατή αξιοπιστία και απόδοση. Η χρήση DC μικροδικτύων υπό τάση λειτουργίας τα 48V DC, ικανοποιεί πλήρως τις πραπάνω απαιτήσεις (η αξιοπιστία τους αγγίζει το 99.999%)[54].

5.5.2 Τροφοδοσία κτιρίων

Σύμφωνα με περιπτωσιολογικές μελέτες (case studies) που έχουν δημοσιευτεί (EPRI 2006), μεγάλα συγκροτήματα κτιρίων χρησιμοποιούν πηγές διεσπαρμένης παραγωγής (κατά κύριο λόγο φωτοβολταϊκά πάνελ) για την πλήρη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών τους, ενώ η υπερβάλλουσα παραγωγή πωλείται στο κεντρικό δίκτυο. Ο φωτισμός των επί μέρους χώρων του κτιρίου αποτελεί το σημαντικότερο φορτίο σε τέτοιου τύπου εφαρμογές, καθώς δεσμεύει περισσότερο από 50% του συνόλου της καταναλισκόμενης ενέργειας. Η αντικατάσταση των AC ballast με DC, οδήγησε σε σημαντική μείωση της πυκνότητας φωτισμού, γεγονός το οποίο, σε συνδυασμό με την υλοποίηση DC μικροδικτύου χαμηλής τάσης (48V), είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση των απωλειών σε ποσοστό 20% του αρχικού φορτίου φωτισμού. Η περίοδος αποπληρωμής του όλου εγχειρήματος ορίστηκε αρχικά στα 18 χρόνια, όμως με την επιβολή ενός μικρού τέλους χρήσης κατά τις περιόδους μέγιστης ζήτησης, το διάστημα αυτό μειώθηκε κατά το ήμισυ. Όσον αφορά μελέτες σχετικές με συγκροτήματα κατοικιών, το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ισχύος επιλέγεται στα 200V DC, ενώ μέσω μετατροπέων η τάση αυτή υποβιβάζεται, για την τροφοδοσία των φορτίων υπό 48V DC. Η αντικατάσταση ενός AC δικτύου με DC μικροδίκτυα αυτής της μορφής μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση των απωλειών μετατροπής κατά μεγάλο ποσοστό, έως και 85%[53].

5.5.3 Τομέας μεταφορών

- **Ηλεκτρικά Τρένα/Τρόλεϋ**

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει τα περισσότερα μέσα τα οποία χρησιμοποιούνται στις δημόσιες συγκοινωνίες, όπως το μετρό, τα τρόλεϋ και το τραμ. Για την τροφοδοσία των συγκεκριμένων μέσων μεταφοράς επιλέγονται DC συστήματα διανομής ενέργειας, αφού στη μεγαλύτερη πλειοψηφία τους, τα οχήματα αυτά χρησιμοποιούν DC κινητήρες. Επίσης, ιδιαίτερα στην περίπτωση των ηλεκτρικών σιδηροδρόμων, απαιτείται η παρουσία ενός μόνο αγωγού μεταφοράς, αφού οι ράγες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως διαδρομή επιστροφής του ρεύματος τροφοδοσίας. Πέραν των απαιτήσεων κίνησης, το DC μικροδίκτυο φροντίζει και για την κάλυψη των βοηθητικών φορτίων, με την τάση λειτουργίας του να κυμαίνεται συνήθως από 0.6kV έως 1kV.

- **Ηλεκτρικά Συστήματα Πλοίων**

Σε πολλές περιπτώσεις, το συνολικό ηλεκτρικό σύστημα ενός πλοίου αποτελείται από επί μέρους δίκτυα, τα οποία λειτουργούν ανεξάρτητα μεταξύ τους. Έτσι, ένα εξ αυτών μπορεί να φροντίζει για την τροφοδοσία του μηχανισμού πρόωσης, ενώ κάποιο άλλο για τη λειτουργία του οπλικού συστήματος και ένα τρίτο για την εξυπηρέτηση ηλεκτρικών αναγκών των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Στα ολοκληρωμένα συστήματα ισχύος (Integrated Power Systems/IPS) τα επί μέρους μικροδίκτυα συνδέονται μεταξύ τους σε μία ενωποιημένη μορφή, που συνεπάγεται την αύξηση της αξιοπιστίας του συστήματος αλλά και του βαθμού πολυπλοκότητας των διαδικασιών ελέγχου. Η μεταφορά της ενέργειας, στην παρούσα φάση γίνεται σχεδόν αποκλειστικά υπό AC μορφή, αλλά το τοπίο αναμένεται να αλλάξει κατά τα επόμενα χρόνια. Η μείωση των απωλειών μεταφοράς καθώς και η βελτιώση της ενεργειακής απόδοσης του μηχανισμού πρόωσης αποτελούν δύο από τους κυριότερους παράγοντες που πιέζουν για την αντικατάσταση των AC μικροδικτύων με DC. Η καθυστέρηση υιοθέτησης ενός αναλυτικού σχεδίου, προς αυτή την κατεύθυνση, από μεγάλες ναυτιλιακές εταιρίες οφείλεται στην υψηλή οικονομική επιβάρυνση ενός τέτοιου εγχειρήματος, καθώς και στην αδυναμία μεγάλων εταιριών κατασκευής να ορίσουν ένα καθολικό πρότυπο σχετικά με την ακριβή τοπολογία των δικτύων.

5.5.4 DC μικροδίκτυα σε εναέριες πλατφόρμες

- **Διαστημόπλοια**

Τα διαστημόπλοια πραγματοποιούν το μεγαλύτερο μέρος της πτήσης τους εκτός της ατμόσφαιρας της γης, όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι ιδιαίτερα υψηλή (κατά μέσο όρο $1,369\text{W}/\text{m}^2$) γεγονός που καθιστά τη φωτοβολταϊκή τεχνολογία ως μία ιδανική επιλογή. Η παρουσία μπαταριών και πλήθους DC φορτίων επιβάλλει την DC διανομή της παραγόμενης ενέργειας. Ο διεθνής διαστημικός σταθμός αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα μίας τέτοιου τύπου εφαρμογής, αφού τροφοδοτείται αποκλειστικά από ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από φωτοβολταϊκά πάνελ (συνολική ισχύς 100kW) και ηλεκτρικούς συσσωρευτές, ενώ χρησιμοποιούνται δύο ξεχωριστά συστήματα DC διανομής υπό τάση 120V και 28V .

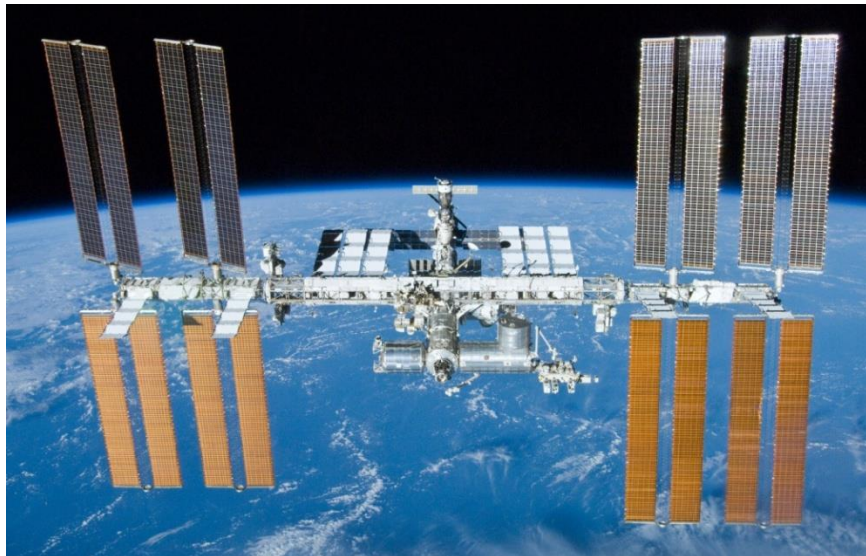
- **UAV**

Η δεκαετία που διανύουμε αποτελεί μία εποχή καινοτομίας στον τομέα της κατασκευής μη επανδρωμένων αεροσκαφών. Ως εκ τούτου, έχει μειωθεί σημαντικά η εξάρτηση από τον εξοπλισμό που συναντάμε σε παραδοσιακά αεροσκάφη, κάτι που συνεπάγεται λιγότερους περιορισμούς σχετικά με το σχεδιασμό της αρχιτεκτονικής του ηλεκτρικού συστήματος. Η μεγαλύτερη ευελιξία που προσφέρεται επιτρέπει τη βελτιστοποίηση τη όλης διαδικασίας, μέσω εισαγωγής πλήθους νέως μεταβλητών (επίπεδο τάσης λειτουργίας, μορφή

αποθηκευόμενης ενέργειας, τύπος φορτίων κλπ). Φυσικά η συνολική πολυπλοκότητα αυξάνεται σημαντικά, καθώς η ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών και η μελέτη πρωτοποριακών τρόπων λειτουργίας δεν είναι ακόμα καλά τεκμηριωμένες στην υπάρχουσα ερευνητική βιβλιογραφία[55].

Στα MALE υαν παρατηρείται σταδιακή μετάβαση από το τριφασικό 115V AC σύστημα διανομής σε 270V DC προς εκμετάλλευση των βασικών πλεονεκτημάτων που συνεπάγεται η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας υπό DC μορφή. Η μείωση του αριθμού των απαιτούμενων μετατροπέων ισχύος, πέραν της αύξησης της απόδοσης του συστήματος (που αναφέρθηκε πρωτύτερα) οδηγεί επιπλέον σε μείωση του βάρους και του όγκου του δικτύου, δύο ιδιαίτερα σημαντικούς παράγοντες στον τομέα της αεροπλοΐας. Η DC διανομή διευκολύνει επίσης την παράλληλη λειτουργία πολλαπλών γεννητριών-πηγών παραγωγής και τη σύνδεσή τους σε ένα κεντρικό ζυγό DC αυξάνοντας ακόμα περισσότερο τη συνολική απόδοση του συστήματος και μειώνοντας το συνολικό κόστος κατασκευής.

Κατά τη μεταφορά DC ενέργειας υπό υψηλό δυναμικό υπάρχει πάντα ο κίνδυνος εμφάνισης ηλεκτρικών σφαλμάτων, με τα ρεύματα σφάλματος να λαμβάνουν ιδιαίτερα υψηλές τιμές. Η έλλειψη τεχνογνωσίας σχετικά με αξιόπιστες συσκευές προστασίας από τα φαινόμενα αυτά αντισταθμίζει ως ένα βαθμό τα πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν, ενώ αποτελεί σημαντικό εμπόδιο για την ευρύτερη υιοθέτηση DC μικροδικτύων σε ηλεκτρικά συστήματα αεροσκαφών. Σε υαν μικρότερου μεγέθους, ο περιορισμός αυτός δεν υφίσταται, καθώς η dc διανομή μπορεί να γίνει υπό χαμηλότερη τάση (48V DC), εφόσον αυτό δε συνεπάγεται σημαντικές θερμικές απώλειες μεταφοράς. Σε αντίθεση με τα πλοία, το DC σύστημα διανομής ενός υαν είναι ιδιαίτερα απλό, και αποτελεί πάντα μία ενιαία οντότητα.



Εικόνα 5.7: Διεθνής Διαστημικός Σταθμός (ISS)

Κεφάλαιο 6: Ενεργειακές Απαιτήσεις Πτήσεως/Επιλογή Uav

6.1 Επιλογή UAV

Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά ενός μη επανδρωμένου αεροσκάφους καθορίζονται κατά κύριο λόγο, από το είδος της αποστολής που πρόκειται να εκτελέσει. Στη μεγάλη πλειοψηφία τους, τα uav χρησιμοποιούνται για την εξυπηρέτηση αποστολών επιτήρησης-παρακολούθησης. Αυτό οφείλεται κυρίως στους πολλούς τομείς, τους οποίους εξυπηρετεί μία τέτοιου τύπου αποστολή. Αρχικά, αναφερόμενοι σε στρατιωτικές επιχειρήσεις, συχνά απαιτείται η συλλογή πληροφοριών από περιοχές υψηλού κινδύνου (πχ μία στρατιωτική βάση). Κατά την εκτέλεση της αποστολής, το αεροσκάφος πρέπει να διαθέτει τη δυνατότητα πτήσης σε υψηλά και χαμηλά υψόμετρα, πολλές φορές περιμετρικά γύρω από το σημείο ενδιαφέροντος, ενώ ο χρόνος πτήσης μπορεί να κυμαίνεται από μερικά λεπτά τις ώρες, έως αρκετές ώρες. Φυσικά με την αύξηση του χρόνου επιτήρησης, αυξάνεται και η πιθανότητα εντοπισμού του αεροσκάφους, και κατ' επέκταση η κατάρριψη/κατάσχεση αυτού, θέτοντας έτσι σε κίνδυνο τη ζωή του πληρώματος. Παρατάσσοντας ένα στόλο μη επανδρωμένων, έναντι συμβατικών, αεροσκαφών, η ασφάλεια του χειριστή είναι απολύτως εξασφαλισμένη. Εάν δε, τα uav έχουν τη δυνατότητα ανάπτυξης υψηλής ταχύτητας πτήσης, καθίσταται δυνατή και η ασφαλής επιστροφή τους.

Σε αγροτικές εφαρμογές προτιμούνται συνήθως μικρά drones, γνωστά ως τετρακόπτερα ή εξακόπτερα, αναλόγως τον αριθμό των στροφείων που χρησιμοποιούν. Σε χώρες που βασίζονται ιδιαίτερα στην αγροτική παραγωγή, όπως η Κίνα, οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις καλύπτουν χιλιάδες χιλιόμετρα, με αποτέλεσμα, η χρήση uav πολλών στροφείων να είναι ιδιαίτερα κοστοβόρα από ενεργειακής και οικονομικής σκοπιάς, αφού ως πηγή τροφοδοσίας χρησιμοποιούνται αποκλειστικά ηλεκτρικοί συσσωρευτές. Επίσης η διάρκεια πτήσης των συγκεκριμένων uav είναι πολύ περιορισμένη, συνήθως περί τη μία ώρα. Αντίθετα, ένα uav σταθερού εκπετάσματος υψηλής αντοχής, εφοδιασμένο με μία κάμερα υψηλής ευκρίνειας, μπορεί να φροντίσει για την κάλυψη του συνόλου των αγροτικών περιοχών, σε πολύ λιγότερο χρόνο, λόγω της δυνατότητας ανάπτυξης υψηλής ταχύτητας πτήσεως. Επιπροσθέτως, με την ενσωμάτωση ενός υβριδικού συστήματος τροφοδοσίας, οι ανάγκες ανεφοδιασμού του περιορίζονται σημαντικά.

Η αυτονομία ενός μη επανδρωμένου εναέριου συστήματος κατά τις διάφορες φάσεις πτήσεως, είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό ζήτημα. Όσον αφορά τη διαδικασία απογείωσης του uav, κρίνεται προτιμότερο να μην απαιτείται κάποιος ιδιαίτερος εξοπλισμός (όπως ένας καταπέλτης εκτόξευσης ή μία πλατφόρμα προς απόκτηση αρχικής ταχύτητας και υψομέτρου πτήσης), αφού η προετοιμασία του μηχανισμού αυτού απαιτεί συνήθως την παρουσία ενός ή περισσότερων ατόμων, περιορίζοντας έτσι σημαντικά τη λειτουργικότητα του συστήματος.

Αντίθετα, με την απογείωση μέσω ανάπτυξης ταχύτητας σε έναν ειδικά διαμορφωμένο διάδρομο, όπως συμβαίνει με τα επιβατικά αεροσκάφη, παρέχεται μεγαλύτερη αυτονομία στο συνολικό σύστημα. Όσον αφορά την διαδικασία προσγείωσης, και πάλι η χρήση ενός ειδικά διαμορφωμένου διαδρόμου κρίνεται προτιμότερη από την χρήση κάποιου μηχανισμού (πχ αλεξίπτωτο ή δίχτυ).

Ενα μη επανδρωμένο αεροσκάφος, σχεδιασμένο για την εκτέλεση αποστολών παρακολούθησης, δεν είναι απαραίτητο να διαθέτει τη δυνατότητα μεταφοράς φορτίων υψηλού βάρους. Ως αποτέλεσμα, οι ενεργειακές απαιτήσεις πτήσεως είναι αρκετά μειωμένες συγκριτικά με ένα επανδρωμένο αεροσκάφος, ή καποιου άλλου τύπου υαν. Φυσικά, αν η απαιτούμενη ενέργεια προς τροφοδοσία του συστήματος προώθησης (συχνότερα μία ή περισσότερες προπέλλες/έλικες) εξασφαλίζεται μέσω καυσίμων, η μεταφορά βαρύτερου φορτίου (περισσότερα καύσιμα), συνεπάγεται άμεσα την αύξηση της αυτονομίας πτήσεως. Η χρήση ηλεκτροκινητήρων έναντι ΜΕΚ προτιμάται, λόγω των πλεονεκτημάτων τους στην εκτέλεση αποστολών αυτού του τύπου (αναλυτική αναφορά έγινε σε προηγούμενο κεφάλαιο). Στη μεγαλύτερη πλειοψηφία τους, τα σύγχρονα ηλεκτροκίνητα υαν μικρού και μεσαίου μεγέθους τροφοδοτούνται από συστοιχίες μπαταριών, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις έχουμε και την παρουσία κάποιας ανανεώσιμης πηγής ηλεκτρικής ενέργειας, προς δημιουργία ενός υβριδικού συστήματος ηλεκτρικής ισχύος. Στα συστήματα αυτά οι μπαταρίες επιτελούν συνήθως το βοηθητικό ρόλο της συμπλήρωσης του απαιτούμενου φορτίου, όταν η κύρια πηγή τροφοδοσίας αδυνατεί να το καλύψει εξ ολοκλήρου, ενώ σε περίπτωση αστοχίας αυτής, αναλαμβάνουν την τροφοδοσία των λειτουργιών έκτακτης προσγείωσης. Φυσικά και το αντίθετο μπορεί να συμβαίνει (πχ σε συστήματα που ενσωματώνουν φ/β στοιχεία και μπαταρίες, μπορεί ο ρόλος των φ/β να περιορίζεται στη φόρτιση των μπαταριών). Σε κάθε περίπτωση, η λειτουργία του αεροσκάφους αποτελεί μία ιδιαίτερα οικονομική και φιλική προς το περιβάλλον διαδικασία. Ο ισχυρισμός αυτός βασίζεται στο γεγονός πως, με την συμπερίληψη ΑΠΕ στο σύστημα τροφοδοσίας, το βάθος εκφόρτισης των μπαταριών μπορεί να αυξομειώνεται κατ επιλογήν κατά τη διάρκεια της πτήσης, με αποτέλεσμα η διάρκεια ζωής τους να αυξάνεται σημαντικά. Με βάση την υπάρχουσα τεχνολογία, η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών στοιχείων καθώς και κυψελών καυσίμου είναι δυνατή, με πλήθος μοντέλων να είναι ήδη διαθέσιμα στην αγορά.

Όσον αφορά την επιλογή του ηλεκτρικού κινητήρα του συστήματος, τη βέλτιστη εναλλακτική για εφαρμογές στην αεροπολοΐα αποτελούν οι brushless-DC κινητήρες, λόγω του υψηλού βαθμού απόδοσης (θεωρητικά ~95%) και του μειωμένου βάρους που συνεπάγεται η απουσία ψυκτρών. Η αξιολόγηση του συνολικού συστήματος προώθησης κινητήρα-προπέλας, αποτελεί ένα ιδιαίτερα σύνθετο ζήτημα. Η συνολική απόδοση του συστήματος μπορεί να κυμαίνεται από 70% έως 90%, αναλόγως τη φάση πτήσεως, ενώ αν ληφθεί υπόψιν και η χρονική διάρκεια της κάθε φάσης, η μέση απόδοση αυξάνεται ή μειώνεται αναλόγως. Στα πλαίσια αυτής της

διπλωματικής εργασίας, δεν εντρυφήσαμε στο θέμα αυτό για λόγους απλότητας. Μελετήθηκαν οι ενεργειακές απαιτήσεις πτήσεως του αεροσκάφους, ενώ θεωρήθηκε ένας συνολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος πρόωσης (ηλεκτρικός κινητήρας και προπέλλα πρόωσης) 79%, ένα αρκετά αισιόδοξο αλλά και εφικτό σενάριο. Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω, ως πλατφόρμα αναφοράς, επιλέχθηκε το αεροσκάφος που περιγράφεται στην [47], αφού πρόκειται για ένα ηλεκτροκίνητο, μη επανδρωμένο αεροσκάφος μικρού μεγέθους, με την τροφοδοσία του να βασίζεται σε ένα υβριδικό σύστημα ηλεκτρικής ισχύος. Φυσικά έγιναν οι απαραίτητες τροποποιήσεις, για προσαρμογή του uan στα σενάρια προσομοίωσης.

6.2 Προσδιορισμός σημαντικών μεγεθών στην αεροπλοΐα

Όπως αναφέρθηκε στο εισαγωγικό κεφάλαιο, κατά τη διάρκεια πτήσεως ενός αεροσκάφους, ασκούνται επ αυτού δύο ζεύγη αντίθετων δυνάμεων. Στον κατακόρυφο άξονα επιδρούν η δύναμη της άντωσης και του βάρους ενώ, στον οριζόντιο άξονα, η ώση και η οπισθέλκουσα. Η εξασφάλιση των κατάλληλων δυνάμεων ώσης και άντωσης, απαιτεί την τροφοδοσία του συστήματος πρόωσης με την απαιτούμενη ενέργεια, κατά την ακριβή εκτίμηση της οποίας πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν κάποια από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του αεροσκάφους. Διάφορα μεγέθη ορίζονται προς περιγραφή των τεχνικών χαρακτηριστικών, ενώ συγκεκριμένοι συντελεστές χρησιμοποιούνται για την καλύτερη κατανόηση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς του αεροχήματος. Ακολουθεί μία σύντομη παρουσίαση των μεγεθών αυτών, καθώς χρησιμοποιούνται στη συνέχεια, προς υπολογισμό των ενεργειακών απαιτήσεων πτήσης.

- **Πτερυγικός Φόρτος (Wing Loading)**

Ως πτερυγικός φόρτος ορίζεται ο λόγος $\frac{W}{S}$, όπου W είναι το συνολικό βάρος (ή η μάζα) του αεροχήματος και S η επιφάνεια των φτερών του. Στην ουσία δηλώνει πόσο βάρος είναι ικανή να σηκώσει κάθε μονάδα επιφάνειας της πτέρυγας. Το μέγεθος αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς συνδέεται άμεσα με τις επιδόσεις του αεροσκάφους, όπως την ταχύτητα απώλειας στήριξης, τη μέγιστη ταχύτητα, την ταχύτητα απογείωσης, την ευχαίρια πραγματοποίησης ελιγμών κλπ. Πιο συγκεκριμένα, μικρότερες τιμές πτερυγικού φόρτου (συναντώνται συνήθως στα ανεμόπλانا) μεταφράζονται σε χαμηλότερες ταχύτητες απογείωσης/προσγείωσης και αύξηση της ευκινησίας του οχήματος. Αντίθετα, υψηλότερος πτερυγικός φόρτος (χαρακτηρίζει συνήθως τα πολεμικά αεροσκάφη) συνεπάγεται μείωση της επιτάχυνσης κατά τη φάση της αναρρίχησης, καθώς και μεγαλύτερη ευστάθεια καθόλη τη διάρκεια της πτήσης. Προς βελτιστοποίηση της τιμής του πτερυγικού φόρτου σε κάθε επί μέρους φάση της πτήσης, κάποια αεροπλάνα κατασκευάζονται με δυνατότητα αυξομείωσης της επιφάνειας των φτερών τους (Turbolev Tu-22M). Ο πτερυγικός φόρτος υπολογίζεται

συνήθως κατά την απογείωση και μετράται σε kg/m^2 (ή Nt/m^2 αναφερόμενοι σε πτήσεις εντος της γήινης ατμόσφαιρας).

- **Φόρτιση Ισχύος (Thrust to Weight Ratio)**

Η φόρτιση ισχύος ορίζεται ως ο λόγος $\frac{T}{W}$, όπου T είναι η ώση που παράγεται από τη μηχανή και W το βάρος του αεροσκάφους. Το μέγεθος αυτό είναι ευθέως ανάλογο της επιτάχυνσης του αεροσκάφους και κατ' επέκταση του ρυθμού αναρρίχησης. Η τιμή του μεταβάλλεται συνεχώς κατά τη διάρκεια της πτήσης ενώ η εκτίμηση που αναφέρεται συνήθως αφορά τη μέγιστη στατική ώση προς το μέγιστο βάρος απογείωσης σε μηδενικό υψόμετρο πτήσης. Κατά τη φάση πλεύσης, παρατηρείται η ισότητα $\frac{T}{W} = \frac{D}{L}$, λόγω ισορροπίας των δυνάμεων κατά τον κατακόρυφο και οριζόντιο άξονα. Σε περίπτωση που η φόρτιση ισχύος είναι μεγαλύτερη της μονάδας και η οπισθέλκουσα παρουσιάζει επαρκώς μικρή τιμή παρέχεται η δυνατότητα κάθετης επιτάχυνσης του αεροχήματος.

- **Ταχύτητα Απώλειας Στήριξης (Stall Speed)**

Τα αεροσκάφη σταθερού εκπετάσματος, πρέπει να διατηρούν μία ελάχιστη ταχύτητα, ώστε να παραμένουν στον αέρα, κατά τη διάρκεια της πτήσης. Η ταχύτητα αυτή χαρακτηρίζεται ως ταχύτητα απώλειας στήριξης, και εξαρτάται άμεσα από τον πτερυγικό φόρτο.

- **Αεροδυναμικοί Συντελεστές**

Για τη λεπτομερέστερη μελέτη της συμπεριφοράς του αεροσκάφους κατά την πτήση, κρίνεται απαραίτητος ο προσδιορισμός των κάτωθι συντελεστών.

C_L : Συντελεστής Άντωσης

C_D : Συντελεστής Αντίστασης

C_{D0} : Συντελεστής Οπισθέλκουσας μηδενικής άντωσης

Οι συντελεστές αυτοί εξαρτώνται από πλήθος παραγόντων, όπως το σχήμα της αεροτομής, την έκταση του εκπετάσματος ή την ύπαρξη βοηθητικών διατάξεων (πχ πτερυγίων). Οι ακριβείς τιμές τους παρέχονται από τον κατασκευαστή του αεροσκάφους, για συγκεκριμένες φάσεις της πτήσης, ή υπολογίζονται θεωρητικά με τη βοήθεια άλλων γνωστών μεγεθών.

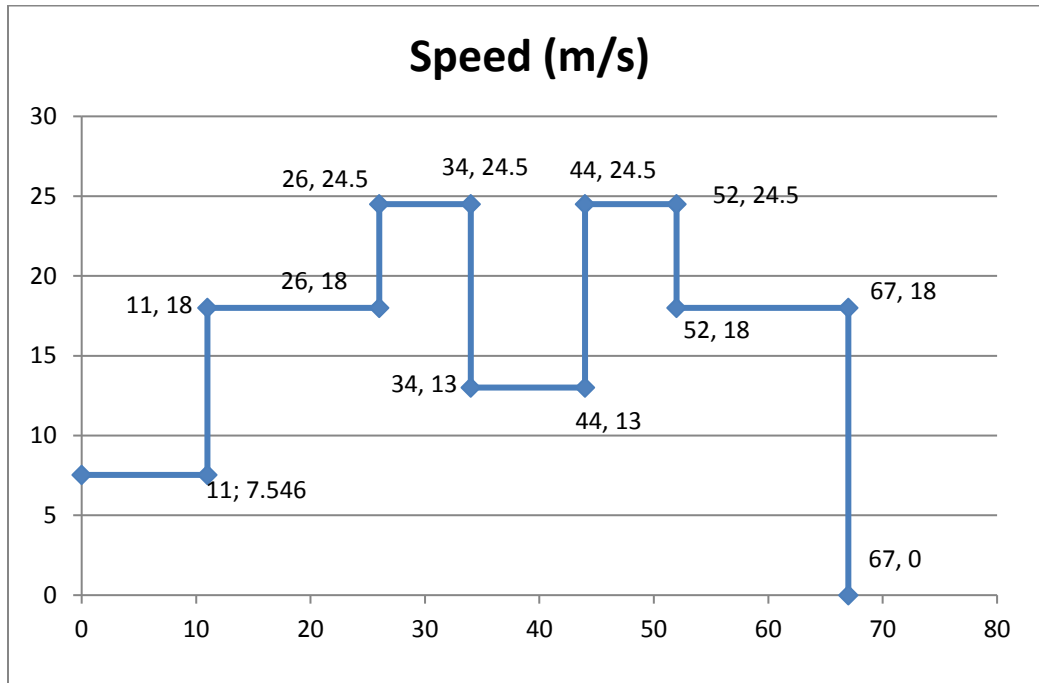
6.3 Ενεργειακές Απαιτήσεις Πτήσεως

6.3.1 Γενικά Χαρακτηριστικά Αποστολής

Η αποστολή που επιλέχθηκε να εκτελέσει το μη επανδρωμένο αεροσκάφος εκπίπτει στην κατηγορία αποστολών παρακολούθησης και συλλογής δεδομένων. Προς σχεδιασμό του συστήματος τροφοδοσίας θεωρήθηκε απαραίτητη η δυνατότητα κάλυψης μεγάλων αποστάσεων καθώς και ανάπτυξης υψηλής ταχύτητας πτήσης. Στην παράγραφο αυτή θα αναφερθούμε στα γενικά χαρακτηριστικά της αποστολής, ενώ μία πιο λεπτομερής και αναλυτική περιγραφή ακολουθεί στη συνέχεια. Αρχικά, το αεροσκάφος τοποθετείται σε έναν ειδικά δαμορφωμένο διάδρομο, προς ανάπτυξη της ταχύτητας απογείωσης ($V_{takeoff} = 7.546$ m/s, ο αναλυτικό υπολογισμός δίνεται στη συνέχεια) και ακολουθεί η αναρρίχηση αυτού έως το επιθυμητό υψόμετρο πτήσης. Στη συνέχεια, κατά τη φάση πλεύσης, το uan κινείται προς τον επιθυμητό προορισμό. Η αναπτυσσόμενη ταχύτητα κατά το διάστημα αυτό δεν παραμένει σταθερή, αλλά μεταβάλλεται μεταξύ των τιμών πλεύσης και μέγιστης αναπτυσσόμενης ταχύτητας, προς μείωση του συνολικού χρόνου πτήσεως. Καθώς το αεροσκάφος προσεγγίζει το σημείο ενδιαφέροντος το υψόμετρο πτήσης του μειώνεται, για αποδοτικότερη εκτέλεση της αποστολής. Κατά τη διάρκεια της παρακολούθησης/συλλογής δεδομένων, το μη επανδρωμένο αεροσκάφος μεταβαίνει σε «λειτουργία αντοχής» (endurance mode), για περιορισμό της καταναλισκόμενης ενέργειας. Με την εκτέλεση της αποστολής, αναρριχάται ξανά στο επιθυμητό υψόμετρο και μεταβαίνει εκ νέου σε κατάσταση πλεύσης, για την ασφαλή επιστροφή του στη βάση. Από ενεργειακής σκοπιάς, η εκ νέου αναρρίχηση καθώς και η προσγείωση του αεροσκάφους δεν είναι απαραίτητο να μελετηθούν ξεχωριστά, αλλά μπορούν να ενσωματωθούν στη φάση επιστροφής[56].

Το σημείο παρακολούθησης θεωρήθηκε πως απέχει απόσταση 30 χιλιομέτρων από τη βάση του uan, ενώ η συνολική διάρκεια πτήσης υπολογίστηκε στα 67 λεπτά. Ο υπολογισμός αυτός βασίστηκε στην αναπτυσσόμενη ταχύτητα του αεροσκάφους, η οποία μπορεί να αυξομειωθεί αναλόγως τις απαιτήσεις της εκάστοτε αποστολής. Φυσικά δεν πρέπει ποτέ η ταχύτητα πτήσης να λάβει τιμές κοντά στην ταχύτητα απώλειας στήριξης (stall speed), αφού κάτι τέτοιο θα έχει ως άμεση συνέπεια την απώλεια ελέγχου του αεροσκάφους. Η τιμή του μεγέθους αυτού δίνεται ως 11 m/s και το αεροσκάφος πρέπει να κινείται υπό υψηλότερη ταχύτητα, για όσο διάστημα βρίσκεται στον αέρα. Ο ρυθμός αναρρίχησης τοποθετήθηκε στα 1.8m/s, με αποτέλεσμα η φάση της αναρρίχησης να διαρκεί περί τα εννέα λεπτά, αφού το επιθυμητό ύψος πτήσεως ορίστηκε στα 1000 μέτρα. Ακολουθεί η πρώτη φάση πλεύσεως (cruising phase), προς το στόχο, με την ταχύτητα πτήσης να λαμβάνει τις τιμές 18m/s και 24.5m/s για τα χρονικά διαστήματα των 15 και 8 λεπτών αντίστοιχα. Με την ολοκλήρωση αυτής, ακολουθεί η μείωση του υψομέτρου πτήσης στα 300m, προς εκτέλεση της αποστολής. Η συλλογή δεδομένων διαρκεί 10 λεπτά, και κατά τη διάρκεια αυτή το αεροσκάφος πετάει κυκλικά γύρω

από το στόχο. Τέλος πραγματοποιείται η επιστροφή του uav στη βάση, μέσω μίας δεύτερης φάσης πλεύσης, ίδιων χαρακτηριστικών με την πρώτη.



Διάγραμμα 6.1: Ταχύτητα προς Χρόνο πτήσης

6.3.2 Προσδιορισμός Ενεργειακών Απαιτήσεων

Για τον προσδιορισμό των ενεργειακών απαιτήσεων πτήσης του uav απαιτείται μία αρχική εκτίμηση του βάρους του. Τροποποιώντας το σύστημα τροφοδοσίας του μη επανδρωμένου αεροσκάφους που επιλέχθηκε, το βάρος μεταβάλλεται ελαφρώς, από τα 15.65 στα 17kg (πίνακας 5.1). Η μεταβολή αυτή δεν επηρεάζει ιδιαίτερα κάποια από τα κατασκευαστικά μεγέθη του αεροσκάφους, τα οποία θεωρήθηκε πως διατηρούνται σταθερά. Έτσι ο μέγιστος συντελεστής άντωσης δίνεται ως $C_{L,max}=1.25$ ενώ ο συντελεστής μηδενικής άντωσης $C_{D,0}=0.036$.

Τέλος ο μέγιστος λόγος Άντωσης προς Οπισθέλκουσα λαμβάνει την τιμή $(\frac{L}{D})_{max}= 16.4$ και η ταχύτητα απώλειας στήριξης $V_{stall}= 11m/s$.

Βάρος Uav/Σενάριο 1	
Συνολικό Βάρος (εκτός των πηγών)	8 kg
Κυψέλη Καυσίμου PEM	4.2 kg
Δεξαμενή Υδρογόνου	1.95 kg

Battery (24V 9ah)	2.1 kg
Μετατροπείς	0.5 kg
Σύνολο Μάζας	17kg
Συνολικό βάρος (W ₀)	166.77 Nt
Βάρος UAV/Σενάριο 2	
Συνολικό Βάρος (εκτός των πηγών)	8 kg
Φωτοβολταϊκό Πάνελ (300W)	3.5 kg
Μπαταρία (36V 25ah)	5 kg
Μετατροπείς	0.5 kg
Σύνολο Μάζας	17 kg
Συνολικό βάρος (W ₀)	166.77Nt

Πίνακας 6.1: Συνολικό βάρος UAV για κάθε σενάριο προσομοίωσης. Οι τιμές ανταποκρίνονται σε πραγματικές πηγές που κυκλοφορούν στην αγορά (Παράρτημα 1)

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό των ενεργειακών απαιτήσεων πτήσης[3], ενώ το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο παρέχεται στην [57]. Πρωτού προβούμε στις επί μέρους φάσεις πτήσεως, κρίνεται απαραίτητος ο υπολογισμός του πτερυγικού φόρτου ($\frac{W}{S}$), καθώς και της επιφάνειας εκπετάσματος (S) ως εξής:

- $\frac{W}{S} = \frac{1}{2} * \rho_o * V_{stall}^2 * C_{Lmax} = 92.641 \text{ Nt/m}^2$ (6.1)

- $S = W_o * (W/S)^{-1} = 1.8\text{m}^2$ (6.2)

6.3.2.1 Απογείωση

Κατά τη φάση απογείωσης του αεροσκάφους παρατηρείται κλίση των πτερυγίων από τις 45° στις 25°, με αποτέλεσμα ο μέγιστος συντελεστής άντωσης να λαμβάνει την τιμή[58]:

- $C_{L_takeoff_max} = 0.9 * (C_{Lmax} + 0.9 * (\frac{25}{45})) = 1.575$ (6.3)

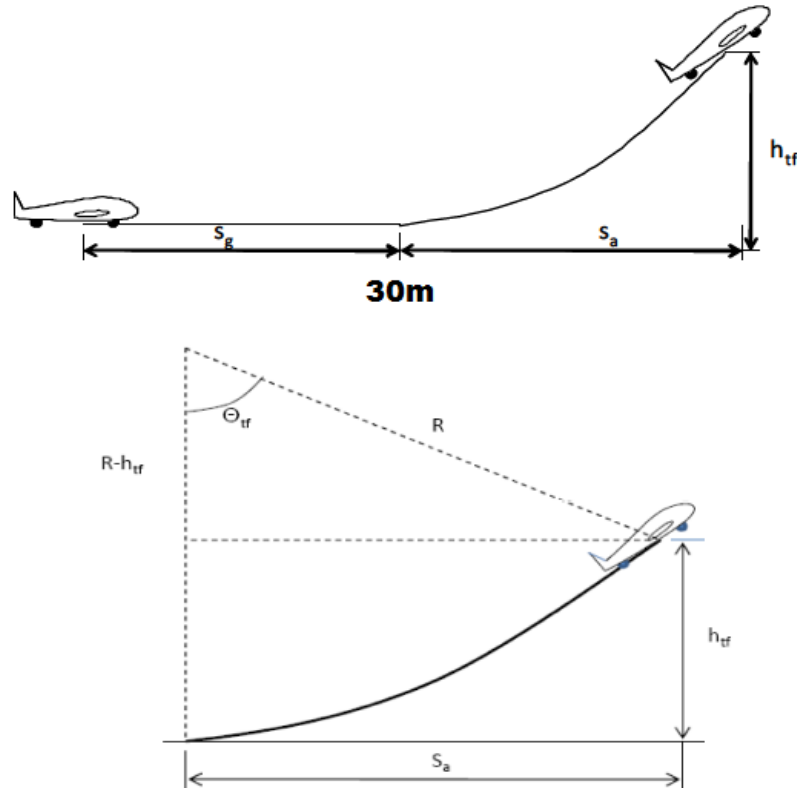
Αντίστοιχα, παρατηρείται μεταβολή της ταχύτητας στήριξης ως εξής:

- $$V_{\text{stall_takeoff}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \frac{W}{S}}{\rho_0 \cdot 1.575}} = 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (6.4)$$

όπου ρ_0 η πυκνότητα του αέρα σε μηδενικό υψόμετρο: $\rho_0 = 1.225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Ως επιθυμητό διάστημα απογείωσης ορίστηκαν τα 30 μέτρα. Το διάστημα αυτό αποτελείται από δύο τμήματα:

- Το τμήμα S_g ορίζεται ως το τμήμα που διανύει το αεροσκάφος κυλιόμενο επί του διαδρόμου απογείωσης, έως ότου καρτορθώσει να αναπτύξει την απαιτούμενη ταχύτητα (V_{takeoff}).
- Το τμήμα S_a αποτελεί την υπόλοιπη έκταση του διαδρόμου, όπου το αεροσκάφος αιωρείται, αλλά δεν έχει μεταβεί ακόμα στη φάση αναρρίχησης.



Εικόνα 6.1: Απογείωση του αεροσκάφους

Αναφερόμενοι στην εικόνα (6.1) η ακτίνα R εξαρτάται από την ταχύτητα απώλεια στήριξης που υπολογίστηκε παραπάνω[57]:

- $$R = \frac{6.96}{g} \cdot V_{\text{stall_takeoff}}^2 = 68.156 \text{ m} \quad (6.5)$$

Στη συνέχεια από τη γεωμετρία του σχήματος προκύπτει:

$$\bullet \quad \Theta_{tf} = \arccos\left(1 - \frac{h_{tf}}{R}\right) = 0.243 \text{ rad} \quad S_a = R \cdot \sin(\Theta_{tf}) = 16.39 \quad S_g = 30 - S_a = 13.61 \text{ m} \quad (6.6)$$

Σε αυτό το σημείο είμαστε έτοιμοι να υπολογίσουμε το λόγο γνωστό ως φόρτιση ισχύος, ο οποίος για αεροπλάνα κινούμενα με χρήση προπέλλας δίνεται ως [57]:

$$\frac{T}{W} = 1.21 * \frac{\frac{W}{S}}{S_g * g * \rho_0 * C_{L_{takeoffmax}}} = 0.435 \quad (6.7)$$

Το τελευταίο μέγεθος που απαιτείται είναι η ταχύτητα απογείωσης:

$$\bullet \quad V_{takeoff} = 0.7 * V_{lift_off} = 0.7 * 1.1 * V_{stall_takeoff} = 10.78 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (6.8)$$

Πλέον είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε την απαιτούμενη ενέργεια κατά την απογείωση:

$$\bullet \quad P_{takeoff} = \frac{T}{W} * W_0 * V_{takeoff} = 547.584 \text{ Watt} . \quad (6.9)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν και το συνολικό βαθμό απόδοσης του συστήματος (0.79):

$$\mathbf{P_{takeoff} = 693.144 \text{ Watt}}$$

6.3.2.2 Αναρρίχηση

Ο ρυθμός αναρρίχησης ορίστηκε πρωτίτερα στα 1.8 m/s. Ορίζοντας τη σταθερά K ως:

$$\bullet \quad K = 1 / \{4 * C_{D,0} * \left(\frac{L}{D}\right)_{max}^2\} = 0.026 \quad (6.10)$$

Η απαιτούμενη ενέργεια κατά τη φάση αναρρίχησης προκύπτει 401.052 Watt από τον τύπο:

$$P_{climb} = W_0 * \left(\text{ClimbRate} + \sqrt{\frac{2 * \frac{W}{S} * \sqrt{K}}{\rho_0 * \sqrt{3 * \sqrt{C_{D0}}}}} * \frac{1.155}{D}} \right) \quad (6.11)$$

Ενώ συνυπολογίζοντας το βαθμό απόδοσης:

$$\mathbf{P_{climb} = 507.661 \text{ Watt}}$$

6.3.2.3 Πλεύση

1. Ταχύτητα πλεύσης $18 \frac{m}{s}$

Το αεροπλάνο κατά την εκκίνηση της φάσης αυτής, βρίσκεται στα 1000m, που είναι το επιθυμητό υψόμετρο πτήσης. Η ώση του ισούται με τη δύναμη της οπισθέλκουσας κατά την επίπεδη πτήση, με αποτέλεσμα το βάρος να λαμβάνει την τιμή του βάρους πλεύσης, το οποίο ορίζεται ως[57]:

$$\bullet \quad W_{mc} = 0.9039W_0 = 150.592 \text{ Nt} \quad (6.12)$$

Στο υψόμετρο αυτό, η πυκνότητα του αέρα μεταβάλλεται σε $\rho_1=1.112 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Οι συντελεστές άντωσης και οπισθέλκουσας υπολογίζονται ως:

$$C_L = 2 * \frac{W_{MC}}{\rho_1 * V_{cruise}^2 * S} = 0.465 \quad C_D = C_{D0} + K * C_L = 0.048 \quad (6.13)$$

Τέλος, για διευκόλυνση στους υπολογισμούς, ορίζουμε την αδιάστατη σταθερά M ως:

$$\bullet \quad M = C_L^{3/2} * C_D^{-1} = 6.602 \quad (6.14)$$

Έχοντας υπολογίσει τα παραπάνω μεγέθη, η απαιτούμενη ισχύς κατά τη φάση πλεύσης, υπό ταχύτητα $18 \frac{m}{s}$ είναι:

$$P_{cruise} = \sqrt{2 * W_{MC}^3 * \frac{1}{\rho_1 * S} * \frac{1}{M}} = 280.104W \quad (6.15)$$

Ενώ συνυπολογίζοντας το βαθμό απόδοσης (0.79), προκύπτει:

$$P_{cruise} = 354.562 \text{ W}$$

2. Μέγιστη Αναπτυσσόμενη Ταχύτητα $V_{max} = 24.5 \frac{m}{s}$

Λόγω μεταβολής του βάρους από την τιμή W_0 σε W_{mc} η φόρτιση ισχύος γίνεται[58]:

$$\frac{T}{W_{mc}} = 2 * \frac{K * W_{MC}}{\rho_1 * V_{max}^2 * S} + 0.5 * \rho_1 * V_{max}^2 * \frac{C_{D0}}{W_{MC}} = 0.15 \quad (6.16)$$

Ενώ η ηλεκτρική ισχύς που απαιτείται προκύπτει:

$$P_{vmax} = \frac{T}{W_{MC}} * W_{MC} * V_{max} = 553.634W \quad (6.17)$$

Και τελικώς:

$$P_{Vmax} = 700.803 \text{ W}$$

6.3.2.4 Εκτέλεση Αποστολής

Η ταχύτητα του αεροσκάφους κατά τη διάρκεια παρακολούθησης της περιοχής ενδιαφέροντος, V_{surv} , διατηρείται στα $13 \frac{m}{s}$ γεγονός που αναμένουμε να επιφέρει σημαντική μείωση στις ενεργειακές απαιτήσεις. Το υψόμετρο πτήσεως μειώνεται επίσης στα 300m με την πυκνότητα του αέρα να παρουσιάζει τιμή: $\rho_2 = 1.1685 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Εντελώς ανάλογα με τη φάση πλεύσης, η τιμή των C_L C_D είναι σε αυτή την περίπτωση:

$$C_L = 2 * \frac{W_{MC}}{\rho_2 * V_{surv}^2 * S} = 0.848 \quad C_D = C_{D0} + K * C_{L1} = 0.058 \quad (6.18)$$

Ως αποτέλεσμα, η αδιάστατη σταθερά Λ_1 λαμβάνει την τιμή:

- $\Lambda_1 = C_L^{3/2} * C_D^{-1} = 16.27$

Και η απαιτούμενη ισχύς του αεροσκάφους προκύπτει:

$$P_{surv} = \sqrt{2 * W_{mc}^3 * \frac{1}{\rho_2 * S} * \frac{1}{\Lambda_1}} = 110.881 \text{ W} \quad (6.19)$$

Ενώ στον κινητήρα πρέπει να παρέχουμε συνολικά:

$$P_{surv} = 140.355 \text{ W}$$

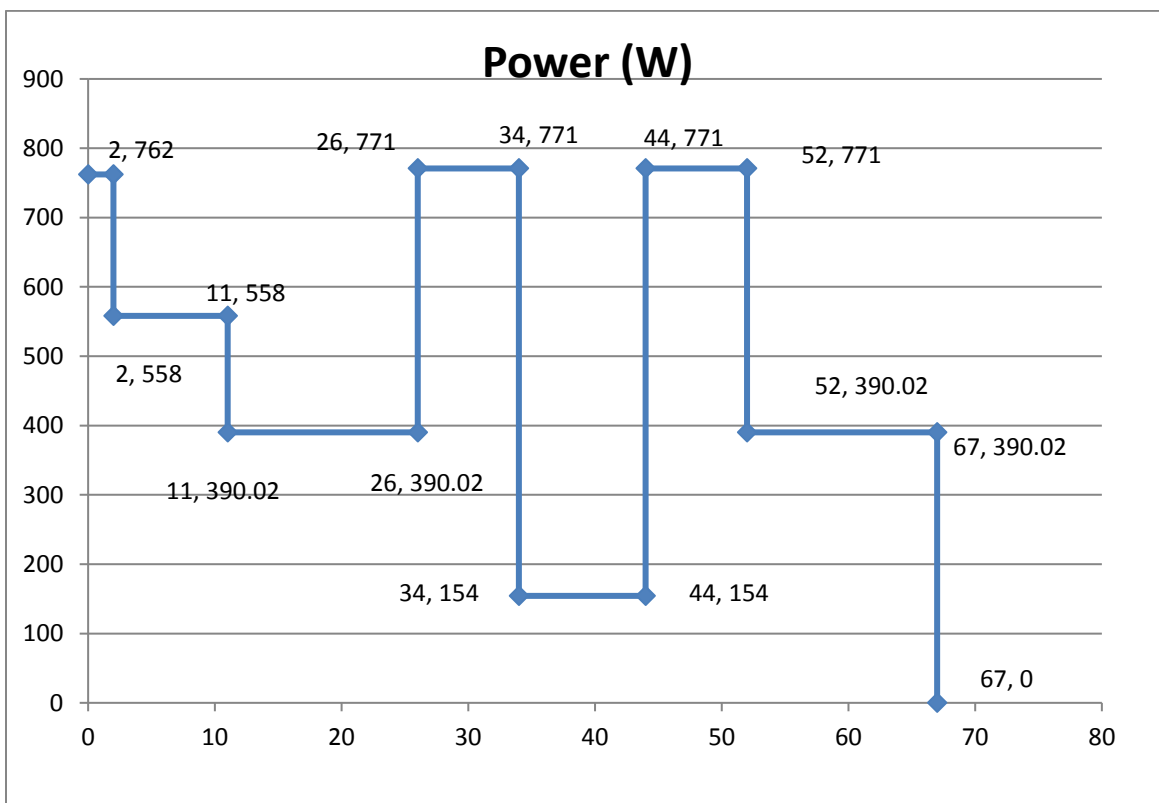
Οι παραπάνω υπολογισμοί εκτελέστηκαν στο πρόγραμμα Mathcad (παράρτημα 2)

6.4 Συνοπτική Παρουσίαση

Ακολουθεί το διάγραμμα (5.2) όπου παρουσιάζονται οι ενεργειακές απαιτήσεις και ο πίνακας (5.2) όπου συνοψίζονται τα κύριότερα χαρακτηριστικά της πτήσεως. Πρέπει να σημειωθεί ότι, προς συμπερίληψη των απωλειών λειτουργίας των μετατροπέων, οι τιμές ισχύος που υπολογίστηκαν παραπάνω πολλαπλασιάζονται επί ένα σταθερό συντελεστή απωλειών (x1.1).

ΦΑΣΗ ΠΤΗΣΗΣ	ΥΨΟΜΕΤΡΟ ΠΤΗΣΗΣ (m)	ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ (m/s)	ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (Watt)	ΧΡΟΝΙΚΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ (min)
Απογείωση	0	7.546	762.46	2
Αναρρίχηση	0~1000	7.546	558.43	9
Πλεύση 1	1000	18	390.02	30
Πλευση 2	1000	24.5	770.88	16
Επιτήρηση	300	13	154.37	10

Πίνακας 6.2: Συνοπτική παρουσίαση προφίλ πτήσεως



Διάγραμμα 6.2: Ενεργειακές απαιτήσεις πτήσης

Κεφάλαιο 7: Μοντελοποίηση σε περιβάλλον Matlab/Simulink

7.1 Σενάρια Προσομοίωσης

Έχοντας παρουσιάσει το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο σχετικά με τις τεχνολογίες των επί μέρους στοιχείων του συστήματος, είμαστε έτοιμοι να αναφερθούμε αναλυτικά στα δύο σενάρια που επιλέχθηκαν προς προσομοίωση.

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το συνολικό βάρος του uav υπολογίστηκε στα 17kg. Το μέγεθος αυτό καθορίστηκε με βάση το 1^ο σενάριο προσομοίωσης ως εξής:

- **Σενάριο 1 / Φωτοβολταϊκά Πάνελ – Ηλεκτρικός Συσσωρευτής**

Με βάση την επιφάνεια των φτερών του αεροσκάφους (1.8 m²) επιλέχθηκε το φωτοβολταϊκό πάνελ με τη μέγιστη δυνατή ισχύ. Με μία σύντομη έρευνα στην αγορά, η τιμή αυτή ήταν ~300 Wp. Στη συνέχεια, έπρεπε να επιλεγεί ένας κατάλληλος ηλεκτρικός συσσωρευτής, ώστε να μπορεί να εξυπηρετήσει εξ ολοκλήρου τις ενεργειακές απαιτήσεις της αποστολής, σε περίπτωση αδυναμίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού. Η προϋπόθεση αυτή θεωρήθηκε απαραίτητη, αφού το αεροσκάφος πρέπει να είναι λειτουργικό καθόλη τη διάρκεια του έτους. Επίσης η στάθμη φόρτισης πρέπει να διατηρείται πάντα σε ποσοστό μεγαλύτερο του 30%, προς εξασφάλιση μέγιστης διάρκειας ζωής της μπαταρίας. Με βάση αυτά, τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας ορίστηκαν στα 36V / 25ah. Και κατ' επέκταση το συνολικό βάρος του uav στα 17 kg.

- **Σενάριο 2 / Κυψέλη Καυσίμου – Ηλεκτρικός Συσσωρευτής**

Κατά το δεύτερο σενάριο, το σύστημα τροφοδοσίας του uav αποτελούν μία κυψέλη καυσίμου(PEMFC), ονομαστικής ισχύος 460W, και ένας ηλεκτρικός συσσωρευτής. Η κυψέλη επιλέχθηκε να λειτουργεί στα 430W και τροφοδοτείται με καθαρό υδρογόνο, το οποίο βρίσκεται αποθηκευμένο εντός μίας δεξαμενής υπό πίεση 300 bar. Ο απαιτούμενος ρυθμός ροής αυτού στην κυψέλη είναι 6.5 litre/min υπό πίεση 0.6 bar. Για τον προσδιορισμό του ποσοστού αξιοποίησης της περιεχόμενης ενέργειας του υδρογόνου ακολουθήθηκε η εξής μεθοδολογία[58]: Θεωρήσαμε πως το υδρογόνο συμπεριφέρεται ως ιδανικό αέριο, υπό πίεση 0.6bar. Έτσι από την καταστατική εξίσωση των αερίων με $R=8.3145 \frac{J}{mol \cdot K}$ και $V=6.5L$ προκύπτει:

$PV = nRT \rightarrow n = 0.1783 \text{ mole/min}$. Με το ατομικό βάρος του υδρογόνου να ισούται με $23.0158 \frac{gr}{mol}$ η κατανάλωση ανά λεπτό προκύπτει $0.3594 \frac{gr}{min}$

Η δεξαμενή που επιλέχθηκε περιέχει 65gr υδρογόνου, ενώ το βάρος της είναι 1.95kg[59]. Στην περίπτωση λειτουργίας της κυψέλης καθόλη τη διάρκεια της πτήσης, ο συνολικό χρόνος

τροφοδοσίας ορίζεται ~200 λεπτά (3 ώρες και 20 λεπτά). Έχοντας προσδιορίσει το βάρος των επι μέρους στοιχείων πέραν του ηλεκτρικού συσσωρευτή, η επιλογή αυτού βασίστηκε στην περιορισμό των 17kg ως συνολικό βάρος του αεροσκάφους. Έτσι τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του προέκυψαν 24V / 9ah (παράρτημα 1).

Κατά την προσομοίωση των δύο σεναρίων, μεταξύ πηγών και κεντρικού ζυγού τροφοδοσίας τοποθετήθηκαν μετατροπείς DC/DC με στόχο την παροχή ισχύος κατάλληλων προδιαγραφών στο φορτίο. Η τάση λειτουργίας του κεντρικού ζυγού ορίστηκε στα 48V DC (περισσότερα σχετικά με την επιλογή αυτή στη συνέχεια).

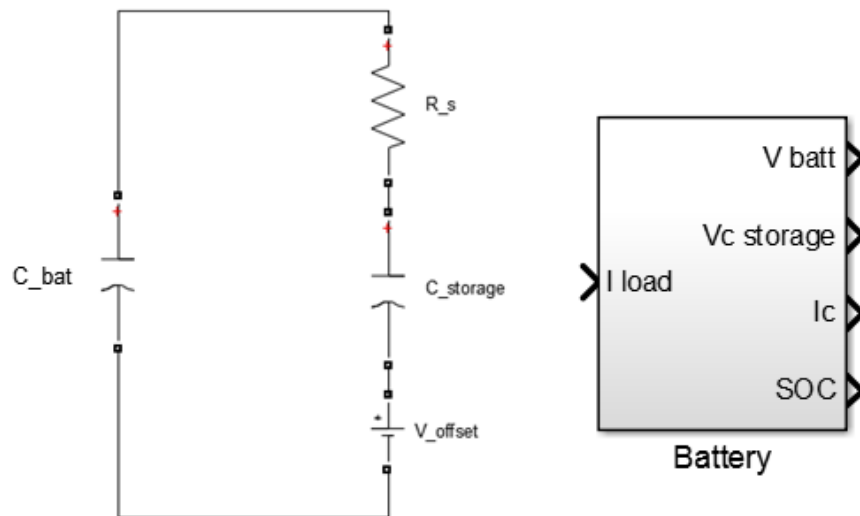
7.2 Παρουσίαση μοντέλων προσομοίωσης

7.2.1 Πηγές παραγωγής

7.2.1.1 Ηλεκτρικοί Συσσωρευτές

Αρχικά αναφέρουμε πως τα ηλεκτροχημικά στοιχεία των ηλεκτρικών συσσωρευτών που επιλέχθηκαν ήταν τεχνολογίας ιόντων λιθίου και πιο συγκεκριμένα $\text{LiFePO}_4/\text{Li}(\text{NiCoMn})\text{O}_2$. Η μέγιστη τάση φόρτισης ενός τέτοιου στοιχείου κυμαίνεται από τα 3.2~4.2Volt, ενώ η εκφόρτιση δεν πρέπει να γίνεται σε τάση μικρότερη των 3V. Η μέγιστη τάση λειτουργίας επιλέχθηκε στα 3.6V/στοιχείο με την αντίσταση σειράς να ισούται με 0.007Ω/στοιχείο.

Το ισοδύναμο κύκλωμα, στο οποίο βασίστηκε η μοντελοποίηση των ηλεκτρικών συσσωρευτών παρουσιάζεται στην εικόνα (7.1)[60]:



Εικόνα 7.1: Ισοδύναμο κύκλωμα ηλεκτρικού συσσωρευτή

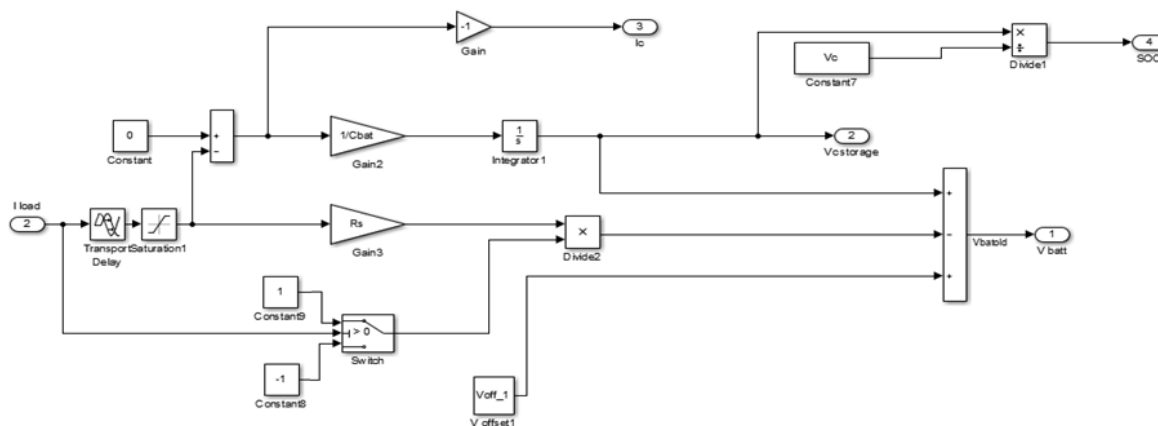
Αριστερά βλέπουμε το ισοδύναμο κύκλωμα, ενώ δεξιά τον ηλεκτρικό συσσωρευτή ως ένα υποσύστημα σε περιβάλλον Matlab/Simulink. Η περιγραφή των μεγεθών του κυκλώματος, καθώς και η αντιστοιχία τους με τα μεγέθη του μπλοκ Battery κρίνεται απαραίτητη:

- **C_bat**: Συμβολίζει το συνολικό φορτίο που περιέχεται στη μπαταρία, όταν αυτή είναι πλήρως φορτισμένη. Η τιμή του προσδιορίζεται από την εξίσωση (7.1):

$$C_{bat} = \frac{Q}{V} = \frac{X(Ah) * \left(\frac{3600sec}{h}\right)}{V_{max} - V_{offset} (V)} \quad (7.1)$$

- **Rs**: Πρόκειται για τη συνολική αντίσταση σειράς της μπαταρίας. Δίνεται από τον κατασκευαστή, συνήθως για ένα κελί-στοιχείο του συσσωρευτή ενώ η συνολική τιμή της υπολογίζεται στη συνέχεια πολλαπλασιάζοντας επί τον αριθμό των στοιχείων.
- **V_offset**: Πρόκειται για την τάση αποκοπής της μπαταρίας. Δεδομένου ότι οι συσσωρευτές τεχνολογίας λιθίου καθίστανται ιδιαίτερα επικίνδυνοι σε περίπτωση εκφόρτίσής τους πέραν της συνιστάμενης τιμής, η τάση της μπαταρίας δεν πρέπει ποτέ να εκπίπτει κάτω από την τιμή V_{offset} .
- **C_storage**: Συμβολίζει το περιεχόμενο φορτίο κατά τη φόρτιση/εκφόρτιση της μπαταρίας.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η εσωτερική υλοποίηση του μπλοκ battery, καθώς και μία σύντομη περιγραφή των μεγεθών που εμφανίζονται:



Εικόνα 7.2: Μοντέλο ηλεκτρικού συσσωρευτή σε περιβάλλον Matlab/Simulink

- **I_load/Ic**: Είναι το ρεύμα φορτίου που ζητείται από τη μπαταρία. Σε περίπτωση θετικής τιμής του η στάθμη φόρτισης της μπαταρίας μειώνεται, ενώ αν η τιμή του είναι αρνητική, η στάθμη φόρτισης αυξάνεται.
- **Vc**: Αποτελεί το εύρος της περιοχής γραμμικής λειτουργίας του συσσωρευτή. Ουσιαστικά με βάση το μέγεθος αυτό, στη συγκεκριμένη μοντελοποίηση, προσδιορίζεται το συνολικό φορτίο εντός του συσσωρευτή. Για παράδειγμα, αν μία μπαταρία παρουσιάζει $V_{max}=25.2V$

και $V_{offset}=21V$, τότε η διαφορά τους αποτελεί το εύρος τάσης της γραμμικής περιοχής λειτουργίας, δηλαδή $V_c = 25.2-21 = 4.2V$ olt.

- **Vc_storage:** Συμβολίζει την τάση/φορτίο που απομένει κατά τη διαδικασία φόρτισης/εκφόρτισης.

Έχοντας ορίσει του συμβολισμούς του μοντέλου, περνάμε στην περιγραφή της λειτουργίας του. Σύμφωνα με την εικόνα (7.1.A) και λαμβάνοντας υπ όψιν πως $I_c = C \frac{dU_c}{dt}$, και $I_c = I_{load}$ η τάση της μπαταρίας κατά τη διαδικασία φόρτισης/εκφόρτισης ισούται με:

$$\bullet \quad V_{batt} = V_{offset} - \frac{1}{C_{bat}} \int_0^t I_c dt - |I_{load}| * R_s \quad (7.2.a)$$

Ενώ στο πεδίο της συχνότητας:

$$\bullet \quad V_{batt} = V_{offset} - I_{load} \frac{1}{s * C_{bat}} + V_c - |I_{load}| * R_s \quad (7.2.b)$$

Έτσι αν το I_{load} είναι θετικό έχουμε μείωση του περιεχόμενου φορτίου της μπαταρίας ενώ, στην αντίθετη περίπτωση, το φορτίο αυξάνεται. Τέλος ορίζουμε ακόμη ένα μέγεθος που εμφανίζεται στον μοντέλο:

SOC: Πρόκειται για τη στάθμη φόρτισης της μπαταρίας, όχι ως προς το συνολικά περιεχόμενο φορτίο της, αλλά ως προς τη μέγιστη τιμή της τάσης κατά τη γραμμική λειτουργία της. Έτσι η τιμή του μεγέθους αυτού μπορεί να κυμένεται από 100% έως 0%, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι η τάση της μπαταρίας είναι μηδενική, αλλά ότι αυτή έχει εκφορτιστεί έως το κατώτατο επιτρεπόμενο όριο.

Πρέπει να σημειωθεί πως τη μοναδική είσοδο του μοντέλου αποτελεί το ρεύμα φορτίου I_{load} , το οποίο εισέρχεται στο μπλοκ `transport_delay`, που φροντίζει για την καθυστέρηση μετάβασης της τιμής του ρεύματος κατά 0.001 sec προς ομαλή λειτουργία του συνολικού συστήματος. Στη συνέχεια παρουσιάζονται σε μορφή πινάκων οι αρχικές τιμές των μεγεθών που προαναφέρθηκαν, καθώς και τα χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών συσσωρευτών που επιλέχθηκαν για τα δύο σενάρια προσομοίωσης. Παρέχεται επίσης το M-file όπου ορίζονται οι απαραίτητες αρχικές τιμές, προς ομαλή λειτουργία του μοντέλου:

ΣΕΝΑΡΙΟ	Τεχνολογία ΗΛ/ων Στοιχείων	Αριθμός ΗΛ/ων Στοιχείων	Αντίσταση Σειράς (Ω)	Χωρητικότητα (Ah)
1 (PV/BATTERY)	LiFePo ₄ Li(NiCoMn)O ₂	10	0.07	25
2 (FC/BATTERY)	LiFePo ₄ Li(NiCoMn)O ₂	7	0.049	9

Πίνακας 7.1: Στοιχεία ηλεκτρικών συσσωρευτών (Α)

ΣΕΝΑΡΙΟ	Μεγιστη Τάση Στοιχείου V_{max} (V)	Τάση Πλήρους Εκφόρτισης Μπαταρίας V_{offset} (V)	Εύρος Τάσης Γραμμικής Λειτουργίας V_c (V)	Χωρητικότητα (F)
1 (PV/BATTERY)	3.6	30	6	15000
2 (FC/BATTERY)	3.6	21	4.2	~7714

Πίνακας 7.2: Στοιχεία ηλεκτρικών συσσωρευτών (Β)

```

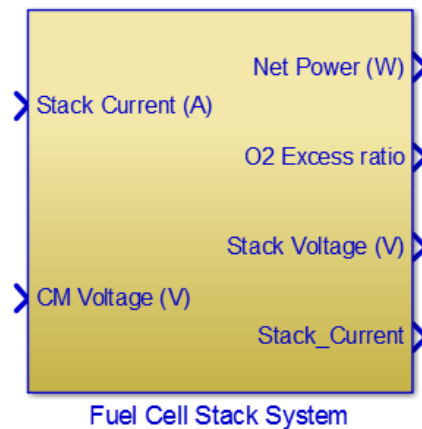
Editor - Untitled*
Untitled* x +
1      % Αρχικοποίηση μεταβλητών Battery fc
2      Cbat=7714; % F
3      Vc=4.2; %Vc=Vbat-Voffset V
4      Rs=0.049; %Ohm
5      Voff=21;
6
7      % Αρχικοποίηση μεταβλητών Battery PV
8      Cbat_1=15000; % F
9      Vc_1=6; %Vc=Vbat-Voffset V
10     Rs_1=0.07; %Ohm
11     Voff_1=30;
12
13

```

Εικόνα 7.3: Προσδιορισμός τιμών μοντέλου ηλεκτρικού συσσωρευτή

7.2.1.2 Συστοιχία Κυψελών Καυσίμου

Στην περίπτωση της κυψέλης καυσίμου, το μοντέλο που επιλέχθηκε έχει δοκιμαστεί πειραματικά, και παρέχεται στη διεύθυνση deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/90423 από το University of Michigan. Το μοντέλο αυτο είναι ιδιαίτερα λεπτομερές και πολύπλοκο στην υλοποίηση του, με το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο να παρέχεται στην [61]. Για μία αναλυτική περιγραφή της λειτουργίας του, κρίνεται απαραίτητη η μελέτη της παρεχόμενης βιβλιογραφίας και πιθανώς η επικοινωνία με τους σχεδιαστές.

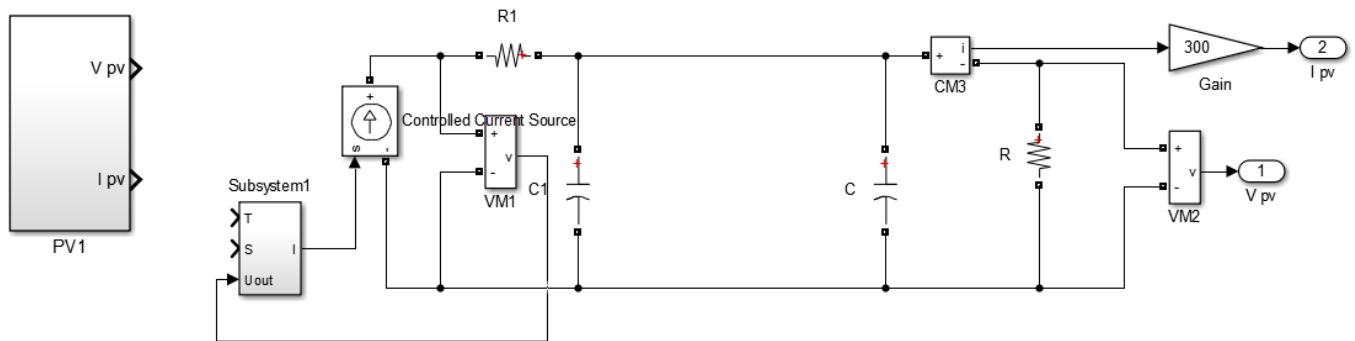


Εικόνα 7.4: Συστοιχία κυψελών καυσίμου σε περιβάλλον Matlab/Simulink

Αναφερόμενοι στην εικόνα (7.4), σημειώνεται πως αποκλειστική είσοδο του μοντέλου αποτελεί το ρεύμα της συστοιχίας (Stack Current/SC). Στη είσοδο CM Voltage εισάγεται το ρεύμα αυτό, μέσω της συνάρτησης: $0.67251948014558 * SC + 33.5541156435263$. Τις

εξόδους του μοντέλου αποτελούν η καθαρή ισχύς (Net Power), η τάση και το ρεύμα της συστοιχίας, ενώ δίνεται επίσης ο λόγος περίσσειας του οξυγόνου (Oxygen Excess Ratio/OER). Το μέγεθος αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό καθώς χρησιμοποιείται ως ένδειξη της κατάστασης ροής του αέρα, ενώ απαιτείται η συνεχής παρακολούθησή του προς αποφυγή φαινομένων κορεσμού του οξυγόνου. Μία διευκρίνιση πρέπει να γίνει σχετικά με την καθαρή ισχύ της συστοιχίας: δεν αναφέρεται στην ισχύ εξόδου αλλά αποτελεί ένα τμήμα αυτής που σχετίζεται άμεσα με το OER στην κάθοδο. Σημειώνεται επίσης πως, για τα διαστήματα κατά τα οποία η κυψέλη βρισκόταν σε λειτουργία, η ισχύς που παρείχε στο σύστημα ήταν 430W, με το ρεύμα $SC = 28A$ και την τάση λειτουργίας στα 15.3V.

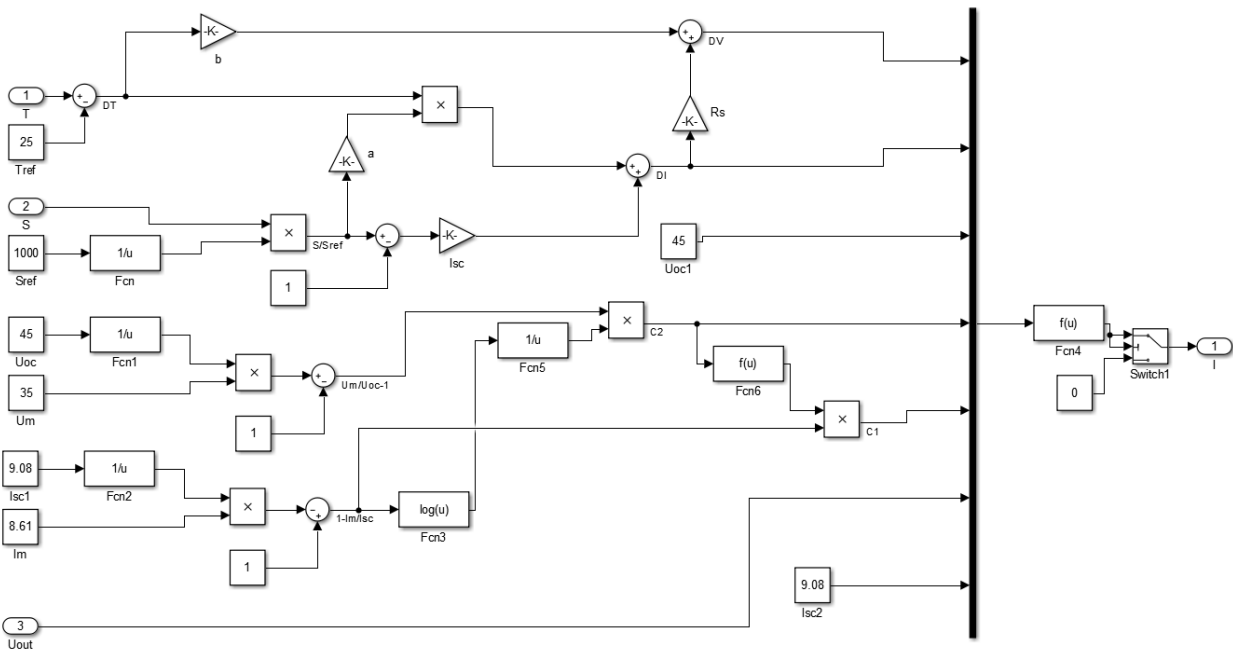
7.2.1.3 Φωτοβολταϊκά Στοιχεία



Εικόνα 7.5: Μπλοκ συστοιχίας φωτοβολταϊκών (αριστερά) / εσωτερικό του μπλοκ (δεξιά)

Με μία πρώτη ματιά στο αριστερό μέρος της εικόνας (7.5) φαίνεται το φωτοβολταϊκό μοντέλο να μη χρειάζεται κάποια είσοδο για τη λειτουργία του, δίνοντας απλά την τάση και το ρεύμα εξόδου. Κάτι τέτοιο βέβαια δεν ισχύει καθώς, όπως παρατηρούμε στο δεξί μέρος της εικόνας, τις εισόδους του φωτοβολταϊκού μοντέλου αποτελούν η τάση εξόδου, η θερμοκρασία λειτουργίας και η παρεχόμενη ακτινοβολία. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί πως τόσο η μοντελοποίηση της συστοιχίας κυψελών καυσίμου, όσο και η μοντελοποίηση των φωτοβολταϊκών πάνελ δεν αποτελούν το κύριο τμήμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Τα μοντέλα ελήφθησαν από τις πηγές στις οποίες γίνεται αναφορά, και η αναλυτική περιγραφή της λειτουργίας τους δεν κρίνεται απαραίτητη. Παρατηρώντας βέβαια την υλοποίηση του φ/β μοντέλου της εικόνας (7.5), βλέπουμε πως πρόκειται ουσιαστικά για μία πηγή ρεύματος, το οποίο παράγεται στο μπλοκ Subsystem1 ενώ στη συνέχεια διέρχεται μέσω της αντίστασης σειράς $R1$ και ενισχυόμενο κατά 300 φορές (Gain), ισούται με το ρεύμα εξόδου της φ/β συστοιχίας. Η τάση στα άκρα της παράλληλης αντίστασης R ισούται με την τάση εξόδου V_{pv} . Η μοντελοποίηση του φωτοβολταϊκού πάνελ ως πηγή ρεύματος ακολουθείται στο μεγαλύτερο μέρος της υπάρχουσας βιβλιογραφίας [62][63][64], ενώ η απόδοση του μοντέλου

που παρατίθεται ελέγχθηκε συγκριτικά με το μοντέλο που παρέχεται από το λογισμικό Matlab/Simulink/Simpowersystems.



Εικόνα 7.6: Εσωτερικό του μπλοκ Subsystem1

Σχετικά με την εικόνα (7.6), θα αναφέρουμε συνοπτικά στους συμβολισμούς που χρησιμοποιούνται, ενώ σκόπιμη κρίνεται επίσης μία αναφορά σχετικά με το αν είναι απαραίτητη ή όχι η μεταβολή της τιμής του κάθε συμβολιζόμενου μεγέθους κατά την επιλογή πάνελ διαφορετικών χαρακτηριστικών (M). Όσον αφορά τα φ/β στοιχεία που επιλέχθησαν (συνολικής ισχύος 300Wp) τα απαραίτητα στοιχεία παράχονται στο τέλος της εργασίας (παράρτημα 1). Στη συνέχεια η εξαγωγή των εξισώσεων που χρησιμοποιούνται φαίνονται στην εικόνα.

- $T-T_{ref}$: Θερμοκρασία λειτουργίας-αναφοράς. Δίνεται σε °C.
- $S-S_{ref}$: Ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια συλλογής. Δίνεται σε W/m^2
- V_{oc} : Τάση ανοιχτοκύκλωσης των φ/β στοιχείων. Δίνεται σε Volt και παρέχεται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του φ/β. (M)
- V_m-I_m : Πρόκειται για την τάση-ρεύμα του σημείου λειτουργίας μέγιστης ισχύος του φωτοβολταϊκού (V_{max}). (M)
- $I_{sc(1,2)}$: Είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης του φωτοβλταϊκού πάνελ. (M)
- R_s : Η αντίσταση σειράς των φ/β στοιχείων
- Σταθερές a-b: Λαμβάνουν τις τιμές $a=0.06$ και $b=-0.361$

Επιστρέφοντας στις εισόδους του φ/β μοντέλου, η επιθυμητή θερμοκρασία λειτουργίας μπορεί να εξασφαλιστεί μέσω επιλογής κατάλληλων μονωτικών υλικών προστασίας του φωτοβολταϊκού πάνελ από τις εξωτερικές ατμοσφαιρικές συνθήκες. Γενικά τα φ/β στοιχεία λειτουργούν αποτελεσματικότερα υπό χαμηλή θερμοκρασία, εφόσον βέβαια η τιμή κυμαίνεται σε λογικά πλαίσια. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία ως θερμοκρασία λειτουργίας επιλέχθηκε η θερμοκρασία αναφοράς κατά τον έλεγχο της επίδοσης των φ/β στοιχείων, που αντιστοιχεί σε 25°C.

Η δεύτερη είσοδος του μοντέλου (ηλιακή ακτινοβολία) εξαρτάται από πλήθος παραγόντων, όπως είναι η εποχή του χρόνου, οι καιρικές συνθήκες, το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής κλπ. Για λόγους απλότητας προβαίνουμε στην παραδοχή ότι κατά την ημέρα της πτήσης δεν υπάρχουν νεφώσεις, γεγονός που μας επιτρέπει να ακολουθήσουμε την απλοποιημένη μεθοδολογία που παρουσιάζεται στην [65] προς υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας κατά την εκτέλεση της πτήσης. Η μεθοδολογία αυτή παρουσιάζεται στη συνέχεια για διευκόλυνση. Ο ορισμός μέρους των μεγεθών που χρησιμοποιούνται έγινε στο κεφάλαιο 2, ενώ τα υπόλοιπα ορίζονται στη συνέχεια.

Αρχικά υπολογίζεται η ακριβής τιμή της ηλιακής σταθεράς στο εξωτερικό της ατμόσφαιρας, με βάση την ημερομηνία διεξαγωγής της ηλιακής πτήσης σύμφωνα με τον τύπο:

$$\bullet \quad G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (7.3)$$

όπου $G_{sc} = 1353 \text{ W/m}^2$ είναι μέση τιμή της σταθεράς που προτείνεται από το συγγραφέα, ενώ n είναι η ημέρα διεξαγωγής της πτήσης, με αναφορά την 1^η Ιανουαρίου (πχ η 1^η Απριλίου αντιστοιχεί σε $n = 31 + 28 + 31 = 91$). Η πτήση επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί κατά την 20^η Μαΐου ($n=140$), πάνω από την Αθήνα. Έτσι, προσδιορίστηκε το γεωγραφικό πλάτος $L = 37.6^\circ$. Στη συνέχεια ορίζονται τα ακόλουθα μεγέθη:

- **Γωνία απόκλισης του ηλίου (d):** Είναι η γωνία μεταξύ του ηλίου και του ισημερινού κατά την ημέρα της πτήσης. Η τιμή της δίνεται από τον τύπο:

$$d = 23.45 * \sin\left(\frac{360(284+n)}{365}\right) \quad (7.4)$$

- **Ώρα διεξαγωγής της πτήσης (t):** Στη μεθοδολογία που ακολουθούμε η ώρα εκκίνησης της πτήσης ορίζεται με αναφορά τις 12μ.μ. Έτσι η ώρα 12.45μ.μ. αντιστοιχεί σε $t = 0.75$, ενώ η 4.30μ.μ. σε $t = 4.5$. Στην παρούσα διπλωματική εργασία ως ώρα εκκίνησης της πτήσης επιλέχθηκε η 12^η μεσημβρινή.
- **Υψόμετρο επιφάνειας συλλογής (h):** Ταυτίζεται με το υψόμετρο πτήσης, αφού τα φωτοβολταϊκά πάνελ τοποθετούνται επί του εκπετάσματος του αεροσκάφους. Προς

μεγιστοποίηση της απόδοσής του συστήματος, τα φ/β στοιχεία τίθενται σε λειτουργία μόνο κατά τις φάσεις πλεύσης (h=1km) και επιτήρησης(h=0.3km), όπου παρατηρείται κάθετη πρόσπτωση των ηλιακών ακτινών.

- **Ωριαία γωνία (ω):** Η γωνιακή μετατόπιση του ηλίου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού, που οφείλεται στην περιστροφή της γης, περί του άξονά της. Μεταβάλλεται κατά 15°/ώρα, ενώ λαμβάνει αρνητικές τιμές το πρωί και θετικές το απόγευμα.
- **Γωνία Ζενίθ (θ_z):** Η γωνία πρόσπτωσης της άμεσης ακτινοβολίας σε μία οριζόντια επιφάνεια. Το συνημίτονο της γωνίας είναι απαραίτητο για τον τελικό υπολογισμό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και ορίζεται ως:

$$\cos(\theta_z) = \cos(L) * \cos(d) * \cos(\omega) + \sin(L) * \sin(d) \quad (7.5)$$

- Στο τελευταίο στάδιο της μεθοδολογίας, απαιτείται ο προσδιορισμός των τιμών των κάτωθι σταθερών ποσοστών:

$$a_0 = 0.4237 - 0.00821 * (6-h)^2 \quad (7.6.α)$$

$$a_1 = 0.5055 + 0.00595 * (6.5-h)^2 \quad (7.6.β)$$

$$k = 0.2711 + 0.01858 * (2.5-h)^2 \quad (7.6.γ)$$

Οι τιμές που προκύπτουν πρέπει να μεταβληθούν κατά ένα ποσοστό που εξαρτάται από το κλίμα της περιοχής, σύμφωνα με τον πίνακα (7.3):

Climate Type	r_0	r_1	r_k
Tropical	0.95	0.98	1.02
Midlatitude summer	0.97	0.99	1.02
Subarctic summer	0.99	0.99	1.01
Midlatitude winter	1.03	1.01	1.00

Πίνακας 7.3: Συντελεστές διόρθωσης

πρέπει να σημειωθεί πως οι σχέσεις (7.6) ισχύουν αποκλειστικά για υψόμετρο μικρότερο των 2.5km.

- **Ατμοσφαιρική Διαπερατότητα (t_b):** Λαμβάνοντας υπ' όψιν την απουσία νεφώσεων, τη γωνία Ζενίθ και το υψόμετρο της επιφάνειας συλλογής, η ατμοσφαιρική διαπερατότητα για την άμεση ακτινοβολία ορίζεται ως:

$$t_b = r_0 \cdot a_0 + r_1 \cdot a_1 \cdot \exp\left(\frac{-k \cdot r_k}{\cos \theta_z}\right) \quad (7.7)$$

όπου $r_0=0.97$ $r_1=0.99$ $r_k=1.02$

Έχοντας ορίσει όλα τα απαραίτητα μεγέθη, η προσπίπτουσα ακτινοβολία ισούται με:

$$G_{cb} = G_{on} \cdot t_b \cdot \cos(\theta_z) \quad (7.8)$$

Τα αποτελέσματα των παραπάνω εξισώσεων υπολογίστηκαν απευθείας με χρήση του προγράμματος Matlab, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός μικρού κώδικα, που παρατίθεται εδώ:

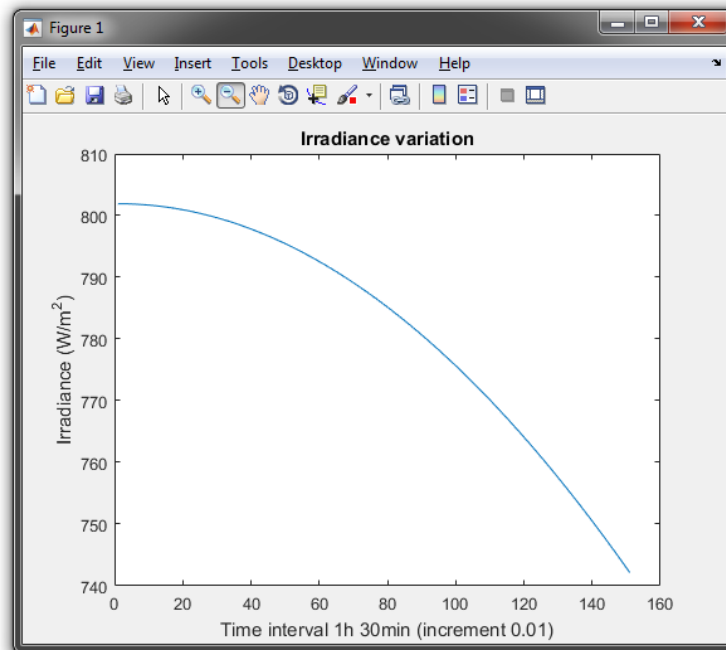
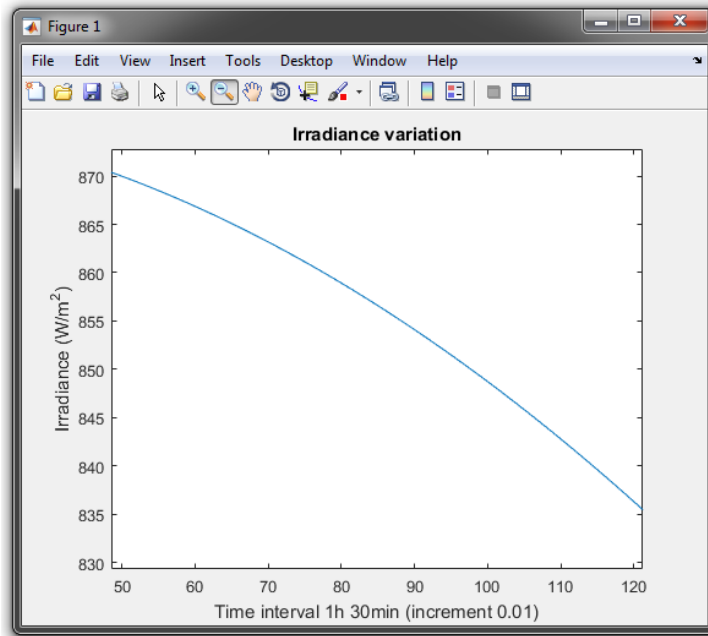
```

Editor - C:\Users\Andreas\Desktop\ΣΕΝΑΡΙΑ\Scenario_2 (PV_BATTER)\Irradiance\Kwdikas.m*
Kwdikas.m* x +
1 %Υπολογισμός ηλιακής ακτινοβολίας 15/4
2 %
3 %Είσοδοι από το Χρήστη
4 L = 37.6; % Γεωγραφικό πλάτος (Αθήνα) σε μοίρες
5 n=31+28+31+30+20; % Ημέρα του έτους (από 1/1=1 έως 31/12=365)
6 Gsc=1353 % Μέση τιμή ηλιακής σταθεράς στο εξωτερικό (W/m^2)
7 t=0 % Ώρα της ημέρας με αναφορά τις 12.00μμ
8 % (πχ για 6:30 το απόγευμα έχουμε t=6.5)
9 h=1 % Ύψος όπου βρίσκεται η επιφάνεια συλλογής (km)
10 %Υπολογισμός μεγεθών
11 Gon=Gsc*(1+0.033*cosd(360*n/365)) % Τιμή ηλιακής σταθεράς στο εξωτερικό (την ημέρα μας)
12 d=23.45*sind(360*(284+n)/365) % Γωνία απόκλισης του ηλίου (ισημερινου-κέντρο ηλίου γης)
13 a_0=0.4237-0.00821*((6-h)^2) % σταθερά δίνεται ως έχει (+διόρθωση)
14 a_1=0.5055+0.00595*((6.5-1)^2) % >>
15 k=0.2711+0.01858*((2.5-1)^2) % >>
16 i=1 % μετρητής για το LOOP
17 for t=0:0.01:1.5
18 Z(i)=t; %Size(Z)=Size(Gcb) για χρήση polyfit
19 w=15*t; % Hour angle (15 μοίρες*απόκλιση από 12 μμ)
20 cos_uz=cosp(L)*cosp(d)*cosp(w)+sind(L)*sind(d) % συνημίτονο θz (zenith angle, ^zenith-κέντρο ηλίου)
21 t_b=0.97*a_0+0.99*a_1*exp(-k*1.02/cos_uz) % Διαπερατότητα
22 Gcb(i)=Gon*t_b*cos_uz; % Ακτινοβολία στο ύψος 1000m
23 i=i+1
24 end
25 plot(Gcb)
26 xlabel('Time interval 1h 30min (increment 0.01)')
27 ylabel('Irradiance (W/m^2)')
28 title('Irradiance variation')
29 p=polyfit(Z,Gcb,6)
30

```

Εικόνα 7.7: Κώδικας σε Matlab για υπολογισμό ηλιακής ακτινοβολίας

Με την εκτέλεση του κώδικα δύο φορές, για τα διαφορετικά υψόμετρα $h=1\text{km}$ και $h=0.3\text{km}$ λάβαμε τις κάτωθι γραφικές παραστάσεις:



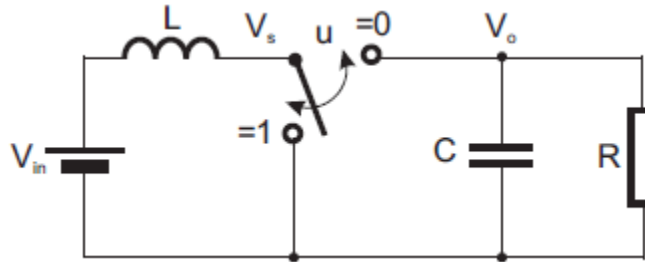
Εικόνα 7.8: Μεταβολή ηλιακής ακτινοβολίας κατά την πτήση για υψόμετρα 1km (επάνω) και 0.3km (κάτω)

Παρατηρώντας τα γραφήματα, βλέπουμε πως η μορφή της εξίσωσης της ηλιακής ακτινοβολίας διαφέρει για τα δύο υψόμετρα, ενώ επιλέχθηκε μία μέση τιμή για την κάθε περίπτωση:

- Πτήση σε **1000m** υψόμετρο → **$S = 850 \text{ W/m}^2$**
- Πτήση σε **300m** υψόμετρο → **$S = 775 \text{ W/m}^2$**

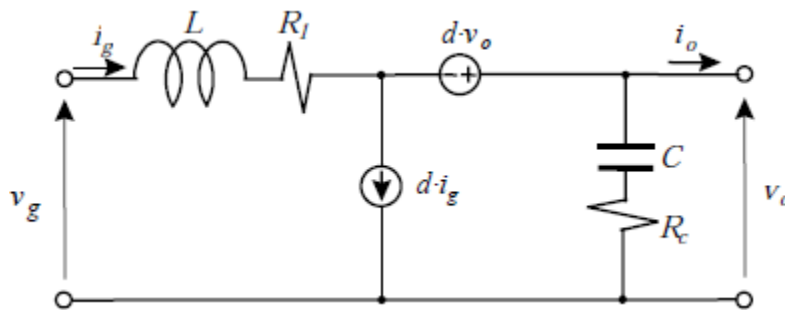
7.2.2 Μετατροπείς DC-DC

7.2.2.1 Μετατροπέας ανύψωσης τάσης συνεχούς-συνεχούς (Boost DC-DC)



Εικόνα 7.9: Κυκλωματικό ισοδύναμο μετατροπέα ανύψωσης

Η περιγραφή των μεγεθών που παρατηρούνται στην εικόνα (7.9), καθώς και της συνολικής λειτουργίας του μετατροπέα τοποθετείται στο Κεφάλαιο 6. Εξετάζοντας προσεκτικά το κυκλωματικό ισοδύναμο και συγκρίνοντάς το με αυτό της εικόνας (5.4) παρατηρούμε την παρουσία ενός διακόπτη (u), αντί του S και της διόδου D . Η αλλαγή αυτή πραγματοποιήθηκε ώστε να είναι ευκολότερη η μοντελοποίηση του μετατροπέα, ενώ η συνολική λειτουργία του κυκλώματος παραμένει ίδια. Σημειώνεται πως στον πυκνωτή C και το πηνίο L περιέχονται οι εσωτερικές αντιστάσεις R_L και R_C , που δε φαίνονται στο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα. Προς υλοποίηση του κυκλώματος αυτού σε περιβάλλον Matlab/Simulink, κρίνεται απαραίτητη η μοντελοποίηση της λειτουργίας του διακόπτη, που έγινε σύμφωνα με στο κύκλωμα της εικόνας (7.10)[66].



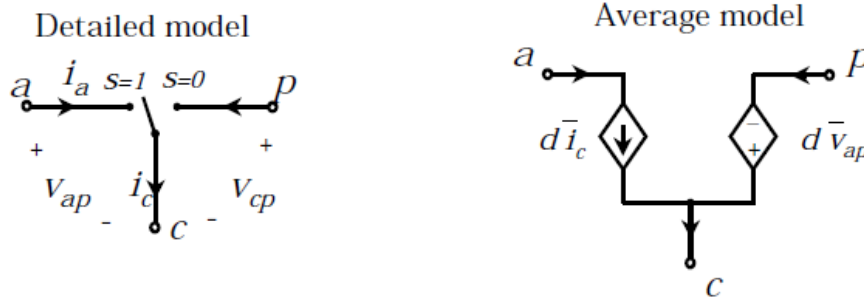
Εικόνα 7.10: Μετατροπέας ανύψωσης τάσης DC/DC από μία άλλη σκοπιά

Όπως φαίνεται στο σχήμα, η μοντελοποίηση του PWM διακόπτη βασίζεται σε μία πηγή ρεύματος και μία πηγή τάσης, με την πολικότητα και το μέτρο αυτών να αιτιολογούνται σύμφωνα με την εικόνα (7.11). Κατά τη λεπτομερή λειτουργία του διακόπτη, ισχύουν οι σχέσεις (7.9.α), ενώ λαμβάνοντας τη μέση τιμή μίας περιόδου λειτουργίας (7.9.β), οι σχέσεις αυτές μετασχηματίζονται στις (7.9.γ), στις οποίες και βασίζεται το κύκλωμα της εικόνας (7.10):

$$i_a = s * i_c \quad V_{cp} = s * V_{ap} \quad (7.9.\alpha)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t x(\tau) d\tau \quad d = \bar{s} \quad (7.9.\beta)$$

$$i_a = d * i_c \quad V_{cp} = d * V_{ap} \quad (7.9.\gamma)$$



Εικόνα 7.11: Μοντελοποίηση PWM διακόπτη

Σύμφωνα με τα παραπάνω, εφαρμόζοντας ΝΤΚ στο συνολικό κύκλωμα και ΝΡΚ στον κόμβο όπου συνδέεται ο πυκνωτής με την πηγή τάσης, προκύπτουν οι δύο κάτωθι εξισώσεις:

$$I_o = I_g(1 - d) - I_c \Rightarrow I_o = I_g - d \cdot I_g - C \frac{dV_c}{dt} \Rightarrow I_o = I_g - d \cdot I_g - C \cdot s \cdot V_c \quad (7.10.\alpha)$$

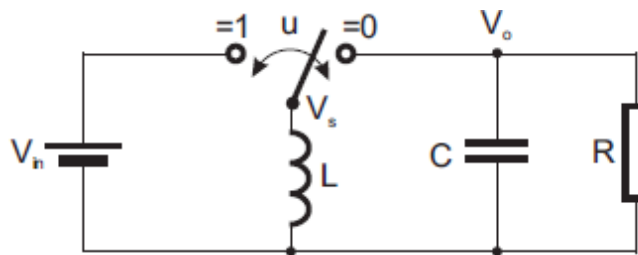
$$-V_L - I_g \cdot R_L - V_o + d \cdot V_o + V_g = 0 \Rightarrow V_o = -L \cdot s \cdot I_g - I_g \cdot R_L + d \cdot V_o + V_g \quad (7.10.\beta)$$

Επίσης, λόγω της παρουσίας της εσωτερικής αντίστασης R_c του πυκνωτή, ισχύει:

$$V_c = V_o - I_c \cdot R_c \quad (7.10.\gamma)$$

Έτσι, εκφράζουμε την τάση και ρεύμα εξόδου του μετατροπέα ως συνάρτηση της τάσης και ρεύματος εισόδου αυτού, καθώς και του duty cycle (D). Συνεπώς με τον έλεγχο της περιόδου αγωγής-μη αγωγής του διακόπτη, δηλαδή του D, μπορούμε να ρυθμίσουμε την τάση και το ρεύμα στην έξοδο του μετατροπέα.

7.2.2.2 Μετατροπέας Υποβιβασμού/Ανύψωσης Τάσης Συνεχούς-Συνεχούς



Εικόνα 7.12: Κυκλωματικό ισοδύναμο μετατροπέα υποβιβασμού/ανύψωσης

Η μοντελοποίηση του μετατροπέα υποβιβασμού-ανύψωσης βασίστηκε ακριβώς στη ίδια λογική με το Boost Converter. Με την εξίσωση (7.10.γ) να παραμένει αναλοιώτη, η συνάρτηση τάσης εξόδου ορίζεται στην [67] ως:

$$-L \frac{dI_g}{dt} - I_g \cdot R_L - V_o + d \cdot V_o + dV_g = 0 \Rightarrow V_o = -L \cdot s \cdot I_g - I_g \cdot R_L + d \cdot V_o + dV_g \quad (7.11.A)$$

Ενώ όσον αφορά το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα:

$$I_o = \frac{I_g}{d} - I_g - C \frac{dV_c}{dt} \Rightarrow I_o = \frac{I_g}{d} - I_g - C \cdot s \cdot V_c \quad (7.11.B)$$

7.2.3 PID Έλεγχος

7.2.3.1 PID Ελεγκτές

Η μέθοδος PID (Proportional Integral Derivative) χρησιμοποιείται ως μηχανισμός ελέγχου στους ηλεκτρικούς μετατροπείς ισχύος και μπορεί να είναι εξαιρετικά αποτελεσματική και ακριβής, υπό την προϋπόθεση της κατάλληλης ρύθμισης των βασικών συντελεστών, που χρησιμοποιούνται προς επίτευξη της τελικής επιθυμητής κατάστασης. Οι συντελεστές αυτοί (K_p , K_i , K_d) δεν είναι απαραίτητο να παρίστανται σε όλες τις εφαρμογές. Έτσι μπορεί να έχουμε χρήση ενός PI ελεγκτή, ή ακόμη και ενός P ελεγκτή. Περί το 95% του συνόλου των συστημάτων κλειστού βρόχου που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές διεργασίες βασίζονται σε PID έλεγχο[68].

- **P ελεγκτής**

Ο P ή αλλιώς αναλογικός ελεγκτής βοηθάει στη βελτίωση της συμπεριφοράς του συστήματος στη μεταβατική αλλά και τη μόνιμη κατάσταση. Το όνομά του οφείλεται στη λειτουργία που επιτελεί, η οποία δεν είναι άλλη από τη μεταβολή της τιμής της μεταβλητής ελέγχου αναλογικά με το σφάλμα που παρατηρείται. Ως σφάλμα ορίζεται η διαφορά μεταξύ της επιθυμητής κατάστασης του συστήματος και της παρούσας κατάστασης (πχ σε ένα όχημα κινούμενο με 60χλμ/ώρα και επιθυμητή ταχύτητα 80χλμ/ώρα η τιμή του σφάλματος ισούται με 20χλμ/ώρα). Με τη χρήση ενός συντελεστή K_p , ελέγχεται η βαρύτητα που επιθυμούμε να δώσουμε στο υπάρχον σφάλμα. Η επιλογή της κατάλληλης τιμής του συντελεστή ρυθμίζει στην ουσία την αποτελεσματικότητα του P-ελεγκτή, αφού για μεγάλες τιμές αυτού, η τιμή της μεταβλητής ελέγχου ταλαντώνεται συνεχώς γύρω από την τιμή επιθυμητής κατάστασης, ενώ για πολύ μικρές τιμές αυξάνεται η ακρίβεια της επιθυμητής τιμής, αλλά και ο χρόνος προσέγγισης αυτής από τον ελεγκτή. Εκτός από ελάχιστες συμπτωματικές εξαιρέσεις, η παρουσία ενός P-ελεγκτή δεν επαρκεί ώστε να μηδενιστεί το σφάλμα μόνιμης κατάστασης. Ορίζοντας ως `current_state` την παρούσα κατάσταση του συστήματος, ως `next_state` την

κατάσταση κατά τον επόμενο παλμό του ρολογιού και ως *desired_state* την επιθυμητή κατάσταση έχουμε:

$$\text{Error} = \text{desired_state} - \text{current_state} \qquad \text{next_state} = K_p * \text{error} \qquad (7.12)$$

- **PI ελεγκτής**

Ο I ή αλλιώς ολοκληρωτικός ελεγκτής συμπληρώνει τη λειτουργία του P-ελεγκτή, μέσω παρακολούθησης των σφαλμάτων που έχουν εμφανισθεί κατά τη λειτουργία του συστήματος υπό σταθερό K_p . Όπως προαναφέρθηκε, η αποκλειστική παρουσία ενός P-ελεγκτή δεν αρκεί ώστε να έχουμε εξάλειψη του σφάλματος μόνιμης κατάστασης, αλλά φροντίζει ώστε αυτό να λάβει μία αρκετά μικρή τιμή. Με τη συμπερίληψη του ολοκληρωτικού όρου I, η προσέγγιση της τιμής αυτής από τον ελεγκτή επιβραδύνεται ελαφρώς, αλλά διορθώνεται το όποιο σφάλμα. Ο PI ελεγκτής χρησιμοποιείται συχνότερα σε διατάξεις αυτομάτου ελέγχου, συγκριτικά με τους P, PID και PD ελεγκτές ενώ σύμφωνα με τους προηγούμενους συμβολισμούς, αν θέσουμε ως $t=0$ τη χρονική στιγμή εκκίνησης του συστήματος έχουμε:

$$\text{next_state} = K_p * \text{error}(t) + K_i \int_0^t \text{error}(t) dt \qquad (7.13)$$

Κατά την επιλογή της κατάλληλης τιμής του συντελεστή K_i απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή, καθώς για μεγάλες τιμές αυτού παρατηρείται υψηλό overshoot (δηλαδή ξεπερνάται η επιθυμητή κατάσταση και δημιουργείται απόκλιση του συστήματος προς την αντίθετη κατεύθυνση).

- **PID ελεγκτής**

Τον τελευταίο όρο ενός PID ελεγκτή, αποτελεί ο ρυθμός μεταβολής (παράγωγος) του παρατηρούμενο σφάλματος, σταθμισμένος υπό τον παράγοντα K_d . Ο ρόλος του όρου αυτού έγκειται στην επιβράδυνση του ρυθμού μεταβολής της εξόδου του ελεγκτή, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό όταν αυτή προσεγγίζει την επιθυμητή τιμή. Για παράδειγμα, σε περίπτωση ενός PID ελεγκτή, ακόμα και αν η τιμή του όρου K_i είναι σχετικά υψηλή, καθώς η έξοδος θα πλησιάζει την επιθυμητή τιμή, η παρουσία του όρου D φροντίζει ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα overshooting. Συμπληρώνοντας τα προηγούμενα:

$$\text{next_state} = K_p * \text{error} + K_i \int_0^t \text{error} dt + K_d * \frac{d[\text{error}(t)]}{dt} \qquad (7.14)$$

Η ρύθμιση των τιμών των σταθερών όρων (K_p , K_i , K_d) αποτελεί μία πολύπλοκη και χρονοβόρα διαδικασία, την οποία αναλαμβάνουν συνήθως προγραμματιζόμενοι ηλεκτρονικοί υπολογιστές. Στην περίπτωση χειροκίνητης ρύθμισης οι τιμές των όρων αρχικά μηδενίζονται, ενώ στη συνέχεια αυξάνονται κατά βούληση. Με την άυξηση της τιμής των K_i , K_p , K_d επηρεάζονται άμεσα τα μεγέθη που ορίζονται παρακάτω (πίνακας 7.4).

Χρόνος Ανόδου: Η χρονική διάρκεια από την εκκίνηση της λειτουργίας του ελεγκτή έως την σταθεροποίηση της εξόδου του συστήματος στην επιθυμητή τιμή.

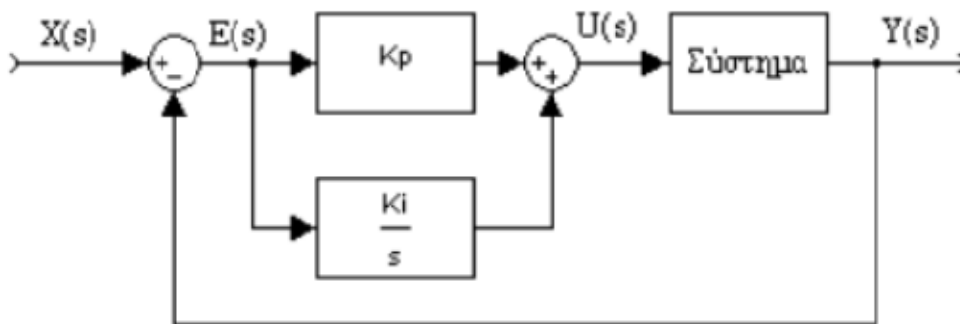
Χρόνος Σταθεροποίησης: Η χρονική διάρκεια σταθεροποίησης του συστήματος σε μία επιθυμητή τιμή, λόγω κάποιας απότομης αλλαγής/διαταραχής.

Όρος	Χρόνος Ανόδου	Overshoot	Χρόνος Σταθεροποίησης	Σφάλμα Μόνιμης Κατάστασης	Σταθερότητα του Συστήματος
K_p	Μείωση	Αύξηση	Μικρή μεταβολή	Μείωση	Υποβάθμιση
K_i	Μείωση	Αύξηση	Αύξηση	Αύξηση	Υποβάθμιση
K_d	Αμελητέα Μεταβολή	Μείωση	Μείωση	Μείωση	Βελτίωση

Πίνακας 7.4: Μεταβολή χαρακτηριστικών του συστήματος με την αύξηση των σταθερών όρων

Έχοντας παρουσιάσει μία σύντομη περιγραφή της λειτουργίας των PID ελεγκτών, σημειώνεται πως στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά ελεγκτές PI. Για το λόγο αυτό παρουσιάζεται στη συνέχεια η συνδεσμολογία ενός τέτοιου ελεγκτή, καθώς και η συνάρτηση μεταφοράς στο πεδίο της συχνότητας[69]:

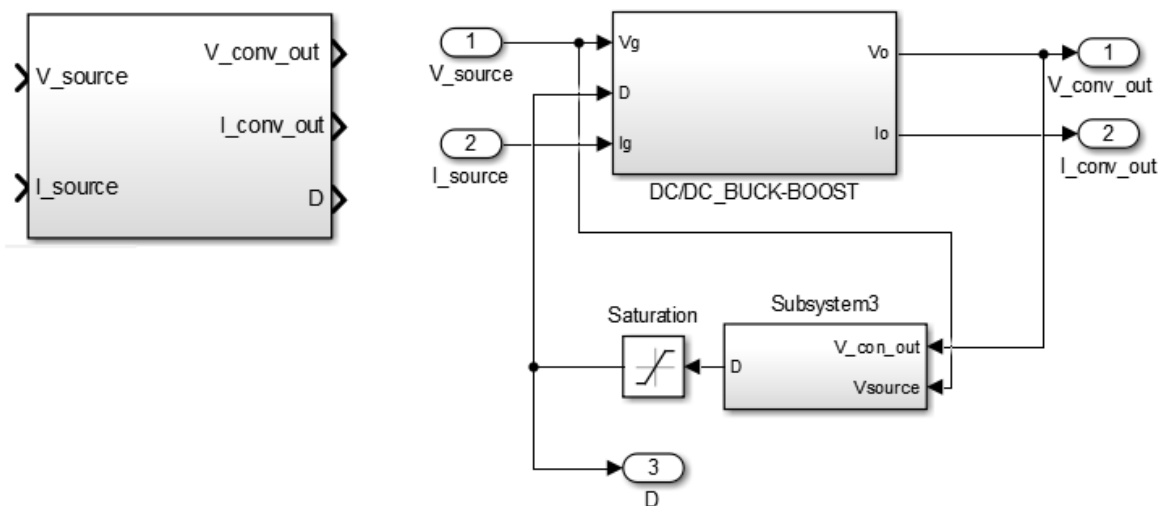
$$PI(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{sK_p + K_i}{s} = \frac{s + \frac{K_i}{K_p}}{s} \quad (7.15)$$



Εικόνα 7.13: Συνδεσμολογία ενός PI ελεγκτή

7.2.3.2 PID έλεγχος και ηλεκτρικοί μετατροπείς

Στην προηγούμενη παράγραφο παρουσιάστηκε η μοντελοποίηση των DC/DC μετατροπέων, που χρησιμοποιήθηκαν, σε περιβάλλον Matlab/Simulink. Τα μοντέλα αυτά δεν περιλάμβαναν κάποιου τύπου έλεγχο της λειτουργίας τους, αλλά μία απλή υλοποίηση των εξισώσεων περιγραφής της συμπεριφοράς του ισοδύναμου κυκλώματος. Φυσικά η απλοποιημένη αυτή μορφή δεν αρκεί ώστε οι μετατροπείς να μπορούν να ανταποκριθούν στις μεταβολές του φορτίου κατά τις διάφορες φάσεις πτήσης. Συνεπώς κρίθηκε απαραίτητη η παρουσία ενός PI ελεγκτή, ο οποίος φροντίζει για την κατάλληλη προσαρμογή του duty cycle(D), ώστε η τάση εξόδου των μετατροπέων να είναι πάντα σε συμφωνία με την ονομαστική τάση του DC ζυγού μεταφοράς. Στο αριστερό μέρος της εικόνας (7.14) βλέπουμε τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 7.2.2 σε μορφή υποσυστημάτων (subsystems) με εισόδους την τάση και το ρεύμα της πηγής και εξόδους την τάση και το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα, καθώς και το duty cycle. Όπως φαίνεται στο δεξί μέρος της εικόνας, το duty cycle και η τάση εξόδου εισάγονται σε ένα νέο υποσύστημα, όπου υπό την παρουσία ενός PI ελεγκτή υπολογίζεται η νέα τιμή του D, η οποία στη συνέχεια περιορίζεται στα κατάλληλα όρια ($0.0001 < D < 0.9999$). Με την εισαγωγή της τιμής αυτής στο κύριο μπλοκ του μετατροπέα υπολογίζεται η νέα, διορθωμένη τιμή της τάσης εξόδου.



Εικόνα 7.14: Μετατροπέας DC/DC BUCK-BOOST / BOOST

Σχετικά με το μπλοκ ελέγχου (subsystem3/εικόνα 7.14) για το μετατροπέα ανύψωσης τάσης και το μετατροπέα ανύψωσης/υποβιβασμού τάσης, ο ρόλος του PI ελεγκτή περιορίζεται στη ρύθμιση της διαφοράς που παρατηρείται μεταξύ της τάσης εξόδου του converter και της τάσης λειτουργίας του ζυγού (48V). Ο προσδιορισμός της κατάλληλης τιμής του D γίνεται σύμφωνα με τις εξισώσεις (7.16). Τέλος, πρέπει να σημειωθεί πως η ρύθμιση των τμών των σταθερών $K_p=0.01$ και $K_i=5$ έγινε χειροκίνητα, με βάση τα όσα αναφέρονται στον πίνακα (7.4).

$$D = \frac{V_o}{V_o + V_{in}} \text{ (Buck-Boost)} \qquad D = 1 - \frac{V_{in}}{V_o} \text{ (Boost)} \qquad (7.16)$$

7.2.4 Κεντρικός ζυγός διανομής (DC BUS)

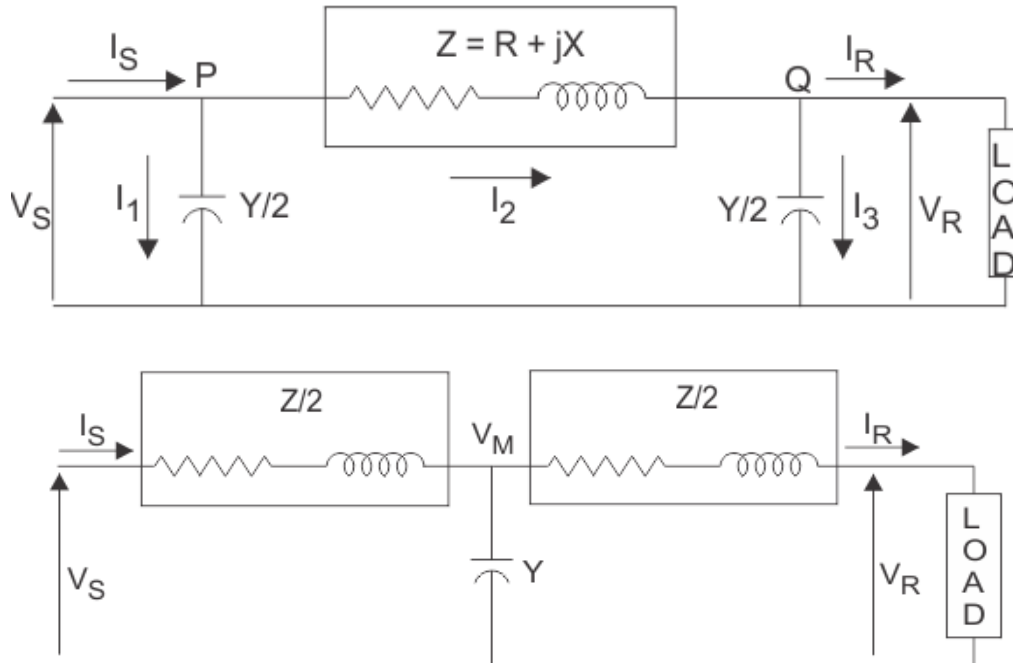
Τα μικροδίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στο εσωτερικό επανδρωμένων (ή μη) αεροσκαφών περιλαμβάνουν συνήθως έναν κεντρικό ζυγό, υπό τάση που μπορεί να κυμαίνεται από 28V έως 280V DC ή άλλες φορές τοποθετείται στα 115V AC[70]. Στα σενάρια που εξετάζονται στην παρούσα διπλωματική εργασία οι πηγές τροφοδοσίας παράγουν αποκλειστικά DC τάση, γεγονός που κρίνει συμφαίρουσα τη μεταφορά και διανομή της παραγόμενης ισχύος υπό αυτή τη μορφή, μέσω ενός DC ζυγού. Έτσι έχουμε ελαχιστοποίηση των απωλειών μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε τάση και ρεύμα κατάλληλων προδιαγραφών (μέτρο, κυμάτωση κλπ), αφού χρησιμοποιούνται αποκλειστικά μετατροπείς DC/DC, εξαιρετικά υψηλής απόδοσης (~90%). Στο κεφάλαιο 5 αναφερθήκαμε στα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η διανομή της ηλεκτρικής ισχύος μέσω ενός ζυγού 48V DC, έναντι ζυγών υψηλότερης ονομαστικής τάσης λειτουργίας. Λαμβάνοντας υπ όψιν το γεγονός πως οι ενεργειακές απαιτήσεις πτήσης (όπως υπολογίστηκαν στο κεφάλαιο 6) δεν ξεπερνούν τα 800W και κατ' επέκταση οι απώλειες μεταφοράς υπό χαμηλή τάση παρμένουν αρκετά περιορισμένες, η τάση λειτουργίας του DC ζυγού διανομής ορίστηκε στα 48V.

Όσον αφορά τη συνολική έκταση του καλωδίου, προσδιορίστηκε με βάση τη μήκος της ατράκτου του αεροσκάφους. Με το εκπέτασμα αυτού να ισούται με 5.7m, η άτρακτος αποτελεί περί το 80% του εκπετάσματος (Chuck Cunningham/Rule of thumb), και το μήκος της προσδιορίζεται στα 4.6m. Ο κεντρικός ζυγός DC πρέπει να εκτείνεται τουλάχιστον δύο φορές όσο το μήκος αυτό (9.2m), ενώ συνυπολογίζοντας τις προεκτάσεις του προς τις πηγές παραγωγής, καθώς και ένα ποσοστό ασφαλείας (~30%), το συνολικό μήκος του ορίστηκε στα 15m. Η διατομή του καλωδίου που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί προσδιορίζεται με βάση τα χαρακτηριστικά της μεταφερόμενης ισχύος. Στην περίπτωση μας η τιμή του μέγιστου μεταφερόμενου ρεύματος ορίζεται στα 16.5 Αμπέρ, υπό 48V DC τάση. Συνεπώς επιλέχθηκε καλώδιο διατομής 8.37mm² (AWG 10), με ικανότητα μεταφοράς ρεύματος μέγιστης τιμής 30A. Η αντίσταση ενός τέτοιου καλωδίου ορίζεται στα 1.6Ω/km, με την αγωγιμότητα και τη χωρητικότητα αυτού να ισούνται με 0.34 mH/km και 0.5μF/km αντίστοιχα. Τα χαρακτηριστικά του καλωδίου συνοψίζονται στον πίνακα (7.5)

ΔΙΑΤΟΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΟ ΡΕΥΜΑ	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ	ΕΠΑΓΩΓΗ	ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ
8.37 mm ²	15 A	24 mΩ	5.1 μH	7.5 nF

Πίνακας 7.5: Χαρακτηριστικά DC bus

Έχοντας προσδιορίσει τα χαρακτηριστικά και την έκταση του καλωδίου, απομένει η επιλογή του ισοδύναμου κυκλώματος αναπαράστασης αυτού. Δύο μοντέλα χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στην υπάρχουσα βιβλιογραφία: το Π-ισοδύναμο και το Τ-ισοδύναμο.



Εικόνα 7.15: Π-ισοδύναμο μοντέλο (επάνω) και Τ-ισοδύναμο μοντέλο (κάτω)

Η επιλογή μεταξύ των δύο μοντέλων αναπαράστασης για μία γραμμή διανομής τόσο μικρού μήκους (15m) δεν έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς η συμπεριφορά τους είναι σχεδόν ταυτόσημη. Σε πολλές περιπτώσεις, μπορεί ακόμα και να παραληφθούν η επαγωγή και η χωρητικότητα της γραμμής. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία επιλέχθηκε η αναπαράσταση του DC ζυγού διανομής με βάση το Τ-ισοδύναμο μοντέλο, ενώ οι εξισώσεις που υλοποιήθηκαν παρουσιάζονται παρακάτω:

$$I_{out} = I_{in} - I_c \quad (7.17.A)$$

$$V_{in} = I_{in} \cdot R + L \frac{dI_{in}}{dt} + V_C \Rightarrow V_C = V_{in} - I_{in} \cdot R - L \cdot s \cdot I_{in} \quad (7.17.B)$$

$$V_o = -I_{out} \cdot R - L \frac{dI_{out}}{dt} + V_C \quad (7.17.Γ)$$

Τις εισόδους του μοντέλου αποτελούν η τάση και το ρεύμα V_{in} , I_{in} ενώ οι τιμές των R, L, C δίνονται μέσω ενός M-file. Σημειώνεται πως τα μοντέλα των DC/DC μετατροπέων καθώς και του DCbus αποτελούν τμήμα της διδακτορικής διατριβής της κ. Εριέττας Ζουντουρίδου, που αναμένεται να δημοσιευτεί εντός των επόμενων μηνών.

7.3.2 Προσδιορισμός επί μέρους παραμέτρων

Η παρουσίαση των μοντέλων που χρησιμοποιηθήκαν ολοκληρώθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, πλην μίας σημαντικής παράλειψης, που δεν είναι άλλη από τον προσδιορισμό των επί μέρους στοιχείων (αγωγιμότητα και χωρητικότητα) των μετατροπέων. Μία αναλυτική παρουσίαση των απαραίτητων υπολογισμών ακολουθεί, ενώ οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στην παράγραφο αυτή βασίζονται στις πηγές [71][3]. Στον πίνακα (7.5) παρουσιάζονται τα επί μέρους στοιχεία ανά σενάριο και τύπο μετατροπέα (boost και buck-boost). Τέλος, στο παράρτημα 2 παρουσιάζονται οι υπολογισμοί εκτελεσμένοι στο πρόγραμμα Mathcad.

7.3.2.1 Σενάριο 2

- **Μετατροπέας Ανύψωσης Τάσης (Συστοιχία Κυψελών Καυσίμου – DC Ζυγός)**

Η ισχύς λειτουργίας της συστοιχίας κυψελών καυσίμου ορίστηκε ~430W με χαρακτηριστικό σημείο λειτουργίας το (15.3V,28A). Σύμφωνα με αυτό, η τιμή του duty cycle του μετατροπέα υπολογίζεται από την εξίσωση (7.18.A) ως:

$$D = 1 - \frac{15.3}{48} = 0.68125 \quad (7.18.A)$$

Επιλέγοντας ως συχνότητα λειτουργίας του διακόπτη τα 25kHz και ως επιθυμητή κυμάτωση του ρεύματος εξόδου ένα ποσοστό 2% της μέγιστης τιμής του

$$\Delta i_L = 0.02 * \frac{P_{max}}{V_{dc_bus}} = 0.1791A \quad (7.18.B)$$

μπορούμε να υπολογίσουμε την επαγωγή L του μετατροπέα, με βάση το χρόνο αγωγής του διακόπτη ($DT = 40\mu s * 0.68125 = 27.25\mu s$)[3]:

$$L = V_{fc} \frac{D*T}{\Delta i_L} = 2.4 mH \quad (7.18.Γ)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν πως ο πυκνωτής φορτίζει κατά την κατάσταση μη αγωγής του διακόπτη ενώ εκφορτίζεται κατά την κατάσταση αγωγής, πρέπει να διαθέτει χωρητικότητα αρκετά μεγάλη ώστε να μπορεί να παρέχει τη μέγιστη απαιτούμενη ενέργεια για το χρόνο αγωγής DT. Επίσης, όπως είναι γνωστό έχουμε: $\delta Q = C * \delta V$, όπου $\delta Q = i * \delta t$ και συνεπώς $C = i * \frac{\delta T}{\delta V}$.

Θεωρώντας επιθυμητή κυμάτωση τάσης στο 2% ($V_{ripple} = 0.02 * 48 = 0.96V$) προκύπτει:

$$C = I * \frac{DT}{V_{ripple}} = 0.2543 mF \quad (7.18.Δ)$$

Σύμφωνα με την [51] η τιμή αυτή αποτελεί το κατώτατο όριο λειτουργίας οπότε πρέπει να επιλεγεί πυκνωτής με χωρητικότητα μεγαλύτερη από την τιμή της εξίσωσης (7.18.Δ).

Το κατώτατο όριο επαγωγής ώστε ο μετατροπέας να παραμένει σε CCM λειτουργία υπολογίζεται ως:

$$L_{ccm} = (1 - D)^2 * D * \frac{V_{dc_bus}}{2 * I * f} = 7.42 \mu H \quad (7.18.E)$$

- **Μετατροπέας Ανύψωσης-Υποβιβασμού (Μπαταρία – DC Ζυγός)**

Η διαστασιολόγηση των παραμέτρων του buck-boost μετατροπέα έγινε με βάση τη λειτουργία του κατά το boost mode αναφορικά με τη φάση πτήσεως μέγιστης ταχύτητας, αφού εκεί παρουσιάζονται οι υψηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις. Κατά τη φάση αυτή η μέση τάση της μπαταρίας βρίσκεται στα 33.3V και το παρεχόμενο ρεύμα στα 10.5A. Έχουμε λοιπόν:

$$D = \frac{48}{48+33.3} = 0.59 \quad (7.19.A)$$

$$\Delta i_L = 0.02 * \frac{P_{max}}{V_{dc_bus}} = 0.15A \quad (7.19.B)$$

$$L = V_{fc} \frac{D * T}{\Delta i_L} = 5.25 mH \quad (7.19.Γ)$$

$$C = I * \frac{DT}{V_{ripple}} = 0.184 mF \quad (7.19.Δ)$$

$$L_{ccm} = (1 - D)^2 * D * \frac{V_{dc_bus}}{2 * I * f} = 12.7 \mu H \quad (7.19.E)$$

7.3.2.2 Σενάριο 1

- **Μετατροπέας Ανύψωσης Τάσης (Φωτοβολταϊκά Στοιχεία – DC Ζυγός)**

Η ισχύς λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων που επιλέχθηκαν, σε υψόμετρο πτήσης 1000 μέτρων, ισούται με ~267.5W με χαρακτηριστικό σημείο λειτουργίας το (41.8V,6.4A). Σύμφωνα με αυτό, η τιμή του duty cycle του μετατροπέα υπολογίζεται από την εξίσωση (7.20.A) ως:

$$D = 1 - \frac{41.8}{48} = 0.129 \quad (7.20.A)$$

Επιλέγοντας ως συχνότητα λειτουργίας του διακόπτη τα 25kHz και ως επιθυμητή κυμάτωση του ρεύματος εξόδου ένα ποσοστό 2% της μέγιστης τιμής του

$$\Delta i_L = 0.02 * \frac{P_{max}}{V_{dc_bus}} = 0.111A \quad (7.20.B)$$

μπορούμε να υπολογίσουμε την επαγωγή L του μετατροπέα, με βάση το χρόνο αγωγής του διακόπτη ($DT = 40\mu s * 0.144 = 5.76\mu s$)[3]:

$$L = V_{pv} \frac{D * T}{\Delta i_L} = 1.94 \text{ mH} \quad (7.20.Γ)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν πως ο πυκνωτής φορτίζει κατά την κατάσταση μη αγωγής του διακόπτη ενώ εκφορτίζεται κατά την κατάσταση αγωγής, πρέπει να διαθέτει χωρητικότητα αρκετά μεγάλη ώστε να μπορεί να παρέχει τη μέγιστη απαιτούμενη ενέργεια για το χρόνο αγωγής DT . Επίσης, όπως είναι γνωστό έχουμε: $\delta Q = C * \delta V$, όπου $\delta Q = i * \delta t$ και συνεπώς $C = i * \frac{\delta T}{\delta V}$.

Θεωρώντας επιθυμητή κυμάτωση τάσης στο 2% ($V_{ripple} = 0.02 * 48 = 0.96V$) προκύπτει:

$$C = I * \frac{DT}{V_{ripple}} = 30\mu F \quad (7.20.Δ)$$

Σύμφωνα με την [51] η τιμή αυτή αποτελεί το κατώτατο όριο λειτουργίας οπότε πρέπει να επιλεγεί πυκνωτής με χωρητικότητα μεγαλύτερη από την τιμή της εξίσωσης (7.20.Δ).

Το κατώτατο όριο επαγωγής ώστε ο μετατροπέας να παραμένει σε CCM λειτουργία υπολογίζεται ως:

$$L_{ccm} = (1 - D)^2 * D * \frac{V_{dc_bus}}{2 * I * f} = 16.87 \mu H \quad (7.20.Ε)$$

- **Μετατροπέας Ανύψωσης-Υποβιβασμού (Μπαταρία – DC Ζυγός)**

Η διαστασιολόγηση των παραμέτρων του buck-boost μετατροπέα έγινε με βάση τη λειτουργία του κατά το boost mode αναφορικά με τη φάση πτήσεως μέγιστης ταχύτητας, αφού εκεί παρουσιάζονται οι υψηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις. Κατά τη φάση αυτή η τάση της μπαταρίας βρίσκεται στα 33.7V και το παρεχόμενο ρεύμα στα 15.7A. Έχουμε λοιπόν:

$$D = \frac{48}{48+33.7} = 0.588 \quad (7.21.Α)$$

$$\Delta i_L = 0.02 * \frac{P_{max}}{V_{dc_bus}} = 0.22A \quad (7.21.Β)$$

$$L = V_{fc} \frac{D * T}{\Delta i_L} = 3.59 \text{ mH} \quad (7.21.Γ)$$

$$C = I * \frac{DT}{V_{ripple}} = 0.27 \text{ mF} \quad (7.21.Δ)$$

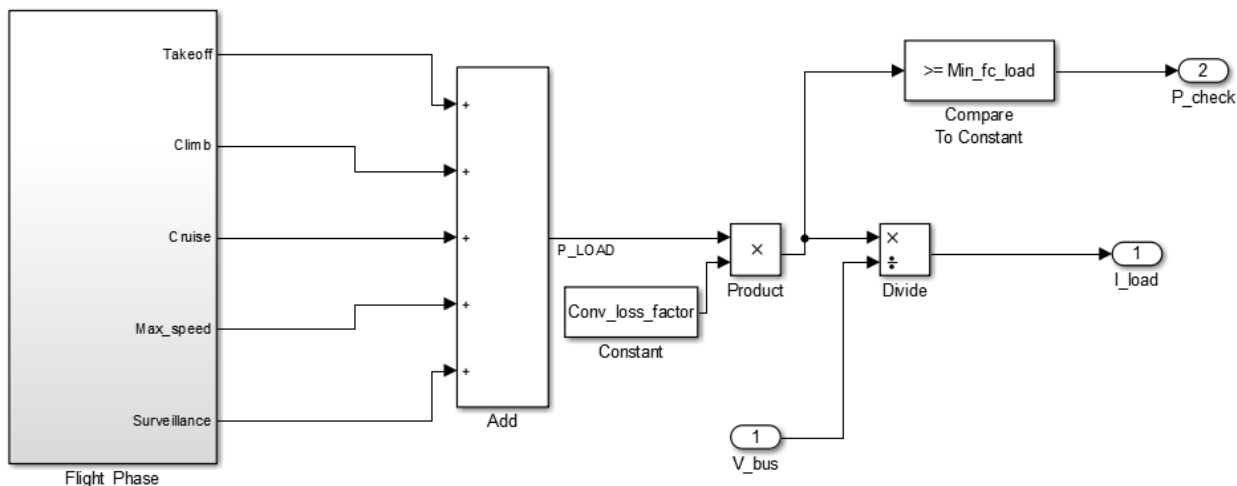
$$L_{ccm} = (1 - D)^2 * D * \frac{V_{dc_bus}}{2 * I * f} = 8.707 \mu H \quad (7.21.Ε)$$

Σενάριο	1 / (PV-battery)				2 / (FC-battery)			
Μετατροπέας	Boost		Buck-Boost		Boost		Buck-Boost	
Στοιχείο	L	C	L	C	L	C	L	C
Τιμές (mH / mF)	2.2	0.1	3.7	0.3	2.4	0.3	5.4	0.2

Πίνακας 7.6: Τιμές επί μέρους στοιχείων των μετατροπέων

7.4 Άλλα στοιχεία του συστήματος και συνολική λειτουργία

Από ηλεκτρολογικής σκοπιάς, η παρουσίαση των επί μέρους μονάδων του συστήματος (πηγές παραγωγής, μετατροπείς ισχύος, ζυγός μεταφοράς/διανομής) έχει ολοκληρωθεί. Στην παράγραφο αυτή θα αναφερθούμε στη περιγραφή των υπόλοιπων στοιχείων του Simulink, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ώστε να εξυπηρετηθεί η ομαλή λειτουργία κατά την προσομοίωση (τρόπος εισαγωγής ενεργειακών απαιτήσεων, σύνδεση/αποσύνδεση πηγών κατά τη λειτουργία, συμπερίληψη απωλειών μετατροπέων κλπ).

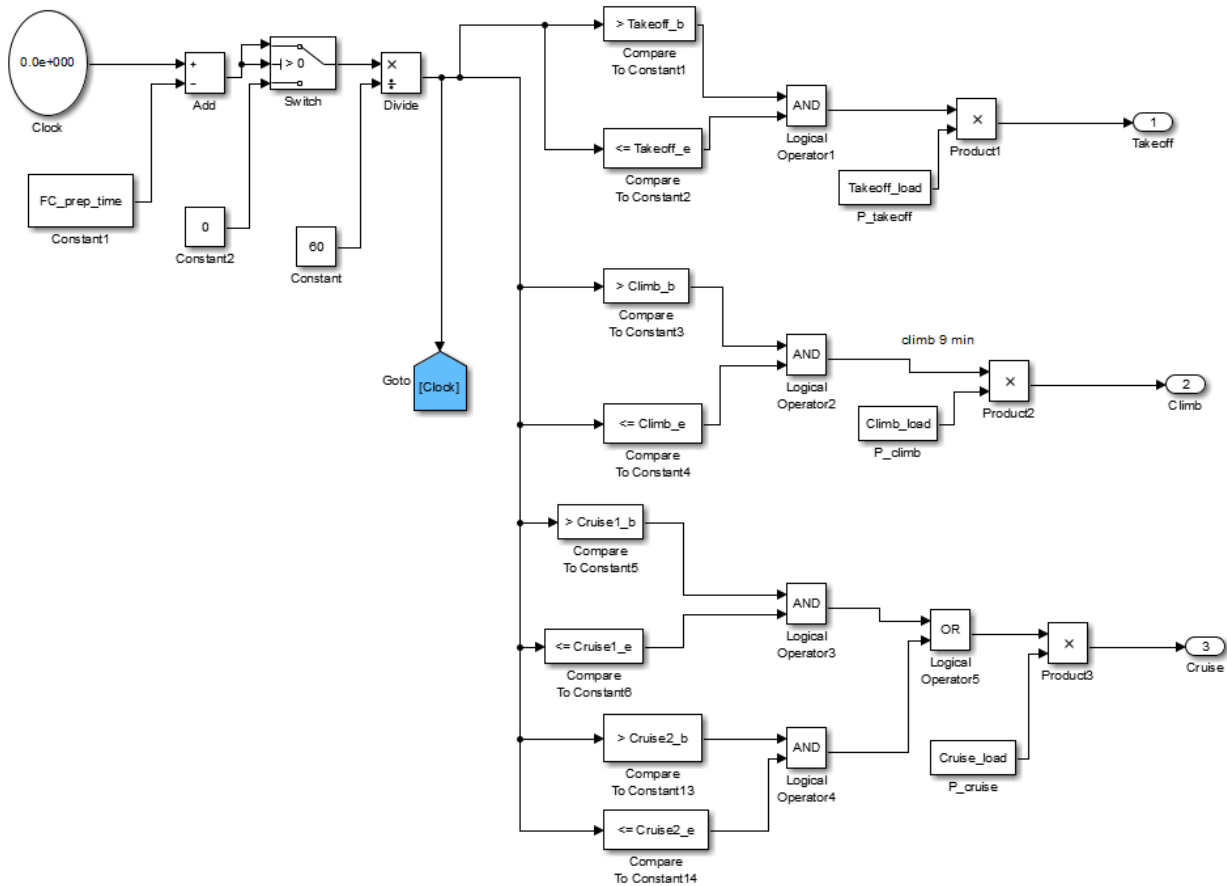


Εικόνα 7.16: Προσδιορισμός ρεύματος φορτίου

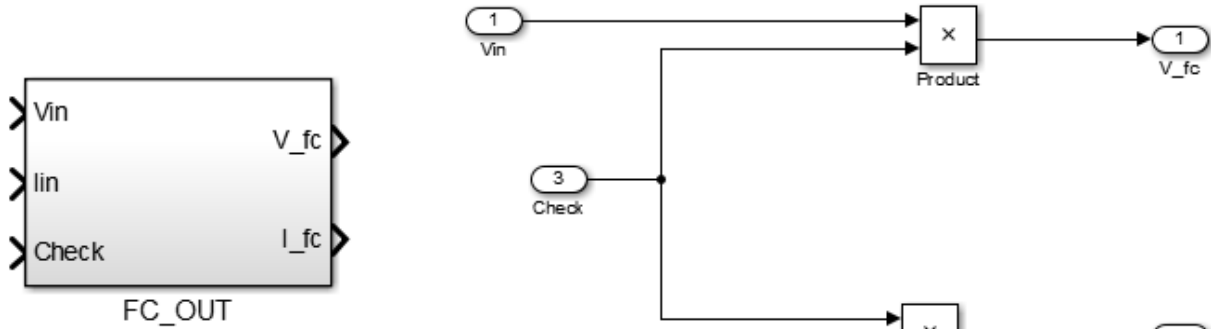
Στην εικόνα (7.16) βλέπουμε τον τρόπο με τον οποίο προσομοιώνεται το ρεύμα φορτίου, ή αλλιώς οι ενεργειακές απαιτήσεις πτήσεως. Στο μπλοκ Flight_Phase ορίζεται η ισχύς που απαιτείται κατά τις διάφορες φάσεις πτήσης. Φυσικά μόνο μία από τις εξόδους του μπλοκ αυτού μπορεί να είναι διάφορη του μηδενός, γεγονός που θα φανεί παρακάτω. Η ισχύς εξόδου πολλαπλασιάζεται στη συνέχεια με ένα συντελεστή ώστε να ληφθούν υπ όψιν οι απώλειες των μετατροπέων ισχύος (απώλειες~10%, συντελεστής Conv_loss_factor=1.1). Διαιρώντας με την τάση του DC ζυγού διανομής (48V) προκύπτει το απαιτούμενο ρεύμα. Όσον αφορά την έξοδο P_check, πρόκειται για ένα λογικό σήμα (0-1) που φροντίζει ώστε η κυψέλη

καυσίμου να τίθεται εκτός λειτουργίας σε περίπτωση που οι ενεργειακές απαιτήσεις πτήσεως είναι μικρότερες από 300W (εικόνα 7.18).

Στην εικόνα που ακολουθεί (7.17) βλέπουμε την εσωτερική υλοποίηση του μπλοκ Flight_Phase. Στο αριστερό τμήμα αυτού γίνεται η μετατροπή του χρόνου που δίνουμε στο πρόγραμμα (από λεπτά σε δευτερόλεπτα) σε λεπτά (ο χρόνος δίνεται σε ένα M-file / παράρτημα 3), ενώ ο διακόπτης φροντίζει για την εξασφάλιση του χρόνου που απαιτείται ώστε η κυψέλη καυσίμου να τεθεί σε λειτουργία και το μοντέλο να σταθεροποιήσει την έξοδό του (~100sec). Στο δεξί τμήμα βλέπουμε πως γίνεται η σύγκριση του χρόνου προσομοίωσης με το χρόνο έναρξης/λήξης της κάθε φάσης πτήσεως και η ρύθμιση της εξόδου του μπλοκ σύμφωνα με τα αποτελέσματα των συγκρίσεων. Να σημειωθεί πως οι έξοδοι Max_Speed, Surveillance και End δε φαίνονται στην εικόνα για λόγους ευκρίνειας, ενώ η υλοποίηση είναι πανομοιότυπη.

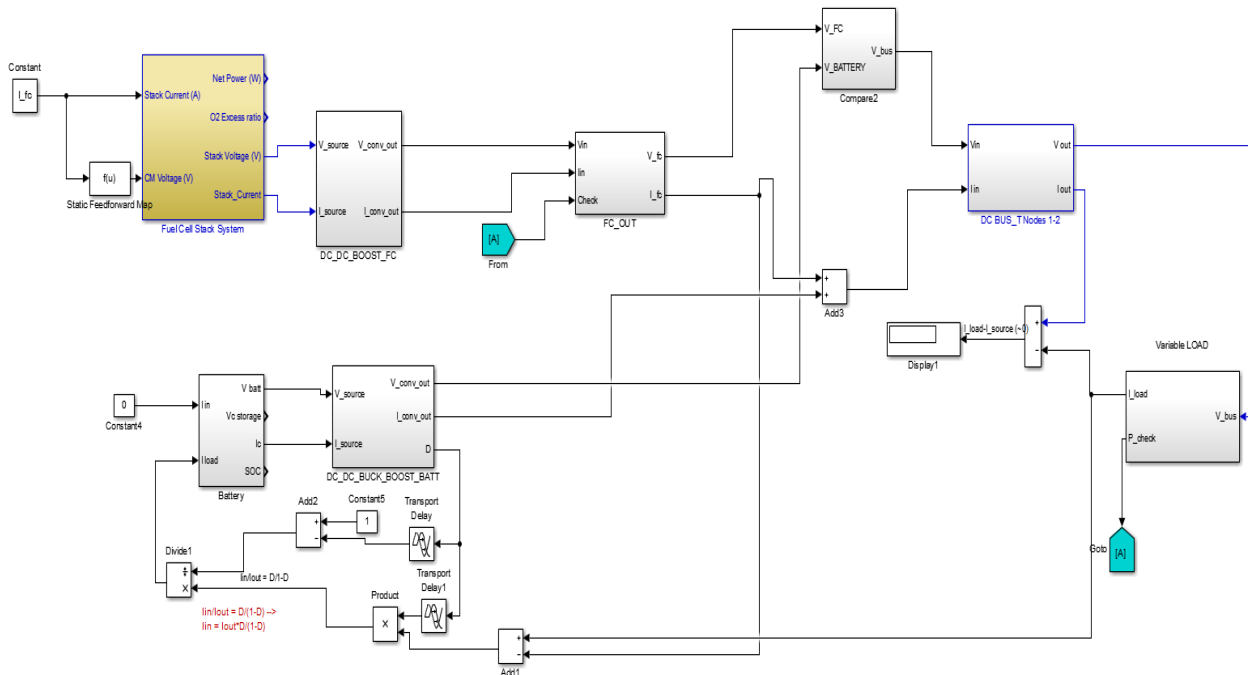


Εικόνα 7.17: Εσωτερικό του μπλοκ Flight_Phase



Εικόνα 7.18: (Μη) συμμετοχή της κυψέλης στο σύστημα

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το συνολικό μοντέλο Simulink για το δεύτερο σενάριο προσομοίωσης:



Εικόνα 7.19: Σενάριο προσομοίωσης 2 - Συνολικό σύστημα

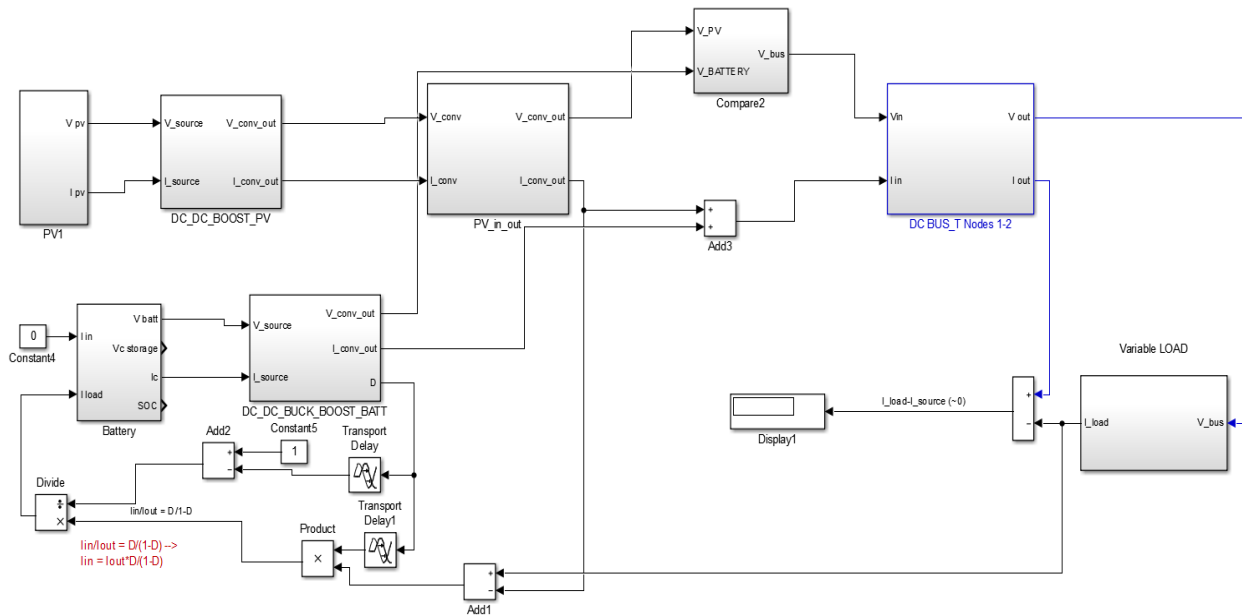
Είμαστε πλέον έτοιμοι να αναφέρουμε συνοπτικά τη συνολική λειτουργία του μοντέλου της εικόνας (7.19): Ορίζουμε αρχικά το σημείο λειτουργίας της συστοιχίας κυψελών καυσίμου, προσδίδοντας την κατάλληλη τιμή στο ρεύμα I_{fc} . Στη συνέχεια, το I_{fc} διερχόμενο μέσω του μετατροπέα, προστίθεται στο ρεύμα που παρέχει η μπαταρία και το άθροισμά τους αποτελεί το ρεύμα εισόδου του ζυγού. Όπως προαναφέρθηκε, ο ρόλος της μπαταρίας είναι συμπληρωματικός. Έτσι, το ρεύμα με το οποίο καλείται να τροφοδοτήσει το φορτίο προσδιορίζεται με βάση τη διαφορά $I_{load} - I_{fc}$. Το αποτέλεσμα της πράξης αυτής (I_{diff}), πρέπει στη συνέχεια να εισαχθεί ως μεταβλητή εισόδου στο μοντέλο της μπαταρίας, αφού πρώτα έχει

διέλθει μέσω του μετατροπέα dc/dc. Έτσι, υλοποιείται η εξίσωση (κάτω αριστερά στην εικόνα):

$$I_{diff} = I_{out} \Rightarrow I_{in} = I_{out} * \frac{D}{1-D} \quad (7.22)$$

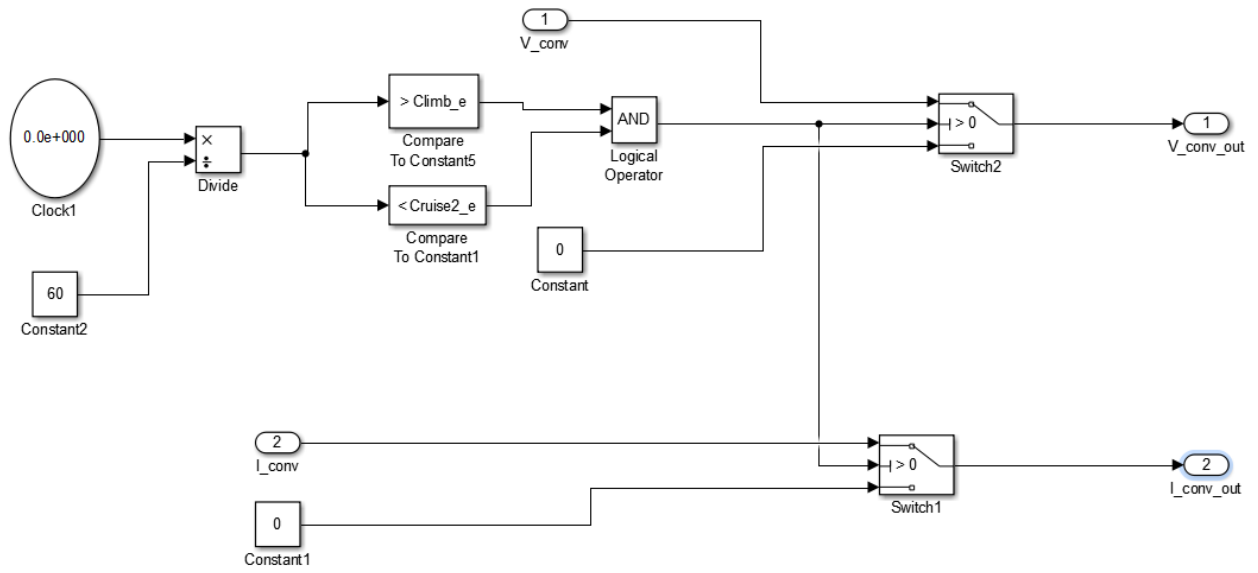
Σε περίπτωση που το I_{out} είναι θετικό η μπαταρία παρέχει το απαιτούμενο ρεύμα στο φορτίο, ενώ στην αντίθετη περίπτωση φορτίζει, αξιοποιώντας το υπολοιπόμενο ρεύμα της κυψέλης.

Ολοκληρώνοντας το κεφάλαιο αυτό, στην εικόνα (7.20) παρουσιάζεται το μοντέλο Simulink για τη πρώτο σενάριο προσομοίωσης:



Εικόνα 7.20: Σενάριο προσομοίωσης 1 - Συνολικό σύστημα

Η συνολική λειτουργία του συστήματος είναι ακριβώς ίδια με του Σεναρίου 2 που περιγράφηκε πρωτίτερα. Βασική διαφορά αποτελεί το μπλοκ PV_in_out, το οποίο επιτελεί μία αντίστοιχη λειτουργία με αυτή του FC_OUT. Σε αυτή την περίπτωση, η σύνδεση ή όχι του φωτοβολταϊκού στο σύστημα εξαρτάται από το χρόνο πτήσης και όχι από το ζητούμενο φορτίο όπως προηγουμένως. Αναλυτικότερα, το εσωτερικό του μπλοκ παρουσιάζεται στην εικόνα (7.21) που ακολουθεί:



Εικόνα 7.21: Μπλοκ PV_in_out

Κεφάλαιο 8: Αποτελέσματα Προσομοιώσεων και Προτάσεις για Μελέτη

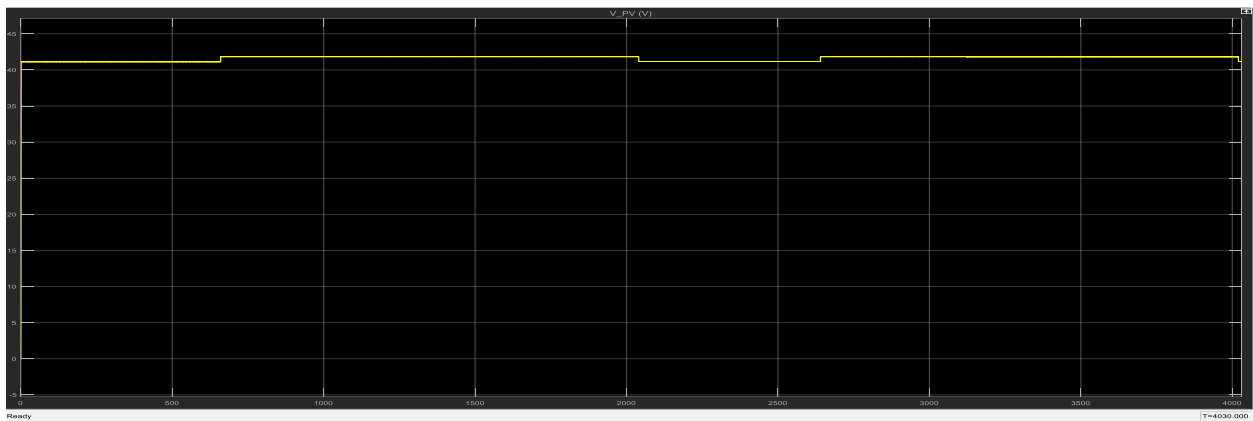
Στο πρώτο μέρος του κεφαλαίου αυτού παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που λάβαμε από το πρόγραμμα Matlab/Simulink με την εκτέλεση των δύο σεναρίων προσομοίωσης. Στη συνέχεια αναφερόμαστε στα συμπεράσματα που εξάγαμε από τη συγκριτική μελέτη μεταξύ των δύο συστημάτων τροφοδοσίας, ενώ η εργασία ολοκληρώνεται με την παρουσίαση προτάσεων επέκτασης της παρούσας ερευνητικής μελέτης.

8.1 Αποτελέσματα Προσομοίωσης: Σενάριο 1

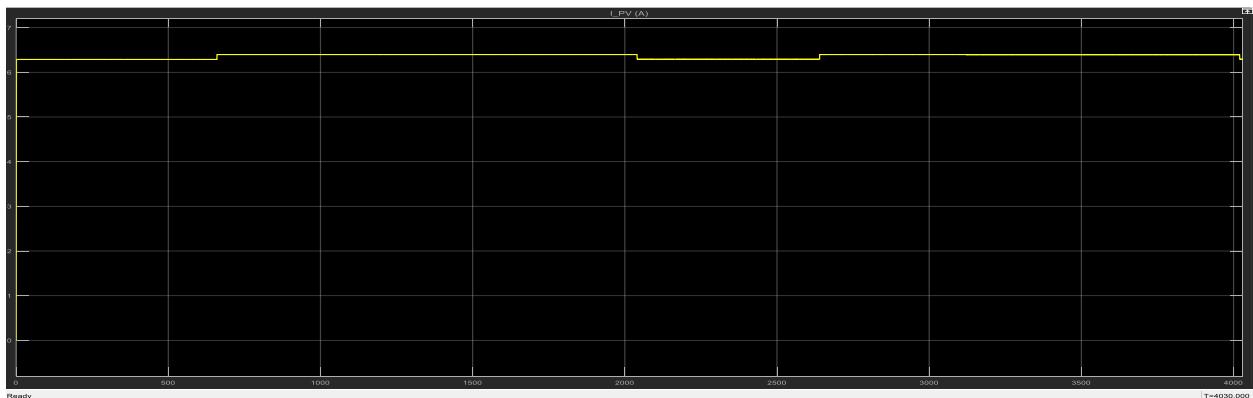
Η συμμετοχή των φωτοβολταϊκών στοιχείων, ως πηγή τροφοδοσίας στο σύστημα ηλεκτρικής ισχύος του uan καθιστά συμφαίρουσα τη διεξαγωγή της πτήσης υπό την παρουσία ηλιακής ακτινοβολίας καθώς, στην αντίθετη περίπτωση, τα φ/β πάνελ προσθέτουν επιπλέον βάρος στο αεροσκάφος χωρίς να παρέχουν την παραμικρή χρησιμότητα. Βέβαια το γεγονός αυτό δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να επηρεάζει τη λειτουργικότητα του uan, το οποίο οφείλει να είναι σε θέση να εκτελέσει την όποια αποστολή του ανατίθεται, υπό οποιεσδήποτε περιβαλλοντικές συνθήκες. Έτσι, ενώ η φυσική παρουσία των φ/β πάνελ είναι απαραίτητη σε κάθε περίπτωση, με την αποσύνδεση αυτών από το σύστημα τροφοδοσίας μπορούμε στην ουσία να μελετήσουμε τις ενεργειακές δυνατότητες του αεροσκάφους σε περίπτωση απουσίας της ηλιακής ακτινοβολίας (υψηλές νεφώσεις ή εκτέλεση πτήσης κατά τις βραδινές ώρες). Για το λόγο αυτό, το πρώτο σενάριο προσομοίωσης μελετήθηκε αρχικά με τη συμμετοχή των φ/β στοιχείων καθόλη τη διάρκεια πτήσεως του αεροσκάφους, ενώ στη συνέχεια αποσυνδέθηκαν, με αποτέλεσμα ο ηλεκτρικός συσσωρευτής του συστήματος να καλείται να εξυπηρετήσει εξ ολοκλήρου τις ενεργειακές απαιτήσεις πτήσεως.

8.1.1 Συμμετοχή φωτοβολταϊκών στοιχείων

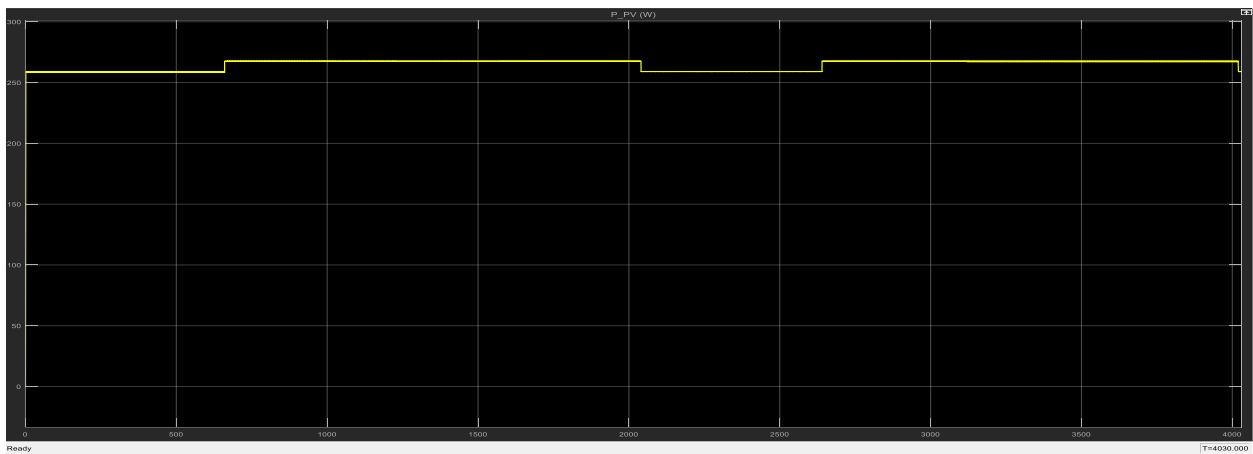
Στην περίπτωση αυτή, το φ/β πάνελ χρησιμοποιείται ως πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και τις φάσεις πλεύσεως και επιτήρησης-εκτέλεσης αποστολής. Στην πρώτη περίπτωση καλύπτει μέρος του απαιτούμενου φορτίου, ενώ στη δεύτερη η ισχύς που παράγεται (~260W) επαρκεί ώστε να καθίσταται δυνατή και η φόρτιση της μπαταρίας. Παρακάτω παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις που λήφθηκαν (με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab/Simulink) σχετικά με την τάση, το ρεύμα και την ισχύ εξόδου των πηγών παραγωγής, την απόκλιση μεταξύ του παρεχόμενου και του απαιτούμενου ρεύματος καθώς και την ισχύ εισόδου-εξόδου των μετατροπέων.



Εικόνα 8.1: Τάση Λειτουργίας φ/β



Εικόνα 8.2: Παραγόμενο ρεύμα από φ/β



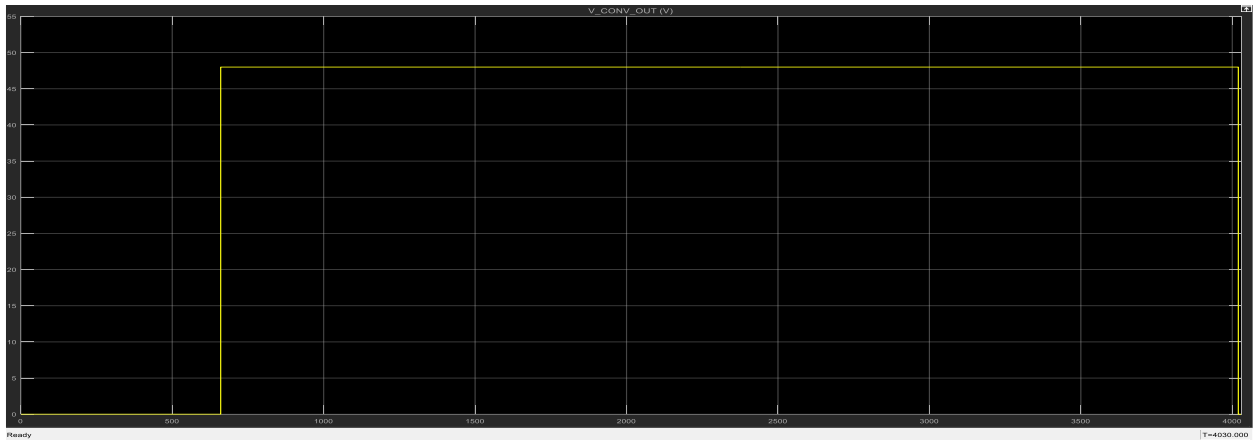
Εικόνα 8.3: Παραγόμενη ισχύς από φ/β

Σύμφωνα με τις εικόνες (8.1/2/3) παρατηρούνται δύο επίπεδα λειτουργίας του φ/β πάνελ με την τάση, το ρεύμα και την παραγόμενη ισχύ να μεταβάλλονται μεταξύ δύο σταθερών τιμών. Φυσικά τα επίπεδα αυτά αντιστοιχούν στις διαφορετικές τιμές που λαμβάνει η ηλιακή ακτινοβολία (775 W/m^2 και 800 W/m^2) κατά τα διαφορετικά υψόμετρα πτήσης του αεροσκάφους. Τα σημαντικά στοιχεία των γραφημάτων συνοψίζονται παρακάτω:

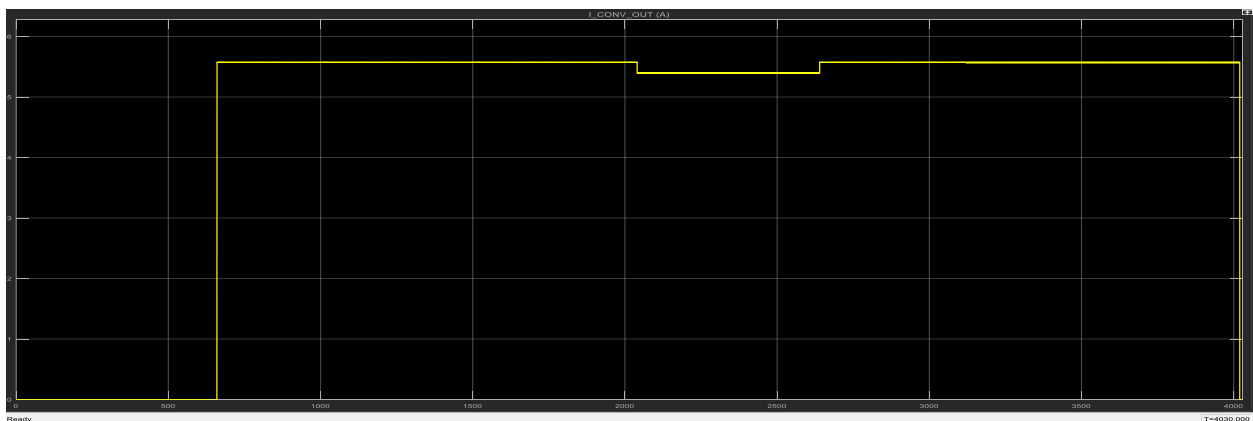
Ακτινοβολία	$S = 775 \text{ W/m}^2$		$S = 800 \text{ W/m}^2$	
	Σημείο Λειτουργίας	Κυμάτωση	Σημείο Λειτουργίας	Κυμάτωση
Τάση (V)	41.1	0.03	41.83	0.03
Ρεύμα (A)	6.29	0.0065	6.395	0.005
Ισχύς (W)	259	0.55	267.5	0.4

Πίνακας 8.1: Χαρακτηριστικά Σημεία Λειτουργίας φ/β

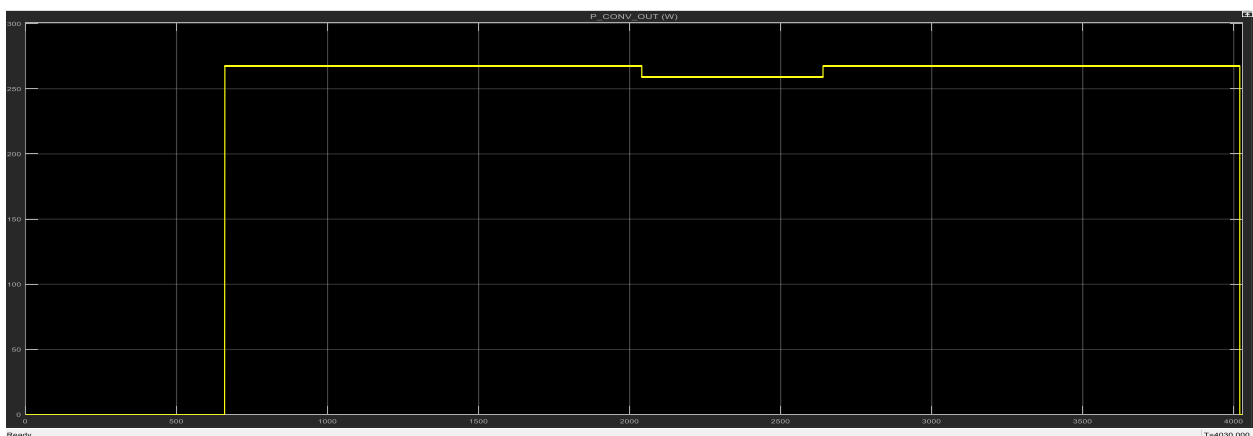
Όσον αφορά το πρώτο τμήμα των γραφικών παραστάσεων (0-660 sec), αυτό αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα κατά το οποίο το φωτοβολταϊκό πάνελ δε συνεισφέρει στην τροφοδοσία του συστήματος. Παρόλα αυτά, κατά την προσομοίωση δεν είναι εφικτό το μοντέλο να τεθεί ολοκληρωτικά εκτός λειτουργίας, καθώς έτσι οδηγούμε σε πρόβλημα αλγεβρικού βρόχου (algebraic loop / δυσκολία επίλυσης κάποιας εξίσωσης λόγω της παρουσίας κάποιου τύπου ανάδρασης σε αυτή) το πρόγραμμα Matlab/Simulink, και κατ' επέκταση σε αδυναμία εκτέλεσης της προσομοίωσης. Έτσι επιλέχθηκε η λειτουργία του φ/β μοντέλου καθόλη τη διάρκεια πτήσης, ενώ η συμμετοχή του ή όχι ως πηγή τροφοδοσίας του συστήματος ρυθμίζεται στη συνέχεια, μέσω ενός ξεχωριστού μπλοκ (PV_in_out), όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 7. Η έξοδος του μετατροπέα λοιπόν, με τη μεσολάβηση του μπλοκ που προαναφέρθηκε καταλήγει στην ικανοποίηση τμήματος του ζητούμενου φορτίου, σύμφωνα με τις κάτωθι γραφικές παραστάσεις:



Εικόνα 8.4: Τάση εξόδου DC/DC converter



Εικόνα 8.5: Ρεύμα εξόδου DC/DC converter



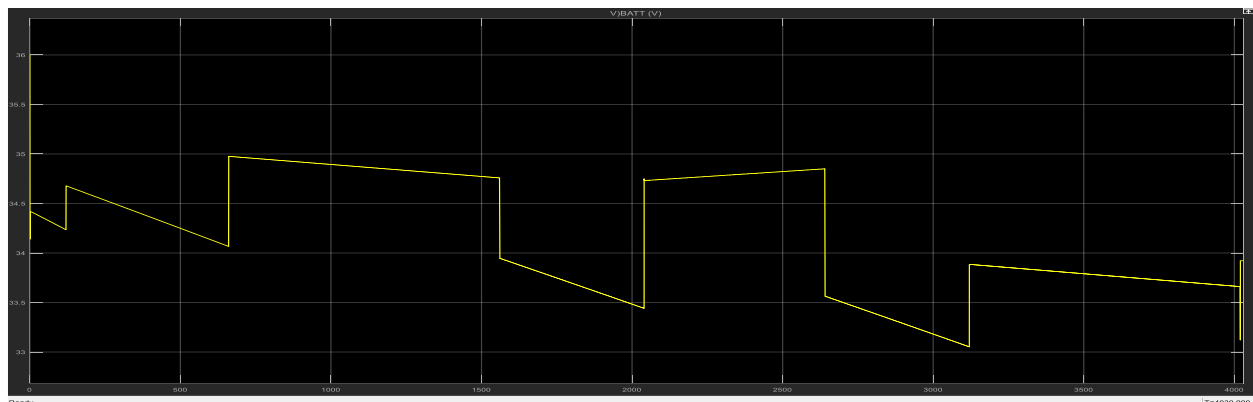
Εικόνα 8.6: Ισχύς στην έξοδο του DC/DC Converter

Όπως παρατηρείται από τα παραπάνω γραφήματα η τάση, το ρεύμα και η ισχύς εξόδου του μετατροπέα είναι μηδενική για τα πρώτα 11 λεπτά πτήσης (φάση απογείωσης και αναρρίχησης), ενώ στη συνέχεια λαμβάνουν τις κάτωθι τιμές:

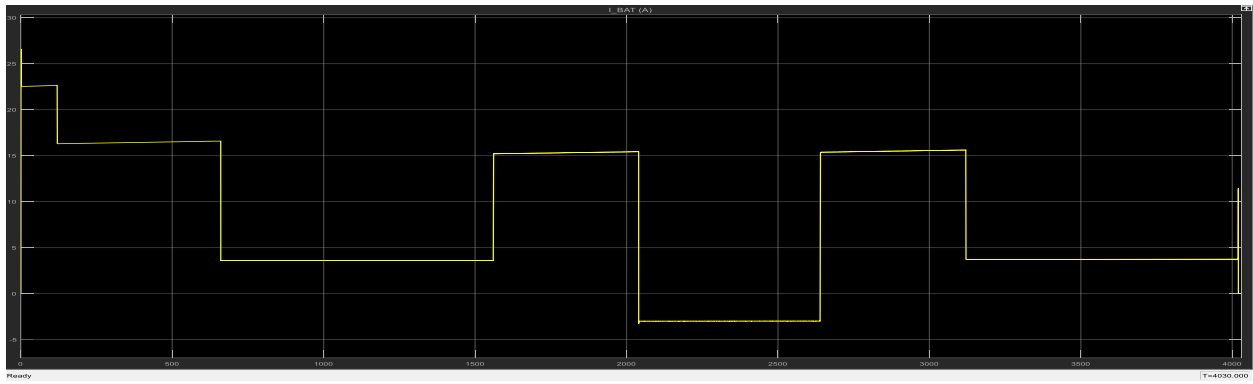
Ακτινοβολία	$S = 775 \text{ W/m}^2$	$S = 800 \text{ W/m}^2$
Χαρακτηριστικά Γραφημάτων	Έξοδος Μετατροπέα	Έξοδος Μετατροπέα
ΤΑΣΗ (V)	48	48
ΡΕΥΜΑ (A)	5.396	5.574
ΙΣΧΥΣ (W)	259	267.5

Πίνακας 8.2: Χαρακτηριστικά μεγέθη στην έξοδο του μετατροπέα

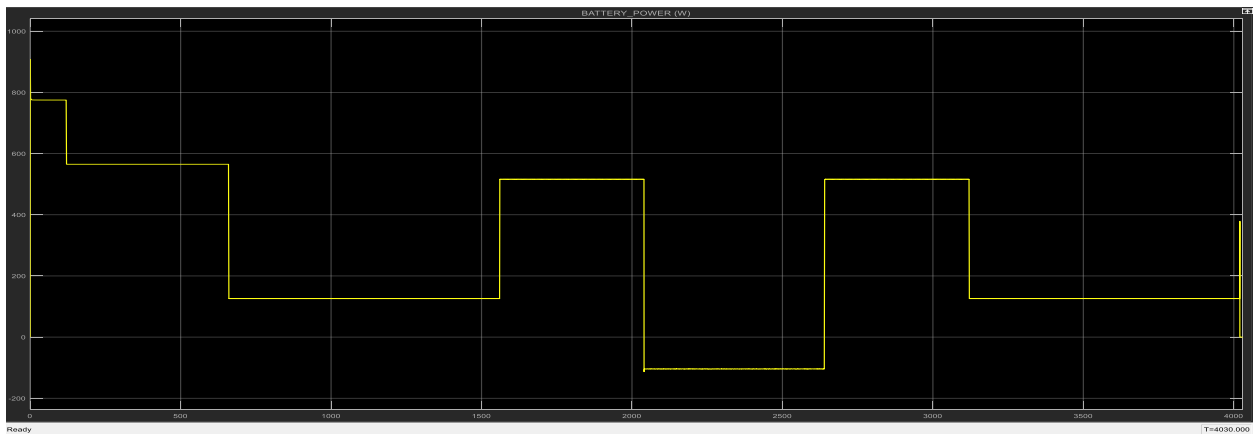
Η τάση εξόδου του μετατροπέα βρίσκεται σταθερά στα 48V, όπως και πρέπει να συμβαίνει, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του DC ζυγού. Η ισχύς εξόδου είναι φυσικά ίση με την ισχύ εισόδου (οι απώλειες λαμβάνονται υπ όψιν στο φορτίο), ενώ η θετική τιμή του ρεύματος εξόδου δηλώνει τη συνεισφορά του φ/β πάνελ στην κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων πτήσης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις και οι πίνακες πληροφοριών σχετικά με το μοντέλο του ηλεκτρικού συσσωρευτή και τη συμπεριφορά του κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης:



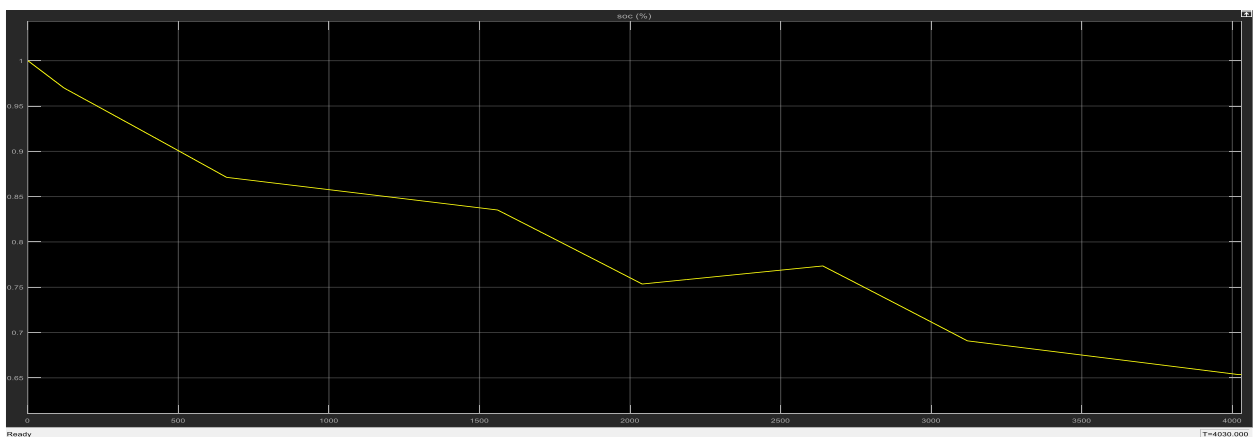
Εικόνα 8.7: Τάση λειτουργίας ηλεκτρικού συσσωρευτή (36V/25ah)



Εικόνα 8.8: Ρεύμα εκφόρτισης ηλεκτρικού συσσωρευτή (36V/25ah)



Εικόνα 8.9: Εξαγόμενη ισχύς από τη μπαταρία (36V/25ah)



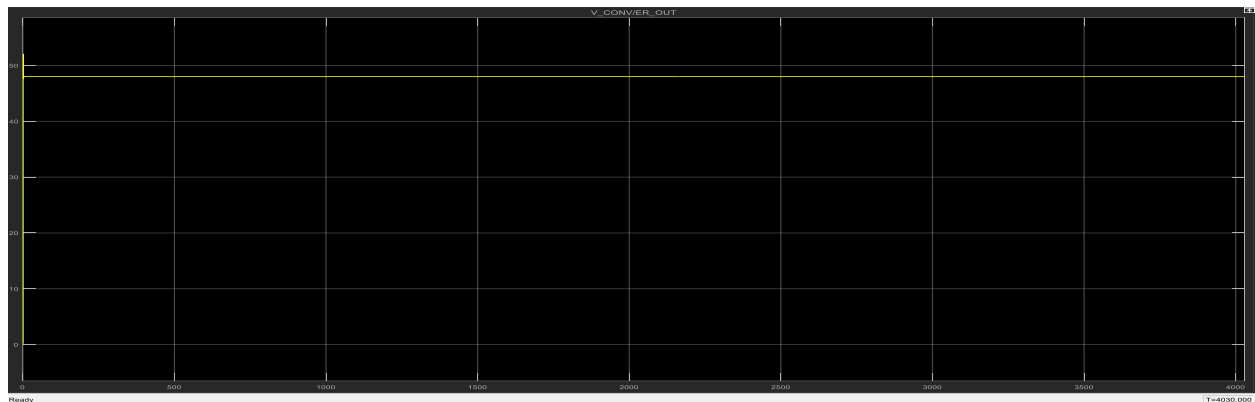
Εικόνα 8.10: Συνολική στάθμη φόρτισης της μπαταρίας

Λόγω της παραγωγής σταθερής ποσότητας ισχύος από το φ/β πάνελ (0W, 259W ή 267.5W), τα χαρακτηριστικά μεγέθη του ηλεκτρικού συσσωρευτή ακολουθούν, όπως είναι φυσικό, τις μεταβολές του ηλεκτρικού φορτίου. Η τάση λειτουργίας μειώνεται γραμμικά κατά την εκφόρτιση, ενώ μεταβάλλεται απότομα κατά τη ζήτηση αυξημένης/μειωμένης ποσότητας ρεύματος, προς λειτουργία της μπαταρίας στο κατάλληλο σημείο της περιοχής γραμμικής λειτουργίας (εικόνα 8.7). Όσον αφορά τις κυματομορφές ισχύος και ρεύματος, ομοιάζουν σημαντικά μεταξύ τους, με την ελεφρά κλίση που παρατηρείται κατά διαστήματα στην εικόνα (8.8) να οφείλεται στην ταχύτατη εκφόρτιση του συσσωρευτή και κατ' επέκταση στην πτώση της τάσης λειτουργίας του. Εξετάζοντας το γράφημα της εικόνας (8.10), βλέπουμε πως η στάθμη φόρτισης μειώνεται σταδιακά, με εξαίρεση τη φάση εκτέλεσης της αποστολής, όπου, με την παρουσία αρνητικής τιμής του ρεύματος εισόδου, έχουμε σταδιακή αύξηση αυτής. Αναλυτικότερα, οι τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών λειτουργίας της μπαταρίας παρέχονται στον παρακάτω πίνακα, για τις διαφορετικές φάσεις πτήσεως:

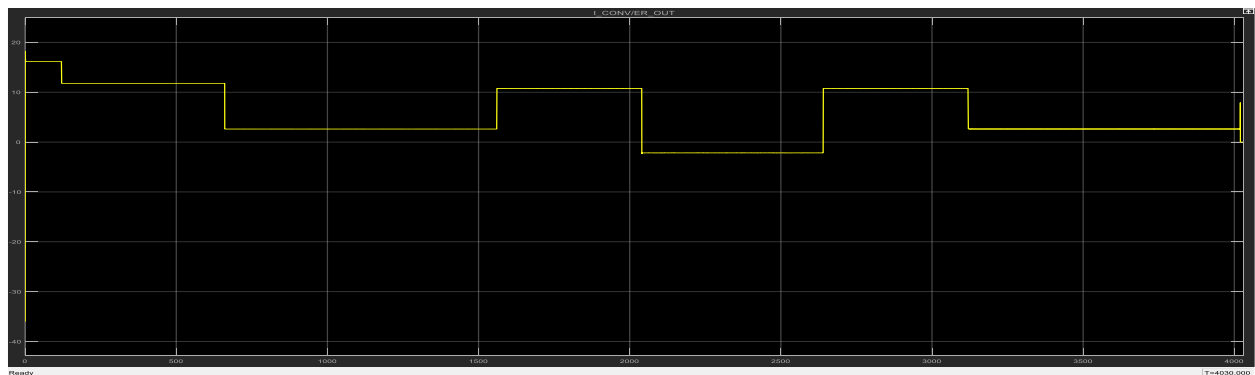
Φάση Πτήσεως	Τάση Λειτουργίας (V)	Ρεύμα Εκφόρτισης (A)	Στάθμη Φόρτισης (%)	Χρονική Διάρκεια (λεπτά)
Απογείωση ($7.546\frac{m}{s}$)	34.42 – 34.23	22.53 – 22.64	100 – 97	0-2
Αναρρίχηση ($7.546\frac{m}{s}$)	34.68 – 34.1	16.3 – 16.59	97 – 87	2-11
Πλεύση_1 ($18\frac{m}{s}$)	34.98 – 34.76	3.59 – 3.62	87 – 83.5	11-26
Πλεύση_2 ($24.5\frac{m}{s}$)	33.95 – 33.44	15.20 – 15.43	83.5 – 75.4	26-34
Επιτήρηση ($13\frac{m}{s}$)	34.73 – 34.85	(-)3 / Φόρτιση	75.4 – 77.4	34-44
Πλεύση_3 ($24.5\frac{m}{s}$)	33.56 – 33.05	15.38 – 15.62	77.4 – 69.1	44-52
Πλεύση_4 ($18\frac{m}{s}$)	33.89 – 33.66	3.71 – 3.74	69.1 – 65.37	52-67

Πίνακας 8.3: Λειτουργία ηλεκτρικού συσσωρευτή

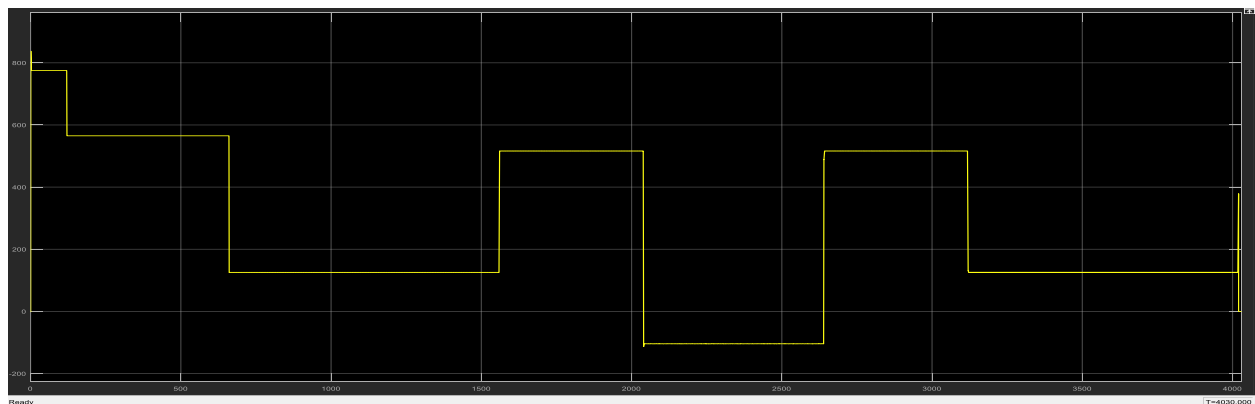
Στη συνέχεια ακολουθούν οι κυματομορφές των μεγεθών εξόδου του μετατροπέα που παρεμβάλλεται μεταξύ μπαταρίας-φορτίου:



Εικόνα 8.11: Τάση εξόδου DC/DC converter



Εικόνα 8.12: Ρεύμα εξόδου DC/DC Converter



Εικόνα 8.13: Ισχύς στην έξοδο του DC/DC Converter

Από τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις παρατηρούμε πως τα μεγέθη της τάσης του ρεύματος και της ισχύος εξόδου του μετατροπέα να διατηρούν μηδενική κλίση καθόλη τη διάρκεια πτήσεως. Το γεγονός αυτό αναμενόταν αφού, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 7, ο PI ελεκτήρας φροντίζει ώστε να διατηρείται η τάση στην έξοδο του μετατροπέα σταθερή, σύμφωνα με τις προδιαγραφές λειτουργίας του ζυγού. Οι τιμές των μεγεθών αυτών παρέχονται αναλυτικά στον πίνακα (8.4):

Φάση Πτήσεως	Τάση Εξόδου (V)	Ρεύμα Εξόδου (A)	Ισχύς Εξόδου (W)	Χρονική Διάρκεια (λεπτά)
Απογείωση ($7.546 \frac{m}{s}$)	48	16.14	775	0-2
Αναρρίχηση ($7.546 \frac{m}{s}$)	48	11.77	565	2-11
Πλεύση_1 ($18 \frac{m}{s}$)	48	2.62	125.7	11-26
Πλεύση_2 ($24.5 \frac{m}{s}$)	48	10.75	516	26-34
Επιτήρηση ($13 \frac{m}{s}$)	48	(-)2.17 (φόρτιση)	(-)104.15 (φόρτιση)	34-44
Πλεύση_3 ($24.5 \frac{m}{s}$)	48	10.75	516	44-52
Πλεύση_4 ($18 \frac{m}{s}$)	48	2.62	125.7	52-67

Πίνακας 8.4: Χαρακτηριστικά μεγέθη στην έξοδο του μετατροπέα

Στη συνέχεια παρέχεται η συνεισφορά κάθε πηγής στο συνολικό φορτίο σύμφωνα με τους πίνακες (8.2) (8.3) (8.4):

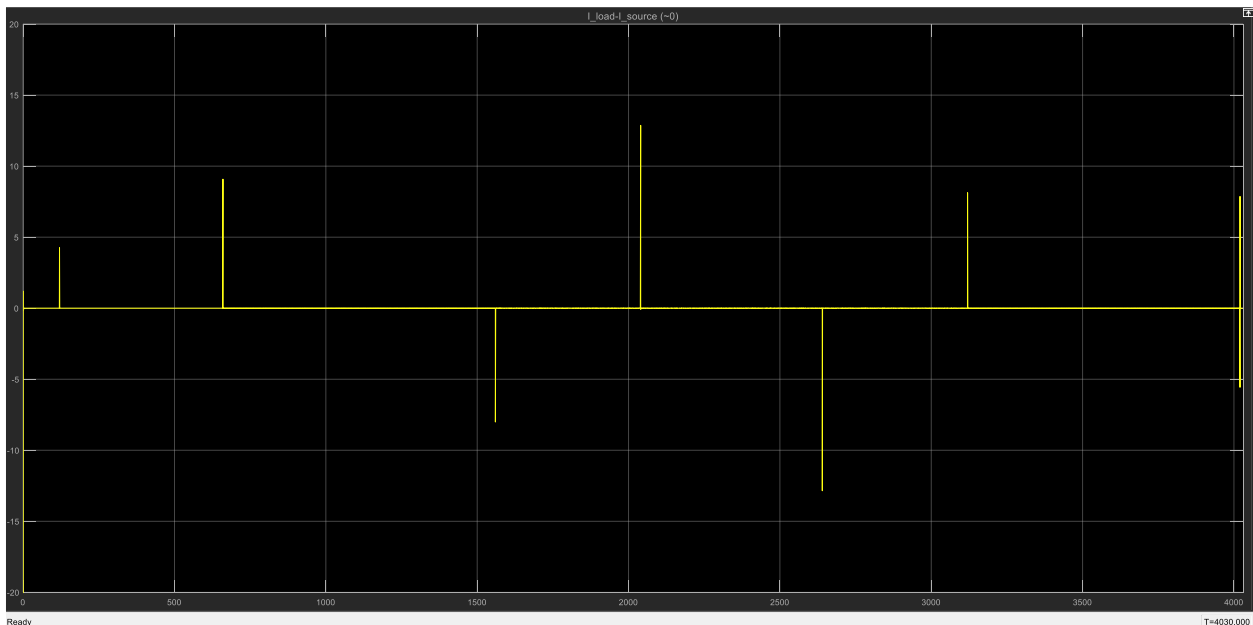
Φάση Πτήσεως	Ισχύς φ/β (W)	Ισχύς συσσωρευτή (W)	Ισχύς φορτίου (W)	Ποσοστό συμμετοχής (%)	
				Φ/β	Μπαταρία
Απογείωση ($7.546 \frac{m}{s}$)	0	775	775	0	100
Αναρρίχηση ($7.546 \frac{m}{s}$)	0	565	565	0	100
Πλεύση_1 ($18 \frac{m}{s}$)	267.5	125.7	393.2	68.03	31.97
Πλεύση_2 ($24.5 \frac{m}{s}$)	267.5	516	783.5	34.14	65.86
Επιτήρηση ($13 \frac{m}{s}$)	259	(-)104.15 (φόρτιση)	154.85	100	(-)67.26 (φορτίο)
Πλεύση_3 ($24.5 \frac{m}{s}$)	267.5	516	783.5	34.14	65.86
Πλεύση_4 ($18 \frac{m}{s}$)	267.5	125.7	393.2	68.03	31.97

Πίνακας 8.5: Συνεισφορά πηγών στο συνολικό φορτίο

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, το φ/β πάνελ συνεισφέρει μόνο κατά τις φάσεις πλεύσεως στην κάλυψη μέρους του φορτίου. Κατά την εκτέλεση της αποστολής, λόγω των χαμηλών ενεργειακών απαιτήσεων, καλύπτει έως και 167% του απαιτούμενου φορτίου αναλαμβάνοντας επιπλέον τη φόρτιση του συσσωρευτή. Με μία σύντομη ματιά στον πίνακα (8.3) παρατηρούμε πως η φόρτιση της μπαταρίας κατά τη φάση της επιτήρησης δεν έχει ιδιαίτερη σημασία στα πλαίσια της συγκεκριμένης αποστολής, αφού η SOC αυξάνεται ελάχιστα ($75.4\% \rightarrow 77.4\%$). Η ουσία όμως είναι πως το σύστημα τροφοδοσίας που υλοποιήσαμε είναι ικανό να προσομοιώσει τη φόρτιση της μπαταρίας μέσω των φ/β στοιχείων, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς η διαδικασία αυτή μπορεί να γίνεται ενώ το αεροσκάφος βρίσκεται προσεδαφισμένο. Αναφορικά με το βάθος εκφόρτισης του

συσσωρευτή, παρατηρούμε πως κυμαίνεται εντός των προδιαγραφών, αφού δεν ξεπερνά το 35%.

Αντιπαραβάλλοντας τα στοιχεία των πινάκων (8.5) και (6.2) παρατηρούμε πως υπάρχει μια μικρή απόκλιση μεταξύ των ενεργειακών απαιτήσεων πτήσεως, η οποία κυμαίνεται από 0.003% έως ~0.03%. Το γεγονός αυτό οφείλεται στις απώλειες του ζυγού μεταφοράς, που συνεπάγεται η παρουσία της εσωτερικής αντίστασης του καλωδίου (24 mΩ). Τέλος παρουσιάζεται το γράφημα που απεικονίζει τη διαφορά μεταξύ του ρεύματος τροφοδοσίας του DC ζυγού και του ρεύματος φορτίου:

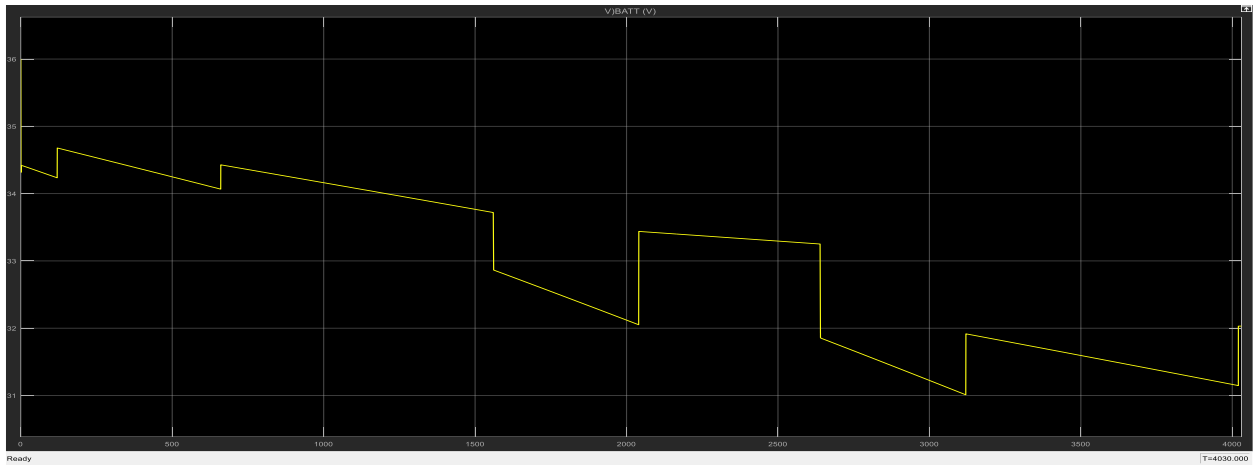


Εικόνα 8.14: Απεικόνιση διαφοράς ρεύματος τροφοδοσίας και ρεύματος φορτίου

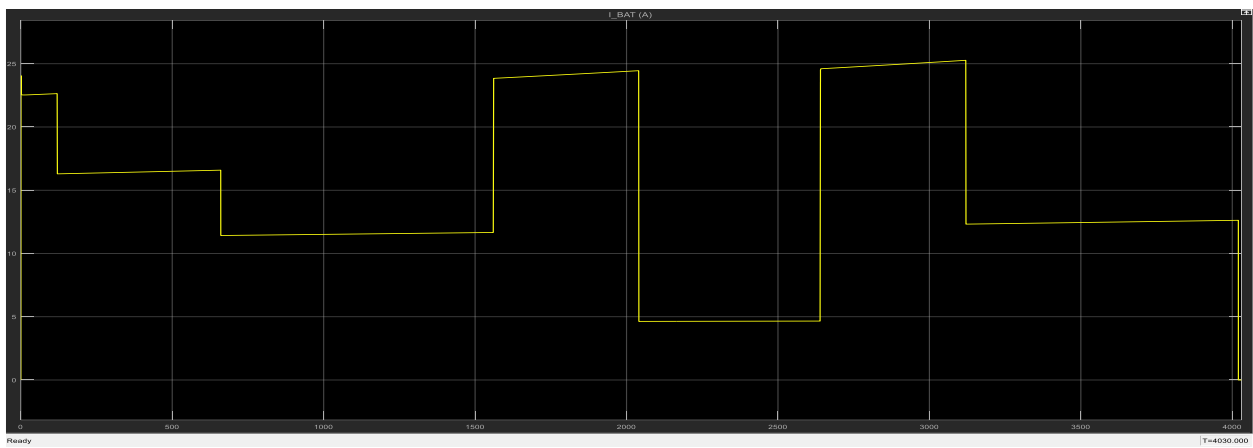
Όπως βλέπουμε από το διάγραμμα, κατά τις μεταβολές του φορτίου παρατηρείται μία κορυφή (peak) στη διαφορά των δύο ρευμάτων. Η διαφορά αυτή παρουσιάζεται ως ένας παλμός κρουστικής μορφής, με διάρκεια μικρότερη από 0.4 δευτερόλεπτα, γεγονός που δηλώνει πως το σύστημα ανταπεξέρχεται ταχύτατα στις όποιες μεταβολές ενεργειακών απαιτήσεων, δίνοντας εντολή για την αύξηση ή μείωση του επιπέδου παραγωγής των πηγών.

8.1.2 Μη Συμμετοχή φωτοβολταϊκών στοιχείων

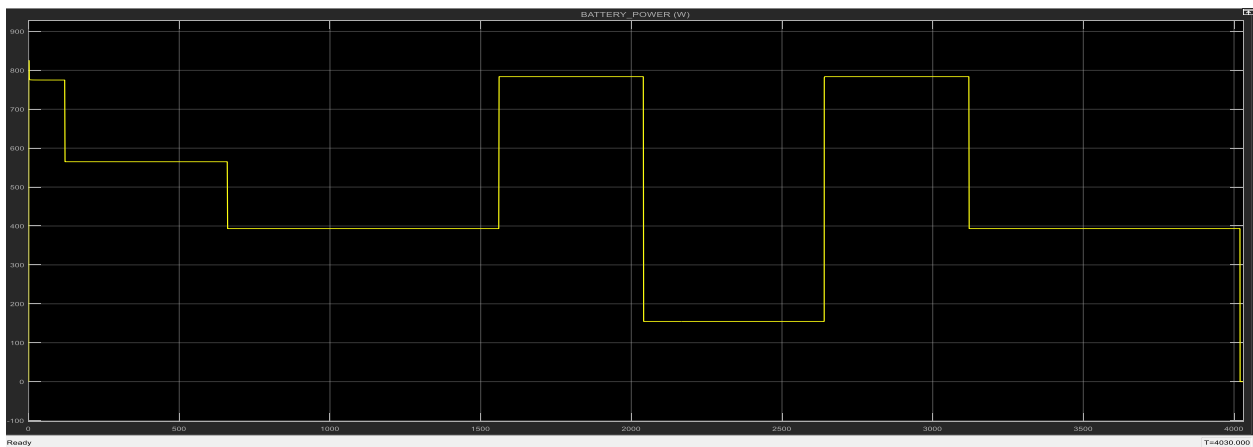
Στην περίπτωση αυτή, τίθεται εκτός λειτουργίας το μοντέλο των φωτοβολταϊκών στοιχείων, με αποτέλεσμα το φορτίο να τροφοδοτείται αποκλειστικά από την ηλεκτρικό συσσωρευτή. Όπως είναι φυσικό, τόσο η έξοδοι του φ/β όσο και του μετατροπέα σύνδεσης αυτού με το φορτίο είναι μηδενικές, με αποτέλεσμα η παρουσίασή τους να κρίνεται περιττή. Όσον αφορά την τάση και το ρεύμα λειτουργίας του ηλεκτρικού συσσωρευτή, καθώς και τη στάθμη φόρτισης καθόλη τη διάρκεια πτήσεως (67 λεπτά), λάβαμε τις παρακάτω γραφικές παραστάσεις:



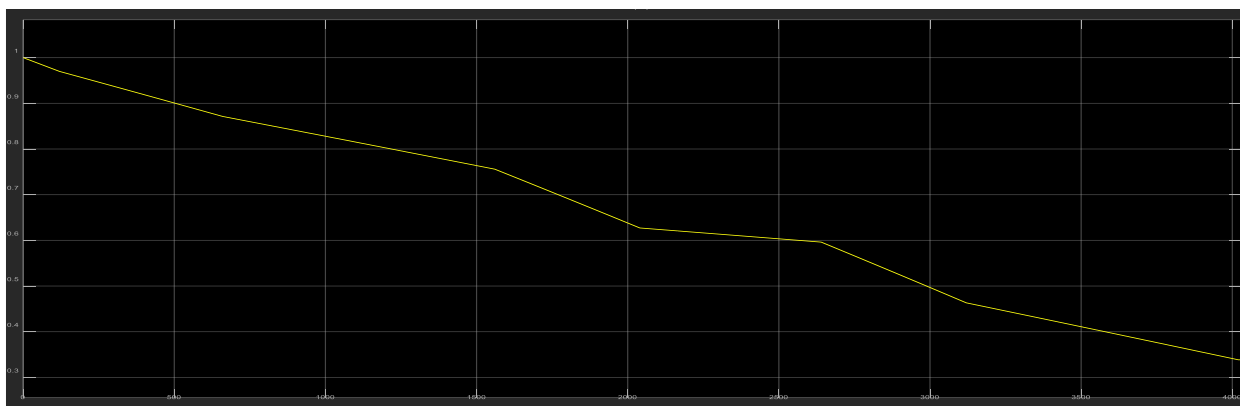
Εικόνα 8.15: Τάση λειτουργίας ηλεκτρικού συσσωρευτή (36V/25ah)



Εικόνα 8.16: Ρεύμα εκφόρτισης ηλεκτρικού συσσωρευτή (36V/25ah)



Εικόνα 8.17: Εξαγόμενη ισχύς από τη μπαταρία (36V/25ah)



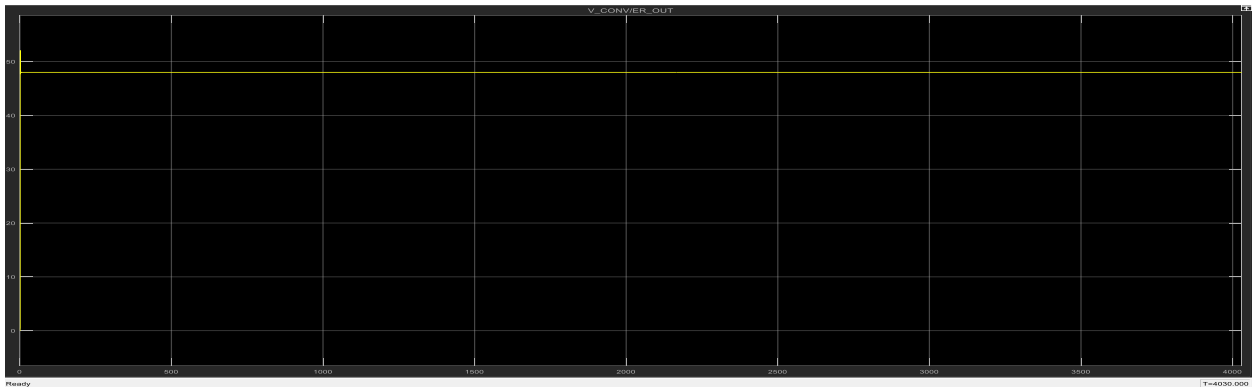
Εικόνα 8.18: Συνολική στάθμη φόρτισης της μπαταρίας

Αναλυτικά, τα αποτελέσματα σχετικά με τα χαρακτηριστικά μεγέθη της μπαταρίας εκτίθενται παρακάτω:

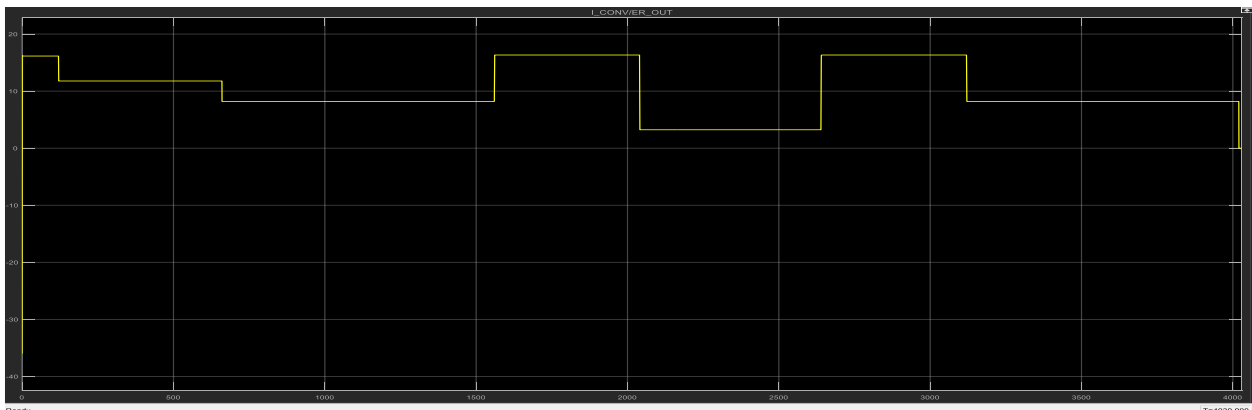
Φάση Πτήσεως	Τάση Λειτουργίας (V)	Ρεύμα (Εκ)φόρτισης (A)	Στάθμη Φόρτισης (%)	Χρονική Διάρκεια (λεπτά)
Απογείωση ($7.546 \frac{m}{s}$)	34.42 – 34.24	22.53 – 22.64	100 – 97	0-2
Αναρρίχηση ($7.546 \frac{m}{s}$)	34.68 – 34.1	16.3 – 16.59	97 – 87	2-11
Πλεύση_1 ($18 \frac{m}{s}$)	34.43 – 33.72	11.42 – 11.66	87 – 75.6	11-26
Πλεύση_2 ($24.5 \frac{m}{s}$)	32.87 – 32.1	23.85 – 24.45	75.6 – 62.7	26-34
Επιτήρηση ($13 \frac{m}{s}$)	33.44 – 33.25	4.63 – 4.66	62.7 – 59.6	34-44
Πλεύση_3 ($24.5 \frac{m}{s}$)	31.85 – 31	24.6 – 25.27	59.6 – 46.2	44-52
Πλεύση_4 ($18 \frac{m}{s}$)	31.92 – 31.15	12.32 – 12.63	46.2 – 33.9	52-67

Πίνακας 8.6: Λειτουργία ηλεκτρικού συσσωρευτή

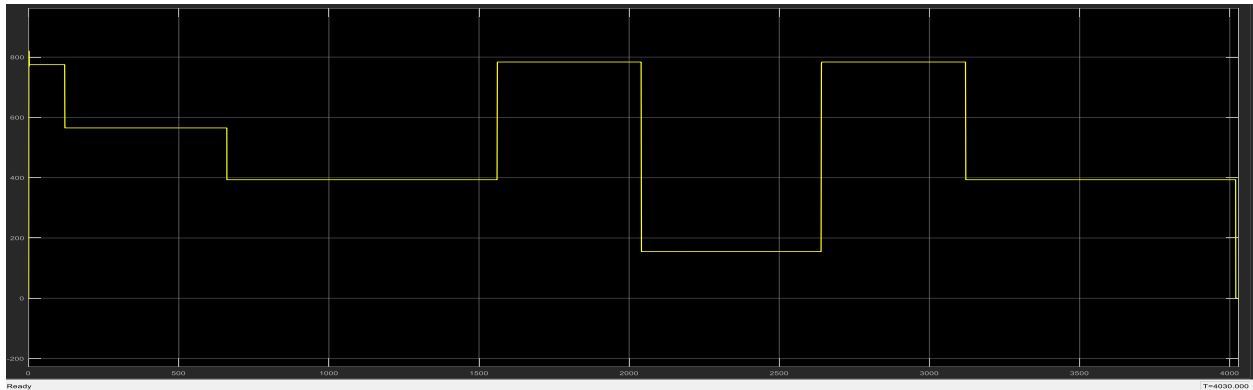
Κατά τα δύο πρώτα στάδια της πτήσης (απογείωση-αναρρίχηση) οι γραφικές παραστάσεις λειτουργίας του συσσωρευτή (εικόνες 8.7/8/9/10 και 8.15/16/17/18) είναι ακριβώς ίδιες, όπως και οι τιμές των πινάκων, γεγονός που αναμέναμε, αφού και στις δύο περιπτώσεις τα φ/β στοιχεία δε συμμετέχουν στην τροφοδοσία του συστήματος. Στη συνέχεια η εικόνα είναι διαφορετική, αφού στα γραφήματα (8.15/16/17/18) παρατηρούμε πιο έντονη κλίση της τάσης και του ρεύματος λειτουργίας του συσσωρευτή, ενώ η στάθμη φόρτισης μειώνεται ταχύτατα. Η παρατήρηση αυτή φαντάζει λογική και οφείλεται στην ανάγκη κάλυψης των ενεργειακών απαιτήσεων του φορτίου αποκλειστικά από τη μπαταρία. Εξετάζοντας τη γραφική παράσταση της εικόνας (8.18) βλέπουμε πως το μέγεθος SOC δεν ξεπερνά το κατώτατο επιτρεπόμενο όριο (30%), κάτι στο οποίο αποσκοπούσαμε εξαρχής. Κλείνοντας με το πρώτο σενάριο προσομοίωσης, παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις εξόδου του μετατροπέα DC/DC, οι οποίες δε διαφέρουν ιδιαίτερα από αυτές των εικόνων (8.11/12/13), με εξαίρεση το επίπεδο του μεταφερόμενου ρεύματος, το οποίο φυσικά είναι αυξημένο (πίνακας 8.7). Τέλος, όσον αφορά την απόκλιση μεταξύ ρεύματος φορτίου και ρεύματος τροφοδοσίας δεν παρατηρείται καμία διαφορά από τη γραφική παράσταση της εικόνας (8.14).



Εικόνα 8.19: Τάση εξόδου DC/DC Converter



Εικόνα 8.20: Ρεύμα εξόδου DC/DC Converter



Εικόνα 8.21: Ισχύς στην έξοδο του DC/DC Converter

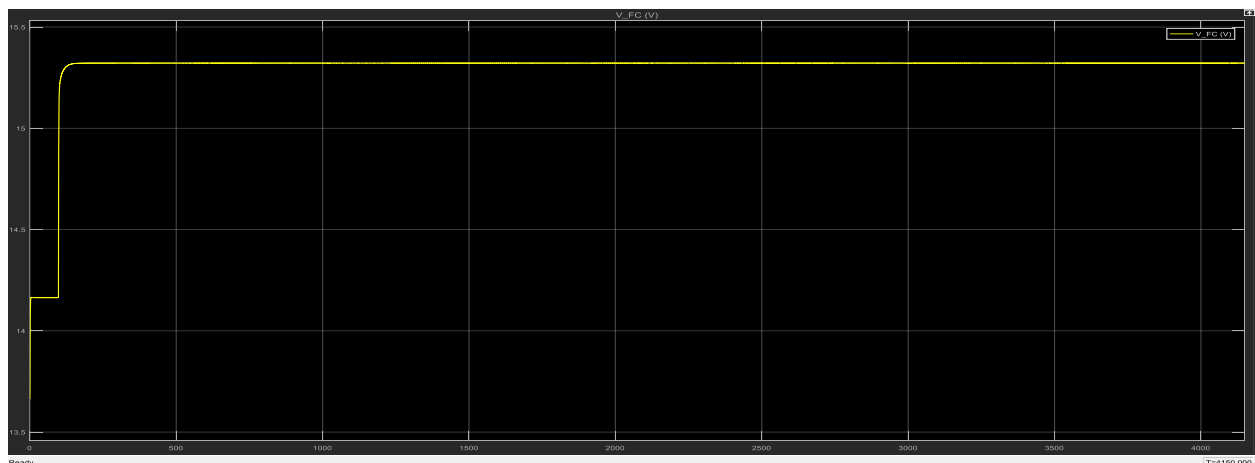
Αναλυτικά οι τιμές των παραπάνω γραφημάτων:

Φάση Πτήσεως	Τάση Εξόδου (V)	Ρεύμα Εξόδου (A)	Ισχύς Εξόδου (W)	Χρονική Διάρκεια (λεπτά)
Απογείωση ($7.546 \frac{m}{s}$)	48	16.146	775	0-2
Αναρρίχηση ($7.546 \frac{m}{s}$)	48	11.771	565	2-11
Πλεύση_1 ($18 \frac{m}{s}$)	48	8.192	393.2	11-26
Πλεύση_2 ($24.5 \frac{m}{s}$)	48	16.326	783.65	26-34
Επιτήρηση ($13 \frac{m}{s}$)	48	3.227	154.9	34-44
Πλεύση_3 ($24.5 \frac{m}{s}$)	48	16.326	783.65	44-52
Πλεύση_4 ($18 \frac{m}{s}$)	48	8.192	393.2	52-67

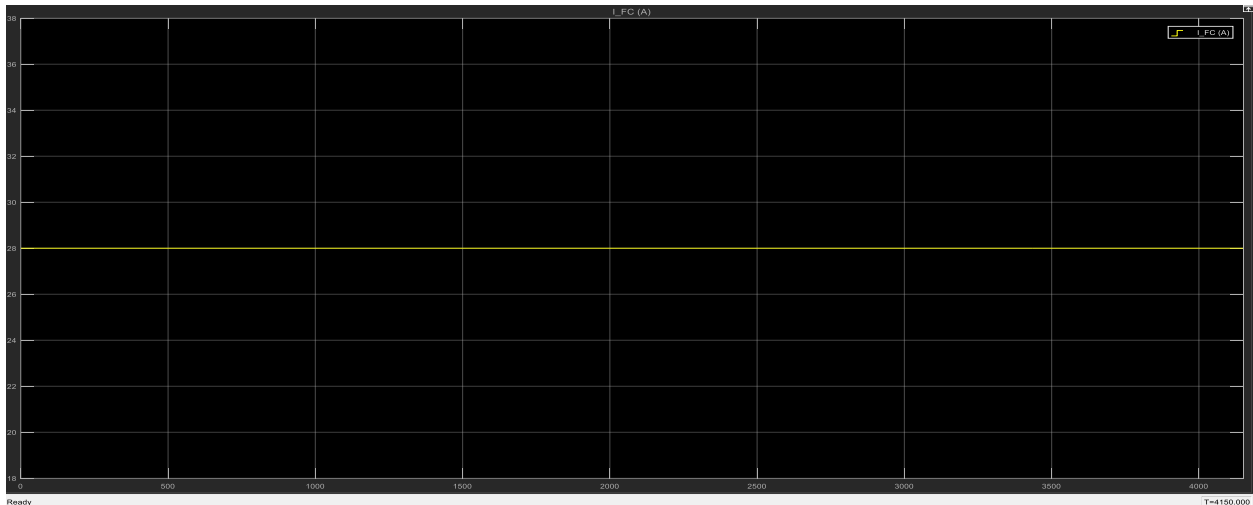
Πίνακας 8.7: Χαρακτηριστικά μεγέθη στην έξοδο του μετατροπέα

8.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης: Σενάριο 2

Στο σενάριο αυτό, το μεγαλύτερο μέρος των ενεργειακών απαιτήσεων, καθόλη τη διάρκεια της πτήσης, καλύπτεται από τη συστοιχία κυψελών καυσίμου, η οποία λειτουργεί σταθερά στα 430W. Κατά την εκκίνηση της προσομοίωσης παρέχεται ο απαραίτητος χρόνος (~100sec) ώστε η έξοδος της κυψέλης να σταθεροποιηθεί. Από φυσικής πλευράς, το διάστημα αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως ο χρόνος προετοιμασίας του αεροσκάφους, πρώτου μεταβεί στη φάση απογείωσης (δηλαδή πριν αρχίσει να αναπτύσσει ταχύτητα επί του διαδρόμου). Όσον αφορά τον ηλεκτρικού συσσωρευτή που επιλέχθηκε (25.2V / 9ah), αυτός εκφορτίζεται κατά τις φάσεις της απογείωσης, της αναρρίχησης και της πλεύσης υπό μέγιστη ταχύτητα, ώστε να συμπληρώνεται το επιπλέον φορτίο που αδυνατεί να καλύψει η κυψέλη. Κατά την υπόλοιπη διάρκεια της πτήσης, ο συσσωρευτής συμπεριφέρεται ως ένα επιπλέον φορτίο, με την κυψέλη να αναλαμβάνει τη φόρτιση αυτού. Η διαδικασία φόρτισης της μπαταρίας είναι δευτερευούσης σημασίας και επιτέλεται εφόσον οι ενεργειακές απαιτήσεις πτήσεως ικανοποιούνται απολύτως. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις που λήφθηκαν σχετικά με την τάση, το ρεύμα και την ισχύ εξόδου των πηγών παραγωγής, την απόκλιση μεταξύ του παρεχόμενου και του απαιτούμενου ρεύματος καθώς και την ισχύ εισόδου-εξόδου των μετατροπέων.



Εικόνα 8.22: Τάση λειτουργίας FC



Εικόνα 8.23: Παραγόμενο ρεύμα από FC



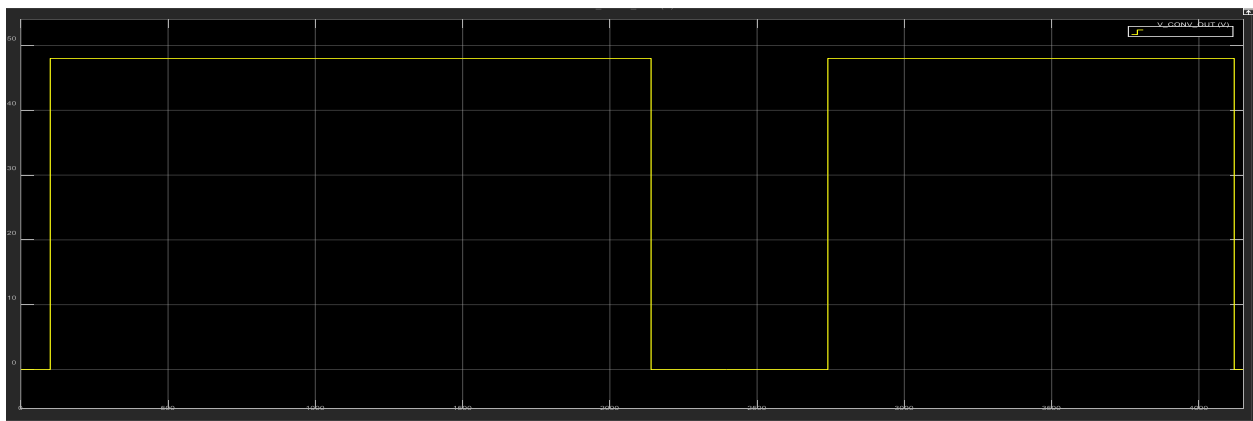
Εικόνα 8.24: Παραγόμενη ισχύς από FC

Εξετάζοντας τις εικόνες (8.22/23/24) βλέπουμε πως τα χαρακτηριστικά μεγέθη εξόδου της κυψέλης σταθεροποιούνται περίπου 100sec αφότου τη θέσουμε σε λειτουργία. Αυτό δεν ισχύει φυσικά για το ρεύμα που ζητείται από την κυψέλη, αφού η τιμή του αποτελεί τη βασική είσοδο του μοντέλο και καθορίζεται εξαρχής από το χρήστη. Παρατηρούμε πως η τάση λειτουργίας, το ρεύμα και η ισχύς παραγωγής τη κυψέλης διατηρούνται σταθερά (όπως επιθυμούμε), με τις αναλυτικές τιμές των μεγεθών αυτών να δίνονται παρακάτω:

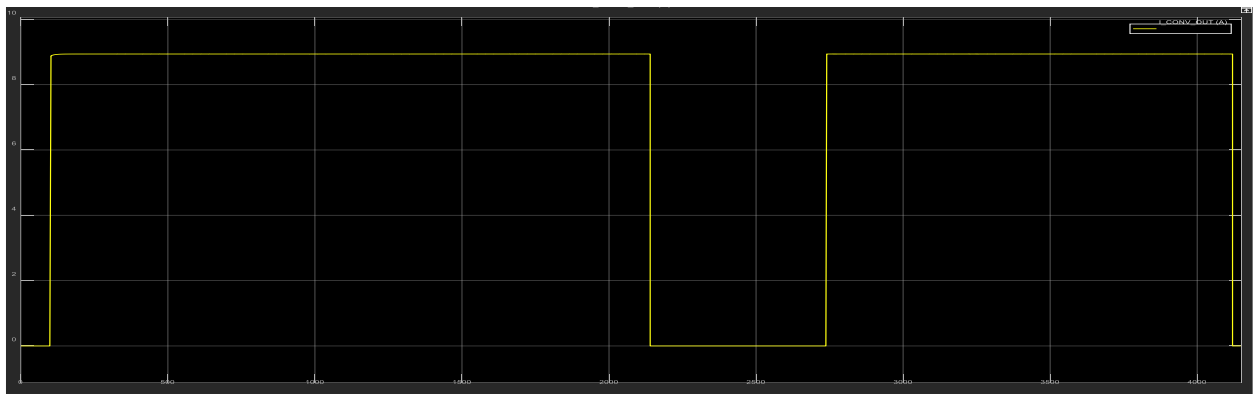
Χαρακτηριστικά Γραφημάτων	Σημείο Λειτουργίας	Κυμάτωση
ΤΑΣΗ (V)	15.32	0.0006
ΡΕΥΜΑ (A)	28	0
ΙΣΧΥΣ (W)	429	0.018

Πίνακας 8.8: Χαρακτηριστικά σημεία λειτουργίας FC

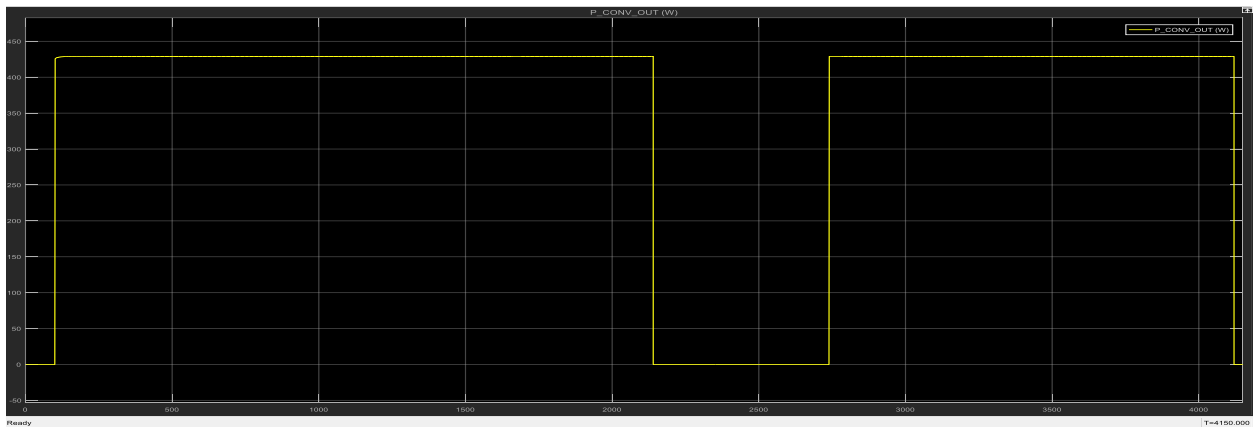
Πρωτού προβούμε στην παρουσίαση των γραφημάτων των μεγεθών εξόδου του μετατροπέα που παρεμβάλλεται μεταξύ FC-φορτίου, αναφέρουμε το εξής: Κατά τη φάση της επιτήρησης και συλλογή δεδομένων, ή αλλιώς κατά την εκτέλεση της αποστολής, οι ενεργειακές απαιτήσεις φορτίου είναι ιδιαίτερα μειωμένες (~155W). Υπό τον περιορισμό του μέγιστου ρεύματος φόρτισης της μπαταρίας (0.5C~1C / 4.5A συνιστάμενο) το συνολικό φορτίο που καλείται να καλύψει η κυψέλη είναι ιδιαίτερα μικρό. Η λειτουργία της κυψέλης σε ένα τόσο χαμηλό σημείο (< 300W) μπορεί να οδηγήσει σε μόνιμη βλάβη της συσκευής και σημαντικές επιπλοκές κατά την πτήση. Προς αποφυγή τέτοιων φαινομένων θέσαμε εκτός του συστήματος τροφοδοσίας την έξοδο της κυψέλης για τη φάση εκτέλεσης της αποστολής, κάτι που φαίνεται χαρακτηριστικά στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν:



Εικόνα 8.25: Τάση εξόδου DC/DC Converter



Εικόνα 8.26: Ρεύμα εξόδου DC/DC Converter



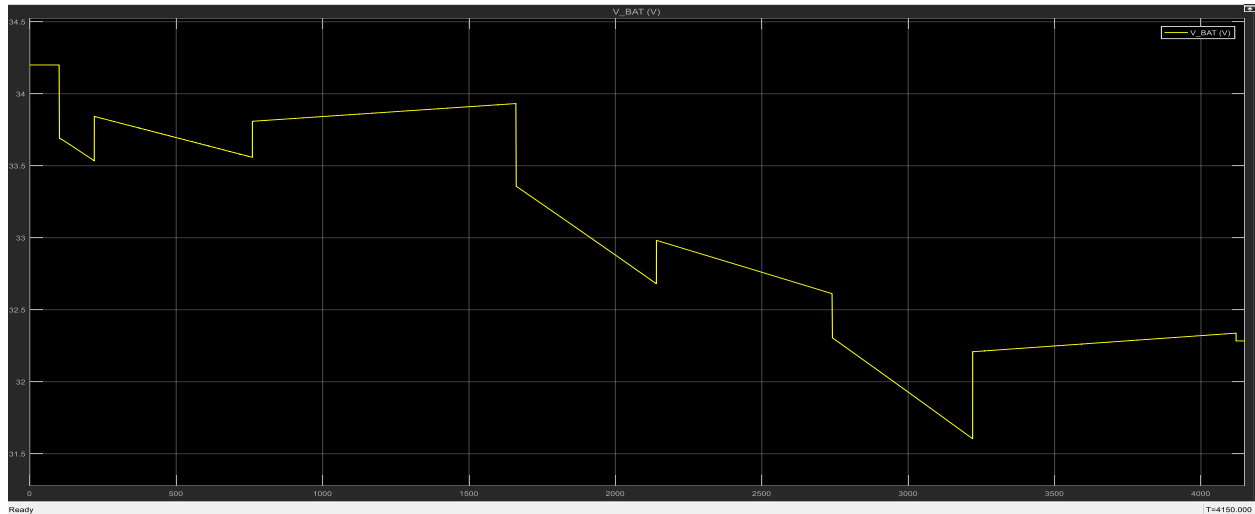
Εικόνα 8.27: Ισχύς εξόδου του DC/DC Converter

Όπως παρατηρείται, οι έξοδοι της κυψέλης μηδενίζονται για το χρονικό διάστημα των δέκα λεπτών που διαρκεί η φάση της επιτήρησης και συλλογής δεδομένων, δηλαδή στην ουσία η PEMFC τίθεται εκτός λειτουργίας. Στη συνέχεια οι τιμές της επανέρχονται στα κανονικά επίπεδα λειτουργίας, με τα μεγέθη εξόδου του μετατροπέα να λαμβάνουν τις κάτωθι τιμές:

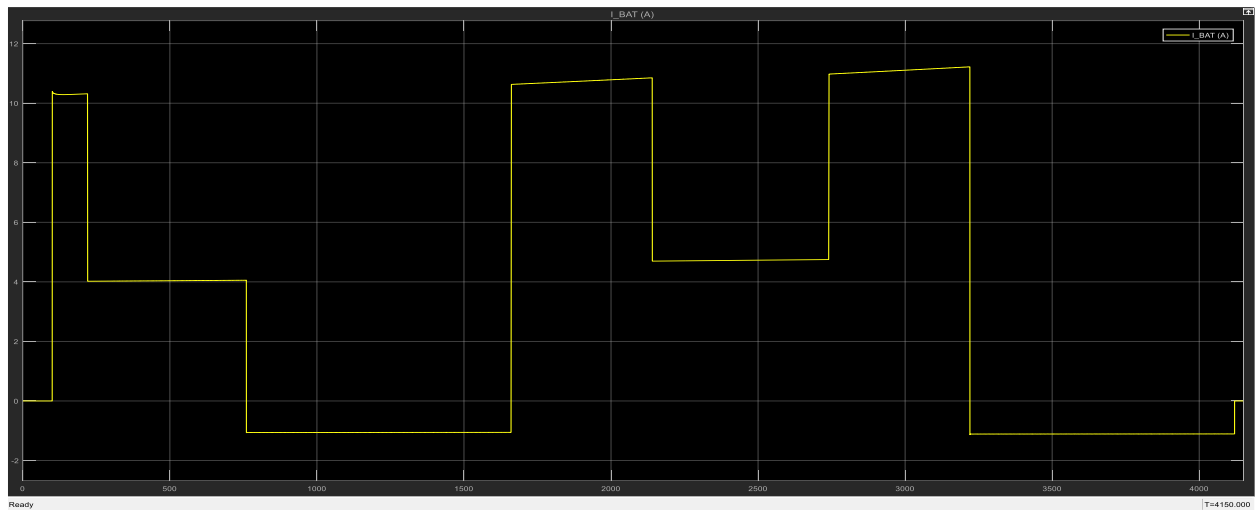
ΜΕΓΕΘΟΣ ΕΞΟΔΟΥ	ΤΙΜΗ
ΤΑΣΗ (V)	48
ΡΕΥΜΑ (A)	8.9375
ΙΣΧΥΣ (W)	429

Πίνακας 8.9: Χαρακτηριστικά μεγέθη εξόδου του μετατροπέα

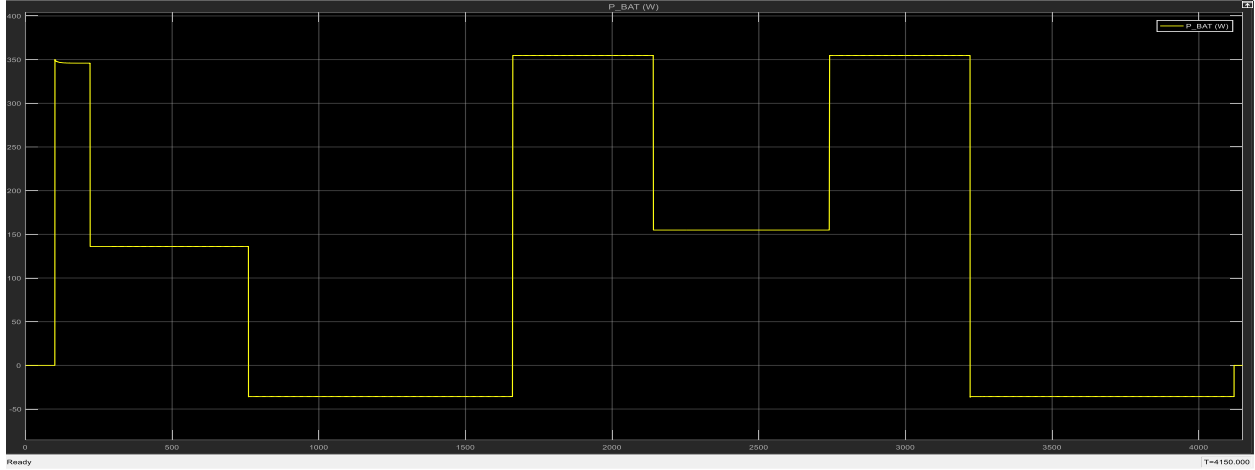
Ακολούθως, παρατίθενται οι γραφικές παραστάσεις των χαρακτηριστικών μεγεθών λειτουργίας του ηλεκτρικού συσσωρευτή. Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν αναμένουμε μία απότομη άνοδο του ρεύματος εκφόρτισης και της παρεχόμενης ισχύος κατά τη φάση της επιτήρησης αλλά και της μέγιστης ταχύτητας, ενώ η παρουσία αρνητικού ρεύματος πρέπει να είναι εμφανής κατά την υπόλοιπη διάρκεια της πτήσης (διαδικασία φόρτισης).



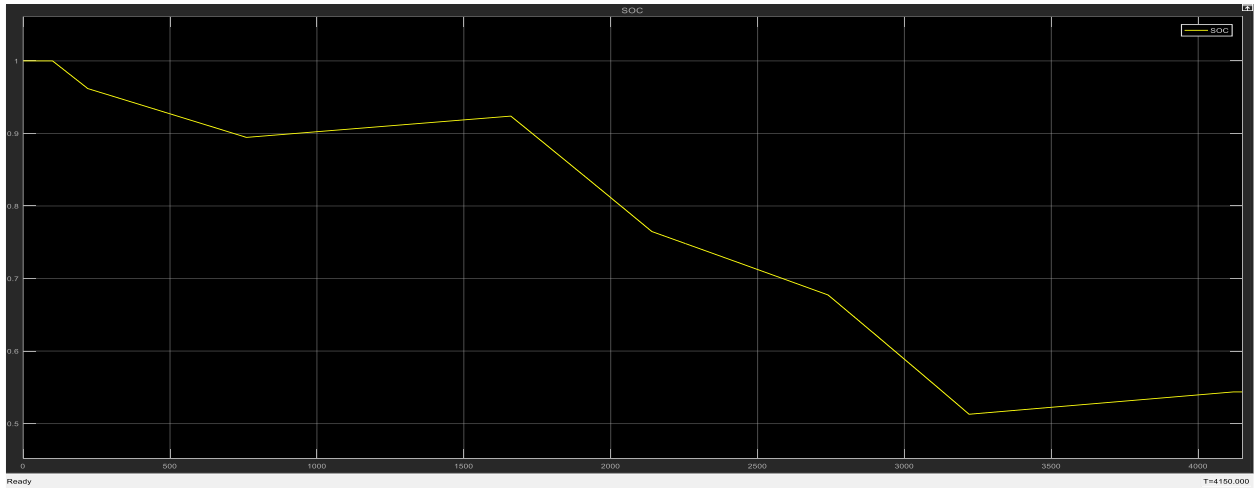
Εικόνα 8.28: Τάση λειτουργίας ηλεκτρικού συσσωρευτή (25V/9ah)



Εικόνα 8.29: Ρεύμα εκφόρτισης ηλεκτρικού συσσωρευτή (25V/9ah)



Εικόνα 8.30: Εξαγόμενη ισχύς από τη μπαταρία (25V/9ah)



Εικόνα 8.31: Συνολική στάθμη φόρτισης της μπαταρίας

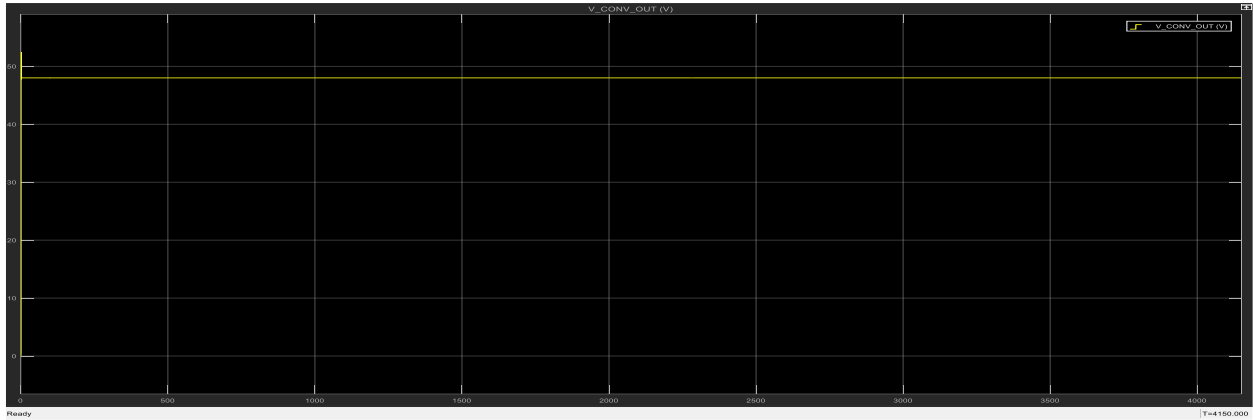
Αναλυτικά, τα αποτελέσματα σχετικά με τα χαρακτηριστικά μεγέθη της μπαταρίας εκτίθενται παρακάτω:

Φάση Πτήσεως	Τάση Λειτουργίας (V)	Ρεύμα (Εκ)φόρτισης (A)	Στάθμη Φόρτισης (%)	Χρονική Διάρκεια (λεπτά)
Απογείωση ($7.546\frac{m}{s}$)	33.69 – 33.53	10.39 – 10.32	100 – 96.2	0-2
Αναρρίχηση ($7.546\frac{m}{s}$)	33.84 – 33.56	4.02 – 4.06	96.2 – 89.9	2-11
Πλεύση_1 ($18\frac{m}{s}$)	33.81 – 33.93	(-)1.06 (φόρτιση)	89.9 – 92.4	11-26
Πλεύση_2 ($24.5\frac{m}{s}$)	33.36 – 32.68	10.63 – 10.85	92.4 – 76.5	26-34
Επιτήρηση ($13\frac{m}{s}$)	32.98 – 32.61	4.70 – 4.75	76.5 – 67.7	34-44
Πλεύση_3 ($24.5\frac{m}{s}$)	32.31 – 31.60	10.98 – 11.22	77.2 – 51.3	44-52
Πλεύση_4 ($18\frac{m}{s}$)	32.21 – 32.34	(-)1.11 (φόρτιση)	51.3 – 54.4	52-67

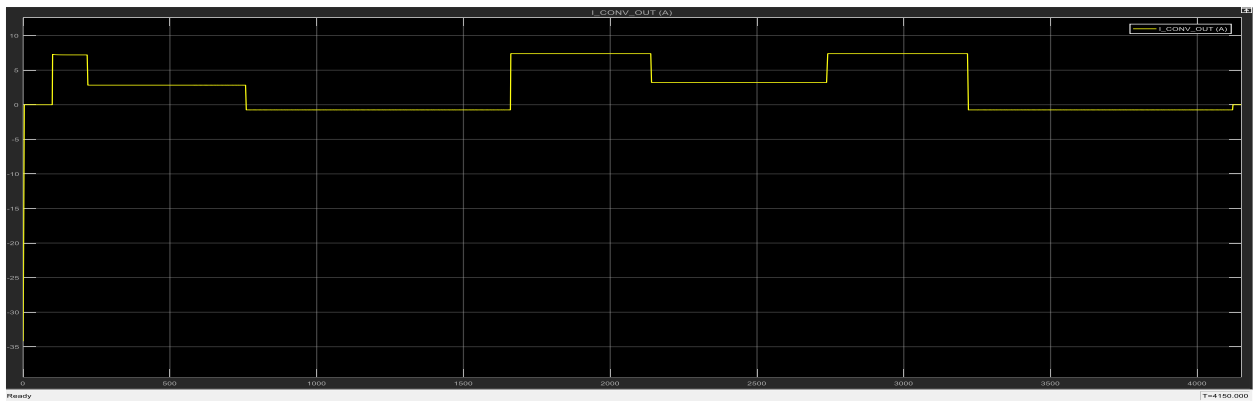
Πίνακας 8.10: Λειτουργία ηλεκτρικού συσσωρευτή

Όπως βλέπουμε από τον πίνακα (8.10) αλλά και τις εικόνες (8.28/29/30) η συμπεριφορά του ηλεκτρικού συσσωρευτή είναι φυσιολογική, αφού παρατηρείται μεταβολή της τάσης και του ρεύματος λειτουργίας αναλόγως τις απαιτήσεις του φορτίου. Κατά τη διαδικασία εκφόρτισης, η τάση μειώνεται γραμμικά ενώ, αντιθέτως, το ρεύμα αυξάνεται ελαφρώς. Κατά τη φάση της απογείωσης παρατηρείται το εξής παράδοξο: η τάση μειώνεται γραμμικά, ενώ το ρεύμα αντί να αυξηθεί μειώνεται επίσης. Το συμπέρασμα αυτό δεν είναι απολύτως σωστό, αφού στην ουσία η τιμή 10.39 δεν αντιπροσωπεύει το ρεύμα του συσσωρευτή καθώς αυτός βρίσκεται υπό τάση 33.69V, αλλά μία λίγο αυξημένη τιμή, που οφείλεται στην είσοδο της κυψέλης στο σύστημα (100 sec). Στη συνέχεια το ρεύμα μειώνεται ταχύτατα στην πρέπουσα τιμή (~10.29A) και η λειτουργία του συσσωρευτή συνεχίζεται ομαλά. Σχετικά με τη στάθμη και το ρεύμα φόρτισης της μπαταρίας, δε σημειώνεται κάτι το ανησυχητικό αφού η τιμή του ρεύματος είναι ιδιαίτερα χαμηλή (~0.12C), ενώ το βάθος εκφόρτισης δεν ξεπερνά το 50%.

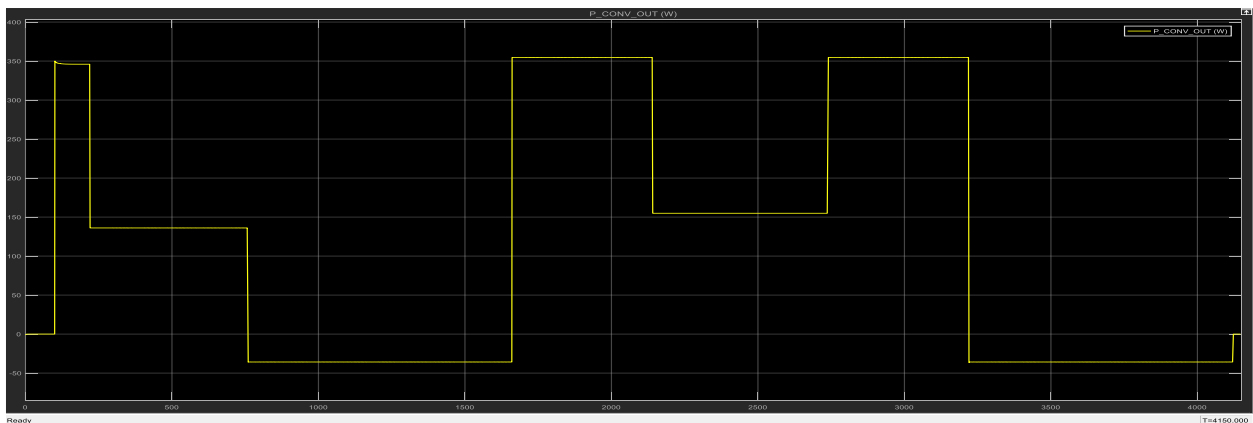
Στη συνέχεια ακολουθούν οι κυματομορφές των μεγεθών εξόδου του μετατροπέα που παρεμβάλλεται μεταξύ μπαταρίας και φορτίου:



ΕΙΚΟΝΑ 8.11.A: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ DC/DC CONVERTER



ΕΙΚΟΝΑ 8.11.B: ΡΕΥΜΑ ΕΞΟΔΟΥ DC/DC CONVERTER



ΕΙΚΟΝΑ 8.11.Γ: ΙΣΧΥΣ ΣΤΗΝ ΕΞΟΔΟ ΤΟΥ DC/DC CONVERTER

Όπως αναμέναμε, στην έξοδο του μετατροπέα τα μεγέθη λαμβάνουν σταθερές τιμές, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του ζυγού τροφοδοσίας αλλά και τις ενεργειακές απαιτήσεις του συστήματος. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται παρακάτω:

Φάση Πτήσεως	Τάση Εξόδου (V)	Ρεύμα Εξόδου (A)	Ισχύς Εξόδου (W)	Χρονική Διάρκεια (λεπτά)
Απογείωση ($7.546\frac{m}{s}$)	48	7.21	346	0-2
Αναρρίχηση ($7.546\frac{m}{s}$)	48	2.84	136	2-11
Πλεύση_1 ($18\frac{m}{s}$)	48	-0.75 (φόρτιση)	(-)35.8 (φόρτιση)	11-26
Πλεύση_2 ($24.5\frac{m}{s}$)	48	7.39	354.6	26-34
Επιτήρηση ($13\frac{m}{s}$)	48	3.23	154.9	34-44
Πλεύση_3 ($24.5\frac{m}{s}$)	48	7.39	354.6	44-52
Πλεύση_4 ($18\frac{m}{s}$)	48	-0.75	(-)35.8 (φόρτιση)	52-67

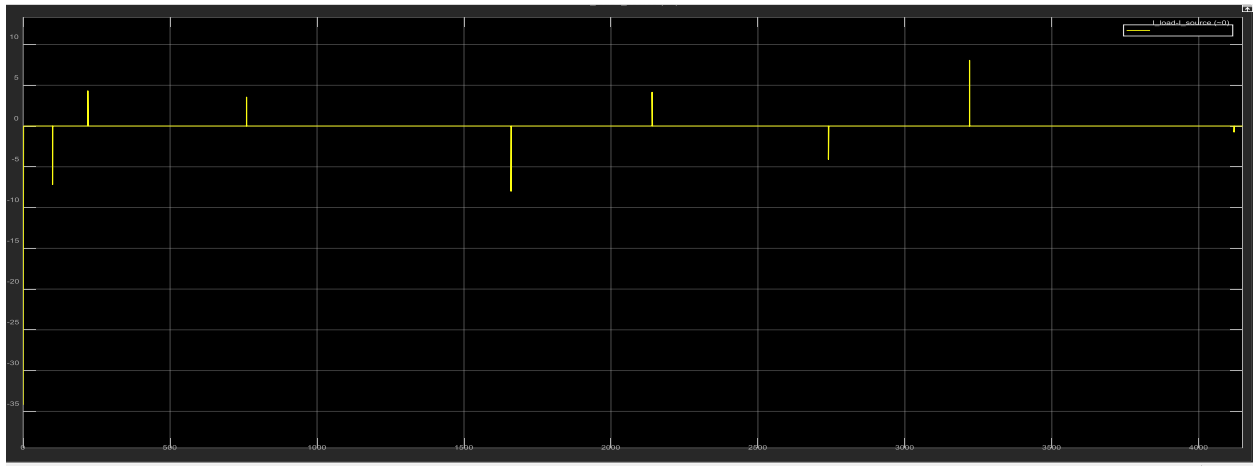
Πίνακας 8.11: Χαρακτηριστικά μεγέθη στην έξοδο του μετατροπέα

Στη συνέχεια παρέχεται η συνεισφορά κάθε πηγής στο συνολικό φορτίο σύμφωνα με τους πίνακες (8.9) και (8.11):

Φάση Πτήσεως	Ισχύς FC (W)	Ισχύς Συσσωρευτή (W)	Ισχύς Φορτίου (W)	Ποσοστό Συμμετοχής (%)	
				FC	Μπαταρία
Απογείωση ($7.546 \frac{m}{s}$)	429	346	775	55.35	44.65
Αναρρίχηση ($7.546 \frac{m}{s}$)	429	136	565	75.93	24.07
Πλεύση_1 ($18 \frac{m}{s}$)	429	(-)35.8 (φόρτιση)	393.2	100	(-)9 (φορτίο)
Πλεύση_2 ($24.5 \frac{m}{s}$)	429	354.6	783.6	54.75	45.25
Επιτήρηση ($13 \frac{m}{s}$)	0	154.9	154.9	0	100
Πλεύση_3 ($24.5 \frac{m}{s}$)	429	354.6	783.6	54.75	45.25
Πλεύση_4 ($18 \frac{m}{s}$)	429	(-)35.8 (φόρτιση)	393.2	100	(-)9 (φορτίο)

Πίνακας 8.12: Συνεισφορά πηγών στο συνολικό φορτίο

Από τον πίνακα (8.12) αποδεικνύεται ο προηγούμενος ισχυρισμός μας, πως το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου καλύπτεται από τη συστοιχία κυψελών καυσίμου κατά τη διάρκεια της πτήσης. Επίσης παρατηρείται η συμπεριφορά του ηλεκτρικού συσσωρευτή ως ένα επιπλέον φορτίο κατά τη φάση πλεύσεως υπό κανονική ταχύτητα καθώς και η καλύψη του συνόλου του φορτίου από αυτόν κατά τη φάση της επιτήρησης. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων ολοκληρώνεται με την παράθεση του γραφήματος της διαφοράς μεταξύ του ρεύματος που παρέχεται και του ρεύματος που ζητείται από το φορτίο. Με μία γρήγορη ματιά, παρατηρούμε πως η μορφή του είναι παρόμοια με αυτή του πρώτου σεναρίου προσομοίωσης, με κύρια διαφορά την παρουσία ενός αρνητικού παλμού κατά τη στιγμή εισαγωγής των πηγών τροφοδοσίας στο σύστημα.



Πίνακας 8.13: Απεικόνιση διαφοράς ρεύματος τροφοδοσίας και ρεύματος φορτίου

8.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

Έχοντας ολοκληρώσει την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσμοίωσης, μπορούμε να προβούμε σε κάποια συμπεράσματα σχετικά με τη δυνατότητα ενσωμάτωσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο σύστημα τροφοδοσίας ενός μη επανδρωμένου αεροσκάφους, την κατάλληλη επιλογή μεταξύ των πηγών που εξετάστηκαν καθώς και τη διαστασιολόγηση αυτών.

Αρχικά, όπως παρουσιάστηκε στο 6^ο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η συμπερίληψη ΑΠΕ στο σύστημα τροφοδοσίας του UAV δεν αποτελεί κάποιο ιδιαίτερα σύνθετο ζήτημα, όσον αφορά τον προσδιορισμό των ενεργειακών απαιτήσεων πτήσεως του αεροσκάφους. Φυσικά προϋποτίθεται η γνώση κάποιων μεγεθών σχετικών με την αεροδυναμική συμπεριφορά του αεροχήματος καθώς και η μεταβολή αυτών συναρτήσει του συνολικού βάρους. Εφόσον οι πληροφορίες αυτές είναι γνωστές, μπορεί να εξεταστεί οποιοσδήποτε συνδυασμός (ανανεώσιμων) πηγών παραγωγής ηλεκτρικής (ή άλλης μορφής) ενέργειας, αρκεί να υπάρχει συμφωνία μεταξύ της τελικής μορφής της ενέργειας αυτής και του μηχανισμού μετατροπής της σε δυνάμεις πρόωσης και άντωσης του αεροσκάφους.

Όσον αφορά τα δύο σενάρια που εξετάστηκαν εδώ, παρατηρούμε πως η συμμετοχή της κυψέλης καυσίμου στο σύστημα παρέχει ιδιαίτερη υψηλή αυτονομία πτήσης, η οποία μάλιστα δεν αξιοποιείται στο έπακρο. Με τους θεωρητικούς υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν στο κεφάλαιο 7 είδαμε πως μία πολύ μικρή ποσότητα υδρογόνου (65g), η οποία είναι αποθηκευμένη προς τροφοδοσία της κυψέλης, επαρκεί για 200 λεπτά πτήσης, δηλαδή περίπου 3 φορές το χρόνο εκτέλεσης της αποστολής που επιλέχθηκε. Μία σχετική απόκλιση αναμενόταν, καθώς η διαστασιολόγηση των πηγών έγινε με αναφορά το πρώτο σενάριο

προσομοίωσης (φ/β-μπαταρία), ενώ προκειμένου να είναι απλή και επουσιώδης η σύγκριση των αποτελεσμάτων, οι απαιτήσεις της αποστολής έπρεπε να είναι ίδιες για τα δύο σενάρια. Σε κάθε περίπτωση, η υψηλή αποδοτικότητα που χαρακτηρίζει τις σύγχρονες κυψέλες καυσίμου σε συνδυασμό με την υψηλή ενεργειακή πυκνότητα του υδρογόνου αποδυναμώνεται, με βάση τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης, πως είναι ικανή να τροφοδοτήσει φορτία μεγάλου εύρους για μεγάλο χρονικό διάστημα. Βέβαια το γεγονός αυτό δεν επέρχεται χωρίς κόστος. Πιο συγκεκριμένα, συγκρίνοντας τα υβριδικά συστήματα που εξετάστηκαν, από οικονομικής σκοπιάς είναι εμφανές πως η παράλληλη λειτουργία φ/β στοιχείων και ηλεκτρικού συσσωρευτή αποτελεί τη βέλτιστη επιλογή. Το γεγονός αυτό δεν οφείλεται αποκλειστικά στο υψηλό αρχικό κόστος αγοράς κυψέλης καυσίμου και υδρογόνου, αλλά και σε ένα σημαντικό πλεονέκτημα που συνεπάγεται η παρουσία φ/β στοιχείων: την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθόλη τη διάρκεια της ημέρας. Ως συνέπεια, παρέχεται η δυνατότητα φόρτισης της μπαταρίας του αεροσκάφους, καθώς αυτό είναι προσημασμένο. Έτσι μετά την εκτέλεση της αποστολής, η μπαταρία φορτίζεται εκ νέου, με μηδαμινό ενεργειακό και οικονομικό κόστος, κάτι το οποίο δε συνεπάγεται άμεσα η παρουσία της κυψέλης καυσίμου.

Ένα επίσης σημαντικό συμπέρασμα προκύπτει σχετικά με την αξιοπιστία του συστήματος τροφοδοσίας και πως αυτή συνδέεται με το συνολικό βάρος αυτού. Σύμφωνα με τον πίνακα (6.1) το συνολικό βάρος της κυψέλης καυσίμου (συστοιχία κυψελών-δεξαμενη-υδρογόνο) υπολογίζεται στα 6.15kg, δηλαδή περίπου 1.75 φορές μεγαλύτερο από το βάρος των φ/β στοιχείων (3.5kg). Ως αποτέλεσμα, η συμπερίληψη της κυψέλης στο σύστημα του αεροσκάφους θέτει σημαντικούς περιορισμούς σχετικά με τη διαστασιολόγηση του ηλεκτρικού συσσωρευτή ιδίως όσον αφορά το βάρος του. Το γεγονός αυτό μπορεί να μην επηρεάζει άμεσα την αποδοτικότητα του συστήματος τροφοδοσίας (αφού με την επιλογή μίας κυψέλης συγκεκριμένων προδιαγραφών μπορούν να καλυφθούν εξ ολοκλήρου οι ενεργειακές απαιτήσεις του αεροσκάφους), εμπεριέχει όμως μεγάλο κίνδυνο σε περίπτωση βλάβης κατά τη λειτουργία της κυψέλης, ιδιαίτερα κατά την εκτέλεση αποστολών μεγάλης διάρκειας. Πιο συγκεκριμένα, εάν η κυψέλη καυσίμου τεθεί αναγκαστικά εκτός λειτουργίας, η παρουσία ενός συσσωρευτή περιορισμένων δυνατοτήτων μπορεί να μην είναι αρκετή ώστε να πραγματοποιηθεί η ασφαλής επιστροφή του uan στη βάση απογείωσης ή έστω να προσεδαφιστεί σε κάποια κοντινή περιοχή. Με άλλα λόγια μειώνεται ο βαθμός αξιοπιστίας του συστήματος τροφοδοσίας. Παρατηρώντας τα στοιχεία του πίνακα (8.10) βλέπουμε πως κατά τα τελευταία στάδια της πτήσεως η στάθμη φόρτισης της μπαταρίας είναι μόλις ~50%. Μία ενδεχόμενη βλάβη της κυψέλης κατά τη φάση αυτή, είναι πολύ πιθανό να αναγκάσει τη μπαταρία ιόντων-λιθίου να εκφορτιστεί πέραν του επιτρεπόμενου ορίου κάτι το οποίο συνεπάγεται φαινόμενα ανάφλεξης στο εσωτερικό της. Φυσικά κάτι τέτοιο δεν παρατηρείται κατά την εκτέλεση του πρώτου σεναρίου, αφού εκεί το χαμηλό συνολικό βάρος των φ/β στοιχείων επιτρέπει την παρουσία ενός ισχυρού ηλεκτρικού συσσωρευτή, με αποτέλεσμα, ακόμα και σε περίπτωση δυσλειτουργίας τους, το αεροσκάφος να μπορεί να εκτελέσει με

ασφάλεια την αποστολή. Βέβαια μία τέτοια σύγκριση μπορεί να μην είναι απολύτως σωστή, καθώς αν παρατηρήσουμε προσεκτικά τα στοιχεία των πινάκων (8.12) και (8.5) βλέπουμε πως το ρόλο της κύριας πηγής τροφοδοσίας του συστήματος αποτελούν (στο δεύτερο σενάριο) η κυψέλη καυσίμου και (στο πρώτο σενάριο) ο ηλεκτρικός συσσωρευτής, με τα φ/β στοιχεία να περιορίζονται σε δευτερεύοντα ρόλο.

Κλείνοντας, πέραν των όσων προαναφέρθηκαν, το θέμα της λειτουργικότητας του αεροσκάφους αποτελεί έναν εκ των σημαντικότερων παραγόντων που πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψιν κατά τη σχεδίαση του συστήματος τροφοδοσίας του. Από αυτή τη σκοπιά, η παρουσία κυψέλης καυσίμου-μπαταρίας υπερέρχει σαφέστατα. Η λειτουργία της κυψέλης δεν επηρεάζεται επ' ουδενί λόγω από τις καιρικές συνθήκες και γενικότερα από εξωτερικούς παράγοντες. Οι γραφικές παραστάσεις που ελήφθησαν δε μεταβάλλονται είτε το αεροσκάφος πετά πάνω από την Αθήνα είτε οπουδήποτε αλλού, οποιαδήποτε στιγμή της ημέρας, καθόλη τη διάρκεια του έτους. Στην αντίθετη περίπτωση, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα στο παρόν κεφάλαιο, η μεγάλη εξάρτηση των φ/β στοιχείων από εξωτερικούς παράγοντες, έκρινε απαραίτητη τη μελέτη του πρώτου σεναρίου υπό την πλήρη απουσία των φ/β. Παρόλο που τα αποτελέσματα ήταν οριακά εντός των επιτρεπόμενων ορίων (η στάθμη φόρτισης της μπαταρίας μειώθηκε έως και το 34% / Πίνακας 8.6), η λειτουργία υπό αυτές τις συνθήκες κρίνεται ιδιαίτερα κοστοβόρα από ενεργειακής και οικονομικής σκοπιάς, αφού λόγω του μεγάλου βάθους εκφόρτισης, η διάρκεια ζωής του ηλεκτρικού συσσωρευτή μειώνεται ραγδαία. Εκτός αυτού, μία μικρή βλάβη στον ηλεκτρικό συσσωρευτή θα επέφερε καταστροφικές συνέπειες για το αεροσκάφος, ενώ η παρουσία μη ευνοϊκών συνθηκών πτήσης (πχ κενά αέρος οφειλόμενα σε αέρια ρεύματα) θα απαιτούσε την κατανάλωση μεγαλύτερης ποσότητας ενέργειας με αποτέλεσμα η μπαταρία να μην μπορεί να ανταπεξέλθει και το αεροσκάφος να κρίνεται μη λειτουργικό υπό αυτές τις συνθήκες. Επίσης, ακόμα και σε περίπτωση συμμετοχής των φ/β στο ρόλο της πηγής τροφοδοσίας του ζυγού φορτίου, καθίσταται απαραίτητη η παρουσία εξειδικευμένων συστημάτων διαχείρισης της παραγόμενης ισχύος, καθώς, υπό πραγματικές συνθήκες, παρατηρούνται συνεχώς διακυμάνσεις του ποσοστού συμμετοχής των πηγών, λόγω της μεταβολής του επιπέδου παραγωγής των φ/β.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, η παρουσία μίας κυψέλης καυσίμου στο υβριδικό σύστημα τροφοδοσίας ενός uav προσδίδει αυξημένη αυτονομία πτήσεως στο αεροσκάφος ενώ παράλληλα αυξάνει σημαντικά τη λειτουργικότητά του. Το κόστος προμήθειας του υδρογόνου, καθώς και το κόστος αγοράς της κυψέλης καθιστούν την αξιόπιστη και αποτελεσματικότερη αυτή εναλλακτική επιλογή ιδιαίτερα κοστοβόρα. Αντιθέτως, με τη συμπερίληψη φωτοβολταϊκών στοιχείων το συνολικό οικονομικό κόστος πτήσεως του αεροσκάφους μειώνεται σημαντικά, ιδιαίτερα σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα. Το γεγονός αυτό γίνεται σε βάρος της δυνατότητας του αεροσκάφους να εκτελεί πτήσεις υπό απαιτητικές συνθήκες, κάτι

το οποίο θέτει σημαντικούς περιορισμούς σχετικά με τη συνολική λειτουργικότητα του μη επανδρωμένου εναέριου συστήματος. Σε κάθε περίπτωση, τόσο η κυψέλη καυσίμου όσο και τα φ/β στοιχεία φροντίζουν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω διαδικασιών που συνεπάγονται μηδαμινή περιβαλλοντική επιβάρυνση, ενώ η συνεχώς αυξανόμενη έρευνα στον τομέα των ΑΠΕ προμηνύει την περαιτέρω μείωση του κόστους προμήθειας και λειτουργίας αυτών.

8.4 Προτάσεις για μελλοντικές έρευνες

Η δυνατότητα ενσωμάτωσης των υβριδικών συστημάτων τροφοδοσίας που εξετάσαμε σε μη επανδρωμένα αεροσκάφη διαφορετικού μεγέθους μπορεί να αποτελέσει θέμα μελέτης ως επέκταση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσο τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που προαναφέρθηκαν, διατηρούνται σε αεροχήματα διαφορετικών προδιαγραφών. Μία συγκριτική μελέτη σχετικά με το μήκος του εκπετάσματος διαφόρων μη επανδρωμένων αεροσκαφών κρίνεται ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα, καθώς μπορεί να παρουσιάσει σημαντικές πληροφορίες αναφορικά με τη βέλτιστη χωροταξική κατανομή των φ/β στοιχείων.

Η εξέταση του συστήματος πρόωσης του αεροσκάφους που επιλέχθηκε, σε συνδυασμό με το μηχανισμό μετατροπής της παρεχόμενης ενέργειας, αποτελεί ένα σύνθετο αλλά και πολύ σημαντικό ζήτημα. Στα πλαίσια προέκτασης της εργασίας αυτής, μπορεί να εξεταστεί κατά πόσο η παραδοχή που έγινε σχετικά με το βαθμό απόδοσης του συστήματος ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, καθώς και το ακριβές ποσοστό μεταβολής του βαθμού αυτού κατά τις διαφορετικές φάσεις πτήσεως του uav προς μία λεπτομερέστερη προσομοίωση της συνολικής διαδικασίας.

Τέλος, δύο ακόμη θέματα προτείνονται προς μελέτη. Το πρώτο αφορά το συνολικό μη επανδρωμένο εναέριο σύστημα, τμήμα του οποίου αποτελεί ένα uav. Μία αναλυτική έρευνα σχετικά με τις συνολικές απαιτήσεις του συστήματος, το ενεργειακό και οικονομικό κόστος λειτουργίας διαφόρων συστημάτων προσγείωσης/απογείωσης, επικοινωνίας και χειρισμού του αεροσκάφους μπορεί να δώσει μία ολοκληρωμένη εικόνα σχετικά με τα πλεονεκτήματα/μειονεκτήματα των uav που διατίθενται στις μέρες μας. Το δεύτερο θέμα αναφέρεται στην εξέταση της συνολικής αξιοπιστίας του συστήματος τροφοδοσίας (αστοχία πηγών, ομαλή λειτουργία μετατροπέων, αξιοπιστία ζυγού μεταφοράς) μέσω πιθανοτικών μοντέλων, ώστε να υπάρξει μία ποσοτικοποίηση του χαρακτηριστικού αυτού σχετικά με τα δύο σενάρια που προσομοιώθηκαν.

Βιβλιογραφία

- [1] Austin, R. (2011). *Unmanned aircraft systems: UAVS design, development and deployment* (Vol. 54). John Wiley & Sons.
- [2] Federal Aviation Administration and Office of the Secretary of Transportation, Department of Transportation (2015). *Operation and Certification of Small Unmanned Aircraft Systems* (4910-13-P)
- [3] Karunarathne, L. (2012). *An intelligent power management system for unmanned aerial vehicle propulsion applications* (Doctoral dissertation, Cranfield University).
- [4] Petrescu, R. V., & Petrescu, F. I. (2013). *The Aviation History*. BoD–Books on Demand.
- [5] Blom, J. D. (2010). *Unmanned Aerial Systems: a historical perspective* (Vol. 45). Combat Studies Institute Press.
- [6] Newcome, L. R. (2004). *Unmanned aviation: a brief history of unmanned aerial vehicles*. Aiaa.
- [7] Strategic Defence Intelligence (2015). *The Global UAV Market 2015-2025* (DF0060SR)
- [8] Arjomandi, M., Agostino, S., Mammone, M., Nelson, M., & Zhou, T. (2006). Classification of unmanned aerial vehicles. *Report for Mechanical Engineering class, University of Adelaide, Adelaide, Australia*.
- [9] Τσαβλίδης Ι. (2014). *Πρώιμη Σχεδίαση και Διαστασιολόγηση Υβριδικού Ηλιακού Μη-Επανδρωμένου Αεροσκάφους* (Διπλωματική εργασία). Ανακτήθηκε από <https://ikee.lib.auth.gr>
- [10] Sonntag, R. E., & Borgnakke, C. (2001). *Introduction to engineering thermodynamics* (Vol. 2). New York: Wiley.
- [11] Lieh, J., Spahr, E., Behbahani, A., & Hoying, J. (2011). Design of hybrid propulsion systems for unmanned aerial vehicles. In *47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit* (p. 6146).
- [12] Βουρνάς και Γ. Κονταξής. *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Αθήνα: Ε.Μ.Π., 2001
- [13] Hashemnia, N., & Asaei, B. (2008, September). Comparative study of using different electric motors in the electric vehicles. In *Electrical Machines, 2008. ICEM 2008. 18th International Conference on* (pp. 1-5). IEEE.
- [14] Akshay Balachandran, Akshay Shah, Dr Jayaramulu Challa (2014). Propulsion Selection and Analysis for Unmanned Aerial Vehicles for SAE Aero Design Series, The International Journal Of Engineering And Science, 3(8), 29-35. Ανακτήθηκε από <http://www.theijes.com>
- [15] Wang, C. (2006). *Modeling and control of hybrid wind/photovoltaic/fuel cell distributed generation systems* (Doctoral dissertation, Montana State University-Bozeman, College of Engineering).
- [16] Lazarov V, Notton G, Zarkov Z, Bochev I. *Hybrid power systems with renewable energy sources types, structures, trends for research and development*. In: Proceedings of International Conference ELMA; 2005.
- [17] Ζουντουρίδου Ε. (2006). *Ανάλυση – Λειτουργία Κυψελών Καυσίμου και Προσομοίωση Λειτουργίας Κυψέλης Καυσίμου Μembrάνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEMFC) για την Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας* (Διπλωματική εργασία). Ανακτήθηκε από <http://artemis-new.cslab.ece.ntua.gr>

- [18] Sandra Curtin and Jennifer Gangi (2015). *Fuel Cell Technologies Market Report 2015*. Washington D.C.: Ανακτήθηκε από <https://energy.gov>
- [19] Larminie, J., Dicks, A., & McDonald, M. S. (2003). *Fuel cell systems explained* (Vol. 2). Chichester, UK: J. Wiley.
- [20] U.S. Department of Energy (2017). Ανακτήθηκε από <https://energy.gov/eere/fuelcells/types-fuel-cells>
- [21] National Museum of American History. Ανακτήθηκε από <http://americanhistory.si.edu/fuelcells/basics.htm>
- [22] Kahraman, E., Ozcanlı, S. C., & Ozerdem, B. (2007). An experimental study on performance and emission characteristics of a hydrogen fuelled spark ignition engine. *International journal of hydrogen energy*, 32(12), 2066-2072.
- [23] U.S. Energy Information Administration (2017). Ανακτήθηκε από https://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=hydrogen_use
- [24] U.S. Department of Energy (2017). Ανακτήθηκε από <https://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming>
- [25] Timothy Lipman (2011). *An Overview of Hydrogen Production and Storage Systems with Renewable Hydrogen Case Studies*. Ανακτήθηκε από <http://cesa.org>
- [26] Züttel, A. (2004). Hydrogen storage methods. *Naturwissenschaften*, 91(4), 157-172.
- [27] González-Espasandín, Ó., Leo, T. J., & Navarro-Arévalo, E. (2014). Fuel cells: a real option for unmanned aerial vehicles propulsion. *The Scientific World Journal*, 2014.
- [28] Masson G, Brunisholz M (2016). *A Snapshot of Global Photovoltaic Markets (1992-2015)*. Paris: IEA-PVS, 2016. ISBN 978-3-906042-42-8.
- [29] Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (1980). *Solar engineering of thermal processes*.
- [30] Πουλημένος Γ. (2016). *Πολιτικές Διαχείρισης Ενέργειας σε υβριδικά AC/DC Μικροδίκτυα με ενσωμάτωση Φωτοβολταϊκών Μονάδων και Συστημάτων Συμπαράγωγής* (Διπλωματική εργασία). Ανακτήθηκε από <http://artemis-new.cslab.ece.ntua.gr>
- [31] Klaus Jäger, Olindo Isabella Arno H.M. Smets, René A.C.M.M. van Swaaij, Miro Zeman (2014). *Solar Energy Fundamentals, Technology, and Systems*.
- [32] Solar Energy Research Institute (1982). *Basic Photovoltaic Principles and Methods*. Washington D.C.: U.S. Government Printing Office
- [33] LINAK (2017). Ανακτήθηκε από <http://www.solar-tracking.com>
- [34] Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy in Photovoltaic Systems (August 2016). Ανακτήθηκε από <http://energyprofessionalsymposium.com/?p=8378>
- [35] Bhatt, M. R. (2012). *Solar Power Unmanned Aerial Vehicle: High Altitude Long Endurance Applications (HALE-SPUAV)* (Doctoral dissertation, San Jose State University).
- [36] Dell, R. M., & Rand, D. A. J. (2001). *Understanding batteries*. Royal Society of Chemistry.
- [37] Nelson, J. T., & Green, C. F. (1972). *Organic electrolyte battery systems* (No. HDL-TR-1588). HARRY DIAMOND LABS ADELPHI MD.

- [38] D. Linden, T. Reddy, *Handbook of Batteries* (3rd Edition). McGraw-Hill, New York (2002).
- [39] Alsaidan, I., Khodaei, A., & Gao, W. (2016, September). Determination of optimal size and depth of discharge for battery energy storage in standalone microgrids. In *North American Power Symposium (NAPS), 2016* (pp. 1-6). IEEE.
- [40] Robert J. Gell (2013). *A Study of Lead Acid Battery Self-discharge Characteristics*. Ανακτήθηκε από <http://www.gelcoservices.com.au/docs/Lead%20Acid%20Battery%20Self-Discharge%20Paper.pdf>
- [41] Crompton, T. P. (2000). *Battery reference book*. Newnes.
- [42] Nguyen, T., & Bushnell, L. (2003). Advanced Battery Charging Techniques: Pulse-Charging in Large-Scale Applications-Design of Divide and Conquer Technique for High-Capacity Batteries. *Technical Report*.
- [43] Chin, C. K. (2011). *Extending the endurance, missions and capabilities of most UAVs using advanced flexible/ridged solar cells and new high power density batteries technology*. NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL MONTEREY CA.
- [44] Taiyou Research (2014). *Global Market for Lithium-Ion Batteries - Forecast, Trends & Opportunities 2014-2020*. Ανακτήθηκε από <https://www.marketresearch.com/product/sample-8323376.pdf>
- [45] [Ηλεκτρονικό] <http://batteryuniversity.com>
- [46] Subhronil Chaudhuri (2015). *Power Balance Control of DC Microgrids* (Master of Science Thesis).
- [47] Στρατινάκης Β. (2016). *ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ AC ΚΑΙ DC ΟΙΚΙΑΚΩΝ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΩΝ* (Διπλωματική Εργασία).
- [48] National Renewable Energy Laboratory (2016, February). *Distributed Generation Renewable Energy Estimate of Costs*. Ανακτήθηκε από http://www.nrel.gov/analysis/tech_lcoe_re_cost_est.html?print
- [49] U.S. Department of Energy. Ανακτήθηκε από <https://energy.gov/oe/services/technology-development/smart-grid>
- [50] Porter, S. F., Denkenberger, D., Mercier, C., & May-Ostendorp, E. P. (2014). Reviving the War of Currents: Opportunities to Save Energy with DC Distribution in Commercial Buildings.
- [51] Rashid, M. H. (2010). *Power electronics handbook: devices, circuits and applications*. Academic press.
- [52] Robert W. Erickson. DC-DC Power Converters, *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*.

- [53] Blasi, B. R. (2013). *DC microgrids: review and applications* (Doctoral dissertation, Kansas State University).
- [54] Elsayed, A. T., Mohamed, A. A., & Mohammed, O. A. (2015). DC microgrids and distribution systems: An overview. *Electric Power Systems Research*, 119, 407-417.
- [55] Fletcher, S. D. A., Norman, P., Galloway, S., Rakhra, P., Burt, G., & Lowe, V. (2011). Modeling and simulation enabled UAV electrical power system design. *SAE International Journal of Aerospace*, 4(2011-01-2645), 1074-1083.
- [56] TREATY, N. A. Fuel Cells and Other Emerging Manportable Power Technologies for the NATO Warfighter—Part II: Power Sources for Unmanned Applications.
- [57] Anderson, J. D. (1999). *Aircraft performance and design*. McGraw-Hill Science/Engineering/Math.
- [58] Karunaratne, L., Economou, J. T., & Knowles, K. (2012). Power and energy management system for fuel cell unmanned aerial vehicle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 226(4), 437-454.
- [59] Herwerth, C., Chiang, C., Ko, A., Matsuyama, S., Choi, S. B., Mirmirani, M., ... & Koschany, A. (2007). *Development of a small long endurance hybrid PEM fuel cell powered UAV* (No. 2007-01-3930). SAE Technical Paper.
- [60] West, S. P. (2000). Performance evaluation of switched capacitor battery equalizer.
- [61] Pukrushpan, J. T., Stefanopoulou, A. G., & Peng, H. (2004). *Control of fuel cell power systems: principles, modeling, analysis and feedback design*. Springer Science & Business Media.
- [62] Sumathi, S., Kumar, L. A., & Surekha, P. (2015). Application of MATLAB/SIMULINK in Solar PV Systems. In *Solar PV and Wind Energy Conversion Systems* (pp. 59-143). Springer International Publishing.
- [63] Kolcun, M., Vojtek, M., & Čonka, Z. (2015, May). The implementation of an ideal photovoltaic module in Matlab/Simulink using simpowersystems toolbox. In *Electric Power Engineering (EPE), 2015 16th International Scientific Conference on* (pp. 579-583). IEEE.
- [64] Ye, C., Miao, S., Lei, Q., & Li, Y. (2016). Dynamic Energy Management of Hybrid Energy Storage Systems with a Hierarchical Structure. *Energies*, 9(6), 395.
- [65] Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons.
- [66] Louganski, K. P. (1999). *Modeling and analysis of a DC power distribution system in 21st century airlifters* (Doctoral dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University).

[67] Cao, G. Y. (2009). Mathematical models of dc-dc converters. *Journal of Zhejiang University*, 263-270.

[68] George Gillard (2012, May 10). An introduction and tutorial for PID controllers, by George Gillard. Ανακτήθηκε από http://smithsrobot.weebly.com/uploads/6/0/9/5/60954939/pid_control_document.pdf

[69] Δεσύλλας Α. (2014). Ανάλυση και Διαχείριση Υβριδικού Μικροδικτύου (Διπλωματική εργασία).

[70] Izquierdo, D., Azcona, R., Del Cerro, F. L., Fernandez, C., & Delicado, B. (2010, February). Electrical power distribution system (HV270DC), for application in more electric aircraft. In *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE* (pp. 1300-1305). IEEE.

[71] Erickson, R. W., & Maksimovic, D. (2007). *Fundamentals of power electronics*. Springer Science & Business Media.

Παράρτημα

Παράρτημα 1: Χαρακτηριστικά πηγών τροφοδοσίας

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζονται κάποιες πηγές παραγωγής οι οποίες διαθέτουν όμοια χαρακτηριστικά, με τις πηγές που επιλέχθηκαν στα δύο σενάρια προσομοίωσης

- **Κυψέλη καυσίμου**

Technical characteristics:

The MES Fuel Cells Assembly Systems are composed of PEM Fuel Cell Stacks with microprocessor controlled steering electronics (ECU), valves and blowers.

Performance:

Max. Power Output (about):	Electrical: 500 W; Thermal: 500 W	
Voltage range:	13.2 V – 20.2 V Unregulated DC Output	Stack specific power: 430 W/kg
Hydrogen consumption:	6.5 l/min (0.03 kg/h) (@ full load)	Stack power density: 380 W/l

Gas supply:

Hydrogen purity:	at least 4.5 standard
Hydrogen overpressure:	0.5 – 0.6 bar
Oxygen Supply:	from ambient air
Air pressure:	ambient pressure

No additional humidification of the gases

Operating conditions:

Temperature Stack:	max. 63 °C
Hydrogen management :	Circulation
Ambient temperature:	> 0 up to +35 °C
Working cycle:	Continuous
Cooling:	Forced air cooling
Noise:	60dB (@ 1 metre)

Human Machine Interface:

PC Interface:	Fuel cell supervisor H2
Bus communication:	CAN bus 2.0B

Physical dimensions:

Cell number:	22 cells (61 cm ² active area)
Size Stack (L x B x H):	140 x 174 x 80 mm
Size Stack&Aux (L x B x H):	240 x 215 x 150 mm



Stack Weight:	1.4 kg
Stack&Auxiliary Weight:	2.7 kg

Size ECU (L x B x H):
(¹)with cooling air chamber included

150 x 125 x 76 mm

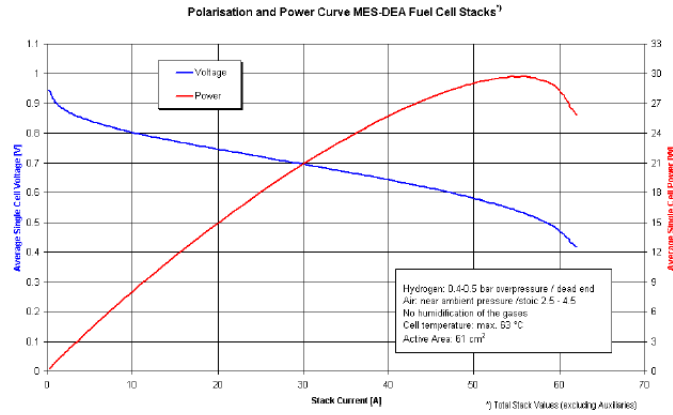
System Weight:

3.8 kg

Suitable applications: portable and light automotive applications



MES reserves the right to change this specification without notice



ΕΙΚΟΝΑ Π.1.1: ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ [74]

- Φωτοβολταϊκό Πάνελ

[Solar Panel Directory](#) / DH-SP-100W



DH-SP-100W
 DH-Solar Co., Ltd.

Price: **From €1.84 / Wp**

Type: **Monocrystalline**

Power Range: **100 Wp**

Region: **China** 🇨🇳

[Enquire](#)

Power Warranty

10 Years of 90% Output Power, 25 Years of 80% Output Power

Electrical Data at STC

Maximum Power (Pmax)	100 Wp
Voltage at Maximum Power (Vmpp)	17.7 V
Current at Maximum Power (Impp)	5.7 A
Open Circuit Voltage (Voc)	21.6 V
Short Circuit Current (Isc)	6.1 A
Panel Efficiency	19 %
Power Tolerance(Positive)	+ 3 %
Power Tolerance(Negative)	- 3 %

Standard Test Conditions (STC): air mass AM 1.5, irradiance 1000W/m², cell temperature 25°C

ΕΙΚΟΝΑ Π.1.2: ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ Φ/Β ΠΑΝΕΛ

- Ηλεκτρικός Συσσωρευτής (Σενάριο 1)



Type:	Li-Ion	Nominal Volta... 36V or as you need	Size:	OEM	
Nominal Capa...	25ah or Customized	Specifications: Lithium ion Battery 36v 25ah ...	Standard char...	0.2-0.5c	
Continuous di...	≤15A/adjustable	overcharge pr...	4.25V±0.025 / adjustable	overdischarge ... 2.5V±0.05 / adjustable	
Charge mode:	CC/CV	Certificate:	UL, UN38.5, RoHS, CE, etc.	Application:	E-bike Battery,
Cycle life:	over 500 times	Warrantv:	1 years		

No.	Items	Parameters
10	Dimensions of battery pack	OEM
11	Charge temperature	0 °C~+45 °C
12	Discharge temperature	-20 °C~+60 °C
13	Storage temperature	-5 °C~+25 °C
14	Relative humidity	40~85%RH
15	Dimension	customized
16	warranty	1 year

No.	Items	Parameters
Technology parameters of High Performance Lithium ion Battery 36v 25ah Electric Bike Battery cell		
01	Type of battery cell	LiFePo4/Li(NiCoMn)O2
02	Brand	Home made/Import
03	discharge level	5C/adjustable
04	Size	Φ18mm×65mm/other
05	Nominal voltage	3.6V/3.2v etc
06	Nominal capacity	2200mAh/2000mah/2400mah etc
07	The maximum upper limit voltage	4.2V

ΕΙΚΟΝΑ Π.1.3: ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ (36V/25ah)



Specification:	
Product name	24V9Ah
Model	RSK-2409
Rated Capacity	9Ah
Nominal Voltage	24V
Over discharge protection voltage	21V±0.05V
Over charge protection voltage	29.4V±0.05V
AC Impedance New Cell Max.(mΩ)	≤100 mΩ
Maximum Continuous Charge Current	≤5A adjustment
Maximum Continuous Discharge Current	≤15A adjustment
Maximum Pulse discharge current	≤45A adjustment
Operation Temperature Range	Charge: 0~45°C, Discharge: -20~60°C
Storage Temperature Range	Less than 1 year: -20~25°C Less than 3 months: -20~40°C
Storage Temperature Range	Less than 30 Days: -25°C~45°C Less than 90 Days: -25°C~30°C
Weight	Approx 2.2kg
Cycle Characteristic	500 times

ΕΙΚΟΝΑ Π.1.4: ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ (24V/9ah)

Παράρτημα 2: Υπολογισμός εκτελεσμένοι σε Mathcad

Take_off_distance := 30m	$V_{cruise} := 18 \frac{m}{s}$	$V_{stall} := 11 \frac{m}{s}$	$\rho_0 := 1.225 \frac{kg}{m^3}$	Cruise_Altitude := 1000m
$W_0 := 17kg \cdot g = 166.713 N$	$Climb_Rate := 1.8 \frac{m}{s}$	$V_{end} := 12 \frac{m}{s}$	$C_{Lmax} := 1.25$	$V_{surv} := 13 \frac{m}{s}$
$C_{D0} := 0.036$	Max_LtoD := 16.4			$V_{max} := 24.5 \frac{m}{s}$
$W_{prosS} := 0.5 \cdot \rho_0 \cdot V_{stall}^2 \cdot 1.25 = 92.641 Pa$		$V_{\infty} := 48V$	$h := 2m$	

Take_off Phase:	Climb Phase:	Cruise Phase:
$\eta := 79\%$ (Motor)	$\eta := 79\%$ (Motor)	
$\eta_{pr} := 1$	$\eta_{pr} := 1$	$\rho_1 := 1.112 \frac{kg}{m^3}$
$C_{Ltakeoffmax} := 0.9 \cdot \left[C_{Lmax} + 0.9 \cdot \left(\frac{25}{45} \right) \right] = 1.575$	$K_{\infty} := \frac{1}{Max_LtoD^2 \cdot 4 \cdot C_{D0}} = 0.026$	$W_{MC} := 0.9039 \cdot W_0 = 150.692 N$
$V_{stalltakeoff} := \sqrt{\frac{2 \cdot W_{prosS}}{\rho_0 \cdot C_{Ltakeoffmax}}} = 9.8 \frac{m}{s}$	$\frac{W_0 \cdot \left(Climb_Rate + \sqrt{\frac{2 \cdot W_{prosS} \cdot \sqrt{K}}{\rho_0 \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{C_{D0}}}} \cdot \frac{1.155}{Max_LtoD} \right)}{\eta_{pr}} = 401.052 W$	$S_{\infty} := \frac{W_0}{W_{prosS}} = 1.8 m^2$
$V_{takeoff} := 1.1 \cdot 0.7 \cdot V_{stalltakeoff} = 7.546 \frac{m}{s}$	$P_{climb_total} := \frac{P_{climb}}{\eta} = 507.661 W$	$C_L := 2 \cdot \frac{W_{MC}}{\rho_1 \cdot V_{cruise}^2 \cdot S} = 0.465$
$R_{\infty} := 6.96 \cdot \frac{V_{stalltakeoff}^2}{g} = 68.156 m$	$I_{climb} := \frac{P_{climb_total}}{V} = 10.576 A$	$C_D := C_{D0} + K \cdot C_L = 0.048$
$\Theta_{tf} := \arcsin\left(1 - \frac{h}{R}\right) = 0.243$	9 min to cruise altitude	$\Lambda := \frac{C_L^{\frac{3}{2}}}{C_D} = 6.602$
$S_a := R \cdot \sin(\Theta_{tf}) = 16.39 m$		$P_{cruise} := \sqrt{2 \cdot W_{MC}^3 \cdot \frac{1}{\rho_1 \cdot S} \cdot \frac{1}{\Lambda}} = 280.104 W$
$S_g := Take_off_distance - S_a = 13.61 m$		$P_{cruise_total} := \frac{P_{cruise}}{\eta} = 354.562 W$
$T_{prosW} := 1.21 \cdot \frac{W_{prosS}}{S_g \cdot g \cdot \rho_0 \cdot C_{Ltakeoffmax}} = 0.435$		$I_{cruise} := \frac{P_{cruise_total}}{V} = 7.387 A$
$P_{takeoff} := T_{prosW} \cdot W_0 \cdot V_{takeoff} = 547.584 W$		15min to mission
$P_{takeoff_total} := \frac{P_{takeoff}}{\eta} = 693.144 W$		
$I_{takeoff} := \frac{P_{takeoff_total}}{V} = 14.441 A$ (2min)		

Surveillance	Max_Speed
$\rho_2 := 1.1685 \frac{kg}{m^3}$	$T_{prosW_{mc}} := 2 \cdot \frac{K \cdot W_{MC}}{\rho_1 \cdot V_{max}^2 \cdot S} + 0.5 \cdot \rho_1 \cdot V_{max}^2 \cdot \frac{C_{D0}}{W_{MC}} = 0.15$
$C_{L1} := 2 \cdot \frac{W_{MC}}{\rho_2 \cdot V_{surv}^2 \cdot S} = 0.848$	$P_{vmax} := T_{prosW_{mc}} \cdot W_{MC} \cdot \frac{V_{max}}{0.79} = 700.803 W$
$C_{D2} := C_{D0} + K \cdot C_{L1} = 0.058$	8+8 min
$\Lambda_1 := \frac{C_{L1}^{\frac{3}{2}}}{C_D} = 16.27$	total mission time: 67 λεπτά (περίπου 1 ώρα)
$P_{surv} := \sqrt{2 \cdot W_{MC}^3 \cdot \frac{1}{\rho_2 \cdot S} \cdot \frac{1}{\Lambda_1}} = 110.881 W$	Recovery phase demands same as cruise phase
$P_{surv_total} := \frac{P_{surv}}{\eta} = 140.355 W$	15 min
$I_{surv} := \frac{P_{surv_total}}{V} = 2.924 A$	
10 min mission	

ΕΙΚΟΝΑ Π.2.1: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ

ΣΕΝΑΡΙΟ 1: PV - Battery

$$V_{pv} := 41.8V \quad V_{dcbus} := 48V \quad P_{pvmax} := 267.5W \quad f := 25kHz \quad I := \frac{P_{pvmax}}{V_{dcbus}} = 5.573 A$$

Boost Converter

$$D := 1 - \frac{V_{pv}}{V_{dcbus}} = 0.129 \quad \Delta i_L := 0.02 \cdot \frac{P_{pvmax}}{V_{dcbus}} = 0.111 A \quad L := V_{pv} \cdot D \cdot \frac{T}{\Delta i_L} = 1.938 \times 10^{-3} H$$

$$V_{ripple} = 0.96 V \quad (2\%) \quad C := I \cdot D \cdot \frac{T}{V_{ripple}} = 2.999 \times 10^{-5} F$$

$$L_{ccm} := (1 - D)^2 \cdot D \cdot \frac{V_{dcbus}}{2 \cdot I \cdot f} = 1.687 \times 10^{-5} H$$

Buck_Boost Converter / Λειτουργία ανύψωσης / Φάση Max_speed

$$V_{bat} := 33.7V \quad P_{batmax} := 529W \quad I := \frac{P_{batmax}}{V_{dcbus}} = 11.021 A$$

$$D := \frac{V_{dcbus}}{V_{dcbus} + V_{bat}} = 0.588 \quad \Delta i_L := 0.02 \cdot I = 0.22 A \quad L := V_{bat} \cdot D \cdot \frac{T}{\Delta i_L} = 3.593 \times 10^{-3} H$$

$$C := I \cdot D \cdot \frac{T}{V_{ripple}} = 2.698 \times 10^{-4} F \quad L_{ccm} := (1 - D)^2 \cdot D \cdot \frac{V_{dcbus}}{2 \cdot I \cdot f} = 8.707 \times 10^{-6} H$$

ΣΕΝΑΡΙΟ 2: Fuel Cell - Battery

$$V_{fc} := 15.3V \quad V_{dcbus} := 48V \quad P_{fcmax} := 430W \quad f := 25kHz \quad I := \frac{P_{fcmax}}{V_{dcbus}} = 8.958 A$$

Boost Converter

$$D := 1 - \frac{V_{fc}}{V_{dcbus}} = 0.681 \quad T := \frac{1}{f} = 4 \times 10^{-5} s \quad \Delta i_L := 0.02 \cdot \frac{P_{fcmax}}{V_{dcbus}} = 0.179 A \quad L := V_{fc} \cdot \frac{D \cdot T}{\Delta i_L} = 2.327 \times 10^{-3} H$$

$$V_{ripple} := 0.96V (2\%) \quad C := I \cdot D \cdot \frac{T}{V_{ripple}} = 2.543 \times 10^{-4} F \quad ripple := 2\% \quad C_{ccm} := D \cdot \frac{ripple^{-1} \cdot I}{f \cdot V_{dcbus}} = 2.543 \times 10^{-4} F$$

Buck_Boost Converter / Λειτουργία ανύψωσης / Φάση Max_speed

$$V_{bat} := 33.3V \quad P_{batmax} := V_{bat} \cdot 10.8A = 359.64 W \quad I := \frac{P_{batmax}}{V_{dcbus}} = 7.492 A$$

$$D := \frac{V_{dcbus}}{V_{dcbus} + V_{bat}} = 0.59 \quad \Delta i_L := 0.02 \cdot \frac{P_{batmax}}{V_{dcbus}} = 0.15 A \quad L := V_{bat} \cdot D \cdot \frac{T}{\Delta i_L} = 5.248 \times 10^{-3} H$$

$$C := I \cdot \frac{D \cdot T}{V_{ripple}} = 1.843 \times 10^{-4} F \quad L_{ccm} := (1 - D)^2 \cdot D \cdot \frac{V_{dcbus}}{2 \cdot I \cdot f} = 1.269 \times 10^{-5} H$$

ΕΙΚΟΝΑ Π.2.2: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕΑΤΡΟΠΕΩΝ

Παράρτημα 3: M-files απαραίτητα για τη διεξαγωγή προσομοιώσεων

<pre> 1 % Αρχικοποίηση μεταβλητών 2 % Boost Converter (δείκτης b) 3 Lb1=2.4e-3; 4 RLb1=1e-9; 5 Cb1=0.3e-3; 6 RCb1=0.001; 7 8 Lb2=2.2e-3 9 RLb2=1e-9 10 Cb2=0.1e-3 11 RCb2=0.001 12 13 % Αρχικοποίηση μεταβλητών 14 % Buck Boost Converter (δείκτης bb) 15 Lbb1=5.4e-3; 16 RLbb1=1e-9; 17 Cbb1=0.2e-3; 18 RCbb1=0.001; 19 20 Lbb2=3.7e-3 21 RLbb2=1e-9; 22 Cbb2=0.3e-3 23 RCbb2=0.001; 24 </pre>	<pre> 25 % Αρχικοποίηση μεταβλητών 26 % DC BUS line (δείκτης t) 27 Lt =5.1e-6; 28 Ct = 7.5e-9; 29 Rt=0.012; 30 31 32 % Αρχικοποίηση μεταβλητών 33 % Battery fc 34 Cbat=7714; % F 35 Vc=4.2; %Vc=Vbat-Voffset V 36 Rs=0.049; %Ohm 37 Voff=21; 38 39 % Αρχικοποίηση μεταβλητών 40 % Battery PV 41 Cbat_1=15000; % F 42 Vc_1=6; %Vc=Vbat-Voffset V 43 Rs_1=0.07; %Ohm 44 Voff_1=30; </pre>
---	---

ΕΙΚΟΝΑ Π.3.1: ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ CONVERTERS/DC BUS/ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ

<pre> 1 % Χρονική Διάρκεια Διαφορετικών 2 % Φάσεων Πτήσεως 3 Takeoff_b=0; 4 Takeoff_e=2; 5 Climb_b=2; 6 Climb_e=11; 7 Cruise1_b=11; 8 Cruise1_e=26; 9 Max_speed1_b=26; 10 Max_speed1_e=34; 11 Mission_b=34; 12 Mission_e=44; 13 Max_speed2_b=44; 14 Max_speed2_e=52; 15 Cruise2_b=52; 16 Cruise2_e=67; 17 18 % Σημείο λειτουργίας FC 19 I_fc=28; </pre>	<pre> 20 % Απαιτήσεις Φορτίου 21 Takeoff_load=693.144; 22 Climb_load=507.661; 23 Cruise_load=354.562; 24 Max_speed_load=700.803; 25 Mission_load=140.355; 26 27 % Απαιτήσεις σύνδεσης/αποσύνδεσης των πηγών 28 % FC/PV στο συνολικό σύστημα 29 FC_prep_time=100; 30 Min_fc_load=300; 31 32 Conv_loss_factor=1.1 </pre>
--	--

ΕΙΚΟΝΑ Π.3.2: ΟΡΙΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΑΙ ΧΡΟΝΟΥ ΑΝΑ ΦΑΣΗ ΠΤΗΣΗΣ

Δεν παρουσιάζονται τα M-files σχετικά με την αρχικοποίηση της κυψέλης καυσίμου, καθώς παρέχονται στην ηλεκτρονική διεύθυνση που αναφέραμε παραπάνω.