



**ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ.**

Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Τμήμα Μηχανικών Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος Τ.Ε.

Πτυχιακή εργασία

# Συστήματα Αιολικής και Ηλιακής Ενέργειας



Σπουδάστρια: Μέξη Εμμανουέλα

ΑΕΜ: ΤΦ1488

Επιβλέπων καθηγητής: Κατσιγιαννης Ιωάννης

Χανιά, Ιούνιος 2019

Συστήματα  
Αιολικής  
και  
Ηλιακής Ενέργειας

**Σχεδιασμός, ανάλυση και λειτουργία**

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εργασία αυτή μου ανατέθηκε από τον κύριο Κατσίγιαννη Ιωάννη, καθηγητή του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου / Τμήμα Μηχανικών Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος Τ.Ε. και αφορά την μελέτη της λειτουργίας, δύο σημαντικών και πολλά υποσχόμενων στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τεχνολογικών επιτευγμάτων. Των ανεμογεννητριών και των φωτοβολταϊκών συστημάτων, που σε παγκόσμιο επίπεδο τείνουν να συνυπάρξουν αν όχι να κυριαρχήσουν, εκείνων των στερεών, υγρών και αερίων καυσίμων.

Οι ανεμογεννήτριες εκμεταλλεύονται την αιολική ενέργεια, τα φωτοβολταϊκά συστήματα την ηλιακή. Κάθε μία ξεχωριστά ή και οι δύο μαζί λειτουργώντας συμπληρωματικά η μία της άλλης, ίσως στο κοντινό μέλλον, δώσουν την δυνατότητα στους ανθρώπους, να αποδεσμευτούν από την ανάγκη τους σε ορυκτά και υγρά καύσιμα που πλέον τείνουν να εξαλειφθούν.

Στο πόνημα αυτό γίνεται ιστορική αναδρομή της ανάπτυξης σε παγκόσμιο επίπεδο από τις πρωτοπόρες στο είδος εταιρείες των δύο αυτών ενεργειακών συστημάτων, περιγράφονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τους, ο τρόπος λειτουργίας τους για την παραγωγή ενέργειας και τα συστατικά στοιχεία που τα αποτελούν.

Ευχαριστώ πολύ τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Κατσίγιαννη Ιωάννη που μου έδωσε την δυνατότητα και ευκαιρία να συνεισφέρω με την ελάχιστη αυτή συμμετοχή μου, διά μέσου αυτού του πονήματος, στην καλλιέργεια της Ενεργειακής και Περιβαλλοντικής συνείδησης των Ελλήνων πολιτών. Με το ενδιαφέρον τους στραμμένο προς τις σχεδόν αστείρευτες Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και το καθαρό περιβάλλον προοιωνίζεται κατά την κρατούσα άποψη, η ποιότητα ζωής στο γαλάζιο πλανήτη μας.

Χανιά, Ιούνιος 2019

**ΛΕΞΙΚΟ**

ΛΕΞΙΚΟ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΟΡΩΝ και ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΓΓΛΙΚΗΣ-ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ

(υπογραμμισμένα τα σε χρήση)

- 1 Rotor = Δρομέας, στροφέιο, στροφέας, ρότορας (ορίζεται άλλοτε με τις πτέρυγες και άλλοτε χωρίς)
- 2 Blade = Πτέρυγα, πτερύγιο, έλικα, λεπίδα
- 3 Yaw = Στροφή, εκτροπή δεξιά-αριστερά (π.χ. ανεμοδείκτης, κάθετο ουραίο αεροπλάνου)
- 4 Turbine = Στρόβιλος, τουρμπίνα
- 5 Wind turbine = Ανεμογεννήτρια (Α/Γ)
- 6 Stator = Στάτης, στάτορας
- 7 Stall = Απώλεια στήριξης πτέρυγας (όταν δεν δημιουργούνται στην πτέρυγα υποπίεση και πίεση πάνω και κάτω από αυτήν με συνέπεια την μη λειτουργία της)
- 8 Step-up gear = Gear box = Κιβώτιο ταχυτήτων (σχέσεων), μηχανισμός γραναζιών, μειωτήρας (άσχετα αν εδώ εκφράζεται σαν αυξητής (step-up))
- 9 Site = Τοποθεσία, εγκατάσταση, σταθμός, θέση κτιριακής εγκατάστασης.
- 10 Nacelle = Άτρακτος, Αεροδυναμικό περίβλημα (ατρακτοειδές όπως η τουρμπίνα ενός αεροσκάφους)
- 11 Pitch = Βήμα πτέρυγας (κλίση γωνίας) (η κλίση γωνίας μιας πτέρυγας καθορίζει πόση υποπίεση και υπερπίεση θα δημιουργηθούν πάνω και κάτω από την πτέρυγα ώστε να έχουμε άντωση αλλιώς απώλεια στήριξης)
- 12 Upwind = Προσήνεμα, προς την πλευρά του ανέμου, (πορεία με κόντρα τον άνεμο)
- 13 Downwind = Υπήνεμα, με τον άνεμο από πίσω, ούριο, (πορεία με την φορά του ανέμου)
- 14 Vane = Ανεμοδείκτης, κάθετο πτερύγιο
- 15 Hub = Πλήμνη, ο ομφαλός στροφέιου, το κέντρο του στροφέιου (άξονας)
- 16 Rpm = revolutions per minute, στροφές ανά λεπτό (σ.α.λ.), στροφές/λεπτό
- 17 H = Henry μονάδα μαγνητικής επαγωγής
- 18 Km/h = Χιλιόμετρα ανά ώρα (Km per hour)

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	<b>2</b>
<b>ΛΕΞΙΚΟ</b> .....	<b>3</b>
<b>ΚΕΦ. 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>10</b>
<b>ΚΕΦ. 2. ΑΙΟΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ</b> .....	<b>13</b>
2.1. <i>ΤΜΗΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ</i> .....	<b>13</b>
2.1.1. <i>Ο ΠΥΡΓΟΣ</i> .....	16
2.1.2. <i>ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ</i> .....	18
2.1.3. <i>ΠΤΕΡΥΓΕΣ</i> .....	19
2.1.4. <i>ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ</i> .....	21
2.2. <i>ΑΠΟΔΟΣΗ ΙΣΧΥΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ</i> .....	<b>22</b>
2.3. <i>ΙΣΧΥΣ ΕΝΑΝΤΙ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ TIP SPEED RATIO (TSR)</i> .....	<b>23</b>
2.4. <i>ΜΕΓΙΣΤΗ ΣΥΛΛΟΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ</i> .....	<b>26</b>
2.5. <i>ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ</i> .....	<b>28</b>
2.5.1. <i>ΣΧΗΜΑ ΣΤΑΘΕΡΟΥ TSR</i> .....	28
2.5.2. <i>ΣΧΗΜΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ</i> .....	28
2.6. <i>ΣΥΜΒΙΒΑΣΜΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ</i> .....	<b>29</b>
2.6.1. <i>ΠΥΡΓΟΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΣΤΑΣΗ</i> .....	29
2.6.2. <i>ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΤΕΡΥΓΩΝ</i> .....	31
2.6.3. <i>ΠΡΟΣΗΝΕΜΑ Η ΥΠΗΝΕΜΑ ΣΤΡΟΦΕΙΑ</i> .....	32
2.6.4. <i>ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΣ ΕΝΑΝΤΙ ΚΑΘΕΤΟΥ ΑΞΟΝΑ</i> .....	33
2.7. <i>ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ</i> .....	<b>34</b>
2.7.1. <i>ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ</i> .....	34
2.7.2. <i>ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΥΘΜΟΥ</i> .....	35
2.8. <i>ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΠΟΨΗ</i> .....	<b>36</b>
2.8.1. <i>ΗΧΗΤΙΚΟΣ ΘΟΡΥΒΟΣ</i> .....	36
2.8.2. <i>ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ (Electromagnetic interference EMI)</i> .....	37
2.8.3. <i>ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΑ ΠΤΗΝΑ</i> .....	37
2.8.4. <i>ΑΛΛΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ</i> .....	39
2.9. <i>ΠΙΘΑΝΕΣ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΕΣ</i> .....	<b>39</b>
2.9.1. <i>ΠΥΡΚΑΓΙΑ</i> .....	39
2.9.2. <i>ΣΕΙΣΜΟΣ</i> .....	40
2.10. <i>ΤΑΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ</i> .....	<b>41</b>
<b>ΚΕΦ. 3. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ</b> .....	<b>42</b>
3.1. <i>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (DIRECT CURRENT GENERATORS)</i> .....	<b>42</b>
3.2. <i>ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ</i> .....	<b>44</b>
3.3. <i>ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ</i> .....	<b>45</b>
3.3.1. <i>ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ</i> .....	45
3.3.2. <i>ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ</i> .....	46
3.3.3. <i>ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΡΟΜΕΑ ΚΑΙ ΟΛΙΣΘΗΣΗ</i> .....	48

## Συστήματα Αιολικής και Ηλιακής Ενέργειας

3.3.4.	ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ .....	50
3.3.5.	ΑΠΟΛΟΣΗ ΚΑΙ ΨΥΞΗ .....	53
3.3.6.	ΠΥΚΝΩΤΕΣ ΑΥΤΟΔΙΕΓΕΡΣΗΣ .....	54
3.3.7.	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΡΟΠΗΣ-ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ .....	56
3.3.8.	ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ .....	57
3.4.	ΔΙΠΛΑ ΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΜΕΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ .....	59
3.5.	ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΑΜΕΣΗΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ .....	60
<b>ΚΕΦ. 4.</b>	<b>ΕΛΕΓΧΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ .....</b>	<b>63</b>
4.1.	ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ .....	65
4.2.	ΟΔΗΓΗΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ .....	66
4.2.1.	ΟΔΗΓΗΣΗ ΜΙΑΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ .....	67
4.2.2.	ΟΔΗΓΗΣΗ ΔΥΟ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ .....	70
4.2.3.	ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΔΗΓΗΣΗ ΜΕ ΚΙΒΩΤΙΟ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ .....	72
4.2.4.	ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ .....	72
4.2.5.	ΟΔΗΓΗΣΗ ΜΗΧΑΝΗΣ SCHERBIUS ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ .....	74
4.2.6.	ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΜΕΣΗ ΟΔΗΓΗΣΗ .....	75
4.3.	ΕΠΙΛΟΓΗ ΟΔΗΓΗΣΗΣ.....	76
4.4.	ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΠΑΥΣΗΣ .....	77
<b>ΚΕΦ. 5.</b>	<b>ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΙΣΧΥΣ .....</b>	<b>80</b>
5.1.	ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΕΡΓΑ .....	87
5.2.	ΚΤΙΖΟΝΤΑΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ .....	90
5.3.	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ (ΦΒ) ΚΥΤΤΑΡΩΝ .....	92
5.3.1.	ΚΥΤΤΑΡΑ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ .....	93
5.3.2.	ΚΥΤΤΑΡΑ ΠΟΛΥΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ .....	93
5.3.3.	ΚΥΤΤΑΡΑ ΛΕΠΤΟΥ ΥΜΕΝΙΟΥ .....	93
5.3.4.	ΑΜΟΡΦΟ ΠΥΡΙΤΙΟ .....	95
5.3.5.	ΣΦΑΙΡΙΚΑ ΚΥΤΤΑΡΑ (ΚΥΨΕΛΕΣ) .....	96
5.3.6.	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΚΥΤΤΑΡΑ .....	97
5.3.7.	ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ .....	98
5.4.	ΧΑΡΤΕΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	98
5.5.	ΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ.....	100
<b>ΚΕΦ. 6.</b>	<b>ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....</b>	<b>104</b>
6.1.	ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΚΥΤΤΑΡΟ .....	104
6.2.	ΠΛΑΙΣΙΟ ΚΑΙ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ (MODULE AND ARRAY) .....	106
6.3.	ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ.....	108
6.4.	ΤΑΣΗ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΡΕΥΜΑ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΣΗΣ .....	109
6.5.	ΚΑΜΠΥΛΕΣ I-V ΚΑΙ P-V .....	110
6.6.	ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ .....	112
6.6.1.	ΕΝΤΑΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ .....	113

## Συστήματα Αιολικής και Ηλιακής Ενέργειας

6.6.2.	ΓΩΝΙΑ ΗΛΙΟΥ .....	114
6.6.3.	ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΣΚΙΑΣΗΣ .....	114
6.6.4.	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ .....	116
6.6.5.	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΚΛΙΜΑΤΟΣ .....	118
6.6.6.	ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΦΟΡΤΙΟΥ .....	118
6.6.7.	ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΗΛΙΟΥ .....	119
6.7.	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ .....	122
6.8.	ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ .....	123
<b>ΚΕΦ. 7.</b>	<b>ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....</b>	<b>126</b>
7.1.	ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗΣ (ΜΠΑΤΑΡΙΑ) .....	126
7.2.	ΤΥΠΟΙ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ .....	128
7.2.1.	ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΜΟΛΥΒΔΟΥ-ΟΞΕΟΣ .....	129
7.2.2.	ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΝΙΚΕΛΙΟΥ-ΚΑΔΜΙΟΥ .....	130
7.2.3.	ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΥΔΡΙΔΙΟΥ ΝΙΚΕΛΙΟΥ-ΜΕΤΑΛΛΟΥ .....	130
7.2.4.	ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΙΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ .....	130
7.2.5.	ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΛΙΘΙΟΥ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΕΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ .....	131
7.2.6.	ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΥ-ΑΕΡΟΣ .....	131
7.3.	ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ .....	131
7.4.	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΔΟΣΗΣ .....	133
7.4.1.	ΤΑΣΕΙΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ / ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ (C / D) .....	134
7.4.2.	ΛΟΓΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ / ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ (C / D) .....	134
7.4.3.	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ .....	135
7.4.4.	ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ .....	136
7.4.5.	ΑΠΟΔΟΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ .....	136
7.4.6.	ΑΥΤΟΕΚΦΟΡΤΙΣΗ ΚΑΙ ΦΟΡΤΙΣΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ (ΑΡΓΗ ΦΟΡΤΙΣΗ) .....	137
7.4.7.	ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΜΝΗΜΗΣ .....	138
7.4.8.	ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ .....	138
7.4.9.	ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΙ ΑΝΟΔΟΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ .....	140
7.4.10.	ΤΥΧΑΙΑ ΒΛΑΒΗ .....	142
7.4.11.	ΒΛΑΒΗ ΑΠΟ ΠΑΛΑΙΩΣΗ (ΦΘΟΡΑ) .....	142
7.4.12.	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΥΠΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ .....	144
7.5.	ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΠΑΤΑΡΙΑ ΜΟΛΥΒΔΟΥ (Pb-acid) .....	145
7.6.	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ .....	147
7.7.	ΦΟΡΤΙΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ .....	149
7.8.	ΡΥΘΜΙΣΤΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ .....	149
7.8.1.	ΠΟΛΛΑΠΛΟΙ ΡΥΘΜΟΙ ΦΟΡΤΙΣΗΣ .....	149
7.8.2.	ΜΟΝΟΣ ΡΥΘΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ .....	150
7.8.3.	ΜΗ ΡΥΘΜΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ .....	150
7.9.	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ .....	151
7.9.1.	ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΙ .....	151
7.9.2.	ΑΣΦΑΛΕΙΑ .....	153
7.10.	ΣΦΟΝΔΥΛΟΣ .....	153
7.10.1.	ΣΧΕΣΕΙΣ (ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ) ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	154
7.10.2.	ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΦΟΝΔΥΛΟΥ .....	156
7.10.3.	ΟΦΕΛΗ ΣΦΟΝΔΥΛΟΥ ΕΝΑΝΤΙ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ .....	159
7.11.	ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΟΣ ΜΑΓΝΗΤΗΣ .....	160

*Συστήματα Αιολικής και Ηλιακής Ενέργειας*

<b>7.12.</b>	<b>ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΑΕΡΑ</b> .....	<b>163</b>
<b>7.13.</b>	<b>ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ</b> .....	<b>166</b>
<b>ΚΕΦ. 8.</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ</b> .....	<b>168</b>



## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Αντικείμενο της παρούσας μελέτης είναι η περιγραφή των δύο επικρατέστερων συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, της Αιολικής και της Ηλιακής.

Σε γενικές γραμμές η μεν Αιολική ενέργεια παράγεται με την χρήση γεννητριών, των οποίων η περιστροφική κίνηση τους επιτυγχάνεται με τον αέρα μέσω πτερύγων, η δε Ηλιακή, με την χρήση πλήθους φωτοβολταϊκών πλαισίων ώστε να δημιουργηθεί η κατάλληλη τάση και ισχύς ηλεκτρικής ενέργειας που χρειαζόμαστε.

Για την κατανόηση τους, θα περιγράψουμε το σύνολο των επιμέρους μονάδων που τα απαρτίζουν κάνοντας παράλληλα χρήση εικόνων, τις παραμέτρους που τα ορίζουν, θα συγκρίνουμε τις παραλλαγές στον σχεδιασμό τους, θα δούμε την μικρή ιστορική τους πορεία και ανάπτυξη, την θέση τους στο περιβάλλον, την επίδρασή τους σε αυτό ώστε να μπορούμε να καθορίζουμε τα υπέρ και τα κατά, τα οφέλη και τις επιπτώσεις που προσφέρουν στον άνθρωπο και γενικότερα στον ζωικό και φυτικό κόσμο του πλανήτη μας.

Η μελέτη επικεντρώνεται στην τεχνική περιγραφή των συστημάτων αυτών, ώστε να χρησιμοποιηθεί για την θεωρητική κατάρτιση των ενδιαφερομένων στοχεύοντας κυρίως σε εκείνους που προσβλέπουν να δουλέψουν με τα συστήματα αυτά.

Ας μη ξεχνάμε πως το ζητούμενο για αυτά τα νέα συστήματα είναι να αποτελέσουν στο μέλλον την κύρια και καθαυτή πηγή ενέργειας στον πλανήτη, μας δίνοντας έμφαση στην Ηλιακή με στόχο την παραγωγή όλης της απαραίτητης ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών μας.

Λέξεις κλειδιά: Ανεμογεννήτρια, Φωτοβολταϊκά, Ενέργεια, Συσσωρευτές-Μπαταρίες, Αιολική, Ηλιακή.

***ABSTRACT***

The subject of this study is the description of the two most prevalent systems of renewable energy sources, wind and solar.

Generally wind energy is generated by using generators whose rotary motion is achieved with air through wings, and solar using a variety of photovoltaic panels to generate the proper voltage and power of electricity you need.

For their comprehension, we will describe all the individual units that make up them while making use of images, the parameters that define them, we will compare the variants in their design, we will see their small historical course and development, their place in the environment, their impact on it so that we can determine the pros and cons, the benefits and the impact they have on humans and the animal and plant world of our planet.

The study focuses on the technical description of these systems to be used for theoretical training of those interested, focusing mainly on those who are looking to work on these systems.

Let us not forget that the demand for these new systems is to become in the future the main source of energy on our planet, especially the solar system, with the aim of producing all the energy necessary to meet our needs.

Keywords: Wind turbine, Photovoltaic, Energy, Batteries, Wind, Solar.

## **ΚΕΦ. 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) κατά την κρατούσα άποψη της εποχής μας είναι το μέλλον του πλανήτη. Η εξόρυξη και άντληση στερεών, υγρών και αερίων καυσίμων έχει αρχίσει να καθίσταται ενεργοβόρα και ασύμφορη πλέον.

Δεν πρέπει να παραβλέπεται το γεγονός ότι όσο τα αποθέματα στερεών, υγρών και αερίων καυσίμων εξαντλούνται, τόσο περισσότερη ενέργεια χρειάζεται για τις εργασίες άντλησης και εξόρυξης τους από μεγαλύτερα βάθη. Έτσι, θα φθάσει στιγμή όπου η καταναλισκόμενη ενέργεια για την απόκτησή τους θα είναι μεγαλύτερη αυτής που μπορούν να αποδώσουν, με συνέπεια να γίνει εκ των πραγμάτων ασύμφορη η εκμετάλλευσή τους. Μοιραία οδηγούμαστε στην εξεύρεση άλλων μεθόδων παραγωγής ενέργειας.

Η πυρηνική ενέργεια αποτελεί λύση στο πρόβλημα αλλά έχει πλέον γίνει φανερό στον άνθρωπο, ότι οι κίνδυνοι που κρύβονται, μπορεί να αποβούν μοιραίοι. Η εμπειρία του πυρηνικού ατυχήματος στο Τσερνόμπιλ, στις 26 Απριλίου του 1986, στον αντιδραστήρα τέσσερα του Πυρηνικού Σταθμού Παραγωγής Ενέργειας στη Σοβιετική Ένωση, όπως και του πιο πρόσφατου στην πόλη Φουκουσίμα την άνοιξη του 2011 στην Ιαπωνία οφειλόμενου σε σεισμό, έχει δείξει την σκληρή πραγματικότητα και το τίμημα που πληρώνεται από τα ανθρώπινα λάθη ή τα ακραία νάζια της φύσης.

Είναι μονόδρομος η αναζήτηση ηπιότερων μορφών παραγωγής ενέργειας, που να μην επιβαρύνουν το περιβάλλον και τέτοιες είναι η εκμετάλλευσή της Αιολικής, της γεωθερμικής, του νερού (παλιρροϊκής, κυμάτων, υδραυλικής), αερίων (που εκλύονται από βιολογικές εγκαταστάσεις καθαρισμού αποβλήτων ή βιοαέρια) και της ηλιακής. Όλες χαρακτηρίζονται με την ονομασία Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Πράσινη ενέργεια ή Ήπιας Μορφής Ενέργεια, αν και για κάποιες μορφές ενέργειας όπως η γεωθερμική, καταχρώνται την ονομασία ανανεώσιμη γιατί η ανανέωση της στο χρόνο είναι της τάξεως των χιλιετιών.

Η διαφορά των παραπάνω μορφών ενέργειας από εκείνες των στερεών, υγρών ή αερίων καυσίμων, βρίσκεται στην δυνατότητα εκμετάλλευσής τους χωρίς την ανάγκη εξόρυξης ή άντλησής τους. Θεωρούνται δε ήπιας μορφής, διότι είναι φιλικές προς το περιβάλλον, χωρίς να το ρυπαίνουν με προϊόντα καύσης όπως υδρογονάνθρακες, οξείδια του άνθρακα ή του αζώτου, και τοξικά ή ραδιενεργά απόβλητα. Τα προαναφερθέντα αέρια, συντελούν στο « φαινόμενο του θερμοκηπίου » όπως το ονόμασε ο Γάλλος μαθηματικός Fourier το 1822 και έχουν σαν αποτέλεσμα την θέρμανση της γης, με αποτέλεσμα την δημιουργία ζωής όπως την βιώνουμε σήμερα. Η υπερβολική παραγωγή όμως αυτών των αερίων και κυρίως του διοξειδίου του άνθρακα από ανθρωπογενή αίτια, συνεπάγεται αντίστοιχα αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη. Από το 1880 μέχρι σήμερα, (λόγω ανάπτυξης της βιομηχανικής δραστηριότητας κυρίως), παρατηρήθηκε αύξηση της θερμοκρασίας κατά 0,6 βαθμούς Κελσίου και υπολογίζεται ότι, μέχρι το τέλος του 2100 θα ανέλθει κατά 1,5 έως 4 βαθμούς αν δεν ληφθούν μέτρα παγκοσμίως.

Έχει υπολογιστεί ότι για κάθε κιλοβατώρα αιολικής ενέργειας, αντιστοιχεί μείωση του αερίου του θερμοκηπίου διοξειδίου του άνθρακα κατά ένα κιλό . Το 2100 οι ΑΠΕ, υπολογίζεται να καλύψουν τουλάχιστον το 70% της παγκόσμιας ενεργειακής

κατανάλωσης. Για τη χώρα μας δε, ισχύει το Πρωτόκολλο του Κιότο που ορίζει για την περίοδο 2008 - 2012 το ποσοστό αύξησης των συγκεντρώσεων να κρατηθεί στο 25%, σε σχέση με αυτό του 1990 που αποτελεί και το έτος αναφοράς. Αυτό σημαίνει ότι έως το 2010, το ποσοστό παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ, θα είναι 22,1% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας (οδηγία 2001/77/ΕΚ). Επίσης, προβλέπεται μείωση έως το 2020 των αερίων του θερμοκηπίου κατά 20%, και αύξηση της συμμετοχής των ΑΠΕ επίσης κατά 20%, που για την Ελλάδα σημαίνει συμμετοχή των ΑΕΠ στην τελική κατανάλωση έως το 2020 κατά 18%.

Η ιδέα βέβαια της εκμετάλλευση της ενέργειας που προσφέρεται από την φύση δεν είναι νέα. Έχει εφαρμοστεί επιτυχώς στο παρελθόν, παγκοσμίως αλλά και στην Ελλάδα. Αντιπρόσωποι της εκμετάλλευσης της δύναμης του νερού, ήσαν και είναι οι υδροηλεκτρικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν κατά κόρο. Η εκμετάλλευση της δύναμης του αέρα έχει αφήσει τα σημάδια της με τους ανεμόμυλους σε όλη την έκταση της χώρας, που χρησίμευαν για την άλεση των αλεύρων, με την διαφορά ότι την θέση των μυλόπετρων, την πήραν οι ηλεκτρογεννήτριες.

Όπως συμβαίνει με όλα τα φαινόμενα έτσι και στις ΑΠΕ παρουσιάζονται πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Τα πλεονεκτήματα των ΑΠΕ είναι:

- Φιλικές προς το περιβάλλον γιατί δεν έχουν προϊόντα καύσης ή τοξικά απόβλητα.
- Δεν εξαντλούνται
- Αντικαθιστούν τα γνωστά καύσιμα και είναι κατάλληλα για παραγωγή ενέργειας σε απομακρυσμένες περιοχές.
- Οι εγκατάστασή τους είναι απλή, με φθινό εξοπλισμό και συντήρηση και μεγάλο χρόνο ζωής.

Τα μειονεκτηματά τους είναι:

- Έχουν μικρό συντελεστή απόδοσης, της τάξης του 30% ή χαμηλότερο.
- Λόγω χαμηλού συντελεστή απόδοσης, δεν μπορούν να καλύψουν μεγάλες ανάγκες σε ενέργεια, όπως εκείνες μιας πόλης προς το παρόν.
- Η παραγωγή ενέργειας, εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες, οι οποίες δεν είναι σταθερές.
- Λόγω του προηγούμενου, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν κύριες πηγές ενέργειας αλλά συμπληρωματικές.
- Απαιτούν μεγάλες εκτάσεις εγκατάστασης και δεν ταιριάζουν με το περιβάλλον αισθητικά.

Στο παρόν πόνημα, από τις παραπάνω μορφές ενέργειας, θα εξετάσουμε τις δύο πιο διαδεδομένες, οι οποίες είναι εκείνες της Αιολικής και της ηλιακής ενέργειας. Η μεν Αιολική αντιπροσωπεύεται και υλοποιείται από τις ανεμογεννήτριες και κυρίως αυτών

## *Συστήματα Αιολικής και Ηλιακής Ενέργειας*

οριζόντιας διάρθρωσης, η δε ηλιακή από τα πλαίσια (πάνελ) φωτοβολταϊκών κυττάρων και τις συστοιχίες αυτών.

Σκοπός του παρόντος, είναι η αναλυτική αλλά ταυτόχρονα, συνοπτική περιγραφή της κατασκευαστικής δομής των συστημάτων αυτών και των συστατικών τους μερών από ηλεκτρομηχανικής σκοπιάς κυρίως, ώστε η αποκτηθείσα γνώση, να αποτελέσει ισχυρό εργαλείο του Μηχανικού Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος όταν κληθεί να υπηρετήσει σε παρόμοιες μονάδες του είδους.

## ΚΕΦ. 2. ΑΙΟΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Το σύστημα αιολικής ενέργειας καλύπτεται πλήρως σε αυτό και τα ακόλουθα δύο κεφάλαια. Αυτό το κεφάλαιο καλύπτει, όλη την λειτουργία σε επίπεδο συστήματος, τις θεωρήσεις σχεδιασμού και τα επαγγέλματα. Η ηλεκτρική γεννήτρια καλύπτεται στο επόμενο κεφάλαιο, και οι μονάδες γεννητριών στο κεφάλαιο 6.

### 2.1. ΤΜΗΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Το σύστημα αιολικής ενέργειας περιλαμβάνει μία ή περισσότερες μονάδες ανεμογεννητριών (Α/Γ) που λειτουργούν ηλεκτρικά σε παραλληλία. Κάθε ανεμογεννήτρια (Α/Γ) αποτελείται από τα ακόλουθα βασικά συστατικά:

- Κατασκευή πύργων
- Στροφέιο με δύο ή τρεις πτέρυγες που συνδέονται με την πλήμνη
- Άξονας με το μηχανικό γρανάζι
- Ηλεκτρική γεννήτρια
- Μηχανισμός στροφής δεξιά-αριστερά (όπως το κάθετο ουραίο πτερύγιο ενός αεροσκάφους ή ενός ανεμοδείκτη)
- Αισθητήρες και έλεγχος

Λόγω της μεγάλης αδράνειας του στροφέα, οι σχεδιαστικές προκλήσεις περιλαμβάνουν την εκκίνηση, τον έλεγχο ταχύτητας κατά τη διάρκεια της λειτουργίας παραγωγή ισχύος, και την παύση της ανεμογεννήτριας (Α/Γ) όταν αυτό απαιτείται. Τα δινορεύματα της Α/Γ ή άλλος τύπος φρένου χρησιμοποιούνται για να σταματήσει η Α/Γ όταν απαιτείται σε έκτακτη ανάγκη ή για συντήρηση ρουτίνας.

Σε ένα σύγχρονο αιολικό πάρκο, κάθε Α/Γ πρέπει να έχει το σύστημα ελέγχου, του που παρέχει λειτουργικές και ασφαλείς λειτουργίες από μια απομακρυσμένη θέση (Σχήμα 2.1). Πρέπει επίσης να έχει, ένα ή περισσότερα από τα ακόλουθα πρόσθετα συστατικά:

- Ανεμόμετρα, τα οποία μετρούν τη ταχύτητα ανέμου και διαβιβάζουν τα στοιχεία στον ελεγκτή.
- Πολυάριθμους αισθητήρες, για να ελέγχει και να ρυθμίσει διάφορες μηχανικές και ηλεκτρικές παραμέτρους. Μία Α/Γ του 1 MW μπορεί να έχει εκατοντάδες αισθητήρες.
- Ελεγκτή απώλειας στήριξης, ο οποίος θέτει τη μηχανή σε λειτουργία σε ταχύτητες ανέμου 13 έως 24 Km/h και παύει σε ταχύτητες 130 έως 180 Km/h για να προστατεύσει τις πτέρυγες από την υπερένταση και την γεννήτρια από την υπερθέρμανση.
- Ηλεκτρονικά ισχύος για να μετατρέψει και να ρυθμίσει την ισχύ στα απαιτούμενα πρότυπα.

## Συστήματα Αιολικής και Ηλιακής Ενέργειας

- Ηλεκτρονικά ελέγχου, που συνήθως περιλαμβάνουν έναν υπολογιστή.
- Μπαταρία για τη βελτίωση της διαθεσιμότητας φορτίων σε αυτόνομες εγκαταστάσεις.
- Σύνδεση μετάδοσης (μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας) για τη σύνδεση των εγκαταστάσεων με το δίκτυο της περιοχής.



ΣΧΗΜΑ 2.1 Κέντρο ελέγχου αιολικού πάρκου.

Τα ακόλουθα είναι κοινοί χρησιμοποιημένοι όροι και ορολογίες στην βιομηχανία αιολικής ενέργειας:

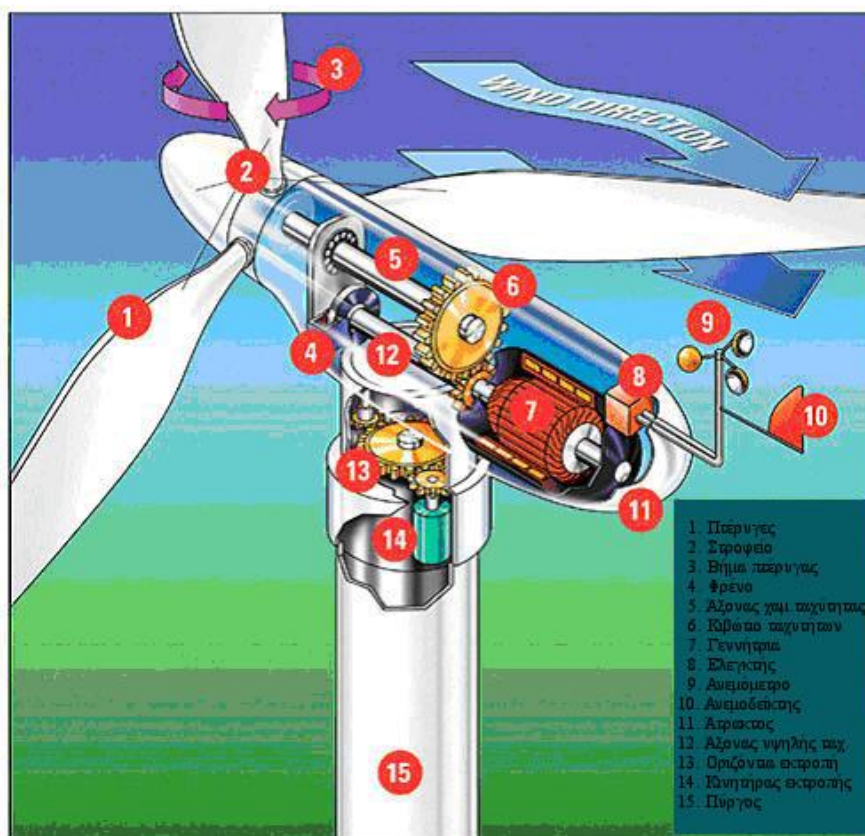
- *Άξονας χαμηλής ταχύτητας*: Ο στροφέας περιστρέφει τον άξονα με 30 έως 60 στροφές ανά λεπτό (σ.α.λ.).
- *Άξονας υψηλής ταχύτητας*: Οδηγεί τη γεννήτρια μέσω του μηχανισμού αύξησης ταχύτητας (κιβώτιο ταχυτήτων).
- *Φρένο*: Ένα δισκόφρενο, το οποίο σταματά τον στροφέα σε έκτακτη ανάγκη. Μπορεί να εφαρμοστεί μηχανικά, ηλεκτρικά, ή υδραυλικά.
- *Κιβώτιο ταχυτήτων*: Μηχανισμός γραναζιών, που συνδέει τον άξονα χαμηλής ταχύτητας με τον άξονα υψηλής ταχύτητας και αυξάνει την ταχύτητα της Α/Γ από 30 έως 60 στροφές/λεπτό στις 1200 έως 1800 στροφές/λεπτό, που απαιτείται από τις περισσότερες γεννήτριες για να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια με αποδοτικό τρόπο. Επειδή το κιβώτιο ταχυτήτων είναι ένα δαπανηρό και βαρύ τμήμα, οι μηχανικοί σχεδιαστές, ερευνούν χαμηλής ταχύτητας, άμεσης μετάδοσης κίνησης γεννήτριες, που δεν χρειάζονται κιβώτιο ταχυτήτων.
- *Γεννήτρια*: Είναι συνήθως μια ετοιμοπαράδοτη γεννήτρια επαγωγής που παράγει εναλλασσόμενο ρεύμα 50 ή 60 Hertz (Hz).
- *Άτρακτος*: Ο στροφέας συνδέεται στην άτρακτο, η οποία είναι τοποθετημένη στην κορυφή του πύργου και περιλαμβάνει ένα κιβώτιο ταχυτήτων, χαμηλής και υψηλής ταχύτητας άξονες, γεννήτρια, ελεγκτή, και φρένο. Ένα κάλυμμα προστατεύει τα εξαρτήματα μέσα στην άτρακτο. Μερικές άτρακτοι

## Συστήματα Αιολικής και Ηλιακής Ενέργειας

είναι αρκετά μεγάλες ώστε οι τεχνικοί μπορούν να εργάζονται όρθιοι στο εσωτερικό τους.

- *Βήμα έλικας:* Οι πτέρυγες (έλικες) στρέφονται, ή αλλάζουν κλίση, σε σχέση με τον άνεμο για να ρυθμίζουν τις στροφές του στροφέα, από ανέμους που έχουν πάρα πολύ υψηλές ταχύτητες ή πάρα πολύ χαμηλές για να παραγάγουν ηλεκτρική ενέργεια.
- *Προσήνεμα (κόντρα στον άνεμο) και υπήνεμα (με τον άνεμο):* Η προσήνεμη Α/Γ λειτουργεί κοιτάζοντας προς τον άνεμο όπως προεξέχει από την κορυφή του πύργου, ενώ η υπήνεμη αντίθετα.
- *Ανεμοδείκτης:* Μετρά την κατεύθυνση του αέρα και επικοινωνεί με τον μηχανισμό εκτροπής ώστε να προσανατολίσει την Α/Γ κατάλληλα σε σχέση με τον αέρα.
- *Μηχανισμός εκτροπής:* Διατηρεί την προσήνεμη Α/Γ να στρέφεται πάντα προς τον άνεμο όταν πάει να αλλάξει η διεύθυνσή του. Ένα κινητήρας εκτροπής κινεί τον μηχανισμό εκτροπής. Οι υπήνεμες Α/Γ δεν χρειάζονται μηχανισμό εκτροπής γιατί ο αέρας έρχεται από πίσω τους.

Ο σχεδιασμός και η λειτουργία των διαφόρων υποσυστημάτων περιγράφονται παρακάτω.



ΣΧΗΜΑ 2.2 Λεπτομέρειες της ατράκτου μίας ανεμογεννήτριας.



### 2.1.1. Ο ΠΥΡΓΟΣ

Ο πύργος υποστηρίζει τον στρόφρα και την άτρακτο (nacelle) που περιέχει τον μηχανισμό των γραναζιών, την ηλεκτρική γεννήτρια, τον μηχανισμό εκτροπής, και τον έλεγχο διακοπής λειτουργίας. Το σχήμα 2.2 παρουσιάζει λεπτομέρειες των εξαρτημάτων και της διάταξης ενός μεγάλου περιβλήματος, και το σχήμα 2.3 δείχνει την εγκατάσταση πάνω στον πύργο. Το ύψος του πύργου στο παρελθόν κυμαινόταν στα 20 με 50 μέτρα. Για μεσαίου και μεγάλου μεγέθους Α/Γ, το ύψος του πύργου είναι περίπου ίσο με την διάμετρο του στρόφρα όπως φαίνεται στις διαστάσεις μιας 600 kW Α/Γ (Σχήμα 2.4). Μικρές Α/Γ γενικά στερεώνονται σε πύργο που έχει ύψος πολλαπλάσιο μερικών διαμέτρων του στρόφρα. Αλλιώς θα υπέφεραν λόγω της χαμηλής ταχύτητας του ανέμου κοντά στο έδαφος. Το σχήμα 2.5 δείχνει ύψη πύργων, διαφόρων μεγεθών Α/Γ με βάση γνωστές κατασκευές.

Σε χρήση διατίθενται πύργοι είτε από χάλυβα είτε από τσιμέντο. Η κατασκευή μπορεί να είναι κυλινδρική ή δικτυωτή. Οι πύργοι πρέπει να έχουν ύψος τουλάχιστον 25 με 30 μέτρα, για την αποφυγή της τυρβώδους ροής του αέρα, λόγω των δένδρων και των κτιρίων.

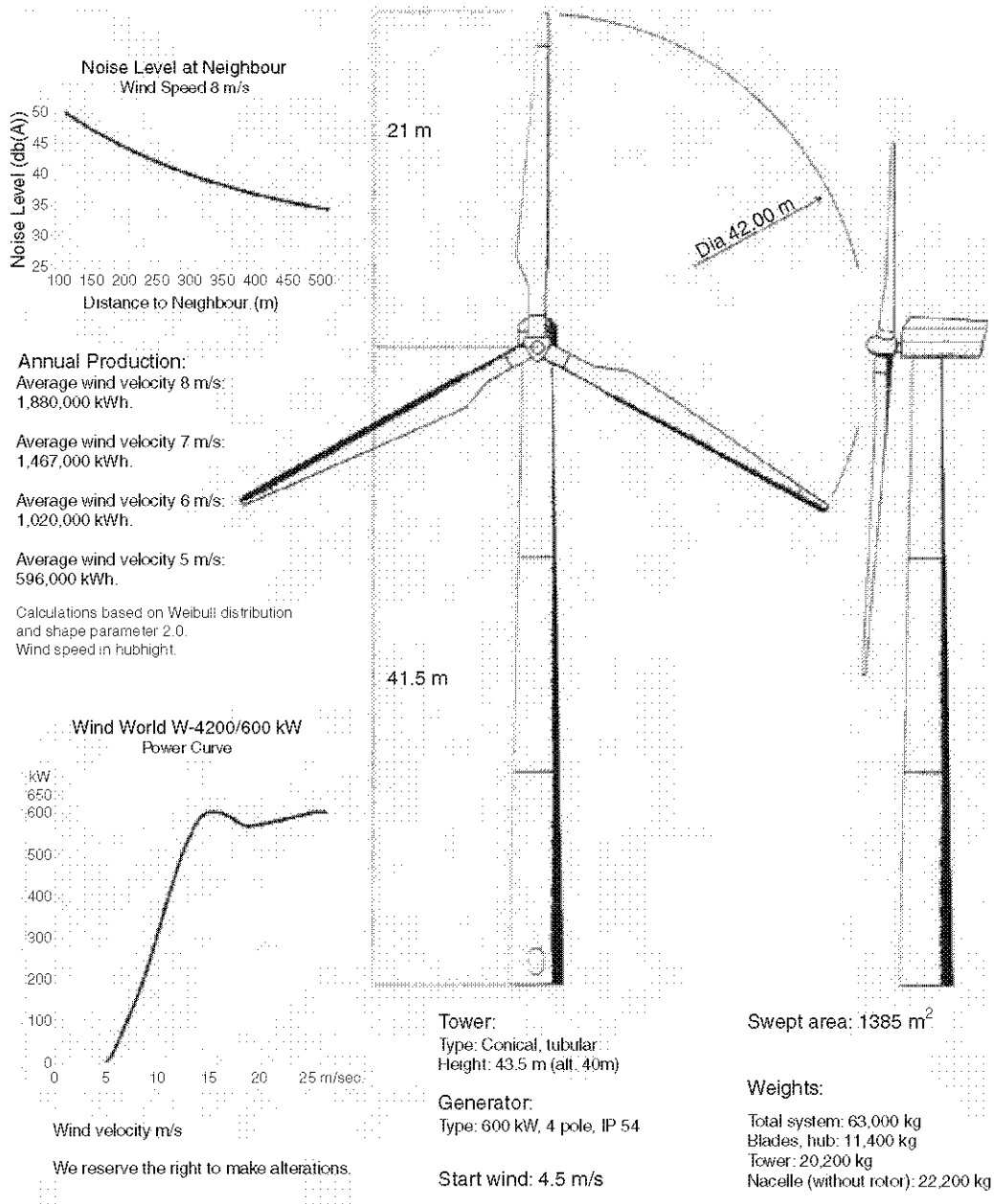


ΣΧΗΜΑ 2.3 Άτρακτος υπό κατασκευή.

Το κύριο ζήτημα στον σχεδιασμό του πύργου είναι η δυναμική του δομή. Η δόνηση του πύργου και η προκύπτουσα κόπωση λόγω της αυξομείωσης της ταχύτητας του ανέμου, αποφεύγονται από τον καλό σχεδιασμό. Αυτό απαιτεί προσεκτική αποφυγή όλων των συχνοτήτων συντονισμού του πύργου, του στρόφρα, και της άτρακτου από την αυξομείωση των συχνοτήτων που παράγονται από τον αέρα. Επαρκές περιθώριο πρέπει να διατηρηθεί μεταξύ των συχνοτήτων σε όλους τους τρόπους δόνησης. Οι

## Συστήματα Αιολικής και Ηλιακής Ενέργειας

συχρότητες συντονισμού της κατασκευής προσδιορίζονται από πλήρη «ιδιομορφική ανάλυση» (modal analysis), που οδηγεί στα ιδιοδιανύσματα και ιδιοτιμές των εξισώσεων μιγαδικών πινάκων, που παριστούν την κίνηση των δομικών στοιχείων. Οι συχνότητες διακύμανσης του ανέμου, βρίσκονται από μετρήσεις στην υπό εξέταση εγκατάσταση. Εμπειρία από μία παρόμοια κοντινή εγκατάσταση, μπορεί να γεφυρώσει το χάσμα στις απαιτούμενες πληροφορίες. Μεγάλοι γερανοί απαιτούνται για την εγκατάσταση τέτοιων πύργων. Σταδιακή αύξηση του ύψους του πύργου, ωστόσο, φέρνει μια νέα διάσταση στην εγκατάσταση (Σχήμα 2.6). Μεγάλοι στροφείς όμως επιβαρύνουν το πρόβλημα της μεταφοράς.

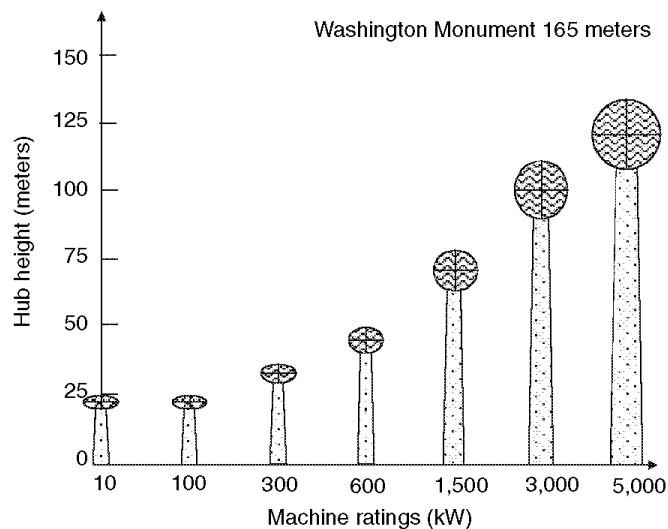


ΣΧΗΜΑ 2.4 Ανεμογεννήτρια 600 kW.

### 2.1.2. ANEMOΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Οι ανεμογεννήτριες κατασκευάζονται σε μεγέθη που κυμαίνονται από μερικά kW για αυτόνομες απομακρυσμένες εφαρμογές, μέχρι λίγα MW η κάθε μία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το μέγεθος της Α/Γ έχει αυξηθεί σταθερά. Το μέσο μέγεθος της Α/Γ που έχει εγκατασταθεί σε όλο τον κόσμο μέσα στο 2002 ήταν πάνω από 1 MW. Μέχρι το τέλος του 2003, περίπου 1.200 ανεμογεννήτριες του 1,5 MW κατασκευάστηκαν από τη GE Wind Energy, εγκαταστάθηκαν και λειτούργησαν. Σήμερα, ακόμη μεγαλύτερες μηχανές εγκαθίστανται σε μεγάλη εμπορική κλίμακα, όπως της GE οι νέες ανεμογεννήτριες 3,6 MW για υπεράκτια αιολικά πάρκα τόσο στην Ευρώπη όσο και στις ΗΠΑ. Προσφέρουν ελαφρύτερες μεταβλητής ταχύτητας, πτέρυγες, ελεγχόμενου βήματος πάνω σε πιο ήπιας δομής στήριξη, με αποτέλεσμα μια οικονομικά αποδοτικότερη θεμελίωση. Η ονομαστική ταχύτητα ανέμου είναι 14 m/sec με ταχύτητα εκκίνησης σύνδεσης 3,5 m/sec και αποκοπής στα 25 m/sec. Η διάμετρος της λεπίδας είναι 104 m με ύψος έως την πλήμνη 100 m για εγκαταστάσεις στην ξηρά και 75 μέτρα για υπεράκτιες εγκαταστάσεις. Τον Αύγουστο του 2002, το πρωτότυπο ανεμογεννήτριας της Enercon των 4,5 MW εγκαταστάθηκε κοντά στο Μαδγεμβούργο στην Ανατολική Γερμανία. Έχει διάμετρο στροφείου 113 m, ύψος μέχρι την πλήμνη 124 m, και μία ωοειδή άτρακτο. Η διάμετρος του ενισχυμένου τσιμεντένιου πύργου είναι 12 m στην βάση, λεπυνόμενη στα 4 m στην κορυφή. Σήμερα, ακόμη 5 MW μηχανές έχουν εγκατασταθεί σε μεγάλα υπεράκτια αιολικά πάρκα. Η μάζα μίας 5 MW Α/Γ μπορεί να ποικίλει από 150 έως 300 τόνους στην άτρακτο και 70 έως 100 τόνους στα περύγια, ανάλογα με την τεχνολογία κατασκευής που εγκρίθηκε κατά την σχεδίαση. Η προμήθεια μιας Α/Γ απαιτεί προδιαγραφές, οι οποίες είναι συχνά κομμένες-ραμμένες στα μέτρα των κατασκευαστών.

Οι κορυφαίοι κατασκευαστές ανεμογεννητριών στον κόσμο παρατίθενται στον Πίνακα 2.1.



ΣΧΗΜΑ 2.5 Ύψη πύργων διαφόρων χωρητικότητων ανεμογεννητριών

### 2.1.3. ΠΤΕΡΥΓΕΣ

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες έχουν δύο ή τρεις πτέρυγες, οι οποίες είναι αεροτομές κατασκευασμένες με προσοχή, που χρησιμοποιούν αεροδυναμικές αρχές για να εκμεταλλευτούν όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια.

Ο σχεδιασμός της αεροτομής, χρησιμοποιεί μεγαλύτερη επιφάνεια στην επάνω πλευρά, ενώ η κάτω επιφάνεια παραμένει ομοιόμορφη. Με βάση την αρχή του Bernoulli, δημιουργείται «άντωση» στη πτέρυγα, λόγω της διαφοράς πίεσης μεταξύ της ροής του ανέμου στην επάνω επιφάνεια της πτέρυγας και της ροής στην κάτω επιφάνεια της πτέρυγας. Αυτή η δύναμη, λόγω της αεροδυναμικής μορφής της πτέρυγας, ανυψώνει ένα αεροπλάνο ψηλά, στην περίπτωση μας όμως, περιστρέφει τις πτέρυγες γύρω από την πλήμνη (ομφαλό) του στροφείου. Εκτός από την δύναμη της άντωσης πάνω στις πτέρυγες, δημιουργείται και μια οπισθέλκουσα δύναμη, η οποία ενεργεί κάθετα προς τις λεπίδες, αντιδρώντας στην άντωση με συνέπεια την επιβράδυνση του στροφείου. Ο στόχος του σχεδιασμού, είναι να παραγάγει τον υψηλότερο λόγω «άντωσης προς οπισθέλκουσα» κατά μήκος της πτέρυγας, ώστε να βελτιστοποιήσει την ισχύ εξόδου της Α/Γ σε διάφορες ταχύτητες.



ΣΧΗΜΑ 2.6 Εγκατάσταση ανεμογεννητριών.

Πίνακας 2.1: Μερίδιο αγοράς Α/Γ

Χώρα	Εταιρία	Μερίδιο αγοράς 2014 (%)
Δανία	Vestas	13,2
Κίνα	Goldwind	10,3
Γερμανία	Enercon	10,1
Γερμανία	Siemens	8,0
Ινδία	Sulzon Group	6,3
Ηνωμένες Πολιτείες	GE Energy	4,9
Ισπανία	Gamesa	4,6
Κίνα	United Power	3,9
Κίνα	Ming Yang	3,7
Γερμανία	Nordex	3,4

Τα πτερύγια του στροφείου είναι το πιο ορατό μέρος της ανεμογεννήτριας, και αντιπροσωπεύουν την πρώτη γραμμή της αεροδυναμικής μηχανικής. Η σταθερή μηχανική τάση λόγω της φυγόκεντρης δύναμης και η κόπωση κάτω από συνεχείς κραδασμούς, κάνουν τη σχεδίαση της πτέρυγας την πιο αδύναμη μηχανική σύνδεση στο σύστημα. Απαιτείται εκτεταμένη προσπάθεια σχεδιασμού για την αποφυγή πρόωρης κόπωσης των πτερύγων. Ταχεία αύξηση του μεγέθους της Α/Γ, έχει καταστεί πρόσφατα δυνατή, λόγω της ταχείας προόδου στην τεχνολογία της πτέρυγας, που περιλαμβάνει την εμφάνιση της τεχνολογίας του άνθρακα με ίνες υάλου, με βάση εποξικά συστατικά. Οι πτέρυγες της Α/Γ είναι κατασκευασμένες από ξύλο υψηλής πυκνότητας ή ίνες γυαλιού και εποξικών συστατικών.

Η μεγάλη γωνία βήματος που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της απώλειας στήριξης, παράγει επίσης μια μεγάλη δύναμη. Το προκύπτον φορτίο στην πτέρυγα, μπορεί να προκαλέσει υψηλό επίπεδο δονήσεων και καταπόνησης, που πιθανόν να οδηγήσει σε μηχανική βλάβη. Ανεξάρτητα από την σχεδίαση της πτέρυγας για σταθερή ή μεταβλητή ταχύτητα, ο μηχανικός πρέπει να ασχοληθεί με τις δυνάμεις απώλειας στήριξης. Οι ερευνητές μετακινούνται από 2-D σε 3-D τύπου ανάλυσης τάσεων, για καλύτερη κατανόηση και σχεδίαση για τέτοιες δυνάμεις. Σαν αποτέλεσμα, η σχεδίαση της πτέρυγας αλλάζει συνεχώς, ιδιαίτερα στη βάση του πτέρυγας, όπου η φόρτιση είναι η μέγιστη, λόγω της επίδρασης του προβόλου (cantilever).

Η αεροδυναμική σχεδίαση της πτέρυγας είναι σημαντική, καθώς καθορίζει την δυνατότητα συλλογής ενέργειας. Οι πτέρυγες των μεγάλων και μικρών μηχανών, έχουν σημαντικά διαφορετικές φιλοσοφίες σχεδιασμού. Η μικρή μηχανή που κάθετα σε ένα πύργο σχετικά ψηλότερο από την διάμετρο της πτέρυγας, και γενικά χωρίς επίβλεψη, απαιτεί έναν σχεδιασμό χαμηλού κόστους συντήρησης. Από την άλλη, μία μεγάλη μηχανή τείνει να βελτιστοποιήσει την αεροδυναμική απόδοση για το μέγιστο δυνατό κέρδος ενέργειας. Σε κάθε περίπτωση, το κόστος της πτέρυγας διατηρείται γενικά κάτω από το 10% του συνολικού κόστους εγκατάστασης.

### 2.1.4. ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ

Η τεχνολογία των ανεμογεννητριών έχει αλλάξει σημαντικά τα τελευταία 25 χρόνια. Μεγάλες ανεμογεννήτριες έχουν εγκατασταθεί σήμερα και τείνουν να είναι μεταβλητής ταχύτητας σχεδίασης, περιλαμβάνοντας έλεγχο βήματος πτέρυγας και ηλεκτρονικά ισχύος. Μικρές μηχανές από τη άλλη, πρέπει να έχουν απλό και φθινό μηχανισμό ελέγχου ισχύος και ταχύτητας. Οι μέθοδοι ελέγχου ταχύτητας ανήκουν στις παρακάτω κατηγορίες.

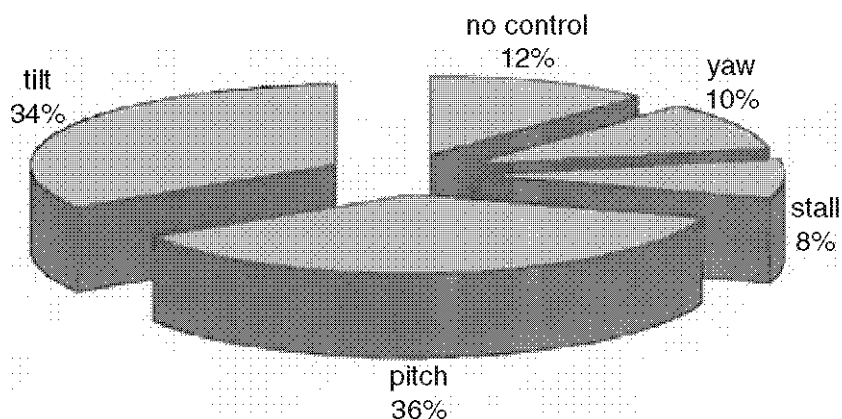
*Μη ελέγχου ταχύτητας:* Σ' αυτήν την μέθοδο, η Α/Γ, η ηλεκτρική γεννήτρια, και γενικότερα το όλο σύστημα σχεδιάζεται να αντέχει ακραίες ταχύτητες θυελλωδών ανέμων.

*Έλεγχος οριζόντιας εκτροπής (δεξιά-αριστερά):* Ο έλεγχος οριζόντιας εκτροπής, προσανατολίζει το στροφέιο να στρέφεται προς τον άνεμο. Μπορεί να είναι απλός μηχανισμός όπως η ουρά ενός ανεμοδείκτη ή πιο σύνθετος στους σύγχρονους πύργους. Θεωρητικές παραδοχές υπαγορεύουν, να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο ελεύθερης εκτροπής. Πάντως περιστρεφόμενες πτέρυγες με μεγάλη ροπή αδρανείας, παράγουν μεγάλη γυροσκοπική ροπή (γυροσκοπική ροπή είναι η αντίσταση που παρουσιάζει μία περιστρεφόμενη μάζα όταν προσπαθούμε να της αλλάξουμε διεύθυνση) κατά την διάρκεια της εκτροπής δεξιά-αριστερά, που συχνά έχει σαν αποτέλεσμα ηχηρό θόρυβο. Μία γρήγορη εκτροπή, μπορεί να δημιουργήσει θόρυβο που ξεπερνά τα όρια που υπαγορεύονται από τους εθνικούς κανονισμούς. Για αυτόν τον λόγο, χρησιμοποιείται συχνά ελεγχόμενη εκτροπή, στην οποία ο άξονας του στροφείου ολισθαίνει εκτός της κατεύθυνσης του ανέμου όταν η ταχύτητα του υπερβαίνει τα σχεδιαστικά όρια.

*Έλεγχος βήματος πτέρυγας:* Αλλάζει την κλίση της πτέρυγας όταν αλλάζει η ταχύτητα του ανέμου ώστε να ρυθμίσει την ταχύτητα περιστροφής του στροφείου. Μεγάλης κλίμακας παραγωγή ενέργειας, μετακινείται προς στροφεία μεταβλητής ταχύτητας με ηλεκτρονικά ισχύος, που περιλαμβάνουν έλεγχο βήματος.

*Έλεγχος απώλειας στήριξης:* Ο έλεγχος οριζόντιας εκτροπής και βήματος στροφείου, σταδιακά ολισθαίνει τον άξονα του στροφείου μέσα και έξω από την διεύθυνση του ανέμου. Σε θυελλώδεις ανέμους όμως, με ταχύτητες πάνω από συγκεκριμένο όριο, οι πτέρυγες ολισθαίνουν σε μία τέτοια θέση ώστε να επέλθει απώλεια στήριξης δηλαδή να μην παράγεται η δύναμη της «άντωσης» πάνω στις πτέρυγες ώστε να περιστρέφεται το στροφέιο. Κατά την φάση απώλειας στήριξης, η ροή του ανέμου παύει να είναι ομαλή γύρω από την περίμετρο της πτέρυγας, αλλά φθίνει πριν φθάσει στα άκρα της. Αυτό συμβαίνει πάντα σε μεγάλο βήμα πτέρυγας (γωνία κλίσης πτέρυγας). Οι πτέρυγες υπόκεινται τότε σε μία μεγάλης τιμής οπισθέλκουσα, με συνέπεια την μείωση της ισχύος εξόδου της Α/Γ. Με αυτόν τον τρόπο οι πτέρυγες διατηρούνται σε μία ταχύτητα κάτω του ορίου όταν έχουμε θυελλώδεις ανέμους. Αυτό όχι μόνο προστατεύει τις πτέρυγες από μηχανική καταπόνηση, αλλά και την γεννήτρια από υπερφόρτωση και υπερθέρμανση. Μετά την απώλεια στήριξης, η Α/Γ πρέπει να επανεκκινήσει μετά την υποχώρηση της θύελλας.

Το σχήμα 2.7 απεικονίζει την κατανομή των μεθόδων ελέγχου που χρησιμοποιούνται σε μικρού μεγέθους Α/Γ. Μεγάλες μηχανές γενικά, χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά ισχύος ελέγχου ταχύτητας, και καλύπτονται στα κεφάλαια 6 και 11.



ΣΧΗΜΑ 2.7 Μέθοδοι ελέγχου ταχύτητας για μικρού και μεσαίου μεγέθους Α/Γ.

## 2.2. ΑΠΟΔΟΣΗ ΙΣΧΥΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Η μέθοδος εκτίμησης της ονομαστικής απόδοσης ισχύος της ανεμογεννήτριας, δεν έχει παγκόσμιο αποδεκτό πρότυπο. Η δυσκολία υπάρχει, γιατί η ισχύς εξόδου της Α/Γ εξαρτάται από το τετράγωνο της διαμέτρου του στροφείου και τον κύβο της ταχύτητας του ανέμου. Συνεπώς, το στροφείο δεδομένης διαμέτρου, θα παράγαγε διαφορετική ισχύ για διαφορετική ταχύτητα ανέμου. Μία Α/Γ που μπορεί να παράγει 300 kW με 7 m/sec ταχύτητα ανέμου θα παράγαγε 450 kW με 8 m/sec. Ποια διαβάθμιση θα εκχωρείτο σε αυτήν την Α/Γ; Θα πρέπει να καθορίσουμε την ταχύτητα λειτουργίας; Παλαιότεροι σχεδιαστές ανεμογεννητριών, δημιούργησαν ένα σύστημα, που καθόριζε την ισχύ εξόδου για αυθαίρετα επιλεγμένες ταχύτητες ανέμου. Αυτή η μέθοδος δεν λειτούργησε καλά, γιατί δεν υπήρχε εύκολα συμφωνία σε πια ταχύτητα θα υπολογιζόταν η ισχύς. Η «ονομαστική» ταχύτητα ανέμου διέφερε μεταξύ 10 έως 15 m/sec υπό αυτήν την πρακτική. Οι κατασκευαστές παρέθεταν την μεγαλύτερη τιμή, αξιώνοντας μεγαλύτερη έξοδο ισχύος για την ίδια σχεδίαση ανεμογεννήτριας.

Τέτοια σύγχυση για την απόδοση αποφεύχθηκε από μερικούς Ευρωπαίους κατασκευαστές, οι οποίοι παρέθεταν μόνο την διάμετρο του στροφείου. Αλλά η σύγχυση συνεχίστηκε ως προς την μέγιστη ισχύ που μπορεί να λειτουργεί μια μηχανή, κάτω από την μέγιστη ταχύτητα ανέμου, συνεχώς και ασφαλώς. Μερικοί κατασκευαστές, υιοθέτησαν τον συνδυαστικό ορισμό απόδοσης  $\chi/\psi$ , η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας, προς την διάμετρο των πτερύγων του στροφείου. Παράδειγμα, το 300/30 kW/m σημαίνει, 300 kW μέγιστη ισχύς (ισχύς κορυφής) της ηλεκτρικής γεννήτριας και μία Α/Γ με στροφέα διαμέτρου 30 m. Ο λόγος αυτός καλείται «Ειδική ονομαστική ισχύς» (Specific Rated Capacity SRC) και χρησιμοποιείται συχνά σαν συγκριτικός δείκτης της σχεδίασης ανεμογεννητριών. Μετρά την ικανότητα παραγωγής ισχύος ανά τετραγωνικό μέτρο της επιφάνειας που σαρώνεται από τις πτέρυγες του στροφείου και ορίζεται με μονάδες kW/ m<sup>2</sup> ως:

$$SRC = \text{Ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας} / \text{Διάμετρος εκ περιστροφής της πτέρυγας} \quad (2.1)$$

Το SRC για μια 300/30 ανεμογεννήτρια είναι  $300 / \pi \times 15^2 = 0,42 \text{ kW} / \text{m}^2$ . Αυξάνει με την διάμετρο, δίνοντας ευνοϊκότερα οικονομικά οφέλη για μεγάλης κλίμακας μηχανές που ξεκινούν από περίπου  $0,2 \text{ kW} / \text{m}^2$  για ένα στροφέιο διαμέτρου 10 m έως  $0,5 \text{ kW} / \text{m}^2$  για στροφέιο 40 m διαμέτρου. Μερικές ανεμογεννήτριες, έχουν SRC των  $0,7 \text{ kW} / \text{m}^2$ , και μερικές φτάνουν τόσο υψηλά όσο  $1 \text{ kW} / \text{m}^2$ . Πτέρυγες με μεγαλύτερο SRC υποφέρουν από μεγαλύτερες τάσεις καταπόνησης κατά την λειτουργία τους, με συνέπεια μείωση της διάρκειάς ζωής τους. Όλες οι περιοχές συγκέντρωσης τάσεων (καταπόνησης), καθορίζονται προσεκτικά και εξαλείφονται σε υψηλού SRC σχεδιασμούς. Σύγχρονα εργαλεία σχεδιασμού, όπως η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων τάσεων και ανάλυσης δονήσεων, μπορεί να έχουν μεγάλη αξία στον σχεδιασμό του στροφείου.

Η ονομαστική τιμή μιας Α/Γ είναι σημαντική, καθώς δείχνει στον σχεδιαστή του συστήματος, πώς να ταξινομήσει το μέγεθος της ηλεκτρικής γεννήτριας, τον μετασχηματιστή της εγκατάστασης, και τα καλώδια σύνδεσης με τον υποσταθμό και την σύνδεση μετάδοσης (μεταφοράς ενέργειας) με το δίκτυο. Το σύστημα ισχύος, πρέπει να έχει ονομαστική τιμή, την τιμή κορυφής ισχύος (την μέγιστη ισχύ) της γεννήτριας. Επειδή η ισχύς της Α/Γ εξαρτάται από τον κύβο (δύναμη εις την τρίτη) της ταχύτητας του ανέμου, ο μηχανικός σχεδιασμού του συστήματος, προσαρμόζει τα χαρακτηριστικά λειτουργίας της Α/Γ και της γεννήτριας. Αυτό σημαίνει ότι επιλέγει την ονομαστική ταχύτητα της Α/Γ, να ταιριάζει με την γεννήτρια. Δεδομένου ότι το κιβώτιο ταχυτήτων και η γεννήτρια κατασκευάζονται μόνο σε διακριτά μεγέθη, η επιλογή της ονομαστικής ταχύτητας της Α/Γ μπορεί να είναι περίπλοκη. Η διαδικασία επιλογής περνά μέσα από πολλές επαναλήψεις, διαπραγμάτευσης μεταξύ κόστους και ωφέλειας των διαθέσιμων ταχυτήτων. Επιλέγοντας χαμηλή ονομαστική ταχύτητα, θα οδηγήσει σε σπατάλη ενέργειας σε ισχυρούς ανέμους. Από την άλλη, εάν η ονομαστική ταχύτητα είναι υψηλή, η αποδοτικότητα του στροφείου θα υποφέρει τον περισσότερο καιρό.

Το Σχήμα 2.8 είναι ένα παράδειγμα τεχνικού δελτίου πληροφοριών (data sheet) ανεμογεννήτριας 550 / 41 kW / m που κατασκευάζεται από την Nordtank Energy Group της Δανίας. Τέτοιου είδους δεδομένα χρησιμοποιούνται στην προκαταρκτική σχεδίαση του όλου συστήματος. Το SRC αυτού του μηχανήματος είναι 0.414. Έχει ταχύτητα ανέμου εκκίνησης-σύνδεσης 5 m / sec, ταχύτητα ανέμου αποκοπής 25 m / sec, και φτάνει την μέγιστη ισχύ στα 15 m / sec.

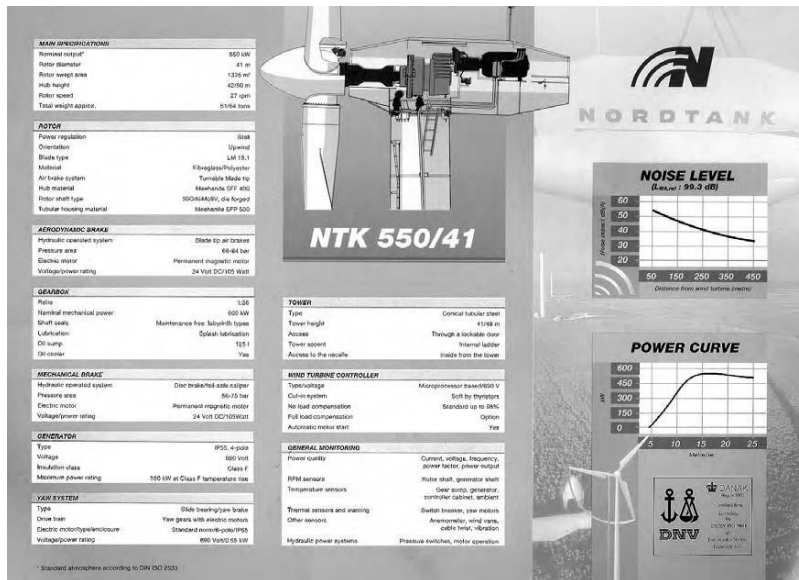
### **2.3. ΙΣΧΥΣ ΕΝΑΝΤΙ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ TIP SPEED RATIO (TSR)**

Η τυπική ροπή της Α/Γ έναντι της ταχύτητας στροφείου φαίνεται στο Σχήμα 2.9. Το σχήμα δείχνει μικρή ροπή σε μηδενική ταχύτητα, αυξανόμενη σε μια μέγιστη τιμή πριν πέσει σχεδόν στο μηδέν, όταν το στροφέιο απλά περιφέρεται ελεύθερα στον άνεμο. Δύο τέτοιες καμπύλες χαράσσονται για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου  $V1$  και  $V2$ , με  $V2$  μεγαλύτερης της  $V1$ . Η ισχύ που αντιστοιχεί στην ταχύτητα του στροφείου για τις δύο ταχύτητες του ανέμου φαίνεται στο Σχήμα 2.10. Καθώς η μηχανική ισχύς που μετατρέπεται σε ηλεκτρική, δίνεται από το γινόμενο της ροπής  $T$  και της γωνιακής ταχύτητας, η ισχύς είναι μηδενική σε μηδενική ταχύτητα και πάλι μηδενική σε υψηλή



## Συστήματα Αιολικής και Ηλιακής Ενέργειας

ταχύτητα με μηδενική ροπή. Η μέγιστη ισχύς παράγεται με μια ταχύτητα  $A/\Gamma$  κάπου ενδιάμεσα, όπως δεικνύεται από τα  $P1max$  και  $P2max$  για τις ταχύτητες  $V1$  και  $V2$ , αντίστοιχα. Η ταχύτητα με την μέγιστη ισχύ, δεν είναι η ίδια ταχύτητα με αυτήν της οποίας η ροπή είναι μέγιστη. Η στρατηγική λειτουργίας ενός καλά σχεδιασμένου συστήματος αιολικής ενέργειας, είναι να προσαρμόζει την ταχύτητα του στροφείου, να παράγει ισχύ συνεχώς κοντά στα σημεία  $Pmax$ .



ΣΧΗΜΑ 2.8 Τεχνικό φύλλο πληροφοριών ανεμογεννήτριας των 550 kW/41 m διαμέτρου στροφείου, με επίπεδο ισχύος και θορύβου.

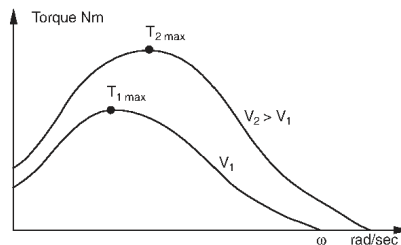
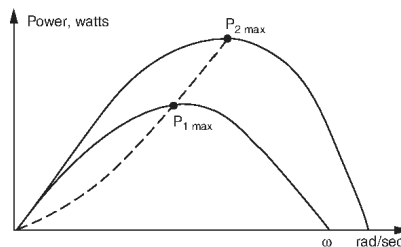


FIGURE 4.9 Wind turbine torque vs. rotor speed characteristic at two wind speeds,  $V_1$  and  $V_2$ .



ΣΧΗΜΑ 2.10 Ισχύς ανεμογεννήτριας έναντι ταχύτητας για δύο ταχύτητες ανέμου  $V1$  και  $V2$ .

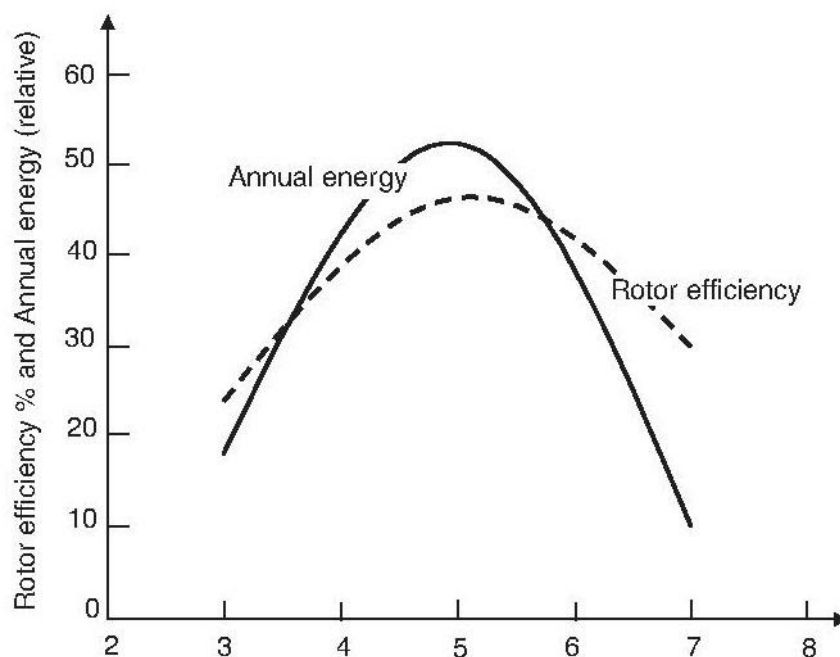
Επειδή το σημείο  $Pmax$  αλλάζει με την ταχύτητα του ανέμου, η ταχύτητα του στροφείου πρέπει, να προσαρμοστεί σύμφωνα με την ταχύτητα του ανέμου, για να

αναγκάσει το στροφέιο να λειτουργεί συνεχώς στο  $P_{max}$ . Αυτό μπορεί να γίνει με σχεδιασμό και λειτουργία ενός μεταβλητής ταχύτητας συστήματος.

Σε μια δεδομένη τοποθεσία (εγκατάσταση), η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται σε μία ευρεία περιοχή από το μηδέν έως μεγάλες θύελλες (βίαιες ριπές ανέμων). Ορίζουμε ως Λόγο Ταχύτητας Ακροπτερυγίου (Tip Speed Ratio TSR) τον τύπο:

$$TSR = \text{Γραμμική ταχ. ακροπτερυγίων} / \text{Προσήνεμη ταχ. ανέμου} = \omega R / V \quad (2.2)$$

όπου  $R$  και  $\omega$  είναι η ακτίνα και η γωνιακή ταχύτητα του στροφέιου αντίστοιχα, και  $V$  η ταχύτητα του ανέμου.



ΣΧΗΜΑ 2.11 Απόδοση στροφέιου και ετήσια παραγωγή ενέργειας έναντι TSR στροφέιου.

Για μια δεδομένη ταχύτητα ανέμου, η απόδοση του στροφέιου (συντελεστής ισχύος)  $C_p$  μεταβάλλεται με το TSR, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.11. Η μέγιστη τιμή της  $C_p$ , εμφανίζεται περίπου στην ίδια ταχύτητα ανέμου, που δίνει μέγιστη ισχύ στην καμπύλη κατανομής ισχύος του Σχήματος 2.10. Για την συλλογή υψηλής ισχύος σε υψηλής ταχύτητας ανέμους, το στροφέιο πρέπει επίσης να περιστρέφεται σε υψηλή ταχύτητα, διατηρώντας σταθερό το TSR στο βέλτιστο επίπεδο. Ωστόσο, τα ακόλουθα τρία χαρακτηριστικά απόδοσης του συστήματος σχετίζονται με το TSR:

1. Η μέγιστη απόδοση του στροφέιου  $C_p$  επιτυγχάνεται για ένα συγκεκριμένο TSR, το οποίο είναι χαρακτηριστικό του αεροδυναμικού σχεδιασμού μιας δεδομένης Α/Γ. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4, το TSR που απαιτείται για την εξαγωγή της μέγιστης ισχύος, κυμαίνεται μεταξύ της μονάδας περίπου για μηχανές με πολλαπλές πτέρυγες

χαμηλής ταχύτητας, έως έξι περίπου, για σύγχρονες μηχανές υψηλής ταχύτητας δύο πτερύγων.

2. Η φυγόκεντρος μηχανική καταπόνηση στο υλικό της πτέρυγας, είναι ανάλογη με το TSR. Η μηχανή λειτουργώντας σε υψηλότερο TSR κατ'ανάγκη καταπονείται περισσότερο. Ως εκ τούτου, εάν έχει σχεδιαστεί για την ίδια ισχύ, στην ίδια ταχύτητα ανέμου, η μηχανή που λειτουργεί σε μεγαλύτερο TSR θα έχει πιο λεπτά πτερύγια στροφείου.

3. Η ικανότητα μιας ανεμογεννήτριας να ξεκινά υπό φορτίο, είναι αντιστρόφως ανάλογη του TSR για το οποίο έχει σχεδιαστεί. Καθώς αυτή η αναλογία αυξάνεται, η ροπή εκκίνησης που παράγεται από τις πτέρυγες μειώνεται.

Είναι απαραίτητος ο έλεγχος μεταβλητής ταχύτητας, για να διατηρηθεί σταθερό το TSR και να κρατηθεί η απόδοση του στροφείου στο μέγιστο. Στο βέλτιστο TSR, οι πτέρυγες προσανατολίζονται, ώστε να μεγιστοποιήσουν την άντωση και να ελαχιστοποιήσουν την οπισθέλκουσα στο στροφείο. Η Α/Γ που επιλέγεται για λειτουργία σε σταθερό TSR, επιτρέπει, ώστε η περιστροφική ταχύτητα τόσο του στροφείου όσο και της γεννήτριας, να ποικίλουν μέχρι και 60% μεταβάλλοντας το βήμα των πτερύγων.

#### ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2 Πλεονεκτήματα σταθερής και μεταβλητής ταχύτητας συστημάτων

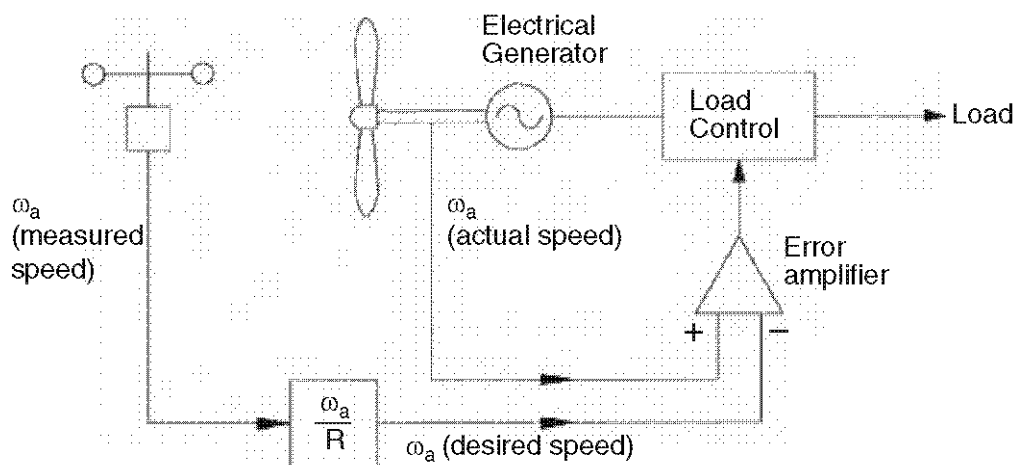
<ul style="list-style-type: none"><li>• <i>Σταθερής ταχύτητας σύστημα:</i> Απλό και φθινό ηλεκτρικό σύστημα Λιγότερα εξαρτήματα άρα υψηλότερη αξιοπιστία Μικρότερη πιθανότητα μηχανικών συντονισμών της δομής Μη μετατροπή συχνότητας, άρα όχι ηλεκτρικές αρμονικές Χαμηλότερο κόστος κεφαλαίου</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• <i>Μεταβλητής ταχύτητας σύστημα:</i> Υψηλότερη απόδοση στροφείου, άρα μεγαλύτερο κέρδος ανά έτος Χαμηλότερη μεταβατικών φαινομένων ροπή Λιγότερα γρανάζια, άρα φθινό κιβώτιο ταχυτήτων Μη χρήση μηχανικής απόσβεσης, γίνεται ηλεκτρικά αν απαιτηθεί Όχι προβλήματα συγχρονισμού Ηλεκτρικοί έλεγχοι μπορούν να μειώσουν πτώσεις τάσεων του συστήματος</li></ul>

#### **2.4. ΜΕΓΙΣΤΗ ΣΥΛΛΟΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Ο σχεδιασμός συστήματος αιολικής ενέργειας, πρέπει να βελτιστοποιεί την ετήσια συλλογή ενέργειας σε μια δεδομένη τοποθεσία. Ο μόνος τρόπος λειτουργίας για την εξαγωγή της μέγιστης ενέργειας, είναι να μεταβάλλει την ταχύτητα της Α/Γ, για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου, έτσι ώστε ανά πάσα στιγμή το TSR να είναι συνεχώς ίσο με εκείνο που απαιτείται για μέγιστο συντελεστή ισχύος  $C_p$ . Η θεωρία και η εμπειρία στην πράξη, δείχνει ότι η λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας, αποδίδει 20 έως 30% περισσότερη ισχύ από ότι εκείνης με λειτουργία σταθερής ταχύτητας. Παρ' όλα αυτά, το κόστος ελέγχου μεταβλητής ταχύτητας αυξάνεται. Κατά το σχεδιασμό του

συστήματος, αυτός ο συμβιβασμός, ανάμεσα στην αύξηση της ενέργειας και του κόστους, πρέπει να βελτιστοποιηθεί. Στο παρελθόν, το αυξημένο κόστος για σχεδιασμό μεταβλητού βήματος πτέρυγας στροφείου ή ο έλεγχος της ταχύτητας με ηλεκτρονικά ισχύος, ξεπερνούσε τα οφέλη από εκείνα της αύξησης συλλογής ενέργειας. Ωστόσο, η πτώση των τιμών των ηλεκτρονικών ισχύος για έλεγχο ταχύτητας και η διαθεσιμότητα των σύνθετων ινών υψηλής αντοχής, για την κατασκευή στροφείων υψηλών ταχυτήτων, έχουν καταστήσει οικονομική την συλλογή περισσότερης άεργης ενέργειας σε υψηλότερες ταχύτητες ανέμου. Η λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας έχει ένα έμμεσο πλεονέκτημα. Επιτρέπει τον έλεγχο της ενεργούς και άεργης ισχύος ξεχωριστά, κατά την διαδικασία ελέγχου αυτόματης παραγωγής. Κατά τη λειτουργία σταθερής ταχύτητας, από την άλλη, το στροφείο κλείνει κατά τη διάρκεια υψηλών ταχυτήτων ανέμου, χάνοντας σημαντική ενέργεια. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της σταθερής και μεταβλητής ταχύτητας λειτουργίας αναφέρονται στον πίνακα 2.2.

Σχεδόν όλοι οι μεγάλοι προμηθευτές προσφέρουν τώρα συστήματα μεταβλητής ταχύτητας σε συνδυασμό με ρύθμιση βήματος πτέρυγας. Δυνητικά πλεονεκτήματα του συστήματος μεταβλητής ταχύτητας περιλαμβάνουν ενεργή υποστήριξη του δικτύου, λειτουργία ανίχνευσης μέγιστης ισχύος, και φθηνότερα θεμέλια υπεράκτιων κατασκευών. Οι διπλά τροφοδοτούμενες γεννήτριες επαγωγής, χρησιμοποιούνται σε κάποιες μεγάλες ανεμογεννήτριες όπως η NEG Micon των 4,2 MW, μηχανές με διάμετρο στροφείου 110 m και πολλών μεγαβάττ μηχανές της GE. Πρόκειται για μια ανερχόμενη πρωτοποριακή τεχνολογία για μεταβλητής ταχύτητας συστήματα με κιβώτιο ταχυτήτων, πρωτίστως επειδή μόνο η ισχύς της συχνότητας που ολισθαίνει (της τάξης των 20 έως 30% του συνόλου) πρέπει να τροφοδοτηθεί μέσω του μετατροπέα συχνότητας. Αυτό εξοικονομεί σημαντικό κόστος για τα ηλεκτρονικά ισχύος.



ΣΧΗΜΑ 2.12 Μέγιστη ισχύς λειτουργίας με έλεγχου ταχύτητας ακροπερυγίου στροφείου.

## **2.5. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ**

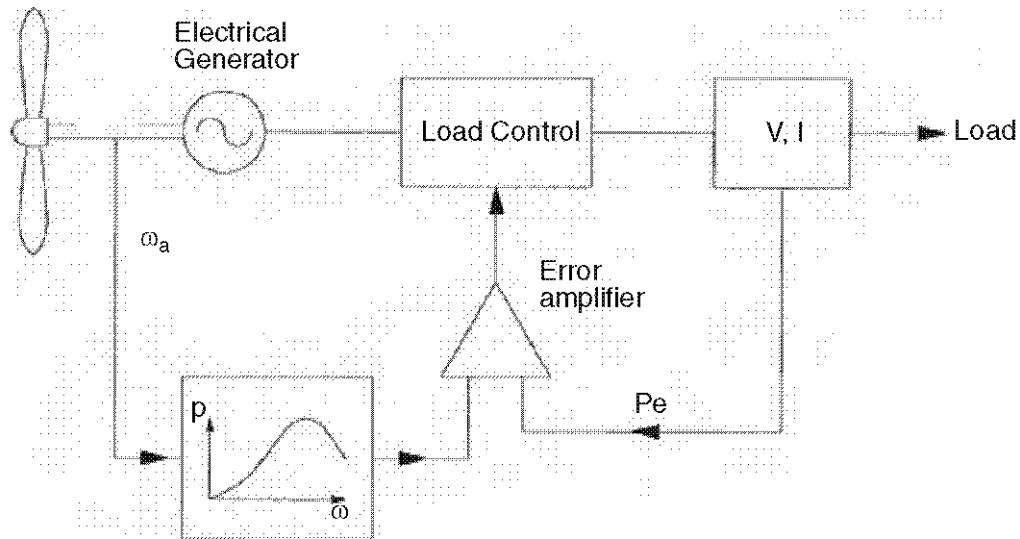
Όπως φαίνεται παραπάνω, λειτουργώντας την ανεμογεννήτρια σε σταθερό TSR, που αντιστοιχεί στο σημείο μέγιστης ισχύος, ανά πάσα στιγμή μπορεί να παράγει ετησίως 20 με 30% περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια. Ωστόσο, αυτό απαιτεί ένα σύστημα ελέγχου, ώστε να λειτουργεί με μεταβλητή ταχύτητα για να παράγει συνεχώς την μέγιστη ισχύ. Δύο πιθανά σχήματα για μια τέτοια επιχείρηση έχουν ως εξής:

### **2.5.1. ΣΧΗΜΑ ΣΤΑΘΕΡΟΥ TSR**

Σε αυτό το σχήμα η μηχανή λειτουργεί συνεχώς στο βέλτιστο TSR, το οποίον είναι ένα χαρακτηριστικό της δεδομένης ανεμογεννήτριας. Αυτή η βέλτιστη τιμή του TSR αποθηκεύεται σαν τιμή αναφοράς στον υπολογιστή ελέγχου. Η ταχύτητα του ανέμου μετράται συνεχώς και συγκρίνεται με την ταχύτητα ακροπτερυγίου. Το σήμα σφάλματος, οδηγείται κατόπιν στο σύστημα ελέγχου, το οποίο αλλάζει την ταχύτητα της Α/Γ για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος (Εικόνα 2.12). Σε αυτήν την στιγμή το στρόφειο πρέπει να λειτουργεί στο TSR αναφοράς, παράγοντας τη μέγιστη ισχύ. Το σύστημα αυτό έχει το μειονέκτημα της απαίτησης μέτρησης της τοπικής ταχύτητας του ανέμου, η οποία θα μπορούσε να παρουσιάζει σημαντικό σφάλμα, ιδιαίτερα σε μεγάλα αιολικά πάρκα με φαινόμενα σκίασης. Όντας ευαίσθητο στις αλλαγές της επιφάνειας των πτερύγων, το βέλτιστο TSR αλλάζει σταδιακά με την ηλικία και το περιβάλλον. Το TSR αναφοράς του υπολογιστή, πρέπει να τροποποιηθεί και αυτό αναλόγως πολλές φορές, και το οποίο είναι ακριβό. Εκτός αυτού, είναι δύσκολο να προσδιοριστεί το βέλτιστο νέο TSR, με αλλαγές που δεν είναι πλήρως κατανοητές ή μετρώνται εύκολα.

### **2.5.2. ΣΧΗΜΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ**

Η καμπύλη ισχύος έναντι της ταχύτητας έχει μόνο μία καλά καθορισμένη κορυφή. Αν λειτουργούμε στο σημείο κορυφής, μια μικρή αύξηση ή μείωση της ταχύτητας της Α/Γ δεν θα οδηγήσει σε καμία αλλαγή στην ισχύ εξόδου, καθώς το σημείο κορυφής βρίσκεται τοπικά στο σχεδόν επίπεδο τμήμα της καμπύλης. Με άλλα λόγια, μια απαραίτητη προϋπόθεση για την ταχύτητα να βρίσκεται στο σημείο μέγιστης ισχύος είναι η εξής:



ΣΧΗΜΑ 2.13 Λειτουργία μέγιστης ισχύος με σύστημα ελέγχου ισχύος

$$dP / d\omega = 0 \quad (2.3)$$

Η αρχή αυτή χρησιμοποιείται στο σύστημα ελέγχου (Σχήμα 2.13). Η ταχύτητα αυξάνεται ή μειώνεται σε μικρά βήματα, η ισχύς μετράται συνεχώς, και το  $\Delta P / \Delta \omega$  συνεχώς υπολογίζεται. Αν η αναλογία αυτή είναι θετική – που σημαίνει ότι παίρνουμε περισσότερη ισχύ με την αύξηση της ταχύτητας - η ταχύτητα αυξάνεται περαιτέρω. Από την άλλη, εάν η αναλογία είναι αρνητική, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας θα μειωθεί αν αλλάξουμε και άλλο την ταχύτητα.

Η ταχύτητα διατηρείται στο επίπεδο όπου το  $\Delta P / \Delta \omega$  είναι κοντά στο μηδέν. Αυτή η μέθοδος, δεν είναι ευαίσθητη σε σφάλματα στην μέτρηση της τοπικής ταχύτητας του ανέμου, αλλά και στην σχεδίαση των ανεμογεννητριών. Είναι, ως εκ τούτου, η προτιμώμενη μέθοδος. Σε αιολικό πάρκο με πολλές μηχανές, κάθε Α/Γ πρέπει να ελέγχεται από τον δικό του βρόχο ελέγχου, με ενσωματωμένες την επιχειρησιακή λειτουργία και ασφάλεια.

## 2.6. ΣΥΜΒΙΒΑΣΜΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Όταν η έκταση γης είναι περιορισμένη ή έχει ακριβή τιμή αγοράς, μια μελέτη βελτιστοποίησης που πρέπει να διεξάγεται σε ένα πρώτο στάδιο του σχεδιασμού αιολικού πάρκου, είναι να προσδιοριστεί ο αριθμός των Α/Γ, το μέγεθος τους, και η απόσταση μεταξύ των ανεμογεννητριών για την εξαγωγή της μέγιστης ετήσιας ενέργειας. Οι συμβιβασμοί σε μια τέτοια μελέτη είναι οι εξής:

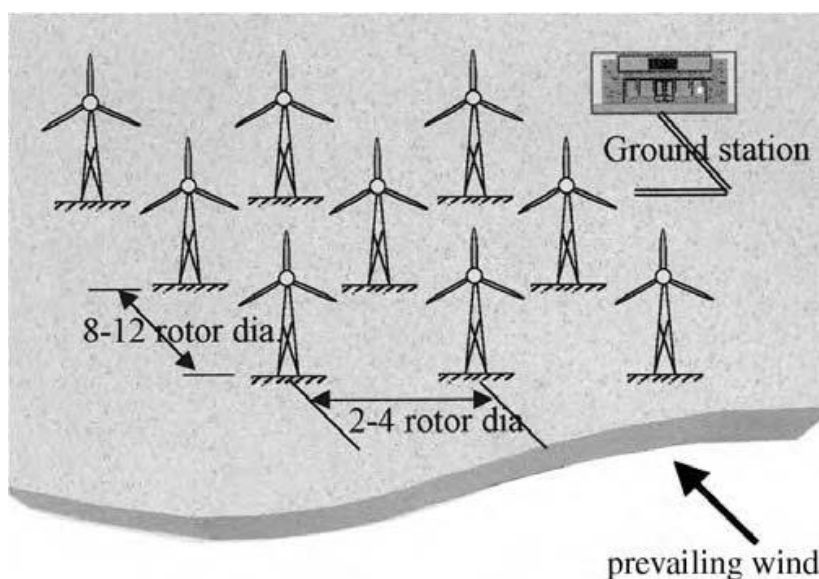
### 2.6.1. ΠΥΡΓΟΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΣΤΑΣΗ

Μεγάλες ανεμογεννήτριες κοστίζουν λιγότερο ανά μεγαβάτ ισχύος και καταλαμβάνουν λιγότερο χώρο γης. Από την άλλη, λιγότερο μεγάλες μηχανές, μπορούν

να μειώσουν τις MWh ενέργειας ανά έτος, καθώς η απώλεια μιας μεγάλης μηχανής, έχει μεγαλύτερο αντίκτυπο στην παραγόμενη ενέργεια. Ένα συγκεκριμένο μέγεθος Α/Γ μπορεί να ξεχωρίσει, ώστε να είναι η βέλτιστη επιλογή για ένα δεδομένο αιολικό πάρκο από την σκοπιά κόστους παραγωγής των επενδύσεων και της ενέργειας.

Οι ψηλοί πύργοι είναι προνομιακοί, αλλά το ύψος πρέπει να βελτιστοποιηθεί με τούς τοπικούς κανονισμούς και περιορισμούς του εδάφους και των γειτονικών περιοχών. Το βάρος της ατράκτου και η δυναμική της κατασκευής είναι επίσης σημαντικός παράγων.

Κατά την εγκατάσταση ενός συμπλέγματος μηχανών σε ένα αιολικό πάρκο, πρέπει να τηρηθεί συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ ανεμογεννητριών, ώστε να βελτιστοποιηθεί η ετήσια ενεργειακή συγκομιδή. Η απόσταση εξαρτάται από το έδαφος, την κατεύθυνση του ανέμου, την ταχύτητα του ανέμου, και το μέγεθος της Α/Γ. Η βέλτιστη απόσταση βρίσκεται μεταξύ σειρών 8 έως 12 διαμέτρων στροφείου κατά τη διεύθυνση του ανέμου, και 2 έως 4 διαμέτρους στροφείου μεταξύ τους κατά την πλάγια κατεύθυνση (σχήμα 4,14). Ένα αιολικό πάρκο που αποτελείται από 20 πύργους, ονομαστικής ισχύος 500 kW κάθε μία, χρειάζεται 1 με 2 km<sup>2</sup> έκταση γης. Από αυτά, λιγότερο από το 5% της γης απαιτείται για τις ανεμογεννήτριες και τους δρόμους πρόσβασης. Το υπόλοιπο της γης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την αρχική του χρήση. Έτσι, οι ανεμογεννήτριες μπορούν να συνυπάρχουν με βόσκηση, κτηνοτροφία, αλιεία, και ψυχαγωγική χρήση (Σχήμα 2.15). Ο μέσος αριθμός μηχανών στα αιολικά πάρκα, ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό, και κυμαίνεται από μερικές έως εκατοντάδες, ανάλογα με την απαιτούμενη χωρητικότητα ισχύος του αιολικού πάρκου. Οι προηγούμενοι κανόνες για την απόσταση, εξασφαλίζουν ότι οι ανεμογεννήτριες δεν σκιάζουν εκείνους των πίσω σειρών. Ορισμένα αιολικά πάρκα έχουν χρησιμοποιήσει μικρή απόσταση μεταξύ σειρών των 5 με 6 διαμέτρων στροφείου. Για ένα τέτοιο πάρκο όπως αυτό στο Mackinaw City, αναφέρθηκε ότι τα στροφεία στην υπήνεμη διεύθυνση των μπροστινών περιστρέφονται πιο αργά λόγω της σκίασης από τα προσήνεμα στροφεία.



ΣΧΗΜΑ 2.14 Βέλτιστη απόσταση πύργων αιολικού πάρκου με επίπεδο έδαφος

Οι διακυμάνσεις της αιολικής ενέργειας και οι μεταβάσεις σε λιγότερες μεγάλες μηχανές θα κόστιζε περισσότερο στο φιλτράρισμα της ισχύος και των διακυμάνσεων τάσης, ή θα υποβάθμιζε την ποιότητα της ενέργειας, επισύροντας ποινές από το δίκτυο μεταφοράς.

Η μέθοδος βελτιστοποίησης που παρουσίασε ο Roy, λαμβάνει υπόψη τους προηγούμενους συμβιβασμούς. Επιπλέον, περιλαμβάνει την επίδραση του ύψους του πύργου, που πηγαίνει με την διάμετρο του στροφείου, τις διαθέσιμες ονομαστικές ισχύεις, το κόστος κατά την στιγμή της προμήθειας, και την ταχύτητα του ανέμου. Η επίδραση της σκίασης των μπροστινών στροφείων και πύργων αγνοούνται για λόγους απλότητας. Τέτοια βελτιστοποίηση, οδηγεί σε έναν ορισμένο αριθμό και μέγεθος ανεμογεννητριών λόγω τοποθεσίας που να ελαχιστοποιεί το κόστος ενέργειας.



ΣΧΗΜΑ 2.15 Χρήση γης όπως γινόταν αρχικά (Από Vestas Wind Systems, Denmark)

### **2.6.2. ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΤΕΡΥΓΩΝ**

Μπορεί κάποιος να εξάγει την ισχύ που διατίθεται από τον άνεμο με ένα μικρό αριθμό πτερύγων γρήγορα περιστρεφόμενες, ή έναν μεγάλο αριθμό πτερύγων αργά περιστρεφόμενες. Περισσότερες πτέρυγες δεν δίνουν περισσότερη ισχύ, αλλά δίνουν περισσότερη ροπή και απαιτούν βαρύτερη κατασκευή. Μερικές γρήγορα περιστρεφόμενες πτέρυγες, έχουν αποτέλεσμα ένα οικονομικότερο σύστημα. Έχουν κατασκευαστεί ανεμογεννήτριες, με αριθμό πτερύγων που κυμαίνεται από 1 έως 40 ή περισσότερο. Μία μηχανή μίας λεπίδας, αν και τεχνικά εφικτή, δίνει μια υπερηχητική ταχύτητα ακροπτερυγίου και μία εξαιρετικά παλλόμενη ροπή, προκαλώντας υπερβολικούς κραδασμούς. Είναι, ως εκ τούτου, δύσκολο να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλα συστήματα. Μεγάλου αριθμού πτερύγων στροφεία χαμηλού TSR, χρησιμοποιούνταν



στο παρελθόν για άντληση νερού και άλεση δημητριακών, εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ροπή εκκίνησης. Σύγχρονα υψηλού TSR στροφεία για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχουν δύο ή τρία πτερύγια, πολλά από αυτά μόνο δύο, αν και το πρότυπο της Δανίας είναι τρεις πτέρυγες. Οι σημαντικότεροι παράγοντες που εμπλέκονται στην απόφαση για τον αριθμό των πτερύγων είναι οι εξής:

- Η επίδραση στον συντελεστή ισχύος
- Το σχεδιασμένο TSR
- Τα μέσα περιορισμού του ρυθμού εκτροπής για να μειωθεί η γυροσκοπική κόπωση

Σε σύγκριση με τον σχεδιασμό δύο πτερύγων, η μηχανή των τριών πτερύγων έχει ομαλότερη ισχύ εξόδου και μια ισορροπημένη γυροσκοπική δύναμη. Δεν υπάρχει καμία ανάγκη ταλάντευσης του στροφείου, επιτρέποντας έτσι την χρήση μιας απλής άκαμπτης πλήμνης. Τρεις πτέρυγες είναι πιο συχνές στην Ευρώπη, όπου οι μεγάλες μηχανές έως μερικά MW κατασκευάζονται με διαμόρφωση τριών πτερύγων. Η πρακτική στην ΗΠΑ ωστόσο, ήταν η χρήση δύο πτερύγων. Προσθέτοντας τρίτη πτέρυγα αυξάνει το συντελεστή ισχύος μόνο κατά περίπου 5%, δίνοντας ένα μειωμένο ποσοστό απόδοσης λόγω του 50% περισσότερου βάρους πτέρυγας και του κόστους αυτής. Το στροφείο δύο πτερύγων είναι επίσης απλούστερο να υψωθεί, επειδή μπορεί να συναρμολογηθεί επί τόπου και ανυψώνεται στον άξονα χωρίς περίπλοκες μανούβρες κατά τη διάρκεια της ανύψωσης. Ο αριθμός των λεπίδων, συχνά θεωρείται σαν η σταθερότητα των πτερύγων. Υψηλότερος λόγος σταθερότητας δίνει μεγαλύτερη ροπή εκκίνησης και οδηγεί σε λειτουργία χαμηλής ταχύτητας. Για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η Α/Γ θα πρέπει να λειτουργεί σε υψηλές ταχύτητες, καθώς η ηλεκτρική γεννήτρια ζυγίζει λιγότερο και λειτουργεί πιο αποτελεσματικά σε υψηλές ταχύτητες. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο όλες οι ανεμογεννήτριες μεγάλης κλίμακας, έχουν χαμηλή αναλογία σταθερότητας, με μόνο δύο ή τρεις πτέρυγες.

### **2.6.3. ΠΡΟΣΗΝΕΜΑ Η ΥΠΗΝΕΜΑ ΣΤΡΟΦΕΙΑ**

Η λειτουργία του στροφείου προσήνεμα του πύργου, παράγει υψηλότερη ισχύ, δεδομένου ότι εξαλείφει την σκίαση του πύργου στις πτέρυγες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερο θόρυβο, μικρότερη κόπωση πτέρυγας, και ομαλότερη απόδοση ισχύος. Μειονέκτημα είναι ότι το στροφείο, πρέπει συνεχώς να βλέπει τον άνεμο μέσω του μηχανισμού εκτροπής. Ο βαρύτερος μηχανισμός εκτροπής μιας προσήνεμης ανεμογεννήτριας, απαιτεί πιο βαρύ και άκαμπτο στροφείο σε σύγκριση με ένα υπήνεμο.

Το υπήνεμο στροφείο έχει τα «απόνερα του πύργου» (σκίασμα του ανέμου) μπροστά του και χάνει κάποια ισχύ από την ελαφρά μείωση του ανέμου. Από την άλλη, επιτρέπει την χρήση ενός ελεύθερου συστήματος εκτροπής. Επιτρέπει επίσης, οι πτέρυγες να εκτρέπονται μακριά από τον πύργο, όταν υπερφορτώνεται. Μειονέκτημα είναι ότι η μηχανή μπορεί να εκτρέπεται προς την ίδια κατεύθυνση (ολόκληρες

στροφές) για μεγάλη χρονική περίοδο, με συνέπεια την συστροφή των καλωδίων που μεταφέρουν το ρεύμα από τις ανεμογεννήτριες.

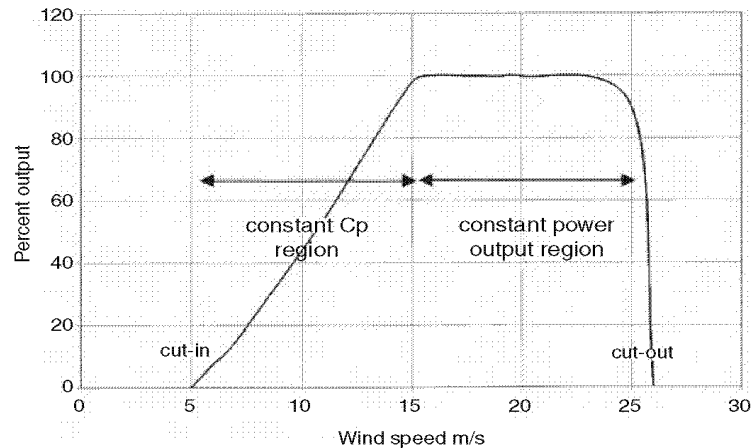
Και οι δύο τύποι έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν χωρίς σαφή προτίμηση. Ωστόσο, η προσήνεμη διαμόρφωση του στροφείου έχει γίνει πρόσφατα πιο συχνή.

#### **2.6.4. ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΣ ΕΝΑΝΤΙ ΚΑΘΕΤΟΥ ΑΞΟΝΑ**

Στην μηχανή οριζόντιου άξονα, που θεωρείται κλασική, ο άξονας περιστροφής της πτέρυγας κείται οριζόντια σε σχέση με το έδαφος και παράλληλα προς την ροή του ανέμου. Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες, κατασκευάζονται σήμερα με σχεδιασμό οριζόντιου άξονα, ο οποίος προσφέρει μια οικονομικά αποδοτική κατασκευή, εγκατάσταση και έλεγχο μεταβάλλοντας την κλίση (το βήμα) της πτέρυγας.

Η μηχανή Darricus με κάθετο άξονα έχει διαφορετικά πλεονεκτήματα. Πρώτα απ' όλα, είναι πανκατευθυντική και δεν απαιτεί μηχανισμό εκτροπής για να προσανατολίζεται συνεχώς προς την κατεύθυνση του ανέμου. Δεύτερον, ο κάθετος άξονα μετάδοσης κίνησης της, απλοποιεί την εγκατάσταση του κιβωτίου ταχυτήτων και της ηλεκτρικής γεννήτρια επί του εδάφους, καθιστώντας τη δομή πολύ απλούστερη. Από την άλλη, απαιτεί συρματόσχοινα που δένουν στην κορυφή για την υποστήριξη της δομής. Αυτό θα μπορούσε να περιορίσει τις εφαρμογές της, ιδιαίτερα σε υπεράκτιες περιοχές. Συνολικά, η μηχανή κατακόρυφου άξονα δεν έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως, κυρίως λόγω της ισχύς εξόδου της, που δεν μπορεί να ελεγχθεί εύκολα σε ισχυρούς ανέμους απλά με την αλλαγή του βήματος της πτέρυγας. Με σύγχρονα χαμηλού κόστους ηλεκτρονικά ισχύος μεταβλητής ταχύτητας που αναδύονται στον κλάδο της αιολικής ενέργειας, η διαμόρφωση Darricus μπορεί να αναβιώσει, ιδιαίτερα για εφαρμογές μεγάλης χωρητικότητας.

Η Darricus τύπου μηχανή, έχει δομικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με μία οριζόντιου άξονα Α/Γ, επειδή είναι ισοροπημένη. Οι πτέρυγες «υφίστανται» την μέγιστη ροπή άντωσης δύο φορές ανά περιστροφή. Υφιστάμενες μέγιστη ροπή σε μία πτέρυγα μία φορά ανά περιστροφή, εγείρει πολλές φυσικές συχνότητες, προκαλώντας υπερβολικούς κραδασμούς. Επίσης, η γεννήτρια μίας ανεμογεννήτριας κάθετου άξονα, βρίσκεται κάτω στο έδαφος. Ως εκ τούτου, δεν είναι εφικτή η αποτελεσματική η χρήση υψηλότερων ταχυτήτων ανέμου χρησιμοποιώντας υψηλότερο πύργο, καθώς δεν υπάρχει πύργος σε αυτού του τύπου ανεμογεννήτριες.



ΣΧΗΜΑ 2.16 Οι πέντε περιοχές ελέγχου της ταχύτητας της Α/Γ

## 2.7. ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Τόσο η ταχύτητα όσο και ο ρυθμός αλλαγής αυτής, θα πρέπει να ελέγχεται σε ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα.

### 2.7.1. ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ

Η ταχύτητα του στροφείου θα πρέπει να ελέγχεται για τρεις λόγους:

- Για να συλλέξει περισσότερη ενέργεια, όπως έχουμε ξαναδεί.
- Για την προστασία του στροφείου, της γεννήτριας, και την συσκευή ηλεκτρονικών ισχύος από υπερφόρτωση κατά τη διάρκεια ανέμων υψηλών εντάσεων.
- Όταν η γεννήτρια αποσυνδέεται από το ηλεκτρικό φορτίο, κατά λάθος ή για μια προγραμματισμένη συντήρηση.

Υπό αυτές τις συνθήκες, η ταχύτητα του στροφείου μπορεί να είναι πολύ μεγάλη, με αποτέλεσμα μηχανικές καταστροφές στοιχείων της ανεμογεννήτριας, εάν δεν υπάρχει έλεγχος.

Η απαίτηση ελέγχου ταχύτητας του στροφείου έχει πέντε ξεχωριστές περιοχές, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.16:

1. Η ταχύτητα εκκίνησης σύνδεσης (cut-in) κατά την οποία η Α/Γ ξεκινά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Κάτω από αυτήν, δεν αξίζει τον κόπο, να θέσουμε την Α/Γ σε λειτουργία.
2. Η σταθερή μέγιστη περιοχή  $C_p$  όπου η ταχύτητα του στροφείου μεταβάλλεται με την μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου για να λειτουργούν σε σταθερό TSR που αντιστοιχεί στην μέγιστη τιμή  $C_p$ .
3. Κατά τη διάρκεια ισχυρών ανέμων, η ταχύτητα του στροφείου περιορίζεται σε ένα ανώτερο σταθερό όριο με βάση τον σχεδιασμό των ορίων αντοχής των εξαρτημάτων του συστήματος. Στην σταθερής ταχύτητας περιοχή, το  $C_p$  είναι χαμηλότερο από το μέγιστο  $C_p$ , και η ισχύς αυξάνεται με χαμηλότερο ρυθμό από ότι στην πρώτη περιοχή.

4. Σε ακόμη υψηλότερες ταχύτητες ανέμου, όπως κατά τη διάρκεια μιας ριπής, η μηχανή λειτουργεί σε ελεγχόμενη σταθερή ισχύ, για την προστασία της γεννήτριας και των ηλεκτρονικών ισχύος από υπερφόρτωση. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη μείωση της ταχύτητας του στροφείου. Εάν η ταχύτητα μειώνεται με την αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου, τότε η γεννήτρια υπερφορτώνεται, ματαιώνοντας τον επιδιωκόμενο στόχο. Για να αποφευχθεί η υπερφόρτωση της γεννήτριας, κάποιο είδος φρένου (δινορεύματος ή άλλου τύπου) πρέπει να εγκατασταθεί στο στροφείο.

5. Η ταχύτητα αποκοπής, κατά την οποία το στροφείο διακόπτεται για την προστασία των πτερύγων, της ηλεκτρικής γεννήτριας, και άλλων συστατικών του συστήματος πέρα από ένα ορισμένο όριο ταχύτητας ανέμου.

### 2.7.2. ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΥΘΜΟΥ

Η αδράνεια των μεγάλων στροφείων, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον έλεγχο της ταχύτητας. Η επιτάχυνση και επιβράδυνση, πρέπει να ελέγχεται για να περιοριστεί η δυναμική μηχανική καταπόνηση, σχετικά με τα πτερύγια και την πλήμνη και το ηλεκτρικό φορτίο στη γεννήτρια και τα ηλεκτρονικά ισχύος. Η στιγμιαία διαφορά, μεταξύ της μηχανικής ισχύος που παράγεται από τις πτέρυγες και του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται από τη γεννήτρια, θα αλλάξει την ταχύτητα του στροφείου ως εξής:

$$J(d\omega/dt) = (P_m - P_e)/\omega \quad (2.4)$$

όπου  $J =$  η πολική ροπή αδράνειας του στροφείου

$\omega =$  η γωνιακή ταχύτητα του στροφείου

$P_m =$  η μηχανική ισχύ που παράγεται από τις πτέρυγες

$P_e =$  η ηλεκτρική ισχύ που παράγεται από την γεννήτρια

Ολοκληρώνοντας την εξίσωση (2.4) λαμβάνουμε:

$$1/2 * J * (\omega_2^2 - \omega_1^2) = \int (P_m - P_e) dt \quad (2.5)$$

Αν εξεταστεί η περίπτωση Α/Γ με ροπή αδράνειας  $J = 7500 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ , η αλλαγή της ταχύτητας περιστροφής από 100 σε 95 rpm μέσα σε 5 δευτερόλεπτα απαιτεί  $\Delta P$  της τάξης των 800 kW. Η προκύπτουσα ροπή των 80 Nm, θα παράγει στρεπτική καταπόνηση της δομής του στροφείου και των στοιχείων της πλήμνης. Αν η ίδια αλλαγή ταχύτητας γινόταν μέσα σε 1 sec, η απαιτούμενη ισχύς θα ήταν 4.000 kW και η ροπή 400 Nm. Τέτοια υψηλή ροπή μπορεί να καταπονήσει και να καταστρέψει τα μέρη του στροφείου ή να μειώσει σημαντικά τη διάρκεια ζωής του. Γι 'αυτό το λόγο, η επιτάχυνση και επιβράδυνση πρέπει να διατηρούνται εντός των ορίων σχεδιασμού, με επαρκή περιθώρια.

Η στρατηγική για τον έλεγχο της ταχύτητας της ανεμογεννήτριας, ποικίλει ανάλογα με τον τύπο ηλεκτρικής μηχανής (γεννήτρια) που χρησιμοποιείται, δηλαδή, επαγωγή, σύγχρονη, ή μηχανή συνεχούς ρεύματος (DC μηχανή).

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.3: Επίπεδα θορύβου μερικών γνωστών πηγών συγκρινόμενες με A/Γ

Πηγή	Επίπεδο θορύβου (dB)
Κρεμαστό τραίνο	100
Θορυβώδες εργοστάσιο	90
Μέσης κυκλοφορίας οδός	70
Μέσης κατηγορίας εργοστάσιο	60
Μέσης κατηγορίας γραφείο	50
Ήσυχη συνομιλία	30

## 2.8. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΠΟΨΗ

Οι ακόλουθες πτυχές περιβαλλοντικής διάστασης εισάγουν ρυθμίσεις στα αιολικά πάρκα:

### 2.8.1. ΗΧΗΤΙΚΟΣ ΘΟΡΥΒΟΣ

Οι Ανεμογεννήτριες γενικά δεν δημιουργούν σημαντικά επίπεδα θορύβου στη γύρω τους περιοχή. Οι κατασκευαστές ανεμογεννητριών δίδουν το επίπεδο θορύβου της μηχανής σε μονάδες dB (A) έναντι της απόστασης από τον πύργο. Ένα επίπεδο θορύβου μίας τυπικής μηχανής των 600 kW φαίνεται στο Σχήμα 2.8. Αυτή η μηχανή παράγει 55 dB (A) θορύβου σε απόσταση 50 m από την A/Γ και 40 dB (A) σε απόσταση 250 m. Ο πίνακας 2.3, συγκρίνει το επίπεδο θορύβου της A/Γ με άλλα γενικά γνωστά επίπεδα θορύβου. Ο πίνακας δείχνει ότι η A/Γ σε απόσταση 50 m, δεν παράγει θόρυβο μεγαλύτερο από ένα μέσο εργοστάσιο. Αυτός ο θόρυβος όμως, είναι ένας σταθερός θόρυβος. Επιπλέον, η A/Γ κάνει δυνατότερο θόρυβο καθώς εκτρέπεται όταν αλλάζει η κατεύθυνση του ανέμου. Σε κάθε περίπτωση, οι τοπικές νομικές διατάξεις για τον θόρυβο πρέπει να τηρούνται. Σε ορισμένες περιπτώσεις, έχουν υπάρξει καταγγελίες από κοντινές κοινότητες για θόρυβο. Παρά το γεγονός ότι η ηχορύπανση δεν είναι μείζον πρόβλημα με τα υπεράκτια αιολικά πάρκα, εξαρτάται από το μέγεθος των ανεμογεννητριών, αν μπορεί να τις ακούσει κάποιος ή όχι ενώ λειτουργούν. Έχει επίσης προταθεί, πως ο θόρυβος από τις A/Γ ταξιδεύει υποβρυχίως και διαταράσσει τη θαλάσσια ζωή.

Γενικά, υπάρχουν δύο κύριες πηγές θορύβου που εκπέμπονται από την ανεμογεννήτρια. Η μία είναι μηχανική, η οποία είναι σύμφυτη με το σύστημα οδοντωτών τροχών. Η άλλη που έχει δημιουργηθεί από την αεροδυναμική της περιστρεφόμενης πτέρυγας, η οποία εκπέμπει θόρυβο κατά τη διάβαση της μπροστά από τον πύργο, γνωστή ως «γδούπος» πύργου ή απλά αεροδυναμικός θόρυβος. Η πρώτη μπορεί να είναι σε κάπως χαμηλό επίπεδο, γενικά ομοιόμορφο κατά τη διάρκεια

του έτους. Η άλλη ο γδούπος πύργου μπορεί να είναι πολύ δυνατή. Ποικίλλει ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής της πτέρυγας και μπορεί να προκαλέσουν τα περισσότερα από τα προβλήματα και παράπονα. Κάποιοι κάτοικοι περιγράφουν το θόρυβο γδούπου του πύργου σαν εκείνον της εκκίνησης ενός στεγνωτηρίου. Μια μεγάλη ανεμογεννήτρια, μπορεί να παράγει μια συνολική στάθμη θορύβου έως 100 dB (A), η οποία εξασθενεί σε φυσιολογικά επίπεδα μέσα σε μία απόσταση 1,5 km. Οι χειρότερες συνθήκες, είναι όταν ο άνεμος φυσάει ελαφρά και ο θόρυβος περιβάλλοντος στο έδαφος είναι ελάχιστος. Κάτοικοι που ζουν εντός ακτίνας 1 km έχουν απευθυνθεί στις Αρχές Περιβαλλοντικής Υγείας για τον θόρυβο από τις Α/Γ.

### **2.8.2. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ (Electromagnetic interference EMI)**

Κάθε σταθερή ή κινητή κατασκευή κοντά σε πύργους σταθμών ραδιοφώνου ή τηλεόρασης παρεμβάλλει στα σήματα τους. Ο πύργος μιας ανεμογεννήτριας, είναι μια μεγάλη κατασκευή, που μπορεί να προκαλέσει απaráδεκτη EMI στην λειτουργία ενός συχνότητα περιστροφής της πτέρυγας. Η ακριβής φύση και το μέγεθος των εν λόγω ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, εξαρτώνται από έναν αριθμό παραμέτρων. Οι κύριοι παράμετροι είναι η θέση της ανεμογεννήτριας σε σχέση με τον πύργο της ραδιοφωνίας ή τηλεόρασης, οι φυσικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των πτερύγων, η μέθοδος διαμόρφωσης της συχνότητας του σήματος, και τα ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά διάδοσης των κυμάτων της υψηλής συχνότητας στην ατμόσφαιρα κοντινού πομπού ή δέκτη. Επιπροσθέτως, οι περιστρεφόμενες πτέρυγες ανεμογεννήτριας σε λειτουργία, μπορεί να αντανakλά τα προσπίπτοντα σε αυτήν σήματα, έτσι ώστε τα ηλεκτρομαγνητικά σήματα στο κοντινό περιβάλλον, να εμφανίζουν παρεμβολές στην

Η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή μπορεί να είναι σοβαρό πρόβλημα με τον σχεδιασμό του αιολικού πάρκου. Για παράδειγμα, 5 από τα 18 υπεράκτια αιολικά πάρκα που έχουν εγκατασταθεί γύρω από τις ακτές του Ηνωμένου Βασιλείου, είχαν μπλοκαριστεί από το Βρετανικό Υπουργείο Εθνικής Άμυνας, λόγω ανησυχιών ότι μπορεί να αλληλεπιδράσουν με ραντάρ και διαδρομές πτήσεων προς αεροδρόμια κοντά στις προτεινόμενες περιοχές. Λεπτομερείς μελέτες σχετικά με τις ακριβείς επιπτώσεις από τις ανεμογεννήτριες στα ραντάρ και τις πιθανές τροποποιήσεις στο λογισμικό των ραντάρ, μπορούν να μετριάσουν αυτές τις ανησυχίες. Το πιθανό κόστος των μελετών αυτών και οι δικαστικές προσφυγές, θα πρέπει να συνυπολογίζονται στον αρχικό σχεδιασμό των μεγάλων αιολικών πάρκων.

### **2.8.3. ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΑ ΠΤΗΝΑ**

Η επίδραση των αιολικών πάρκων στην άγρια ζωή και στον πληθυσμό των πτηνών, συμπεριλαμβανομένων των απειλούμενων ειδών που προστατεύονται από ομοσπονδιακούς νόμους, έχει δημιουργήσει διαμάχη και σύγχυση στην κρατούσα τάση της περιβαλλοντικής κοινότητας. Η αναπαραγωγή και σίτιση μερικών πουλιών μπορεί να διαταραχθεί. Το πτερύγιο ανεμογεννήτριας μπορεί να ζυγίζει μέχρι 1,5 τόνο και το ακροπτερύγιο, μπορεί να ταξιδέψει με ταχύτητα έως 320 Km/h, που αποτελεί

θανατηφόρο όπλο, εναντίον οποιουδήποτε ιπτάμενου πλάσματος. Τα πουλιά μπορούν να θανατώνονται ή τουλάχιστον να τραυματιστούν, όταν συγκρουσθούν με μια πτέρυγα. Συχνά η αναρρόφηση που δημιουργείται από τον άνεμο που ρέει σε μία Α/Γ, παρασύρει τα πουλιά στο ρεύμα αέρος που παράγεται από την πτέρυγα. Αν και λιγότερο σύνηθες, τα πουλιά προσελκύονται από το βουητό (μουσική!) του πύργου και απλά πετούν προς αυτούς. Από την άλλη, μελέτες σε παράκτιες τοποθεσίες κοντά στην Δανία, έχουν διαπιστώσει ότι τα πουλιά αλλάζουν διαδρομή πτήσης 200 m περίπου γύρω από την Α/Γ. Έτσι, ένα αιολικό πάρκο μπορεί να αλλάξει σημαντικά τις πορείες μεγάλων πληθυσμών πτηνών. Σε άλλη μελέτη, ο πληθυσμός των υδρόβιων πτηνών μειώθηκε 75 έως 90% μέσα σε 3 έτη μετά την εγκατάσταση υπεράκτιου αιολικού πάρκου. Μια τέτοια μεγάλη πτώση θα μπορούσε να έχει τεράστιες επιπτώσεις στο οικοσύστημα της γύρω περιοχής.

Το αρχικό υψηλό ποσοστό θανάτων πτηνών της δεκαετίας του 1980, έχει μειωθεί σημαντικά με τις μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες που έχουν πλέον πιο αργά κινούμενα πτερύγια, τα οποία είναι πιο εύκολο για τα πουλιά να τα δουν και να τα αποφύγουν. Οι σωληνοειδείς πύργοι έχουν χαμηλότερο ποσοστό θανάτων πτηνών σε σύγκριση με πύργους τύπου πλέγματος, οι οποίοι προσελκύουν τα πουλιά να φωλιάζουν. Οι ανεμογεννήτριες πλέον, τοποθετούνται είτε σε στέρεους σωληνοειδείς πύργους ή πύργους με διαγώνια αντιστήριξη, εξαιλείνοντας τα οριζόντια στηρίγματα που προσελκύουν τα πουλιά να φωλιάζουν. Νέα αιολικά πάρκα, επίσης, βρίσκονται μακριά από τις διαδρομές της πτήσης των πτηνών.

Δεδομένα από διάφορες πηγές για πουλιά που σκοτώθηκαν:

- Στο Altamont Pass, CA, 200 με 300 κόκκινης ουράς γεράκια και 40 με 60 χρυσοί αετοί έχαναν τη ζωή τους κάθε χρόνο από τα πρώτα αιολικά πάρκα στη δεκαετία του 1980. Ο Bill Evans του Cornell University, εκτιμά ότι τα πουλιά που σκοτώνονται λόγω των αιολικών πάρκων, μπορεί να υπερβαίνουν τα 5.000.000 / έτος κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980. Μέχρι και 10.000 πουλιά έχουν σκοτωθεί από μία Α/Γ σε μια νύχτα. Μια εκτίμηση του 1994 στην Ευρώπη έδειξε ότι ένας σημαντικός αριθμός 13 ειδών πτηνών, που προστατεύονται από το ευρωπαϊκό δίκαιο, σκοτώθηκε από ανεμογεννήτριες στην Ταρίφα της Ισπανίας.
- Στην περιοχή της Αιόβα το δασολογικό σχολείο της πόλης, το οποίο αγόραζε ηλεκτρική ενέργεια από έναν τοπικό πάροχο με 4,5 cents / kWh, εγκατέστησε ανεμογεννήτριες για την αυτάρκεια του στον τομέα της ενέργειας. Οι θέσεις των ανεμογεννητριών, έχουν τον περισσότερο άνεμο στην πόλη, και βρίσκονται στο μεταναστευτικό μονοπάτι των χηνών. Ακόμη και τότε, ούτε πουλί έχει σκοτωθεί ούτε αναφέρθηκαν παράπονα θορύβου κατά τη διάρκεια των πρώτων ετών λειτουργίας του.
- Για λόγους σύγκρισης, οι κνηγοί των ΗΠΑ σκοτώνουν ετησίως περίπου 121 εκατομμύρια πουλιά, και περίπου ένα δισεκατομμύριο πουλιά, σκοτώνονται πετώντας σε γυάλινα παράθυρα από μόνα τους, κάθε χρόνο στις Η.Π.Α.

Είναι γενικά αποδεκτό, ότι οι διαδρομές μετανάστευσης και ωτοκίας των σπάνιων ειδών πτηνών, θα πρέπει να προστατεύονται από την απειλή των αιολικών

πάρκων. Κάτω από αυτές τις ανησυχίες, η απόκτηση άδειας από τις τοπικές υπηρεσίες μπορεί να πάρει αρκετό καιρό και πολλές προσπάθειες.

#### **2.8.4. ΑΛΛΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ**

Η οπτική επίδραση του αιολικού πάρκου, μπορεί να είναι δυσάρεστη για τους ιδιοκτήτες ακινήτων γύρω από το αιολικό πάρκο. Αυτό ισχύει περισσότερο για υπεράκτια αιολικά πάρκα, όπου οι ιδιοκτήτες ακινήτων είναι συνήθως εύποροι άνθρωποι, με σημαντική επιρροή στη χάραξη πολιτικών, των οργανώσεων της περιοχής. Το πιο γνωστό προτεινόμενο έργο στο Nantucket Sound, κατέληξε εξαιρετικά αμφιλεγόμενο από τους ιδιοκτήτες υψηλού προφίλ με ιδιοκτησίες στην παραλία.

Οι σχεδιαστές αιολικών πάρκων, μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τα αισθητικά παράπονα, με την εγκατάσταση πανομοιότυπων ανεμογεννητριών με ομοιόμορφη μεταξύ τους απόσταση.

Επειδή ο άνεμος είναι ένας σημαντικός μεταφορέας ενέργειας σε όλη την υδρόγειο, η επίπτωση της ενέργειας που αφαιρείται από τα πολλά και μεγάλα αιολικά πάρκα σε μεγάλη κλίμακα, μπορεί να επηρεάσει το κλίμα. Αυτό μπορεί να είναι ένα αντικείμενο μελλοντικών μελετών.

### **2.9. ΠΙΘΑΝΕΣ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΕΣ**

Μια πυρκαγιά ή ένας σεισμός μπορεί να είναι μια μεγάλη καταστροφή για ένα εργοστάσιο αιολικής ενέργειας.

#### **2.9.1. ΠΥΡΚΑΓΙΑ**

Οι ζημιές από πυρκαγιά, ανέρχονται σε 10 με 20% των απαιτήσεων των αιολικών εγκαταστάσεων. Μια πυρκαγιά σε μία ανεμογεννήτρια είναι σπάνια, αλλά δύσκολη στην καταπολέμησή της. Η άφιξη στο ύψος του κόμβου (στην πλήμνη) στην κεφαλή είναι αργή, και η πίεση του νερού είναι πάντα ανεπαρκής για να σβήσει τη φωτιά. Αυτό οδηγεί συνήθως σε ολική απώλεια της Α/Γ, με αποτέλεσμα 9 έως 12 μήνες διακοπή λειτουργίας και απώλεια εσόδων. Το κόστος αντικατάστασης μίας ενιαίας πτέρυγας των 30 m, μπορεί να υπερβαίνει τα 100.000 δολάρια, και η αντικατάσταση ολόκληρης της Α/Γ 3 MW μπορεί να υπερβαίνει τα 2 εκατομμύρια δολάρια.

Τα παρακάτω είναι μερικές αιτίες πυρκαγιάς σε ανεμογεννήτριες:

**Κεραυνός:** Τα αλεξικέραυνα χρησιμοποιούνται για να προστατεύσουν τα πτερύγια της Α/Γ, της ατράκτου, και του συνόλου της κατασκευής του πύργου. Ωστόσο, εάν ο κεραυνός δεν καταστέλλεται σωστά, μπορεί να οδηγήσει σε τοπική βλάβη ή ολική ζημιά εάν δημιουργηθούν σπινθήρες και μετά φωτιά στην Α/Γ. Τα συμβάντα κεραυνών, εξαρτώνται από την τοποθεσία. Υπεράκτιες ανεμογεννήτριες είναι πιο επιρρεπείς στους κεραυνούς, από ανεμογεννήτριες της στεριάς. Στην ξηρά, οι αστραπές είναι σπάνιες σε μέρη παραδείγματος χάριν όπως η Δανία, ενώ είναι συχνές,



όπως στην βόρεια Γερμανία και σε περιοχές των Άλπεων, και ακόμη συχνότερα σε τμήματα της Ιαπωνίας και των ΗΠΑ, κυρίως στη Φλόριντα και το Τέξας. Οι αυξανόμενες τάσεις χρήσης ηλεκτρικά αγωγίμων συνθέτων υλικών από άνθρακονήματα για την υψηλή αντοχή τους και το χαμηλό βάρος στην κατασκευή πτερύγων, κάνει τις πτέρυγες πιο ευάλωτες στους κεραυνούς. Για το λόγο αυτό, ορισμένοι κατασκευαστές αποφεύγουν τις ίνες άνθρακα στις πτέρυγές τους, πολύ περισσότερο στις μεγάλου ύψους Α/Γ για υπεράκτιες εγκαταστάσεις.

*Εσωτερικό σφάλμα:* Κάθε ηλεκτρική ή μηχανική βλάβη που οδηγεί σε σπινθήρα, με εκπομπή υγρών ή άλλων λιπαντικών είναι ένας σημαντικός κίνδυνος. Το εύφλεκτο πλαστικό που χρησιμοποιείται στην κατασκευή, όπως τα καλύμματα της ατράκτου, είναι επίσης ένας κίνδυνος. Τυπικά εσωτερικά σφάλματα που μπορούν να προκαλέσουν υπερβολική θερμότητα και να οδηγήσουν σε πυρκαγιά έχουν ως εξής:

- Ρουλεμάν που ξεραίνουν και χαλάνε
- Βλάβη του συστήματος ψύξης
- Φρένα που θερμαίνονται κάτω από συνεχή πέδηση
- Διαρροές λαδιών και γράσων
- Βραχυκύκλωμα στην μπαταρία του συστήματος ελέγχου βήματος πτέρυγας
- Καλώδια που περνούν κοντά σε περιστρεφόμενα ή δονούμενα εξαρτήματα

Συχνοί φυσικοί έλεγχοι ολόκληρης της εγκατάστασης, επισκευή και συντήρηση, και ένα σύστημα παρακολούθησης κατάστασης απομακρυσμένης πρόσβασης με υπολογιστές που χρησιμοποιούνται στις σύγχρονες εγκαταστάσεις, μπορεί να εντοπίσει πιθανούς κινδύνους πυρκαγιάς και την αποφυγή τους.

### **2.9.2. ΣΕΙΣΜΟΣ**

Πλευρικά φορτία που προκύπτουν από ένα σεισμό, είναι σημαντικά στοιχεία που λαμβάνονται υπόψη, κατά τον σχεδιασμό μιας δομής πύργου σε πολλά μέρη του κόσμου. Ο πύργος, που είναι ψηλός, είναι ιδιαίτερα ευάλωτος σε σεισμικά γεγονότα. Η σεισμική ενέργεια συγκεντρώνεται στην ζώνη συχνοτήτων 1 έως 10 Hz . Απαιτείται δυναμική ανάλυση, καθώς αναμένεται μια δυναμική απόκριση ενίσχυσης. Ωστόσο, λόγω της πολυπλοκότητας στη μοντελοποίηση και την εκτέλεση τέτοιων αναλύσεων, συνήθως τακτική ήταν να αντικαθίστανται τα σεισμικά φορτία, με ισοδύναμα στατικά φορτία. Η σοβαρότητα των σεισμικών φορτίων, οι τρόποι πιθανής βλάβης, και τα προκύπτοντα αποτελέσματα, απαιτούν οι μηχανικοί σχεδιασμού, να κάνουν λογικούς συμβιβασμούς μεταξύ των πιθανών ανησυχιών ασφάλειας και οικονομίας κατά τη φάση του σχεδιασμού. Για να αντιμετωπιστεί αυτή η δυσκολία, η πρόσφατη τάση στις ΗΠΑ είναι η δυναμική ανάλυση για την εκτίμηση των σεισμικών καταπονήσεων. Για παράδειγμα, όλες οι πρωτογενείς συνιστώσες των πυρηνικών εργοστασίων στις ΗΠΑ, πρέπει να αναλύονται δυναμικά για τα ειδικά σεισμικά φορτία. Αυτό απαιτείται ακόμη και για εγκαταστάσεις που βρίσκονται σε ανενεργές σεισμικά περιοχές.

## 2.10. ΤΑΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Σημαντικές εργασίες έρευνας και ανάπτυξης είναι σε εξέλιξη στο NREL και στο Εθνικό Κέντρο Τεχνολογίας Ανέμου στο Golden του Κολοράντο. Οι κύριοι τομείς της εφαρμοσμένης έρευνας που διεξάγεται στο NWTC έχουν ως εξής:

- Αεροδυναμική ώστε να αυξηθεί το ενεργειακό κέρδος και η μείωση των ηχητικών επιπτώσεων.
- Εισροή και αναταραχή ώστε να κατανοήσουμε τη φύση του ανέμου.
- Κατασκευαστικά δυναμικά μοντέλα για να ελαχιστοποιήσουν την ανάγκη πρωτοτύπων.
- Έλεγχοι βελτίωσης της ενεργειακής συλλογής, μείωση φορτίων, διατήρηση σταθερού κλειστού βρόγχου συμπεριφορά των ευέλικτων συστημάτων είναι σημαντικός στόχος σχεδιασμού.
- Η πρόοδος του σχεδιασμού ανεμογεννήτριας περιλαμβάνει μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες σε ψηλότερους πύργους ώστε να συλλέξει υψηλότερη ταχύτητα ανέμου. Η δυσκολία σχεδιασμού αυξάνει, καθώς αυτές οι μηχανές γίνονται μεγαλύτερες και οι πύργοι ψηλότεροι.

### ΑΝΑΦΟΡΕΣ - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Van Kuik, G. Τεχνολογία Ανεμογεννήτριας – πρόοδος 25 χρόνων, Wind Directions, Απρίλιος 1998.
2. Roy, S. Βέλτιστο σχεδιασμός συστημάτων μετατροπής Αιολικής ενέργειας πάνω σε ένα σενάριο ενέργειας, IEEE Transactions on Energy Conversion, Σεπτέμβριος 1997.
3. Spera, D. A. «Wind Turbine Technology», American Society of Mechanical Engineers, New York, 1994.

### **ΚΕΦ. 3. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ**

Η μηχανική ισχύς μιας ανεμογεννήτριας μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια από μία γεννήτρια εναλλασσομένου ρεύματος (AC) ή συνεχούς ρεύματος (DC). Η AC γεννήτρια μπορεί να είναι είτε μια σύγχρονη μηχανή ή μια μηχανή επαγωγής, η τελευταία χρησιμοποιείται ευρύτατα στη βιομηχανία αιολικής ενέργειας.

Η ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί με την αρχή της δράσης και αντίδρασης της ηλεκτρομαγνητικής

επαγωγής. Η προκύπτουσα ηλεκτρομηχανική μετατροπή της ενέργειας είναι αντιστρεπτή. Η ίδια μηχανή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κινητήρας για την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική ισχύ ή ως γεννήτρια για τη μετατροπή μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Το σχήμα 3.1 απεικονίζει κοινά χαρακτηριστικά κατασκευής ηλεκτρικών μηχανών. Τυπικά, υπάρχει ένα εξωτερικό σταθερό μέρος (στάτης, στάτορας) και ένα εσωτερικό περιστρεφόμενο στέλεχος (δρομέας ή στροφέας ή στροφείο ή ρότορας). Ο δρομέας είναι τοποθετημένο σε έδρανα (ρουλεμάν) στερεωμένα στον στάτη. Τόσο ο στάτης όσο και ο δρομέας φέρουν κυλινδρικούς πυρήνες σιδήρου, οι οποίοι χωρίζονται από κενό αέρος. Οι πυρήνες είναι κατασκευασμένοι από σιδηρομαγνητικό υλικό υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας και έχουν αγωγούς ενσωματωμένους σε εγκοπές, κατανεμημένες στην επιφάνεια του πυρήνα. Εναλλακτικά, οι αγωγοί τυλίγονται υπό μορφή πηνίου γύρω από προεξέχοντες μαγνητικούς πόλους. Το Σχήμα 3.2 είναι μία όψη εγκάρσιας τομής μίας περιστρεφόμενης ηλεκτρικής μηχανής, με τον στάτη κατασκευασμένο από προεξέχοντες πόλους και δρομέα με κατανεμημένους αγωγούς. Η μαγνητική ροή, η οποία δημιουργήθηκε από το ρεύμα διέγερσης σε ένα από τα δύο πηνία, περνά από τον ένα πυρήνα στον άλλο σε ένα συνδυασμό μαγνητικού κυκλώματος, σχηματίζοντας πάντοτε έναν κλειστό βρόχο. Η ηλεκτρομηχανική μετατροπή ενέργειας, επιτυγχάνεται με αλληλεπίδραση της μαγνητικής ροής που παράγεται από ένα πηνίο, με το ηλεκτρικό ρεύμα στο άλλο πηνίο. Το ρεύμα μπορεί να παρέχεται εξωτερικά ή ηλεκτρομαγνητικά. Το επαγωγικό ρεύμα σε ένα πηνίο, είναι ανάλογο με τον ρυθμό μεταβολής της ροής του εν λόγω πηνίου.

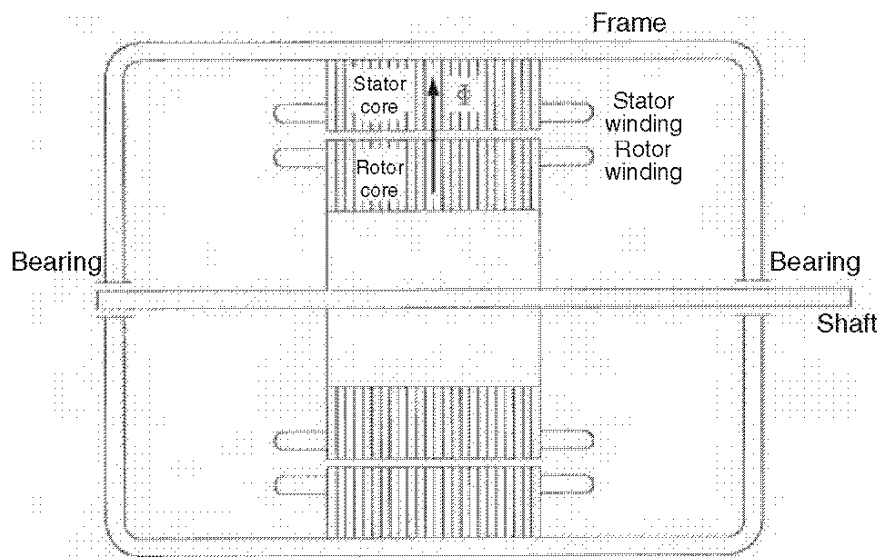
Οι διάφοροι τύποι μηχανών, διαφέρουν βασικά στην κατανομή των αγωγών που σχηματίζουν τις περιελίξεις, καθώς και από τα στοιχεία τους, είτε έχουν συνεχώς αυλακωμένους πυρήνες ή προεξέχοντες πόλους. Η ηλεκτρική λειτουργία κάθε συγκεκριμένης μηχανής, εξαρτάται από την φύση της τάσης που εφαρμόζεται στις περιελίξεις της. Το στενό δακτυλιοειδές διάκενο αέρος μεταξύ στάτη και δρομέα είναι κρίσιμη περιοχή της λειτουργίας της μηχανής, και η θεωρία που πραγματεύεται την απόδοση της, ασχολείται κυρίως με τις συνθήκες μέσα ή κοντά στο διάκενο αέρος.

#### **3.1. ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (DIRECT CURRENT GENERATORS)**

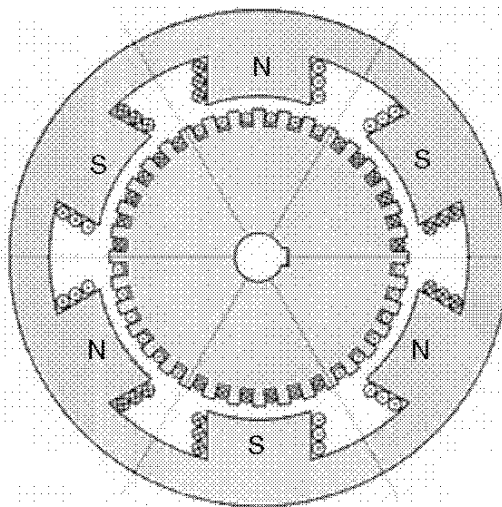
Όλες οι μηχανές στην εσωτερική λειτουργία τους είναι εναλλασσόμενου ρεύματος (Alternative Current-AC) μηχανές, επειδή οι αγωγοί περιστρέφονται στον ρυθμό της μαγνητικής ροής της εναλλαγής βορείου και νοτίου πόλου. Η συνεχούς

## Συστήματα Αιολικής και Ηλιακής Ενέργειας

ρεύματος (Direct Current-DC) μηχανή, μετατρέπει την εναλλασσομένου ρεύματος (Alternative Current-AC) σε συνεχούς για εξωτερική χρήση. Αυτό το κάνει χρησιμοποιώντας έναν μηχανικό μετατροπέα (κάνοντας χρήση συλλέκτη). Ο μετατροπέας εκτελεί αυτή την λειτουργία, ολισθαίνοντας επαφές από γραφίτη «καρβουνάκια ή ψήκτρες» κατά μήκος μιας σειράς τμημάτων χαλκού (συλλέκτης). Συνδέει έτσι τον θετικό ακροδέκτη εξόδου συνεχώς με τον αγωγό που δημιουργεί την θετική τάση πολικότητας, και το ίδιο κάνει για την αρνητική πολικότητα, δηλαδή συνδέει τον αρνητικό ακροδέκτη συνεχώς με τον αγωγό που δημιουργεί την αρνητική τάση πολικότητας.



ΣΧΗΜΑ 3.1 Κοινές κατασκευαστικές λειτουργίες περιστρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών



ΣΧΗΜΑ 3.2 Διατομή στάτη και δρομέα ηλεκτρικής μηχανής

Οι ολισθαίνουσες επαφές εγγενώς οδηγούν σε χαμηλή αξιοπιστία και υψηλό κόστος συντήρησης. Παρά το μειονέκτημα αυτό, η DC γεννήτρια χρησιμοποιήθηκε εκτενώς ως κινητήρας (μοτέρ) μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1980, λόγω του εξαιρετικά εύκολου ελέγχου της ταχύτητας της. Έχει χρησιμοποιηθεί σαν γεννήτρια σε περιορισμένο αριθμό εγκαταστάσεων αιολικής ενέργειας μικρής χωρητικότητας, ιδίως αν η ηλεκτρική ενέργεια μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε τοπικό επίπεδο, απευθείας με τη μορφή συνεχούς ρεύματος. Ωστόσο, η συμβατική μηχανή συνεχούς ρεύματος με ένα μηχανικό συλλέκτη και ολίσθηση επαφών γραφίτου (καρβουνάκια ή ψήκτρες), έχει πέσει σε δυσμένεια στην παρούσα περίοδο. Η χωρίς ψήκτρες έκδοση της, χρησιμοποιείται όπου η μηχανή DC δίνει πλεονεκτήματα.

Η συμβατική μηχανή DC είναι αυτοδιεγερόμενη είτε με παράλληλα πηνία ή σε σειρά, που μεταφέρουν ρεύμα DC για να παραχθεί μαγνητικό πεδίο. Οι σύγχρονες DC μηχανές συχνά σχεδιάζονται με μόνιμους μαγνήτες για να εξαιρεθεί η ανάγκη ρεύματος διέγερσης για την δημιουργία μαγνητικού πεδίου. Σχεδιάζεται στην μορφή «μέσα-έξω». Ο δρομέας φέρει τους πόλους του μόνιμου μαγνήτη και ο στάτης φέρει το τύλιγμα του τυμπάνου (οπλισμό). Ο στάτης παράγει εναλλασσόμενο ρεύμα, το οποίο στη συνέχεια ανορθώνεται (μετατρέπεται σε συνεχές), με τη χρήση ημιαγωγών στερεάς κατάστασης. Μια τέτοια μηχανή δεν χρειάζεται μετατροπέα και ψήκτρες, ως εκ τούτου, η αξιοπιστία βελτιώνεται σημαντικά. Η μηχανή DC με μόνιμο μαγνήτη χρησιμοποιείται σε μικρές ανεμογεννήτριες. Ωστόσο, λόγω των περιορισμών της ικανότητας και της ισχύος του μόνιμου μαγνήτη, οι DC μηχανές χωρίς ψήκτρες περιορίζονται σε ισχύες κάτω των 100 kW.

### **3.2. ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ**

Η σύγχρονη γεννήτρια, παράγει το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται στον κόσμο. Για το λόγο αυτό, η σύγχρονη μηχανή είναι μια καθιερωμένη μηχανή. Η μηχανή λειτουργεί με σταθερή ταχύτητα που σχετίζεται με τη σταθερή παροχή συχνότητας. Επομένως, δεν είναι κατάλληλη για λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας εγκαταστάσεων αιολική ενέργειας, χωρίς μετατροπείς συχνότητας με ηλεκτρονικά ισχύος. Επιπλέον, η συμβατική σύγχρονη μηχανή, απαιτεί συνεχές ρεύμα για να διεγείρει το πεδίο του δρομέα, μια μέθοδος που έχει χρησιμοποιηθεί παραδοσιακά με την χρήση ολισθαίνοντων ψηκτρών άνθρακος σε ολισθηρά δαχτυλίδια στερεωμένα στον άξονα του δρομέα. Αυτό εισάγει κάποια αναξιπιστία στην χρήση της. Οι μοντέρνες σύγχρονες μηχανές γίνονται χωρίς ψήκτρες, με δημιουργία του απαιτούμενου ρεύματος πεδίου DC από το ίδιο ο δρομέας. Η αξιοπιστία βελτιώνεται σημαντικά, ενώ μειώνεται το κόστος. Η ανάγκη του DC πεδίου ρεύματος μπορεί να εξαλειφθεί εντελώς, με την χρήση δρομέα μαγνητικής αντίστασης, στο οποίον η σύγχρονη λειτουργία επιτυγχάνεται από την ροπή της μαγνητικής αντίστασης. Η ισχύς της μηχανής μαγνητικής αντίστασης, ωστόσο, περιορίζεται σε δεκάδες kW. Προς το παρόν εξετάζεται για μικρές ανεμογεννήτριες.

Η σύγχρονη μηχανή είναι ιδανική για συστήματα σταθερής ταχύτητας, όπως ηλιακούς θερμοηλεκτρικούς σταθμούς και όταν χρησιμοποιείται διασυνδεδεμένη σε

ένα σύστημα δικτύου, έχει μερικά πλεονεκτήματα έναντι της επαγωγικής μηχανής. Δεν απαιτεί άεργο ισχύ από το δίκτυο. Αυτό οδηγεί σε μία καλύτερης ποιότητας ισχύος στη διασύνδεση με το δίκτυο. Αυτό το πλεονέκτημα είναι πιο έντονο, όταν το αιολικό πάρκο είναι συνδεδεμένο σε ένα δίκτυο μικρής χωρητικότητας, χρησιμοποιώντας μία μεγάλου μήκους σύνδεση μεταφοράς χαμηλής τάσης. Για το λόγο αυτό, τα εργοστάσια ηλεκτρικής ενέργειας της Καλιφόρνιας στις αρχές της δεκαετίας του 1980, χρησιμοποιούσαν σύγχρονες γεννήτριες. Σήμερα τα αιολικά πάρκα, συνδέονται με μεγάλα δίκτυα, χρησιμοποιώντας μικρού μήκους γραμμές και σχεδόν παγκοσμίως, χρησιμοποιούν επαγωγικές γεννήτριες.

Η σύγχρονη γεννήτρια χρησιμοποιείται σπάνια στα αιολικά συστήματα μετάδοσης με κιβώτιο ταχυτήτων. Ωστόσο, ο χαμηλής ταχύτητας σχεδιασμός της σύγχρονης γεννήτριας, βρίσκεται συχνά σε πλεονεκτικότερη θέση σε απευθείας οδήγησης μεταβλητής ταχύτητας ανεμογεννήτριες. Σε έναν τέτοιο σχεδιασμό, η γεννήτρια είναι εντελώς αποσυνδεδεμένη από το δίκτυο με έναν ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος πηγής τάσης συνδεδεμένο με το στάτη, και ο δρομέας διεγείρεται από περιέλιξη διέγερσης ή έναν μόνιμο μαγνήτη. Οι γεννήτριες της σειράς Wind 2.X των 2 έως 3 MW της εταιρείας GE έχουν μεταχθεί από την διπλά τροφοδοτούμενη γεννήτρια επαγωγής, στην σύγχρονη γεννήτρια, όπου η μεταβλητής ταχύτητας, ελεγχόμενου βήματος αρχή λειτουργίας έχει παραμείνει αμετάβλητη.

### **3.3. ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ**

Η ηλεκτρική ενέργεια στη βιομηχανία, καταναλώνεται κυρίως από επαγωγικές μηχανές, λειτουργούσες σαν κινητήρες οδηγώντας μηχανικά φορτία. Για το λόγο αυτό, η επαγωγική μηχανή, που εφευρέθηκε από τον Nikola Tesla και χρηματοδοτήθηκε από τον George Westinghouse στα τέλη της δεκαετίας του 1880, αντιπροσωπεύει μία καλά καθιερωμένη τεχνολογία. Το κύριο πλεονέκτημα της επαγωγικής μηχανής, είναι η στιβαρή κατασκευή, χωρίς ψήκτρες που δεν χρειάζεται ξεχωριστή DC ισχύ πεδίου. Τα μειονεκτήματα τόσο της μηχανής DC όσο και της σύγχρονης μηχανής, εξαλείφονται στην επαγωγική μηχανή, με αποτέλεσμα χαμηλό κόστος κεφαλαίου, χαμηλό κόστος συντήρησης, και καλύτερη μεταβατικών φαινομένων απόδοση. Για τους λόγους αυτούς, η γεννήτρια επαγωγής, χρησιμοποιείται εκτενώς σε μικρά και μεγάλα αιολικά πάρκα και μικρά υδροηλεκτρικά εργοστάσια. Η μηχανή είναι διαθέσιμη σε πολλές τιμές ονομαστικής ισχύος έως και μεγάλης χωρητικότητας μεγαβάτ, και ακόμη μεγαλύτερης.

Για οικονομία και αξιοπιστία, πολλά συστήματα αιολικής ενέργειας, χρησιμοποιούν επαγωγικές μηχανές όπως ηλεκτρικές γεννήτριες. Το υπόλοιπο μέρος αυτού του κεφαλαίου είναι αφιερωμένο στην κατασκευή και την θεωρία λειτουργίας της επαγωγικής γεννήτριας.

#### **3.3.1. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ**

Στην ηλεκτρομαγνητική δομή της γεννήτριας επαγωγής, ο στάτης κατασκευάζεται από πολυάριθμα πηνία τυλιγμένα σε τρεις ομάδες (φάσεις), και

τροφοδοτείται με τριφασικό ρεύμα. Τα τρία πηνία είναι φυσικά απλωμένα γύρω από την περιφέρεια του στάτη και φέρει ρεύματα, τα οποία είναι εκτός φάσης. Αυτός ο συνδυασμός παράγει ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο είναι βασικό χαρακτηριστικό στη λειτουργία της μηχανής επαγωγής. Η γωνιακή ταχύτητα του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου ονομάζεται σύγχρονη ταχύτητα. Παριστάνεται με  $N_s$  και δίνεται από το ακόλουθο τύπο σε rpm:

$$N_s = 60 * f / p \quad (3.1)$$

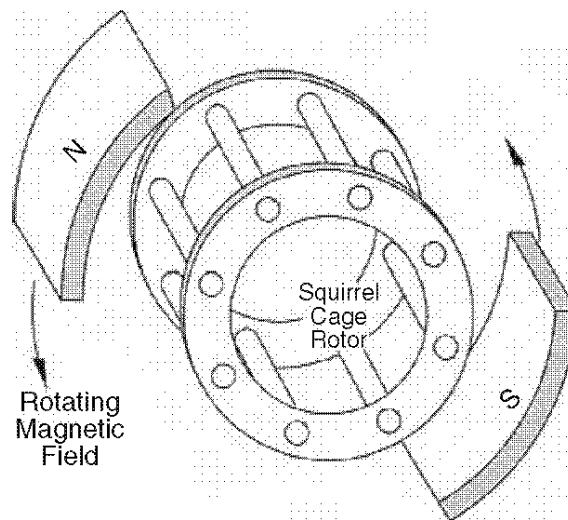
όπου

$f$  = συχνότητα διέγερσης του στάτη

$p$  = ο αριθμός των ζευγών μαγνητικών πόλων

Τα πηνία του στάτη, ενσωματώνονται σε εγκοπές σε έναν υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας πυρήνα, για να παράγουν την απαιτούμενη ένταση του μαγνητικού πεδίου με ένα μικρόρεύμα διέγερσης.

Ο δρομέας, ωστόσο, έχει μια εντελώς διαφορετική δομή. Κατασκευάζεται από συμπαγείς αγωγίμες ράβδους, ενσωματωμένες επίσης σε εγκοπές σε ένα μαγνητικό πυρήνα. Οι ράβδοι συνδέονται μαζί στα δύο άκρα από δύο αγωγίμους δακτυλίους (Σχήμα 3.3). Λόγω ομοιότητας ο δρομέας ονομάζεται δρομέας κλωβού σκίουρου (squirrel cage rotor) ή δρομέας κλωβού (cage rotor), για συντομία, και ο κινητήρας ονομάζεται κινητήρας επαγωγής κλωβού.



ΣΧΗΜΑ 3.3 Δρομέας κλωβού επαγωγικής μηχανής κάτω από περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο

### 3.3.2. ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Το μαγνητικό πεδίο του δρομέα περιστρέφεται κατά τη σύγχρονη ταχύτητα που καθορίζεται από την εξίσωση 3.1. Αυτό το πεδίο αναπαρίσταται από τους

περιστρεφόμενους μαγνήτες στο Σχήμα 3.3. Η σχετική ταχύτητα μεταξύ του περιστρεφόμενου πεδίου και του δρομέα, επάγει την τάση σε κάθε κλειστό βρόγχο των αγωγών που συνδέουν την μαγνητική ροή του στάτη. Το μέγεθος της επαγόμενης τάσης δίνεται από το νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής του Faraday, δηλαδή:

$$E = d\phi / dt \quad (3.2)$$

όπου  $\phi$  = η μαγνητική ροή του στάτη που συνδέει τον βρόγχο του δρομέα

Αυτή η τάση με τη σειρά της, δημιουργεί το κυκλοφορούν ρεύμα στον δρομέα. Η ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση του ρεύματος δρομέα και της μαγνητικής ροής του στάτη, παράγει την ροπή. Το μέγεθος αυτής της ροπής δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$T = k \Phi I_2 \cos\phi_2 \quad (3.3)$$

όπου

$k$  = σταθερά αναλογικότητας

$\Phi$  = μέγεθος κύματος μαγνητικής ροής στάτη

$I_2$  = μέγεθος επαγόμενου ρεύματος στους βρόγχους δρομέα

$\phi_2$  = γωνία φάσης υπό την οποία το ρεύμα δρομέα καθυστερεί της τάσης δρομέα

Ο δρομέας επιταχύνεται κάτω από αυτήν την ροπή. Αν ο δρομέας βρισκόταν σε χωρίς τριβές ρουλεμάν μέσα στο κενό, χωρίς μηχανικό φορτίο συνδεδεμένο, θα ήταν εντελώς ελεύθερο να περιστρέφεται με μηδενική αντίσταση. Υπό αυτές τις συνθήκες, ο δρομέας θα επετύγχανε την ίδια ταχύτητα, όπως το πεδίο του στάτη, δηλαδή την σύγχρονη ταχύτητα. Σε αυτήν την ταχύτητα, το επαγόμενο ρεύμα στον δρομέα είναι μηδέν, καμία ροπή δεν παράγεται, και τίποτα δεν χρειάζεται. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, ο δρομέας βρίσκει ισορροπία και θα συνεχίσει να λειτουργεί με τη σύγχρονη ταχύτητα.

Αν ο δρομέας τώρα συνδεθεί με ένα μηχανικό φορτίο όπως ένας ανεμιστήρας, θα επιβραδύνει. Η ροή του στάτη, η οποία περιστρέφεται πάντα με σταθερή σύγχρονη ταχύτητα, θα έχει μια σχετική ταχύτητα σε σχέση με τον δρομέα. Ως αποτέλεσμα, ηλεκτρομαγνητικά επαγόμενη τάση, ρεύμα, και ροπή παράγεται στον δρομέα. Η ροπή που παράγεται, πρέπει να είναι ίση με εκείνη που απαιτείται για να οδηγήσει το φορτίο σε αυτή την ταχύτητα. Η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας σε αυτή την κατάσταση.

Αν συνδέσουμε τον δρομέα σε μια ανεμογεννήτρια και το οδηγήσουμε, πιο γρήγορα από την σύγχρονη ταχύτητα του μέσω ενός βηματικού γραναζιού, το επαγόμενο ρεύμα και ροπή του δρομέα αντιστρέφει την κατεύθυνση. Η μηχανή λειτουργεί πλέον ως γεννήτρια, μετατρέποντας την μηχανική ενέργεια της Α/Γ σε ηλεκτρική ενέργεια, η οποία παρέχεται στο φορτίο που συνδέεται στους ακροδέκτες του στάτη. Αν η μηχανή συνδεόταν σε ένα δίκτυο, θα τροφοδοτούσε το δίκτυο με ρεύμα. Έτσι, η μηχανή επαγωγής μπορεί να λειτουργήσει ως μια ηλεκτρική γεννήτρια, μόνο σε ταχύτητες υψηλότερες από την σύγχρονη ταχύτητα. Η λειτουργία της γεννήτριας, για το λόγο αυτό, αποκαλείται συχνά η υπερσύγχρονη λειτουργία της μηχανής επαγωγής.



Όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κείμενο, μια μηχανή επαγωγής δεν χρειάζεται ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ του στάτη και του δρομέα. Η λειτουργία της βασίζεται εξ ολοκλήρου στην ηλεκτρομαγνητική επαγωγή, εκ της οποίας και το όνομα. Η απουσία ηλεκτρικών επαφών και η απλότητα της κατασκευής της κάνει την γεννήτρια επαγωγής μία πολύ ισχυρή, αξιόπιστη, και χαμηλού κόστους μηχανή. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές.

Οι μηχανικοί εξοικειωμένοι με τη θεωρία και τη λειτουργία του ηλεκτρικού μετασχηματιστή, θα έβλεπαν την αρχή λειτουργίας της μηχανής περιστρεφόμενου πεδίου ότι μπορεί να θεωρηθεί ως μετασχηματιστής, με βραχυκυκλωμένο δευτερεύον πηνίο. Το πηνίο υψηλής τάσης στον στάτη διεγείρεται, και το πηνίο χαμηλής τάσης στον δρομέα βραχυκυκλώνεται από μόνο του. Η ηλεκτρική ή μηχανική ισχύς από την μία στην άλλη μπορεί να ρέει προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Η θεωρία και η λειτουργία του μετασχηματιστή, ως εκ τούτου, ισχύει όταν τροποποιείται ώστε να εξηγήσει την σχετική κίνηση μεταξύ του στάτη και του δρομέα. Αυτή η κίνηση, εκφράζεται με την ολίσθηση του δρομέα σε σχέση με το συγχρονισμένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.

### 3.3.3. ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΡΟΜΕΑ ΚΑΙ ΟΛΙΣΘΗΣΗ

Η ολίσθηση του στροφέα ορίζεται ως ο λόγος της ταχύτητας του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου και της σύγχρονης ταχύτητας του μαγνητικού πεδίου του στάτη ως εξής:

$$s = (Ns - Nr) / Ns \quad (3.4)$$

όπου

$s$  = η ολίσθηση του δρομέα στο κλάσμα της σύγχρονης ταχύτητας

$Ns$  = η σύγχρονη ταχύτητα =  $60 f/p$  (συχνότητα περ/φής  $f$  διά του αριθμού πόλων  $p$ )

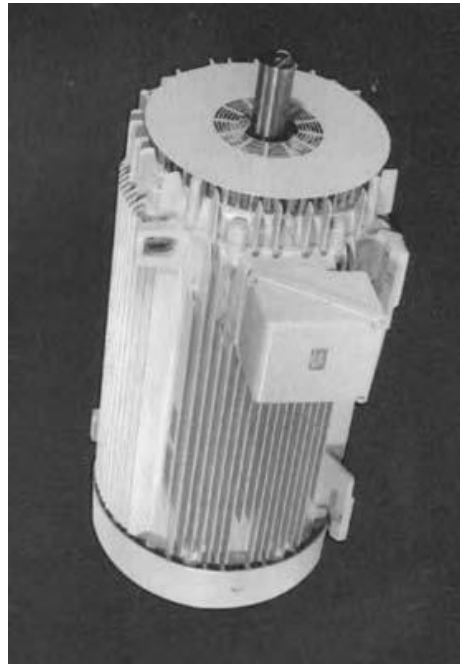
$Nr$  = η ταχύτητα του δρομέα

Η ολίσθηση είναι θετική σε λειτουργία κινητήρα και αρνητική σε λειτουργία γεννήτριας. Και στις δύο λειτουργίες, υψηλότερη ολίσθηση του δρομέα επάγει αναλογικά υψηλότερο ρεύμα στον δρομέα, το οποίο συνεπάγεται μεγαλύτερη μετατροπή ηλεκτρομηχανικής ισχύος. Και στις δύο λειτουργίες, η τιμή της ολίσθησης είναι γενικά μερικές έως αρκετές ποσοστιαίες μονάδες. Υψηλότερες ολισθήσεις, έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη ηλεκτρική απώλεια, η οποία πρέπει να διαχέεται (απάγεται) αποτελεσματικά από τον δρομέα για να κρατήσει την θερμοκρασία λειτουργίας εντός του επιτρεπόμενου ορίου.

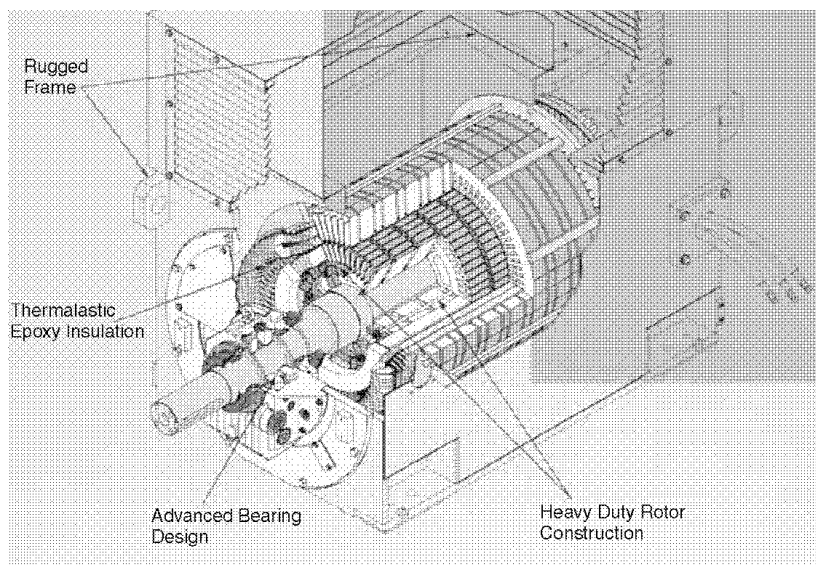
Η θερμότητα απομακρύνεται από τη μηχανή, με τα πτερύγια του ανεμιστήρα που συνδέονται στον ένα από τα δύο έδρανα (ρουλεμάν) στις άκρες του δρομέα. Ο ανεμιστήρας είναι κλεισμένος μέσα σε ένα περίβλημα στην άκρη. Ο εξαναγκασμένος αέρας ταξιδεύει κατά μήκος της εξωτερικής πλευράς της μηχανής, η οποία έχει πτερύγια ψύξης για την αύξηση της επιφάνειας απαγωγής της θερμότητας. Το Σχήμα 3.4 είναι η εξωτερική όψη μίας μηχανής επαγωγής 150 kW που δείχνει το ακριανό

## Συστήματα Αιολικής και Ηλιακής Ενέργειας

περίβλημα και τα πτερύγια ψύξης με αξονική κατεύθυνση. Το σχήμα 3.5 είναι μια τομή του εσωτερικού μιας μηχανής επαγωγής των 2 MW.



ΣΧΗΜΑ 3.4 Α Επαγωγική μηχανή 150 kW. (Από την εταιρεία General Electric)



ΣΧΗΜΑ 3.5 Επαγωγική μηχανή των 2 MW. (Από την Teco Westinghouse Motor)

Η επαγωγική γεννήτρια που τροφοδοτεί ένα δίκτυο συχνότητας 60 Hz, πρέπει να περιστρέφεται με ταχύτητα υψηλότερη από 3600 rpm (rotations per minute) σχεδιασμού 2 πόλων, 1800 rpm σχεδιασμού 4 πόλων, και 1200 rpm σχεδιασμού 6 πόλων. Η ταχύτητα της ανεμογεννήτριας, από την άλλη πλευρά, ποικίλλει από μερικές

εκατοντάδες rpm σε μηχανές της τάξης των kW έως μερικές δεκάδες rpm σε μηχανές της τάξεως των MW. Η Α/Γ, ως εκ τούτου, πρέπει να συνδέεται με την γεννήτρια μέσω ενός μηχανισμού γραναζιών. Δεδομένου ότι αυτό υποβαθμίζει κάπως την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία, πολλές μικρές αυτόνομες μονάδες, λειτουργούν με ειδικά σχεδιασμένα γεννήτριες για χαμηλότερες ταχύτητες, χωρίς κανέναν μηχανισμό γραναζιών.

Κάτω από σταθερή κατάσταση λειτουργίας στην ολίσθηση "s", η γεννήτρια επαγωγής έχει τις ακόλουθες ταχύτητες λειτουργίας σε στροφές ανά λεπτό (rpm):

- Ταχύτητα ροής του στάτη  $N_s$
- Μηχανική ταχύτητα δρομέα  $N_r = (1 - s)N_s$
- Ταχύτητα ροής του στάτη σε σχέση με τον δρομέα  $sN_s$
- Ταχύτητα ροής του δρομέα σε σχέση με τον στάτη  $N_r + sN_s = N_s$  (3.5)

Έτσι, η μηχανή επαγωγής κλωβού, είναι ουσιαστικά μια σταθερής ταχύτητας μηχανή, η οποία περιστρέφεται ολισθαίνοντας ελαφρώς, πίσω από το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του τριφασικού ρεύματος του στάτη. Η ολίσθηση του δρομέα μεταβάλλεται ανάλογα με την μετατρεπόμενη ισχύ, και οι διακυμάνσεις της ταχύτητας του δρομέα είναι μερικών ποσοστιαίων μονάδων. Καταναλώνει πάντα άεργο ισχύ η οποία είναι ανεπιθύμητη όταν συνδέεται σε ένα ασθενές δίκτυο, που συχνά αντισταθμίζεται από πυκνωτές για την επίτευξη του συντελεστή ισχύος κοντά στην μονάδα. Η αλλαγή της ταχύτητας της μηχανής είναι δύσκολη. Μπορεί να σχεδιαστεί να λειτουργεί σε δύο διαφορετικές αλλά σταθερές ταχύτητες, αλλάζοντας τον αριθμό των πόλων της περιέλιξης του στάτη.

Η τάση συνήθως που παράγεται στη γεννήτρια επαγωγής είναι 690 V AC. Δεν είναι οικονομικό να μεταφέρεις ενέργεια με μία τέτοια χαμηλή τάση σε μεγάλη απόσταση. Επομένως, η τάση της μηχανής αυξάνεται σε μια υψηλότερη τιμή μεταξύ 10.000 V και 30.000 V μέσω μετασχηματιστή αύξησης τάσης, για να μειωθούν οι απώλειες ισχύος στις γραμμές.

### 3.3.4. ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ

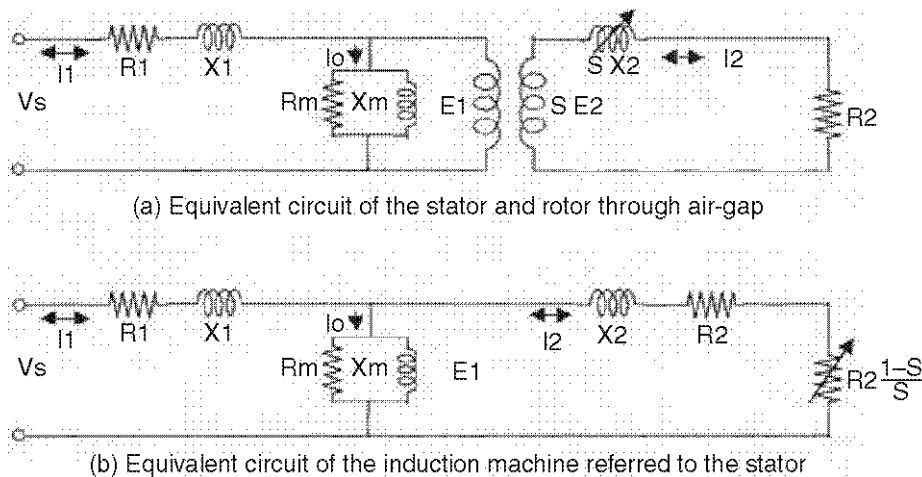
Η θεωρία της λειτουργίας της μηχανής επαγωγής, αναπαρίσταται από το ισοδύναμο κύκλωμα που φαίνεται στο σχήμα 3.6 (a). Είναι παρόμοια με εκείνη του μετασχηματιστή. Η αριστερή πλευρά του κυκλώματος αναπαριστά τον στάτη και η δεξιά πλευρά, τον δρομέα. Τα ρεύματα του στάτη και του δρομέα αναπαρίστανται από τα  $I_1$  και  $I_2$ , αντίστοιχα. Ο κλάδος του κάθετου κυκλώματος φέρει την μαγνήτιση (επίσης γνωστή ως διέγερση ή ρεύμα  $I_0$  χωρίς φορτίο), η οποία δημιουργεί την μαγνητική ροή που απαιτείται για την ηλεκτρομαγνητική λειτουργία της μηχανής. Το συνολικό ρεύμα του στάτη τότε, είναι το άθροισμα του ρεύματος του δρομέα και του ρεύματος διέγερσης. Ο διαχωρισμός από το διάκενο του αέρα δεν φαίνεται, ούτε η διαφορά στον αριθμό στροφών του πηνίου του στάτη και του δρομέα. Αυτό ουσιαστικά σημαίνει ότι ο δρομέας, θεωρείται πως έχει τον ίδιο αριθμό σπειρών με του στάτη και ότι υπάρχει ιδανική μαγνητική σύζευξη. Υπολογίζουμε τις παραμέτρους λειτουργίας,

λαμβάνοντας σαν αναφορά το τύλιγμα του στάτη. Η πραγματική τάση και ρεύμα του δρομέα θα είναι ανάλογοι με οι τιμές που υπολογίζονται από τον λόγο μεταξύ των δύο περιελίξεων. Έτσι, οι υπολογισμοί εκτελούνται συνήθως από την πλευρά του στάτη, όπως θα κάνουμε σε αυτό το κεφάλαιο. Αυτό ταιριάζει με την πρακτική, καθώς οι μετρήσεις λειτουργίας γίνονται πάντα από την πλευρά του στάτη.

Το μεγαλύτερο μέρος της μαγνητικής ροής, διαπερνά τόσο τα πηνία του στάτη όσο και του δρομέα. Η ροή που δεν διαπερνά και τα δύο πηνία ονομάζεται ροή διαφυγής, και αναπαρίσταται από την επαγωγική αντίσταση διαρροής σε Ohm ανά μονάδα φάσης. Το μισό του συνόλου της αντίστασης διαρροής, αποδίδεται σε κάθε πλευρά του κυκλώματος, δηλαδή η επαγωγική αντίσταση διαρροής του στάτη  $X1$  και η επαγωγική αντίσταση διαρροής του δρομέα  $X2$  στο σχήμα 3.6 (b). Η αντίσταση των αγωγών του στάτη και του δρομέα αντιπροσωπεύονται από τις  $R1$  και  $R2$ , αντίστοιχα. Οι παράμετροι μαγνήτισης  $Xm$  και  $Rm$  αντιπροσωπεύουν την μαγνητική διαπερατότητα και τις απώλειες (υστέρηση και δινορεύματα) στο μαγνητικό κύκλωμα της μηχανής.

Η ηλεκτρική αντίσταση που εξαρτάται από την ολίσθηση  $R2 (1 - s) / s$  αντιπροσωπεύει την ισοδύναμη μηχανική αντίσταση του άξονα. Ως εκ τούτου, η μετατροπή της ηλεκτρομηχανικής ισχύος ανά μονάδα φάσης δίνεται από τη σχέση  $I2^2 * 2R2 * (1 - s) / s$ , και η τριφασική μετατροπή ισχύος δίνεται σε Watt ως ακολούθως:

$$P_{em} = 3I2^2 * R2(1 - s) / s \quad (3.6)$$



ΣΧΗΜΑ 3.6 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα επαγωγικής μηχανής για τον υπολογισμό της απόδοσης

Αν η μηχανή δεν βρίσκεται υπό φορτίο και έχει μηδενική τριβή, τρέχει στην σύγχρονη ταχύτητα, η ολίσθηση είναι μηδέν, και η τιμή του  $R2 (1 - s) / s$  γίνεται άπειρη. Το ρεύμα του δρομέα είναι τότε μηδέν και το  $P_{em}$  είναι επίσης μηδέν, όπως θα έπρεπε. Από το άλλο άκρο, όταν ο δρομέας στέκεται ακίνητος, η ολίσθηση είναι μονάδα και η τιμή του  $R2 (1 - s) / s$  είναι μηδέν. Το ρεύμα του δρομέα δεν είναι μηδέν, αλλά η  $P_{em}$  είναι μηδέν, καθώς η μηχανική δύναμη που παράγεται από τον ακίνητο δρομέα είναι μηδέν. Αυτά τα δύο ακραία σημεία λειτουργίας, επιβεβαιώνουν

ουσιαστικά την μετατροπή της ηλεκτρομηχανικής ισχύος που δίνεται από την εξίσωση 3.6.

Σε οποιαδήποτε ολίσθηση που δεν είναι μηδέν ή μονάδα, ούτε το ρεύμα του δρομέα, ούτε η ταχύτητα του είναι μηδέν, με αποτέλεσμα μια μη μηδενική τιμή του  $P_{em}$ .

Η ονομαστική ισχύς της μηχανής είναι η ισχύς που αναπτύχθηκε υπό ονομαστικές συνθήκες, και είναι ίση με:

$$\begin{aligned} & P_{em \text{ rated}} / 1000 \text{ σε (kW)} \\ & \text{ή } P_{em \text{ rated}} / 746 \text{ σε (hp)} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Η μηχανική ροπή δίνεται από την ισχύ διαιρεμένη από την γωνιακή ταχύτητα ως εξής:

$$T_{em} = P_{em} / \omega \quad (3.8)$$

Όπου

$T_{em}$  = Η ηλεκτρομηχανική ροπή που αναπτύσσεται στον δρομέα σε Nm

$\omega$  = Η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα =  $2\pi Ns(1-s) / 60$  σε rad/sec

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 3.6 και 3.8 επιτυγχάνουμε την ροπή σε κάθε ολίσθηση  $s$ , ως ακολούθως σε μονάδες Nm:

$$T_{em} = (180 / 2\pi Ns) I_2^2 R_2 / s \quad (3.9)$$

Η τιμή του  $I_2$  στην Εξίσωση 3.9 προσδιορίζεται από τις παραμέτρους του ισοδύναμου κυκλώματος, και εξαρτώνται από την ολίσθηση. Η ροπή που αναπτύσσεται από τον δρομέα της επαγωγικής μηχανής, είναι ως εκ τούτου, ιδιαίτερα εξαρτημένη από την ολίσθηση, όπως περιγράφεται αργότερα σε αυτό το κεφάλαιο.

Σημειώνουμε εδώ ότι η λειτουργία της επαγωγικής μηχανής καθορίζεται πλήρως από τις παραμέτρους του ισοδύναμου κυκλώματος. Οι παράμετροι του κυκλώματος παρέχονται από τον κατασκευαστή της μηχανής, αλλά μπορεί να προσδιοριστεί με δύο βασικές δοκιμές στην μηχανή. Η δοκιμή πλήρους ταχύτητας χωρίς φορτίο και η δοκιμή μηδενικής ταχύτητας με μπλοκαρισμένο τον δρομέα καθορίζουν το πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα της μηχανής.

Οι παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος, εκφράζονται γενικά σε κλάσματα (ανά μονάδα) των αντίστοιχων ονομαστικών τιμών τους ανά μονάδα φάσης. Η ονομαστική σύνθετη αντίσταση ανά μονάδα φάσης ορίζεται ως ακολούθως σε ohms:

$$Z_{ονομ} = \text{Ονομαστική τάση ανά φάση} / \text{Ονομαστικό ρεύμα ανά φάση} \quad (3.10)$$

Για παράδειγμα η αντίσταση του δρομέα ανά μονάδα εκφράζεται με τον ακόλουθο τρόπο:

$$RI \text{ ανά μον.} = RI(\text{ohms}) / Z_{\text{ονομ}} (\text{ohms}) \quad (3.11)$$

και παρόμοιες εκφράσεις για όλες τις άλλες παραμέτρους του κυκλώματος. Όταν εκφράζεται ως τέτοια, οι  $X1$  και  $X2$  είναι ίσες, με λίγες έως κάμποσες ποσοστιαίες μονάδες, και  $R1$  και  $R2$  είναι επίσης περίπου ίσες, με μερικές ποσοστιαίες μονάδες ονομαστικής σύνθετης αντίστασης. Οι παράμετροι μαγνήτισης  $Xm$  και  $Rm$  είναι συνήθως μεγάλες, αρκετών ποσοστιαίων μονάδων της  $Z_{\text{ονομ}}$ , τραβώντας έτσι αμελητέο ρεύμα σε σύγκριση με το ονομαστικό ρεύμα. Για το λόγο αυτό, αυτός ο κλάδος μαγνήτισης συχνά αγνοείται από το κύκλωμα, κάνοντας προσεγγιστικούς υπολογισμούς της λειτουργίας της μηχανής.

Όλες οι προηγούμενες εξισώσεις ισχύουν τόσο για τον επαγωγικό κινητήρα, όσο και την επαγωγική γεννήτρια με το σωστό πρόσημο της ολίσθησης. Σε λειτουργία γεννήτριας, η τιμή της ολίσθησης είναι αρνητική στις εξισώσεις λειτουργίας όποτε εμφανίζεται. Πρέπει επίσης να θυμόμαστε ότι η πραγματική μηχανική ισχύς εξόδου είναι αρνητική, γεγονός που σημαίνει ότι ο άξονας λαμβάνει μηχανική ισχύ αντί να παράγει. Η άεργος ηλεκτρική ισχύς που λαμβάνεται στους ακροδέκτες του στάτη, προπορεύεται της τάσης της γραμμής και ως εκ τούτου, μπορούμε να πούμε ότι η γεννήτρια επαγωγής, παράγει προπορευόμενη άεργο ισχύ.

### 3.3.5. ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΑΙ ΨΥΞΗ

Οι τιμές των  $R1$  και  $R2$  στο ισοδύναμο κύκλωμα, αντιπροσωπεύουν τις ηλεκτρικές απώλειες στο στάτη και τον δρομέα, αντίστοιχα. Όπως θα φανεί αργότερα, για μία καλά σχεδιασμένη μηχανή, η μαγνητική απώλεια του πυρήνα πρέπει να ισούται με την απώλεια του αγωγού. Ως εκ τούτου, με τα  $R1$  και  $R2$  που εκφράζονται ανά μονάδα της βασικής σύνθετης αντίστασης, η απόδοση της μηχανής επαγωγής είναι περίπου ίση με:

$$\eta = 1 - 2(R1 + R2) \quad (3.12)$$

Για παράδειγμα, σε ένα μηχάνημα με τα  $R1$  και  $R2$  το καθένα 2%, γράφουμε  $R1 = R2 = 0.02$  ανά μονάδα. Η απόδοση είναι τότε απλά  $1 - 2(0,02 + 0,02) = 0.92$  ανά μονάδα ή 92% της εισόδου ισχύος σε αυτό το μηχάνημα, 8% χάνεται στην διαδικασία ηλεκτρομηχανικής μετατροπής.

Οι απώλειες που λαμβάνουν χώρα στη μηχανή ελαχιστοποιούνται με την διάθεση επαρκούς ψύξης. Οι μικρές μηχανές είναι γενικά αερόψυκτες, ενώ οι μεγάλες γεννήτριες που βρίσκονται μέσα στην άτρακτο μπορεί να είναι δύσκολο να ψύχονται από τον αέρα. Η ψύξη με νερό, που είναι πολύ πιο αποτελεσματική από του αέρα σε τέτοιες περιπτώσεις, μπορεί να είναι πλεονεκτικότερη με τρεις τρόπους:

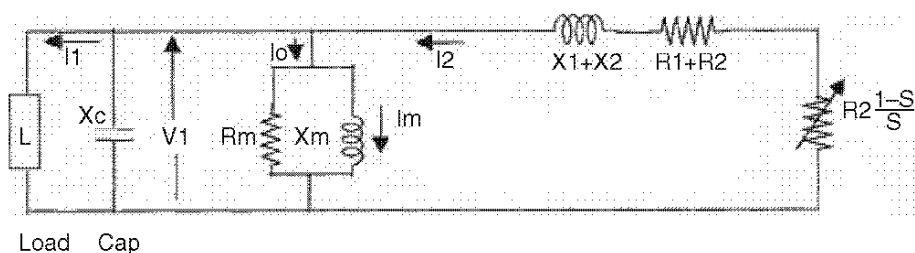
- η ψύξη με νερό μειώνει το βάρος της γεννήτριας στην άτρακτο, ωφελώντας την δομική σχεδίαση του πύργου.
- Απορροφά και έτσι μειώνει το θόρυβο και τους κραδασμούς.

- Εξαλείφει το άνοιγμα της ατράκτου με την τοποθέτηση του εναλλάκτη θερμότητας εξωτερικά, καθιστώντας το περίβλημα πιο ανθεκτικό στις καιρικές συνθήκες.
- Συνολικά, μειώνει την απαίτηση συντήρησης, ένα σημαντικό όφελος στις μεγάλες μηχανές που συνήθως εγκαθίστανται πάνω σε ψηλούς πύργους σε αντίξοες καιρικές συνθήκες.

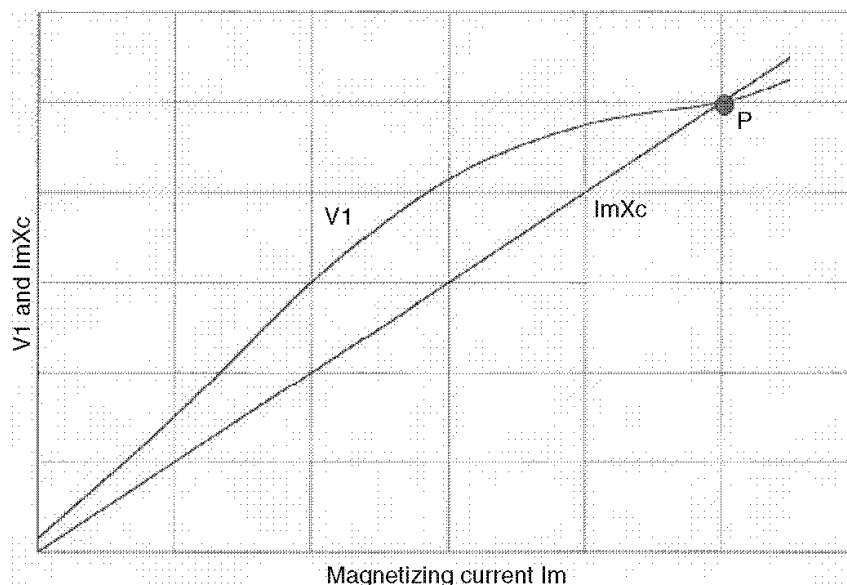
### 3.3.6. ΠΥΚΝΩΤΕΣ ΑΥΤΟΔΙΕΓΕΡΣΗΣ

Η μηχανή επαγωγής χρειάζεται εναλλασσόμενο ρεύμα διέγερσης (AC). Η μηχανή είναι είτε αυτοδιεγερόμενη ή από εξωτερική πηγή διεγερόμενη. Επειδή το ρεύμα διέγερσης είναι κυρίως άεργο (δεν προσφέρει έργο, είναι φανταστικό), ένα αυτόνομο σύστημα τέτοιας μηχανής αυτοδιεγείρεται από παράλληλους πυκνωτές. Μια γεννήτρια επαγωγής συνδεδεμένη με το δίκτυο, αντλεί την ισχύ διέγερσης της από το δίκτυο. Οι σύγχρονες γεννήτριες που συνδέονται με το δίκτυο βασικού φορτίου, πρέπει να είναι ικανές να παρέχουν αυτή την άεργη ισχύ.

Σαν γεννήτρια, η επαγωγική μηχανή έχει ένα μειονέκτημα απαιτώντας προπορευόμενη άεργη ισχύ για την διέγερση. Για μια αυτόνομη, αυτοδιεγερόμενη γεννήτρια επαγωγής, η ισχύς διέγερσης μπορεί να παρέχεται από έναν εξωτερικό πυκνωτή συνδεδεμένο με τους ακροδέκτες της γεννήτριας (Σχήμα 3.7). Δεν απαιτείται ξεχωριστή παροχή ρεύματος AC σε αυτή την περίπτωση. Στην γεννήτρια που συνδέεται στο δίκτυο, η άεργος ισχύς παρέχεται από τις σύγχρονες γεννήτριες που εργάζονται στο άλλο άκρο του δικτύου. Όπου η ικανότητα του δικτύου να παρέχει την άεργη ισχύ είναι περιορισμένη, τοπικοί πυκνωτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή μερικώς της αναγκαίας άεργου ισχύος.



ΣΧΗΜΑ 3.7 Αυτοδιεγερόμενη επαγωγική γεννήτρια με εξωτερικό πυκνωτή.



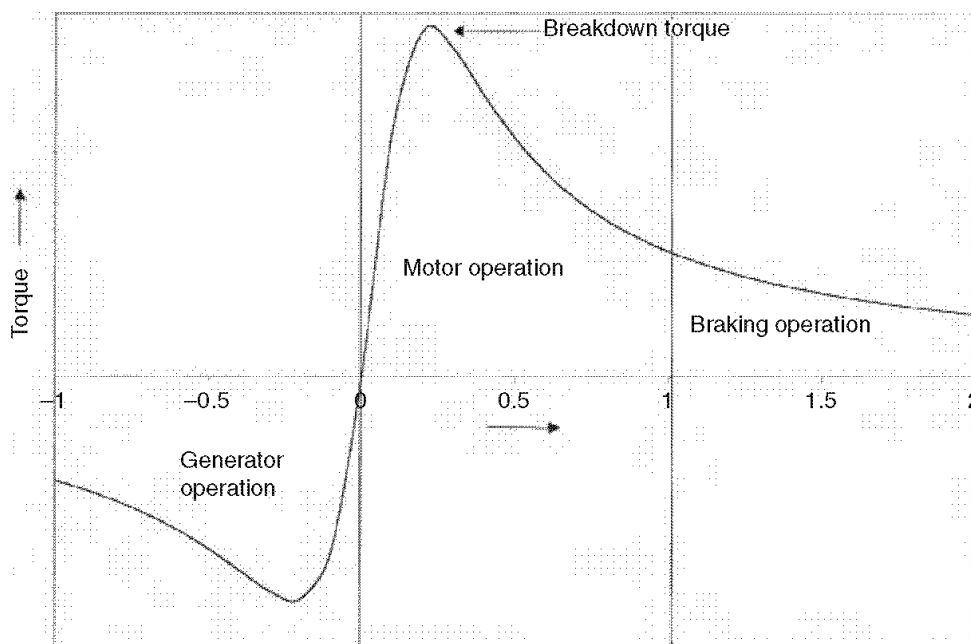
ΣΧΗΜΑ 3.8 Προσδιορισμός σταθερής λειτουργίας αυτοδιεγειρόμενης επαγωγικής μηχανής.

Η επαγωγική γεννήτρια μπορεί να αυτοδιεγερθεί με τη χρήση εξωτερικού πυκνωτή μόνο εάν ο δρομέας έχει επαρκές υπόλοιπο μαγνητικό πεδίο. Στην αυτοδιεγειρόμενη λειτουργία, η ταχύτητα, το φορτίο, και η τιμή της χωρητικότητας επηρεάζει την συχνότητα και την τάση εξόδου της γεννήτριας. Η τάση λειτουργίας και η συχνότητα καθορίζονται στο παρακάτω κείμενο από το κατά προσέγγιση ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 3.7.

Χωρίς φορτίο στους ακροδέκτες της μηχανής, το ρεύμα του πυκνωτή  $I_c = V1 / X_c$  πρέπει να είναι ίσο με το ρεύμα μαγνήτισης  $I_m = V1 / X_m$ . Η  $V1$  τάση είναι συνάρτηση της  $I_m$ , γραμμικά αυξανόμενη μέχρι να φθάσει το σημείο κορεσμού του μαγνητικού πυρήνα (σχήμα 3.8). Η σταθερή λειτουργία, απαιτεί η γραμμή  $I_m X_c$  να τέμνει την καμπύλη  $V1 - I_m$ . Το σημείο λειτουργίας είναι σταθερό εκεί όπου το  $V1 / X_c$  ισούται με  $V1 / X_m$ , δηλαδή, όταν  $1 / X_c = 1 / X_m$ , με  $X_c = 1 / \omega C$ . Αυτό ρυθμίζει την συχνότητα λειτουργίας σε hertz. Με την τιμή του πυκνωτή  $C$ , η συχνότητα εξόδου της αυτοδιεγειρόμενης γεννήτριας δίνεται επομένως από τον τύπο:

$$f = 1 / 2\pi C X_m \quad \text{ή} \quad \omega = 1 / 2\pi (C L m^{1/2}) \quad (3.13)$$





ΣΧΗΜΑ 3.9 Ροπή έναντι ταχύτητας χαρακτηριστικό της επαγωγικής μηχανής σε τρεις τρόπους λειτουργίας.

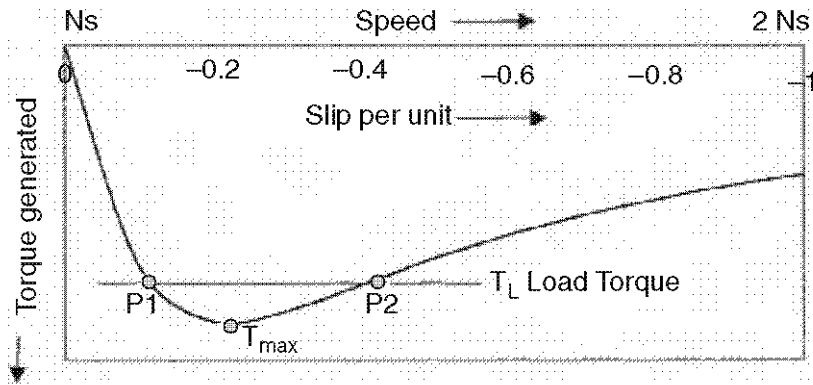
Υπό συνθήκες φορτίου, η παραγόμενη ισχύς  $V I_2 \cos \phi_2$  προνοεί για την ισχύ στην αντίσταση φορτίου  $R$  και την απώλεια στην  $R_m$ , και τα άεργα ρεύματα πρέπει να δίνουν άθροισμα μηδέν, δηλαδή

$$(V I / X) + (V I / X_m) + I_2 \sin \phi_2 = V I / X_c \quad (3.14)$$

Η εξίσωση 3.14 προσδιορίζει την τάση εξόδου υπό φορτίο, ενώ οι εξισώσεις 3.13 και 3.14 προσδιορίζουν την συχνότητα και τάση εξόδου για δοσμένη τιμή πυκνωτή. Αντιστρόφως μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προσδιορίσουν την απαιτούμενη τιμή χωρητικότητας για επιθυμούμενη συχνότητα και τάση εξόδου.

### 3.3.7. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΡΟΠΗΣ-ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ

Αν μεταβάλλουμε την ολίσθηση σε μια ευρεία περιοχή τιμών στο ισοδύναμο κύκλωμα, παίρνουμε την καμπύλη ροπής έναντι της ταχύτητας όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.9. Στην περιοχή των αρνητικών ολισθήσεων, η μηχανή λειτουργεί σαν γεννήτρια που τροφοδοτεί το ηλεκτρικό φορτίο που συνδέεται στους ακροδέκτες της.



ΣΧΗΜΑ 3.10 Ροπή έναντι ολίσθησης επαγωγικής μηχανής υπό φορτίο.

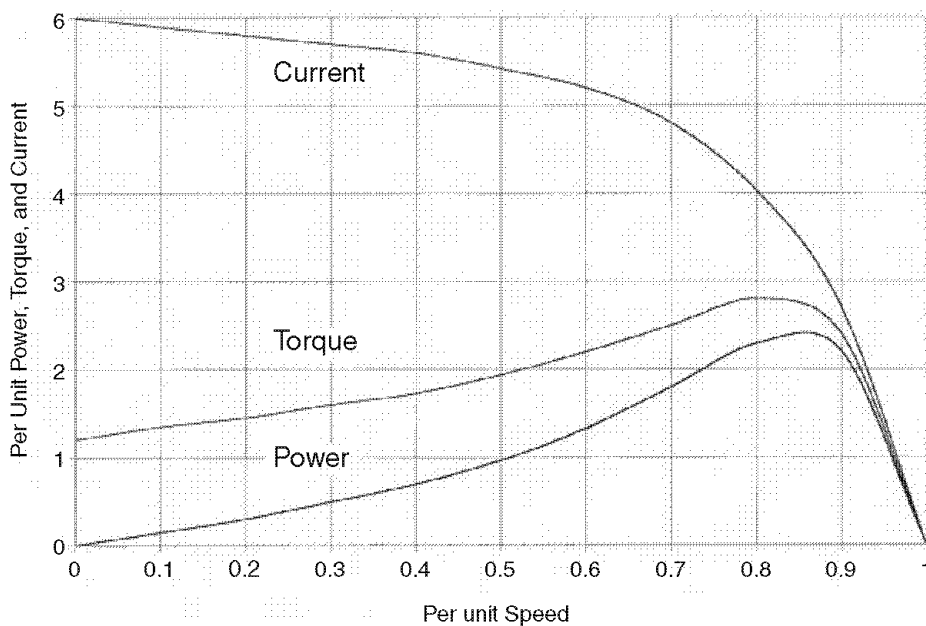
Στην περιοχή των θετικών ολισθήσεων, η μηχανή λειτουργεί σαν κινητήρας, που περιστρέφει το μηχανικό φορτίο, που είναι συνδεδεμένο στον άξονα του. Εκτός από τις περιοχές λειτουργίας σαν κινητήρας και γεννήτρια, η επαγωγική μηχανή έχει ακόμα έναν άλλο τρόπο λειτουργίας, και αυτός είναι η λειτουργία πέδησης. Αν η μηχανή λειτουργεί σε ολίσθηση μεγαλύτερη από 1,0 στρέφοντάς την ανάποδα, απορροφά ισχύ με ροπή όπως αυτή ενός κινητήρα. Δηλαδή, λειτουργεί σαν φρένο. Η ισχύς, σε αυτήν την περίπτωση, μετατρέπεται σε απώλεια ίση με  $I^2 \cdot R$  στους αγωγούς του δρομέα, η οποία πρέπει να απάγεται ως θερμότητα. Η πέδηση με δινορεύματα που χρησιμοποιείται στον δρομέα της ανεμογεννήτριας, στηρίζεται σε αυτήν την αρχή. Έτσι, σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, η συνδεδεμένη από δικού της στο δίκτυο επαγωγική γεννήτρια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πέδη με δινορεύματα, με την αντιστροφή της αλληλουχίας της τριφασικής τάσης δικτύου στους ακροδέκτες του στάτη. Αυτό αντιστρέφει την κατεύθυνση περιστροφής της μαγνητικής ροής σε σχέση με τον δρομέα. Η στρεπτική καταπόνηση των πτερύγων της Α/Γ και της πλήμνης, μίας τέτοιας υψηλής ροπής πέδησης, πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο για καταστάσεις έκτακτης ανάγκης.

Η καμπύλη ροπής-ολίσθησης στην λειτουργία γεννήτριας, απεικονίζεται χωριστά στο Σχήμα 3.10. Αν η γεννήτρια φορτίζεται σε μια σταθερή ροπή φορτίου  $T_L$ , έχει δύο πιθανά σημεία λειτουργίας,  $P1$  και  $P2$ . Μόνο ένα από αυτά τα δύο σημεία,  $P1$ , είναι σταθερό. Κάθε διαταραχή της ταχύτητας γύρω από το  $P1$  θα παράγει σταθεροποιητική ροπή για να το επαναφέρει πίσω στο  $P1$ . Το σχήμα δείχνει επίσης το όριο, στο οποίο μπορεί να φορτωθεί η γεννήτρια. Η μέγιστη ροπή που μπορεί να υποστηρίξει, ονομάζεται ροπή «κατάρρευσης», η οποία παρουσιάζεται ως  $T_{max}$ . Εάν η γεννήτρια φορτωθεί με μία σταθερή ροπή πάνω από την  $T_{max}$ , γίνεται ασταθής, παρουσιάζει απώλεια στήριξης, αντλεί υπερβολικό ρεύμα, και καταστρέφεται λόγω υπερθέρμανσης αν δεν προστατευτεί σωστά.

### 3.3.8. ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

Η γεννήτρια επαγωγής ενδέχεται να αντιμετωπίσει τα ακόλουθα τρία είδη μεταβατικών ρευμάτων:

*Μεταβατικά ρεύματα εκκίνησης:* Σε ένα σύστημα συνδεδεμένο στο δίκτυο, η επαγωγική γεννήτρια χρησιμοποιείται σαν κινητήρας για την εκκίνηση της Α/Γ από την ηρεμία στην υπερσύγχρονη ταχύτητα. Τότε και μόνο τότε η μηχανή μετάγεται (μεταπίπτει) σε λειτουργία γεννήτριας, τροφοδοτώντας το δίκτυο. Αν για την εκκίνηση εφαρμόζεται η πλήρης ονομαστική τάση, ο κινητήρας τραβάει υψηλό ρεύμα εκκίνησης σε μηδενική ταχύτητα όταν η ολίσθηση είναι 1.0 και η αντίσταση του δρομέα είναι η ελάχιστη. Επομένως, το ρεύμα εκκίνησης μπορεί να είναι 5 έως 7 φορές μεγαλύτερο του ονομαστικού ρεύματος, προκαλώντας προβλήματα υπερθέρμανσης, ιδιαίτερα σε μεγάλες μηχανές. Επιπλέον, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.11, η ροπή που διατίθεται για να επιταχύνει τον δρομέα μπορεί να είναι χαμηλή με αποτέλεσμα αργό ξεκίνημα. Αυτό επιβαρύνει επίσης το πρόβλημα θέρμανσης. Για το λόγο αυτό, οι μεγάλοι κινητήρες επαγωγής, εκκινούν συχνά με ένα κύκλωμα ομαλής εκκίνησης, όπως αυτομετασχηματιστή περιορισμού τάσης ή εκκινητή αστέρα τριγώνου. Η σύγχρονη μέθοδος εκκίνησης είναι η εφαρμογή μειωμένης τάσης με μειωμένη συχνότητα, διατηρώντας σταθερή την αναλογία volt προς hertz (τάση προς συχνότητα). Αυτή η μέθοδος ξεκινά τον κινητήρα με την ελάχιστη μηχανική και θερμική καταπόνηση.



ΣΧΗΜΑ 3.11 Καμπύλη εκκίνηση επαγωγικής μηχανής και επιτάχυνσης

*Μεταβατικά ρεύματα επανασύνδεσης:* Ένα σοβαρό μεταβατικό ρεύμα μπορεί να ρέει στο σύστημα, εάν η επαγωγική γεννήτρια που λειτουργεί σε σταθερή κατάσταση, ξαφνικά αποσυνδεθεί λόγω βλάβης του συστήματος ή κάποιο άλλο λόγο, και στη συνέχεια να επανασυνδέεται με αυτόματη μεταγωγή. Το μέγεθος του ρεύματος εξαρτάται από την γωνία φάσης της τάσης όταν η γεννήτρια επανασυνδέεται στο δίκτυο. Η φυσική εκτίμηση αυτού του μεταβατικού ρεύματος εξάγεται από το θεώρημα σταθερής «σύζευξης μαγνητικής ροής». Ένα πηνίο που έχει μηδενική αντίσταση διατηρεί σταθερή την σύζευξη μαγνητικής ροής του. Επειδή η αντίσταση του τυλίγματος είναι μικρή σε σύγκριση με την επαγωγή στις περισσότερες ηλεκτρικές

μηχανές, το θεώρημα σταθερής σύζευξης μαγνητικής ροής, διατηρείται και μετά τη βλάβη. Εάν η επανασύνδεση έγινε όταν η τάση του στάτη και του δρομέα ήταν σε αντίθεση φάσης, μεγάλα μεταβατικά ρεύματα δημιουργούνται ώστε να διατηρηθεί η σύζευξη μαγνητικής ροής, η οποία στη συνέχεια μειώνεται σιγά-σιγά σε μια μικρή τιμή μετά από λίγες δεκάδες χιλιοστά του δευτερολέπτου. Εν τω μεταξύ, η μεταβατική ηλεκτρομηχανική ροπή μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη, ώστε να δώσει στην μηχανή και στον πύργο ένα σοβαρό τράνταγμα. Το πραγματικό πλάτος και πρόσημο της πρώτης κορυφής της μεταβατικής ροπής, εξαρτάται στενά, από την ταχύτητα του δρομέα και την διάρκεια της διακοπής. Στη χειρότερη περίπτωση, η πρώτη κορυφή, μπορεί να φθάσει σε μία τιμή 15 φορές της ονομαστικής ροπής υπό πλήρες φορτίο. Συχνές βλάβες αυτού του είδους, μπορούν να προκαλέσουν θραύση του άξονα λόγω των τάσεων καταπόνησης, ιδίως κατά τις συζεύξεις ανεμογεννητριών.

*Βραχυκύκλωμα:* Όταν συμβαίνει μία βλάβη βραχυκυκλώματος πάνω ή κοντά στους ακροδέκτες της γεννήτριας, η μηχανή συμβάλλει σημαντικά στο ρεύμα σφάλματος του συστήματος, ιδιαίτερα εάν τρέχει σε ένα μικρό φορτίο. Το «ρεύμα βραχυκυκλώματος» είναι πάντα πιο σοβαρό, σε βλάβη μονοφασικού συστήματος από εκείνο ενός τριφασικού συστήματος. Η πιο σημαντική ποσότητα είναι το πρώτο ρεύμα κορυφής, δεδομένου ότι καθορίζει την ισχύ του διακόπτη του κυκλώματος προστασίας, που απαιτείται για την προστασία της γεννήτριας έναντι τέτοιων σφαλμάτων. Το ρεύμα βραχυκυκλώματος, έχει μία αργά φθίνουσα DC συνιστώσα, επάνω σε μία AC συνιστώσα. Η AC συνιστώσα είναι μεγαλύτερη από το εισροής ρεύμα εκκίνησης, και μπορεί να φθάσει σε 10 με 15 φορές την ονομαστική τιμή του ρεύματος υπό πλήρες φορτίο.

Το μεταβατικό ρεύμα και ροπή, σε κάθε περίπτωση, υπολογίζονται χρησιμοποιώντας το γενικευμένο ισοδύναμο κύκλωμα της μηχανής, σε σχέση με τον «άξονα d» και «άξονα q» μεταβατική και υπομεταβατική μαγνητική αντίσταση και σταθερές χρόνου. Οι όροι «άξονας q» στην γενικευμένη θεωρία, δεν υπεισέρχονται στην ανάλυση μεταβατικών φαινομένων της επαγωγικής γεννήτριας, καθώς οι όροι «άξονας d» και «άξονας q» είναι πανομοιότυποι εξαιτίας της τέλει κυκλικής συμμετρίας στην ηλεκτρομαγνητική δομή.

### **3.4. ΔΙΠΛΑ ΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΜΕΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ**

Η διπλά τροφοδοτούμενη γεννήτρια επαγωγής, είναι μια ανερχόμενη πρωτοποριακή τεχνολογία, που προς το παρόν χρησιμοποιείται σε ορισμένες μεγάλες ανεμογεννήτριες, μεταβλητής ταχύτητας. Η μηχανή των 4.2 MW / 100 m διαμέτρου της NEG Micon και η 2 έως 3 MW μηχανή της GE είναι δύο παραδείγματα. Στον διπλά τροφοδοτούμενο επαγωγικό κινητήρα, ένας μετατροπέας συχνότητας πηγής τάσης, τροφοδοτεί την ενέργεια συχνότητας ολίσθησης στον τριφασικό δρομέα. Έτσι, ο κινητήρας τροφοδοτείται και από τις δύο ομάδες ακροδεκτών, του στάτη καθώς και του δρομέα, εξ ου και το όνομα. Σε εφαρμογές ανεμογεννητριών συνδεδεμένων στο δίκτυο, η ταχύτητα του δρομέα και η συχνότητα του δικτύου είναι αποζευγμένες με την χρήση ηλεκτρονικών μετατροπέων συχνότητας.

Το πιο ελκυστικό χαρακτηριστικό της διπλά τροφοδοτούμενης γεννήτριας επαγωγής, είναι ότι μόνο το 20 με 30% της ισχύος πρέπει να περάσει μέσα από μετατροπή συχνότητας, συγκρινόμενο με το 100% της σύγχρονης γεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας. Αυτό δίνει ένα σημαντικό πλεονέκτημα κόστους στο κόστος των ηλεκτρονικών ισχύος. Ωστόσο, η κλασματική μετατροπή ισχύος της διπλά τροφοδοτούμενης γεννήτριας επαγωγής, εισάγει ένα πρόβλημα που σχετίζεται με το δίκτυο. Ένας νέος κανονισμός απαιτεί ότι οι ανεμογεννήτριες πρέπει να παραμένουν συνδεδεμένες με το δίκτυο σε περίπτωση πτώση τάσης και ότι η ενσωματωμένη ικανότητα της ανεμογεννήτριας, στηρίζει ενεργά το δίκτυο. Η άμεση απενεργοποίηση μεγάλης χωρητικότητας αιολικής ενέργειας κατά τη διάρκεια μιας έκτακτης ανάγκης, θα μπορούσε να οδηγήσει σε καταστροφικό blackout το δίκτυο.

### **3.5. ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΑΜΕΣΗΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ**

Η ανεμογεννήτρια λειτουργεί συνήθως σε δεκάδες στροφές ανά λεπτό (rpm), ενώ η γεννήτρια λειτουργεί κοντά στις 1800 ή 3600 rpm σε ένα σύστημα 60 Hz ή κοντά στις 1.500 rpm ή 3.000 rpm σε ένα σύστημα 50 Hz. Στο συμβατικό σύστημα μετάδοσης με κιβώτιο ταχυτήτων, μία Α/Γ που λειτουργεί στις 36 rpm, και οδηγεί μία γεννήτρια τεσσάρων πόλων, πρέπει να χρησιμοποιεί ένα κιβώτιο ταχυτήτων σχέσης 1:50. Το κόστος, οι δονήσεις και ο θόρυβος που σχετίζονται με το κιβώτιο ταχυτήτων μπορούν να εξαλειφθούν, με τη χρήση μίας γεννήτριας άμεσης ώθησης χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων, η οποία βελτιώνει επίσης την αποδοτικότητα της μετατροπής.

Σχεδιάζοντας μια ηλεκτρική γεννήτρια που λειτουργεί σε μερικές δεκάδες rpm και έχει μια συγκρίσιμη απόδοση είναι ένα δύσκολο έργο. Θα πρέπει να έχει μια πολύ υψηλή ονομαστική ροπή, για να μετατρέψει την απαιτούμενη ισχύ σε τόσο χαμηλές ταχύτητες. Επειδή το μέγεθος της μηχανής και η απώλειες ισχύος εξαρτώνται από την ονομαστική ροπή, ο σχεδιασμός χαμηλής ταχύτητας είναι εγγενώς δύσκολος και λιγότερο αποτελεσματικός. Αυτό το μειονέκτημα εν μέρει ξεπερνιέται, σχεδιάζοντας την μηχανή με μεγάλη διάμετρο και μικρό πολικό βήμα (βήμα πόλου). Πολλοί τύποι γεννητριών άμεσης ώθησης έχουν εξετασθεί. Για τέτοιες εφαρμογές υπάρχουν οι εξής:

- Οι συμβατικές σύγχρονες, μεταγωγής μαγνητικής αντίστασης, και επαγωγής τομέα γεννήτριες μεταξύ των ηλεκτρικά διεγειρόμενων
- Η ακτινικής ροής σύγχρονη, αξονικής ροής σύγχρονη, και εγκάρσιας ροής σύγχρονες γεννήτριες μεταξύ αυτών του μόνιμου μαγνήτη

Μια ποικιλία γεννητριών άμεσης ώθησης σε μία περιοχή ισχύος από 30 kW ως 3 MW, έχουν συγκριθεί με τις συμβατικές οδηγούμενες από κιβώτιο ταχυτήτων γεννήτριας από τον Grauers. Η μεθοδολογία του, βασίζεται σε γνωστές αναλυτικές μεθόδους και σωρεία παραμέτρων θερμικών μοντέλων. Η μελέτη του Grauers καταλήγει στο συμπέρασμα ότι, μια ακτινικής ροής μόνιμου μαγνήτη γεννήτρια, ταιριάζει καλά με την άμεσης ώθησης ανεμογεννήτρια. Ο σχεδιασμός μπορεί να είναι μικρός και αποτελεσματικός για διασυνδεδεμένη στο δίκτυο γεννήτρια με μετατροπέα συχνότητας, εάν η ονομαστική ροπή επιτρέπεται να είναι κοντά στην μέγιστη ροπή.

Τέτοιος σχεδιασμός θα μπορούσε να είναι τόσο αποτελεσματικός, όσο της συμβατικής γεννήτριας επαγωγής τεσσάρων πόλων, που οδηγείται από κιβώτιο ταχυτήτων. Δηλαδή η γεννήτρια, πρέπει να έχει ένα μεγάλο αριθμό πόλων. Μια τέτοια μηχανή πρέπει να έχει ένα μικρό πολικό βήμα, που έχει σαν αποτέλεσμα έναν φτωχό μαγνητικό σχεδιασμό. Για να παρακάμψουν τέτοιους περιορισμούς, εξετάζονται οι σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη και τυλιγμένου δρομέα, για 1,5 MW άμεσης ώθησης γεννήτριες.

Μια άλλη πιθανή λύση είναι η μηχανή επαγωγής αξονικού διάκενου. Μπορεί να σχεδιαστεί με ένα μεγάλο αριθμό πόλων με λιγότερη δυσκολία, σε σύγκριση με την συμβατική ακτινικού διάκενου επαγωγική μηχανή. Η μηχανή αξονικού διάκενου, εξετάζεται για άμεσης ώθησης θαλάσσιας προώθησης μηχανές, η οποία είναι επίσης εγγενώς σύστημα χαμηλής ταχύτητας. Για μικρές χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων μονάδες αιολικής ενέργειας με ανεμογεννήτριες, η αξονικής ροής γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη είναι ενδιαφέρουσα για την απλότητά της. Μία εργαστηριακή πρωτότυπη των 5 kW, 200 rpm, αξονικού διάκενου, μόνιμου μαγνήτη γεννήτρια, έχει πρόσφατα ελεγχθεί. Ωστόσο, μια σημαντική προσπάθεια έρευνας και ανάπτυξης απαιτείται, πριν τα μεταβλητής ταχύτητας άμεσης ώθησης συστήματα, γίνουν εμπορικά διαθέσιμα για μεγάλα συστήματα αιολικής ενέργειας.

Η άμεση ώθηση χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο μαζί με τη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη, μέχρι τις ισχείς των 1,5 MW. Η απλοποιημένη σχεδίαση της γεννήτριας και απόδοση υψηλότερου μερικού φορτίου, είναι τα κύρια οφέλη της γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη.

#### *ΑΝΑΦΟΡΕΣ - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ*

1. Rahim, Y.H.A., Controlled Power Transfer from Wind Driven Reluctance Generators, IEEE Winter Power Meeting, Paper No. PE-230-EC-1-09, New York, 1997.
2. Say, M.G., Alternating Current Machines, John Wiley & Sons, New York, 1983.
3. Alger, P.L., The Nature of Induction Machines, Gordon and Breach, New York, 1965.
4. Adkins, B., The General Theory of Electrical Machines, Chapman and Hall, London, 1964.
5. Kron, G., Equivalent Circuits of Electrical Machines, Dover Publications, New York, 1967.
6. Yamayee, Z.A. and Bala, J.L., Electromechanical Devices and Power Systems, John Wiley & Sons, New York, 1994.
7. Slootweg, J.G., Wind Power Modeling and Impact on Power System Dynamics, Ph.D. thesis in Electric Power Systems, TU Delft, The Netherlands, 2003.
8. Grauers, A., Design of Direct-Driven Permanent-Magnet Generators for Wind Turbines, Ph.D. thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, October 1996.

9. Chalmers, B.J. and Spooner, E., Axial Flux Permanent Magnet Generator for Gearless Wind Energy Systems, IEEE Paper No. PE-P13-EC-02, July 1998.

## ΚΕΦ. 4. ΕΛΕΓΧΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Η ταχύτητα της Α/Γ είναι πολύ χαμηλότερη από την επιθυμητή ταχύτητα για την ηλεκτρική γεννήτρια. Για το λόγο αυτό, η ταχύτητα της Α/Γ αυξάνεται χρησιμοποιώντας έναν μηχανισμό γραναζιών (κιβώτιο ταχυτήτων). Το σύστημα μπορεί να είναι σταθερής ταχύτητα ή μεταβλητής ταχύτητας, όπως περιγράφεται σε αυτό το κεφάλαιο.

Η εξίσωση ισχύος της αιολικής ενέργειας, όπως προκύπτει στο κεφάλαιο 3 είναι η εξής:

$$P = 1/2 * \rho * A * V^3 * C_p \quad (4.1)$$

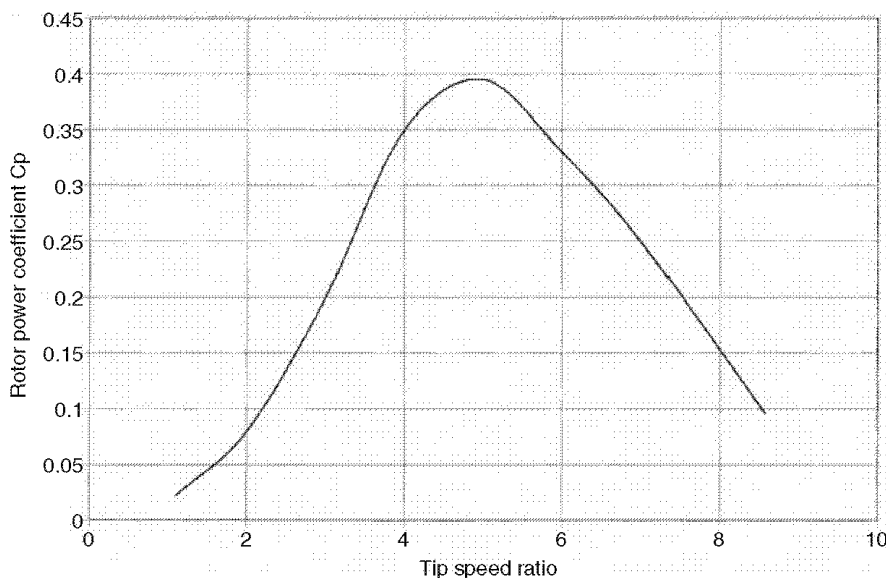
όπου  $C_p$  είναι ο συντελεστής ισχύος.

Όπως φάνηκε παραπάνω, η τιμή του  $C_p$  ποικίλλει ανάλογα με την αναλογία της ταχύτητας του ακροπτερύγιου του στροφείου, προς την ταχύτητα του ανέμου, που ονομάζεται λόγος ταχύτητας ακροπτερύγιου (TSR). Το σχήμα 4.1 απεικονίζει μία τυπική σχέση μεταξύ του συντελεστή ισχύος και του TSR. Το TSR και ο συντελεστής ισχύος ποικίλλει ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Το χαρακτηριστικό  $C_p$  έχει ένα μοναδικό ανώτατο όριο σε μια συγκεκριμένη τιμή του TSR, γύρω στο 5 στην προκειμένη περίπτωση. Ως εκ τούτου, κατά τη λειτουργία του στροφείου με σταθερή ταχύτητα, ο συντελεστής ισχύος μπορεί να είναι μέγιστος σε μία μόνο ταχύτητα ανέμου. Ωστόσο, για την επίτευξη της υψηλότερης ετήσιας απόδοσης ενέργειας, η τιμή του συντελεστή ισχύος πρέπει να διατηρηθεί στο μέγιστο επίπεδο, ανά πάσα στιγμή, ανεξάρτητα της ταχύτητας ανέμου.

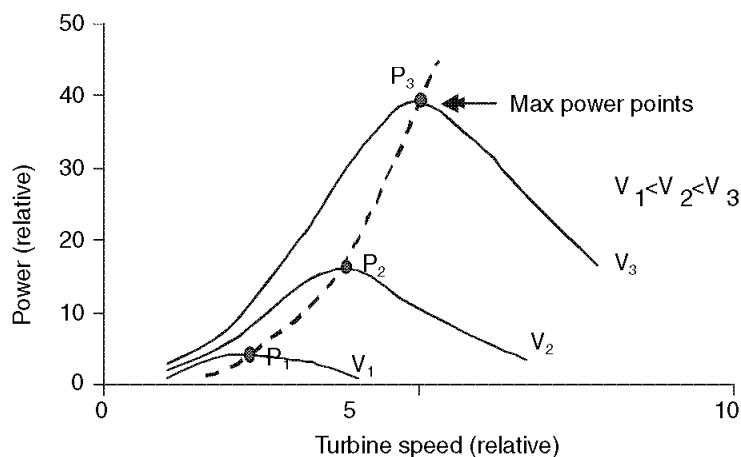
Η τιμή του  $C_p$  μεταβάλλεται όχι μόνο με το TSR, αλλά και με τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του στροφείου. Η θεωρητική μέγιστη τιμή του  $C_p$  είναι 0,593, αλλά το πρακτικό όριο μπορεί να είναι 0,5. Η επίτευξη  $C_p$  πάνω από 0,4 θεωρείται καλή. Οποιαδήποτε μέγιστη τιμή επιτυγχάνεται για μια δεδομένη ανεμογεννήτρια, πρέπει να διατηρείται σταθερή σε αυτή την τιμή. Ως εκ τούτου, η ταχύτητα του στροφείου θα πρέπει να μεταβάλλεται, σε ανταπόκριση προς την αλλαγή της ταχύτητας του ανέμου. Αυτό επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση μιας μονάδας ελέγχου ταχύτητας κατά τον σχεδιασμό του συστήματος, για να περιστρέφεται το στροφείο με υψηλή ταχύτητα, σε υψηλό άνεμο και με χαμηλή ταχύτητα σε συνθήκες χαμηλού ανέμου. Το σχήμα 4.2 επεξηγεί αυτήν την αρχή. Για δεδομένες ταχύτητες ανέμου  $V_1$ ,  $V_2$ , ή  $V_3$ , οι καμπύλες ισχύος του στροφείου έναντι της ταχύτητας της Α/Γ σχεδιάστηκαν με συμπαγή γραμμή. Για την εξαγωγή της μέγιστης δυνατής ενέργειας στη διάρκεια του έτους, η Α/Γ πρέπει να λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος για όλες τις ταχύτητες ανέμου. Στο σχήμα, αυτό συμβαίνει στα σημεία  $P_1$ ,  $P_2$ , και  $P_3$  για ταχύτητες ανέμου  $V_1$ ,  $V_2$ , και  $V_3$ , αντίστοιχα. Ο κοινός παράγοντας μεταξύ των σημείων παραγωγής μέγιστης ισχύος  $P_1$ ,  $P_2$ , και  $P_3$  είναι η σταθερά υψηλή τιμή του TSR περίπου στο 5.



Λειτουργώντας την μηχανή στο σταθερό TSR που αντιστοιχεί στο σημείο μέγιστης ισχύος, σημαίνει περιστροφή του στροφείου σε υψηλή ταχύτητα σε θυελλώδεις ανέμους. Οι φυγόκεντρες δυνάμεις που αναπτύσσονται στις πτέρυγες του στροφείου πάνω από μία ορισμένη τελική ταχύτητα, μπορεί να καταστρέψουν μηχανικά το στροφέιο. Επιπλέον, η ηλεκτρική μηχανή παραγωγής ρεύματος πάνω από την ονομαστική ισχύ της, μπορεί να υπερθερμανθεί και να καταστραφεί. Για τους λόγους αυτούς, η ταχύτητα της Α/Γ και η γεννήτρια παραγωγής ρεύματος πρέπει να ελέγχονται.



ΣΧΗΜΑ 4.1 Συντελεστής ισχύος έναντι της ταχύτητας ακροπτερύγιου TSR.



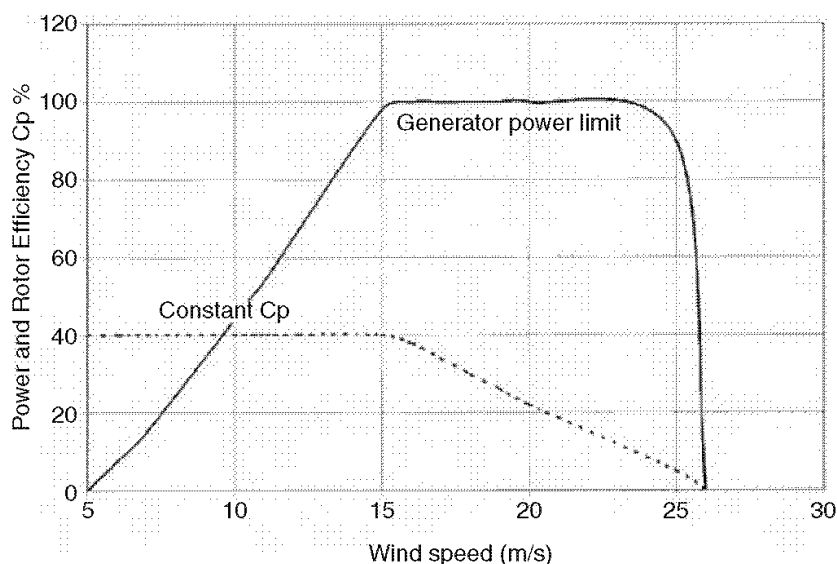
ΣΧΗΜΑ 4.2 Ισχύς Α/Γ έναντι ταχύτητας στροφείου για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου. Το σημείο μέγιστης ισχύος μετακινείται προς τα δεξιά σε υψηλότερες ταχύτητες ανέμου.

#### 4.1. ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ

Οι έλεγχοι ταχύτητας και ισχύος στα συστήματα αιολικής ενέργειας, έχουν τρεις διαφορετικές περιοχές όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3, όπου η καμπύλη με συμπαγή γραμμή είναι η ισχύς και η καμπύλη με διακεκομμένη, η απόδοση του στροφείου. Είναι δε οι ακόλουθες:

- Η βέλτιστη σταθερή περιοχή  $C_p$ , που παράγει γραμμικά αυξανόμενη ισχύ με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου
- Η περιορισμένης ισχύος περιοχή, που παράγει σταθερή ισχύ, ακόμη και σε υψηλότερους άνεμους, μειώνοντας την απόδοση του στροφείου  $C_p$
- Η περιοχή διακοπής λειτουργίας ισχύος, όπου η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επιβραδύνεται στο μηδέν, καθώς η ταχύτητα του ανέμου πλησιάζει το μέγιστο όριο διακοπής

Τυπικά, η Α/Γ αρχίζει να λειτουργεί (cut-in) όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβαίνει την ταχύτητα των 4 έως 5 m / sec, και παύει σε ταχύτητες άνω των 25 έως 30 m / sec. Στο μεταξύ, λειτουργεί σε μία από τις παραπάνω τρεις περιοχές. Σε μια τυπική εγκατάσταση, η ανεμογεννήτρια μπορεί να λειτουργεί περίπου στο 70 έως 80% του χρόνου. Άλλες φορές, παύει επειδή η ταχύτητα του ανέμου είναι ή πολύ χαμηλή ή πολύ υψηλή.



ΣΧΗΜΑ 4.3 Τρεις διακριτές περιοχές ελέγχου ταχύτητας στροφείου του συστήματος.

Η σταθερή περιοχή  $C_p$ , είναι η κανονική κατάσταση λειτουργίας, όπου ο ελεγκτής ταχύτητας λειτουργεί το σύστημα στην βέλτιστη σταθερή τιμή  $C_p$ , που αποθηκεύεται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή του συστήματος. Δύο εναλλακτικά

σχήματα για τον έλεγχο της ταχύτητας στην περιοχή αυτήν, έχουν περιγραφεί στην ενότητα 4.4.

Για να διατηρηθεί σταθερό το  $C_p$ , το σύστημα ελέγχου αυξάνει την ταχύτητα του στροφείου αποκρινόμενο στην αύξηση της ταχύτητας του ανέμου, μόνο μέχρι ενός ορισμένου ορίου. Όταν το όριο αυτό ξεπεραστεί, ο έλεγχος μετατοπίζεται εντός της περιοχής περιορισμού ταχύτητας. Ο συντελεστής ισχύος  $C_p$  δεν βρίσκεται πλέον στην βέλτιστη τιμή, καθώς και η απόδοση ισχύος του στροφείου υποφέρει.

Αν η ταχύτητα του ανέμου συνεχίζει να αυξάνεται, το σύστημα προσεγγίζει τον περιορισμό ρεύματος της ηλεκτρικής γεννήτριας. Όταν συμβεί αυτό, η ταχύτητα της Α/Γ μειώνεται, και ο συντελεστής ισχύος  $C_p$  κινείται πιο μακριά από τη βέλτιστη τιμή. Η ισχύς εξόδου της γεννήτριας, παραμένει σταθερή, στο όριο που έχει σχεδιαστεί. Όταν το όριο της ταχύτητας και της ισχύος, δεν μπορεί να διατηρηθεί κάτω από συνθήκες θυελλωδών ανέμων, η μηχανή διακόπτει την λειτουργία παραγωγής ισχύος.

Δύο παραδοσιακές μέθοδοι ελέγχου ταχύτητας, της Α/Γ και της ισχύος εξόδου της γεννήτριας, είναι οι εξής

1. *Έλεγχος βήματος πτέρυγας (Pitch Control)*: Η ταχύτητα της Α/Γ, ελέγχεται με έλεγχο του βήματος πτέρυγας με μηχανικά και υδραυλικά μέσα. Η ισχύς αυξομειώνεται πάνω και κάτω από την ονομαστική τιμή, καθώς ο μηχανισμός ελέγχου βήματος πτέρυγας, ρυθμίζει το βήμα με βάση την αλλαγή της ταχύτητας του ανέμου. Αυτό παίρνει κάποιο χρόνο, λόγω της μεγάλης αδράνειας του στροφείου. Το σχήμα 4.4, απεικονίζει την μεταβολή στην ταχύτητα του ανέμου, την γωνία κλίσης των πτερύγων (βήμα πτέρυγας), την ταχύτητα της γεννήτριας, και την ισχύ εξόδου, σε σχέση με τον χρόνο σε μεταβαλλόμενο άνεμο με βάση πραγματικές μετρήσεις σε μία ανεμογεννήτρια Vestas των 1,65 MW με OptiSlip® (καταχωρημένη εμπορική επωνυμία της Vestas Wind Systems). Η ισχύς εξόδου της γεννήτριας, διατηρείται σταθερή ακόμη και με μια διακύμανση 10% στην ταχύτητα της γεννήτριας. Αυτό ελαχιστοποιεί τις ανεπιθύμητες διακυμάνσεις στο δίκτυο. Η «ελαστικότητα» ενός τέτοιου συστήματος επίσης, μειώνει την καταπόνηση της Α/Γ και της εγκατάστασης.

2. *Έλεγχος απώλειας στήριξης (Stall control)*: Η Α/Γ χρησιμοποιεί την αεροδυναμική απώλεια στήριξης για τη ρύθμιση της ταχύτητας στροφείου σε ισχυρούς ανέμους. Η παραγωγή ισχύος, φθάνει σε ένα μέγιστο, κάπως υψηλότερο από την ονομαστική τιμή και στη συνέχεια μειώνεται μέχρι να επιτευχθεί η ταχύτητα ανέμου. Πέρα από αυτό το σημείο, η Α/Γ παρουσιάζει απώλεια στήριξης και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μειώνεται στο μηδέν (Σχήμα 4.5).

Και στις δύο μεθόδους ρύθμισης ταχύτητας, η ισχύς εξόδου των περισσότερων μηχανών στην πράξη, δεν είναι τόσο ομαλή. Θεωρητικές εκτιμήσεις, δίνουν μόνο προσεγγίσεις στις ισχύες που παράγονται σε κάθε δεδομένη στιγμή. Για παράδειγμα, η Α/Γ μπορεί να παράγει διαφορετικές ισχύες για την ίδια ταχύτητα, ανάλογα με το αν η ταχύτητα αυξάνεται ή μειώνεται.

## 4.2. ΟΔΗΓΗΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

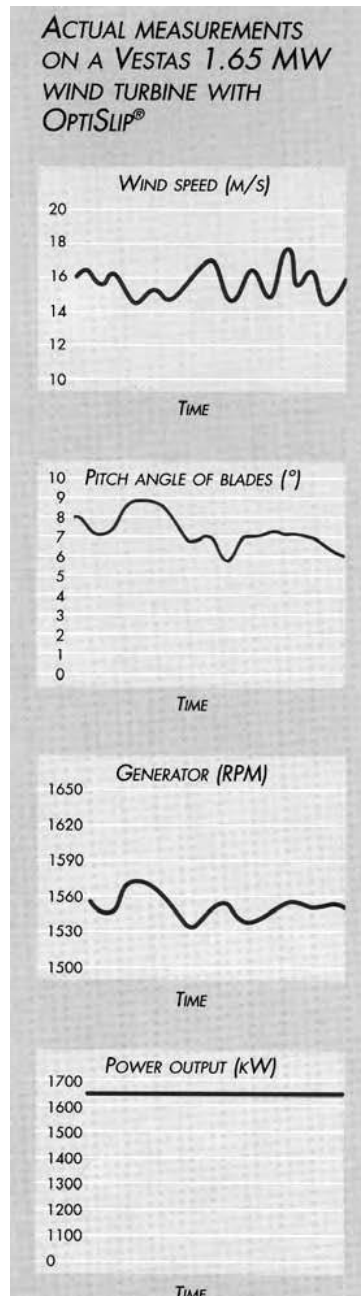
Η επιλογή την ταχύτητας λειτουργίας της γεννήτριας και ο έλεγχος της ανάλογα με τις μεταβολές ταχύτητας του ανέμου, πρέπει να καθορίζεται νωρίς κατά τον

σχεδιασμό του συστήματος. Αυτό είναι σημαντικό, καθώς καθορίζει όλα τα βασικά συστατικά και τις ονομαστικές τιμές τους. Η εναλλακτικές στρατηγικές οδήγησης της γεννήτριας και οι αντίστοιχες μέθοδοι ελέγχου ταχύτητας, ανήκουν στις ακόλουθες κατηγορίες.

#### **4.2.1. ΟΔΗΓΗΣΗ ΜΙΑΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ**

Η λειτουργία σταθερής ταχύτητας της γεννήτριας, προσφέρει ένα απλό σχεδιασμό του συστήματος. Ταιριάζει φυσικά καλά με την επαγωγική γεννήτρια, η οποία είναι εγγενώς μια μηχανή σταθερής ταχύτητας. Ωστόσο, η ταχύτητα της Α/Γ είναι γενικά χαμηλή, ενώ η ηλεκτρική γεννήτρια λειτουργεί πιο αποτελεσματικά με μεγάλη ταχύτητα. Το ταίριασμα της ταχύτητας μεταξύ αυτών των δύο, επιτυγχάνεται από τον μηχανισμό γραναζιών (κιβώτιο ταχυτήτων). Το κιβώτιο ταχυτήτων, μειώνει την ταχύτητα και αυξάνει την ροπή, βελτιώνοντας έτσι τον συντελεστή ισχύος  $C_p$  του στροφείου. Υπό διάφορες ταχύτητες του ανέμου, η αύξηση και μείωση της ηλεκτρομαγνητικά μετατραπέιας ροπής και ισχύος, συνοδεύεται από αντίστοιχη αύξηση ή μείωση στην ολίσθηση του στροφείου σε σχέση με τον στάτη. Η γεννήτρια, λειτουργεί γενικά σε μικρό ποσοστό ολίσθησης. Η υψηλότερη τιμή, ωφελεί το γρανάκι κίνησης, αλλά αυξάνει την ηλεκτρική απώλεια στο στροφείο, η οποία οδηγεί σε δυσκολία ψύξης.

Η ετήσια ενεργειακή απόδοση για μια σταθερής ταχύτητας ανεμογεννήτρια, πρέπει να αναλυθεί με δεδομένη την κατανομή ταχύτητας του ανέμου στην περιοχή ενδιαφέροντος. Επειδή η ταχύτητα κρατιέται σταθερή κάτω από αυτό το σχήμα, η Α/Γ που περιστρέφεται πάνω από την ονομαστική ταχύτητα, δεν είναι θέμα ανησυχίας κατά την σχεδίαση. Όμως, η ροπή στον άξονα της γεννήτριας, πρέπει να είναι υψηλότερη. Ως εκ τούτου, είναι δυνατόν η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, πάνω από την ονομαστική ισχύ της γεννήτριας. Όταν αυτό συμβαίνει, η γεννήτρια παύει με το άνοιγμα του «αυτόματου διακόπτη», αποβάλλοντας το φορτίο και ρίπτοντας την παραγωγή ισχύος του συστήματος στο μηδέν.



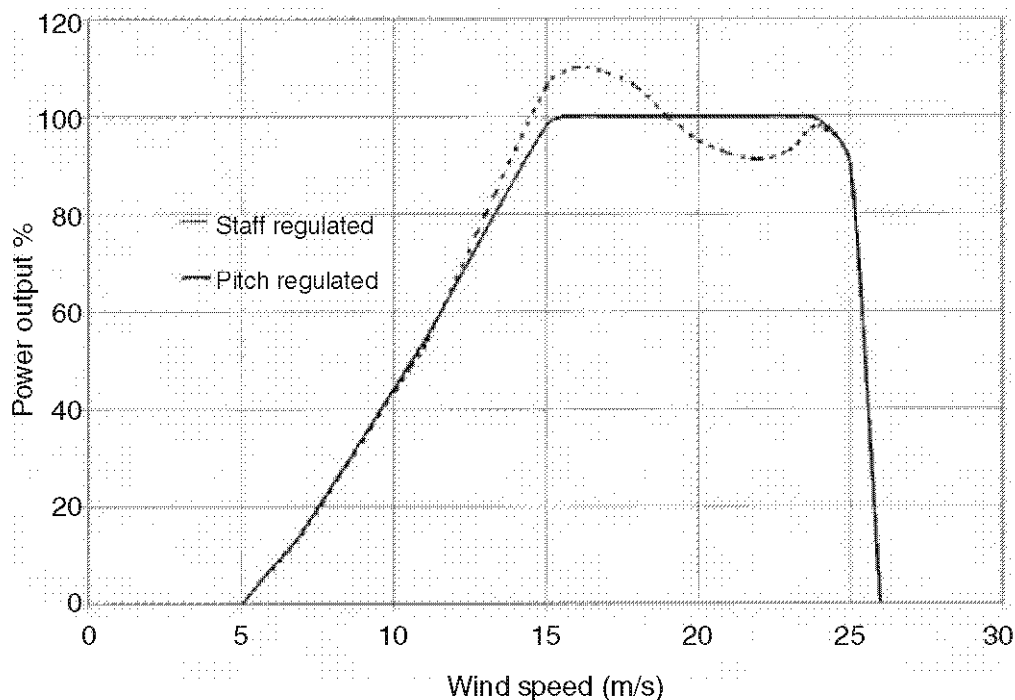
ΣΧΗΜΑ 4.4 Ταχύτητα ανέμου, βήμα έλικας, ταχύτητα γεννήτριας, και ισχύς εξόδου κάτω από μεταβαλλόμενη ταχύτητα ανέμου μιας Α/Γ 1650 kW.

Το κύριο μειονέκτημα λειτουργίας γεννήτριας μιας σταθερής ταχύτητας είναι ότι σχεδόν ποτέ δεν συλλέγει την αιολική ενέργεια με μέγιστη αποδοτικότητα από την άποψη του συντελεστή ισχύος  $C_p$ . Η αιολική ενέργεια σπαταλιέται, όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από μια ορισμένη τιμή που επιλέγεται ως η βέλτιστη.

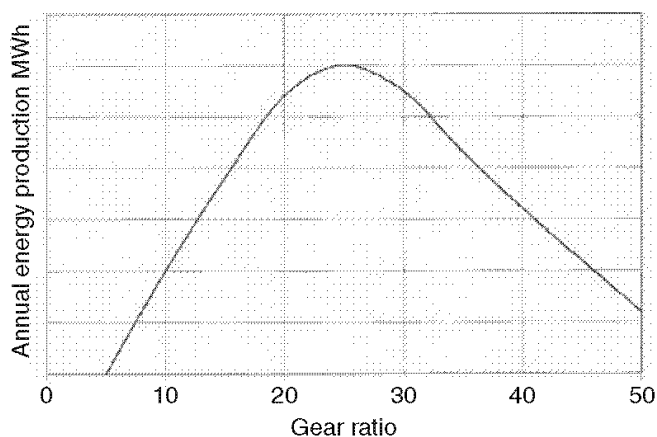
Με τη γεννήτρια να λειτουργεί με σταθερή ταχύτητα, η ετήσια παραγωγή ενέργειας, εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου και την σχέση μετάδοσης του κιβωτίου ταχυτήτων. Το σχήμα 4.6, απεικονίζει την ετήσια ενέργεια έναντι της σχέσης μετάδοσης του κιβωτίου ταχυτήτων, τυπικής ενός τέτοιου συστήματος. Είναι φανερό

ότι η ετήσια απόδοση ενέργειας, εξαρτάται από την επιλεγμένη σχέση μετάδοσης. Για τη δεδομένη κατανομή της ταχύτητας του ανέμου στο σχήμα, η παραγωγή ενέργειας για αυτήν την Α/Γ, θα είναι μέγιστη για σχέση μετάδοσης κιβωτίου ταχυτήτων (γριναζιών) 25. Κατά την επιλογή των σχέσεων του κιβωτίου, επομένως, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη η μέση ταχύτητα του ανέμου στο συγκεκριμένο χώρο. Η βέλτιστη σχέση μετάδοσης, για την λειτουργία της ανεμογεννήτριας, ποικίλλει από τόπο σε τόπο.

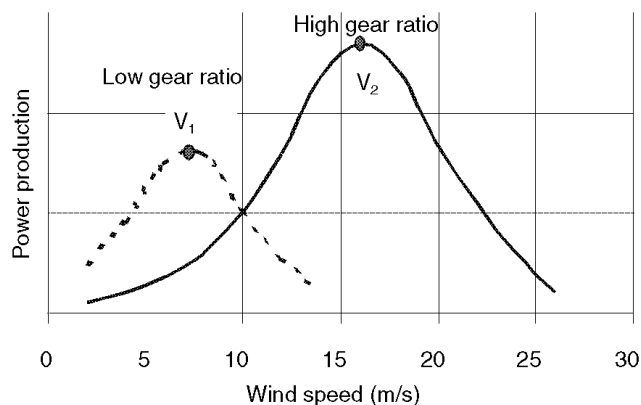
Λόγω της χαμηλής ενεργειακής παραγωγής στη διάρκεια του έτους, οι μονάδες σταθερής ταχύτητας γενικά περιορίζονται σε μικρές μηχανές.



ΣΧΗΜΑ 4.5 Μεταβολή ισχύος εξόδου γεννήτριας έναντι της ταχύτητα του ανέμου, με ρύθμιση του βήματος πτέρυγας και της απώλειας στήριξης.



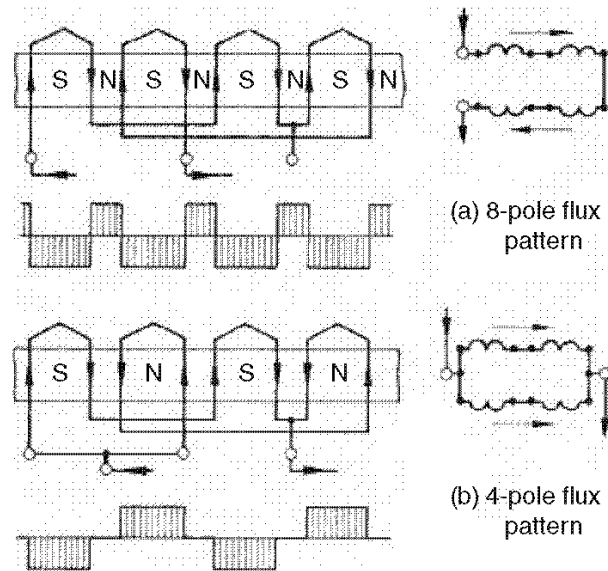
ΣΧΗΜΑ 4.6 Η ετήσια παραγωγή ισχύος μεταβάλλεται με την σχέση του κιβωτίου ταχυτήτων για δεδομένη ταχύτητα ανέμου σε μιας σταθερής ταχύτητας οδήγησης.



ΣΧΗΜΑ 4.7 Κατανομή παραγωγής ισχύος για διάφορες ταχύτητες με χαμηλή και υψηλή σχέση κιβώτιου ταχυτήτων.

#### 4.2.2. ΟΔΗΓΗΣΗ ΔΥΟ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ

Η μηχανή δύο ταχυτήτων, βελτιώνει την ενεργειακή συγκομιδή και μειώνει την ηλεκτρική απώλεια του στροφείου και του θορύβου των γραναζιών. Η ταχύτητα αλλάζει με την αλλαγή της σχέσης μετάδοσης του κιβωτίου ταχυτήτων. Οι δύο ταχύτητες λειτουργίας, επιλέγονται για την βελτιστοποίηση της ετήσιας παραγωγής ενέργειας, με την αναμενόμενη κατανομή της ταχύτητας του ανέμου στην περιοχή. Προφανώς, οι ταχύτητες ανέμου  $V_1$  και  $V_2$  που θα παρήγαγαν μέγιστες ισχείς (ισχείς κορυφής), με δύο σχέσεις μετάδοσης κιβωτίου ταχυτήτων, πρέπει να είναι σε αντίθετες πλευρές (θέσεις), δηλαδή δεξιά και αριστερά της αναμενόμενης μέσης ετήσιας ταχύτητας του ανέμου. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα του Σχήματος 4.7, το σύστημα λειτουργεί στην χαμηλή σχέση μετάδοσης του κιβωτίου ταχυτήτων, για ταχύτητες ανέμου κάτω από 10 m / sec, και στην υψηλή σχέση μετάδοσης για ταχύτητες ανέμου πάνω από 10 m / sec. Η σχέση μετάδοσης θα αλλάξει κατά την διάρκεια λειτουργίας στα 10 m / sec σε αυτό το παράδειγμα.



ΣΧΗΜΑ 4.8 Τύλιγμα του στάτη για αλλαγή πόλων για λόγο ταχυτήτων 2:1.

Σε ορισμένα παλαιότερα Αμερικάνικα σχέδια, δύο ταχύτητες, επιτεύχθηκαν με τη χρήση δύο ξεχωριστών γεννητριών και εναλλαγή μεταξύ αυτών των γεννητριών, με μάντα μετάδοσης κίνησης. Μια οικονομική και αποτελεσματική μέθοδος, είναι ο σχεδιασμός της γεννήτριας επαγωγής να λειτουργεί σε δύο ταχύτητες. Ο κινητήρας κλωβού, με δύο ξεχωριστά τυλίγματα στάτη, διαφορετικού αριθμού πόλων, μπορεί να περιστραφεί σε δύο ή περισσότερες σχετικές ταχύτητες. Ο κινητήρας αλλαγής πόλων, από την άλλη, έχει μόνο ένα τύλιγμα στάτη, η σύνδεση του οποίου μεταβάλλεται, για να δώσει έναν διαφορετικό αριθμό πόλων. Ξεχωριστές περιελίξεις που ταιριάζουν με τις απαιτήσεις του συστήματος πρέπει να προτιμώνται, όπου χρειάζεται να γίνεται αλλαγή ταχύτητας, χωρίς να χαθεί ο έλεγχος της μηχανής. Ξεχωριστές περιελίξεις, ωστόσο, είναι δύσκολο να συστεγαστούν.

Στη μέθοδο αλλαγής πόλων με ένα τύλιγμα, ο στάτης περιελίσσεται με σπείρες που μπορούν να συνδεθούν, είτε σε  $P$  ή σε  $2P$  αριθμό πόλων. Δεν απαιτούνται αλλαγές, ούτε είναι δυνατόν γίνουν, στο στροφείο κλωβού (βραχυκυκλωμένου στροφείου). Η συνδεσμολογία στον στάτη, που παράγει ένα μεγαλύτερο αριθμό πόλων για λειτουργία σε χαμηλή ταχύτητα, αλλάζει στο μισό αριθμό πόλων για λειτουργία σε υψηλή ταχύτητα. Αυτό διατηρεί το TSR κοντά στο βέλτιστο, για να παραγάγει έναν υψηλό συντελεστή ισχύος  $C_p$ . Το μηχάνημα, ωστόσο, λειτουργεί με έναν μόνο λόγο ταχύτητας 2:1.

Το σχήμα 4.8, δείχνει μία φάση της αλλαγής πόλων του τυλίγματος του στάτη. Για υψηλότερο αριθμό πόλων, οι σπείρες βρίσκονται σε σειρά. Για μικρότερο αριθμό, βρίσκονται σε σειρά και παράλληλα. Το προκύπτον πρότυπο μαγνητικής ροής, αντιστοιχεί σε εκείνο των οκτώ και των τεσσάρων πόλων, αντίστοιχα. Είναι σύνηθες, να χρησιμοποιείται ένα τύλιγμα δυο στρώσεων, με  $120^\circ$  ηλεκτρική διαφορά φάσης για υψηλότερο αριθμό πόλων. Μια σημαντική σχεδίαση που λαμβάνεται υπόψη σε μια τέτοια λύση, είναι να περιοριστούν οι αρμονικές, οι οποίες μπορεί να μειώσουν την απόδοση σε λειτουργία γεννήτριας και μπορεί επίσης να παράγει μια τάση ερπυσμού



(αργή και συνεχής παραμόρφωση συνεχούς επίδρασης κάποιας τάσης καταπόνησης) όταν χρησιμοποιείται το μηχάνημα σαν κινητήρας, κατά την διάρκεια εκκίνησης.

Το βήμα πηνίου του τυλίγματος του στάτη σταθεροποιείται άπαξ και τυλιχθεί, αλλά η ηλεκτρική φασική διαφορά, εξαρτάται από τον αριθμό των πόλων. Ένα βήμα πηνίου ένα όγδοο της περιφέρειας, παρέχει πηνία πλήρους βήματος για μία 8-πόλων σύνδεση, τα δύο τρίτα για μία σύνδεση 6-πόλων, και το ένα δεύτερο για μια σύνδεση 4-πόλων. Πάρα πολύ μικρό βήμα πηνίου πρέπει να αποφεύγεται. Για μία γεννήτρια με λόγο ταχυτήτων 2: 1, μια πιθανή έκταση (άνοιγμα, πλάτος) πηνίου (coil span) είναι ίσο με 1.33 βήμα πόλου, για τον μεγαλύτερο αριθμό πόλων και 0,67 για τον μικρότερο αριθμό πόλων. Σε κάθε περίπτωση, ο παράγοντας έκτασης του πηνίου θα είναι 0,86. Χρησιμοποιώντας ανοίγματα κοντά στο 1 και 0,5 με συντελεστές έκτασης των 1,0 και 0,71, μπορεί κανείς να αποφύγει την υπερβολική διαρροή επαγωγικής αντίστασης, στην λειτουργία χαμηλότερης ταχύτητας.

Η τεχνολογία δύο ταχυτήτων, χρησιμοποιώντας στροφέιο σταθερής γωνίας πτέρυγας, με σχεδιασμό χρήσης απώλειας στήριξης για θυελλώδεις ανέμους, εξακολουθεί να είναι διαθέσιμη σε μικρές μηχανές (<1 MW).

#### **4.2.3. ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΔΗΓΗΣΗ ΜΕ ΚΙΒΩΤΙΟ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ**

Η λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας, χρησιμοποιώντας μεταβλητό λόγο σχέσεων γραναζιών (κιβώτιο σχέσης ταχυτήτων) έχει εξετασθεί στο παρελθόν, αλλά έχει βρεθεί ότι προσθέτει περισσότερα προβλήματα, παρά οφέλη. Ως εκ τούτου, τέτοιου είδους μηχανισμοί οδήγησης δεν χρησιμοποιούνται γενικά επί του παρόντος.

#### **4.2.4. ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ**

Τα προηγμένα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου σε ορισμένες ανεμογεννήτριες, προσαρμόζουν συνεχώς το βήμα της γωνία κλίσης της πτέρυγας της ανεμογεννήτριας, για να επιτευχθεί η βέλτιστη ταχύτητα περιστροφής και ο μέγιστος «λόγος άντωσης προς οπισθέλκουσα» (lift to drag ratio), σε κάθε ταχύτητα ανέμου. Αυτή η λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας, μεγιστοποιεί την ικανότητα της Α/Γ να παραμένει στο υψηλότερο επίπεδο απόδοσης. Αν και τα σταθερής ταχύτητας στροφεία πρέπει να σχεδιάζονται ώστε να εκτρέπουν υψηλών ριπών φορτία ανέμου, η μεταβλητής ταχύτητας μέθοδος, κάνει τα φορτία των υψηλών ριπών ανέμου να απορροφούνται και να μετατρέπονται σε ηλεκτρική ενέργεια. Η ροπή της γεννήτριας ελέγχεται μέσω του μετατροπέα συχνότητας. Αυτή η στρατηγική ελέγχου, επιτρέπει στο στροφέιο της Α/Γ να επιταχύνει σε ισχυρούς ανέμους, μειώνοντας έτσι τα φορτία ροπής στο σύστημα οδήγησης κίνησης. Η περιοχή ταχυτήτων λειτουργίας της Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας, είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την περιοχή ταχυτήτων της μεθόδου "ολίσθησης" που χρησιμοποιείται από άλλες τεχνολογίες, η οποία παράγει θερμότητα αντί για ηλεκτρική ενέργεια κατά την ρύθμιση ισχύος σε ισχυρούς θυελλώδεις ανέμους. Το σύστημα μεταβλητής ταχύτητας, παρέχει επίσης ενεργό απόσβεση, ολόκληρου του συστήματος της ανεμογεννήτριας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σημαντικά λιγότερη ταλάντωση του

πύργου, συγκρινόμενη με των ανεμογεννητριών σταθερής ταχύτητας. Ενεργός απόσβεση της μηχανής, περιορίζει επίσης αιχμές ροπής, προσφέροντας μεγαλύτερη αξιοπιστία οδήγησης κίνησης, μειωμένο κόστος συντήρησης, και μεγαλύτερο χρόνο ζωής της Α/Γ.

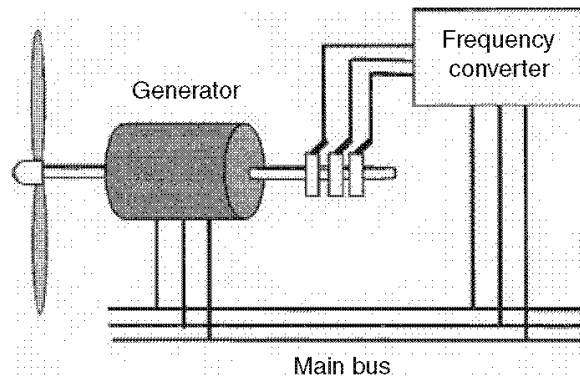
Η μοντέρνα μεταβλητής ταχύτητας οδήγηση, χρησιμοποιεί ηλεκτρονικά ισχύος για να μετατρέψει την μεταβλητή τάση και συχνότητα εξόδου της γεννήτριας, σε μία σταθερή τάση, σταθερής συχνότητας έξοδο. Η τεχνολογία, είναι παρόμοια με εκείνη που χρησιμοποιείται στο σύστημα ισχύος του αεροσκάφους. Η τάση για χρήση ενός τέτοιου συστήματος, οδηγείται από το φθινό κόστος των ημιαγωγών ισχύος. Συμβατικοί ελεγχόμενοι ανορθωτές πυριτίου (silicon-controlled rectifiers SCR) και εναλλάκτες μπορεί να χρησιμοποιηθούν, αλλά η μοντέρνα σχεδίαση στη βιομηχανία αιολικής ενέργειας, φαίνεται να προτιμά θυρίστορ, διαμορφούμενα από πλάτος παλμού (pulse-width-modulated thyristors). Ο λόγος ταχύτητας, δεν περιορίζεται στη θεωρία, αλλά πρακτικά περιορίζεται στο 3: 1, ο οποίος είναι μεγαλύτερος από εκείνον της μεθόδου αλλαγής πόλων, που περιγράφηκε προηγουμένως και εκείνον της μηχανής Scherbius, περιγράφεται στην ακόλουθη ενότητα.

Η απόδοση ενέργειας του συστήματος μεταβλητής ταχύτητας, είναι υψηλότερη. Ωστόσο, το πρόσθετο κόστος και η ηλεκτρική απώλεια στα ηλεκτρονικά ισχύος, αντισταθμίζει εν μέρει το όφελος. Το κόστος και το όφελος είναι γενικά θετικά σε μεγάλα συστήματα.

Εκτός από την υψηλότερη ετήσια παραγωγή ενέργειας, τα ηλεκτρονικά ισχύος του συστήματος μεταβλητής ταχύτητας, προσφέρουν ρυθμιζόμενη από μακριά και ελεγχόμενη ποιότητα ισχύος. Αυτό έχει δύο σημαντικά οφέλη που δεν είναι διαθέσιμα σε άλλα συστήματα:

- *Δυνατότητα τηλεχειρισμού:* Αυτό το καθιστά ελκυστικό για τις υπεράκτιες εγκαταστάσεις.
- *Δυνατότητα λεπτομερούς ρύθμισης για καλύτερη σύνδεση στο δίκτυο:* Αυτή το καθιστά καταλληλότερο για την κάλυψη απαιτήσεων ευπαθών δικτύων στις αναπτυσσόμενες χώρες, όπως την Κίνα και την Ινδία.

Το βασικό στα ηλεκτρονικά ισχύος μεταβλητής ταχύτητας σύστημα, εισάγει κάποια ζητήματα επιπέδου συστήματος που δεν υπάρχουν σε άλλα συστήματα. Παράγει αρμονικές υψηλής συχνότητας (Ηλεκτρικός θόρυβος) στο δίκτυο, το οποίο υποβαθμίζει την ποιότητα του ρεύματος. Εναλλακτικά, για την ίδια ποιότητα ισχύος, απαιτεί υψηλότερο βαθμό ηλεκτρικού φιλτραρίσματος για να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις ποιότητας του δικτύου.



ΣΧΗΜΑ 4.9 Οδήγηση μηχανής Scherbius μεταβλητής ταχύτητας με διπλά τροφοδοτούμενη επαγωγική γεννήτρια.

#### 4.2.5. ΟΔΗΓΗΣΗ ΜΗΧΑΝΗΣ SCHERBIUS ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ

Σε σύγκριση με το σύστημα μεταβλητής ταχύτητας με χρήση ηλεκτρονικών ισχύος, η μηχανή Scherbius προσφέρει μια εναλλακτική λύση χαμηλότερου κόστους, η οποία εξαλείφει επίσης το μειονέκτημα της ποιότητας ισχύος. Έχει χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές ανυψωτικών μηχανημάτων σε εργοστάσια και ορυχεία. Επεκτείνοντας την ανάλυση του ισοδύναμου κυκλώματος που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 5, η ταχύτητα της επαγωγικής μηχανής, μπορεί να αλλάξει με την αλλαγή της αντίστασης στροφείου ή με την εφαρμογή μιας εξωτερικής τάσης συχνότητας, που αντιστοιχεί στην επιθυμητή ολίσθηση στροφείου. Η γεννήτρια κλωβού (βραχυκυκλωμένου δρομέα), δεν επιτρέπει μια τέτοια ενέργεια. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιείται η μηχανή «στροφείου με τύλιγμα», με δακτυλίους ολίσθησης (Σχήμα 4.9). Το κύκλωμα του στροφείου συνδέεται με μια εξωτερική πηγή μεταβλητής συχνότητας μέσω των δακτυλίων ολίσθησης, και ο στάτης συνδέεται στο δίκτυο. Για το λόγο αυτό, η μηχανή Scherbius ονομάζεται επίσης, διπλά τροφοδοτούμενη επαγωγική μηχανή. Τροφοδοτείται τόσο από τον στάτη όσο και το στροφείο. Η ταχύτητα, ελέγχεται ρυθμίζοντας την συχνότητα της εξωτερικής πηγής ρεύματος του στροφείου. Η περιοχή ελέγχου της μεταβλητής ταχύτητας με χρήση των μηχανών Scherbius, γενικά περιορίζεται σε 2:1.

Αυτή η ιδέα χρησιμοποιήθηκε στις πρώτες Α/Γ. Η μειωμένη αξιοπιστία λόγω της φθοράς των ηλεκτρικών επαφών, στα δακτυλίδια ολίσθησης, ήταν ένα ζήτημα. Ωστόσο, ορισμένοι κατασκευαστές φαίνεται να έχουν επιλύσει αυτό το ζήτημα και το εφαρμόζουν σε συστήματα ανεμογεννητριών ισχύος MW. Η ανάγκη πηγής μεταβλητής συχνότητας για το στροφείο, προσθέτει στο κόστος και πολυπλοκότητα. Για μεγάλα συστήματα ωστόσο, το επιπλέον κόστος, είναι μικρότερο από το όφελος της μεγαλύτερης παραγωγής ενέργειας της λειτουργίας μεταβλητής ταχύτητας.

Στην διπλά τροφοδοτούμενη Scherbius μεταβλητής ταχύτητας οδήγηση, ένας ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος, τύπου «εύρους παλμού» (pulse width) ή ένα είδος κυκλομετατροπέα που συνδέεται με την ελεγχόμενη κύρια γραμμή τροφοδοσίας του δικτύου, μετατρέπει τη συχνότητα και την τάση, στις τιμές που απαιτούνται για να διατηρηθεί η επιθυμητή ταχύτητα του στροφείου. Ο έλεγχος γίνεται μέσω δύο

διαφορετικών κυκλωμάτων ελέγχου. Τον ελεγκτή συχνότητας του διαύλου σύνδεσης (τύπου bus), και τον ελεγκτή τροφοδότησης (έκχυσης) τάσης. Το κύκλωμα ελέγχου του κύριου ελεγκτής συχνότητας διαύλου, μετρά την συχνότητα του δικτύου (ή το rpm της γεννήτριας), και συγκρίνει αυτή τη συχνότητα με μια συγκεκριμένη τιμή αναφοράς (50 ή 60 Hz). Ένα σήμα στη συνέχεια, αποστέλλεται στον ελεγκτή τροφοδότησης τάσης, ανάλογα με το πόσο απέχει η συχνότητα από την τιμή αναφοράς.

Ο ελεγκτής τάσης τροφοδότησης λαμβάνει αυτό το σήμα και το συγκρίνει με την τιμή αναφοράς τάσης που αντιστοιχεί, στα 50 ή 60 Hz. Μια ακόλουθη ρύθμιση της τάσης τροφοδότησης (έκχυσης) από την δράση του μετατροπέα συχνότητας θα κάνει την τάση εξόδου τροφοδότησης και την συχνότητα εξόδου να ταιριάζει με την τιμή αναφοράς. Αυτή η ενέργεια κάνει η μεταβλητής ταχύτητας, μεταβλητής τάσης γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος να παραγάγει μία σταθερή τάση και συχνότητα εξόδου στους ακροδέκτες προς το ηλεκτρικό δίκτυο.

Οι Datta και Ranganathan συνέκριναν τα οφέλη ενός διπλά τροφοδοτούμενου στροφείου, επαγωγικής γεννήτρια με τα συστήματα σταθερής ταχύτητας και μεταβλητής ταχύτητας με τη χρήση κλωβού στροφείου. Η σύγκριση έγινε με βάση το υλικό που απαιτείται για την υλοποίηση, την περιοχή λειτουργίας και την έξοδο ενέργειας για μια πρακτική εφικτή κατανομή ταχύτητας ανέμου. Η σύγκριση δείχνει ότι η γεννήτρια με τύλιγμα στο στροφείο παρόμοιας ισχύος μπορεί να αυξήσει σημαντικά την συγκομιδή ενέργειας χάρη στην ικανότητά της να λειτουργεί με την ονομαστική ροπή ακόμα και σε υπερσύγχρονες ταχύτητες. Η ισχύς τότε παράγεται από το στροφείο, καθώς και το στάτη. Επιπλέον, με έλεγχο του στροφείου, η ονομαστική τάση των ηλεκτρονικών συσκευών ισχύος και η τράπεζα πυκνωτών φιλτραρίσματος του διαύλου DC μειώνεται. Το μέγεθος του πηνίου φιλτραρίσματος του επαγωγού από την μεριά της γραμμής σύνδεσης με το δίκτυο επίσης μειώνεται.

Ένας συνδυασμός του συστήματος μεταβλητής ταχύτητας με του ελέγχου βήματος πτέρυγας, γίνεται ολοένα και η πιο κυρίαρχη επιλογή, για μεγαλύτερες Α/Γ. Ο δύο ταχυτήτων ενεργής απώλειας στήριξης συνδυασμός και η κλασική έκδοση απώλειας στήριξης με σταθερές πτέρυγες, παραμένουν επίσης σε χρήση.

#### **4.2.6. ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΜΕΣΗ ΟΔΗΓΗΣΗ**

Μια γεννήτρια που λειτουργεί άμεσα με την ταχύτητα της Α/Γ, είναι εξαιρετικά ελκυστική. Είναι δυνατή ιδίως για μικρές μηχανές, όπου η ταχύτητα του στροφείου, είναι υψηλή. Η άμεση οδήγηση, καταργεί το κιβώτιο ταχυτήτων εντελώς και δεν χρειάζεται ηλεκτρονικά ισχύος. Αυτό συνεπάγεται πολλά οφέλη:

- Χαμηλότερο βάρος ατράκτου
- Μειωμένο θόρυβο και δονήσεις
- Λιγότερη απώλεια ισχύος, κατά κάμποσες ποσοστιαίες μονάδες
- Λιγότερο συχνές απαιτήσεις συντήρησης της ατράκτου

Το τελευταίο πλεονέκτημα, είναι ιδιαίτερα ελκυστικό για εγκαταστάσεις ανοικτής θάλασσας.

Σε μεγάλες ανεμογεννήτριες, η χαμηλή ταχύτητα του στροφείου, επιβάλλει σχεδιαστικό περιορισμό στην άμεση οδήγηση της γεννήτριας. Ωστόσο, έρευνες και εξελίξεις, δρομολογούνται για την επίλυση αυτών των ζητημάτων σχεδιασμού, όπως συζητήθηκε στο κεφάλαιο 5. Για παράδειγμα, η εταιρεία Vensys της Γερμανίας, εγκατέστησε μία πρωτότυπη μηχανή των 1,2 MW το 2003. Χρησιμοποιεί μια γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη, με ένα σύστημα οδήγησης με ιμάντα. Η εταιρεία MTorres της Ισπανίας και της Zephyros του Άμστερνταμ, επιδιώκουν την υλοποίηση άλλων τύπων συστημάτων άμεσης μετάδοσης.

Μία χαμηλής ταχύτητας, άμεσης μετάδοσης μηχανή χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων ή με ένα απλό κιβώτιο ταχυτήτων, είναι μια πολύ επιθυμητή σχεδίαση. Η Multibrid τεχνολογία που αναπτύχθηκε στη Γερμανία, περιγράφεται ως ένας συμπαγής μηχανισμός γεννήτριας, με κιβώτιο ταχυτήτων μιας βαθμίδας και μέσης ταχύτητας (150 rpm), μόνιμου μαγνήτη θαλάσσιου-τύπου. Ένα πρωτότυπο των 5-MW τεχνολογίας Multibrid, έχει αναπτυχθεί και δοκιμαστεί με επιτυχία.

### 4.3. ΕΠΙΛΟΓΗ ΟΔΗΓΗΣΗΣ

Το σύστημα σταθερής ταχύτητας επιτρέπει ένα απλό, εύρωστο, και χαμηλού κόστους σύστημα κίνησης. Το σύστημα μεταβλητής ταχύτητας, από την άλλη, έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- 20 έως 30% υψηλότερη ενεργειακή απόδοση
- Χαμηλή μηχανική καταπόνηση - μια ριπή ανέμου επιταχύνει τις πτέρυγες αντί της δημιουργίας μιας αιχμής ροπής
- Μικρότερη διακύμανση της ηλεκτρικής ενέργειας, διότι η αδράνεια του στροφείου λειτουργεί ως ρυθμιστής ενέργειας
- Μείωση θορύβου σε χαμηλότερη ταχύτητα του ανέμου

Οι αρμονικές ρεύματος ή / και τάσης που εισήγαγαν τα ηλεκτρονικά ισχύος στο μεταβλητής ταχύτητας σύστημα, μπορεί να είναι ενδιαφέρουσες.

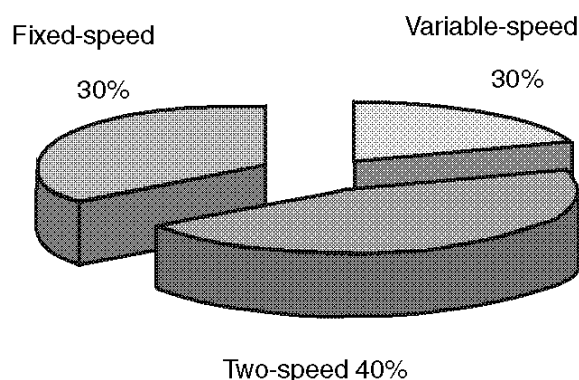
Η λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας, μπορεί να συλλέξει θεωρητικά περίπου το ένα τρίτο περισσότερη ενέργεια ετησίως, από το σύστημα σταθερής ταχύτητας. Η πραγματική βελτίωση που αναφέρθηκε από τους διαχειριστές συστημάτων μεταβλητής ταχύτητας, είναι χαμηλότερη, περίπου 20-30%. Ωστόσο, μια βελτίωση ακόμη και 15-20% στην ετήσια ενεργειακή απόδοση, μπορεί να κάνει το μεταβλητής ταχύτητας σύστημα, εμπορικά βιώσιμο σε μια περιοχή με χαμηλό άνεμο. Αυτό μπορεί να ανοίξει μία εντελώς νέα αγορά για τις εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας, και αυτό συμβαίνει σήμερα σε πολλές χώρες. Ως εκ τούτου, οι νεότερες εγκαταστάσεις, είναι πιο πιθανό να χρησιμοποιήσουν τα μεταβλητής ταχύτητας συστήματα.

Η κατά προσέγγιση κατανομή των συστήματος σήμερα είναι 30% μιας σταθερής ταχύτητας, 40% δύο σταθερών ταχυτήτων, και 30% ισχύος μεταβλητής ταχύτητας με ηλεκτρονικά συστήματα ισχύος (Σχήμα 4.10). Το μερίδιο αγοράς συστημάτων μεταβλητής ταχύτητας, ωστόσο, αυξάνεται κάθε έτος.

#### 4.4. ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΠΑΥΣΗΣ

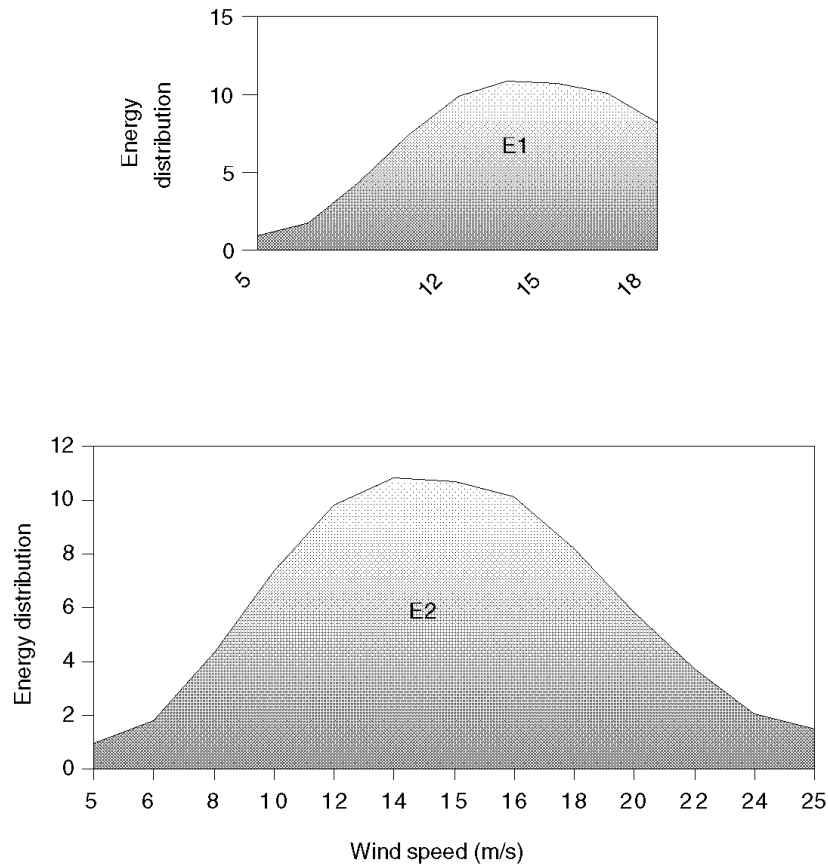
Σε κάθε περίπτωση, είναι σημαντικό η μηχανή να λειτουργεί κάτω από την μέγιστη ταχύτητα της και όρια ισχύος. Η υπέρβαση του ενός εκ των ορίων, μπορεί να έχει αποτέλεσμα την καταστροφή της μηχανής.

Κατά τον σχεδιασμό του συστήματος μεταβλητής ταχύτητας, πρέπει να ληφθεί μια σημαντική απόφαση για το μέγιστο όριο ταχύτητας λειτουργίας. Για την κατανομή ενέργειας που φαίνεται στο Σχήμα 4.11, αν η εγκατάσταση αιολικής έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί έως και 18 m / sec, μπορεί να συλλέξει ενέργεια E1, αθροιστικά ετησίως (περιοχή κάτω από την καμπύλη). Από την άλλη, αν το σύστημα έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί σε μια μεταβλητή ταχύτητα, έως και 25 m / sec, μπορεί να συλλέξει ενέργεια E2 για την ίδια περίοδο.



ΣΧΗΜΑ 4.10 Επιλογές σχεδίασης συστημάτων οδήγησης γεννητριών.

## Συστήματα Αιολικής και Ηλιακής Ενέργειας



ΣΧΗΜΑ 4.11 Κατανομή πιθανότητας παραγωγής ετήσιας ενέργειας σε δύο ταχύτητες διακοπής λειτουργίας.

Το τελευταίο ωστόσο, έρχεται με ένα επιπλέον κόστος σχεδιασμού της ανεμογεννήτριας και της Α/Γ, για να χειριστεί μια υψηλότερη ταχύτητα και μεγαλύτερη ισχύ. Το όφελος και το κόστος, θα πρέπει να διαπραγματευτεί για την συγκεκριμένη εγκατάσταση, ώστε να φτάσει στο βέλτιστο ανώτατο όριο στην ταχύτητα του δρομέα.

Στη μία πλευρά του συμβιβασμού, είναι η πρόσθετη ενέργεια ( $E2 - E1$ ) που μπορεί να συλλεχθεί κατά τη διάρκεια του έτους. Αν τα έσοδα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας αποτιμώνται σε  $p$  ευρώ / kWh, το προστιθέμενο κέρδος ανά έτος είναι  $p(E2 - E1)$  ευρώ. Η παρούσα αξία (Present Worth PW) αυτού του κέρδους, κατά την διάρκεια ζωής των  $n$  ετών, στο ετήσιο κόστος του κεφαλαίου  $i$  είναι :

$$PW = p (E2 - E1) [(1+i)^n - 1] / [i(1+i)^n] \quad (4.2)$$

Στο παρόν παράδειγμα, εάν το αρχικό κόστος κεφαλαίου είναι  $C1$  για το μεταβλητής ταχύτητας σύστημα, με ταχύτητα διακοπής λειτουργίας 25 m / sec, και  $C2$  για αυτό με 18 m / sec, τότε το σύστημα μεταβλητής ταχύτητας με 25 m / sec ταχύτητα διακοπής, θα είναι οικονομικά επωφελές, εάν ισχύει το ακόλουθο:

$$PW > (C2 - C1) \quad (4.3)$$

Τέτοιοι συμβιβασμοί, θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη και άλλα τυχαία, αλλά σημαντικά ζητήματα, όπως πιθανούς θορύβους σε υψηλότερες ταχύτητες διακοπής λειτουργίας.

*ΑΝΑΦΟΡΕΣ - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ*

1. Datta, R. and Ranganathan, V.T., Variable-Speed Wind Power Generation Using a Doubly Fed Wound Rotor Induction Machine: A Comparison with Alternative Schemes, IEEE Transactions on Energy Conversion, Paper No. PE-558EC, September 2002.
2. Zinger, D.S. and Muljadi, E., Annualized wind energy improvement using variable speed, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33–6, pp. 1444–47, 1996.
3. Gardner, P., Wind turbine generator and drive systems, Wind Directions, Magazine of the European Wind Energy Association, London, October 1996.



## ΚΕΦ. 5. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΙΣΧΥΣ

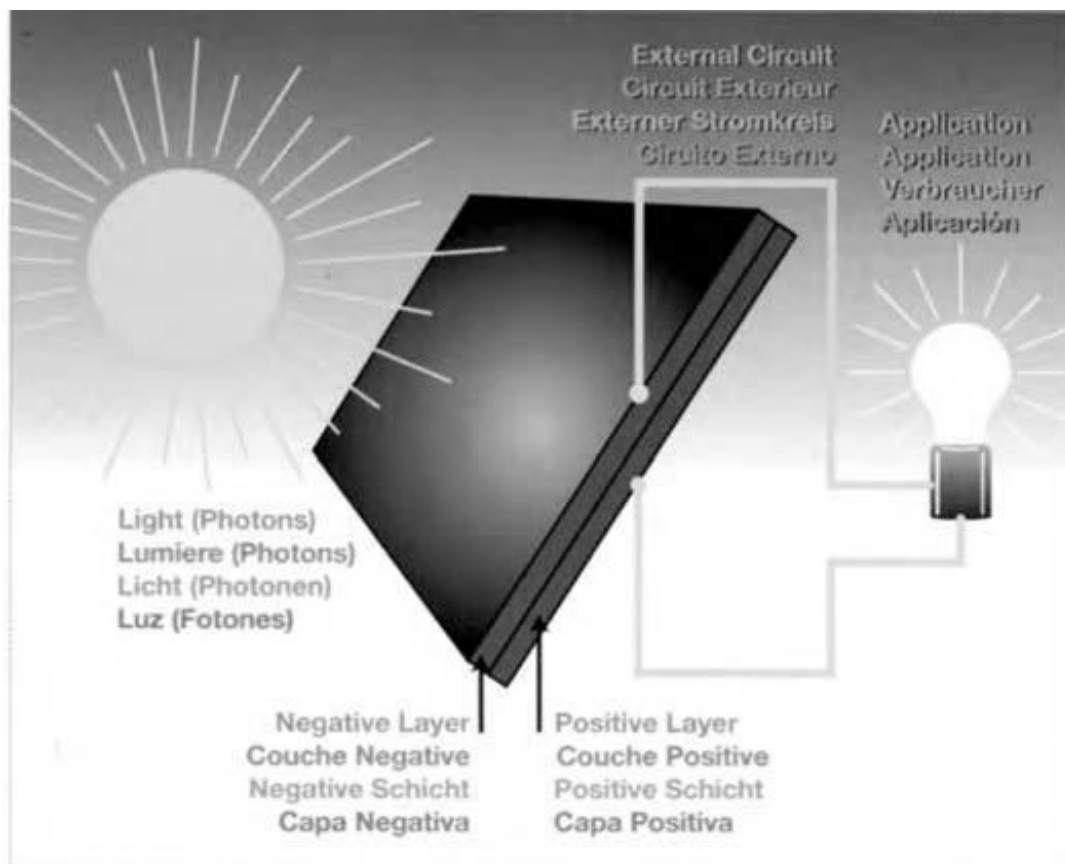
Η Φωτοβολταϊκή (PhotoVoltaic PV) τεχνολογία ισχύος, χρησιμοποιεί ημιαγωγά κύτταρα (στοιχεία), γενικά αρκετών τετραγωνικών εκατοστών σε μέγεθος. Από την άποψη της φυσικής των υλικών στερεάς κατάστασης, το βασικό κύτταρο (cell), είναι μια μεγάλης περιοχής επαφής δίοδος p - n με την επαφή τοποθετημένη κοντά στην επιφάνεια της κορυφής. Το κύτταρο μετατρέπει το ηλιακό φως σε DC τάση. Πολυάριθμα κύτταρα συγκεντρώνονται σε μια ενότητα (πλαίσιο, πίνακα, πάνελ), για την παραγωγή της απαιτούμενης ισχύος (Σχήμα 5.1). Σε αντίθεση με την αεροδυναμική της ανεμογεννήτριας, η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση είναι στατική, δεν χρειάζεται ισχυρούς ψηλούς πύργους, που να μην παράγουν κραδασμούς ή θόρυβο, και δεν χρειάζεται ενεργή ψύξη. Επειδή ένα μεγάλο μέρος της τρέχουσας ΦΒ τεχνολογίας, χρησιμοποιεί υλικό κρυσταλλικών ημιαγωγών, παρόμοιο με εκείνο των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, το κόστος παραγωγής είναι υψηλό. Ωστόσο, μεταξύ 1980 και 2004, το κόστος των ιδίων κεφαλαίων των φωτοβολταϊκών πλαισίων ανά Watt της ηλεκτρικής ισχύος, μειώθηκε από 20 δολάρια ανά watt σε λιγότερο από 4 δολάρια ανά watt (Σχήμα 5.2). Κατά την ίδια περίοδο, το κόστος ενέργειας μειώθηκε από σχεδόν 1 δολάριο σε περίπου 20 σεντς ανά kWh προς το παρόν (Σχήμα 5.3), και αναμένεται να μειωθεί σε λιγότερο από 15 σεντς ανά kWh. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς στις ΗΠΑ, αυξήθηκε από σχεδόν μηδέν το 1980 σε περίπου 200 MW το 1996, και ξεπέρασαν τα 1 GW το 2004 (Σχήμα 5.4α και 5.4β). Το 2010 η συνολική ισχύς στην ΗΠΑ αυξήθηκε στα 3 GW και το 2015-2016 στα 20 GW. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων παγκοσμίως, ήταν περίπου 300 MW το 1996, η οποία ανήλθε σε 800 MW μέχρι το 2000 και 1,3 GW περί τα τέλη του 2002 (Σχήμα 5.4α). Το 2010 αυξήθηκε στα 50 GW (Σχήμα 5.4β) και το 2015-2016 στα 305 GW. Ο ετήσιος ρυθμός αύξησης της εγκατάστασης φωτοβολταϊκών, αυξήθηκε από 20% το 1994 σε 40% το 2000 σε 40% με 50% το 2010 και σε 60% με 75% το 2016.

Ο Ευρωπαϊκός Σύνδεσμος Βιομηχανιών φωτοβολταϊκών, αναφέρει ότι η συνολική παγκόσμια παραγωγή φωτοβολταϊκών κυττάρων σε όλο τον κόσμο το 2002, ήταν πάνω από 560 MW και αυξάνεται σε περίπου 30% ετησίως, τα τελευταία χρόνια. Το σχήμα 5.5, απεικονίζει την ετήσια παραγωγή των φωτοβολταϊκών πλαισίων το 2002. Από το σύνολο των 562 MW σε όλο τον κόσμο, η Ιαπωνία άνοιξε το δρόμο με 251 MW, ακολουθούμενη με 135 MW από την Ευρώπη, 121 MW από ΗΠΑ, και 55 MW από τον υπόλοιπο κόσμο.

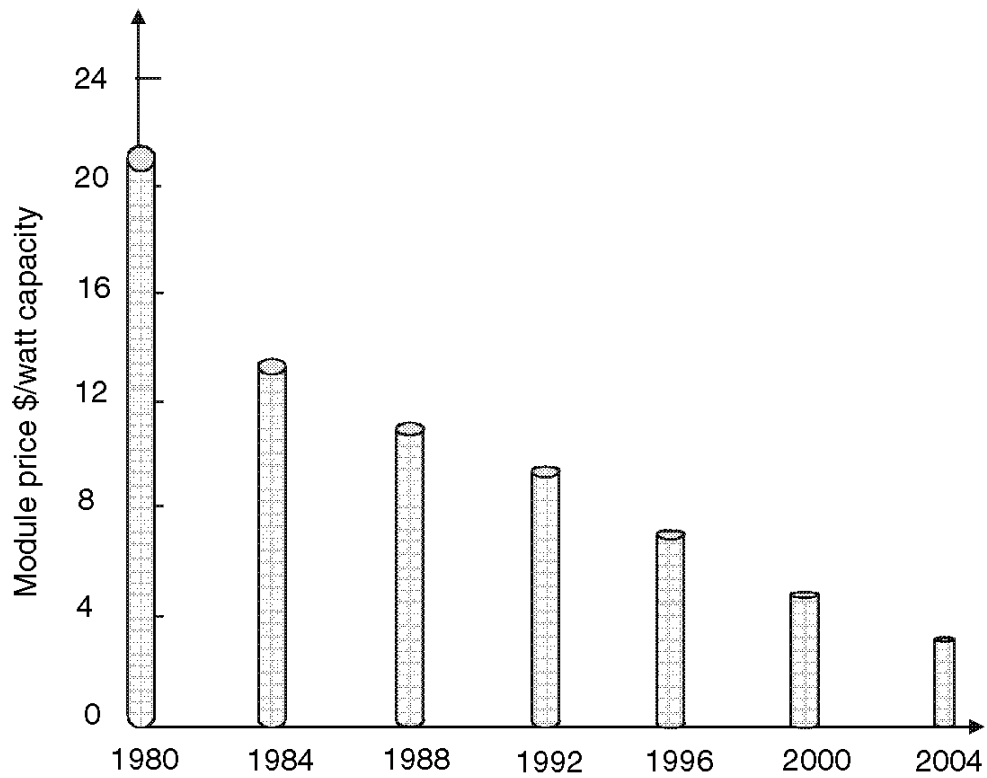
Η ισχυρή ανάπτυξη στα φωτοβολταϊκά συνεχίζεται, με τα διασυνδεδεμένα δίκτυα να επικρατούν. Οι εκτιμήσεις της IEA (International Energy Agency) είναι, ότι μέχρι το τέλος του 2000 περίπου τα δύο τρίτα θα είναι εγκαταστάσεις εκτός δικτύου και το ένα τρίτο, διασυνδεδεμένα στο δίκτυο. Από το 2000, η τιμή των φωτοβολταϊκών συστημάτων, έχει μειωθεί κατά περισσότερο από 20%. Αρκετές πλήρως αυτοματοποιημένες νέες εγκαταστάσεις παραγωγής φωτοβολταϊκών πλαισίων έχουν αρχίσει, και οι εργοστασιακές τιμές των απλών κρυστάλλων και πολυκρυσταλλικών ημιαγωγών πυριτίου, που κατασκευάζουν πάνω από το 80% της παγκόσμιας αγοράς φωτοβολταϊκών πλαισίων, έπεσε κάτω από 3,50 δολάρια ανά watt το 2004 στα 2,4 δολάρια στα τέλη του 2014 και στο 1 δολάριο το 2017. Σε παγκόσμιο επίπεδο, τα

φωτοβολταϊκά (ΦΒ) είναι επιχείρηση, της τάξης των 7 δισεκατομμυρίων δολαρίων ετησίως, κυρίως στην Γερμανία.

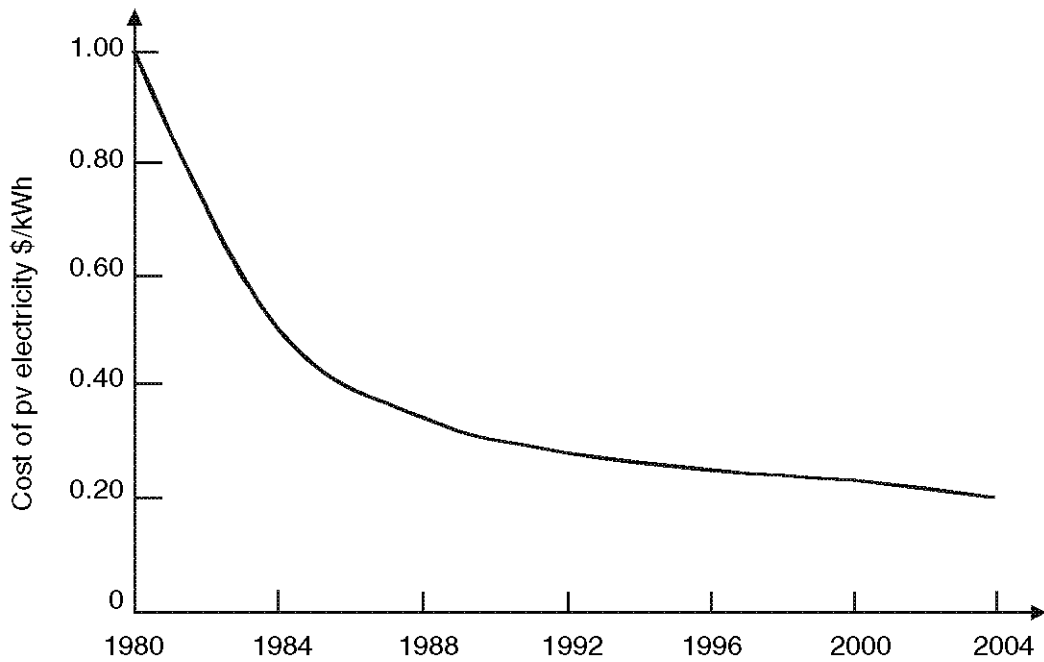
Το σημερινό κόστος φωτοβολταϊκής ενέργειας, εξακολουθεί να είναι υψηλότερο των τιμών που πληρώνουν οι πελάτες, στις κοινής ωφέλειας επιχειρήσεις, στις περισσότερες χώρες. Για το λόγο αυτό, οι ΦΒ εφαρμογές, περιορίζονται σε απομακρυσμένες εγκαταστάσεις που δεν συνδέονται με δίκτυα κοινής ωφελείας. Με τις φθίνουσες τιμές, η αγορά νέων φωτοβολταϊκών πλαισίων αυξάνεται κατά 25 έως 30% ετησίως τα τελευταία 5 χρόνια. Στην ΗΠΑ., στο Ηνωμένο Βασίλειο, στην Γερμανία, στην Ιαπωνία, στην Κίνα, στην Ινδία και άλλες χώρες, έχουν συσταθεί νέα προγράμματα ή έχουν επεκταθεί ήδη υπάρχοντα. Έχει υπολογιστεί ότι δυνητικά η αγορά φωτοβολταϊκών, με τα νέα προγράμματα που έρχονται, θα μπορούσε να είναι τόσο μεγάλη, όσο 1,6 GW μέχρι το 2010 και όσο 250 GW το 2016. Αυτή είναι μια σημαντική πρόβλεψη για την ανάπτυξη, σε μεγάλο βαθμό χαρακτηριστική της κατασκευής των νέων εγκαταστάσεων, που έγιναν στα τέλη της δεκαετίας του 1990 και στις αρχές της δεκαετίας του 2000, για την κατασκευή χαμηλού κόστους φωτοβολταϊκών κυττάρων και πλαισίων (modules), για να ανταποκριθούν στην αυξανόμενη ζήτηση.



ΣΧΗΜΑ 5.1 ΦΒ πάνελ στο ηλιακό φως παράγει DC ρεύμα.

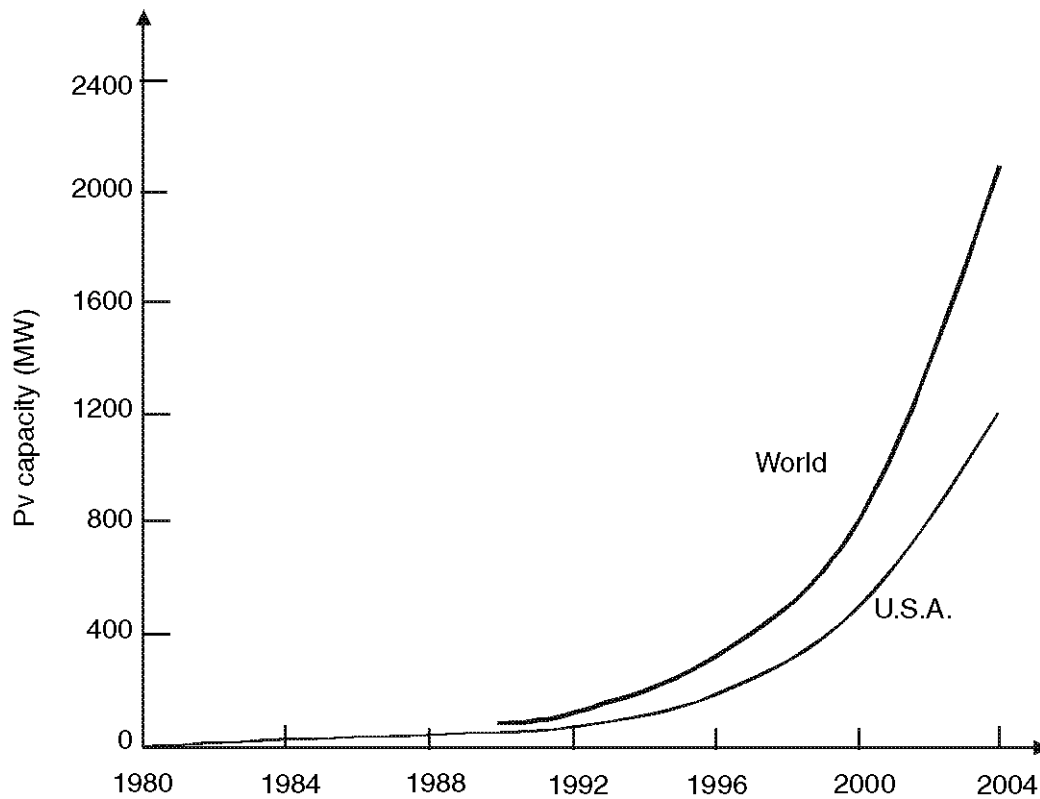


ΣΧΗΜΑ 5.2 Τάση των τιμών των ΦΒ πλαισίων

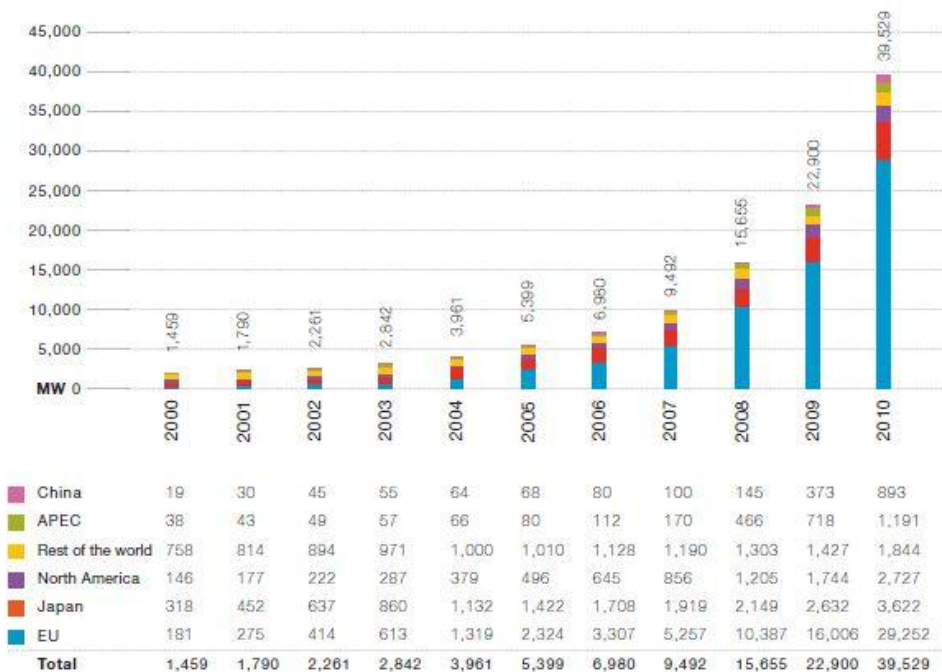


ΣΧΗΜΑ 5.3 Τάση της τιμής της ΦΒ ενέργειας

## Συστήματα Αιολικής και Ηλιακής Ενέργειας

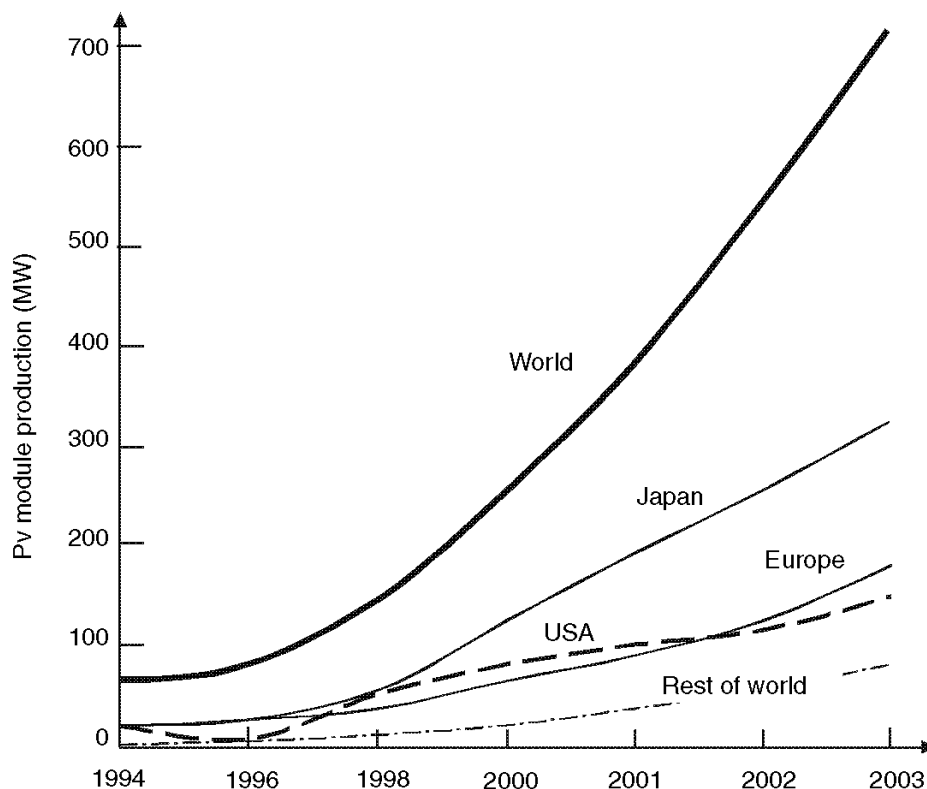


ΣΧΗΜΑ 5.4α Συνολική ισχύς εγκαταστάσεων ΦΒ στον κόσμο και στις Η.Π.Α.



ΣΧΗΜΑ 5.4β Συνολική εγκατασταθείσα ισχύς φωτοβολταϊκών από το 2000 έως το 2010 ανά περιοχή.

## Συστήματα Αιολικής και Ηλιακής Ενέργειας



ΣΧΗΜΑ 5.5 Ετήσια παραγωγή ΦΒ κυττάρων και πλαισίων.

Πίνακας 5.1 Ισχύς παραγωγής διαφόρων τεχνολογιών φωτοβολταϊκών

Φωτοβολταϊκή τεχνολογία	Ισχύς σε GW	Ποσοστό %
Κρυσταλλικό πυρίτιο	88,45	29
Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο	167,75	55
Άμορφο πυρίτιο	18,30	6
Λεπτού υμενίου	9,15	3
Άλλα	21,35	7
Σύνολο	305,00	100

Η ετήσια παραγωγή διαφόρων τεχνολογιών φωτοβολταϊκών κυττάρων το 2016, παρουσιάζεται στον πίνακα 5.1. Περίπου το 90%, αφορά την παραγωγή ΦΒ τεχνολογίας κρυσταλλικού πυριτίου και άμορφου πυριτίου, με το 10% όλων των άλλων τύπων, να βρίσκεται ακόμα στο στάδιο της ανάπτυξης. Οι μεγάλοι παραγωγοί φωτοβολταϊκών κυττάρων στον κόσμο που παρατίθενται στον Πίνακα 5.2α για το 2002 όπως Sharp, η BP Solar, Kyocera, και η Shell Solar, όπως και των νεότερων στον Πίνακα 5.2β του 2017 Trina Solar, JA Solar, Hanwha Q Cells, JinkoSolar, Motech Solar παράγουν περισσότερο από το 50% της παγκόσμιας αγοράς.

## Συστήματα Αιολικής και Ηλιακής Ενέργειας

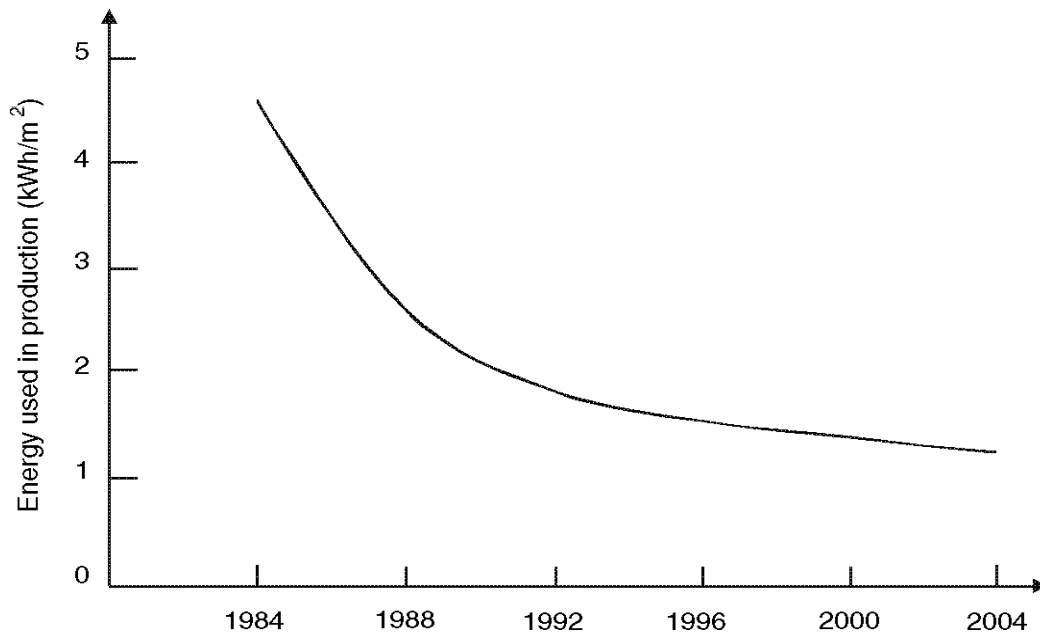
Πίνακας 5.2α:

Οι μεγαλύτεροι κατασκευαστές ΦΒ στον κόσμο το 2002

Κατασκευαστής	Ισχύς σε MW	Ποσοστό σε %
Sharp	123	21,9
BP Polar	74	13,2
Kyocera	60	10,7
Shell Solar	58	10,3
Sanyo	35	6,2
GE (Astro Power)	30	5,3
Άλλοι	182	32,4
Σύνολο	562	100

Πίνακας 5.2β: Οι μεγαλύτεροι κατασκευαστές ΦΒ στον κόσμο το 2017

Σειρά Ταξινόμησης 2017	Εταιρεία	Αλλαγή από το 2016	Χώρα
1	Trina Solar	<i>(none)</i>	Κίνα
2	JA Solar	<i>(none)</i>	Κίνα
3	Hanwha Q Cells	<i>(none)</i>	N. Κορέα
4	JinkoSolar	+2	Κίνα
5	Motech Solar	+3	Taiwan
6	First Solar	-1	ΗΠΑ
7	Longi Lerrri	<i>new to ranking</i>	Κίνα
8	Canadian Solar	-4	Καναδάς
9	Yingli Solar	-2	Κίνα
10	Suntech	<i>(none)</i>	Κίνα



ΣΧΗΜΑ 5.6 Κατανάλωση ενέργειας ανά τετραγωνικό εκατοστό κυττάρου ΦΒ που κατασκευάζεται.

Στην διαδικασία κατασκευής φωτοβολταϊκών κυττάρων, χρειάζεται να καταναλωθεί ενέργεια. Κάθε τετραγωνικό εκατοστό επιφάνειας κυττάρου, καταναλώνει περισσότερο από μια kWh (κιλοβατώρα), πριν στραφεί στον ήλιο για να παραγάγει την πρώτη του kWh (κιλοβατώρα) ενέργειας. Ωστόσο, η κατανάλωση ενέργειας, κατά την διάρκεια κατασκευής μειώνεται σταθερά με την εφαρμογή νέων παραγωγικών διαδικασιών (Σχήμα 5.6).

Σημαντικά πλεονεκτήματα της φωτοβολταϊκής ενέργειας είναι:

- Μικροί χρόνοι για την αρχική σχεδίαση, την εγκατάσταση, και ξεκίνημα νέας μονάδας
- Πολύ αρθρωτή (modular), ως εκ τούτου, η οικονομία της εγκατάστασης δεν εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος της
- Η ισχύς εξόδου προσαρμόζεται πολύ καλά με τις απαιτήσεις μέγιστου φορτίου
- Στατική δομή, χωρίς κινούμενα μέρη, ως εκ τούτου, κανένας θόρυβος
- Δυνατότητα υψηλής ισχύος ανά μονάδα βάρους
- Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής με ελάχιστη συντήρηση λόγω μη κινούμενων μερών
- Εξαιρετικά κινητά και φορητά λόγω μικρού βάρους

Προς το παρόν, η φωτοβολταϊκή ενέργεια, χρησιμοποιείται ευρέως σε αυτόνομα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, σε απομακρυσμένες περιοχές σε ολόκληρο τον κόσμο, ιδιαίτερα σε υβριδικά συστήματα με γεννήτριες ντίζελ. Αναμένεται ότι η εφαρμογή, θα συνεχίσει να βρίσκει επεκτεινόμενες αγορές, σε πολλές χώρες στον κόσμο. Η κινητήρια δύναμη, είναι η ανάγκη ενέργειας στις αναπτυσσόμενες χώρες και οι περιβαλλοντικές ανησυχίες, στις ανεπτυγμένες χώρες.

## 5.1. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΕΡΓΑ

Οι ηλεκτρικές επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας στις ΗΠΑ, έχουν ξεκινήσει προγράμματα για την ανάπτυξη σταθμών παραγωγής ενέργειας, με τη χρήση των νέων διαθέσιμων με χαμηλό κόστος φωτοβολταϊκών πλαισίων. Η Ηλεκτρική επιχείρηση του Αϊντάχο, έχει ένα πρόγραμμα, για την τροφοδοσία επιλεγμένων πελατών που δεν έχουν ακόμη συνδεθεί με το δίκτυο. Άλλες επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας, όπως η Southern California Edison, η δημοτική επιχείρηση του Austin, Delmarva Power and Light, και η New York Power Authority εγκαθιστούν φωτοβολταϊκά συστήματα, για την κάλυψη των απαιτήσεων σε ώρες αιχμής. Η εγκατάσταση των 500 kW στο Κέρμαν της Καλιφόρνιας της κοινωφελούς επιχείρησης Gas and Electric's, έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί κατά την διάρκεια ωρών αιχμής, παράγοντας 1,1 MWh ενέργειας ετησίως.

Οι πολεοδόμοι, αναγνωρίζουν την θετική συνολική οικονομία που προσφέρει η φωτοβολταϊκή ενέργεια για αστικές εφαρμογές. Δεκάδες χιλιάδες ιδιωτικά, ομοσπονδιακά, πολιτειακά και εμπορικά φωτοβολταϊκά συστήματα, έχουν εγκατασταθεί τα τελευταία 25 χρόνια. Περισσότερες από 65 πόλεις σε 25 πολιτείες, έχουν εγκαταστήσει τέτοια συστήματα, για μια ποικιλία χρήσιμων υπηρεσιών. Αυτές οι πόλεις, που φαίνονται στο Σχήμα 5.7, βρίσκονται σε όλες τις περιοχές της χώρας, διαλύοντας τον μύθο ότι τα ΦΒ συστήματα, χρειάζονται κλιματική ζώνη με ήλιο για να λειτουργήσουν αποδοτικά. Οι επιδοτήσεις στην Καλιφόρνια, Νέα Υόρκη, Αριζόνα, και Βόρεια Καρολίνα, έχουν επιταχύνει την αύξηση της ισχύος των φωτοβολταϊκών σε 25 έως 30% ετησίως, κατά την διάρκεια του 2000 έως 2004. Το δανειακό πρόγραμμα της Καλιφόρνιας για φωτοβολταϊκά, είχε σαν αποτέλεσμα την πρόσθεση επιπλέον 8 MW ισχύος το 2002, με κόστος 3,50 δολάρια ανά watt στους πελάτες. Η Αριζόνα πρόσθεσε 3 MW φωτοβολταϊκής ισχύος το 2002.

Μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση 5 MW στην έρημο Mojave, αποτελείται από 20 πάνελ των 250 kW σε χώρο 40 στρεμμάτων γύρω από το Barstow. Η εταιρεία Southern California Edison, έχει κάνει σύμβαση για την αγορά, όλης της παραγωγής ενέργειας των 11 εκατομμυρίων kWh ετησίως. Η ισχύς του σταθμού, ήταν η μεγαλύτερη στον κόσμο το 2004. Ένα σύστημα φωτοβολταϊκών 1.2 MW, χτίστηκε στη στέγη της φυλακής Santa Rita στο Δουβλίνο.

Η οροφή του Aquatic Center στην Ατλάντα (Σχήμα 5.8), τον τόπο διεξαγωγής των Ολυμπιακών αγώνων κολύμβησης του 1996, ήταν ένας από τους μεγαλύτερους διασυνδεδεμένους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, όταν χτίστηκε. Παράγει 345 kW ηλεκτρικής ενέργειας, και είναι συνδεδεμένη με το ηλεκτρικό δίκτυο της Γεωργίας. Η ισχύς της είναι αρκετή για να τροφοδοτήσει 70 σπίτια που συνδέονται με το δίκτυο. Εξοικονομεί 330 τόνους CO<sub>2</sub> (διοξειδίου του άνθρακος), 8,3 τόνους SO<sub>2</sub> (διοξειδίου του θείου), και 1,2 τόνους NO<sub>x</sub> (αζωτοξειδίων) ετησίως. Ένα όμοιο συνδεδεμένο στο δίκτυο σύστημα των 500 kW, εγκαταστάθηκε, για να τροφοδοτήσει τους Ολυμπιακούς Αγώνες του 2000 στο Σίδνεϊ της Αυστραλίας.

Η Εταιρεία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του Long Island, προσφέρει 4 δολάρια ανά watt, για μέχρι 10 kW εγκατάσταση ισχύος στους εμπορικούς και οικιακούς πελάτες της, στο πλαίσιο του Προγράμματος Solar Pioneer που ξεκίνησε στις

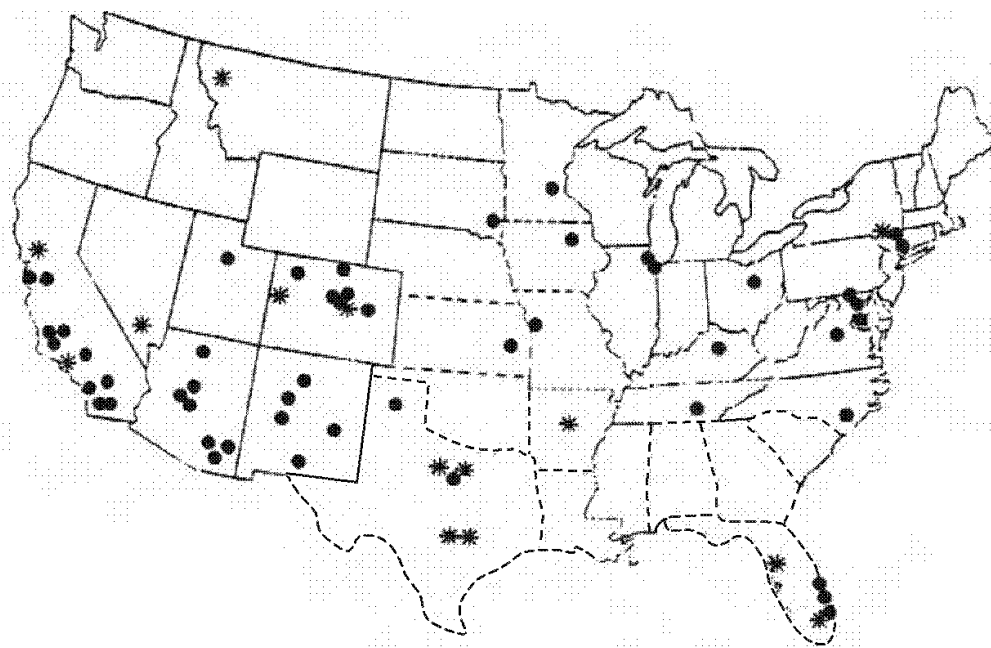


αρχές του 2002. Βάσει του προγράμματος αυτού, 30 οικογένειες επιλέχθηκαν, για δωρεάν εγκατάσταση συστήματος 300 W.

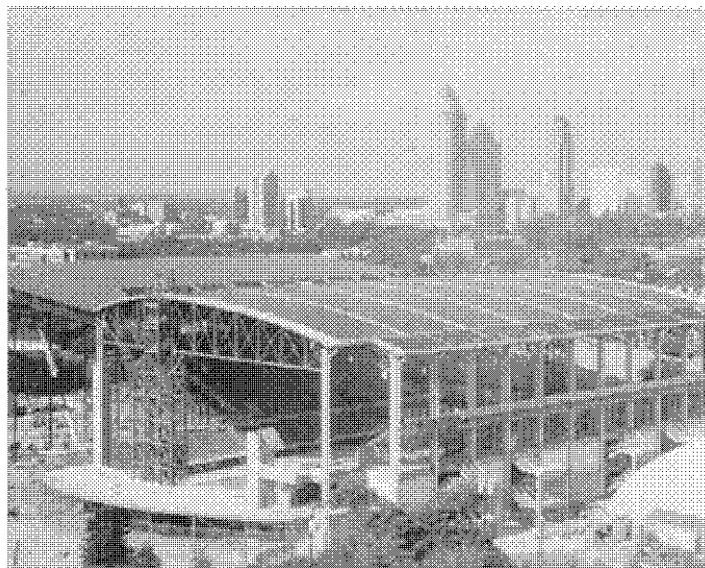
Το πρόγραμμα Solar Power Program των 100.000 οροφών της Γερμανίας, προσέφερε ένα εγγυημένο τιμολόγιο 0,50 Ευρώ / kWh ηλεκτρικής παροχής και μια ελκυστική χρηματοδότηση, για να ενθαρρύνει την εγκατάσταση μιας 100 MW φωτοβολταϊκής μονάδας ισχύος, που ξεκίνησε τον Ιανουάριο του 2000. Ξεπέρασε τον στόχο, με την προσθήκη 325 MW ισχύος τον Ιούλιο του 2003.

Η εταιρεία Shell Solar GmbH και Gesellschaft, ανακοίνωσε το 2004, σχέδια να κατασκευάσει το μεγαλύτερο ηλιακό πάρκο φωτοβολταϊκών (ΦΒ) 5 MW ισχύος, νότια της Λειψίας στη Γερμανία. Η ισχύς του, θα τροφοδοτείται απευθείας στο δίκτυο. Θα αποτελείται από 33.500 πλαίσια κατασκευασμένα από την νέα σειρά της Shell SQ με τα κύτταρα των φωτοβολταϊκών και τους μετατροπείς, τον μετασχηματιστή, και τον πίνακα μεταγωγής να παρέχονται από την Siemens.

Η Ινδία, χρησιμοποιεί ίσως τον μεγαλύτερο αριθμό φωτοβολταϊκών συστημάτων στον κόσμο για απομακρυσμένα χωριά. Την ενέργεια στερείται ο πληθυσμός που ζει κυρίως στην αγροτική Ινδία, όπου η επέκταση του εθνικού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαγορευτικά ακριβή. Τα φωτοβολταϊκά είναι μια ισχυρή λύση σε αυτές τις περιοχές. Μελέτες από το Ερευνητικό Ινστιτούτο Άγονων Ζωνών, Jodhpur, δείχνουν ότι στην επιφάνεια της γης στην Ινδία, φτάνει σημαντική ηλιακή ενέργεια.



ΣΧΗΜΑ 5.7 Πόλεις στην ΗΠΑ με εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών.



ΣΧΗΜΑ 5.8 Οροφή του κτίσματος στην Ατλάντα με 345 kW φωτοβολταϊκής ισχύος διασυνδεδεμένα στο δίκτυο.

Περίπου το 30% της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ινδία, χρησιμοποιείται για γεωργικές ανάγκες. Επειδή η διαθεσιμότητα της ηλιακής ενέργειας για τις γεωργικές ανάγκες δεν είναι κρίσιμη χρονικά (εντός λίγων ημερών), η Ινδία αναμένεται να οδηγήσει τον κόσμο σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις στο εγγύς μέλλον.

Η πολιτεία του Rajasthan, έχει ξεκινήσει μια πολιτική για την αγορά φωτοβολταϊκής ηλεκτρικής ενέργειας, σε ένα ελκυστικό ποσοστό ισοδύναμο με 0,08 δολάρια ανά kWh. Σε απάντηση αυτής, μια κοινοπραξία επιχειρήσεων της ΗΠΑ, πρότεινε την εγκατάσταση 50 MW ισχύος, χρησιμοποιώντας κύτταρα λεπτού υμένα (thin film cells). Όταν ολοκληρωθεί, θα είναι το μεγαλύτερο φωτοβολταϊκό πάρκο παραγωγής ενέργειας στον κόσμο.

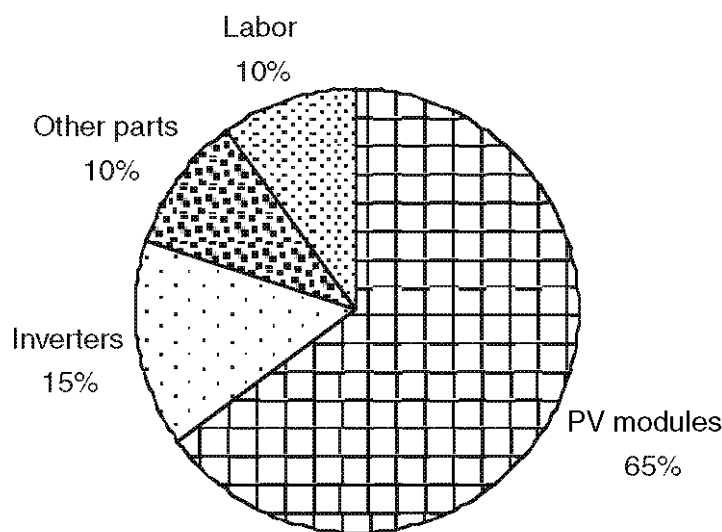
Στην απομακρυσμένη ορεινή περιοχή του Λαντάκ, στα σύνορα του Θιβέτ και του Πακιστάν στον βορρά, η Ινδία ξεκίνησε το 2003 ένα πενταετές σχέδιο, για 2 MW φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Το υψόμετρο κυμαίνεται από 2.500 με 7.000 μέτρα. Το σχέδιο περιλαμβάνει πολυάριθμα ηλιακά οικιακά συστήματα, το καθένα με ένα πλαίσιο των 40 W και 75 Ah μπαταρία βαθέως κύκλου, με μία μεγάλου μεγέθους δεξαμενή ηλεκτρολύτη, έναν ηλεκτρονικό ρυθμιστή φόρτισης, και δύο λαμπτήρες φθορισμού των 11 W. Αυτό επιτρέπει 3 ώρες φωτός κάθε βράδυ τον χειμώνα, ακόμη και χωρίς τον ήλιο να λάμπει για 2 συνεχόμενες μέρες. Για να αποφευχθεί η κατάψυξη της μπαταρίας στους  $-30^{\circ}\text{C}$  τη νύχτα, η μπαταρία έχει θερμομόνωση και υψηλής πυκνότητας ηλεκτρολύτη.

Στην κρατίδιο της Madhya Pradesh, ανατέθηκαν διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα των 700 kW και 425 kW. Το κρατίδιο της Δυτικής Βεγγάλης, νησί Sagar, μετατράπηκε σε φωτοβολταϊκό νησί με 26 MW φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, για να ικανοποιήσει την ανάγκη ηλεκτρικής ενέργειας σε ολόκληρο το νησί. Το νησί έχει περίπου 200.000 κατοίκους απλωμένους σε 16 χωριά σε μια περιοχή περίπου 300 τετραγωνικών χιλιομέτρων ( $\text{km}^2$ ). Το νησί στηρίχθηκε στο παρελθόν σε γεννήτρια

ντίζελ, η οποία ήταν ακριβή και προκαλούσε σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα. Παρόμοιες πρωτοβουλίες, επιδιώκονται σε χωριά στην νότια Ινδία.

Η Κίνα είναι η ταχύτερα αναπτυσσόμενη οικονομία στον κόσμο για τα τελευταία 15 έτη, με 8% αύξηση του ετήσιου ΑΕΠ. Μεγάλο μέρος του πληθυσμού στην αγροτική Κίνα που ζει σε απομακρυσμένα χωριά στις δυτικές και νοτιοδυτικές περιοχές, δεν μπορεί να συνδεθεί οικονομικά με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίον είναι τουλάχιστον 50 χιλιόμετρα μακριά. Αν δεν τροφοδοτηθούν με ηλεκτρική ενέργεια αυτοί οι άνθρωποι, μπορεί να μεταναστεύουν στις πόλεις και να δημιουργήσουν σοβαρά προβλήματα για τις κυβερνήσεις. Ένα μεγάλο έργο ξεκίνησε το 1996 να τροφοδοτήσει χωριά εκτός δικτύου, και τα φωτοβολταϊκά παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαδικασία. Η ηλιακή ενέργεια σε αυτές τις περιοχές είναι υψηλή, περίπου 3000 ώρες ηλιοφάνειας ετησίως, δίνοντας περίπου 1700 kWh / m<sup>2</sup>.

Σε παγκόσμιο επίπεδο, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκής ενέργειας από το τέλος του 2004, εκτιμάται ότι είναι 100 MW, περίπου το 40% αυτής είναι διασυνδεδεμένη και το υπόλοιπο 60% για αυτόνομα συστήματα. Το συνολικό κόστος του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι περίπου 8 δολάρια / W για 1 kW αυτόνομο σύστημα, 6 δολάρια / kW για ένα σύστημα 100 kW, και 5 δολάρια / kW για ένα σύστημα 1000 kW διασυνδεδεμένο. Το τυπικό κόστος εξαρτημάτων είναι περίπου 60 έως 70% σε φωτοβολταϊκά πλαίσια (modules), από 10 έως 15% σε μετατροπείς, 10% σε άλλα μέρη, και 10% σε εργασία (Σχήμα 5.9).



ΣΧΗΜΑ 5.9 Ταξινόμηση κόστους εξαρτημάτων σε ΦΒ συστήματα ισχύος

## 5.2. ΚΤΙΖΟΝΤΑΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

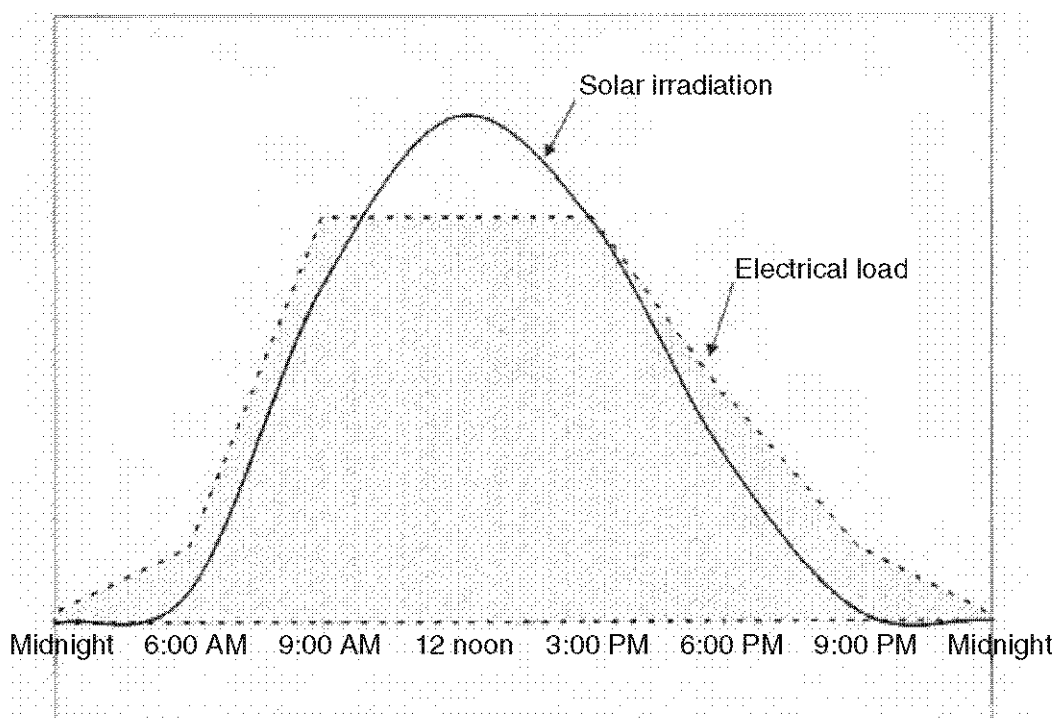
Η βραχυπρόθεσμη δυνητικά μεγάλη εφαρμογή της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας, είναι η επικάλυψη των κτιρίων, για την τροφοδότηση του κλιματισμού και των φορτίων φωτισμού. Ένα από τα ελκυστικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού συστήματος,

είναι ότι, η ισχύς έξοδος προσαρμόζεται πολύ καλά με το απαιτούμενο μέγιστο φορτίο. Παράγει περισσότερη ισχύ σε μια ηλιόλουστη μέρα του καλοκαιριού, όταν το φορτίο των κλιματιστικών καταπονεί τις γραμμές του δικτύου (Σχήμα 5.10). Το σχήμα 5.11, δείχνει ένα επικαλυμμένο κτίριο στην Γερμανία, με ΦΒ διασυνδεδεμένο με ένα ολοκληρωμένο σύστημα ισχύος.

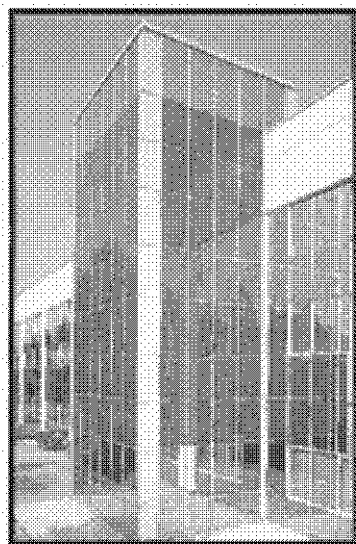
Στα μέσα της δεκαετίας του 1990, το DOE (Department of Energy), ξεκίνησε ένα πενταετές πρόγραμμα κοινής δαπάνης με την εταιρεία Solarex (τώρα BP Solar) στο Μέριλαντ, για την ανάπτυξη και κατασκευή χαμηλού κόστους, εύκολο στην εγκατάσταση, ολοκληρωμένο κτίριο με φωτοβολταϊκά (Building Integrated PhotoVoltaic BIPV) πάνελ. Τέτοια πάνελ κατασκευάζονται σε οικοδομικές σανίδες στέγης (πέταυρα) και τα πάνελ αυτά, μπορούν να αντικαταστήσουν τις παραδοσιακές στέγες και τοίχους. Οι ιδιοκτήτες του κτιρίου, πρέπει να πληρώσουν μόνο το παραπάνω κόστος αυτών των υλικών. Η γη έχει πληρωθεί, η δομή στήριξης είναι ήδη εγκατεστημένη, το κτίριο είναι ήδη καλωδιωμένο και οι αναπτυξιακοί φορείς μπορούν να χρηματοδοτήσουν τα πλαίσια BIPV, ως μέρος του συνολικού έργου. Το κύριο πλεονέκτημα του συστήματος BIPV, είναι ότι παράγει καταμετρημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, στο σημείο της κατανάλωσης. Το σύστημα BIPV επομένως, προσφέρει την πρώτη δυνητικά διαδεδομένη εμπορική εφαρμογή της τεχνολογίας φωτοβολταϊκών, στις βιομηχανικές χώρες.

Από την πλευρά των καταναλωτών, το DOE ξεκίνησε την «Πρωτοβουλία Εκατομμυρίων Ηλιακών Στεγών» για την τοποθέτηση, ενός εκατομμυρίου συστημάτων ηλιακής ενέργειας, για σπίτια και κτίρια σε όλη την ΗΠΑ, από το έτος 2010.

Η Ιαπωνία πρόσθεσε 150 MW BIPV συστημάτων μεταξύ του 1995 και του 2000. Τα υφιστάμενα προγράμματα στην Ευρώπη, την Ιαπωνία και τις ΗΠΑ, θα μπορούσαν να προσθέσουν 200 MW εγκαταστάσεων μέχρι το 2010, και η Ολλανδία σχεδιάζει να εγκαταστήσει 250 MW μέχρι το 2010.



ΣΧΗΜΑ 5.10 Κατανάλωση ισχύος σε εμπορικό κτίριο σε μια τυπική καλοκαιρινή ημέρα.



project	Flachglas building
location	Wernberg, Germany
architect	Kiermeier
date completed	July 1995
area of solar facade	140m <sup>2</sup>
electricity generated	7,000 kWh/year
cell material	polycrystalline
efficiency	11.5%
number of panels	330
orientation	south west/south east
angle of orientation	90°
grid connected	yes

ΣΧΗΜΑ 5.11 Κτίριο με ολοκληρωμένο σύστημα φωτοβολταϊκών.

### 5.3. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ (ΦΒ) ΚΥΤΤΑΡΩΝ

Συγκρίνοντας εναλλακτικές τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας, το πιο σημαντικό μέτρο είναι το κόστος της ενέργειας, που παράγεται ανά κιλοβατώρα. Στην φωτοβολταϊκή ισχύ, το κόστος πρώτιστα εξαρτάται από δύο παραμέτρους: Την απόδοση της μετατροπής της φωτοβολταϊκής ενέργειας, και το κεφαλαιακό κόστος ανά watt ισχύος. Αυτές οι δύο παράμετροι μαζί, δείχνουν την οικονομική ανταγωνιστικότητα της φωτοβολταϊκής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η απόδοση μετατροπής του ηλιακού κυττάρου ορίζεται ως εξής:

$$\eta = \text{Ηλεκτρική ισχύς εξόδου} / \text{Προσπίπτουσα ηλιακή ισχύ στο κύτταρο}$$

Οι πρωταρχικοί στόχοι της έρευνας και της ανάπτυξης φωτοβολταϊκών κυττάρων, είναι να βελτιωθεί η αύξηση της απόδοσης μετατροπής και άλλες λειτουργικές παράμετροι, για να μειώσουν το εμπορικό κόστος των ηλιακών κυττάρων και πινάκων. Ο δευτερεύων στόχος, είναι να βελτιωθεί σημαντικά η παράδοση της κατασκευής, με ταυτόχρονη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και του κατασκευαστικού κόστους και μειώνοντας τις ατέλειες και ελαττώματα. Αυτό, επιτυγχάνεται με τη βελτίωση μας, στην κατανόηση της βασικής φυσικής των φωτοβολταϊκών κυττάρων. Οι συνεχείς προσπάθειες ανάπτυξης για να παράγουμε πιο αποδοτικά κύτταρα χαμηλού κόστους, οδήγησαν σε διάφορους τύπους φωτοβολταϊκών

τεχνολογιών που είναι διαθέσιμες στην αγορά σήμερα, όσον αφορά την απόδοση μετατροπής και το κόστος του πλαισίου. Οι βασικοί τύποι αναλύονται στις ακόλουθες ενότητες.

### **5.3.1. ΚΥΤΤΑΡΑ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ**

Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο, είναι το πιο ευρέως διαθέσιμο υλικό των κυττάρων και έχει υπάρξει η κινητήριος δύναμη της βιομηχανίας. Η αποδοτικότητα της μετατροπής ενέργειας του, κυμαίνεται από 14 έως 18%. Στην πιο κοινή μέθοδος για την παραγωγή του, το ακάθαρτο πυρίτιο, πρώτα τήκεται και καθαρίζεται σε χωνευτήριο. Ένας πυρήνας (σπόρος) κρυστάλλου τότε, τοποθετείται στο υγρό πυρίτιο και «τραβιέται» με αργό σταθερό ρυθμό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μία στερεή, κυλινδρική ενιαία κρυσταλλική ράβδο (ingot - Σχήμα 5.12). Η παραγωγική διαδικασία είναι αργή και ενεργοβόρα, με αποτέλεσμα το υψηλό κόστος πρώτης ύλης προς το παρόν, σε 20 έως 25 δολάρια ανά λίβρα. Η ράβδος κόβεται σε φέτες, χρησιμοποιώντας ένα διαμαντένιο πριόνι, σε 200 έως 400 μm (0,005 έως 0,010 in.) πάχους δισκία (στρογγυλές φέτες). Τα δισκία περαιτέρω, κόβονται σε ορθογώνια κύτταρα, για να μεγιστοποιηθεί ο αριθμός των κυττάρων, που μπορούν να συνδεθούν μαζί σε ένα ορθογώνιο πλαίσιο (module). Δυστυχώς, σχεδόν το ήμισυ της ακριβής ράβδου πυριτίου, σπαταλιέται στον τεμαχισμό της ράβδου, για να σχηματίζει τετράγωνα κύτταρα. Τα αποβλήτα αυτά υλικά, μπορούν να ελαχιστοποιηθούν, φτιάχνοντας πλήρους μεγέθους στρογγυλά κύτταρα, από στρογγυλούς ράβδους (Σχήμα 5.13). Χρησιμοποιώντας τέτοια κύτταρα, θα ήσαν οικονομικά, αν ο χώρος στο πλαίσιο δεν ήταν το σοβαρότερο θέμα. Ένας άλλος τρόπος για την ελαχιστοποίηση των αποβλήτων, είναι να αναπτυχθούν οι κρύσταλλοι σε κορδέλες. Ορισμένες εταιρείες των ΗΠΑ, έχουν δημιουργήσει φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, για να ελασματοποιούν κορδέλες, οι οποίες στην συνέχεια περικόπτονται από ακτίνα λέιζερ, για μείωση των αποβλήτων.

### **5.3.2. ΚΥΤΤΑΡΑ ΠΟΛΥΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ**

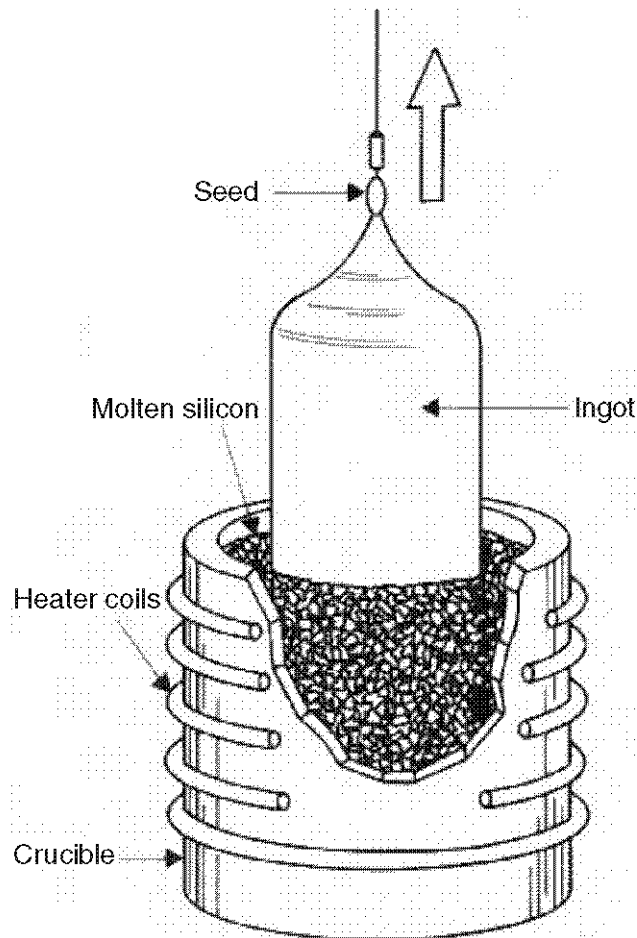
Αυτή είναι μια σχετικά γρήγορη και χαμηλού κόστους διαδικασία για την κατασκευή κρυσταλλικών κυττάρων. Αντί για την κατάρτιση ενιαίου κρυστάλλου, χρησιμοποιώντας σπόρους, το λιωμένο πυρίτιο χύνεται σε ράβδους (πλίνθωμα) κατά την διαδικασία, σχηματίζοντας πολλαπλούς κρυστάλλους. Η απόδοση μετατροπής είναι χαμηλότερη, αλλά το κόστος είναι πολύ χαμηλότερο, δίνοντας έτσι χαμηλό κόστος ανά watt ισχύος. Επειδή η κρυσταλλική δομή είναι κάπως τυχαία (ατελής) ήδη στην αρχή, δεν μπορεί να υποβαθμιστεί περαιτέρω με ατέλειες κατά την διαδικασία κατασκευής ή κατά την λειτουργία. Έρχεται σε χοντρό και λεπτό υμένα (φιλμ) και ξεπερνά την αγορά ηλιακών κυττάρων στις εμπορικές εφαρμογές.

### **5.3.3. ΚΥΤΤΑΡΑ ΛΕΠΤΟΥ ΥΜΕΝΙΟΥ**

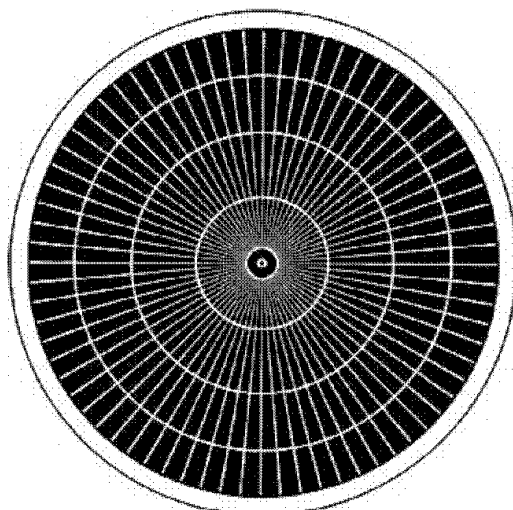
Αυτά είναι νέα είδη φωτοβολταϊκών που εισέρχονται στην αγορά. Δισεληνοινδιούχος χαλκός (CuInSe<sub>2</sub> ή CIS), τελλουριούχο κάδμιο (CdTe) και

## Συστήματα Αιολικής και Ηλιακής Ενέργειας

Αρσενικούχο γάλλιο (GaAs) είναι όλα λεπτού υμένιου υλικά, τυπικά μερικών μικρομέτρων ή μικρότερου πάχους, απευθείας εναποθετημένων πάνω σε γυαλί, πλαστικό, ανοξείδωτο ατσάλι, κεραμικό ή άλλο συμβατικό υλικό υπόστρωμα. Σε αυτήν την διαδικασία κατασκευής, τα στρώματα διαφορετικών υλικών ΦΒ, εφαρμόζονται διαδοχικά σε ένα υπόστρωμα. Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιεί πολύ λιγότερα υλικά ανά τετραγωνική περιοχή του κυττάρου, και ως εκ τούτου, είναι λιγότερο ακριβά ανά Watt της παραγόμενης ενέργειας.



ΣΧΗΜΑ 5.12 Μονοκρυσταλλική ράβδος με την διαδικασία Czochralski.



ΣΧΗΜΑ 5.13 Στρογγυλεμένης μορφής φωτοβολταϊκό μειώνει την σπατάλη υλικού σε σχέση με εκείνης των ορθογώνια κομμένων κυττάρων.

Το τελλουριούχο κάδμιο (CdTe), φαίνεται να είναι μια πολλά υποσχόμενη λεπτού υμένιου τεχνολογία, για χαμηλού κόστους ανά Watt ισχύ. Ερευνητές στο National Renewable Energy Laboratory (NREL) επίσης, αναπτύσσουν αποδοτικά και χαμηλού κόστους CIS στοιχεία. Αυτή η δουλειά, έχει εστιάσει σε διαδικασίες που είναι ικανές για χαμηλό κόστος, διατηρώντας όμως υψηλή απόδοση. Το NREL το 2004, πέτυχε ένα ρεκόρ αποδοτικότητας λεπτού υμένιου ηλιακών κυττάρων του 18% για ένα κύτταρο CIS.

Το DOE (Department of Energy), χρηματοδότησε έρευνα στο NREL για την ανάπτυξη επαναλήψιμων διεργασιών, για την κατασκευή υψηλής απόδοσης CdS (Cadmium sulfide Θειούχου καδμίου) λεπτού υμένιου (thin-film) / CdTe (τελλουριούχου κάδμιο) συσκευές, καθώς και την ανάπτυξη εναλλακτικών διαδικασιών, που μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση της συσκευής, την επαναληψιμότητα, και των δυνατοτήτων κατασκευής μέσω βελτιώσεων σε πέντε τομείς. Είναι διαφανή αγώγιμα στρώματα οξειδίου, Θειούχου καδμίου απορροφητές, επαφές, και συσκευές νανοσωματιδίων.

#### **5.3.4. ΑΜΟΡΦΟ ΠΥΡΙΤΙΟ**

Σε αυτή την τεχνολογία, ένα φιλμ ατμού άμορφου πυριτίου πάχους 2  $\mu\text{m}$ , εναποτίθεται σε γυάλινο ή ανοξείδωτου χάλυβα ρολό, τυπικά μήκους 2000 ποδών μακρύ και 13 ιντσών πλάτους. Σε σύγκριση με το κρυσταλλικό πυρίτιο, αυτή η τεχνολογία, χρησιμοποιεί περίπου μόνο το 1% του υλικού. Η απόδοσή της είναι περίπου η μισή του κρυσταλλικού πυριτίου τεχνολογίας προς το παρόν, αλλά το κόστος ανά Watt ισχύος είναι σημαντικά χαμηλότερο. Με αυτό το σκεπτικό, δύο μεγάλα εργοστάσια παραγωγής πάνελ άμορφου πυριτίου ξεκίνησαν στις ΗΠΑ το 1996.



Το DOE χρηματοδότησε έρευνα, που επικεντρώνεται στη σταθεροποίηση της απόδοσης πάνελ πυριτίου (Si), μέσω τεσσάρων εργασιών:

- Βελτίωση της μεθόδου εναπόθεσης λεπτού υμένιου (μεμβράνης, φιλμ) που υπόσχεται νέες τεχνικές
- Ανάπτυξη υλικών με χαμηλότερης ζώνης διάκενα, ώστε να ισορροπούν καλύτερα την εκμετάλλευση των φωτονίων σε συσκευές πολλαπλών επαφών
- Κατανόηση της μετασταθερότητας της επαγωγής του φωτός, για να εναποθέτει πιο σταθερό πυριτικό υλικό Si
- Ανάπτυξη επίταξης χαμηλής θερμοκρασίας

Ο Πίνακας 5.3 συγκρίνει τις τεχνολογίες άμορφου πυριτίου και κρυσταλλικού πυριτίου.

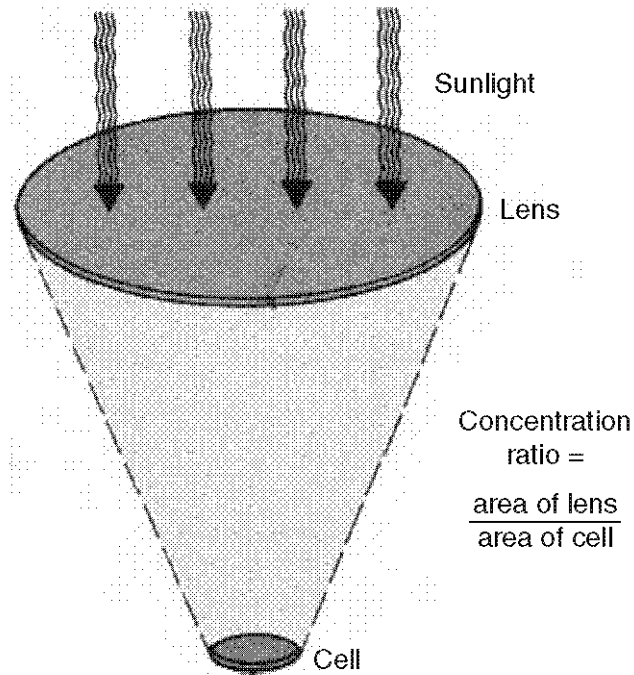
### 5.3.5. ΣΦΑΙΡΙΚΑ ΚΥΤΤΑΡΑ (ΚΥΨΕΛΕΣ)

Αυτή είναι μια ακόμη τεχνολογία που διερευνάται στα εργαστήρια. Το ακατέργαστο υλικό, είναι χαμηλού βαθμού κρυσταλλικές χάνδρες πυριτίου, που προς το παρόν κοστίζει περίπου 1 δολάριο ανά λίβρα. Οι χάνδρες (σφαιρίδια), εφαρμόζονται τυπικά πάνω σε 4 ιντσών τετράγωνα, από λεπτό διάτρητο φύλλο αλουμινίου. Κατά την διαδικασία, οι ακαθαρσίες ωθούνται προς την επιφάνεια, όπου απομακρύνονται. Επειδή κάθε σφαίρα λειτουργεί ανεξάρτητα, η βλάβη μιας σφαίρας, έχει αμελητέα επίπτωση στην μέση λειτουργία της συνολικής επιφάνειας. Η εταιρεία Southern California Edison Company υπολογίζει ότι 100 τετραγωνικά πόδια πάνελ σφαιρικών κυττάρων, μπορούν να παράγουν 2000 kWh ετησίως κατά μέσο όρο, για το κλίμα της Νότιας Καλιφόρνιας.

Πίνακας 5.3

#### Comparison of Crystalline and Amorphous Silicon Technologies

	Crystalline Silicon	Amorphous Silicon
Present Status	Workhorse of terrestrial and space applications	New rapidly developing technology, tens of MW of yearly production facilities were commissioned in 1996 to produce low-cost cells
Thickness	200-400 $\mu\text{m}$ (0.004-0.008 in.)	2 $\mu\text{m}$ (less than 1% of that in crystalline silicon)
Raw Material	High	About 3% of that in crystalline silicon
Conversion Efficiency	16-20%	8-10%
Module costs (2004)	\$3-5 per watt, expected to fall slowly due to the maturation of this technology	\$3-5 per watt, expected to fall rapidly to \$2 per watt due to substantial DOE funding to fully develop this new technology



ΣΧΗΜΑ 5.14 Φακός συγκεντρώνει το ηλιακό φως σε μια μικρή περιοχή εξαλείφοντας την ανάγκη για υλικό ενεργών κυττάρων.

### 5.3.6. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΚΥΤΤΑΡΑ

Σε μια προσπάθεια να βελτιωθεί η αποδοτικότητα της μετατροπής, το φως του ήλιου συγκεντρώνεται δεκάδες ή εκατοντάδες φορές της συνήθους έντασης, εστιάζοντάς το σε μια μικρή περιοχή με τη χρήση χαμηλού κόστους φακών (Σχήμα 5.14). Ένα κύριο πλεονέκτημα αυτού, είναι ότι ένα τέτοιο κύτταρο, απαιτεί ένα μικρό τμήμα περιοχής, σε σύγκριση με τα κανονικά κύτταρα, μειώνοντας σημαντικά την απαίτηση χρήσης φωτοβολταϊκού υλικού. Ωστόσο, η περιοχή συλλογής του συνολικού ηλιακού φωτός, παραμένει περίπου η ίδια για δεδομένη ισχύ εξόδου. Εκτός από την αύξηση της ισχύος και τη μείωση του μεγέθους ή του αριθμού των στοιχείων, το κύτταρο συγκεντρωτής έχει το πρόσθετο πλεονέκτημα ότι αυξάνει την αποδοτικότητα των κυττάρων, κάτω από το συγκεντρωμένο φως μέχρι κάποιου σημείου. Ένα άλλο πλεονέκτημα, είναι η μικρή ενεργή επιφάνειά του κυττάρου. Είναι πιο εύκολο να παραχθεί ένα κύτταρο υψηλής απόδοσης μικρής επιφάνειας, από ότι η παραγωγή κυττάρων μεγάλης επιφάνειας, με συγκρίσιμη αποδοτικότητα. Μια απόδοση του 37% έχει επιτευχθεί σε ένα κύτταρο σχεδιασμένο για επίγειες εφαρμογές, το οποίον είναι τροποποιημένη έκδοση, του κυττάρου τριπλού συνδέσμου, που η Spectrolab ανέπτυξε για διαστημικές εφαρμογές. Από την άλλη, το μεγαλύτερο μειονέκτημα του συγκεντρωτή κυττάρου, είναι ότι απαιτεί οπτικά εστίασης, τα οποία προσθέτουν κόστος. Ο συγκεντρωτής φωτοβολταϊκών κυττάρων, έχει δει μια πρόσφατη αναζωπύρωση του ενδιαφέροντος στην Αυστραλία και την Ισπανία.

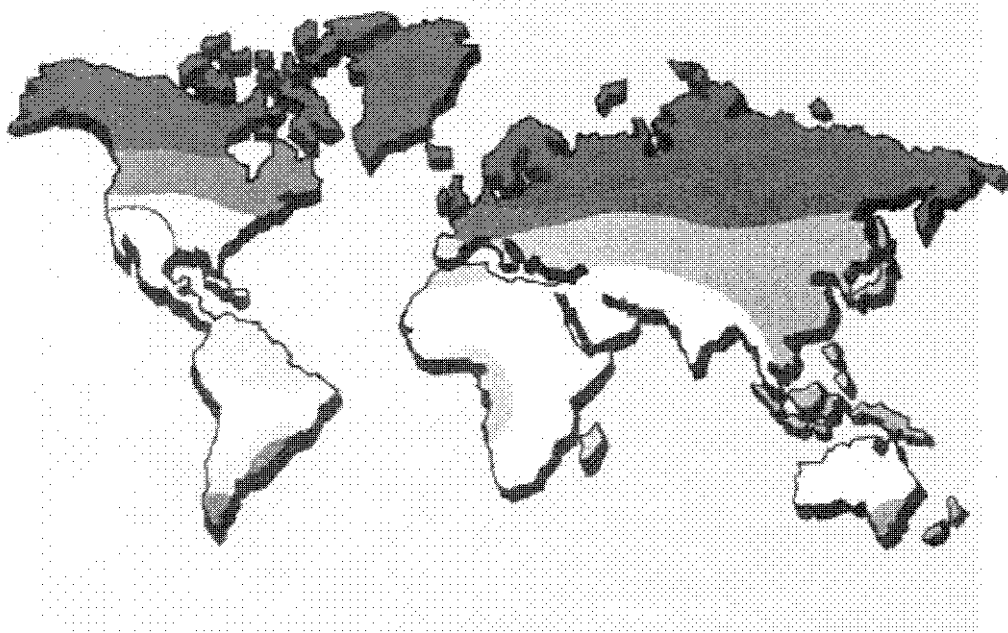
### 5.3.7. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Το μίας επαφής n-p κύτταρο πυριτίου, μετατρέπει μόνο το κόκκινο και το υπέρυθρο φως σε ηλεκτρική ενέργεια, αλλά όχι το μπλε και το υπεριώδες. Η φωτοβολταϊκή κυψέλη, μετατρέπει το φως σε ηλεκτρική ενέργεια, αποτελεσματικότερα όταν η ενέργεια του φωτός, ταιριάζει με το επίπεδο ενέργειας του ημιαγωγού, γνωστό ως «ενεργειακό διάκενο ζώνης» (band gap). Η διαστρωμάτωση των πολλαπλών ημιαγωγών, με ένα ευρύ φάσμα ενεργειακών διάκενων ζώνης, μετατρέπει περισσότερα επίπεδα ενέργειας (μήκη κύματος) του φωτός, σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα κύτταρα πολλαπλών επαφών, χρησιμοποιούν πολλαπλά στρώματα ημιαγωγών υλικών, για την μετατροπή ευρύτερου φάσματος ηλιακό φως, σε ηλεκτρική ενέργεια, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση. Με το γαλλίου ινδίου φωσφιδίου/γαλλίου αρσενιδίου/γερμανίου, (GaInP / GaAs / Ge) τριπλής επαφής κύτταρο, το NREL και η Spectrolab, έχουν αναφέρει ένα ρεκόρ 34% απόδοσης κάτω από συγκεντρωμένο ηλιακό φως. Το κύτταρο συλλέγει υπέρυθρα φωτόνια επίσης. Αποδόσεις έως και 40% σε τριπλής επαφής πιστοποιημένα κύτταρα για διαστημική χρήση, έχουν μετρηθεί από την Spectrolab.

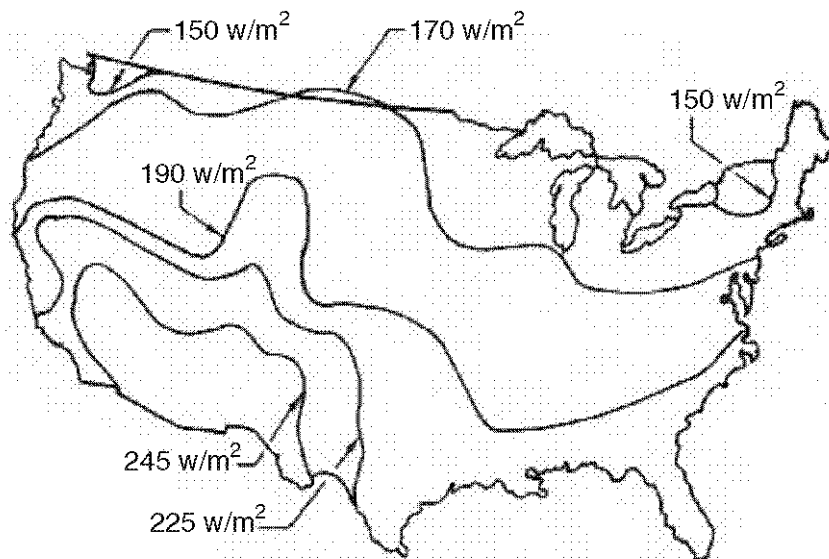
Κάτω από χρηματοδότηση της NASA και της NREL, η Tecstar (τόρα Emcore) και η Spectrolab (τόρα Boeing), ανέπτυξαν πολλαπλών επαφών ηλιακά κύτταρα το 2000, για διαστημικά συστήματα ισχύος. Τα διπλής επαφής ηλιακά κύτταρα GaInP/GaAs αποτέλεσαν την βάση των τριπλής επαφής GaInP / GaAs / Ge ηλιακών κυττάρων, τα οποία πέτυχαν ρεκόρ μεγαλύτερης απόδοσης στο 34%. Αυτό το κύτταρο, ήταν το πρώτο τριπλής επαφής κύτταρο που σχεδιάστηκε, για επίγειες εφαρμογές και το πρώτο μονολιθικό ηλιακό κύτταρο, με επίτευξη απόδοσης του ενός τρίτου του ήλιου. Επί του παρόντος, το κύτταρο GaInP / GaAs / Ge χρησιμοποιείται ευρέως σε δορυφορικά συστήματα ισχύος, αλλά μπορεί σύντομα να κυλίσουν κάτω σε επίγειες εφαρμογές.

## 5.4. ΧΑΡΤΕΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης, απεικονίζεται στο σχήμα 5.15, όπου οι λευκές περιοχές, λαμβάνουν περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία ετησίως. Ο ετήσιος μέσος όρος 24 ωρών ηλιακής ροής που φθάνει στην οριζόντια επιφάνεια της γης, φαίνεται στο Σχήμα 5.16, ενώ το σχήμα 5.17, απεικονίζει αυτό του μήνα Δεκέμβριου. Σημειώστε ότι ο 24ωρος μέσος όρος, μειώνεται τον Δεκέμβριο. Αυτό οφείλεται στις μικρότερες ημέρες και στην παρουσία σύννεφων, και όχι λόγω του χαμηλού ύψους του ήλιου και τις χαμηλές θερμοκρασίες. Όπως θα φανεί αργότερα, το φωτοβολταϊκό κύτταρο στην πράξη, μετατρέπει περισσότερη ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, σε χαμηλή θερμοκρασία (σε χαμηλή θερμοκρασία έχει μεγαλύτερη απόδοση).



ΣΧΗΜΑ 5.15 Ηλιακή ακτινοβολία περιοχών του κόσμου (υψηλότερη ενέργεια στις λευκές περιοχές).

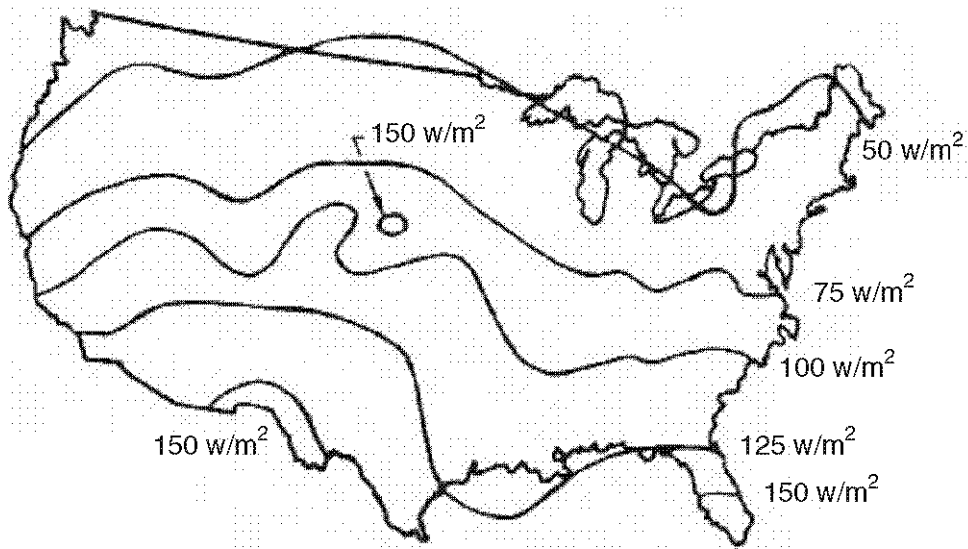


ΣΧΗΜΑ 5.16 Ετήσιος εικοσιτετράωρος μέσος όρος ηλιακής ακτινοβολίας σε  $\text{Watt/m}^2$  που φθάνει στην οριζόντια επιφάνεια της γης.

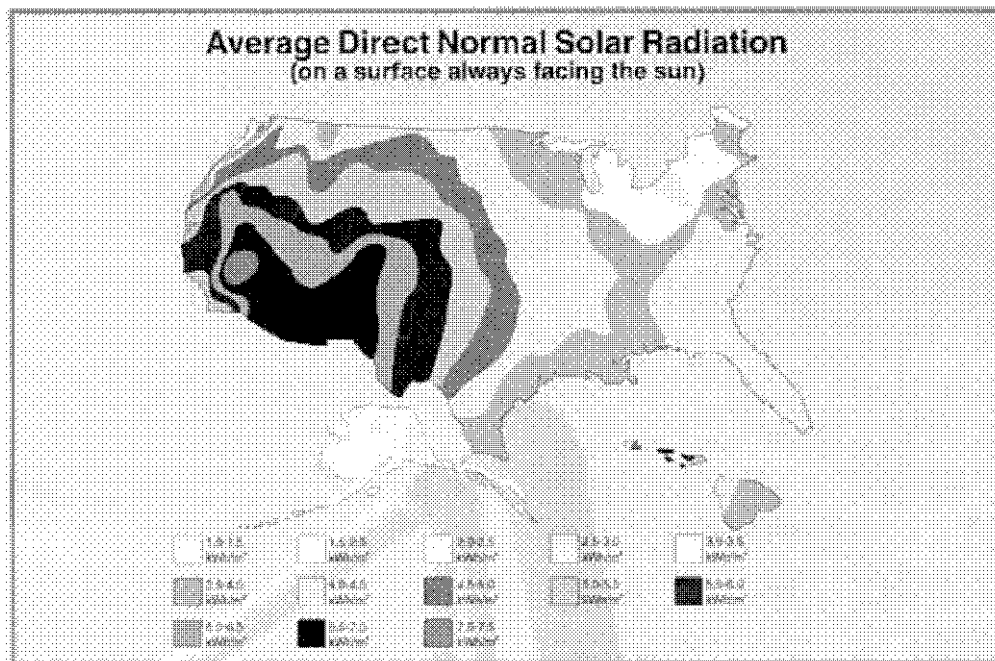
Είναι η συνολική ετήσια δυνητική συλλογή ενέργειας της τοποθεσίας (εγκατάστασης, site), που καθορίζει την οικονομική βιωσιμότητα ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το σχήμα 5.18, είναι χρήσιμο υπό αυτήν την σκοπιά, καθώς δίνει τον ετήσιο μέσο όρο ανά ημέρα, της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στην επιφάνεια η οποία στρέφεται προς τον ήλιο σε γωνία  $90^\circ$  (στρέφεται κάθετα δηλαδή προς τον ήλιο). Πλαίσια (modules) τοποθετημένα σε κατασκευή παρακολούθησης του ήλιου, λαμβάνουν αυτήν την ενέργεια. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται ανά ημέρα, προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του αριθμού που γράφεται

## Συστήματα Αιολικής και Ηλιακής Ενέργειας

στον χάρτη με την απόδοση της φωτομετατροπής των πινάκων, που έχουν εγκατασταθεί στην τοποθεσία (εγκατάσταση).



ΣΧΗΜΑ 5.17 Εικοσιτετράωρος μέσος όρος ηλιακής ακτινοβολίας μήνα Δεκεμβρίου σε  $\text{Watt/m}^2$  που φθάνει στην οριζόντια επιφάνεια τη γης.

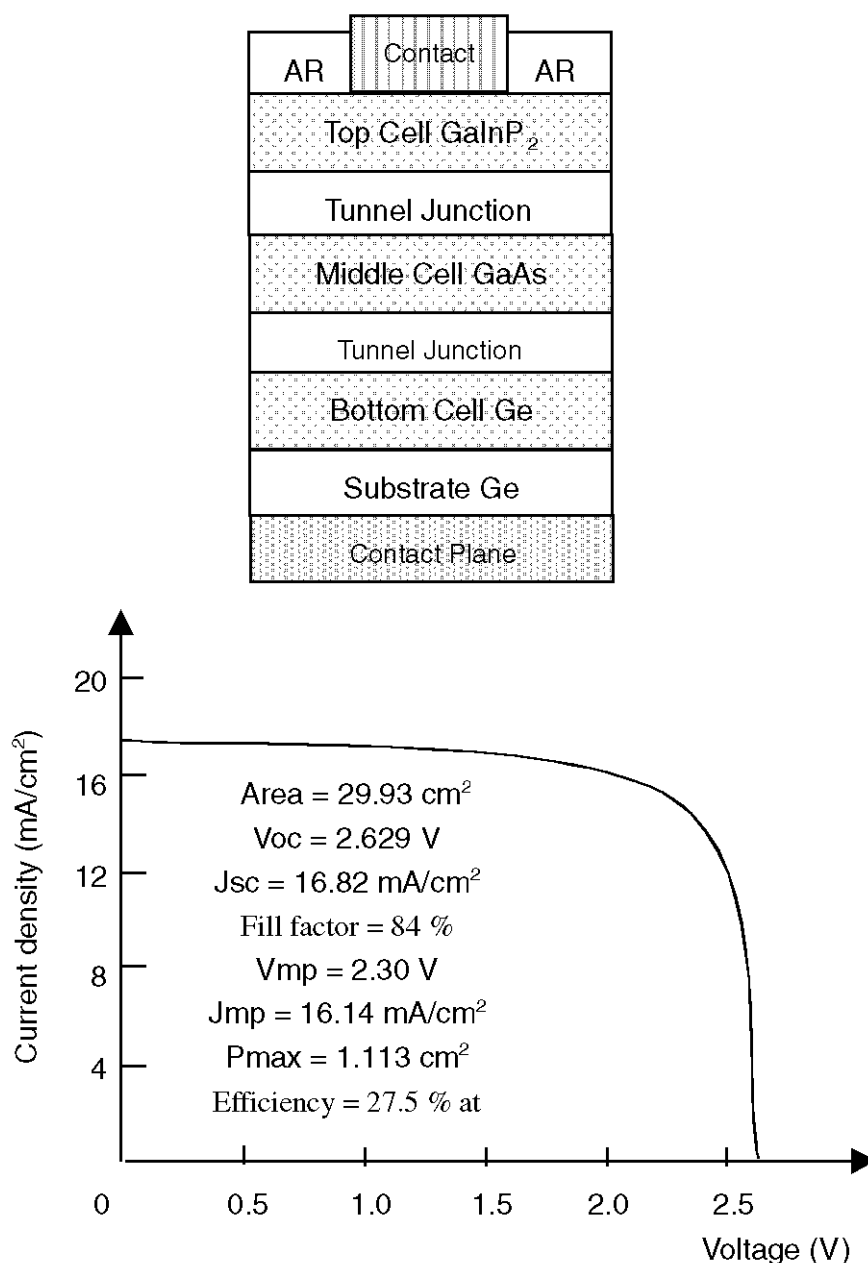


ΣΧΗΜΑ 5.18 Ετήσιος εικοσιτετράωρος μέσος όρος ηλιακής ενέργειας σε  $\text{kWh/m}^2$  που φθάνει στην επιφάνεια που στρέφεται πάντα προς τον ήλιο στις  $90^\circ$ .

### 5.5. ΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Η Τεχνολογική εξέλιξη, κυρίως συνεχίζει να αυξάνει την απόδοση μετατροπής και να μειώνει το κόστος των πάνελ ανά watt. Οι βελτιώσεις στο παραδοσιακό μονοκρυσταλλο πυρίτιο, είναι αυξητικές μέχρι τώρα, από 10% στις αρχές του 1950 σε

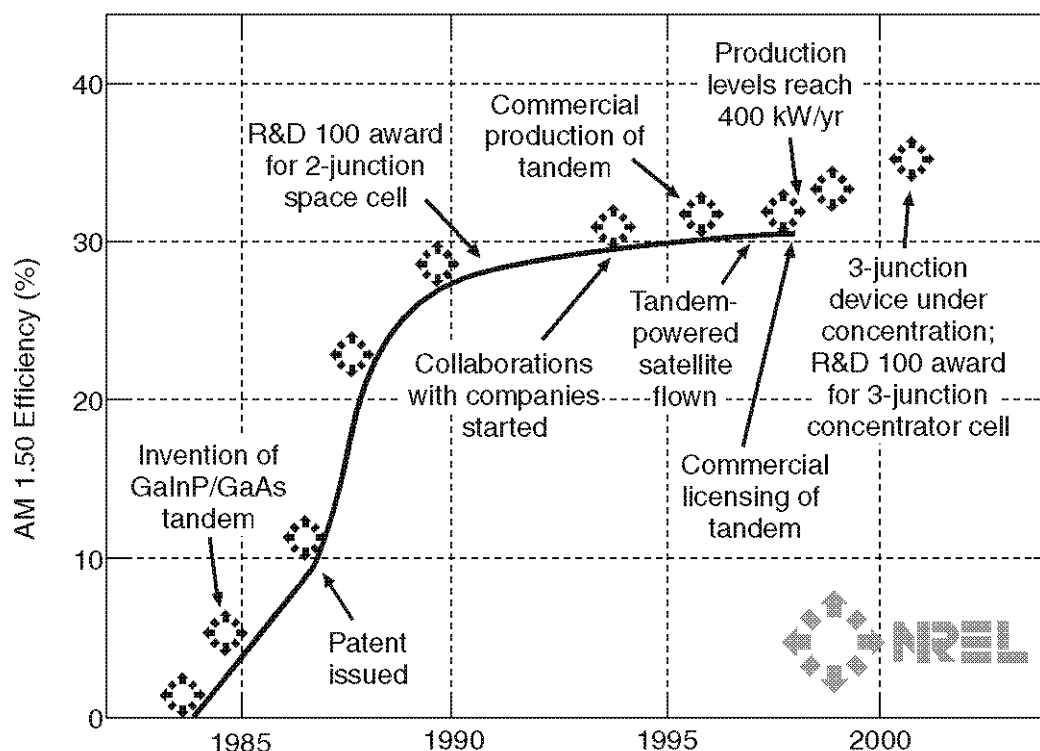
15% το 2005. Το 2004 η SunPower Corporation παρήγαγε ένα κύτταρο υψηλής απόδοσης, με απόδοση 20%. Αυτό το νέο κύτταρο έχει άλλο ένα πλεονέκτημα επίσης. Οι θετικές και αρνητικές επαφές του, βρίσκονται στο πίσω μέρος του κυττάρου, αφήνοντας το μέτωπο καθαρό από τα ασημένια σύρματα, ώστε η σκιά τους να μην πέφτει στην ενεργή περιοχή του κυττάρου, στο μπροστινό μέρος.



ΣΧΗΜΑ 5.19 Κατασκευή κυττάρου τριπλής επαφής και η καμπύλη I-V curve.

Οι παρούσες ενεργοβόρες διαδικασίες κατασκευής του φωτοβολταϊκού κυττάρου, αντικαθίστανται από νέες ενεργειακά αποδοτικές διαδικασίες. Νεότερες μέθοδοι αναπτύσσονται και υλοποιούνται συνεχώς, να χαμηλώσουν την ενέργεια που χρησιμοποιείται ανά τετραγωνικό εκατοστό, για την κατασκευή του τελικού κυττάρου.

Στην παρούσα διαδικασία παραγωγής, το μπροστινό και το πίσω μέρος του κυττάρου, διαχέονται χωριστά, παίρνοντας 1 με 3 ώρες χρόνο κατασκευής. Ερευνητές στο Georgia Institute of Technology, εξετάζουν το ενδεχόμενο της τεχνολογίας ταχείας θερμικής επεξεργασίας. Αυτή η διαδικασία, ταυτόχρονα σχηματίζει το μπροστινό και το πίσω μέρος του κυττάρου σε κάμποσα λεπτά, και οι μεταλλικές επαφές εφαρμόζονται με μεταξοτυπία. Δεν κόβει μόνο το χρόνο επεξεργασίας, αλλά χαμηλώνει επίσης την θερμοκρασία και την ενέργεια που απαιτείται για την κατασκευή.



ΣΧΗΜΑ 5.20 Τάσεις βελτίωσης απόδοσης φωτοβολταϊκού (ΦΒ) κυττάρου.

Η επόμενη σημαντική βελτίωση της απόδοσης έρχεται από το κύτταρο τριπλής επαφής, που φαίνεται στο Σχήμα 5.19. Στο πολλαπλών επαφών κύτταρο GaAs, ένα κύτταρο, αποτελείται από δύο διαδοχικά κύτταρα GaAs που χωρίζονται από μια επαφή λεπτής σήραγγας GaInP, ακολουθούμενο από ένα τρίτο διαδοχικό κύτταρο GaInP, που χωρίζονται από μια επαφή σήραγγας AlInP. Η απόδοση των κυττάρων τριπλής επαφής έχει ελεγχθεί ότι φθάνει έως και 40% σε εργαστηριακές συνθήκες, και έως 34% σε κύτταρα παραγωγής. Το σημερινό κόστος αυτών των κυττάρων, περιορίζει την εφαρμογή τους σε διαστημικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας μόνο, αλλά τελικά θα γίνουν οικονομικά για επίγεια χρήση.

Οι τάσεις βελτίωσης της απόδοσης των ηλιακών κυττάρων, κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών, φαίνεται στο Σχήμα 5.20. Η επόμενη γενιά ηλιακών κυττάρων πολλαπλών επαφών, πρέπει να έχει τέσσερα στρώματα. Ο πιο γρήγορος δρόμος προς επίτευξη αυτού του στόχου, είναι η ανάπτυξη ενός υλικού με ενεργειακό χάσμα ζώνης 1,0 eV, δηλαδή το κρυσταλλικό πλέγμα να ταιριάζει με του GaInP,

## *Συστήματα Αιολικής και Ηλιακής Ενέργειας*

GaAs, και Ge του παρόντος σχεδιασμένου από το NREL, τριπλής επαφής ηλιακού κυττάρου. Οι επιστήμονες του NREL, εκτιμούν ότι η απόδοση του τριπλής επαφής ηλιακού κυττάρου, έχει ένα θεωρητικό όριο του 50%, το οποίο είναι σαν να συλλέγει το 50% της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας.

### *ΑΝΑΦΟΡΕΣ - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ*

1. Carlson, D. E., 1995. Recent Advances in Photovoltaics, Proceedings of the Intersociety Engineering Conference on Energy Conversion, 1995, pp. 621–626.



## **ΚΕΦ. 6. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ**

Το φωτοβολταϊκό (PhotoVoltaic PV) φαινόμενο, είναι η ηλεκτρική δύναμη, που αναπτύσσεται μεταξύ δύο ανόμοιων υλικών, όταν ο κοινός κόμβος τους φωτίζεται με ακτινοβολία φωτονίων. Το φωτοβολταϊκό κύτταρο (PV cell), μετατρέπει το φως απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Ένας Γάλλος φυσικός, ο Becquerel, ανακάλυψε το φωτοβολταϊκό φαινόμενο το 1839. Περιορίστηκε στο εργαστήριο, έως ότου το 1954, η εταιρεία Bell Laboratories, παρήγαγε το πρώτο κύτταρο πυριτίου. Σύντομα βρήκε εφαρμογή στο Αμερικανικό διαστημικό πρόγραμμα, υψηλής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χωρητικότητας ανά μονάδα βάρους. Από τότε, έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς, για να μετατρέπει το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια, για γήινης τροχιάς δορυφόρους. Έχοντας ωριμάσει στις διαστημικές εφαρμογές, η τεχνολογία φωτοβολταϊκών, εξαπλώνεται στις επίγειες εφαρμογές, που κυμαίνονται από την τροφοδοσία απομακρυσμένων περιοχών, μέχρι για την τροφοδοσία δικτύων κοινής ωφελείας σε όλο τον κόσμο.

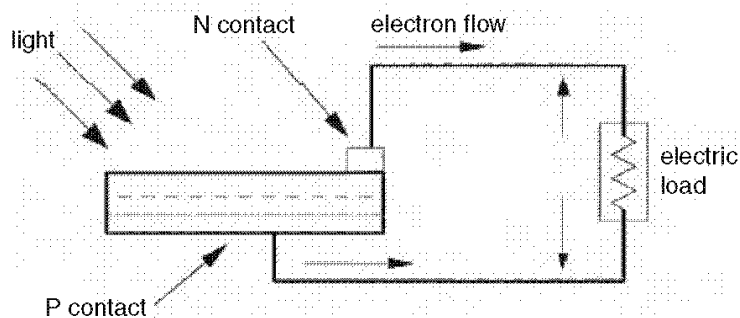
### **6.1. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΚΥΤΤΑΡΟ**

Η φυσική του ΦΒ κυττάρου, είναι παρόμοια με εκείνη της κλασσικής διόδου με μια p-n επαφή (Σχήμα 6.1). Όταν η επαφή απορροφά φως, η ενέργεια των απορροφημένων φωτονίων, μεταφέρεται στο σύστημα ηλεκτρονίου-πρωτονίου του υλικού, δημιουργώντας φορείς φορτίου που διαχωρίζονται στην επαφή. Οι φορείς φορτίου, μπορεί να είναι ζεύγη ηλεκτρονίων-ιόντων σε ένα υγρό ηλεκτρολύτη ή ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών σε ένα υλικό ημιαγωγού στερεάς κατάστασης. Οι φορείς φορτίου στην περιοχή επαφής δημιουργούν μια διαφορά δυναμικού, που συνεπάγεται την κυκλοφορία ρεύματος μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος. Το τετράγωνο του ρεύματος, πολλαπλασιασμένο με την αντίσταση του κυκλώματος, είναι η ισχύς που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Η υπόλοιπη ισχύς του φωτονίου, ανεβάζει τη θερμοκρασία του κυττάρου και απάγεται στον περιβάλλοντα χώρο.

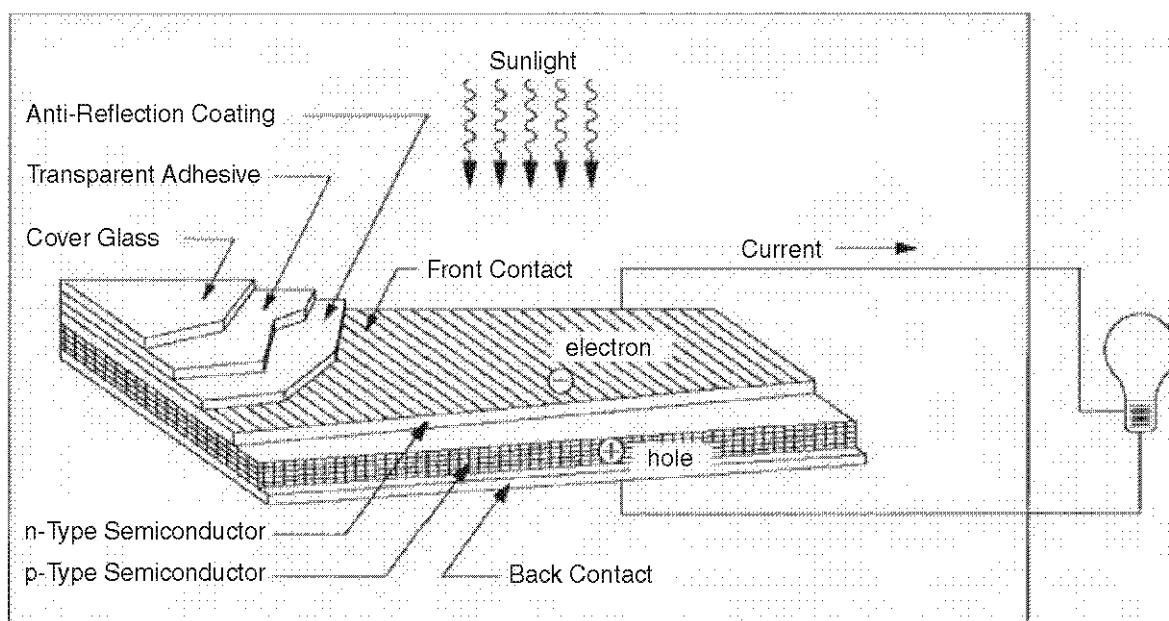
Η προέλευση του ΦΒ τάσης, είναι η διαφορά στο χημικό δυναμικό, που ονομάζεται στάθμη Fermi, των ηλεκτρονίων στα δύο απομονωμένα υλικά. Όταν ενώνονται, η επαφή πλησιάζει σε μια νέα θερμοδυναμική ισορροπία. Τέτοια ισορροπία, μπορεί να επιτευχθεί μόνο όταν η στάθμη Fermi, είναι ίση στα δύο υλικά. Αυτό συμβαίνει από την ροή των ηλεκτρονίων από το ένα υλικό στο άλλο, μέχρι μια διαφορά τάσεως να δημιουργηθεί μεταξύ τους, η οποία έχει δυναμικό, ακριβώς ίσο με την αρχική διαφορά της στάθμης Fermi. Η τάση αυτή οδηγεί το φωτόρευμα στο κύκλωμα ΦΒ.

Το σχήμα 6.2 δείχνει την κατασκευή του βασικού κυττάρου. Μεταλλικές επαφές διατίθενται και στις δύο πλευρές της επαφής, για να συλλέξουν ηλεκτρικό ρεύμα, που επάγεται από την πρόσπτωση των φωτονίων. Ένα λεπτό αγωγίμο πλέγμα ινών αργύρου στην επιφάνεια στην κορυφή (που φωτίζεται), συλλέγει το ρεύμα και αφήνει το φως μέσα. Η απόσταση των αγωγίμων ινών στο πλέγμα, είναι θέμα συμβιβασμού μεταξύ της μεγιστοποίησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και ελαχιστοποίησης της σκίασης του φωτός. Επαφή αγωγίμου φύλλου, διατίθεται πάνω από την επιφάνεια πυθμένα

(σκότους) και στη μια άκρη της άνω επιφάνειας. Εκτός από τα βασικά στοιχεία, αρκετά βελτιωμένα χαρακτηριστικά επίσης, περιλαμβάνονται στην κατασκευή. Για παράδειγμα, η εμπρόσθια επιφάνεια του κυττάρου, έχει μια αντανάκλαστική επικάλυψη ώστε να απορροφήσει όσο το δυνατόν περισσότερο φως, ελαχιστοποιώντας την αντανάκλαση. Η μηχανική προστασία, παρέχεται από ένα γυάλινο κάλυμμα, εφοδιασμένο με ένα διαφανές συγκολλητικό.



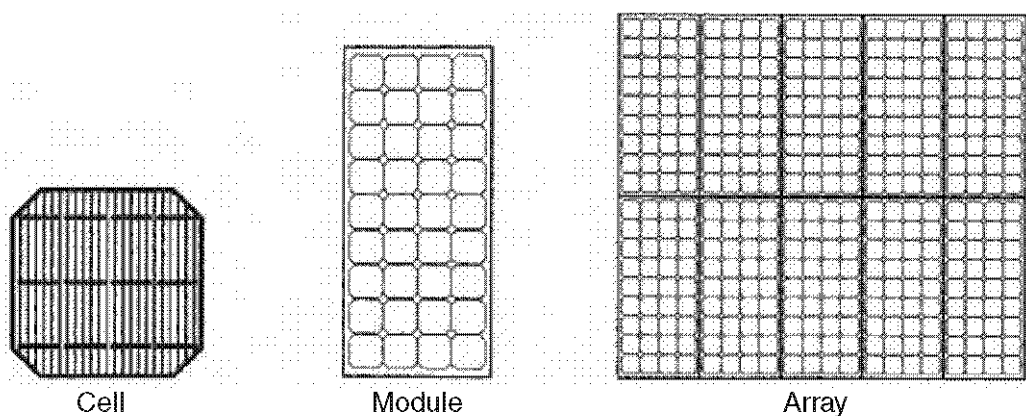
ΣΧΗΜΑ 6.1 Τα φωτοβολταϊκό φαινόμενο μετατρέπει την ενέργεια των φωτονίων σε τάση διά μέσου της επαφής p-n.\



ΣΧΗΜΑ 6.2 Βασική κατασκευή του φωτοβολταϊκού κυττάρου με βελτιωμένες επιδόσεις (πλέγμα αργύρου συλλογής ρεύματος, αντανάκλαστική επικάλυψη, προστασία γυάλινου καλύμματος).

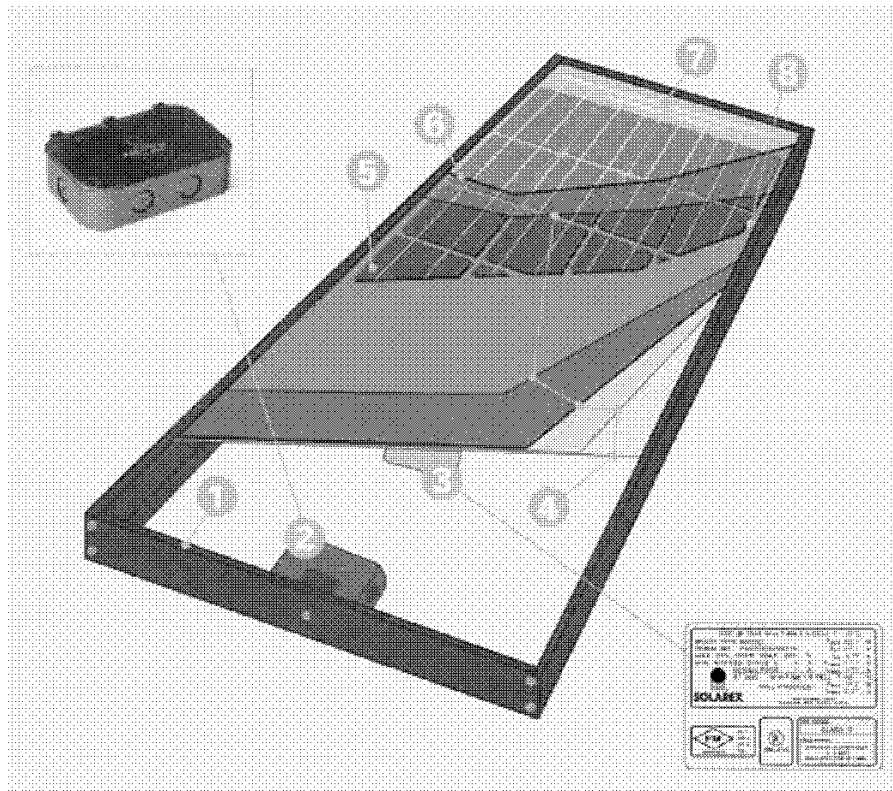
## 6.2. ΠΛΑΙΣΙΟ ΚΑΙ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ (MODULE AND ARRAY)

Το ηλιακό κύτταρο που περιγράφηκε στην προηγούμενη υποενότητα, είναι η βασική δομική μονάδα του φωτοβολταϊκού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Συνήθως, είναι μερικές τετραγωνικές ίντσες σε μέγεθος και παράγει περίπου 1 W ισχύος. Για να επιτευχθεί υψηλή ισχύς, συνδέονται πολλά τέτοια κύτταρα σε σειρά και παράλληλα σε ένα πλαίσιο (module ή panel) έκτασης αρκετών τετραγωνικών ποδιών (Σχήμα 6.3). Η ηλιακή συστοιχία, ορίζεται σαν μια ομάδα πινάκων, ηλεκτρικά συνδεδεμένες σε συνδεσμολογία σειράς και παράλληλης, για να δημιουργήσει το απαιτούμενο ρεύμα και τάση. Το σχήμα 6.4 δείχνει την πραγματική κατασκευή ενός πλαισίου, που μπορεί να στερεωθεί σε μια δομική κατασκευή.

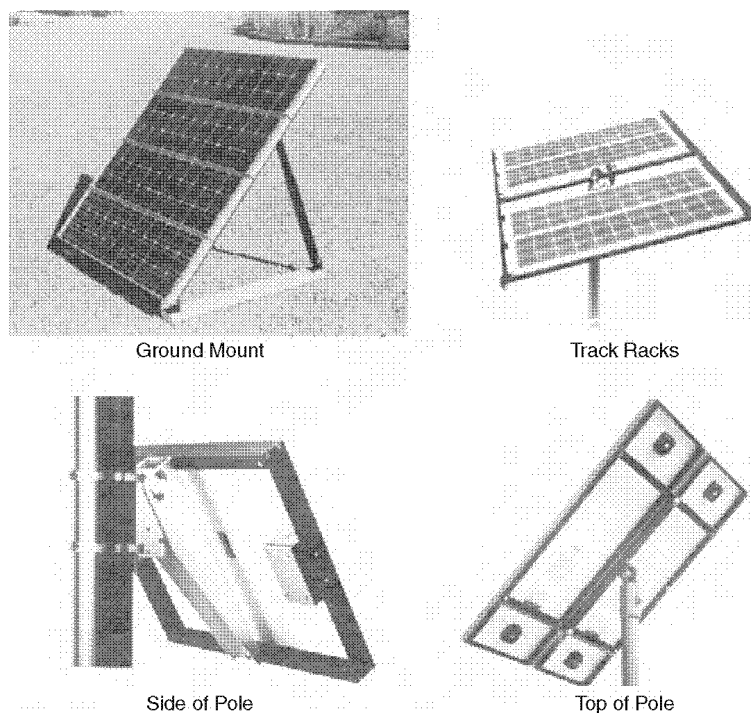


ΣΧΗΜΑ 6.3 Διάφορα ΦΒ στοιχεία φτιάχνουν ένα πλαίσιο, και διάφορα πλαίσια μια συστοιχία.

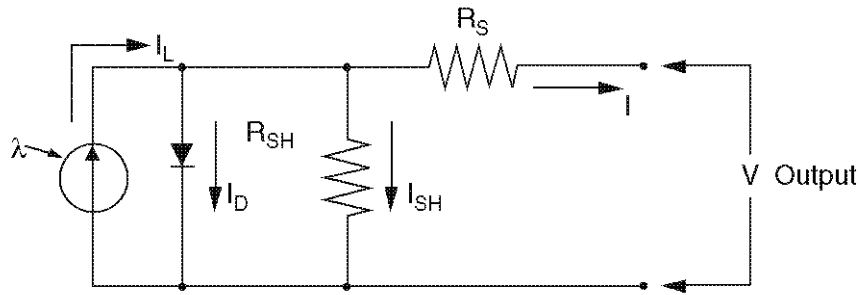
Η τοποθέτηση των πινάκων, μπορεί να είναι διαφόρων μορφών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.5. Στην τοποθέτηση οροφής, τα πλαίσια είναι σε μορφή που μπορεί να τοποθετηθεί απευθείας στην οροφή. Στην πρόσφατα αναπτυγμένη άμορφου πυριτίου τεχνολογίας, τα φωτοβολταϊκά φύλλα κατασκευάζονται σε σανίδες που μπορούν να αντικαταστήσουν τις παραδοσιακές σανίδες οροφής μία προς μία, παρέχοντας μεγαλύτερη οικονομία ως προς τα οικοδομικά υλικά και εργασία.



ΣΧΗΜΑ 6.4 Κατασκευή φωτοβολταϊκών πλαισίων: (1) πλαίσιο, (2) αδιάβροχο κουτί σύνδεσης, (3) ετικέτα πληροφοριών, (4) προστασία από καιρικές συνθήκες για χρόνο ζωής 30 χρόνια, (5) ηλιακά κύτταρα, (6) ενισχυμένο κάλυμμα γυαλιού υψηλής εκπομπής, (7) εξωτερικοί ηλεκτρικοί αγωγοί, (8) καθαρισμός πλαισίου.



ΣΧΗΜΑ 6.5 Μέθοδοι στήριξης φωτοβολταϊκών πάνελ.



ΣΧΗΜΑ 6.6 Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού πλαισίου που δείχνει την δίοδο και τα ρεύματα που διαρρέουν το κύκλωμα

### 6.3. ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ

Η πολύπλοκη φυσική του φωτοβολταϊκού κυττάρου, μπορεί να παρασταθεί από το αντίστοιχο ηλεκτρικό κύκλωμα, που φαίνεται στο Σχήμα 6.6. Οι παράμετροι του κυκλώματος έχουν ως εξής. Το ρεύμα  $I$  στους ακροδέκτες εξόδου, είναι ίσο με το δημιουργούμενο φωτόρευμα  $I_L$ , μείον το ρεύμα της διόδου  $I_d$  και το παράλληλο ρεύμα  $I_{sh}$ . Η αντίσταση σειράς  $R_s$ , παριστά την εσωτερική αντίσταση του κυττάρου, και εξαρτάται από το βάθος της επαφής p-n, τις προσμείξεις, και την αντίσταση της επαφής. Η  $R_{sh}$  αντίσταση είναι αντιστρόφως ανάλογη με το ρεύμα που την διαρρέει. Σε ένα ιδανικό φωτοβολταϊκό κύτταρο, η  $R_s = 0$  (καμία απώλεια σε σειρά), και η  $R_{sh} = \infty$  (καμία διαρροή στην γη). Σε ένα τυπικής υψηλής ποιότητας μίας τετραγωνικής ίντσας κύτταρο πυριτίου, η  $R_s$  κυμαίνεται από 0,05 έως 0,10  $\Omega$  και η  $R_{sh}$  από 200 έως 300  $\Omega$ . Η απόδοση μετατροπής του φωτοβολταϊκού κυττάρου, είναι ευαίσθητη στις μικρές διακυμάνσεις της  $R_s$ , αλλά δεν είναι ευαίσθητη στις διακυμάνσεις της  $R_{sh}$ . Μια μικρή αύξηση στην  $R_s$  μπορεί να μειώσει σημαντικά την έξοδο του φωτοβολταϊκού.

Στο ισοδύναμο κύκλωμα, το ρεύμα που δίδεται στο εξωτερικό φορτίο, ισούται με το ρεύμα  $I_L$  που παράγεται από το φωτισμό, μείον το ρεύμα της διόδου  $I_d$  και το ρεύμα  $I_{sh}$ . Η τάση  $V_{oc}$  ανοικτού κυκλώματος του κυττάρου, επιτυγχάνεται όταν το ρεύμα του φορτίου είναι μηδέν, δηλαδή, όταν  $I = 0$ , και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$V_{oc} = V + I * R_{sh} \quad (6.1)$$

Το ρεύμα διόδου δίνεται από την κλασική σχέση ρεύματος της διόδου

$$I_d = I_D * [e^{(Q * V_{oc}) / (A * k * T)} - 1] \quad (6.2)$$

όπου

$I_D$  = το ρεύμα κορεσμού της διόδου

$Q$  = το ηλεκτρικό φορτίο =  $1,6 * 10^{-19}$  Coulomb

$A$  = σταθερά προσαρμογής καμπύλης

$k$  = σταθερά του Boltzmann

$T$  = η θερμοκρασία στην απόλυτη κλίμακα Kelvin

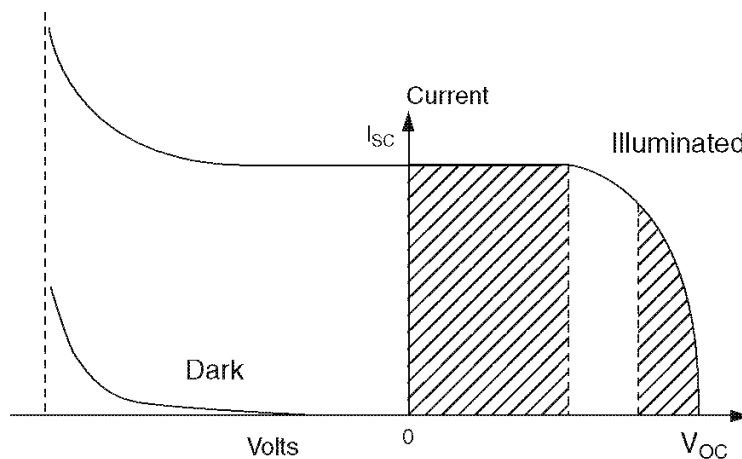
Το ρεύμα φορτίου ως εκ τούτου δίδεται από την σχέση:

$$I = IL - ID * [e^{(Q*Voc)} / (A*k*T) - 1] - Voc / Rsh \quad (6.3)$$

Ο τελευταίος όρος, είναι το ρεύμα διαρροής στην γη. Στα πραγματικά στοιχεία, είναι ασήμαντο συγκρινόμενο με τα  $IL$  και  $ID$  και γενικά αγνοείται. Το ρεύμα κορεσμού της διόδου επομένως μπορεί να καθοριστεί πειραματικά, με την εφαρμογή μιας τάσης  $Voc$  στο φωτοβολταϊκό κύτταρο στο σκοτάδι και μετρώντας το ρεύμα που πηγαιίνει στο κύτταρο. Αυτό το ρεύμα, ονομάζεται «ανάστροφο ρεύμα κορεσμού διόδου».

#### 6.4. ΤΑΣΗ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΡΕΥΜΑ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΣΗΣ

Οι δύο πιο σημαντικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται ευρέως, για να περιγράψουν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά λειτουργίας του κυττάρου, είναι η τάση ανοικτού κυκλώματος  $Voc$  και το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $Isc$  κάτω από πλήρη φωτισμό. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης, μετράται βραχυκυκλώνοντας τους ακροδέκτες εξόδου και μετρώντας το ρεύμα που περνά από αυτούς. Αγνοώντας το ρεύμα της μικρής διόδου και αυτό που ρέει προς την γη υπό μηδενική τάση πάνω στους ακροδέκτες λόγω βραχυκύκλωσης τους, το ρεύμα βραχυκύκλωσης υπό αυτές τις συνθήκες είναι το φωτόρευμα  $IL$ .



ΣΧΗΜΑ 6.7 Καμπύλη ρεύματος έναντι τάσης (I-V) του φωτοβολταϊκού πλαισίου στο φως του ήλιου και στο σκοτάδι.

Η μέγιστη φωτοτάση, παράγεται υπό την τάση ανοικτού κυκλώματος. Και πάλι, αγνοώντας το ρεύμα διαρροής στην γη, η εξίσωση 6.3 με  $I = 0$  δίνει την τάση ανοικτού κυκλώματος ως εξής:

$$V_{oc} = (A * k * T / Q) * \log_n (I_L / I_D + 1) \quad (6.4)$$

Ο όρος  $k * T / Q$ , εκφράζεται σε τάση (0.026 V στους 300 ° K). Στα πραγματικά φωτοκύτταρα, το φωτόρευμα είναι αρκετές τάξεις μεγέθους, μεγαλύτερο από το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού. Επομένως, η τάση ανοικτού κυκλώματος, είναι πολλές φορές μεγαλύτερη της τιμής  $k * T / Q$ . Υπό συνθήκες σταθερού φωτισμού, το  $I_L / I_D$  είναι μία επαρκώς ισχυρή σχέση της θερμοκρασίας του κυττάρου, και το ηλιακό κύτταρο, δείχνει συνήθως έναν αρνητικό συντελεστή θερμοκρασίας τάσης ανοικτού κυκλώματος.

### 6.5. ΚΑΜΠΥΛΕΣ I-V ΚΑΙ P-V

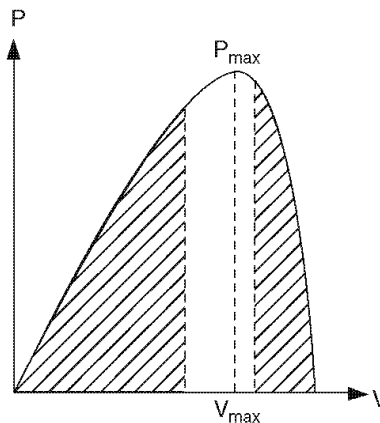
Η ηλεκτρική χαρακτηριστική καμπύλη του φωτοβολταϊκού κυττάρου, αναπαρίσταται από το ρεύμα έναντι της τάσης, (I-V) καμπύλη. Το σχήμα 6.7, δείχνει την χαρακτηριστική καμπύλη I-V ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου υπό δύο συνθήκες, στο φως του ήλιου και στο σκοτάδι. Στο πρώτο τεταρτημόριο, το άνω αριστερά της καμπύλης I-V στην μηδενική τάση, ονομάζεται ρεύμα βραχυκυκλώματος. Αυτό είναι το ρεύμα, που θα μετρούσαμε με τους ακροδέκτες εξόδου βραχυκυκλωμένους (μηδενική τάση). Το κάτω δεξιά της καμπύλης σε μηδέν ρεύμα, ονομάζεται τάση ανοικτού κυκλώματος. Αυτή είναι η τάση που θα μετρούσαμε, με τους ακροδέκτες εξόδου ανοικτούς (μηδενικό ρεύμα). Στην σκιασμένη περιοχή αριστερά, το κύτταρο λειτουργεί ως πηγή σταθερού ρεύματος, παράγοντας μία τάση που προσαρμόζεται με την αντίσταση φορτίου. Στη σκιασμένη περιοχή στα δεξιά, το ρεύμα πέφτει γρήγορα, με μια μικρή αύξηση της τάσης. Στην περιοχή αυτή, το κύτταρο λειτουργεί σαν μια σταθερή πηγή τάσης, με εσωτερική αντίσταση. Κάπου στη μέση των δύο σκιασμένων περιοχών, η καμπύλη έχει ένα σημείο γόνατος.

Εάν μια τάση εφαρμόζεται εξωτερικά στην αντίθετη κατεύθυνση, για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια μιας παροδικής βλάβης του συστήματος, το ρεύμα του κυττάρου παραμένει επίπεδο, και η ισχύς απορροφάται από το κύτταρο, με μια αρνητική τάση και θετικό ρεύμα. Ωστόσο, πέρα από μια ορισμένη αρνητική τάση, η επαφή διασπάται όπως σε μια δίοδο, και το ρεύμα αυξάνεται σε υψηλή τιμή. Στο σκοτάδι, το ρεύμα είναι μηδέν, για κάθε τάση μέχρι την τάση διάσπασης, η οποία είναι ίδια όπως και στην κατάσταση με φως.

Η ισχύς εξόδου του πάνελ, είναι το γινόμενο της τάσης και του ρεύματος εξόδου. Στο Σχήμα 6.8, εικονίζεται η ισχύς, συναρτήσεως της τάσης. Σημειώστε ότι το κύτταρο, δεν παράγει ισχύ για μηδενική τάση ή μηδενικό ρεύμα, και παράγει τη μέγιστη ισχύ, στην τάση που αντιστοιχεί στο σημείο γόνατο της καμπύλης I-V. Αυτός είναι ο λόγος που το φωτοβολταϊκό κύκλωμα ισχύος, έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί κοντά στο σημείο του γονάτου με μια ελαφριά κλίση προς την αριστερή πλευρά. Το κύκλωμα ΦΒ μοντελοποιείται περίπου σαν μια πηγή σταθερού ρεύματος. από την ηλεκτρική ανάλυση του συστήματος.

Το Σχήμα 6.9 είναι η χαρακτηριστική καμπύλη I-V ενός 22 W πάνελ, σε δύο φωτισμούς εντάσεων, 1000 W / m<sup>2</sup> και 500 W / m<sup>2</sup>. Αυτές οι καμπύλες είναι σε Μάζα Αέρα 1,5 (Air mass AM 1.5). Η μάζα αέρα 0 (AM 0) εκπροσωπεί την συνθήκη κενού,

στην οποία η ηλιακή ακτινοβολία είναι  $1350 \text{ W / m}^2$ . Η AM 1 εκπροσωπεί πρότυπες συνθήκες ήλιου μιας καθαρής ατμόσφαιρας της γης, σε ένα στεγνό μεσημέρι.



ΣΧΗΜΑ 6.8 Ισχύς έναντι τάσης (P-V) χαρακτηριστική καμπύλη του πάνελ φωτοβολταϊκών κυττάρων ΦΒ στο φως.

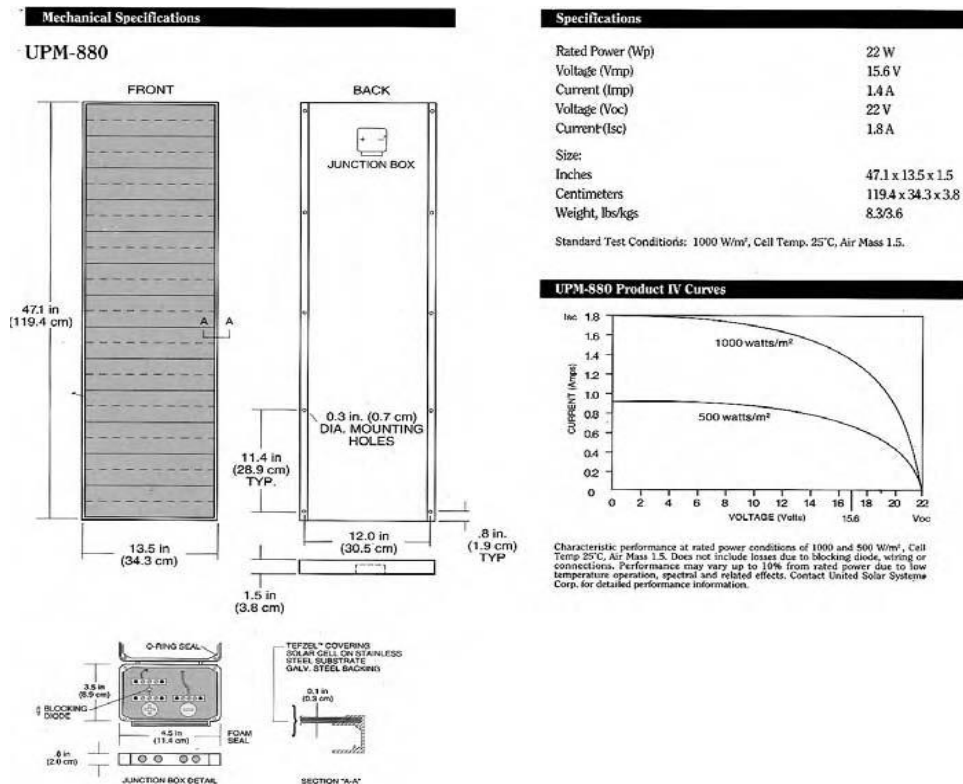
Έτσι, η AM 1 εκπροσωπεί ιδανικές συνθήκες σε καθαρό αέρα, όταν το ηλιακό φως συναντά την ελάχιστη αντίσταση για να φθάσει στην γη. Η AM 1.5 εκπροσωπεί έναν μέσο όρο ποιότητας ατμόσφαιρας, με μέση υγρασία και ρύπανση αέρα με μέση κλίση. Η AM 1.5, ως εκ τούτου, λαμβάνεται ως τιμή αναφοράς, για τον σχεδιασμό επίγειων φωτοβολταϊκών. Στα βόρεια υψόμετρα με τον Ήλιο στις  $15^\circ$  γωνία από τον ορίζοντα, ο δείκτης AM μπορεί να είναι τόσο υψηλός και να φθάνει το 4, όταν το ηλιακό φως συναντά υψηλή αντίσταση, πριν φθάσει στην επιφάνεια της γης.

Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει σε μια κανονική επιφάνεια μια φωτεινή μέρα με AM1.5, είναι  $1000 \text{ W / m}^2$ , και θα είναι χαμηλή σε μια συννεφιασμένη μέρα. Η  $500 \text{ W / m}^2$  ηλιακή ένταση είναι μια άλλη συνθήκη αναφοράς, που η βιομηχανίας χρησιμοποιεί για να αναφέρει τις καμπύλες I-V. Η απόδοση φωτομετατροπής του Φωτοβολταϊκού κυττάρου, ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\eta = \text{Ηλεκτρική ισχύς εξόδου} / \text{Ηλιακή ισχύς που προσπίπτει στο κύτταρο} \quad (6.5)$$



## Συστήματα Αιολικής και Ηλιακής Ενέργειας



ΣΧΗΜΑ 6.9 Καμπύλη I-V ενός πάνελ 22-W ΦΒ σε πλήρη και μισή ένταση ηλιακής ενέργειας.

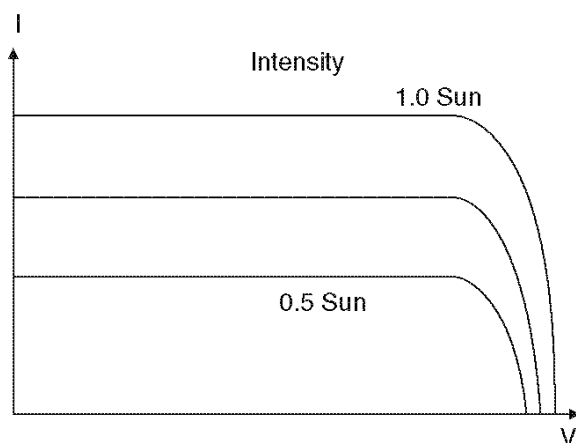
Προφανώς όσο αυξάνεται η απόδοση, αυξάνεται η ισχύς εξόδου που παίρνουμε για δεδομένη φωτεινότητα.

### 6.6. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ

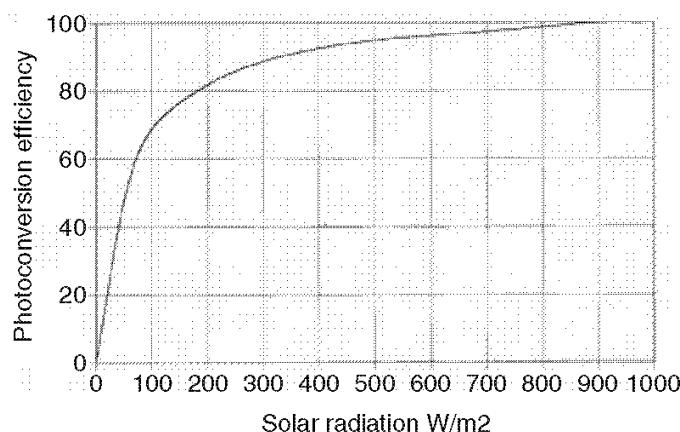
Οι μεγαλύτεροι παράγοντες που επηρεάζουν την ηλεκτρική σχεδίαση της ηλιακής συστοιχίας φωτοβολταϊκών πάνελ, είναι οι:

- Η ένταση του Ήλιου
- Η γωνία του Ήλιου
- Η προσαρμογή του φορτίου για μέγιστη ισχύ
- Η θερμοκρασία λειτουργίας

Οι παράγοντες αυτοί περιγράφονται στις ακόλουθες ενότητες



ΣΧΗΜΑ 6.10 Καμπύλη η I-V πάνελ ΦΒ ολισθαίνει (γέρνει) προς τα κάτω σε χαμηλότερη ηλιακή ένταση, με μικρή μείωση της τάσης.



ΣΧΗΜΑ 6.11 Απόδοση φωτομετατροπής έναντι ηλιακής ακτινοβολίας (πρακτικά σταθερή για μία μεγάλη περιοχή ακτινοβολίας).

### 6.6.1. ΕΝΤΑΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

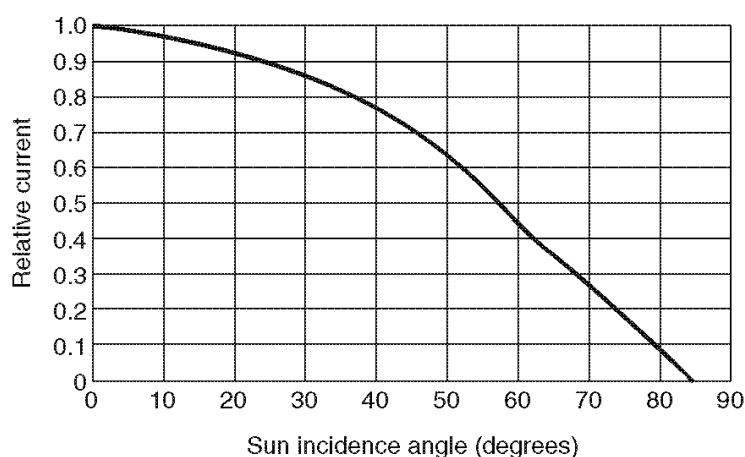
Το μέγεθος του φωτορεύματος, είναι μέγιστο κάτω από ένα λαμπρό πλήρη ήλιο (1,0 ήλιος). Σε μια μερικώς ηλιόλουστη μέρα, το φωτορεύμα, μειώνεται σε αναλογία με την ένταση του ήλιου. Σε μια χαμηλότερη ένταση του ήλιου, οι καμπύλες I-V μετατοπίζονται προς τα κάτω, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.10. Σε μια θολή ημέρα ως εκ τούτου, το ρεύμα βραχυκυκλώματος μειώνεται σημαντικά. Η μείωση της τάσης ανοικτού κυκλώματος ωστόσο, είναι μικρή.

Η απόδοση φωτομετατροπής του κυττάρου, δεν είναι ευαίσθητη στην ακτινοβολία από τον ήλιο, στην πραγματική περιοχή εργασίας. Για παράδειγμα, το Σχήμα 6.11, δείχνει ότι η απόδοση είναι πρακτικά η ίδια στα 500 W / m<sup>2</sup> και στα 1000 W / m<sup>2</sup>. Αυτό σημαίνει ότι η απόδοση μετατροπής, είναι η ίδια σε μια φωτεινή ηλιόλουστη μέρα και σε μια συννεφιασμένη μέρα. Λαμβάνουμε μειωμένη ισχύ εξόδου

σε μια συννεφιασμένη μέρα, μόνο λόγω της χαμηλότερης ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στο κύτταρο.

Πίνακας 6.1

Kelly Cosine Values of the Photocurrent in Silicon Cells		
Sun Angle Degrees	Mathematical Cosine Value	Kelly Cosine Value
30	0.866	0.866
50	0.643	0.635
60	0.500	0.450
80	0.174	0.100
85	0.087	0



ΣΧΗΜΑ 6.12 Καμπύλη συνημίτονου Kelly για φωτοβολταϊκό κύτταρο σε γωνίες Ήλιου από 0 έως 90 μοίρες.

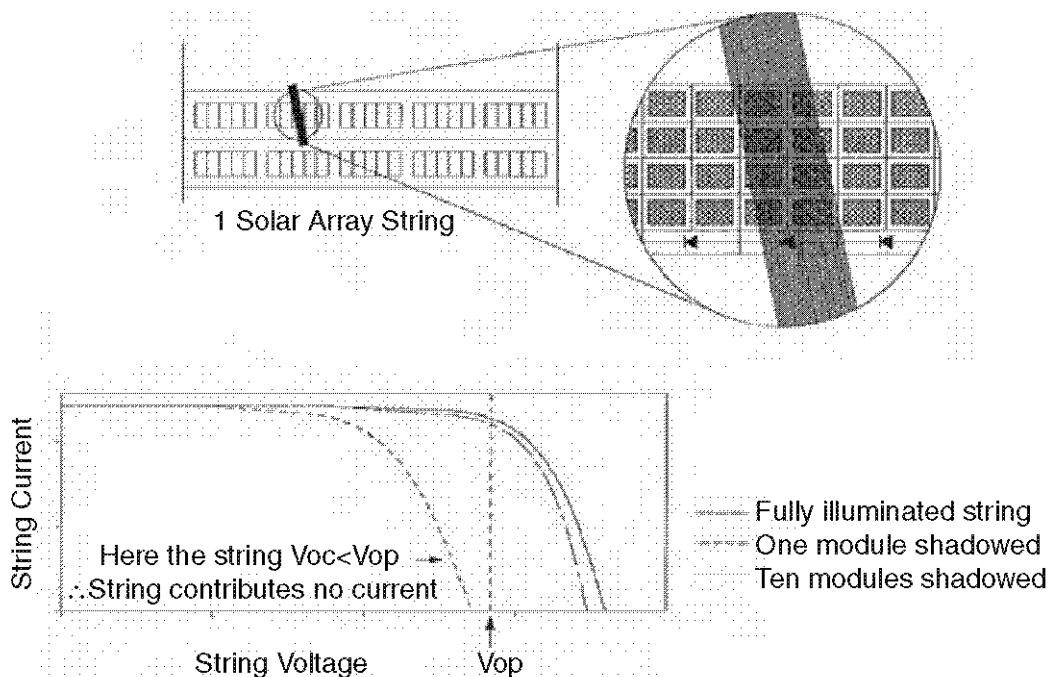
### 6.6.2. ΓΩΝΙΑ ΗΛΙΟΥ

Το ρεύμα εξόδου του κυττάρου είναι  $I = I_0 \cos\theta$ , όπου  $I_0$  είναι το ρεύμα με κανονικό ήλιο (αναφορά), και  $\theta$  είναι η γωνία της γραμμής του ήλιου, μετρημένη από την κανονική. Αυτός ο νόμος του συνημίτονου, ισχύει για γωνίες ήλιου που κυμαίνονται από 0 έως 50°. Πέραν από τις 50°, η ηλεκτρική έξοδος αποκλίνει σημαντικά από τον νόμο συνημίτονου, και το κύτταρο, δεν καμία ισχύ πέρα από τις 85°, αν και ο μαθηματικός νόμος του συνημίτονου, προβλέπει μια παραγωγή του 7,5% της ισχύος (Πίνακας 6.1). Η πραγματική καμπύλη ισχύος-γωνίας του φωτοβολταϊκού κυττάρου, που ονομάζεται συνημίτονο Kelly, παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.12.

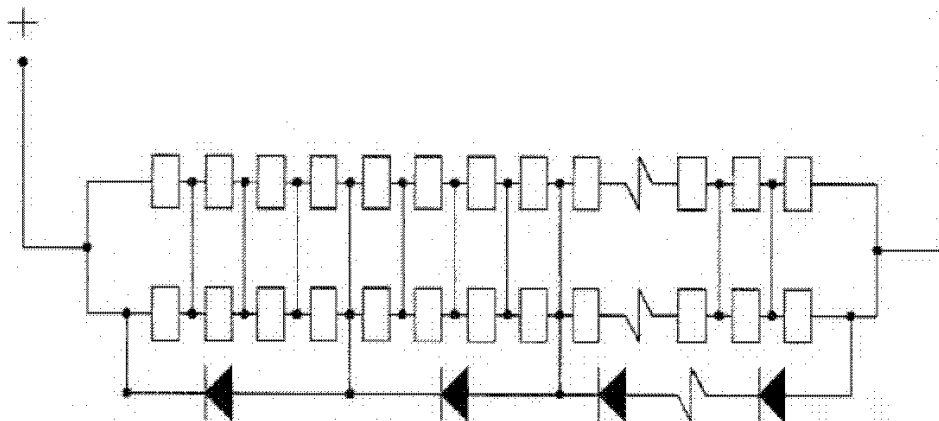
### 6.6.3. ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΣΚΙΑΣΗΣ

Η συστοιχία, μπορεί να αποτελείται από πολλές αλυσίδες κυττάρων συνδεδεμένων σε σειρά. Δύο τέτοιες αλυσίδες, φαίνονται στο σχήμα 6.13. Μια μεγάλη

συστοιχία, μπορεί να σκιαστεί μερικώς, λόγω μιας δομής που παρεμβαίνει στην γραμμή του ήλιου. Εάν ένα κύτταρο σε μια μακριά συστοιχία σκιάζεται εντελώς, χάνει την φωτοτάση του, αλλά ακόμα μεταφέρει το ρεύμα της αλυσίδας στην οποία ανήκει και βρίσκεται σε σειρά, με όλα τα άλλα κύτταρα που λειτουργούν στον πλήρη φωτισμό του ήλιου. Χωρίς εσωτερικά παραγόμενη τάση, το κύτταρο δεν μπορεί να παράγει ισχύ. Αντί αυτού, ενεργεί σαν φορτίο, προκαλώντας κατανάλωση τιμής  $I^2 \cdot R$  και παραγωγή θερμότητας. Τα υπόλοιπα κύτταρα στην αλυσίδα, πρέπει να εργάζονται σε υψηλότερη τάση, για να αντισταθμίσουν την απώλεια τάσης του σκιασμένου κυττάρου. Υψηλότερη τάση μέσα σε υγιή κύτταρα, σημαίνει χαμηλότερο ρεύμα στην αλυσίδα κυττάρων, όπως φαίνεται στην χαρακτηριστική καμπύλη I-V της αλυσίδας. Αυτό δείχνεται στο κάτω αριστερό μέρος του σχήματος 6.13. Η απώλεια ρεύματος, δεν είναι ανάλογη με τη σκιασμένη περιοχή, και μπορεί να περάσει απαρατήρητη, για μια μισοσκιασμένη μικρή περιοχή. Ωστόσο, εάν περισσότερα κύτταρα σκιάζονται πέρα από το κρίσιμο όριο, η καμπύλη I-V πέφτει κάτω από την τάση λειτουργίας της αλυσίδας, κάνοντας το ρεύμα της να πέφτει στο μηδέν, χάνοντας όλη της ισχύ της αλυσίδας. Αυτό προκαλεί απώλεια μιας ολόκληρης αλυσίδας από την συστοιχία.



ΣΧΗΜΑ 6.13 Φαινόμενο σκίασης σε μία μακριά αλυσίδα μιας συστοιχίας (Η υποβάθμιση ισχύος είναι μικρή μέχρι η σκίαση να ξεπεράσει ένα κρίσιμο όριο).



ΣΧΗΜΑ 6.14 Δίοδος παράκαμψης σε αλυσίδα ΦΒ ελαχιστοποιεί την απώλεια ισχύος κάτω από μεγάλη σκίαση.

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται συνήθως για την μείωση της απώλεια ισχύος μιας αλυσίδας, που οφείλεται σε πιθανή σκίαση, είναι να υποδιαιρέσει το μήκος κυκλώματος, σε πολλά τμήματα με διόδους παράκαμψης (Σχήμα 6.14). Η δίοδος σε όλο το σκιασμένο τμήμα, παρακάμπτει μόνο αυτό το τμήμα της αλυσίδας. Αυτό προκαλεί μια αναλογική απώλεια τάσης και ρεύματος της αλυσίδας, χωρίς να απολεσθεί η ισχύς ολόκληρης αυτής της αλυσίδας. Μερικά σύγχρονα φωτοβολταϊκά πάνελ, έρχονται με τέτοιες εσωτερικά ενσωματωμένες διόδους παράκαμψης.

#### 6.6.4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Με την αύξηση της θερμοκρασίας, το ρεύμα βραχυκυκλώματος των κυττάρων αυξάνεται, ενώ μειώνεται η τάση ανοικτού κυκλώματος (Σχήμα 6.15). Η επίδραση της θερμοκρασίας στην ισχύ κυττάρου (ΦΒ κυττάρου) εκτιμάται ποσοτικά, εξετάζοντας την επίδραση του ρεύματος και της τάσης ξεχωριστά. Ας υποθέσουμε ότι  $I_0$  και  $V_0$  είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης και η τάση ανοικτού κυκλώματος στην θερμοκρασία αναφοράς  $T$ , και  $\alpha$  και  $\beta$  είναι οι αντίστοιχοι συντελεστές θερμοκρασία τους. Εάν η θερμοκρασία λειτουργίας αυξάνεται κατά  $\Delta T$ , τότε το νέο ρεύμα και η τάση, δίδονται από τους ακόλουθους τύπους:

$$I_{sc} = I_0(1 + \alpha \Delta T) \quad \text{και} \quad V_{oc} = V_0(1 - \beta \Delta T) \quad (6.6)$$

Επειδή το ρεύμα λειτουργίας και η τάση, αλλάζουν περίπου με την ίδια αναλογία με το ρεύμα βραχυκυκλώματος και της τάσης ανοικτού κυκλώματος, αντίστοιχα, η νέα ισχύς έχει ως εξής:

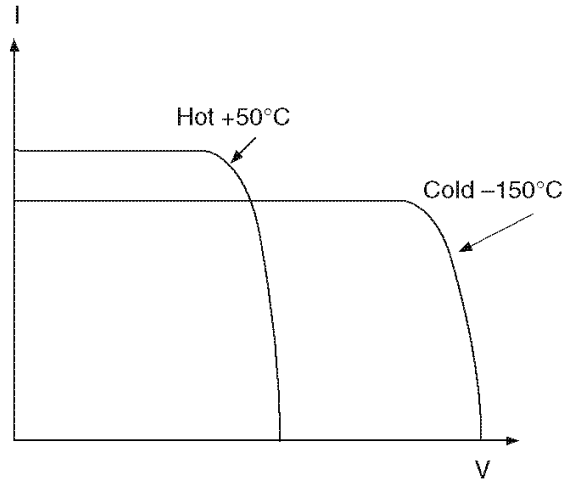
$$P = VI = I_0(1 + \alpha \Delta T) V_0 (1 - \beta \Delta T) \quad (6.7)$$

Αυτή μπορεί να απλοποιηθεί στην ακόλουθη έκφραση, αγνοώντας έναν μικρό όρο:

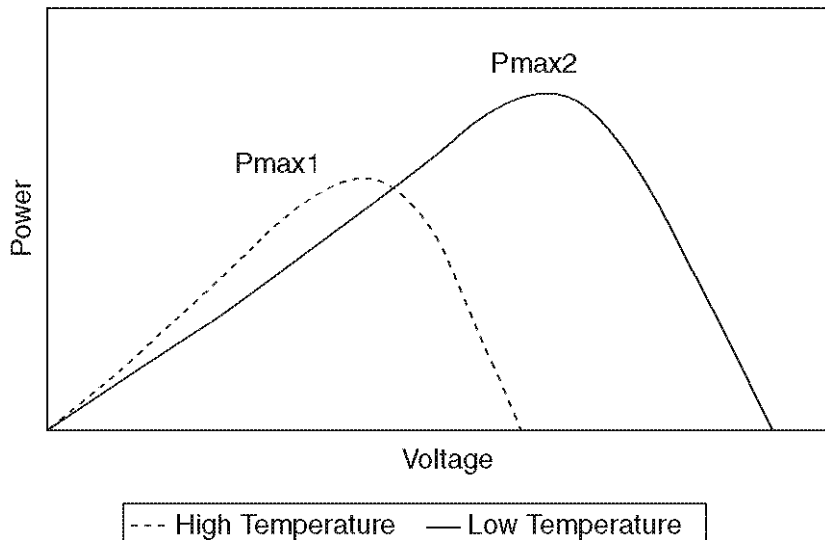
$$P = P_o[1 + (\alpha - \beta) \Delta T] \quad (6.8)$$

Για ένα τυπικό κύτταρο πυριτίου μονού κρυστάλλου,  $\alpha$  είναι περίπου  $20 \mu\text{m} / ^\circ\text{C}$  και  $\beta$  είναι περίπου  $5\text{m} / ^\circ\text{C}$ , όπου το  $\mu$  σημαίνει μονάδα. Η ισχύς, ως εκ τούτου, δίδεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$P = P_o[1 + (20 \times 10^{-6} - 5 \times 10^{-3}) \Delta T] \quad \text{ή} \quad P = P_o[1 - 0.005 \Delta T] \quad (6.9)$$



ΣΧΗΜΑ 6.15 Επίδραση της θερμοκρασίας στην καμπύλη I-V (το κύτταρο παράγει λιγότερο ρεύμα αλλά μεγαλύτερη τάση, με καθαρό κέρδος σε ισχύ εξόδου στις χαμηλές θερμοκρασίες).



ΣΧΗΜΑ 6.16 Επίδραση της θερμοκρασίας στην καμπύλη P-V (το κύτταρο παράγει περισσότερη ισχύ σε χαμηλές θερμοκρασίες).

Αυτή η σχέση, δείχνει ότι για κάθε αύξηση ενός βαθμού Κελσίου, της θερμοκρασίας λειτουργίας πάνω από τη θερμοκρασία αναφοράς, η ισχύς εξόδου του κυττάρου πυριτίου, μειώνεται περίπου κατά 0,5%. Επειδή η αύξηση του ρεύματος είναι πολύ μικρότερη από την μείωση της τάσης, το καθαρό αποτέλεσμα είναι μείωση στην ισχύ, σε υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας.

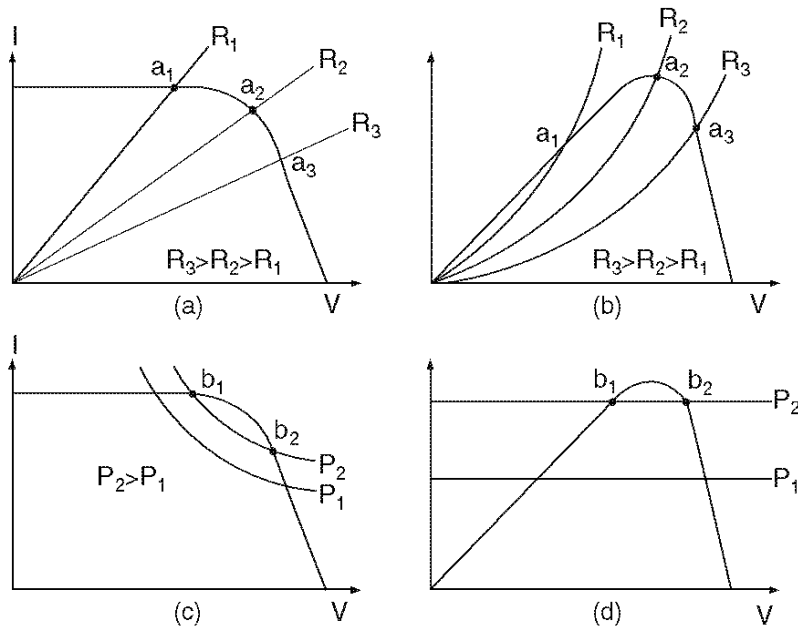
Η επίδραση της θερμοκρασίας στην ισχύ εξόδου, απεικονίζεται στην καμπύλη ισχύος έναντι της τάσεως, σε δύο θερμοκρασίες λειτουργίας στο Σχήμα 6.16. Η εικόνα δείχνει ότι η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς σε χαμηλότερη θερμοκρασία, είναι υψηλότερη από εκείνη σε υψηλότερη θερμοκρασία. Έτσι, μια κρύα μέρα είναι καλύτερη για το φωτοβολταϊκό κύτταρο, καθώς παράγει περισσότερη ισχύ. Ωστόσο, τα δύο σημεία  $P_{max}$  δεν είναι στην ίδια τάση. Προκειμένου να εξαχθεί η μέγιστη ισχύς σε όλες τις θερμοκρασίες, το φωτοβολταϊκό σύστημα θα πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε, η τάση εξόδου του πάνελ να μπορεί να αυξηθεί στο  $V_2$  για τη συλλογή  $P_{max2}$  σε χαμηλότερη θερμοκρασία και να μπορεί να μειωθεί σε  $V_1$  για τη σύλληψη  $P_{max1}$  σε υψηλότερη θερμοκρασία. Αυτό επιβαρύνει την πολυπλοκότητα σχεδίασης του συστήματος.

#### **6.6.5. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΚΛΙΜΑΤΟΣ**

Σε μια εν μέρει συννεφιασμένη μέρα, το φωτοβολταϊκό πλαίσιο μπορεί να παράγει έως και 80% της πλήρους ηλιακής ισχύος. Μπορεί να παράγει περίπου το 30% της ισχύος, ακόμη και με βαριά σύννεφα σε μια εξαιρετικά συννεφιασμένη την ημέρα. Το χιόνι συνήθως δεν συλλέγει ενέργεια, γιατί βρίσκεται υπό γωνία για να συλλέξει ηλιακή ενέργεια. Αν το χιόνι κάνει συλλογή ενέργειας γρήγορα, λιώνει. Μηχανικά, το πλαίσιο έχει σχεδιαστεί για να αντέχει χαλάζι μεγέθους μπάλας του γκολφ.

#### **6.6.6. ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΦΟΡΤΙΟΥ**

Το σημείο λειτουργίας του κάθε συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, είναι η τομή της γραμμής πηγής και της γραμμής φορτίου. Εάν η φωτοβολταϊκή πηγή που έχει χαρακτηριστικές καμπύλες I-V και P-V όπως δείχνονται στο σχήμα 6.17(α), τροφοδοτεί ισχύ σε πραγματικής αντίστασης φορτίο  $R_1$ , θα λειτουργεί στο σημείο A1. Αν η αντίσταση φορτίου αυξάνεται σε  $R_2$  ή  $R_3$ , το σημείο λειτουργίας μετακινείται στο A2 ή το A3 αντίστοιχα. Η μέγιστη ισχύς, ανακτάται από το πλαίσιο, όταν η αντίσταση φορτίου είναι  $R_2$  (σχήμα 6.17b). Ένα τέτοιο φορτίο που προσαρμόζεται με την πηγή, είναι πάντα απαραίτητο, για τη μέγιστη παραγωγή ισχύος από μια πηγή ΦΒ.



ΣΧΗΜΑ 6.17 Σταθερότητα λειτουργίας και ηλεκτρική προσαρμογή φορτίου με φορτίο σταθερής αντίστασης και ισχύος.

Η λειτουργία με ένα φορτίο σταθερής ισχύος, φαίνεται στο σχήμα 6.17 (c) και σχήμα 6.17 (d). Η γραμμή φορτίου σταθερής ισχύος, έχει δύο σημεία τομής με την γραμμή της πηγής, που συμβολίζονται με B1 και B2. Μόνο το σημείο B2 είναι σταθερό, καθώς κάθε διαταραχή από αυτό, παράγει ισχύ επαναφοράς, για να φέρει την λειτουργία πίσω στο B2, και το σύστημα συνεχίζει να λειτουργεί στο B2 με σταθερότητα.

Επομένως, η απαραίτητη συνθήκη για την σταθερότητα της ηλεκτρικής λειτουργίας της ΦΒ συστοιχίας έχει ως εξής:

$$[dP / dV]_{\text{φορτίου}} > [dP / dV]_{\text{πηγής}} \quad (6.10)$$

Μερικά φορτία όπως θερμάστρες, έχουν σταθερές αντιστάσεις, που απορροφούν ισχύ η οποία μεταβάλλεται με το τετράγωνο της τάσης. Άλλα φορτία όπως επαγωγικοί κινητήρες συμπεριφέρονται περισσότερο σαν φορτία σταθερής ισχύος. Τραβάνε περισσότερο ρεύμα σε χαμηλότερη τάση και αντιστρόφως. Στα περισσότερα συστήματα με μεγάλα μικτά φορτία, η δύναμη κυμαίνεται περίπου γραμμικά, σε σχέση με την τάση.

### 6.6.7. ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΗΛΙΟΥ

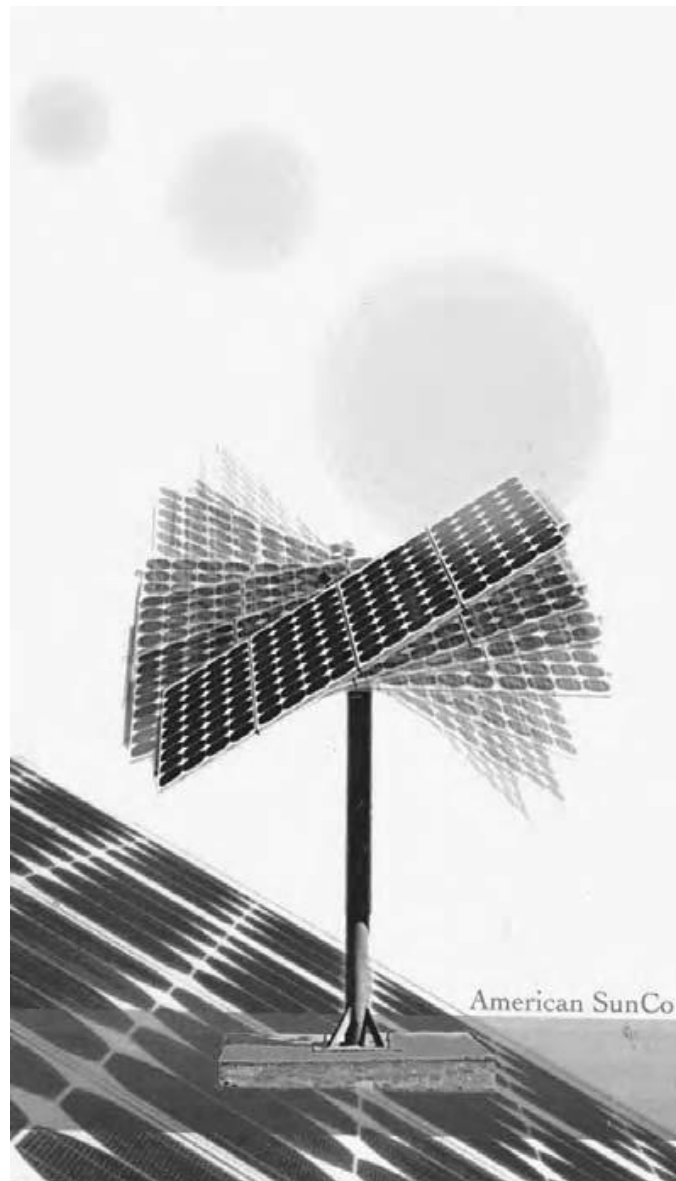
Περισσότερη ενέργεια συλλέγεται μέχρι το τέλος της ημέρας, αν το φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι τοποθετημένο πάνω σε έναν ιχνηλάτης (tracker) με κινητήρα, που ακολουθεί τον ήλιο. Υπάρχουν δύο τύποι παρακολουθητών Ηλίου:

- Ιχνηλάτης ενός άξονα, ο οποίος ακολουθεί τον ήλιο από την ανατολή στη δύση κατά τη διάρκεια της ημέρας.



## Συστήματα Αιολικής και Ηλιακής Ενέργειας

- Ιχνηλάτης δύο αξόνων, ο οποίο ακολουθεί τον ήλιο από την ανατολή στη δύση κατά τη διάρκεια της ημέρας, και από βορρά προς νότο κατά τη διάρκεια των εποχών του έτους (Σχήμα 6.18).



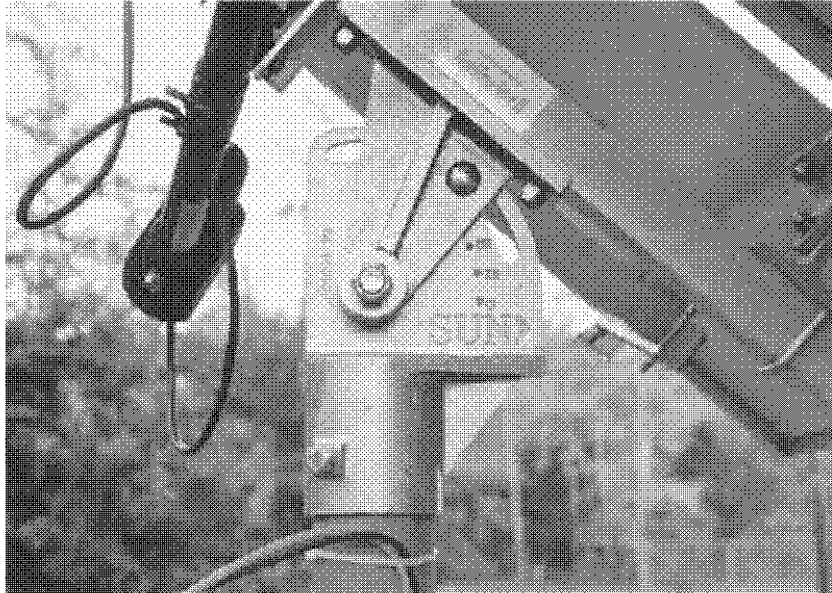
ΣΧΗΜΑ 6.18 Ιχνηλάτης δύο αξόνων που ακολουθεί τον ήλιο καθ' όλο το έτος.

Ένας ιχνηλάτης, μπορεί να αυξήσει την ενεργειακή απόδοση έως και 40% στη διάρκεια του έτους, σε σύγκριση με μια σταθερή συστοιχία. Η ιχνηλάτιση δύο αξόνων, γίνεται με δύο γραμμικούς ηλεκτροκινητήρες, που παρακολουθούν τον ήλιο με ακρίβεια μιας μοίρας (Σχήμα 6.19). Κατά την διάρκεια της ημέρας, ακολουθεί τον ήλιο από τα ανατολικά προς τα δυτικά. Το βράδυ επιστρέφει ανατολικά και παίρνει θέση για τον πρωινό ήλιο. Οι παλιοί παρακολουθητές, το έκαναν αυτό μετά την δύση, χρησιμοποιώντας μια μικρή μπαταρία νικελίου-καδμίου. Η νέα σχεδίαση εξαλείφει την απαίτηση μπαταρίας, κάνοντας την επιστροφή στο αδύναμο φως του σούρουπου ή και την αυγή. Το συνημίτονο της Kelly, που παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.1 είναι χρήσιμο

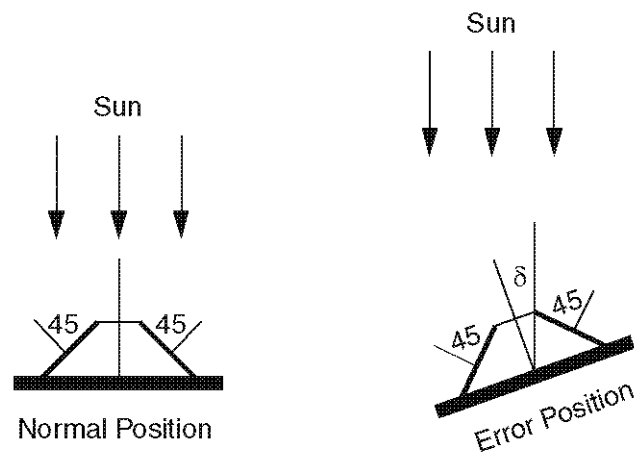
## Συστήματα Αιολικής και Ηλιακής Ενέργειας

για τον υπολογισμό της ισχύος του προσπίπτοντος φωτός του ήλιου σε ακραίες γωνίες το πρωί ή το βράδυ.

Όταν ένα σκοτεινό σύννεφο συσκοτίζει τον ήλιο, ο παρακολουθητής ενδέχεται να στοχεύει στο επόμενο φωτεινότερο αντικείμενο, το οποίο είναι γενικά η άκρη του σύννεφου. Όταν το σύννεφο φύγει, ο παρακολουθητής ξαναστοχεύει τον ήλιο, και ούτω καθεξής. Αυτό το κινήγι του ήλιου, εξαλείφεται σε νεότερους παρακολουθητές ήλιου.



ΣΧΗΜΑ 6.19 Ηλεκτροκινητήρας παρακολουθητή.



ΣΧΗΜΑ 6.20 Αρχή παρακολουθητή ηλίου (Δύο διαφορετικά συνδεδεμένοι αισθητήρες σε  $45^\circ$  παράγουν σήματα ανάλογα του σφάλματος σκόπευσης).

Μία μέθοδος σχεδίασης ενός παρακολουθητή, είναι η χρήση δύο φωτοβολταϊκών κυψελών (στοιχείων, κυττάρων) τοποθετημένες σε δύο όψεις (πλευρές) τριγωνικού πρίσματος των  $45^\circ$  (Σχήμα 6.20), και συνδέοντάς τες διαφορετικά, σε σειρά με έναν ηλεκτροκινητήρα. Όταν ο ήλιος είναι σε κανονική θέση, τα ρεύματα και στις δύο όψεις

(πλευρές) των κυττάρων, είναι ίσα με  $I \cos 45^\circ$ . Καθώς αυτά συνδέονται σε σειρά και με αντίθεση φορά, το καθαρό ρεύμα στον κινητήρα είναι μηδέν, και η συστοιχία παραμένει στη θέση του. Από την άλλη πλευρά, αν η συστοιχία δεν είναι σε κανονική θέση ως προς τον ήλιο, οι γωνίες στα δύο κύτταρα είναι διαφορετικές, δίνοντας έτσι δύο διαφορετικά ρεύματα ως εξής:

$$I_1 = I \cos(45 + \delta) \quad \text{και} \quad I_2 = I \cos(45 - \delta) \quad (6.11)$$

Το ρεύμα του ηλεκτροκινητήρα συνεπώς είναι:

$$I_m = I_1 - I_2 = I \cos(45 + \delta) - I \cos(45 - \delta) \quad (6.12)$$

Χρησιμοποιώντας σειρές Taylor έχουμε:

$$f(x + h) = f(x) + hf'(x) + \frac{h^2}{2!} f''(x)$$

Μπορούμε να εκφράσουμε τα δύο ρεύματα ως εξής:

$$I_1 = I \cos 45 - I \delta \sin 45 \quad \text{και} \quad I_2 = I \cos 45 + I \delta \sin 45 \quad (6.13)$$

Το ρεύμα του ηλεκτροκινητήρα τότε είναι

$$I_m = I_1 - I_2 = 2I \delta \sin 45^\circ = \sqrt{2} I \delta \quad \text{εάν } \delta \text{ είναι σε ακτίνια} \quad (6.14)$$

Ένας μικρό επιστήλιο πλαίσιο (πάνελ), μπορεί να χρησιμοποιεί ενός άξονα ή δύο αξόνων παρακολουθητή ήλιου. Από την άλλη, μια μεγάλη συστοιχία, χωρίζεται σε μικρά πάνελ, το καθένα στερεωμένο στον δικό του παρακολουθητή ήλιου. Αυτό απλοποιεί την κατασκευή και εξαλείφει τα προβλήματα που σχετίζονται με μεγάλες μετακινήσεις μεγάλων πινάκων (πάνελ).

## 6.7. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Ο παρακολουθητής ήλιου, οδηγεί μηχανικά το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, να «βλέπει» τον ήλιο ώστε να συλλέξει την μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία. Ωστόσο, αυτό από μόνο του, δεν εγγυάται τη μέγιστη ισχύ εξόδου από το πλαίσιο. Όπως φάνηκε στο σχήμα 6.16, το πλαίσιο πρέπει να λειτουργεί ηλεκτρικά σε μία συγκεκριμένη τάση η οποία αντιστοιχεί στο σημείο μέγιστης ισχύος, κάτω από μια δεδομένη κατάσταση λειτουργίας. Πρώτα εξετάζουμε την ηλεκτρική αρχή της μέγιστης ισχύος λειτουργίας.

Εάν η συστοιχία λειτουργεί σε οποιοδήποτε σημείο στην τάση  $V$  και ρεύμα  $I$  στην καμπύλη  $I$ - $V$ , η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι  $P = VI$ . Εάν η λειτουργία απομακρύνεται από το προηγούμενο σημείο έτσι ώστε το ρεύμα τώρα να είναι  $I + \Delta I$ , και η τάση είναι  $V + \Delta V$ , τότε η νέα ισχύς έχει ως εξής:

$$P + \Delta P = (V + \Delta V)(I + \Delta I) \quad (6.15)$$

Όπου αγνοώντας έναν μικρό όρο, απλοποιείται ως εξής:

$$\Delta P = \Delta V * I + \Delta I * V \quad (6.16)$$

Η  $\Delta P$  θα ήταν μηδέν, αν η συστοιχία λειτουργούσε στο σημείο μέγιστης ισχύος, η οποία αναγκαστικά βρίσκεται σε μια τοπικά επίπεδη περιοχή. Επομένως, στο σημείο μέγιστης ισχύος, η προηγούμενη σχέση στο όριο γίνεται:

$$dV / dI = - V / I \quad (6.17)$$

Σημειώνουμε εδώ ότι το  $dV / dI$ , είναι η δυναμική σύνθετη αντίσταση της πηγής, και το  $V / I$  ή στατική σύνθετη αντίσταση. Έτσι στο σημείο μεγίστης ισχύος, ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$\text{Δυναμική σύνθετη αντίσταση } Z_d = - \text{Στατική σύνθετη αντίσταση } Z_s \quad (6.18)$$

Υπάρχουν τρεις ηλεκτρικοί μέθοδοι για την εξαγωγή της μέγιστης ισχύος από μια φωτοβολταϊκή πηγή, όπως περιγράφεται στο κείμενο που ακολουθεί:

1. Στην πρώτη μέθοδο, ένα μικρό ρεύμα σήμα «εγχέεται» περιοδικά στον κεντρικό αγωγό σύνδεσης της συστοιχίας, και μετράται η δυναμική αντίσταση αγωγού ( $Z_d = dV / dI$ ) και η στατική σύνθετη αντίσταση αγωγού ( $Z_s = V / I$ ). Η τάση λειτουργίας τότε, αυξάνεται ή μειώνεται μέχρι η  $Z_d$  να γίνει ίση με  $-Z_s$ . Σε αυτό το σημείο, η μέγιστη ισχύς εξάγεται από την πηγή.

2. Σε μία άλλη μέθοδο, η τάση λειτουργίας αυξάνεται εφόσον το  $dP / dV$  είναι θετικό. Δηλαδή, η τάση αυξάνεται, εφόσον παίρνουμε περισσότερη ισχύ. Αν το  $dP / dV$  ανιχνεύεται αρνητικό, η τάση λειτουργίας μειώνεται. Η τάση παραμένει η ίδια, αν το  $dP / dV$  είναι κοντά στο μηδέν, μέσα σε μια προκαθορισμένη νεκρή ζώνη.

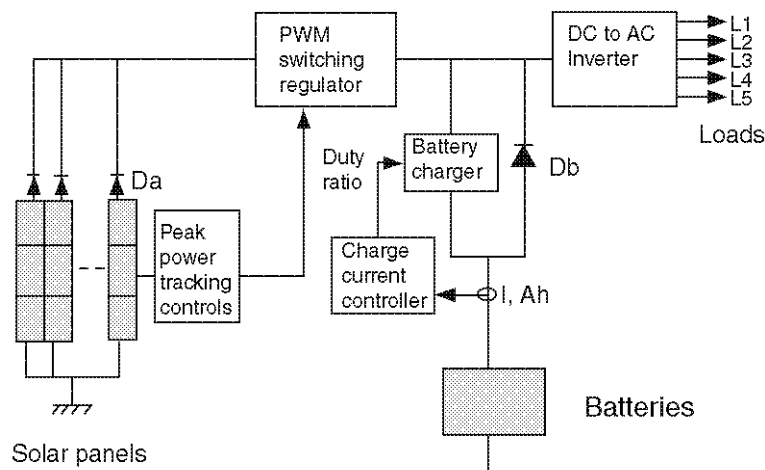
3. Η τρίτη μέθοδος, κάνει χρήση του γεγονότος, ότι για τα περισσότερα φωτοβολταϊκά κύτταρα, ο λόγος της τάσης στο σημείο μέγιστης ισχύος προς την τάση ανοικτού κυκλώματος (δηλαδή,  $V_{mp} / V_{oc}$ ), είναι περίπου σταθερός, δηλαδή  $K$ . Για παράδειγμα, για υψηλής ποιότητας κύτταρα κρυσταλλικού πυριτίου,  $K = 0,72$ . Ένα αφόρτιστο κύτταρο εγκαθίσταται στην συστοιχία και διατηρείται στο ίδιο περιβάλλον με αυτό των κυττάρων που παράγουν ισχύ, και η τάση ανοικτού κυκλώματος του μετράται συνεχώς. Η τάση λειτουργίας της συστοιχίας που παράγει ισχύ τότε είναι  $K * V_{oc}$ , η οποία θα παράγει την μέγιστη ισχύ.

## 6.8. ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η συστοιχία από μόνη της, δεν αποτελεί το φωτοβολταϊκό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Χρειαζόμαστε μια κατασκευή για να την στερεώσουμε, έναν παρακολουθητή ηλίου να κατευθύνει το πλαίσιο (πάνελ) προς τον ήλιο, διάφορους αισθητήρες για την παρακολούθηση της απόδοσης του συστήματος, ηλεκτρονικά ισχύος που δέχονται την DC ενέργεια που παράγεται από την συστοιχία, φορτίζουν την

μπαταρία, και προσαρμόζουν την υπόλοιπη ισχύ, σε μια μορφή που είναι χρήσιμη για το φορτίο. Εάν το φορτίο είναι AC, το σύστημα χρειάζεται έναν μετατροπέα για τη μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο στα 50 ή 60 Hz.

Το σχήμα 6.21, παρουσιάζει τα απαραίτητα στοιχεία ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος ισχύος. Ο παρακολουθητής μέγιστης ισχύος, ανιχνεύει την τάση και το ρεύμα εξόδου της συστοιχίας και ρυθμίζει συνεχώς το σημείο λειτουργίας, για να εξαγάγει την μέγιστη ισχύ κάτω από διάφορες κλιματολογικές συνθήκες. Η έξοδος της συστοιχίας, πηγαίνει στον μετατροπέα, ο οποίος μετατρέπει το DC σε AC. Η έξοδος της συστοιχίας επίσης, πέραν του απαιτούμενου φορτίου, χρησιμοποιείται για την φόρτιση της μπαταρίας. Ο φορτιστής μπαταρίας, είναι συνήθως ένας μετατροπέας DC-DC. Αν εξακολουθεί να περισσεύει ισχύς μετά την πλήρη φόρτιση της μπαταρίας, παραπέμπεται σε θερμαντικά στοιχεία, τα οποία μπορεί να είναι μία θερμάστρα δωματίου ή ένας θερμοσίφωνας σε ένα αυτόνομο σύστημα. Όταν ο ήλιος δεν είναι διαθέσιμος, η μπαταρία εκφορτίζεται στον μετατροπέα, για να τροφοδοτήσει το φορτίο. Η διάοδος εκφόρτισης της μπαταρίας Db, είναι για να αποτρέπει την μπαταρία να φορτίζεται, όταν ο φορτιστής ανοίγει μετά από πλήρη φόρτιση ή για άλλους λόγους. Η διάοδος της συστοιχίας Da, είναι για να απομονώνει την συστοιχία από την μπαταρία, εμποδίζοντας την συστοιχία να γίνεται φορτίο της μπαταρίας κατά την νύχτα. Το σύστημα ελέγχου, συλλέγει σήματα του συστήματος, όπως τα ρεύματα και τις τάσεις της συστοιχίας και της μπαταρίας, και παρακολουθεί την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας, καταγράφοντας τα αμπερώρια φόρτισης / εκφόρτισης. Χρησιμοποιεί αυτές τις πληροφορίες για να ενεργοποιεί ή να απενεργοποιεί τον φορτιστή της μπαταρίας, να εκφορτίζει τον μετατροπέα, και να εκτρέπει τα φορτία όπως απαιτείται. Έτσι, ο ελεγκτής λειτουργίας, είναι ο κύριος ελεγκτής όλου του συστήματος.



ΣΧΗΜΑ 6.21 Παρακολουθήση μέγιστης ισχύος φωτοβολταϊκού συστήματος ισχύος με τα κυριότερα στοιχεία του.

Στο διασυνδεδεμένο σύστημα, δεν απαιτούνται θερμαντικά σώματα, καθώς όλη η περισσευούμενη ενέργεια που παράγεται, τροφοδοτείται πάντα στις γραμμές του δικτύου. Η μπαταρία επίσης, εξαλείφεται, εκτός για μερικά μικρά κρίσιμα φορτία, όπως ο ελεγκτής εκκίνησης και ο υπολογιστής. Η Συνεχούς ρεύματος ισχύς (DC) πρώτα

μετατρέπεται σε εναλλασσόμενη ισχύ (AC), από τον μετατροπέα, οι διακυμάνσεις της τάσης (ripples) φιλτράρονται, και μόνο τότε φιλτράρεται η ισχύς, που τροφοδοτείται στις γραμμές του δικτύου.

Στο φωτοβολταϊκό σύστημα, ο μετατροπέας είναι κρίσιμο στοιχείο, το οποίο μετατρέπει την DC ισχύ της συστοιχίας σε AC, για την τροφοδοσία των φορτίων ή διασύνδεση με το δίκτυο. Ένα νέο προϊόν που εισήχθη στην αγορά πρόσφατα, είναι το AC φωτοβολταϊκό πλαίσιο (πάνελ), το οποίο ενσωματώνει έναν μετατροπέα, απευθείας στο πλαίσιο. Προς το παρόν είναι, διαθέσιμο με χωρητικότητα μερικών εκατοντάδων watts. Παρέχει ισχύ συχνότητας 60 Hz απευθείας από το κιβώτιο σύνδεσης του πάνελ. Αυτό απλοποιεί σημαντικά την σχεδίαση της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.

#### *ΑΝΑΦΟΡΕΣ - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ*

1. Cook, G., Billman, L., and Adcock R., Photovoltaic Fundamentals, DOE/Solar Energy Research Institute Report No. DE91015001, February 1995.

## **ΚΕΦ. 7. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι η πιο ευέλικτη σε χρήση από άλλους τύπους, επειδή είναι μια ιδιαίτερα «διατεταγμένη» μορφή ενέργειας, που μπορεί να μετατρέπεται αποδοτικά σε άλλες μορφές. Για παράδειγμα, μπορεί να μετατραπεί σε μηχανική μορφή με σχεδόν 100% αποτελεσματικότητα ή σε θερμότητα, με αποδοτικότητα 100%. Η θερμική ενέργεια από την άλλη, δεν μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική με τέτοια υψηλή απόδοση, επειδή είναι μια άτακτης (μη διατεταγμένης) μορφής ενέργεια των ατόμων της. Για το λόγο αυτό, η συνολική απόδοση μετατροπής της θερμικής σε ηλεκτρική μιας τυπικής θερμικής μονάδας παραγωγής ενέργειας από ορυκτά, είναι μικρότερη από 50%. Ένα μειονέκτημα της ηλεκτρικής ενέργειας είναι, ότι δεν μπορεί εύκολα να αποθηκεύεται σε μεγάλη κλίμακα.

Σχεδόν όλη η ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται σήμερα, καταναλώνεται καθώς δημιουργείται. Αυτό δεν δημιουργεί καμία δυσκολία στους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, στους οποίους η κατανάλωση καυσίμου συνεχώς μεταβάλλεται, με τις απαιτήσεις του φορτίου. Η αιολική και τα φωτοβολταϊκά (ΦΒ), είναι και οι δύο, διαλείπουσες πηγές ενέργειας, και δεν μπορούν να ανταποκριθούν στην ζήτηση φορτίου, ανά πάσα στιγμή, 24 ώρες την ημέρα, 365 μέρες τον χρόνο. Η αποθήκευση ενέργειας επομένως, είναι ένα επιθυμητό χαρακτηριστικό, που πρέπει να ενσωματωθεί σε τέτοιου είδους συστήματα ισχύος, ιδιαιτέρως σε αυτόνομες εγκαταστάσεις. Μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την διαθεσιμότητα φορτίου, βασική προϋπόθεση για οποιοδήποτε σύστημα ισχύος.

Οι παρούσες και μελλοντικές τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας που μπορεί να ληφθούν υπόψη, για τα αυτόνομα συστήματα παραγωγής ηλιακής ή αιολικής ενέργειας, εμπίπτουν στις ακόλουθες γενικές κατηγορίες:

- Ηλεκτροχημικές μπαταρίες
- Σφόνδυλοι
- Πεπιεσμένου αέρα
- Υπεραγώγιμου πηνίου

### **7.1. ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗΣ (ΜΠΑΤΑΡΙΑ)**

Η μπαταρία αποθηκεύει ενέργεια σε ηλεκτροχημική μορφή και είναι ευρέως, η πιο χρησιμοποιημένη συσκευή, για αποθήκευση ενέργειας σε μια ποικιλία εφαρμογών. Η ηλεκτροχημική ενέργεια, είναι σε μια ημιδιατεταγμένη μορφή, η οποία είναι μεταξύ της ηλεκτρικής και θερμικής μορφής. Αυτό έχει μια μονόδρομη (μιας κατεύθυνσης) απόδοση μετατροπής, από 85 έως 90%.

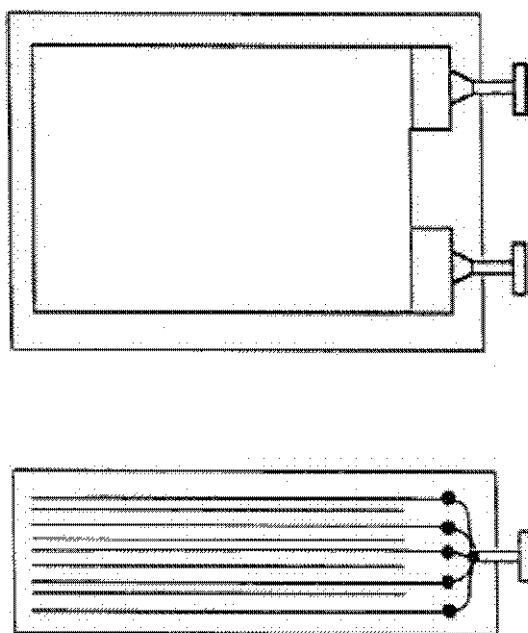
Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι ηλεκτροχημικών μπαταριών:

*Πρωτογενής μπαταρία:* η οποία μετατρέπει την χημική ενέργεια σε ηλεκτρική. Η ηλεκτροχημική αντίδραση σε μία πρωτογενή μπαταρία, είναι μη αναστρέψιμη, και η μπαταρία εκφορτίζεται, μετά από μια πλήρη εκφόρτιση. Για το λόγο αυτό, βρίσκει εφαρμογές, όπου απαιτείται υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, για χρήση μίας φοράς.

## Συστήματα Αιολικής και Ηλιακής Ενέργειας

*Δευτερογενής μπαταρία:* η οποία είναι επίσης γνωστή ως επαναφορτιζόμενη μπαταρία. Η ηλεκτροχημική αντίδραση στην δευτερογενή μπαταρία, είναι αναστρέψιμη. Μετά από μια εκφόρτιση, μπορεί να επαναφορτιστεί με «έγχυση» ενός συνεχούς ρεύματος, από μία εξωτερική πηγή. Αυτό το είδος της μπαταρίας, μετατρέπει τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια κατά την φάση εκφόρτισης. Στην φάση φόρτισης, μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε χημική. Και στις δύο φάσεις, ένα μικρό κλάσμα της ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα, η οποία διαχέεται στο περιβάλλον. Η απόδοση μετατροπής καθ' όλον τον κύκλο, είναι μεταξύ 70 και 80%.

Η εσωτερική κατασκευή ενός τυπικού ηλεκτροχημικού κυττάρου (cell), φαίνεται στο σχήμα 7.1. Έχει θετικές και αρνητικές πλάκες ηλεκτροδίων, με μονωτικά διαχωριστικά και χημικό ηλεκτρολύτη ενδιάμεσα. Οι δύο ομάδες των πλακών ηλεκτροδίων, συνδέονται στους δύο εξωτερικούς ακροδέκτες, που είναι τοποθετημένοι στο περίβλημα. Το κύτταρο, αποθηκεύει ηλεκτροχημική ενέργεια σε χαμηλό δυναμικό, τυπικά μερικών Volt. Η χωρητικότητα (capacity) των κυττάρων, που συμβολίζεται με C, μετριέται σε αμπερώρια (Ah), που σημαίνει ότι μπορεί να δώσει C Αμπέρ σε μία ώρα ή  $C/n$  Αμπέρ σε n ώρες.



ΣΧΗΜΑ 7.1 Κατασκευή κυττάρου αποθήκευσης ηλεκτροχημικής ενέργειας.

Η μπαταρία είναι κατασκευασμένη από ηλεκτροχημικά στοιχεία, που συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή τάση και ρεύμα του συσσωρευτή. Όσο υψηλότερη είναι η τάση της μπαταρίας, τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των κυττάρων, που απαιτείται να συνδεθεί σε σειρά. Η ισχύς της μπαταρίας, δηλώνεται από τον μέσο όρο της τάσης κατά την διάρκεια της εκφόρτισης και τα αμπερώρια της χωρητικότητας της, που μπορεί να δώσει, πριν η τάση πέσει κάτω από ένα ορισμένο όριο. Το γινόμενο της τάσης, με τον αριθμό αμπερωρίων, δίνει την ονομαστική ενέργεια σε βαττώρες (Wh) του συσσωρευτή, που μπορεί να δώσει σε ένα φορτίο, από πλήρως φορτισμένη κατάσταση. Οι ρυθμοί φόρτισης και εκφόρτισης της



μπαταρίας, δηλώνονται σε μονάδες χωρητικότητας σε Ah (αμπερόρια). Για παράδειγμα, η φόρτιση μιας 100 Ah μπαταρίας με ρυθμό φόρτισης C / 10, σημαίνει φόρτιση με ρεύμα  $100/10 = 10$  A για 10 ώρες (γιατί 10 ώρες = ο παρονομαστής του C/10). Εκφορτίζοντάς την με ρυθμό C / 2 σημαίνει ότι για 2 ώρες μπορεί να δίνει ρεύμα 50 Αμπέρ μέχρι να εκφορτιστεί πλήρως. Η κατάσταση φόρτισης (State of Charge SOC) της μπαταρίας ανά πάσα στιγμή, ορίζεται ως εξής:

$SOC = \frac{\text{Τα Ah χωρητικότητας που απομένουν στον συσσωρευτή}}{\text{Τα Ah της ονομαστικής χωρητικότητας}}$

Πίνακας 7.1: Μέση τάση στοιχείου συσσωρευτή κατά την εκφόρτιση για διάφορους επαναφορτιζόμενου ηλεκτροχημικού τύπου συσσωρευτές

Ηλεκτροχημικός τύπος	Τάση στοιχείου σε Volts	Παρατηρήσεις
Μολύβδου (Pb))	2,0	Χαμηλού κόστους τεχνολογία
Νικελίου-Καδμίου (NiCd)	1,2	Παρουσιάζει φαινόμενο μνήμης
Νικελίου-υδριδίου μετάλλου (NiMH)	1,2	Ευαίσθητη στην θερμοκρασία
Ιόντων λιθίου (Li-ion)	3,6	Ασφαλής. Δεν περιέχει μέταλλα λιθίου
Πολυμερών Λιθίου (Li-polymer)	3,0	Περιέχει μέταλλα λιθίου
Ψευδαργύρου-αέρος	1,2	Απαιτεί καλό αερισμό ώστε να μην αυτοεκφορτίζεται

## 7.2. ΤΥΠΟΙ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ

Υπάρχουν τουλάχιστον έξι μεγάλες επαναφορτιζόμενες ηλεκτροχημικές μέθοδοι (ηλεκτροχημικές τεχνικές), κατασκευής συσσωρευτών που διατίθενται σήμερα. Αυτές είναι οι εξής:

- Μολύβδου-οξέος (Pb-acid)
- Νικελίου-καδμίου NiCd)
- Νικελίου-υδριδίου μετάλλου (NiMH)
- Ιόντων λιθίου (Li-ion)
- Πολυμερών Λιθίου (Li-polymer)
- Ψευδαργύρου-αέρος

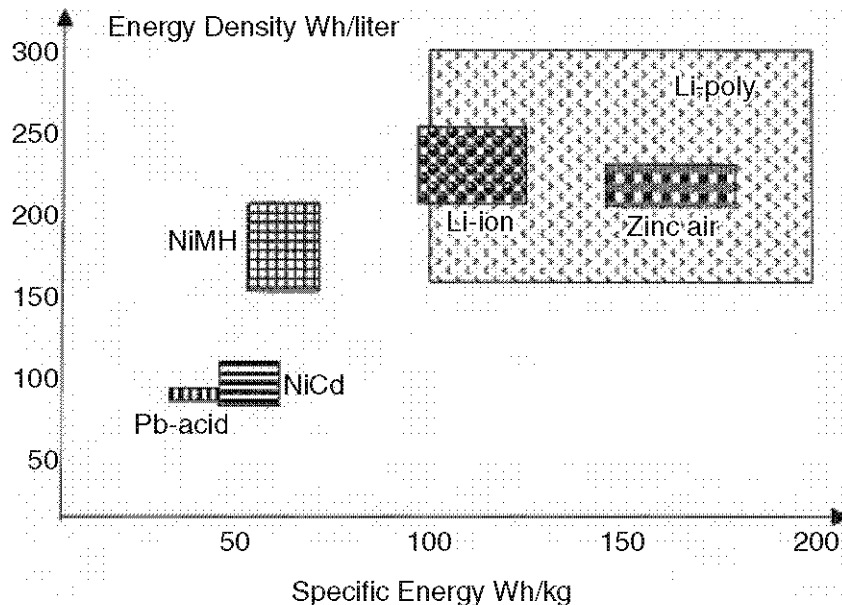
Νέες ηλεκτροχημείες αναπτύσσονται από την Κοινοπραξία Προηγμένων Συσσωρευτών Ηνωμένων Πολιτειών (United States Advanced Battery Consortium), για μια ποικιλία εφαρμογών, όπως ηλεκτρικά οχήματα,, διαστημόπλοια, εφαρμογές εξισορρόπησης φορτίου και φυσικά, για τα συστήματα ισχύος ανανεώσιμων πηγών.

Η μέση τάση εκφόρτισης, εξαρτάται από την ηλεκτροχημεία όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.1. Οι ενεργειακές πυκνότητες των διαφόρων συσσωρευτών, όπως μετρώνται με τα Wh χωρητικότητας ανά μονάδα μάζας και όγκου, συγκρίνονται στο Σχήμα 7.2. Η επιλογή της ηλεκτροχημεία για μια συγκεκριμένη εφαρμογή, είναι ένα θέμα βελτιστοποίησης απόδοσης και κόστους.

Μερικά κατασκευαστικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά αυτών των ηλεκτροχημειών, παρουσιάζονται στις ακόλουθες ενότητες.

### 7.2.1. ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΜΟΛΥΒΔΟΥ-ΟΞΕΟΣ

Αυτός είναι ο πιο κοινός τύπος επαναφορτιζόμενου συσσωρευτή που χρησιμοποιείται σήμερα, λόγω της ωριμότητας και του υψηλού ποσοστού του λόγου Απόδοσης προς Κόστος, ακόμα κι αν έχει την μικρότερη ενεργειακή πυκνότητα ανά βάρος και όγκο. Σε έναν συσσωρευτή μολύβδου (Pb-acid) υπό εκφόρτιση, σχηματίζονται νερό και θεικό άλας μολύβδου, όπου το νερό αραιώνει τον ηλεκτρολύτη θεικού οξέος, και το ειδικό βάρος του ηλεκτρολύτη, μειώνεται με τη μείωση του SOC. Η φόρτιση, αντιστρέφει την αντίδραση, στην οποία μολύβδος και διοξείδιο του μολύβδου, σχηματίζονται στις αρνητικές και θετικές πλάκες αντίστοιχα, επαναφέροντας την μπαταρία στην αρχική φορτισμένη κατάσταση.



ΣΧΗΜΑ 7.2 Ειδική ενέργεια και πυκνότητα ενέργειας διαφόρων ηλεκτροχημειών.

Η μπαταρία Pb-acid έρχεται σε διάφορες εκδόσεις. Η έκδοση «ρηχού κύκλου» (shallow cycle), είναι αυτή που χρησιμοποιείται στα αυτοκίνητα, στα οποία μια βραχεία ριπή ενέργειας προέρχεται από την μπαταρία, για την εκκίνηση του κινητήρα. Η έκδοση «βαθέως κύκλου» (deep cycle) από την άλλη, είναι κατάλληλη για επανειλημμένους πλήρους φόρτισης και αποφόρτισης κύκλους. Οι περισσότερες εφαρμογές απαιτούν βαθέως κύκλου αποθήκευσης ενέργειας, μπαταρίες. Η μπαταρία Pb-acid είναι επίσης διαθέσιμη σε σφραγισμένη έκδοση "gel-cell" (κλειστού τύπου με

ζελέ), με προσμίξεις, οι οποίες μετατρέπουν τον ηλεκτρολύτη σε μη ρευστό ζελέ. Ο συσσωρευτής με ζελέ επομένως, μπορεί να τοποθετηθεί πλαγιαστά ή ανάποδα. Το υψηλό κόστος του όμως, περιορίζει την χρήση του στην στρατιωτική αεροπορία.

### **7.2.2. ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΝΙΚΕΛΙΟΥ-ΚΑΔΜΙΟΥ**

Η ηλεκτροχημεία NiCd, είναι μια ώριμη ηλεκτροχημεία, στην οποία το θετικό ηλεκτρόδιο κατασκευάζεται από κάδμιο και το αρνητικό ηλεκτρόδιο, από υδροξείδιο του νικελίου. Τα δύο ηλεκτρόδια χωρίζονται από διαχωριστές Nylon (νάυλον), και τοποθετούνται σε ηλεκτρολύτη υδροξειδίου του καλίου σε ένα περίβλημα από ανοξείδωτο χάλυβα. Με ένα σφραγισμένο κύτταρο και το ήμισυ του βάρους του συμβατικού συσσωρευτή μολύβδου, ο συσσωρευτής NiCd έχει χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία των περισσότερων επαναφορτιζόμενες εφαρμογών των καταναλωτών. Έχει μεγαλύτερης διάρκειας ζωής «βαθύ κύκλο», και είναι πιο ανεκτικός στην θερμοκρασία από του μολύβδου. Ωστόσο αυτή η ηλεκτροχημεία, έχει το φαινόμενο μνήμης (θα εξηγηθεί αργότερα), που υποβαθμίζει την χωρητικότητά της, αν δεν χρησιμοποιηθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα. Επιπροσθέτως, το κάδμιο έχει τεθεί πρόσφατα υπό περιβαλλοντική παρακολούθηση. Για τους λόγους αυτούς το NiCd, έχει αντικατασταθεί από τους συσσωρευτές NiMH και Li-ion σε φορητούς υπολογιστές και άλλων παρόμοιων υψηλού κόστους καταναλωτικών ηλεκτρονικών ειδών.

### **7.2.3. ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΥΔΡΙΔΙΟΥ ΝΙΚΕΛΙΟΥ-ΜΕΤΑΛΛΟΥ**

Οι μπαταρίες NiMH, είναι μια επέκταση της τεχνολογίας NiCd και προσφέρουν βελτίωση της ενεργειακής πυκνότητας, έναντι εκείνης των μπαταριών NiCd. Η κύρια κατασκευαστική διαφορά είναι ότι η άνοδος, κατασκευάζεται από υδρίδιο μετάλλου. Αυτό εξαλείφει τις περιβαλλοντικές ανησυχίες του καδμίου. Μια άλλη λειτουργική βελτίωση είναι, ότι έχει αμελητέο φαινόμενο μνήμης. Οι μπαταρίες NiMH ωστόσο, είναι λιγότερο ικανές να παρέχουν υψηλή μέγιστη ισχύ, έχουν έναν υψηλό ρυθμό αυτοεκφόρτισης, και είναι επιρρεπείς σε βλάβες, που οφείλονται σε υπερφόρτιση. Σε σύγκριση με τις μπαταρίες NiCd, οι μπαταρίες NiMH είναι ακριβές προς το παρόν, αν και η τιμή τους αναμένεται να πέσει σημαντικά στο μέλλον. Αυτή η προσδοκία, βασίζεται στα τρέχοντα αναπτυξιακά προγράμματα, που στοχεύουν για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές αυτής της τεχνολογίας, σε ηλεκτρικά οχήματα.

### **7.2.4. ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΙΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ**

Η τεχνολογία ιόντων λιθίου, είναι μια νέα εξέλιξη, η οποία προσφέρει τρεις φορές την ενέργεια πυκνότητας εκείνης του μολύβδου. Μια τέτοια μεγάλη βελτίωση στην ενεργειακή πυκνότητα, έρχεται από το χαμηλό ατομικό βάρος του λιθίου 6,9 έναντι 207 για το μόλυβδο. Επιπλέον, οι μπαταρίες Li-ion έχουν υψηλότερη τάση κυττάρου των 3.5 V έναντι 2,0 V των μπαταριών μολύβδου-οξέος και 1,2 V άλλων ηλεκτροχημειών. Αυτό απαιτεί λιγότερα κύτταρα σε σειρά, για δεδομένη τάση μπαταρίας, μειώνοντας έτσι το κόστος κατασκευής.

Από την αρνητική πλευρά, το ηλεκτρόδιο λιθίου, αντιδρά με οποιοδήποτε υγρό ηλεκτρολύτη, δημιουργώντας ένα είδος αδρανοποιητή υμένα (μεμβράνη). Κάθε φορά που το κύτταρο εκκενώνεται και στη συνέχεια φορτίζεται, το λίθιο γδέρνεται, μια ελεύθερη μεταλλική επιφάνεια εκτίθεται στον ηλεκτρολύτη, και ένας νέος υμένας σχηματίζεται. Αυτό αντισταθμίζεται χρησιμοποιώντας χονδρά ηλεκτρόδια, αλλιώς η διάρκεια ζωής της μπαταρίας μειώνεται. Για το λόγο αυτό, οι συσσωρευτές Li-ion είναι πιο ακριβοί του NiCd.

Κατά τη λειτουργία, η ηλεκτροχημεία Li-ion, είναι ευάλωτη σε βλάβες από υπερφόρτιση ή άλλες αδυναμίες στη διαχείριση της μπαταρίας. Ως εκ τούτου, απαιτεί περισσότερο περίτεχνα κυκλώματα φόρτισης, με επαρκή προστασία από υπερφόρτιση.

### **7.2.5. ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΛΙΘΙΟΥ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΕΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ**

Αυτή είναι μια μπαταρία λιθίου με στερεούς πολυμερείς ηλεκτρολύτες. Είναι κατασκευασμένη με ένα φιλμ μεταλλικού λιθίου, στερεωμένο με ένα λεπτό στρώμα στερεού πολυμερούς ηλεκτρολύτη. Ο στερεός ηλεκτρολύτης, αυξάνει την ειδική ενέργεια του κυττάρου, δρώντας ως ηλεκτρολύτης και ως διαχωριστής. Επιπλέον, το μέταλλο στον στερεό ηλεκτρολύτη, αντιδρά λιγότερο από ότι με έναν υγρό ηλεκτρολύτη.

### **7.2.6. ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΥ-ΑΕΡΟΣ**

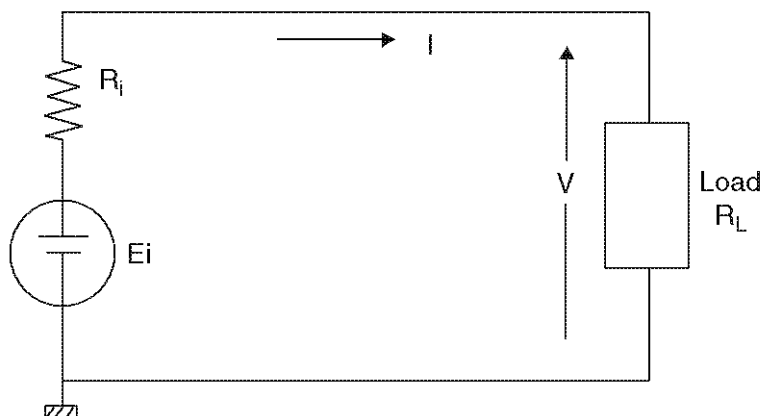
Η μπαταρία ψευδαργύρου-αέρος, έχει αρνητικό ηλεκτρόδιο ψευδαργύρου, έναν ηλεκτρολύτη υδροξειδίου του καλίου, και ένα θετικό ηλεκτρόδιο από άνθρακα, το οποίο είναι εκτεθειμένο στον αέρα. Κατά τη διάρκεια της εκκένωσης, το οξυγόνο από τον αέρα μειώνεται στο ηλεκτρόδιο άνθρακα (το λεγόμενο κάθοδος αέρος), και η άνοδος ψευδαργύρου οξειδώνεται. Κατά τη διάρκεια της εκκένωσης, απορροφά οξυγόνο από τον αέρα και τα μετατρέπει σε ιόντα οξυγόνου για μεταφορά προς την άνοδο ψευδαργύρου. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, παράγει οξυγόνο. Η καλή διαχείριση του αέρα είναι απαραίτητη, για την απόδοση της μπαταρίας ψευδαργύρου-αέρα.

## **7.3. ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ**

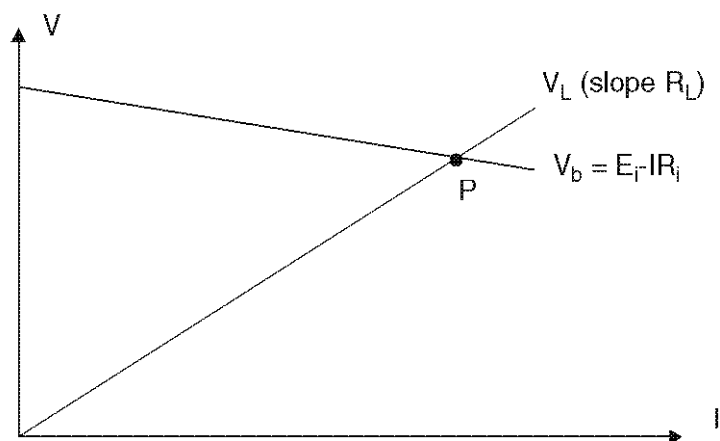
Για τους υπολογισμούς της ηλεκτρικής απόδοσης σε σταθερή κατάσταση, η μπαταρία αντιπροσωπεύεται από ένα ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα που φαίνεται στο σχήμα 7.3. Στην απλούστερη μορφή της, η μπαταρία λειτουργεί ως σταθερή πηγή τάσης με μικρή εσωτερική αντίσταση. Η ανοικτού κυκλώματος (ή ηλεκτροχημική) τάση  $E_i$  της μπαταρίας, μειώνεται γραμμικά με τα  $Ah$  κατά την εκφόρτιση ( $Qd$ ), και η εσωτερική αντίσταση  $R_i$  αυξάνεται γραμμικά με την  $Qd$ . Δηλαδή, η τάση ανοικτού κυκλώματος της μπαταρίας, είναι χαμηλότερη, και η εσωτερική αντίσταση, είναι υψηλότερη σε μια μερικής κατάστασης εκφόρτιση, συγκριτικά με τις τιμές των  $E_0$  και  $R_0$ , της κατάστασης πλήρους φόρτισης. Αυτές οι παράμετροι εκφράζονται ποσοτικά ως εξής:

$$\begin{aligned} E_i &= E_0 - K_1 Q_d \\ R_i &= R_0 + K_2 Q_d \end{aligned} \quad (7.1)$$

όπου  $K_1$  και  $K_2$  είναι σταθερές, που βρέθηκαν από την καμπύλη που φτιάχτηκε από δεδομένα ελέγχου.



ΣΧΗΜΑ 7.3 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα συσσωρευτή που δείχνει την εσωτερική τάση και αντίσταση.



ΣΧΗΜΑ 7.4 Καμπύλη (γραμμή) πηγής συσσωρευτή που τέμνει την καμπύλη (γραμμή) φορτίου στο σημείο λειτουργίας.

Η τάση στους ακροδέκτες, πέφτει με την αύξηση του φορτίου, όπως φαίνεται από τη γραμμή  $V_b$  στο Σχήμα 7.4, στην οποία το σημείο λειτουργίας, είναι το σημείο τομής της γραμμής πηγής και της γραμμής φορτίου (σημείο  $P$ ). Η ισχύς που παραδίδεται στην εξωτερική αντίσταση φορτίου είναι  $I^2 \cdot R_L$ .

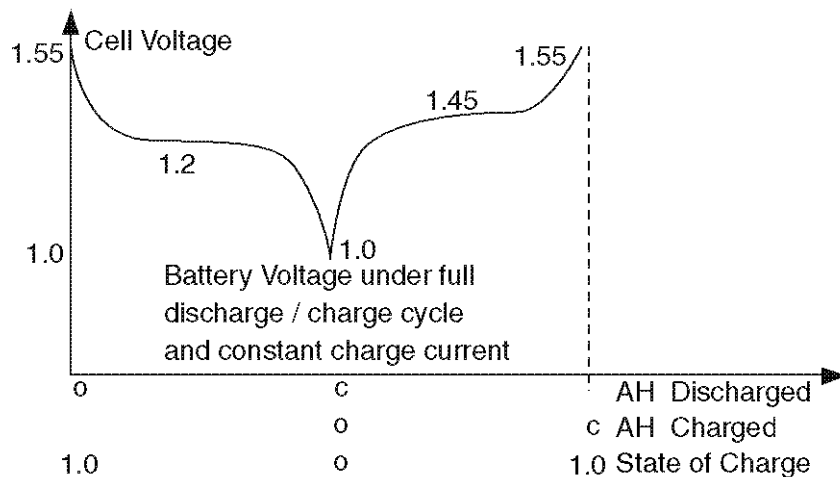
Σε μια εφαρμογή ταχείας εκκένωσης, όπως της εκκίνησης ενός βαριά φορτωμένου κινητήρα, η μπαταρία μπορεί να χρειάζεται να παράσχει την μέγιστη δυνατή ισχύ, για ένα μικρό χρονικό διάστημα. Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να παραδώσει, προέρχεται από την χρήση του θεωρήματος μεταφοράς μέγιστης ηλεκτρικής ενέργειας, στα ηλεκτρικά κυκλώματα. Αυτό αναφέρει ότι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί από την πηγή στο φορτίο, επιτυγχάνεται όταν η εσωτερική αντίσταση της πηγής είναι ίση με την σύνθετη αντίσταση του φορτίου. Η μπαταρία μπορεί να προσφέρει την μέγιστη ισχύ σε φορτίο DC όταν  $RL = Ri$ . Αυτό δίνει τα εξής:

$$P_{max} = Ei^2 / 4Ri \quad (7.2)$$

Επειδή  $Ei$  και  $Ri$  μεταβάλλονται με το SOC, το  $P_{max}$  επίσης μεταβάλλεται ανάλογα. Η εσωτερική απώλεια είναι  $I^2 * Ri$ . Η απόδοση σε κάθε SOC επομένως είναι:

$$\eta = RL / (RL + Ri) \quad (7.3)$$

Η απόδοση μειώνεται καθώς η μπαταρία εκφορτίζεται, δημιουργώντας έτσι περισσότερη θερμότητα σε χαμηλό SOC.



ΣΧΗΜΑ 7.5 Μεταβολή τάσης κατά την διάρκεια του κύκλου φόρτισης/εκφόρτισης ενός κυττάρου NiCd με ονομαστική τάση 1.2 V.

#### 7.4. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Τα βασικά χαρακτηριστικά απόδοσης, τα οποία επηρεάζουν την σχεδίαση της μπαταρίας, έχουν ως:

- Τάσεις φόρτισης / εκφόρτισης (C / D)
- Ο λόγος C / D
- Η ενεργειακή απόδοση όλου του κύκλου φορτοεκφόρτωσης C / D
- Η απόδοση φόρτισης

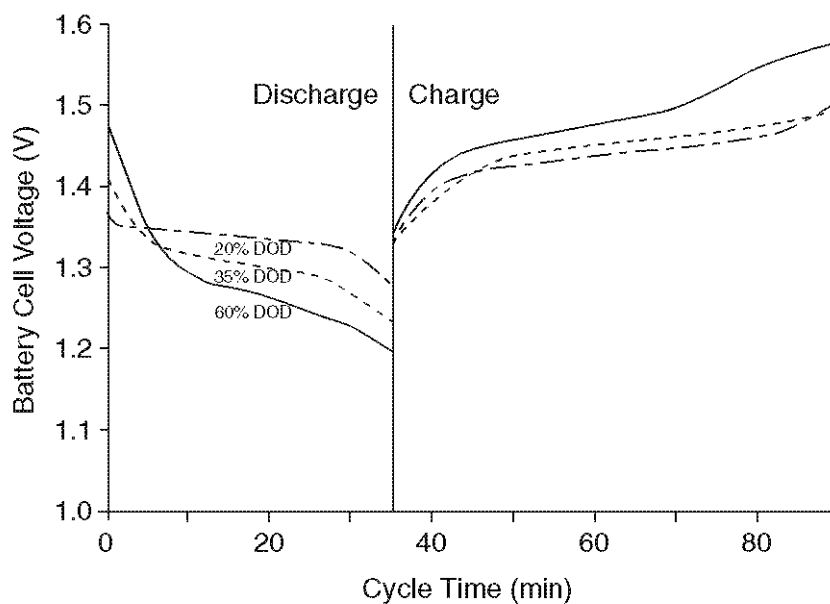
- Η εσωτερική αντίσταση
- Η άνοδος της θερμοκρασίας
- Η ζωή της μπαταρίας σε αριθμό κύκλων C / D

#### 7.4.1. ΤΑΣΕΙΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ / ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ (C / D)

Η διακύμανση τάσης του κυττάρου κατά τη διάρκεια ενός τυπικού κύκλου C / D, παρουσιάζεται στο σχήμα 7.5 για μια ονομαστική τάση κυττάρου 1,2 V όπως των NiMH και NiCd. Η τάση είναι μέγιστη, όταν το κύτταρο είναι πλήρως φορτισμένο (SOC = 1,0 ή τα Ah εκφόρτισης = 0). Καθώς το κύτταρο εκφορτίζεται, η τάση του κυττάρου  $V_c$  πέφτει γρήγορα σε μια τιμή 1,2 V η οποία διαρκεί πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα, πριν πέσει στο 1,0 V μειούμενης της χωρητικότητας (SOC = 0). Αντίστροφα, όταν το κύτταρο επαναφορτίζεται, η τάση αυξάνεται γρήγορα σε μια οριακή τιμή 1,45 V και στη συνέχεια φθάνει μια μέγιστη τιμή 1,55 V. Το χαρακτηριστικό της φόρτισης / εκφόρτισης, εξαρτάται από το πόσο γρήγορα η μπαταρία φορτίζεται και εκφορτίζεται (Σχήμα 7.6).

#### 7.4.2. ΛΟΓΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ / ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ (C / D)

Μετά από την εκφόρτιση ορισμένων Ah στο φορτίο, η μπαταρία απαιτεί περισσότερα Ah για να επανέλθει σε πλήρες SOC (State of Charge). Ο λόγος C / D, ορίζεται ως τα Ah εισόδου, προς τα Ah εξόδου, χωρίς μεταβολή του SOC. Ο λόγος αυτός, εξαρτάται από τον ρυθμό φόρτισης και εκφόρτισης καθώς και την θερμοκρασία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.7. Στους 20 ° C, για παράδειγμα, ο λόγος C / D είναι 1,1, που σημαίνει ότι η μπαταρία χρειάζεται 10% περισσότερα Ah από αυτά της εκφόρτισης της, ώστε να επανέλθει στην πλήρη φορτισμένη κατάσταση της.



ΣΧΗΜΑ 7.6 Καμπύλες τάσης κυττάρου για διαφορετικούς λόγους C/D.

### 7.4.3. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ

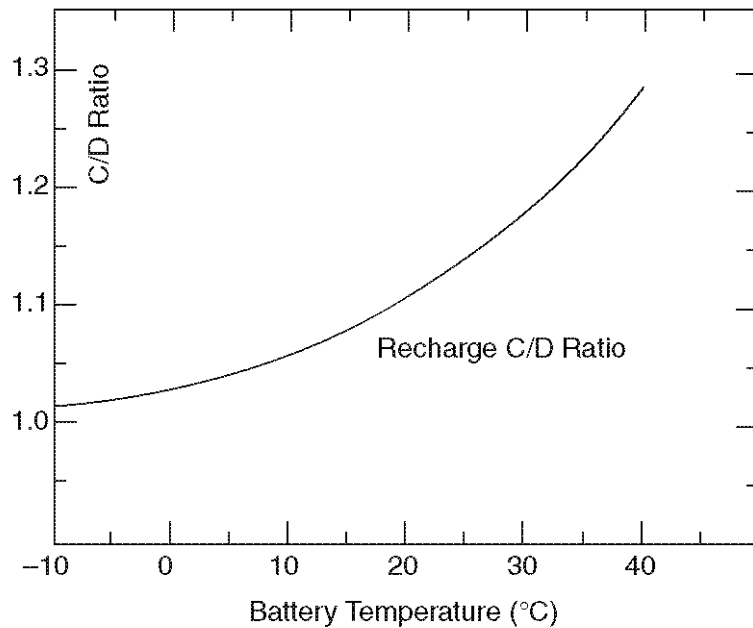
Η ενεργειακή απόδοση ενός πλήρους κύκλου φόρτισης εκφόρτισης, ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας εξόδου, προς την ενέργεια εισόδου, στους ηλεκτρικούς ακροδέκτες της μπαταρίας. Για μια τυπική μπαταρία χωρητικότητας C, με μέση τάση εκφόρτισης 1.2 V, με μέση τάση φόρτισης 1,45 V και λόγο C / D ίσο με 1,1 η απόδοση υπολογίζεται ως ακολούθως:

Η ενέργεια εξόδου σε πλήρη εκφόρτιση =  $1,2 * C$

Η ενέργεια εισόδου που απαιτείται για πλήρη επαναφόρτιση =  $1,45 * 1,1 * C$

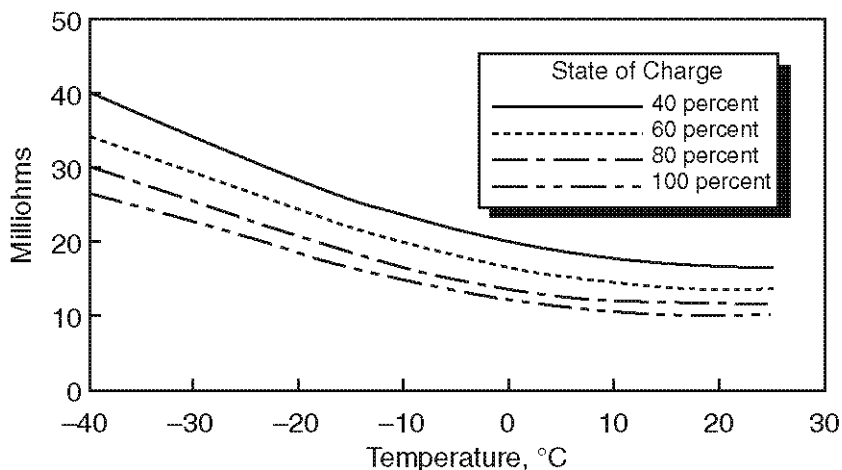
Συνεπώς η απόδοση ενέργειας του πλήρους κύκλου C / D είναι:

$$\eta = 1,2 * C / 1,45 * 1,1 * C = 0,75 = 75\%$$



ΣΧΗΜΑ 7.7 Επίδραση της θερμοκρασίας στον λόγο C/D.





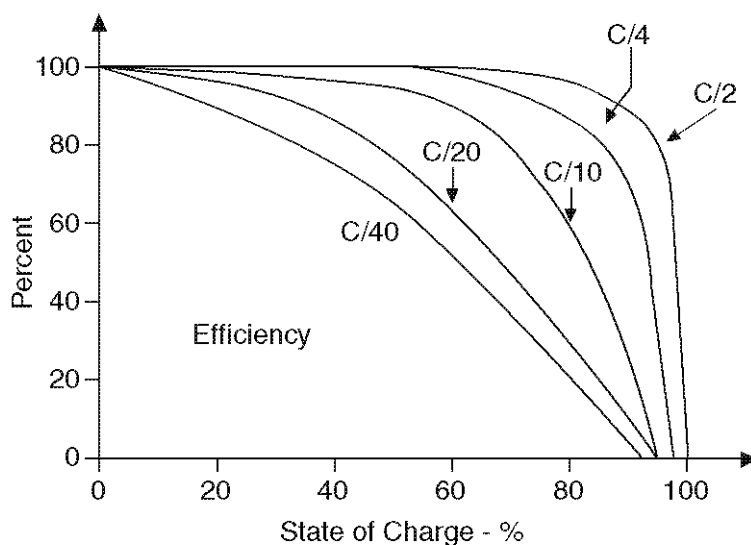
ΣΧΗΜΑ 7.8 Επίδραση της θερμοκρασίας στην εσωτερική αντίσταση ενός κυττάρου NiCd 25 Ah.

#### 7.4.4. ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

Οι υπολογισμοί της απόδοσης στο προηγούμενο κείμενο, δείχνουν ότι το 25% της ενέργειας χάνεται για κάθε κύκλο C / D, μετατρέπόμενο σε θερμότητα. Αυτό το χαρακτηριστικό της μπαταρίας, μπορεί να ειπωθεί σαν να έχει μια εσωτερική αντίσταση  $R_i$ . Η τιμή του  $R_i$ , είναι συνάρτηση της χωρητικότητας της μπαταρίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας, και του SOC. Όσο υψηλότερη είναι η απόδοση των κυττάρων, τόσο μεγαλύτερα τα ηλεκτρόδια και τόσο χαμηλότερη η εσωτερική αντίσταση. Η  $R_i$  μεταβάλλεται με το SOC, σύμφωνα με την Εξίσωση 7.1. Επίσης μεταβάλλεται με την θερμοκρασία, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.8, που αφορά ένα υψηλής ποιότητας κύτταρο NiCd των 25 Ah.

#### 7.4.5. ΑΠΟΔΟΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Η απόδοση φόρτισης, ορίζεται ως ο λόγος των Ah που αποθηκεύονται εσωτερικά ανάμεσα στις πλάκες, προς εκείνων που μετράμε στους ακροδέκτες, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας φόρτισης.



ΣΧΗΜΑ 7.9 Απόδοση φόρτισης έναντι SOC για διάφορους ρυθμούς φόρτισης.

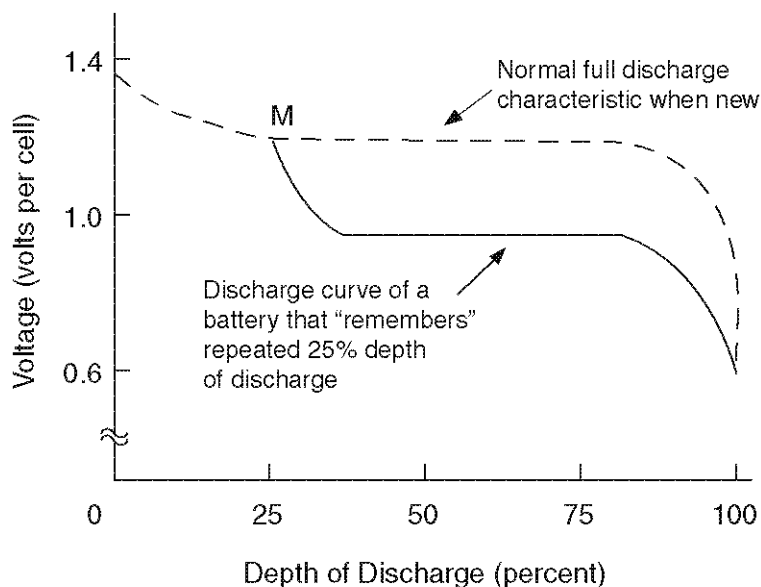
Διαφέρει από την ενεργειακή απόδοση. Η απόδοση φόρτισης είναι σχεδόν 100% όταν το κύτταρο είναι κενό φορτίου, δηλαδή η κατάσταση στην οποία μετατρέπει όλα τα Ah που λαμβάνει, σε ηλεκτροχημική ενέργεια. Καθώς το SOC προσεγγίζει την μονάδα, η απόδοση φόρτισης πλησιάζει στο μηδέν. Το σημείο του γόνατου κατά το οποίο η απόδοση φόρτισης ξεκινά να λεπταίνει, εξαρτάται από τον ρυθμό φόρτισης (Σχήμα 7.9). Για παράδειγμα, για ρυθμό φόρτισης  $C/2$ , η απόδοση φόρτισης είναι 100% μέχρι και 75% SOC. Σε ένα γρήγορο ρυθμό φόρτισης  $C/40$ , από την άλλη, η απόδοση φόρτισης στα 60% SOC είναι μόνο 50%.

#### 7.4.6. ΑΥΤΟΕΚΦΟΡΤΙΣΗ ΚΑΙ ΦΟΡΤΙΣΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ (ΑΡΓΗ ΦΟΡΤΙΣΗ)

Οι μπαταρίες αυτοεκφορτίζονται αργά, ακόμα και χωρίς φορτίο στους ακροδέκτες τους (ανοικτό κύκλωμα). Για να διατηρηθεί το πλήρες SOC, φορτίζονται συνεχώς με αργή φόρτιση για να αντισταθμίσουν τον ρυθμό αυτοεκφόρτισης. Ο ρυθμός αυτός είναι συνήθως λιγότερο από 1% ανά ημέρα, για τις περισσότερες ηλεκτροχημείες σε κανονικές συνθήκες εργασίας.

Αφού η μπαταρία φορτιστή πλήρως, η απόδοση φόρτισης πέφτει στο μηδέν. Κάθε πρόσθετη φόρτιση θα μετατρέπεται σε θερμότητα. Αν υπερφορτίζεται με υψηλότερο ρυθμό από τον ρυθμό αυτοεκφόρτισης, για παρατεταμένο χρονικό διάστημα, η μπαταρία θα υπερθερμανθεί, θέτοντας θέμα ασφάλειας λόγω πιθανού κινδύνου έκρηξης. Η υπερβολική υπερφόρτιση, παράγει υπερβολική διαφυγή αερίου, που γδέρνει τις πλάκες των ηλεκτροδίων. Συνεχές γδάρσιμο σε υψηλό ρυθμό, παράγει υπερβολική θερμότητα και φθείρει τα ηλεκτρόδια, οδηγώντας σε μικρότερη διάρκεια ζωής. Για τον λόγο αυτόν, ο φορτιστής της μπαταρίας, πρέπει να έχει έναν ρυθμιστή, για να περικόψει τον ρυθμό φόρτισης στον ρυθμό συντήρησης, όταν η μπαταρία φορτιστεί πλήρως. Η φόρτιση συντήρησης, παράγει μια ελεγχόμενη ποσότητα

εσωτερικής αερίωσης. Προκαλεί ανάμιξη του ηλεκτρολύτη της μπαταρίας, κρατώντας τον έτοιμο να αποδώσει πλήρη φόρτιση.



ΣΧΗΜΑ 7.10 Το φαινόμενο μνήμης υποβαθμίζει την τάση φόρτισης σε κύτταρα NiCd.

#### 7.4.7. ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΜΝΗΜΗΣ

Ένα σημαντικό μειονέκτημα της μπαταρίας NiCd, είναι το φαινόμενο μνήμης. Είναι η τάση (ροπή) της μπαταρίας, να θυμάται το βάθος, στο οποίο παραδόθηκε το μεγαλύτερο μέρος της χωρητικότητας της κατά το παρελθόν. Για παράδειγμα, εάν η μπαταρία NiCd φορτίζεται και αποφορτίζεται επανειλημμένα στο 25% της χωρητικότητάς της στο σημείο M στο Σχήμα 7.10, θα θυμάται το σημείο M. Στη συνέχεια, αν η μπαταρία εκφορτιστεί πέρα από το σημείο M, η τάση του κελιού θα πέσει πολύ κάτω από την αρχική κανονική τιμή, όπως φαίνεται από τη διακεκομμένη γραμμή στο Σχήμα 7.10. Το τελικό αποτέλεσμα, είναι η απώλεια της πλήρους χωρητικότητας, αν επανειλημμένα χρησιμοποιεί πολλές ρηχές εκφορτίσεις. Το φαινόμενο είναι σαν να χάνεις έναν μν, λόγω μη χρήσης για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η αποκατάσταση της πλήρους χωρητικότητας, είναι η "επιδιόρθωση", κατά την οποία η μπαταρία εκφορτίζεται πλήρως σε σχεδόν μηδενική τάση, μια φορά κάθε λίγους μήνες και στη συνέχεια φορτίζεται πλήρως στα 1,55 V ανά κύτταρο. Άλλοι τύποι μπαταριών δεν έχουν αυτό το φαινόμενο μνήμης.

#### 7.4.8. ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Όπως φάνηκε στις προηγούμενες ενότητες, η θερμοκρασία λειτουργίας επηρεάζει σημαντικά την απόδοση της μπαταρίας ως εξής:

- Η χωρητικότητα και απόδοση φόρτισης μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

- Η χωρητικότητα πέφτει σε θερμοκρασίες πάνω ή κάτω από ένα συγκεκριμένο εύρος, και πέφτει απότομα σε θερμοκρασίες κάτω από το μηδέν.
- Ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης αυξάνει με τη θερμοκρασία.
- Η εσωτερική αντίσταση αυξάνει με μείωση της θερμοκρασίας.

Ο πίνακας 7.2, δείχνει την επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση φόρτισης, στην απόδοση εκφόρτισης και τον ρυθμό αυτοεκφόρτισης της μπαταρίας NiCd. Η διαδικασία καθορισμού της βέλτιστης θερμοκρασίας λειτουργίας, επίσης δεικνύεται στον πίνακα. Είναι φανερό ότι διαφορετικά χαρακτηριστικά, έχουν διαφορετικό εύρος περιοχής επιθυμητής θερμοκρασίας λειτουργίας, όπως φαίνεται από τους παχιούς αριθμούς. Με όλα τα χαρακτηριστικά από κοινού, η βέλτιστη θερμοκρασία λειτουργίας είναι η τομή όλων των επιθυμητών ευρών περιοχών. Για παράδειγμα, εάν θέλουμε να περιορίσουμε τον ρυθμό αυτοεκφόρτισης κάτω του 1%, την απόδοση εκφόρτισης στο 100% και την απόδοση φόρτισης στο 90% ή υψηλότερο, ο πίνακας 7.2 δείχνει ότι η βέλτιστη περιοχή θερμοκρασίας λειτουργίας, είναι μεταξύ  $-10^{\circ}\text{C}$  και μεταξύ  $25^{\circ}\text{C}$ , η οποία είναι η κοινή ζώνη των αριθμών που είναι γραμμένοι με έντονη γραφή (**bold**) των τριών στηλών.

Πίνακας 7.2

Optimum Working-Temperature Range for NiCd Battery			
Operating Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	Charge Efficiency (%)	Discharge Efficiency (%)	Self-Discharge Rate (% Capacity/Day)
-40	0	72	0.1
-35	0	80	0.1
-30	15	85	0.1
-25	40	90	0.2
-20	75	95	0.2
-15	85	97	0.2
<b>-10</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>0.2</b>
<b>-5</b>	<b>92</b>	<b>100</b>	<b>0.2</b>
<b>0</b>	<b>93</b>	<b>100</b>	<b>0.2</b>
<b>5</b>	<b>94</b>	<b>100</b>	<b>0.2</b>
<b>10</b>	<b>94</b>	<b>100</b>	<b>0.2</b>
<b>15</b>	<b>94</b>	<b>100</b>	<b>0.3</b>
<b>20</b>	<b>93</b>	<b>100</b>	<b>0.4</b>
<b>25</b>	<b>92</b>	<b>100</b>	<b>0.6</b>
30	91	100	1.0
35	90	100	1.4
40	88	100	2.0
45	85	100	2.7
50	82	100	3.6
55	79	100	5.1
60	75	100	8.0
65	70	100	12
70	60	100	20

**7.4.9. ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΙ ΑΝΟΔΟΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ**

Η θερμοκρασία της μπαταρίας, ποικίλλει κατά τη διάρκεια του κύκλου charge / discharge (C / D). Λαμβάνοντας ως παράδειγμα το NiCd, η θερμότητα που παράγεται σε ένα τέτοιο κύκλο με 1,2 ώρες και 20,8 ώρες φόρτισης, δείχνεται στο σχήμα 7.11. Σημειώστε ότι η παραγωγή θερμότητας, αυξάνει με το «βάθος εκφόρτισης» (Depth of Discharge DoD) λόγω της αύξησης της εσωτερικής αντίστασης, σε υψηλότερα DoD. Όταν η μπαταρία τεθεί σε φόρτιση, η παραγωγή θερμότητας είναι αρνητική για λίγο, που σημαίνει ότι η ηλεκτροχημική αντίδραση κατά την αρχική περίοδο φόρτισης, είναι ενδόθερμη (απορρόφηση θερμότητας), σε αντίθεση με την εξώθερμη αντίδραση κατά την διάρκεια άλλων περιόδων, με θετική παραγωγή θερμότητας. Η άνοδος της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του κύκλου, εξαρτάται από την μέθοδο ψύξης που χρησιμοποιείται, για να διαχύσει τη θερμότητα με αγωγή, μεταφορά και ακτινοβολία.

Διαφορετικές ηλεκτροχημείες ωστόσο, παράγουν εσωτερική θερμότητα με διαφορετικούς ρυθμούς. Η παραγωγή θερμότητας των διαφόρων μπαταριών, μπορεί να είναι σημαντική, συγκρινόμενη σε σχέση με την αδιαβατική άνοδο της θερμοκρασίας κατά την εκφόρτιση, η οποία δίδεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\Delta T = (WHd / MCp) * [1 - \eta_n + (Ed / Eo)] \tag{7.4}$$

όπου

$\Delta T$  = αδιαβατική άνοδος θερμοκρασίας

$WHd$  = εκφόρτιση ενέργειας, Wh

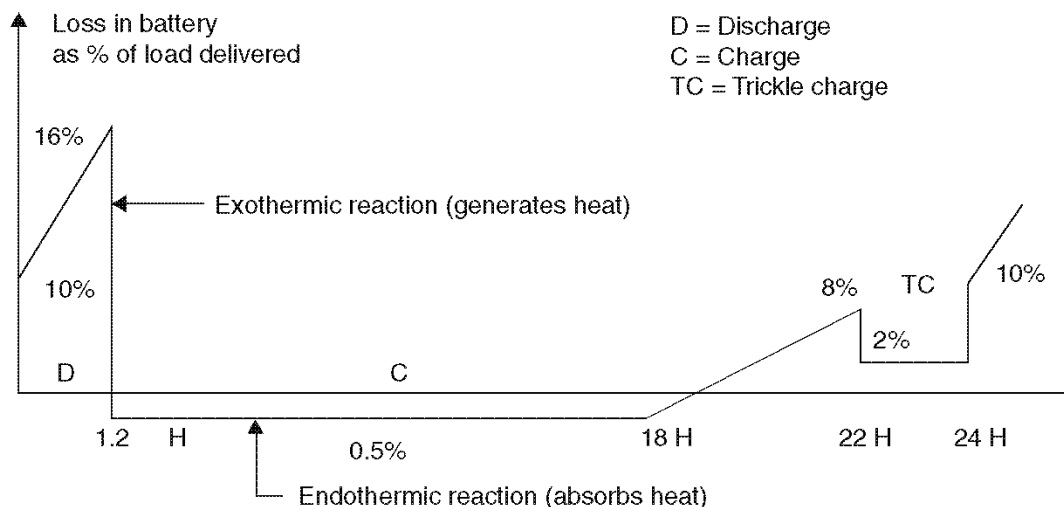
$M$  = η μάζα της μπαταρίας, Kg

$Cp$  = η ειδική θερμότητα της μπαταρίας, Wh/kgC

$\eta_n$  = συντελεστής απόδοσης τάσης στην εκφόρτιση

$Ed$  = μέση ενέργεια εντροπίας κυττάρου ανά κουλόμπ κατά την εκφόρτιση π.χ. μέση απώλεια ισχύος ανά αμπέρ της εκφόρτισης, W/A

$Eo$  = μέση τάση ανοικτού κυκλώματος του κυττάρου, V



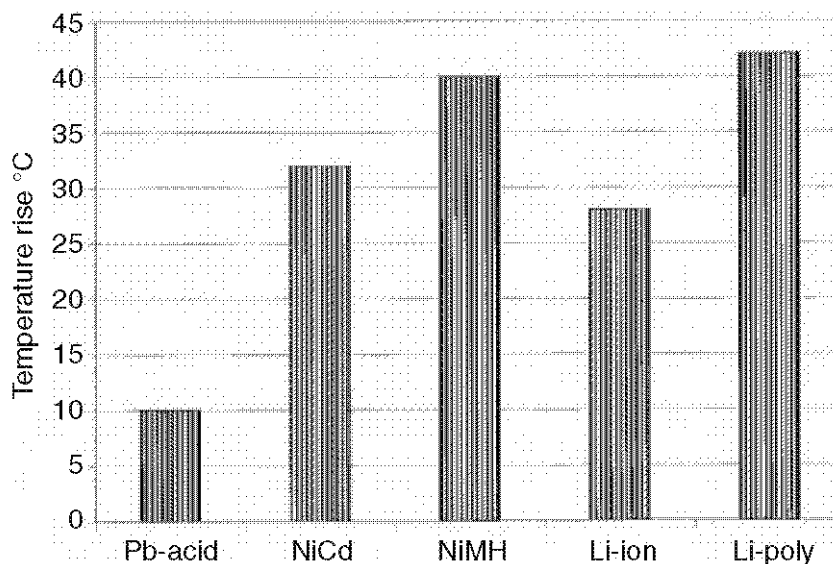
ΣΧΗΜΑ 7.11 Εσωτερική απώλεια ενέργειας κατά τον κύκλο C/D που δείχνει τις ενδόθερμες και εξώθερμες περιόδους.

Πίνακας 7.3

**Battery Characteristics Affecting Thermal Design**

Electrochemistry	Operating Temperature Range (°C)	Overcharge Tolerance	Heat Capacity (Wh/kg-K)	Mass Density (kg/l)	Entropic Heating on Discharge W/A
Lead-acid	-10 to 50	High	0.35	2.1	-0.06
Nickel-cadmium	-20 to 50	Medium	0.35	1.7	0.12
Nickel-metal hydride	-10 to 50	Low	0.35	2.3	0.07
Lithium-ion	10 to 45	Very low	0.38	1.35	0
Lithium-polymer	50 to 70	Very low	0.40	1.3	0

Για πλήρη εκφόρτιση, ο λόγος WHd / M στην εξίσωση 7.4 γίνεται η ειδική ενέργεια. Αυτό δείχνει ότι ένα υψηλότερης ειδικής ενέργειας κύτταρο, τείνει να έχει υψηλότερη άνοδο θερμοκρασίας κατά την εκφόρτιση, απαιτώντας μια βελτιωμένη σχεδίαση ψύξης. Διάφορα χαρακτηριστικά της μπαταρίας που επηρεάζουν την θερμική σχεδίαση, παρατίθενται στον Πίνακα 7.3. Το σχήμα 7.12, δείχνει την αδιαβατική άνοδο  $\Delta T$ , για διάφορες ηλεκτροχημείες μετά από πλήρη εκφόρτιση, σε βραχείες ριπές.



ΣΧΗΜΑ 7.12 Αδιαβατική άνοδος θερμοκρασίας διαφόρων ηλεκτροχημειών.

#### **7.4.10. ΤΥΧΑΙΑ ΒΛΑΒΗ**

Η μπαταρία χαλάει, όταν χαλάει ένα τουλάχιστον κύτταρο σε μία σειρά. Βλάβη ενός κυττάρου θεωρητικά, ορίζεται η κατάσταση κατά την οποία, η τάση των κυττάρων πέφτει κάτω από μια ορισμένη τιμή, πριν την εκφόρτιση από την ονομαστική χωρητικότητα σε θερμοκρασία δωματίου. Η τιμή γενικά είναι το 1,0 V στα κύτταρα με ονομαστική τάση 1,2 V. Αυτός είναι ένας πολύ συντηρητικός ορισμός της βλάβης της μπαταρίας. Στην πράξη, εάν ένα κύτταρο δείχνει μικρότερο από 1,0 V, άλλα κύτταρα μπορούν να καλύψουν τη διαφορά χωρίς να ανιχνευτεί βλάβη σε επίπεδο μπαταρίας. Ακόμη και αν όλα τα κύτταρα παρουσιάζουν σταθερή τάση κάτω από 1,0 V σε πλήρες φορτίο, το φορτίο μπορεί να μειωθεί, ώστε να διατηρηθεί η επιθυμητή τάση για κάποιο χρονικό διάστημα, έως ότου η τάση αυτή, πέσει ακόμα πιο κάτω.

Το κύτταρο μπορεί να χαλάσει σε ανοιχτό κύκλωμα, σε βραχυκύκλωμα, ή σε κάποια ενδιάμεση κατάσταση (ένα μαλακό βραχυκύκλωμα). Ένα βραχυκύκλωμα που ξεκινά σαν μαλακό, τελικά εξελίσσεται σε σκληρό. Σε μία μπαταρία χαμηλής τάσης, κάθε προσπάθεια φόρτισης με βραχυκυκλωμένο κύτταρο, μπορεί να οδηγήσει σε βλάβη της μπαταρίας ή τον φορτιστή. Από την άλλη, το βραχυκυκλωμένο κύτταρο σε μια υψηλής τάσης μπαταρία με πολλά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά, μπορεί να λειτουργήσει για πάντα. Πάντως, χάνει την τάση και την χωρητικότητα, και ως εκ τούτου, θα λειτουργούσε σαν φορτίο στα υγιή κύτταρα. Ένα ανοικτό κύτταρο από την άλλη, απενεργοποιεί ολόκληρη την μπαταρία συνδεδεμένων σε σειρά κυττάρων

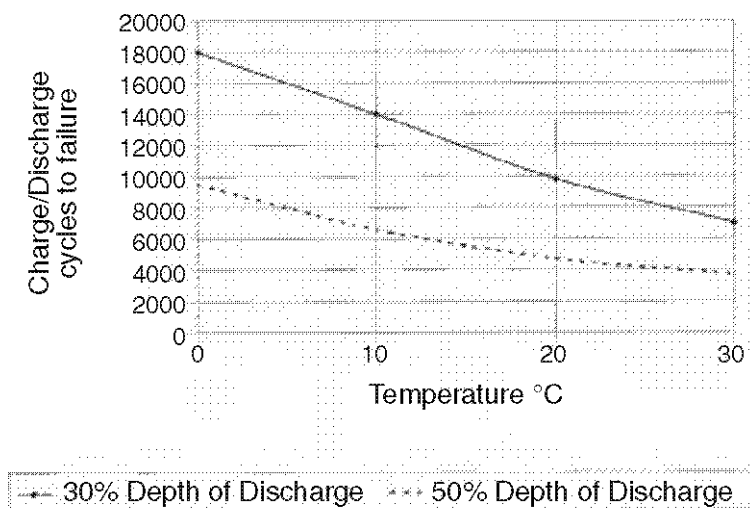
Σε ένα σύστημα με δύο παράλληλες μπαταρίες (μια κοινή πρακτική σχεδιασμού), εάν ένα κύτταρο σε μία μπαταρία βραχυκυκλώνεται, οι δύο μπαταρίες έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά στους ακροδέκτες. Φορτίζοντας ή εκφορτίζοντας τέτοιες μπαταρίες ως μια ομάδα, μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα εξαιρετικά άνισα ρεύματα, όπου στην συνέχεια, μία από τις δύο να υπερθερμαίνεται. Δύο θεραπείες είναι διαθέσιμες για να αποφευχθεί αυτό. Η μία είναι η φόρτιση και εκφόρτιση και των δύο μπαταριών με ξεχωριστά ελεγχόμενα ρεύματα, τέτοια ώστε κάθε μια να τραβάει το δικό της ονομαστικό μερίδιο του φορτίου. Η άλλη είναι η αντικατάσταση του χαλασμένου κυττάρου αμέσως, η οποία μπορεί να μην είναι πρακτικά εφικτή μερικές φορές.

Σε γενικές γραμμές, ένας χωριστός έλεγχος του κύκλου φόρτισης / εκφόρτισης (C / D) για κάθε μπαταρία είναι η καλύτερη στρατηγική. Ενδέχεται επίσης, να επιτρέπει την αντικατάσταση οποιασδήποτε μπαταρίας, με μίας διαφορετικής ηλεκτροχημείας ή διαφορετικής ηλικίας, πράγμα που θα είχε διαφορετικά χαρακτηριστικά στο μοίρασμα του φορτίου. Οι μπαταρίες συνήθως, αντικαθίστανται αρκετές φορές κατά τη διάρκεια της οικονομικής ζωής μιας εγκατάστασης (εργοστασίου).

#### **7.4.11. ΒΛΑΒΗ ΑΠΟ ΠΑΛΑΙΩΣΗ (ΦΘΟΡΑ)**

Πέρα από την τυχαία βλάβη, το κύτταρο της μπαταρίας τελικά φθείρεται και χαλάει. Αυτό συνδέεται με την φθορά του ηλεκτροδίου λόγω επαναλαμβανόμενου κύκλους φορτοεκφορτίσεων. Ο αριθμός των κύκλων που η μπαταρία μπορεί να εκφορτιστεί και να επαναφορτιστεί πριν από την φθορά των ηλεκτροδίων, εξαρτάται

από την ηλεκτροχημεία. Η διάρκεια ζωής της μπαταρίας, μετρείται από τον αριθμό των κύκλων C / D που μπορεί να δώσει, πριν να χαλάσει λόγω φθοράς. Η διάρκεια ζωής, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το «βάθος εκφόρτισης» και την θερμοκρασία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.13, η οποία αφορά μια υψηλής ποιότητας NiCd μπαταρία. Η ζωή της εξαρτάται, σε μικρότερο βαθμό, από την συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη και την πόρωση του ηλεκτροδίου. Οι δύο πρώτοι παράγοντες σχετίζονται με την εφαρμογή, ενώ οι άλλοι σχετίζονται με την κατασκευή.



ΣΧΗΜΑ 7.13 Ζωή κύκλων φόρτισης / εκφόρτισης (C/D) κλειστού τύπου μπαταρίας NiCd έναντι της θερμοκρασίας και του βάθους εκφόρτισης (DoD).

Αξίζει να σημειωθεί από το Σχήμα 7.13, ότι η ζωή της μπαταρίας για δεδομένη θερμοκρασία, είναι η αντίστροφη συνάρτηση του βάθους εκφόρτισης. Στους 20 ° C, η διάρκεια ζωής της είναι 10.000 κύκλοι σε 30% βάθους εκφόρτισης και περίπου 6.000 κύκλους σε 50% βάθους εκφόρτισης. Αυτό καθιστά το γινόμενο του αριθμού κύκλων μέχρι την βλάβη και του βάθους εκφόρτισης να παραμένει περίπου σταθερό. Αυτό το γινόμενο μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό ισχύει για τις περισσότερες μπαταρίες. Αυτό σημαίνει ότι η μπαταρία σε δεδομένη θερμοκρασία, μπορεί να προσφέρει ίδιο αριθμό ισοδύναμων πλήρων κύκλων ενέργειας σε σχέση με το βάθος εκφόρτισης. Τα συνολικά Wh ενέργειας που μπορεί να προσφέρει η μπαταρία κατά την διάρκεια της ζωής της, είναι περίπου σταθερά. Τέτοια παρατήρηση είναι χρήσιμη, όταν συγκρίνουμε το κόστος διαφόρων μπαταριών, για μία δεδομένη εφαρμογή.

Η ζωή μιας μπαταρίας είναι κυρίαρχη σχεδιαστική παράμετρος για το μέγεθος της μπαταρίας. Ακόμη και αν το φορτίο μπορεί να καλυφθεί με μικρότερη χωρητικότητα, η μπαταρία κατασκευάζεται μεγαλύτερου μεγέθους, για να καλύψει τις απαιτήσεις ζωής της μπαταρίας όπως μετράται με αριθμό κύκλων C / D. Για παράδειγμα, για το ίδιο αμπερωριακό φορτίο, η μπαταρία που πρέπει να φορτιστεί / εκφορτιστεί διπλάσιους κύκλους, πρέπει να διπλασιάσει την χωρητικότητά της, για να έχει την ίδια ημερολογιακή ζωή.



Πίνακας 7.4

**Specific Energy and Energy Density of Various Batteries**

Electrochemistry	Specific Energy (Wh/kg)	Energy Density (Wh/l)	Specific Power (W/kg)	Power Density (W/l)
Lead-acid	30–40	70–75	~200	~400
Nickel-cadmium	40–60	70–100	150–200	220–350
Nickel-metal hydride	50–65	140–200	~200	450–500
Lithium-ion	90–120	200–250	>500	500–600
Lithium-polymer	100–200	150–300	>200	>350
Zinc-air	140–180	200–200	~150	~200

Πίνακας 7.5

**Life and Cost Comparison of Various Batteries**

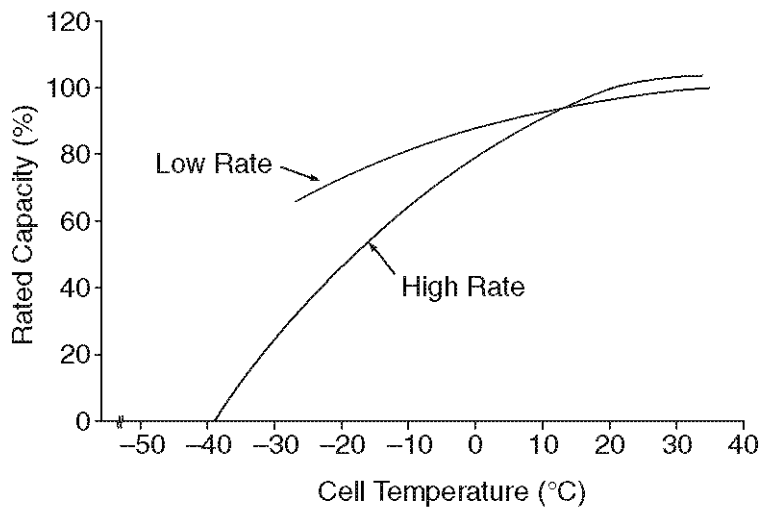
Electrochemistry	Cycle Life in Full Discharge Cycles	Calendar Life in Years	Self-Discharge (%/month at 25°C)	Relative Cost (\$/kWh)
Lead-acid	500–1000	5–8	3–5	200–300
Nickel-cadmium	1000–2000	10–15	20–30	1500
Nickel-metal hydride	1000–2000	8–10	20–30	400–600
Lithium-ion	1500–2000	—	5–10	500–800
Lithium-polymer	1000–1500	—	1–2	>2000
Zinc-air	200–300	—	4–6	—

**7.4.12. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΥΠΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ**

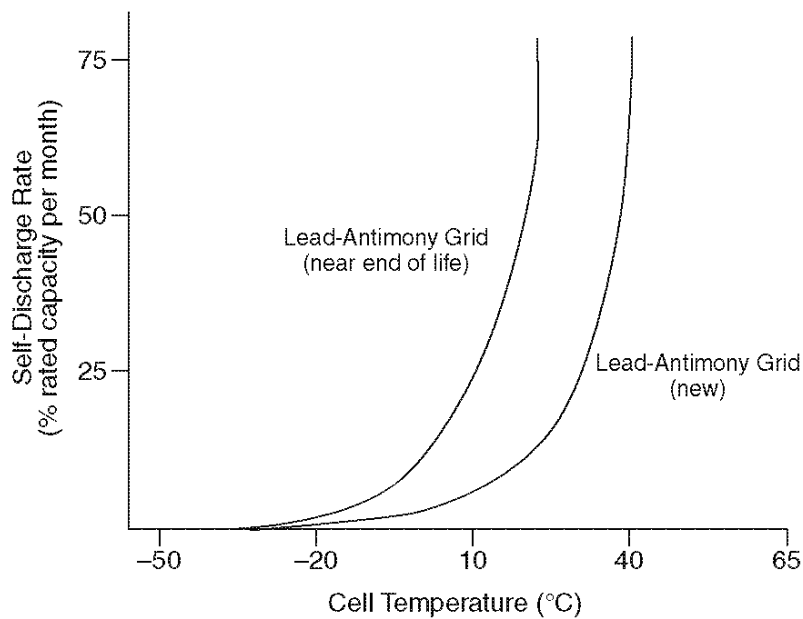
Τα χαρακτηριστικά απόδοσης και οι ιδιότητες των διαφόρων ηλεκτροχημικών που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα τμήματα, συνοψίζονται και συγκρίνονται στον Πίνακα 7.4 και στον Πίνακα 7.5. Σημειώστε ότι το συνολικό κόστος της μπαταρίας μολύβδου (οξειδίων του μολύβδου), είναι χαμηλό σε σύγκριση με των NiCd, NiMH και Li-ion μπαταριών. Λόγω του κόστους της ανά Wh που προσφέρει στην διάρκεια της ζωής της, η μπαταρία μολύβδου, έχει καταστεί η κινητήριος δύναμη της βιομηχανίας.

**7.5. ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΠΑΤΑΡΙΑ ΜΟΛΥΒΔΟΥ (Pb-acid)**

Η μπαταρία μολύβδου είναι διαθέσιμη σε μικρές έως μεγάλες χωρητικότητες σε διάφορες τάσεις στα άκρα της, όπως 6 V, 12 V και 24 V. Όπως και σε άλλες μπαταρίες, η χωρητικότητα σε Ah της μπαταρίας μολύβδου, είναι ευαίσθητη στην θερμοκρασία. Το Σχήμα 7.14, δείχνει τις μεταβολές της χωρητικότητας με την θερμοκρασία για μπαταρίες μολύβδου «βαθέως κύκλου». Στους 20 ° F, για παράδειγμα, το υψηλό ποσοστό χωρητικότητας της μπαταρίας, είναι περίπου το 20% της χωρητικότητάς της στους 100 ° F. Το αυτοκίνητο είναι δύσκολο να ξεκινήσει τον χειμώνα για αυτόν τον λόγο. Από την άλλη, το ποσοστό αυτοεκφόρτισης, μειώνεται σημαντικά στις χαμηλές θερμοκρασίες, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.15.



ΣΧΗΜΑ 7.14 Μεταβολές χωρητικότητας μπαταρίας μολύβδου με την θερμοκρασία.



ΣΧΗΜΑ 7.15 Ρυθμός αυτοεκφόρτισης μπαταρίας μολύβδου έναντι της θερμοκρασίας.

Ο Πίνακας 7.6, δείχνει την επίδραση του SOC (State of Charge) στην τάση, το ειδικό βάρος, και το σημείο πήξης του συσσωρευτή μολύβδου. Ο ηλεκτρολύτης σε μια πλήρως φορτισμένη μπαταρία, έχει υψηλό ειδικό βάρος και παγώνει στους 65 ° F. Από την άλλη, μια πλήρως εκφορτισμένη μπαταρία, παγώνει στους + 15 ° F. Ο πίνακας δείχνει τη σημασία της διατήρησης της μπαταρίας πλήρως φορτισμένης τις κρύες ημέρες.

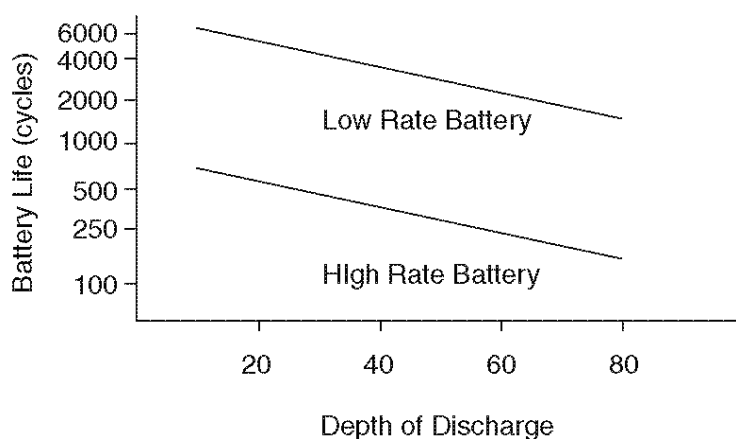
Ο κύκλος ζωής έναντι του DoD για την μπαταρία μολύβδου, απεικονίζεται στο Σχήμα 7.16, που δείχνει τον εμπειρικό κανόνα «χρόνου ημίσειας ζωής στο διπλάσιο του DoD».

Ο ρυθμός εκκένωσης επηρεάζει την χωρητικότητα της μπαταρίας μολύβδου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.17. Όσο μικρότερος είναι ο χρόνος εκφόρτισης (δηλαδή υψηλότερος ρυθμός εκφόρτισης), τόσο μικρότερη είναι η χωρητικότητα σε αμπερώρια που μπορεί να προσφέρει η μπαταρία.

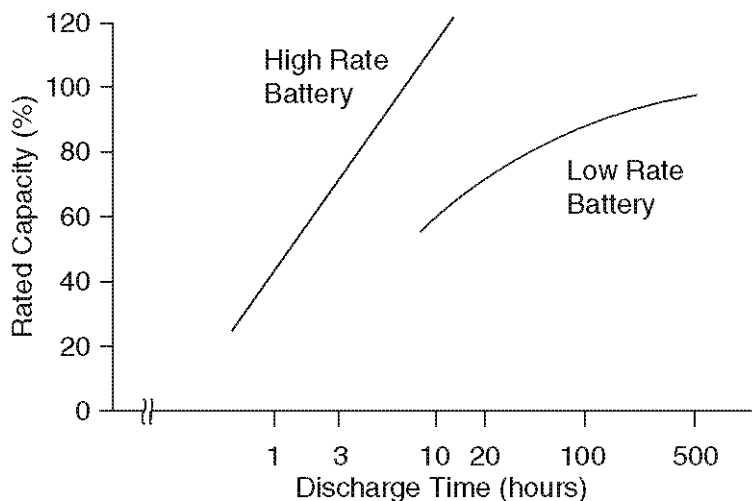
Πίνακας 7.6

**Effects of SOC on Specific Gravity and Freezing Point of Lead-Acid Battery**

State of Charge	Specific Gravity	Freezing Point	120-V Battery Voltage
1 (Fully Charged)	1.27	-65°F	128
75%	1.23	-40°F	124
50%	1.19	-10°F	122
25%	1.15	+5°F	120
0 (Fully Discharged)	1.12	+15°F	118



ΣΧΗΜΑ 7.16 Διάρκεια ζωής σε κύκλους μπαταρίας μολύβδου μέχρι φθοράς έναντι του DoD.



ΣΧΗΜΑ 7.17 Χωρητικότητα μπαταρίας μολύβδου με τον χρόνο εκφόρτισης.

Η ονομαστική τάση του κυττάρου Pb-acid είναι 2,0 V, και η εσωτερική αντίσταση είναι γύρω στο 1 mohm ανά κύτταρο. Η διάρκεια του κύκλου ζωής της, είναι 500 με 1000 πλήρεις κύκλους φορτοεκφόρτισης (C / D) για μεσαίας κατηγορίας μπαταρίες. Οι περιοχή θερμοκρασίας λειτουργίας, είναι μεταξύ -20 ° C και 50 ° C και η θερμοκρασία επιβίωσης, μεταξύ -55 και 60 ° C.

## 7.6. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ

Ο σχεδιασμός της μπαταρίας για δεδομένη εφαρμογή, εξαρτάται από τις ακόλουθες απαιτήσεις συστήματος:

- τάσης και ρεύματος
- Φόρτιση / εκφόρτιση (C / D) και διάρκεια
- Θερμοκρασία λειτουργίας κατά τη διάρκεια των κύκλων C / D
- Η ζωή σε κύκλους C / D
- Τον περιορισμούς του κόστους, το μέγεθος και βάρους

Μόλις αυτές οι παράμετροι σχεδιασμού σε επίπεδο συστήματος προσδιορισθούν, ο σχεδιασμός της μπαταρίας προχωρά στα ακόλουθα βήματα:

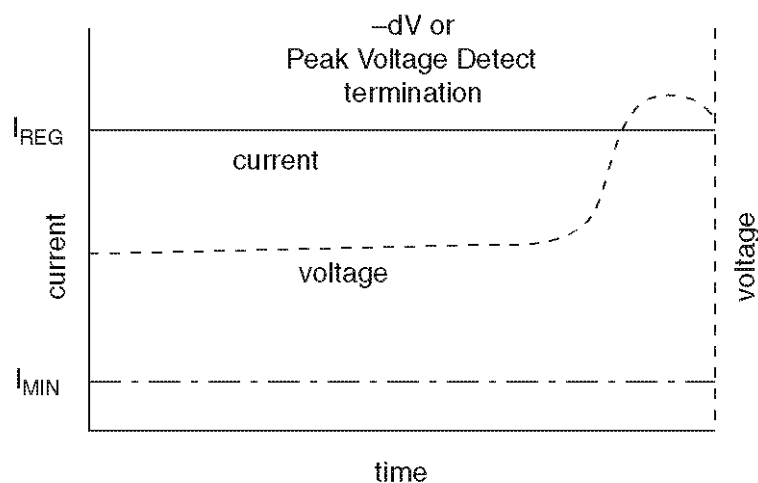
1. Επιλογή της κατάλληλης ηλεκτροχημείας για όλες τις απαιτήσεις του συστήματος.
2. Προσδιορισμός του αριθμού των σε σειρά κυττάρων που απαιτείται για να ανταποκριθεί στην απαίτηση της τάσης.
3. Προσδιορισμός των αμπερωρίων εκφόρτισης που απαιτείται για να ανταποκριθεί στη ζήτηση φορτίου.
4. Για τον απαιτούμενο αριθμό κύκλων C / D, προσδιορισμός του μέγιστου επιτρεπόμενου DoD.

5. Η χωρητικότητα σε αμπερώρια της μπαταρίας προσδιορίζεται τότε, διαιρώντας τα απαιτούμενα αμπερώρια εκφόρτισης με το επιτρεπτό DoD που υπολογίστηκε προωτέρα.
6. Προσδιορισμός του αριθμού των μπαταριών που απαιτούνται σε παράλληλη σύνδεση για την συνολική χωρητικότητα αμπερωρίων.
7. Προσδιορισμός της ανόδου θερμοκρασίας και τον θερμικό έλεγχο που απαιτείται.
8. Παροχή ελέγχων του ρυθμού D / C, όπως απαιτείται.

Κάθε κύτταρο της μπαταρίας είναι ηλεκτρικά μονωμένο από τα άλλα και από την γη. Η ηλεκτρική μόνωση, πρέπει να είναι ένας καλός αγωγός της θερμότητας, για να διατηρηθεί χαμηλή η θερμοκρασία μεταξύ των κυττάρων και της γης.

Η μπαταρία αποδίδει καλύτερα με χαμηλούς ρυθμούς D / C. Δέχεται λιγότερη ενέργεια όταν φορτίζεται με ταχύτερο ρυθμό. Επίσης, όσο πιο γρήγορος ο ρυθμός εκφόρτισης, τόσο πιο γρήγορη η υποβάθμιση και χαμηλότερη η τάση που διατίθεται στο φορτίο. Για τους λόγους αυτούς, υψηλού ρυθμού C / D εφαρμογές, απαιτούν διαφορετικές εκτιμήσεις σχεδιασμού, από τις εφαρμογές χαμηλού ρυθμού.

Επειδή η μπαταρία είναι σχεδιαστικά κτισμένη από πολυάριθμα κύτταρα, δεν υπάρχει τεχνολογικός περιορισμός, σχετικά με το μέγεθος του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας που μπορεί να σχεδιαστεί και να λειτουργεί χρησιμοποιώντας ηλεκτροχημικές μπαταρίες. Η μεγαλύτερη στον κόσμο μπαταρία με μέγιστη ισχύ 40 MW, ανατέθηκε το 2003 με κόστος 30 εκατομμύρια δολάρια. Το σύστημα χρησιμοποίησε 14.000 κύτταρα NiCd κλειστού τύπου (sealed), κατασκευασμένα από ανακυκλωμένο κάδμιο από την εταιρεία Saft Corporation με συνολικό κόστος κυττάρων 10 εκατομμυρίων δολαρίων. Τα κύτταρα θα πρέπει να ανακυκλώνονται και πάλι μετά από τα 20 χρόνια ζωής τους. Το σύστημα αυτό, λειτουργεί από την εταιρεία Golden Valley Electric Association στο Fairbanks, για μια εταιρεία κοινής ωφελείας στη Αλάσκα. Το απόθεμα ενέργειας της μπαταρίας, παρέχει συνεχή υποστήριξη τάσης και μειώνει τις πιθανότητες συσκότισης.



ΣΧΗΜΑ 7.18 Σταθερό ρεύμα φόρτισης μπαταριών NiCd και NiMH.

## 7.7. ΦΟΡΤΙΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ

Κατά τη διάρκεια φόρτισης της μπαταρίας, το λογισμικό διαχείρισης ενέργειας παρακολουθεί την SOC, την γενική υγεία και ασφαλή κριτήρια τερματισμού. Οι συνεχώς παρακολουθούμενες παράμετροι λειτουργίας είναι η τάση μπαταρίας, το ρεύμα και η θερμοκρασία. Το χρονόμετρο φόρτισης, ξεκινά αφού όλοι οι αρχικοί έλεγχοι ολοκληρωθούν επιτυχώς. Η φόρτιση μπορεί να ανασταλεί (αλλά να επανεκκινήσει), εάν εντοπίσει τυχόν παραβίαση των κρίσιμων κριτηρίων ασφαλείας. Το χρονόμετρο σταματά να φορτίζει, αν η βλάβη εξακολουθεί να υφίσταται, πέρα από ένα ορισμένο χρονικό όριο.

Η κανονική φόρτιση έχει τις εξής τρεις φάσεις:

- Μαζική (γρήγορη) φόρτιση που αποθηκεύει το 80 με 90% της χωρητικότητας
- Σταδιακά μειούμενη φόρτιση, στην οποία ο ρυθμός φόρτισης, περικόπτεται στο κορύφωμα της απομείνας χωρητικότητας
- Βραδεία φόρτιση (συντήρησης), αφού η μπαταρία φορτιστεί πλήρως για την αντιμετώπιση της αυτοεκφόρτισης

Τα κριτήρια τερματισμού της μαζικής φόρτισης και της σταδιακά μειούμενης, προφορτώνονται στο λογισμικό διαχείρισης της μπαταρίας, για να ταιριάζει με την ηλεκτροχημεία της μπαταρίας και τις παραμέτρους σχεδιασμού του συστήματος. Για παράδειγμα, οι μπαταρίες NiCd και NiMH, φορτίζονται γενικά με σταθερό ρεύμα (Σχήμα 7.18), τερματίζοντας την φόρτιση, όταν η συνεχώς παρακολουθούμενη  $\Delta V$  ανιχνευθεί αρνητική. Από την άλλη, η μπαταρία ιόντων λιθίου, που είναι ευαίσθητη σε υπερφόρτιση, φορτίζεται με σταθερή τάση, μειώνοντας σταδιακά το ρεύμα φόρτισης, όταν απαιτείται (Σχήμα 7.19).

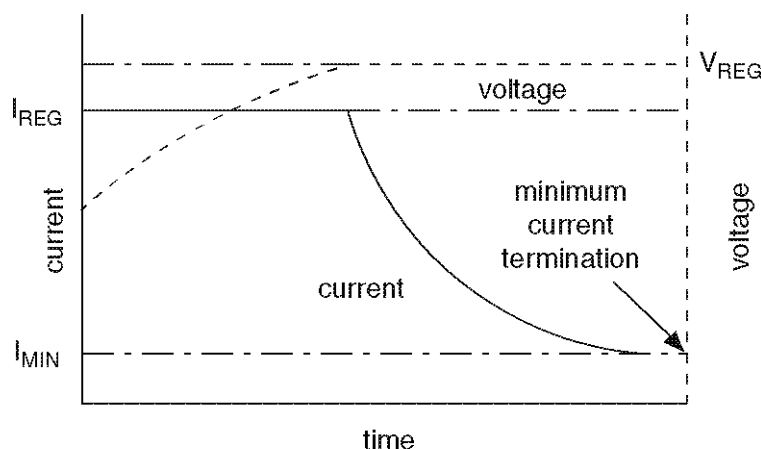
## 7.8. ΡΥΘΜΙΣΤΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Για λόγους ασφάλειας, είναι εξαιρετικά σημαντικό το γεγονός ότι η υπερβολική φόρτιση της μπαταρίας, πρέπει να αποφεύγεται σε κάθε περίπτωση. Η υπερφόρτιση, προκαλεί εσωτερική έκλυση αερίων, η οποία προκαλεί απώλεια του νερού στην μπαταρία μολύβδου και την πρόωρη γήρανση. Ο ρυθμιστής φόρτισης, επιτρέπει το μέγιστο ποσοστό φόρτισης, μέχρι την έναρξη της έκλυσης αερίων. Στην συνέχεια, το ρεύμα φόρτισης είναι σταδιακά μειούμενο, μέχρι το ρεύμα της αργής φόρτισης (συντήρησης), ώστε η πλήρης φόρτιση να προσεγγίζεται απαλά.

### 7.8.1. ΠΟΛΛΑΠΛΟΙ ΡΥΘΜΟΙ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Αυτή είναι η καλύτερη μέθοδος, κατά την οποία η μπαταρία φορτίζεται απαλά σε πολλαπλά βήματα. Πρώτα η μπαταρία φορτίζεται σε μία πλήρη φόρτιση ποσοστό μέχρι 80-90% της χωρητικότητας που είναι να επιτευχθεί. Το ρεύμα φόρτισης τότε περικόπτεται με βήματα, έως ότου η μπαταρία φορτιστεί πλήρως. Κατά τον χρόνο αυτό, το ρεύμα φόρτισης μειώνεται περαιτέρω στον ρυθμό της αργής φόρτισης,

διατηρώντας την πλήρως φορτισμένη, μέχρι την επόμενη ζήτηση φορτίου που θα έρθει στην μπαταρία. Αυτή η μέθοδος, συνεπώς, χρειάζεται τουλάχιστον τρεις ρυθμούς φόρτισης στον σχεδιασμό του ρυθμιστή φόρτισης.



ΣΧΗΜΑ 7.19 Φόρτιση σταθερής τάσης μπαταρίας Li-ion.

### 7.8.2. ΜΟΝΟΣ ΡΥΘΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί απλό ρυθμιστή χαμηλού κόστους, ο οποίος είναι ανοικτός ή κλειστός. Ο ρυθμιστής έχει σχεδιαστεί μόνο για έναν ρυθμό φόρτισης. Όταν η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη, όπως μετράται από την τάση των ακροδεκτών, ο φορτιστής απενεργοποιείται από ένα ρελέ. Όταν η τάση της μπαταρίας πέσει κάτω από μία προκαθορισμένη τιμή, ο φορτιστής συνδέεται και πάλι σε πλήρη ισχύ. Επειδή η φόρτιση δεν είναι ήπια σε αυτήν την μέθοδο, πλήρης φόρτιση είναι δύσκολο να επιτευχθεί και να διατηρηθεί. Μια εναλλακτική εκδοχή της μεθόδου αυτής, είναι η φόρτιση με πολλαπλούς παλμούς. Πλήρες ρεύμα φορτίζει την μπαταρία, μέχρι ένα προκαθορισμένο επίπεδο υψηλής τάσης, ακριβώς κάτω από το κατώφλι αεριοποίησης. Εκείνη την στιγμή, ο φορτιστής απενεργοποιείται για ένα μικρό χρονικό διάστημα, για να επιτρέψει στην μπαταρία να αναμειχθούν τα χημικά της και η τάση να πέσει. Όταν η τάση πέσει κάτω από ένα προκαθορισμένο χαμηλό όριο, ο φορτιστής επανασυνδέεται, περνώντας πάλι πλήρες ρεύμα στη μπαταρία.

### 7.8.3. ΜΗ ΡΥΘΜΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Αυτή η μέθοδος ελάχιστου κόστους, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε φωτοβολταϊκά (ΦΒ) συστήματα ισχύος. Δεν χρησιμοποιεί ρυθμιστή φόρτισης. Η μπαταρία φορτίζεται απευθείας από το ηλιακό πλαίσιο αφιερωμένο μόνο για φόρτιση. Ο πίνακας (πάνελ) φόρτισης, είναι κατάλληλα σχεδιασμένος για ασφαλή λειτουργία, με έναν δεδομένο αριθμό κυττάρων στην μπαταρία. Για παράδειγμα, σε μια μπαταρία μολύβδου 12 V, η μέγιστη τάση του φωτοβολταϊκού πλαισίου (πάνελ), διατηρείται κάτω από τα 15 V, καθιστώντας αδύνατη την υπερφόρτιση της μπαταρίας. Όταν η μπαταρία φορτιστεί πλήρως από την συστοιχία, η συστοιχία των φωτοβολταϊκών βραχυκυκλώνεται με την

γη από έναν διακόπτη βραχυκύκλωσης τρανζίστορ (shunt transistor) ο οποίος εκείνη την στιγμή κλείνει (δηλαδή άγει) ώστε να μην φορτίζει άλλο. Ο διακόπτης τρανζίστορ ανοίγει (δηλαδή παύει να άγει άρα δεν βραχυκυκλώνει την συστοιχία με την γη), όταν η τάση της μπαταρίας πέσει κάτω από μια ορισμένη τιμή και έτσι η φόρτιση συνεχίζεται. Δηλαδή αφού η τάση που παράγει η συστοιχία, δεν μηδενίζεται (δεν βραχυκυκλώνεται) στην γη, φορτίζει πάλι την μπαταρία. Για να μη γίνεται φορτίο η συστοιχία στην μπαταρία όταν η συστοιχία δεν την φορτίζει, μία διάοδος απομόνωσης, εμποδίζει την μπαταρία να τροφοδοτεί την συστοιχία.

## 7.9. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ

Αντλώντας ηλεκτρική ενέργεια από την μπαταρία όταν απαιτείται, και φορτίζοντας όταν η πρόσβαση σε ισχύ είναι διαθέσιμη, απαιτεί μια καλά ελεγχόμενη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης. Σε αντίθετη περίπτωση, η απόδοση της μπαταρίας θα μπορούσε να υποφέρει, η ζωή της θα μπορούσε να μειωθεί, και η συντήρηση της να αυξηθεί. Μερικά κοινά προβλήματα απόδοσης είναι τα εξής:

- Χαμηλή απόδοση φόρτισης, με αποτέλεσμα χαμηλό SOC
- Απώλεια χωρητικότητας, καθιστώντας μη ικανή την μπαταρίας να κρατήσει τα ονομαστικά αμπερώρια φόρτισης
- Υπερβολική αερίωση και θέρμανση, που οδηγεί σε σύντομη ζωή
- Απρόβλεπτη πρόωρη βλάβη, οδηγώντας σε απώλεια της διαθεσιμότητας φορτίου
- Θετική διάβρωση πλάκας, συντομεύει τη διάρκεια ζωής
- Διαστρωμάτωση και θείωση, υποβαθμίζει την απόδοση

Οι παρακάτω λειτουργίες που ενσωματώνονται στην διαχείριση της μπαταρίας, μπορούν να αποφύγουν τα προβλήματα που δίδονται στο προηγούμενο κείμενο:

- Ελεγχόμενη τάση φόρτισης, κατά προτίμηση σε μια σταθερή τάση
- Αντισταθμιζόμενη θερμοκρασίας φόρτισης, στην οποία το τέλος της φόρτισης συμβαίνει νωρίτερα αν η θερμοκρασία είναι υψηλότερη από την θερμοκρασία αναφοράς
- Χωριστό ατομικό έλεγχο αν δύο ή περισσότερες μπαταρίες φορτίζονται παράλληλα
- Ακριβή σημεία εκκίνησης και τερματισμού της λειτουργίας φόρτισης και εκφόρτισης

### 7.9.1. ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΙ

Οι μπαταρίες στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, διαχειρίζονται από ειδικό λογισμικό υπολογιστών.

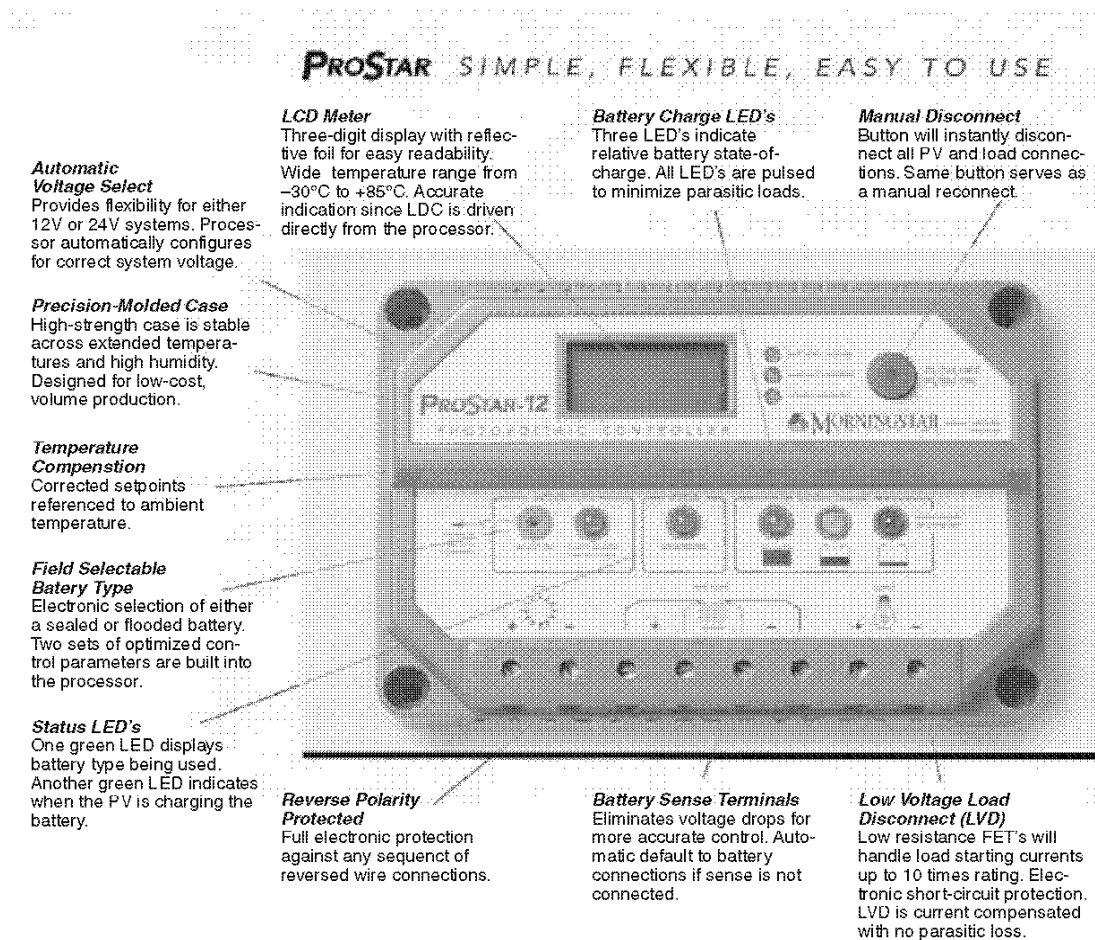
Το λογισμικό παρακολουθεί και ελέγχει τις ακόλουθες παραμέτρους λειτουργίας:

- τάσης και ρεύματος
- Θερμοκρασία και πίεση (κατά περίπτωση)
- Αμπερώρια μέσα και έξω από την μπαταρία



## Συστήματα Αιολικής και Ηλιακής Ενέργειας

- SOC και εκφόρτιση
- Ρυθμό φόρτισης και εκφόρτισης
- Βάθος εκφόρτισης
- Αριθμό κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης



ΣΧΗΜΑ 7.20 Μικροεπεξεργαστής διαχείρισης μπαταρίας για φωτοβολταϊκά συστήματα ισχύος.

Ένα ολοκληρωμένο όργανο μέτρησης Ah που διατίθεται στο εμπόριο, παρακολουθεί τα Ah μέσα και έξω από την μπαταρία και στέλνει τα απαιτούμενα σήματα, στον ελεγκτή λειτουργίας.

Η μέγιστη τάση μπαταρίας αντισταθμιζόμενης θερμοκρασίας και το SOC, μπορούν να βελτιώσουν την διαχείριση της μπαταρίας, ιδιαίτερα σε ακραίες ψυχρές θερμοκρασίες. Μπορεί να επιτρέψει μια επιπλέον φόρτιση κατά τη διάρκεια ψυχρών περιόδων όταν η μπαταρία μπορεί να δεχθεί περισσότερη φόρτιση. Ο συναγερμός χαμηλής τάσης, είναι μια καλή λειτουργία να υπάρχει, καθώς η εκφόρτιση κάτω από την τάση χαμηλού κατωφλίου, μπορεί να κάνει την τάση κάποιου κυττάρου να αντιστραφεί (να γίνει αρνητική). Η αρνητική τάση του κυττάρου, το καθιστά φορτίο με αποτέλεσμα υπερθέρμανση και πρόωρη βλάβη. Ο συναγερμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί, για να απορρίψει μη κρίσιμα φορτία από την μπαταρία, για αποφυγή

πιθανής βλάβης. Το Σχήμα 7.20 απεικονίζει ένα εμπορικά διαθέσιμο σύστημα διαχείρισης μπαταριών, που ενσωματώνει έναν ειδικό μικροεπεξεργαστή με λογισμικό.

### 7.9.2. ΑΣΦΑΛΕΙΑ

Η λειτουργία της μπαταρίας, απαιτεί ορισμένα ζητήματα ασφάλειας να ληφθούν υπόψη. Το πιο σημαντικό είναι να μην υπερφορτιστεί η μπαταρία. Κάθε επιπλέον υπερφόρτιση πάνω από τον ρυθμό αργής φόρτισης, μετατρέπεται σε θερμότητα, η οποία, πέρα από ένα ορισμένο όριο, μπορεί να προκαλέσει έκρηξη της μπαταρίας. Αυτό είναι ιδιαίτερα κρίσιμο, όταν η μπαταρία φορτίζεται από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο απευθείας, χωρίς ρυθμιστή φόρτισης. Σε μια τέτοια περίπτωση, η συστοιχία έχει μέγεθος κάτω από ένα ορισμένο όριο ασφαλείας. Ως γενικός κανόνας, η ισχύς της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, διατηρείται κάτω από το συνεχές ρεύμα υπερφόρτισης που μπορεί να γίνει ανεκτό από την μπαταρία. Συνήθως αυτό είναι κάτω από το  $C / 15$ , για μπαταρίες μολύβδου-οξέος.

### 7.10. ΣΦΟΝΔΥΛΟΣ

Ο σφόνδυλος αποθηκεύει κινητική ενέργεια σε περιστροφική αδράνεια. Αυτή η ενέργεια μπορεί να μετατραπεί από και προς ηλεκτρική ενέργεια με υψηλή απόδοση. Η αποθήκευση ενέργειας σφονδύλου, είναι μια παλιά ιδέα, η οποία έχει γίνει πλέον εμπορικά εφικτή, λόγω της προόδου σε υψηλής αντοχής, ελαφριών συνθετικών ινών Α/Γ, και μαγνητικά έδρανα που λειτουργούν σε υψηλές ταχύτητες. Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας σφονδύλου, αναπτύσσεται για μια ποικιλία πιθανών εφαρμογών, και αναμένεται να κάνει σημαντική εισβολή στο εγγύς μέλλον. Η απόδοση μετατροπής όλου του κύκλου φορτοεκφόρτισης ενός μεγάλου συστήματος σφονδύλου, μπορεί να πλησιάσει το 90%, πολύ υψηλότερη από εκείνου μιας μπαταρίας.

Η αποθήκευση ενέργειας σε ένα σφόνδυλο, περιορίζεται από τις μηχανικές καταπονήσεις, λόγω των φυγόκεντρων δυνάμεων σε υψηλές ταχύτητες. Μικροί και μεσαίοι σφόνδυλοι έχουν χρησιμοποιηθεί για χρόνια. Σημαντικές προσπάθειες ανάπτυξης, βρίσκονται σε εξέλιξη σε όλο τον κόσμο για σφονδύλους υψηλής ταχύτητας, για να αποθηκεύουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας. Ο παρών στόχος αυτών των εξελίξεων, είναι η επίτευξη πέντε φορές την ενεργειακή πυκνότητα των δευτερογενών μπαταριών, που διατίθενται σήμερα. Ο στόχος αυτός μπορεί να επιτευχθεί με τις ακόλουθες τεχνολογίες γενικής εφαρμογής, που είναι ήδη σε ισχύ στην συστατική τους φόρμα:

- Υψηλής αντοχής ίνες έχοντας μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό πάνω από ένα εκατομμύριο λίβρες ανά τετραγωνική ίντσα
- Προόδους που γίνονται στο σχεδιασμό και την κατασκευή εποξικών ινών
- Υψηλής ταχύτητας μαγνητικά έδρανα, τα οποία εξουδετερώνουν την τριβή, τους κραδασμούς, και τον θόρυβο

Το σύστημα σφονδύλου είναι κατασκευασμένο από έναν εποξικών ινών συνθετικό στρόβιλο, στηριζόμενο σε μαγνητικά έδρανα, περιστρεφόμενο σε κενό, και

μηχανικά συζευγμένο με μια ηλεκτρική μηχανή, η οποία μπορεί να λειτουργήσει σαν κινητήρας ή γεννήτρια. Δύο αντίθετα περιστρεφόμενοι τροχοί τοποθετούνται δίπλα-δίπλα, όταν πρέπει να εξαλειφθούν γυροσκοπικές επιδράσεις, όπως αυτές ενός λεωφορείου πόλης, τρένου, ή αυτοκινήτου.

### 7.10.1. ΣΧΕΣΕΙΣ (ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ) ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η ενέργεια που αποθηκεύεται σε ένα σφόνδυλο έχοντας ροπή αδρανείας  $J$  και περιστρεφόμενου με μια γωνιακή ταχύτητα  $\omega$ , δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$E = \frac{1}{2} * J * \omega^2 \quad (7.5)$$

Η φυγόκεντρος δύναμη στο υλικό του δρομέα πυκνότητας  $\rho$  σε ακτίνα  $r$ , δίνεται από τον τύπο  $\rho(r\omega)^2$ , η οποία υποστηρίζεται από την δύναμη στεφάνης του δρομέα. Λόγω της γραμμικής ταχύτητας  $V = 2\pi r\omega$ , η μέγιστη φυγόκεντρη δύναμη στον δρομέα, είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας του εξωτερικού άκρου. Η επιτρεπόμενη καταπόνηση του εξοπλισμού, τοποθετεί ένα ανώτατο όριο για την ταχύτητα των άκρων του δρομέα. Συνεπώς, ένας μικρότερος δρομέας, μπορεί να τρέξει σε υψηλή ταχύτητα και το αντίστροφο. Ο δρομέας λεπτής στεφάνης, έχει υψηλό λόγο αδράνειας προς βάρος και αποθηκεύει περισσότερη ενέργεια ανά χιλιόγραμμο βάρους. Για το λόγο αυτό, ο δρομέας, σε όλα τα πρακτικά συστήματα σχεδίασης σφονδύλου, είναι μορφής λεπτής στεφάνης. Για έναν τέτοιο δρομέα με εσωτερική ακτίνα  $R1$  και εξωτερική  $R2$ , μπορεί να αποδειχθεί ότι η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί για μία επιτρεπτή ταχύτητα άκρου δρομέα,  $V$  έχει ως εξής:

$$E_{max} = KI V^2 [1 + (R1/R2)^2] \quad (7.6)$$

όπου  $KI$  είναι η σταθερά αναλογικότητας. Ο σφόνδυλος λεπτής στεφάνης με λόγο  $R1 / R2$  που προσεγγίζει την μονάδα, οδηγεί σε μια υψηλή ειδική ενέργεια για ένα συγκεκριμένο όριο δύναμης. Όσο υψηλότερη είναι η αντοχή του υλικού, τόσο μεγαλύτερη είναι η ειδική ενέργεια. Όσο χαμηλότερη είναι η πυκνότητα του υλικού, τόσο χαμηλότερη είναι η φυγόκεντρος δύναμη που παράγεται, η οποία οδηγεί σε μια υψηλότερη επιτρεπτή ταχύτητα και ειδική ενέργεια. Η μέγιστη αποθήκευση ενέργειας  $E_{max}$  ως εκ τούτου, μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$E_{max} = K2 * \sigma_{max} / \rho \quad (7.7)$$

όπου

$K2$  = μια άλλη σταθερά αναλογικότητας

$\sigma_{max}$  = μέγιστη επιτρεπτή τάση στεφάνης

$\rho$  = πυκνότητα του υλικού του δρομέα

Ένας καλά σχεδιασμένος σφόνδυλος έχει επομένως υψηλό λόγο  $\sigma_{max} / \rho$  για υψηλή ειδική ενέργεια. Επίσης έχει έναν υψηλό λόγο  $E / \rho$  για ακαμψία, όπου  $E$  είναι ο συντελεστής ελαστικότητας Young.

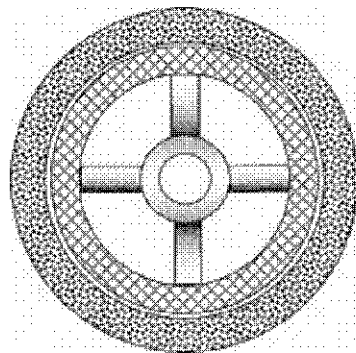
Ο μεταλλικός σφόνδυλος, έχει χαμηλή ειδική ενέργεια λόγω της χαμηλής αναλογίας  $\sigma_{max} / \rho$ , όπου οι υψηλής αντοχής πολυμερισμένες ίνες όπως γραφίτη, διοξείδιο του πυριτίου, και βορίου, πού έχουν πολύ μεγαλύτερο λόγο  $\sigma_{max} / \rho$ , αποθηκεύουν μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη ενέργεια ανά μονάδα βάρους. Ο πίνακας 7.7 συγκρίνει την ειδική ενέργεια των διαφόρων μεταλλικών και πολυμερισμένων σύνθετων ινών δρομέων. Εκτός από την υψηλή ειδική ενέργεια, ο συνθετικός δρομέας έχει ασφαλή λειτουργία αστοχίας, καθώς αποσυντίθεται σε χνούδι και όχι σε κομμάτια όπως ο μεταλλικός σφόνδυλος.

Το σχήμα 7.21, δείχνει έναν σχεδιασμό δρομέα που αναπτύχθηκε πρόσφατα στο Oakridge National Laboratory. Η συνθετική στεφάνη εποξικών ινών, κατασκευάζεται από δύο δακτυλίους. Ο εξωτερικός δακτύλιος είναι κατασκευασμένος από γραφίτη υψηλής αντοχής, και ο εσωτερικός δακτύλιος χαμηλού κόστους από ίνες γυαλιού. Η πλήμνη είναι κατασκευασμένη από ενιαίο κομμάτι αλουμινίου σε ακτινική μορφή. Μια τέτοια κατασκευή είναι οικονομικά αποδοτική, επειδή χρησιμοποιεί το κοστοβόρο υλικό, μόνο όπου είναι απαραίτητο για μεγαλύτερη αντοχή, δηλαδή στον εξωτερικό δακτύλιο όπου η φυγόκεντρος δύναμη είναι υψηλή, με αποτέλεσμα υψηλή τάση στεφάνης.

Πίνακας 7.7

### Maximum Specific Energy Storable in a Thin-Rim Flywheel with Various Rim Materials

Rotor Wheel Material	Maximum Specific Energy Storable (Wh/kg)
Aluminum alloy	25
Maraging steel	50
E-glass composite	200
Carbon fiber composite	220
S-glass composite	250
Polymer fiber composite	350
Fused silica fiber composite	1000
Lead-acid battery	30–40
Lithium-ion battery	90–120

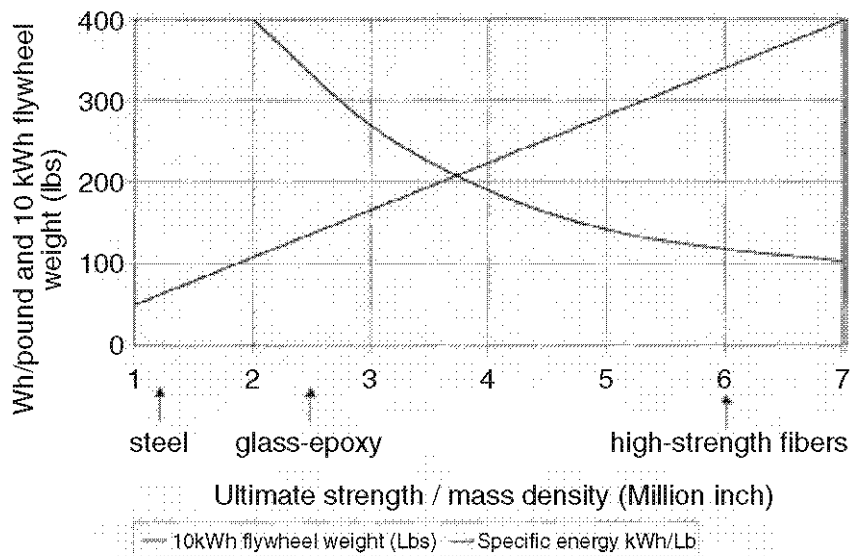


Rotor of two-composite fiber rim for high specific energy and safety

Graphite/epoxy outer rim for strength.  
Glass/epoxy inner rim for economy.  
Interface fit.  
Hub single pieces aluminum with radial flexibility to relieve the interface stress.

ΣΧΗΜΑ 7.21 Σχεδίαση δρομέα σφονδύλου με χρήση δύο συνθετικών δακτυλίων.

Το Σχήμα 7.22, δείχνει έναν πρωτότυπο σφόνδυλο 5 kWh και ειδική ενέργεια (Wh / lb) έναντι του λόγου  $\sigma_{max} / \rho$  του υλικού. Αξίζει να σημειωθεί ότι το βάρος μειώνεται αντίστροφα και η ειδική ενέργεια αυξάνει γραμμικά με τον λόγο  $\sigma_{max} / \rho$ .



ΣΧΗΜΑ 7.22 Ειδική ενέργεια έναντι της ειδικής δύναμης του σφονδύλου

### 7.10.2. ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΦΟΝΔΥΛΟΥ

Το πλήρες σύστημα αποθήκευσης ενέργειας του σφονδύλου απαιτεί τα ακόλουθα εξαρτήματα:

- Δρομέας υψηλής ταχύτητας συνδεδεμένος με τον άξονα μέσω μιας ισχυρής πλήμνης
- Ρουλεμάν με καλό σύστημα λίπανσης ή με μαγνητική ανάρτηση σε δρομείς υψηλών ταχυτήτων

- Ηλεκτρομηχανολογικός μετατροπέας ενέργειας, συνήθως μια μηχανή που μπορεί να λειτουργήσει σαν κινητήρας στην φόρτιση και σαν γεννήτρια στην εκφόρτιση, ενέργειας
- Ηλεκτρονικά ισχύος για την οδήγηση του κινητήρα και να φέρει σε λειτουργία την ισχύ της γεννήτριας
- Ηλεκτρονικά ελέγχου για τον έλεγχο των μαγνητικών εδράνων και άλλων λειτουργιών

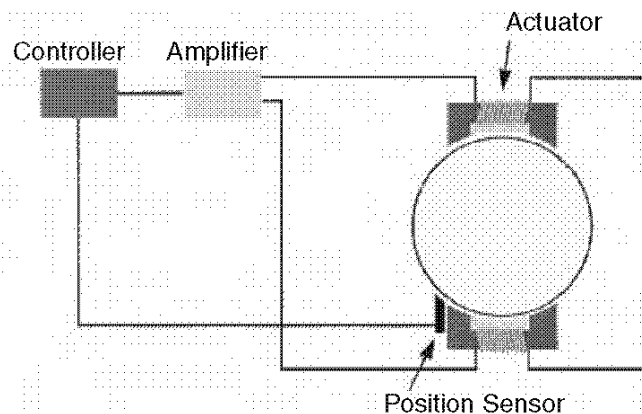
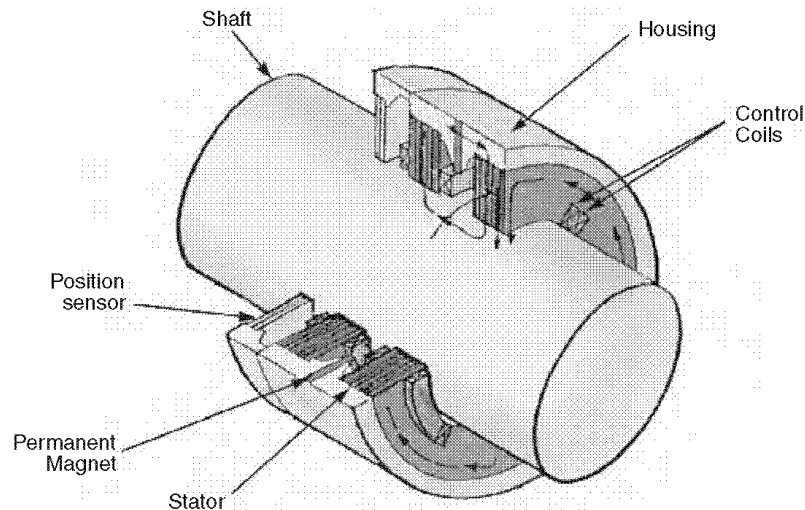
Τα καλά έδρανα έχουν χαμηλή τριβή και κραδασμούς. Τα συμβατικά έδρανα χρησιμοποιούνται μέχρι ταχύτητες μερικών δεκάδων χιλιάδων rpm (σ.α.λ.). Ταχύτητες που πλησιάζουν τις 100.000 rpm (σ.α.λ.) είναι δυνατές μόνο με τη χρήση μαγνητικών εδράνων, οι οποίες υποστηρίζουν τον δρομέα με μαγνητική απόθεση και έλξη. Η μηχανική επαφή εξαλείφεται, εξαλείφοντας έτσι την τριβή. Τρέχοντας ο δρομέας στο κενό, εξαλείφεται η στροβιλώδη ροή του ανέμου.

Το μαγνητικό έδρανο, έρχεται σε μια ποικιλία διαμορφώσεων με τη χρήση μόνιμων μαγνητών και ενεργοποιητή κινητήρα δυναμικού ρεύματος, για την επίτευξη των απαιτούμενων περιορισμών. Ένα άκαμπτο σώμα μπορεί να έχει 6 βαθμούς ελευθερίας. Τα έδρανα εξασφαλίζουν στον δρομέα πέντε βαθμούς ελευθερίας, αφήνοντας ένα βαθμό για περιστροφή. Η ομοπολική διαμόρφωση απεικονίζεται στο Σχήμα 7.23. Οι μόνιμοι μαγνήτες, χρησιμοποιούνται για να παρέχουν ελεύθερη υποστήριξη μετεώρισης για τον άξονα και να βοηθήσει στην σταθεροποίηση του άξονα του δρομέα, σε περίπτωση πτώσης (βλάβης) του δρομέα. Τα ηλεκτρομαγνητικά πηνία, χρησιμοποιούνται για την σταθεροποίηση και τον έλεγχο. Τα πηνία ελέγχου λειτουργούν με χαμηλό κύκλο εργασίας, και μόνο ένα βρόγχος σερβοελέγχου είναι απαραίτητος για κάθε άξονα. Τα πηνία σερβοελέγχου παρέχουν ενεργό έλεγχο, για να διατηρεί σταθερό τον άξονα, παρέχοντας τις δυνάμεις αποκατάστασης που απαιτούνται, για την διατήρηση του άξονα σε κεντραρισμένη θέση. Διάφοροι αισθητήρες θέσης και ταχύτητας χρησιμοποιούνται σε έναν ενεργό βρόχο ανάδρασης. Η μεταβολή του ηλεκτρικού ρεύματος στα πηνία του κινητήρα ενεργοποιητή, αναγκάζει τον άξονα να μένει κεντραρισμένος στην θέση του με τις επιθυμητές αποστάσεις (διάκενα).

Μικρές παλμικές ωθήσεις ροής, καθώς ο δρομέας περιστρέφεται γύρω από τα διακριτά πηνία του κινητήρα ενεργοποιητή, παράγει μια μικρή απώλεια στα μεταλλικά μέρη. Αυτή η απώλεια, ωστόσο, είναι αμελητέα σε σύγκριση με την απώλεια τριβής στα συμβατικά έδρανα (ρουλεμάν, ένσφαιροι τριβείς).

Στην διαμόρφωση του συστήματος σφονδύλου, ο δρομέας μπορεί να τοποθετηθεί ακτινικά προς τα έξω, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.24. Σχηματίζει έναν επαρκή όγκο συσκευασίας. Το μαγνητικό έδρανο έχει μόνιμους μαγνήτες στο εσωτερικό του. Η μαγνητική ροή, ταξιδεύει μέσα από τα πέδιλα των πόλων στον στάτη και του μαγνητικού δακτυλίου ανάδρασης στον δρομέα. Η κλειδαριά μαγνητικής αντίστασης μεταξύ των πέδλων των πόλων και του μαγνητικού δακτυλίου ανάδρασης, παρέχει την κατακόρυφο συγκράτηση. Η οριζόντια συγκράτηση, παρέχεται από τις δύο σειρές των δυναμικών πηνίων του κινητήρα ενεργοποιητή. Τα ρεύματα στα πηνία ελέγχονται, αποκρινόμενα σε έναν βρόχο ανάδρασης που ελέγχει την θέση του δρομέα.

## Συστήματα Αιολικής και Ηλιακής Ενέργειας

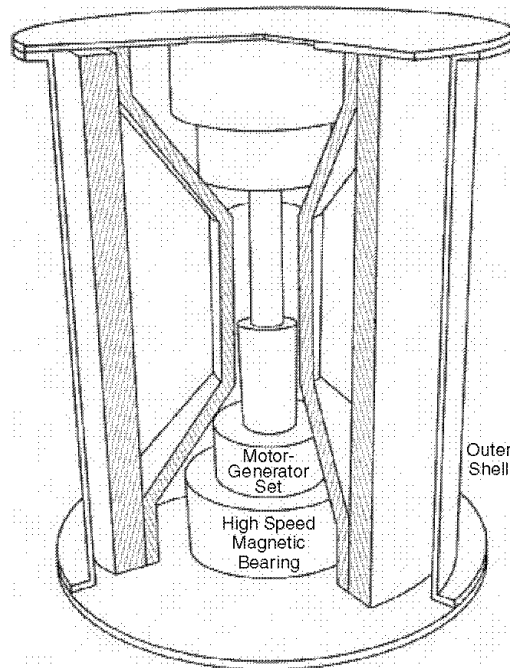


ΣΧΗΜΑ 7.23 Ενεργό έδρανο μόνιμου ομοπολικού μαγνήτη πατέντα της Avcon.

Η μετατροπή της ηλεκτρομηχανική ενέργειας και στις δύο κατευθύνσεις, επιτυγχάνεται με μία ηλεκτρική μηχανή, η οποία λειτουργεί ως κινητήρας για την περιστροφή του δρομέα, για φόρτιση ενέργειας, και ως γεννήτρια, ενώ επιβραδύνει τον δρομέα για εκφόρτιση. Δύο τύποι ηλεκτρικών μηχανών μπορεί να χρησιμοποιηθούν, η σύγχρονη μηχανή με μετατροπέα μεταβλητής συχνότητας ή του συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες, μηχανή μόνιμου μαγνήτη.

Η τάση της μηχανής, ποικίλει σε μία ευρεία κλίμακα σε σχέση με την ταχύτητα. Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος, παρέχουν μια διεπαφή μεταξύ της ευρέως μεταβαλλόμενης τάσης μηχανής και της σταθερής τάσης του κύριου αγωγού (ζυγού). Είναι δυνατόν να σχεδιάσουμε έναν μετατροπέα φόρτισης και έναν εκφόρτισης με μία τάση εισόδου που να μεταβάλλεται από 1 έως 3. Αυτό επιτρέπει στην ταχύτητα της μηχανής, να κυμαίνεται εντός της ίδιας περιοχής. Δηλαδή, η χαμηλή ταχύτητα του δρομέα, μπορεί να είναι το ένα τρίτο της πλήρους ταχύτητα. Επειδή η αποθήκευση ενέργειας είναι ανάλογη της ταχύτητας στο τετράγωνο, το State of Charge (SOC) του

σφονδύλου σε χαμηλή ταχύτητα, μπορεί να είναι τόσο χαμηλό όσο 0.10. Αυτό σημαίνει 90% της ενέργειας του σφονδύλου, μπορεί να εκφορτιστεί χωρίς δυσκολία πάνω στα ηλεκτρονικά ισχύος, ή άλλα εξαρτήματα του συστήματος.



ΣΧΗΜΑ 7.24 Διαμόρφωση σφονδύλου με εξωτερικό δρομέα που περικλείει το ζεύγος κινητήρα-γεννήτριας (=μετατροπέας) και του εδράνου

Ως προς τον αριθμό των κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης, που ο σφόνδυλος μπορεί να αντέξει, η ζωή καταπόνησης του συνθετικού δρομέα είναι ο περιοριστικός παράγοντας. Η εμπειρία δείχνει ότι τα συνθετικά πολυμερών ινών, γενικά έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής καταπόνησης από τα στερεά μέταλλα. Ένας σφόνδυλος σωστά σχεδιασμένος ως εκ τούτου, μπορεί να διαρκέσει πολύ περισσότερο από μια μπαταρία και μπορεί να εκφορτίζεται σε πολύ βαθύτερο επίπεδο. Οι σφόνδυλοι που φτιάχνονται από συνθετικούς δρομείς, κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν για να επιδείξουν περισσότερους από 10.000 κύκλους φορτίσεων και εκφορτίσεων. Αυτό είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από εκείνη που κάθε μπαταρία μπορεί να δώσει προς το παρόν.

### 7.10.3. ΟΦΕΛΗ ΣΦΟΝΔΥΛΟΥ ΕΝΑΝΤΙ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ

Τα κύρια πλεονεκτήματα αποθήκευσης ενέργειας μέσω σφονδύλου έναντι της μπαταρίας είναι τα εξής:

- Υψηλή ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας ανά μονάδα βάρους και όγκου
- Υψηλό βάθος εκφόρτισης (DoD)
- Μεγάλη ζωή κύκλων, η οποία είναι αναίσθητη στο DoD
- Δυνατότητα υψηλής μέγιστης ισχύος, χωρίς προβλήματα υπερθέρμανσης
- Εύκολη διαχείριση ενέργειας, καθώς η SOC απλώς μετράται από την ταχύτητα



- Υψηλή ενεργειακή απόδοση του πλήρους κύκλου φορτοεκφόρτισης
- Ευελιξία στο σχεδιασμό για δοσμένη τάση και ρεύμα
- Βελτιωμένη ποιότητα ισχύος καθώς η ηλεκτρική μηχανή είναι πιο στιβαρή από ότι η μπαταρία

Τα οφέλη αυτά έχουν τη δυνατότητα να κάνουν τον σφόνδυλο το μικρότερου κόστους εναλλακτική αποθήκη ενέργειας ανά βαττώρα, που παρέχεται σε όλη την διάρκεια λειτουργίας του.

### 7.11. ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΟΣ ΜΑΓΝΗΤΗΣ

Η τεχνολογία υπεραγωγιμότητας για την αποθήκευση ενέργειας, έχει αρχίσει να αποδίδει αποτελέσματα πολύ ενθαρρυντικά. Στην αρχή λειτουργίας της, η ενέργεια αποθηκεύεται στο μαγνητικό πεδίο ενός πηνίου, και δίνεται από την ακόλουθη έκφραση:

Η ενέργεια  $E$  που αποθηκεύεται σε ένα πηνίο που φέρει ρεύμα  $I$  δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$E = (1/2 * B^2) / \mu \text{ σε (J/m}^3) \quad \text{ή} \quad E = (1/2 * I^2) * L \text{ (J)} \quad (7.8)$$

όπου

$B$  = πυκνότητα μαγνητικού πεδίου που παράγεται από το πηνίο σε (T) (Tesla)

$\mu$  = η μαγνητική διαπερατότητα του αέρα =  $4\pi * 10^{-7}$  σε (H/m) (Henry / m)

$L$  = η μαγνητική επαγωγή του πηνίου σε (H) (Henry)

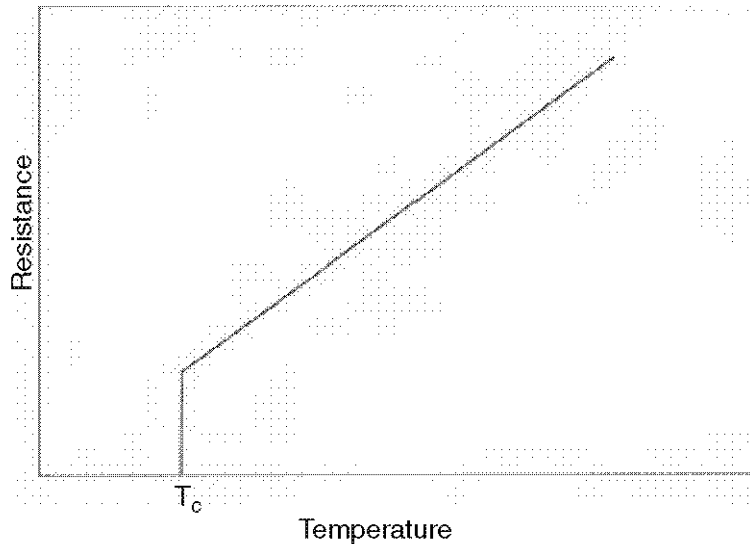
Το πηνίο πρέπει να μεταφέρει ρεύμα για να παράγει το απαιτούμενο μαγνητικό πεδίο. Το ρεύμα απαιτεί μια τάση που εφαρμόζεται στους ακροδέκτες του πηνίου. Η σχέση μεταξύ του ρεύματος πηνίου  $I$  και της τάση  $V$  είναι η εξής:

$$V = R * I = L * di/dt \quad (7.9)$$

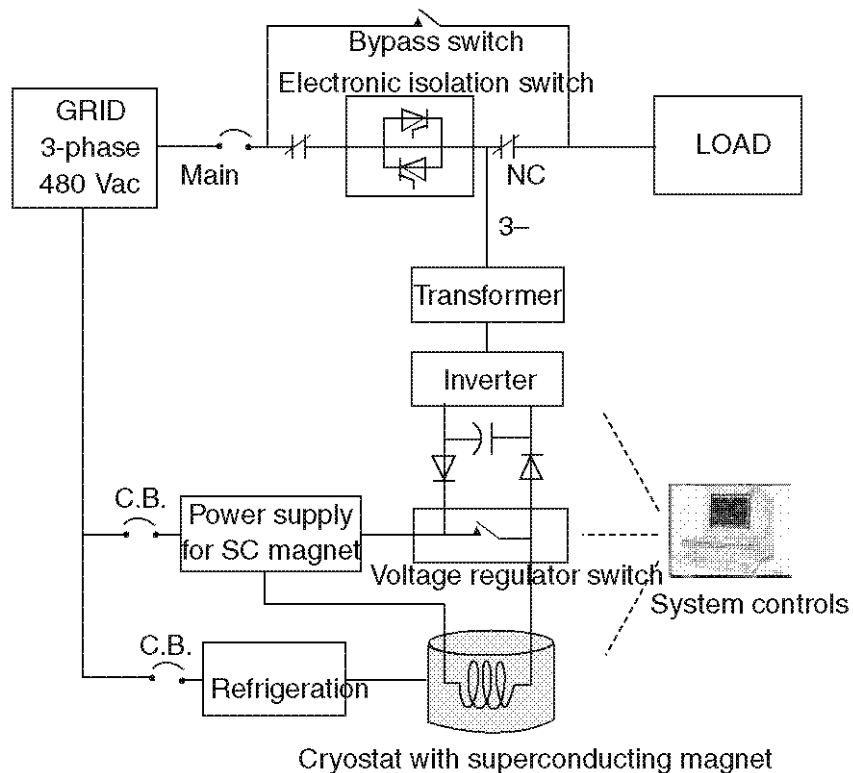
όπου  $R$  και  $L$  είναι η αντίσταση και αυτεπαγωγή του πηνίου, αντίστοιχα. Για αποθήκευση ενέργειας σε σταθερή κατάσταση, ο δεύτερος όρος στην Εξίσωση 7.9 πρέπει να είναι μηδέν. Στη συνέχεια, η τάση που απαιτείται για να κυκλοφορεί το ρεύμα που χρειάζεται είναι απλά  $V = RI$ .

Η αντίσταση του πηνίου εξαρτάται από την θερμοκρασία. Για τα περισσότερα αγώγιμα υλικά, είναι υψηλότερη σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Εάν η θερμοκρασία του πηνίου μειωθεί, η αντίσταση πέφτει όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.25. Σε ορισμένες υλικά, η αντίσταση πέφτει απότομα στο μηδέν για κάποια κρίσιμη θερμοκρασία. Στο σχήμα, αυτό το σημείο εμφανίζεται ως  $T_c$ . Κάτω από την θερμοκρασία αυτή, δεν απαιτείται τάση για να κυκλοφορήσει ρεύμα στο πηνίο, και οι ακροδέκτες του πηνίου μπορούν να βραχυκυκλωθούν. Το ρεύμα συνεχίζει να ρέει στο βραχυκυκλωμένο πηνίο επ' αόριστον, με την αντιστοιχούσα ενέργεια επίσης αποθηκευμένη στο πηνίο επ' αόριστον. Το πηνίο λέγεται ότι έχει φθάσει σε υπεραγώγιμη κατάσταση, η οποία έχει μηδενική αντίσταση. Η ενέργεια στο πηνίο τότε "παγώνει".

Αν και το φαινόμενο υπεραγωγιμότητας ανακαλύφθηκε δεκαετίες πριν, το ενδιαφέρον της βιομηχανίας στην ανάπτυξη πρακτικών εφαρμογών ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1970. Στις ΗΠΑ, το πρωτοποριακό έργο σε αυτό το πεδίο έγινε από την General Electric Company, την Westinghouse Research Center, το University of Wisconsin, και άλλους.



ΣΧΗΜΑ 7.25 Αντίσταση έναντι θερμοκρασίας με απότομη απώλεια αντίστασης στην κρίσιμη θερμοκρασία υπεραγωγιμότητας.



ΣΧΗΜΑ 7.26 Σχηματικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με υπεραγωγιμότητα.

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980, ένα σύστημα 8 kWh αποθήκευσης ενέργειας με υπεραγωγιμότητα διασυνδεδεμένο στο δίκτυο, χτίστηκε με χρηματοδότηση από το Υπουργείο Ενέργειας, και λειτούργησε από την Διοίκηση της Bonneville Power στο Portland, του Oregon. Το σύστημα αποδείχθηκε για πάνω από ένα εκατομμύριο κύκλους φόρτισης εκφόρτισης, καλύπτοντας τους ηλεκτρικούς, μαγνητικούς, και δομικούς στόχους απόδοσής του. Ιδέες σχεδίασης μεγάλων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με υπεραγωγιμότητα μέχρι 5000 MWh (μεγαβαττώρες) ενέργειας για εφαρμογές κοινής ωφελείας έχουν αναπτυχθεί.

Τα κύρια συστατικά σε ένα τυπικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας υπεραγωγιμότητας φαίνονται στο Σχήμα 7.26. Το πηνίο υπεραγωγίου μαγνήτη, φορτίζεται από έναν μετατροπέα AC σε DC στην πηγή τροφοδοσίας μαγνητών. Μόλις φορτιστεί πλήρως, ο μετατροπέας συνεχίζει παρέχοντας τη μικρή τάση που απαιτείται για να υπερνικήσει τις απώλειες θερμοκρασία δωματίου, σε τμήματα των εξαρτημάτων του κυκλώματος. Αυτό διατηρεί ένα σταθερό συνεχές ρεύμα, που ρέει (παγωμένο) στο υπεραγωγίο πηνίο. Στην λειτουργία αποθήκευσης, το ρεύμα κυκλοφορεί μέσω ενός κανονικά κλειστού διακόπτη.

Ο ελεγκτής συστήματος έχει τρεις βασικές λειτουργίες.

- Ελέγχει τον διακόπτη απομόνωσης στερεάς κατάστασης.
- Παρακολουθεί την τάση φορτίου και ρεύματος.
- Διασυνδέεται με τον ρυθμιστή τάσης που ελέγχει την ροή του συνεχούς ρεύματος προς και από το πηνίο.

Εάν ο ελεγκτής συστήματος ανιχνεύσει την πτώση τάσης της γραμμής, ερμηνεύει ότι το σύστημα είναι ανίκανο να ικανοποιήσει τη ζήτηση φορτίου. Ο διακόπτης στον ρυθμιστή τάσης ανοίγει σε λιγότερο από 1 msec. Το ρεύμα ρέει τώρα από το πηνίο σε μια συστοιχία πυκνωτών μέχρι η τάση του συστήματος επανέλθει στο ονομαστικό επίπεδο. Η ισχύς που συσσωρεύτηκε στον πυκνωτή, μετατρέπεται σε AC (Alternate current) των 60 ή 50 Hz και τροφοδοτείται στο φορτίο. Η τάση του κύριου αγωγού (ζυγού) πέφτει καθώς η ενέργεια του πυκνωτή εξαντλείται. Ο διακόπτης ανοίγει και πάλι, και η διαδικασία συνεχίζεται για την παροχή ενέργειας στο φορτίο. Το σύστημα έχει τέτοιο μέγεθος ώστε να αποθηκεύει την ενέργεια που απαιτείται για να τροφοδοτήσει ένα συγκεκριμένο φορτίο για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Η αποθήκευση ενέργειας με υπεραγωγιμότητα έχει πλεονεκτήματα έναντι άλλων τεχνολογιών:

- Η απόδοση πλήρους κύκλου φορτοεκφόρτισης υψηλή στο 95%. Αυτή είναι υψηλότερη από οποιαδήποτε άλλη επιτυχημένη τεχνολογία.
- Έχει πολύ μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, έως 30 έτη.
- Οι χρόνοι φόρτισης και εκφόρτισης μπορεί να είναι εξαιρετικά μικροί, κάνοντάς την ελκυστική παροχή μεγάλης ισχύος σε μικρό χρονικό διάστημα, αν χρειαστεί.
- Δεν έχει κινούμενα μέρη στο κύριο σύστημα, με εξαίρεση τα κρυογονικά ψυκτικά εξαρτήματα.

Στο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας υπεραγωγιμότητας, ένα σημαντικό κόστος είναι να κρατήσουμε το πηνίο κάτω από την κρίσιμη θερμοκρασία υπεραγωγιμότητας. Μέχρι τώρα, το κράμα νιοβίου-τιτανίου έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς, και έχει μια κρίσιμη θερμοκρασία περίπου  $9^\circ \text{K}$ . Αυτό απαιτεί υγρό ήλιο ως ψυκτικό μέσο σε περίπου  $4^\circ \text{K}$ . Το 1986 η ανακάλυψη των υπεραγωγών υψηλής θερμοκρασίας επιτάχυνε το ενδιαφέρον της βιομηχανίας της τεχνολογίας αυτής.

Τρεις τύποι υπεραγωγίων υλικών υψηλής θερμοκρασίας είναι τώρα διαθέσιμοι, όλοι φτιαγμένοι από ενώσεις βισμούθιου ή χαλκούχου υτρίου. Αυτοί οι υπεραγωγοί έχουν την κρίσιμη θερμοκρασία, περίπου στους  $100^\circ \text{K}$  ως εκ τούτου, μπορούν να ψύχονται με υγρό άζωτο, το οποίο χρειάζεται σημαντικά μικρότερη ψυκτική ισχύ. Ως αποτέλεσμα, πολυάριθμα προγράμματα σε όλο τον κόσμο, έχουν αρχίσει να αναπτύσσουν εμπορικές εφαρμογές. Η ιαπωνική Toshiba, η GEC Alsthom μαζί με την Electricite de France, και πολλοί άλλοι, επιδιώκουν ενεργά την ανάπτυξη στον τομέα αυτόν.

## 7.12. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΑΕΡΑ

Ο συμπιεσμένος αέρας, αποθηκεύει ενέργεια λόγω της σχέσης πίεσης-όγκου. Μπορεί να αποθηκεύσει την πλεονάζουσα ενέργεια, μιας μονάδας παραγωγής ενέργειας, θερμική, πυρηνική, αιολική, ή φωτοβολταϊκή και να την αποδώσει όταν χρειαστεί, κατά τις περιόδους αιχμής ή αυξημένων αναγκών. Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα αποτελείται από:

- Συμπιεστή αέρα
- Στρόβιλο επέκτασης
- Ηλεκτρικό κινητήρα-γεννήτρια
- Εναέρια δεξαμενή αποθήκευσης ή υπόγειο σπήλαιο

Εάν τα  $P$  και  $V$  παριστούν την πίεση του αέρα και τον όγκο αντίστοιχα, και αν η πίεση συμπίεσης του αέρα από  $P_1$  έως  $P_2$  ακολουθεί το νόμο των αερίων  $PV^n = \text{σταθερό}$ , τότε το έργο που χρειάζεται κατά την συμπίεση, είναι η ενέργεια που αποθηκεύεται στον συμπιεσμένο αέρα. Δίνεται δε από την ακόλουθη σχέση:

$$\text{Εαποθ. ενέργ} = n \cdot (P_2 \cdot V_2 - P_1 \cdot V_1) / (n-1) \quad (7.10)$$

Και η θερμοκρασία στο τέλος της συμπίεσης δίδεται από:

$$T_2/T_1 = (P_2/P_1)^{(n-1)/n} \quad (7.11)$$

Η ενέργεια που αποθηκεύεται, είναι μικρότερη με μικρότερη τιμή του  $n$ . Η ισοεντροπική (ίσης εντροπίας) τιμή του  $n$  για τον αέρα είναι 1,4. Υπό κανονικές συνθήκες εργασίας, το  $n$  είναι περίπου 1,3. Όταν ο αέρας σε αυξημένη θερμοκρασία μετά την συμπίεση σταθερού όγκου κρυώσει, ένα μέρος της πίεσης χάνεται, αντιστοιχούν σε μείωση της αποθηκευμένης ενέργειας.

Η ηλεκτρική ενέργεια, παράγεται από την εκτόνωση του συμπιεσμένου αέρα μέσω ενός στροβίλου εκτόνωσης, που κινεί μια γεννήτρια. Το σύστημα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, μπορεί να λειτουργήσει υπό σταθερό όγκο ή σταθερή πίεση.

Σε συμπίεση σταθερού όγκου, ο συμπιεσμένος αέρας αποθηκεύεται σε δεξαμενές πίεσης, σπήλαια ορυχείων, εκκενωμένες δεξαμενές λαδιών ή αερίων ή εγκαταλελειμμένα ορυχεία. Ένα εκατομμύριο κυβικά πόδια αέρα που αποθηκεύονται στα 600 psi πίεσης παρέχουν μια χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας των 0.25 εκατομμυρίων kWh. Αυτό το σύστημα ωστόσο, έχει ένα μειονέκτημα. Η πίεση του αέρα, μειώνεται καθώς ο συμπιεσμένος αέρας εξαντλείται από την αποθήκη, και η ηλεκτρική ισχύς εξόδου μειώνεται με την μείωση της πίεσης του αέρα.

Σε συμπίεση σταθερής πίεσης, η αποθήκευση του αέρα μπορεί να γίνεται σε μια μεταβλητού όγκου δεξαμενή πάνω από το έδαφος ή έναν υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα. Ένα εκατομμύριο κυβικά πόδια αέρα που αποθηκεύονται στα 600 psi πίεσης, παρέχουν μια χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας αρκετή, για να δημιουργήσει περίπου 0,10 εκατομμύρια kWh. Μια δεξαμενή μεταβλητού όγκου, διατηρεί μια σταθερή πίεση από ένα βάρος πάνω στο καπάκι της δεξαμενής. Εάν χρησιμοποιείται ένας υδροφόρος ορίζοντας, η πίεση παραμένει σχεδόν σταθερή, ενώ αυξάνει ο όγκος αποθήκευσης, λόγω της εκτόπισης του νερού στα γύρω πετρώματα. Κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, το εκτόπισμα του συμπιεσμένου αέρα, προκαλεί μείωση ένα μικρού ποσοστού της πίεσης αποθήκευσης, διατηρώντας τον ρυθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ουσιαστικά σταθερό.

Το κόστος της ενέργειας λειτουργίας, θα πρέπει να περιλαμβάνει την ψύξη του συμπιεσμένου αέρα για να απάγει την θερμότητα της συμπίεσης. Σε αντίθετη περίπτωση, η θερμοκρασία του αέρα μπορεί να αυξηθεί τόσο υψηλά όσο 1000 ° C στην πράξη, συρρικνώνοντας την χωρητικότητα αποθήκευσης και επηρεάζοντας αρνητικά τους τοίχους-βράχους του ορυχείου. Ενέργεια επίσης, χάνεται στην ψυκτική ισχύ της εκτόνωσης, όταν η ενέργεια απελευθερώνεται.

Η απόδοση της αποθήκευσης της ενέργειας του συστήματος αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, είναι συνάρτηση μιας σειράς συστατικών αποδοτικότητας, όπως η αποδοτικότητα του συμπιεστή, η αποδοτικότητα του κινητήρα-γεννήτρια, οι απώλειες θερμότητας, και η διαρροή συμπιεσμένου αέρα. Η απόδοση ενέργειας της συνολικής κυκλικής διαδρομής (round trip), έχει υπολογιστεί περίπου στο 50%.

Ο συμπιεσμένος αέρας μπορεί να αποθηκεύεται στα ακόλουθα:

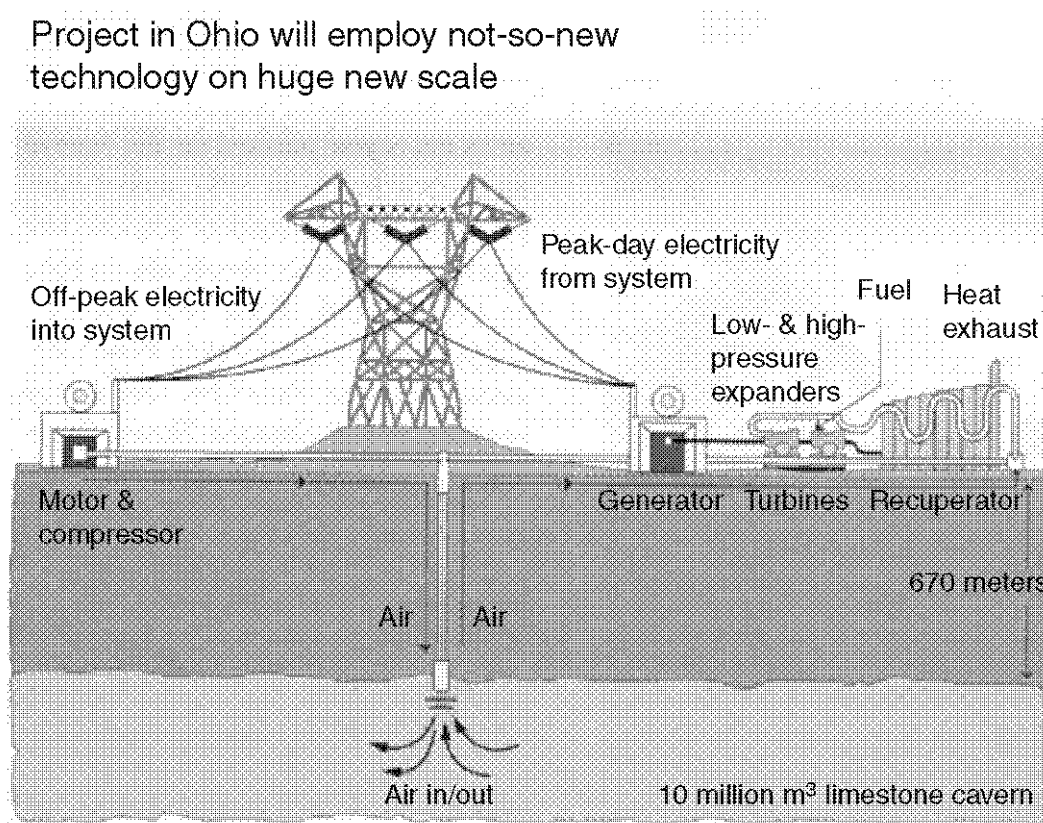
- Σπήλαια άλατος
- Ορυχεία σκληρών βράχων
- Εξαντλημένους χώρους φυσικού αερίου
- Θαμμένους σωλήνες

Η τρέχουσα εκτίμηση του κόστους κεφαλαίου ενός συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας συμπιεσμένου αέρα, κυμαίνεται μεταξύ 1000 και 1500 δολαρίων ανά kW, ανάλογα με το σύστημα αποθήκευσης αέρα που χρησιμοποιείται.

Αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας 300 MW χωρητικότητας, έχουν επίσης κατασκευαστεί στο Ισραήλ, το Μαρόκο, και άλλες

χώρες. Δύο μονάδες των 150 MW, μια στη Γερμανία και μια στην Αλαμπάμα, έχουν τεθεί σε λειτουργία για περισσότερο από μια δεκαετία. Και οι δύο αυτές εγκαταστάσεις λειτουργούν αξιόπιστα, παρά το γεγονός ότι είναι μίας μόνο γεννήτριας. Καταλαμβάνουν σπήλαια άλατος που δημιουργήθηκαν από την διάλυση του άλατος και αφαίρεση της άλμης.

Μια μονάδα αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα των 200 MW έχει ήδη σχεδιαστεί προς λειτουργία, από μια κοινοπραξία επιχειρήσεων κοινής ωφελείας ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου, κοντά στο Fort Dodge, για να υποστηρίξει τη νέα ταχέως αναπτυσσόμενη παραγωγή αιολικής ενέργειας, στην περιοχή. Αυτό το έργο των 200 εκατομμυρίων δολαρίων, αναμένεται να ολοκληρωθεί το 2007. Το εργοστάσιο θα χρησιμοποιεί ενέργεια από ένα 100 MW αιολικό πάρκο, για την αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα σε έναν υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα και στη συνέχεια, αναμεμιγμένο με φυσικό αέριο, θα κινήσει ανεμογεννήτριες για παραγωγή ενέργειας.



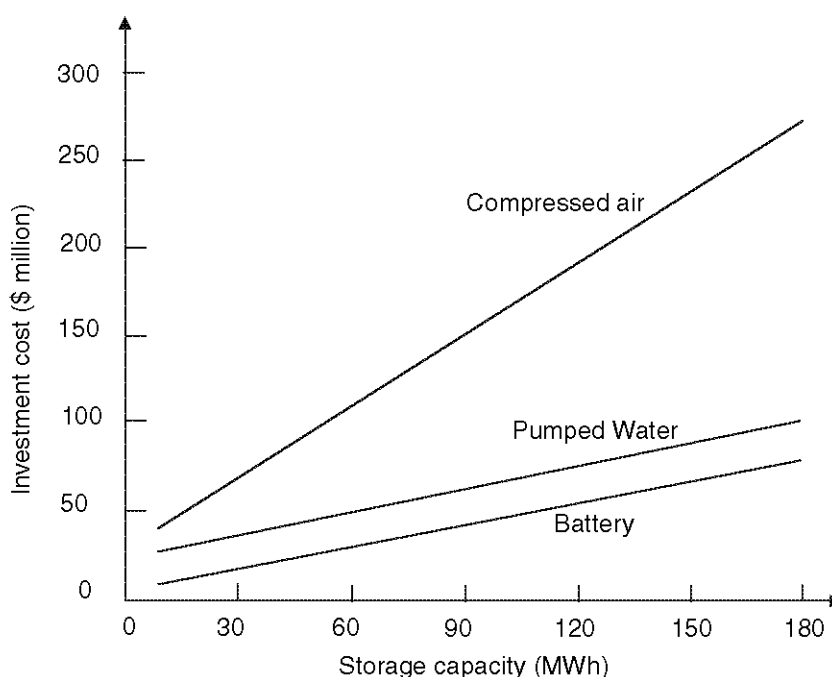
ΣΧΗΜΑ 7.27 Σύστημα ισχύος των 2,7 GW κοινής ωφελείας φορτία χρησιμοποιώντας αποθήκευση ενέργειας συμπιεσμένου αέρα.

Μια εταιρεία με βάση στο Χιούστον, η CAES, έχει προτείνει την χρήση των εγκαταλειμμένων ορυχείων ασβεστόλιθου στο Norton, (Σχήμα 7.27). Τα ορυχεία των 10 εκατομμυρίων m<sup>3</sup>, μπορούν να αποθηκεύσουν αρκετό συμπιεσμένο αέρα για να οδηγήσει στροβίλους χωρητικότητας 2700 MW. Η συνεδριακή δύναμη του διοικητικού συμβουλίου του Οχάιο, ενέκρινε την πρόταση το 2001 για να ξεκινήσει την λειτουργία του πριν από το 2005. Μια μελέτη της Sandia National Laboratory, διαπίστωσε ότι η

δομή του βράχου ήταν αρκετά πυκνή για να αποτραπεί διαρροή του αέρα και αρκετά στερεή, για να χειριστεί τις πιέσεις λειτουργίας από τα 11 MPa μέχρι κάτω στα 5,5 MPa πίεση. Ο αέρας από το ορυχείο μετά την ψύξη εκτόνωσης, θερμαίνεται με φυσικό αέριο, για να οδηγήσει τους στροβίλους στην βέλτιστη θερμοκρασία. Αυτή η λειτουργία χρησιμοποιεί λιγότερο από το ένα τρίτο του καυσίμου μιας γεννήτριας φυσικού αερίου και μειώνει τα επίπεδα του κόστους της ενέργειας και των εκπομπών. Το σύστημα του Οχάιο, έχει σχεδιαστεί με εννέα γεννήτριες των 300 MW και χρησιμοποιεί 18 συμπιεστές, για να διατηρήσει την πίεση των ορυχείων.

### 7.13. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ

Για μια πολύ μεγάλης κλίμακας αποθήκευση ενέργειας, διερευνήθηκε η εφικτότητα ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας 20 MW για ένα αιολικό πάρκο των στην Ολλανδία. Μία ελάχιστη χωρητικότητα των 10 MW βρέθηκε αναγκαία για το αιολικό πάρκο, και μία πρόσθετη χωρητικότητα των 10 MWh επιτράπηκε για να καλύψει τις απώλειες κατά την εκφόρτιση, με κάποιο περιθώριο.



ΣΧΗΜΑ 7.28 Χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας έναντι επενδυτικού κόστους διαφόρων εναλλακτικών τεχνολογιών

Αποθήκευση άντλησης νερού (υδροαντλητικός σταθμός, αντλιοστάσιο), αποθήκευση άντλησης συμπιεσμένου αέρα και μπαταρίες μολύβδου συγκρίθηκαν για αυτό το έργο. Πραγματοποιήθηκε επίσης μια παραμετρική μελέτη, με την χωρητικότητα αποθήκευσης για πιθανές εφαρμογές στην περιοχή των 20 έως 160 MWh. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής, φαίνονται στο σχήμα 7.28. Αυτό δείχνει ότι η μπαταρία μολύβδου είναι η επιλογή ελαχίστου κόστους, που ακολουθείται από το αντλούμενο νερό, και στη συνέχεια από τα συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου

αέρα. Αυτές οι διαπραγματεύσεις ωστόσο, είναι εξαιρετικά ειδικές του χώρου αυτού. Η φύση της αποθήκευσης αέρα και το κόστος του (π.χ. δωρεάν χρήση των παλαιών ορυχείων) μπορεί να αλλάξει τις διαπραγματεύσεις και την τελική απόφαση υλοποίησης της εγκατάστασης.

*ΑΝΑΦΟΡΕΣ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ*

1. Riezenman, M.J., In search of better batteries, IEEE Spectrum, pp. 51–56, May 1995.
2. Wicks, F. and Halls, S., Evaluating performance enhancement of lead-acid batteries by force circulation of the electrolytic, Proceedings of the Intersociety Engineering Conference on Energy Conversion, Paper No. 180, 1995.
3. DeWinkel, C.C. and Lamopree, J.D., Storing power for critical loads, IEEE Spectrum, pp. 38–42, June 1993.
4. Balachandran, U., Super Power, Progress in developing the new superconductors, IEEE Spectrum, pp. 18–25, July 1997.
5. Enslin, J., Jansen, C., and Bauer, P., In store for the future, Interconnection and energy storage for offshore wind farms, Renewable Energy World, James & James Ltd., London, January–February 2004, pp. 104–113.



## **ΚΕΦ. 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Τα καύσιμα του πλανήτη μας εξαντλούνται από την υπερκατανάλωση ώστε αργά ή γρήγορα να δημιουργηθεί παγκόσμιο ενεργειακό πρόβλημα. Οφείλουμε να αλλάξουμε τρόπο ζωής και συνήθειες σε ότι αφορά την ενεργειακή κατανάλωση, να στραφούμε σε άλλους ενεργειακούς πόρους και να μάθουμε να τους διαχειριζόμαστε. Η Αιολική και ηλιακή ενέργεια φιλικές προς το περιβάλλον και ανεξάντλητες είναι μονόδρομος προς το παρόν, αφού ενεργειακές μορφές όπως η πυρηνική που έχουν ήδη δοκιμαστεί, ενέχουν κινδύνους.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας συμβάλλει και αυτή με αρνητικές συνέπειες στο περιβάλλον και στον άνθρωπο. Ο θόρυβος, η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή, η επίδραση στα πτηνά, η αισθητική της στο περιβάλλον είναι μερικά μειονεκτήματά της. Μπορούμε όμως να ισχυριστούμε ότι οι συνέπειες είναι τόσο σοβαρές, ώστε να της αποκλείσουν την υποψηφιότητα της για μελλοντική εκμετάλλευση; Όχι. Διότι απλούστατα η κλιματική αλλαγή που κατά την κρατούσα άποψη είναι συνέπεια των μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενων καυσίμων έχει χειρότερες επιδράσεις. Εμείς, επιλέγουμε «το μη χείρον βέλτιστο». Εξ άλλου η ζωή έχει δείξει ότι τίποτα στην ζωή μας δεν είναι μόνο καλό ή κακό, αλλά μια ενδιάμεση κατάσταση ή συνύπαρξη των δύο, εξαρτώμενη κατά περίπτωση, από τις ανάγκες και συνθήκες της εποχής.

Το ίδιο βέβαια ισχύει και για την ηλιακή ενέργεια η οποία δεν κατηγορείται για τόσα πολλά όσο η Αιολική.

Προς το παρόν και για τις δύο μορφές ενέργειας, ισχύει, ότι είναι συμπληρωματικές εκείνων των ορυκτών καυσίμων. Ο μικρός βαθμός απόδοσης της μετατροπής των ΑΠΕ σε ηλεκτρική είναι μειονέκτημα αλλά όχι τόσο σοβαρό όσο η αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας αυτών. Οι χρησιμοποιούμενοι μέθοδοι αποθήκευσης που υποστηρίζουν τις ΑΠΕ με επικρατέστερους σήμερα τους συσσωρευτές, δεν μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες σε διάρκεια και απόδοση, ώστε να τις καταστήσουν υποψήφιες σαν αυτόνομες και κύριες μορφές ενέργειας.

Άποψη της συντάκτριας της πτυχιακής εργασίας είναι ότι το πρόβλημα της επικράτησης των ΑΠΕ είναι η αποθήκευση της ενέργειας. Για αυτό τα κράτη, οφείλουν να εστιάσουν στην δημιουργία κινήτρων για έρευνα και επενδύσεις σε παγκόσμιο επίπεδο, για την παραγωγή συσσωρευτών μεγάλης απόδοσης σε παγκόσμιο επίπεδο. Έτσι με την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας για μακρά χρονικά διαστήματα, υπερσκελίζονται τα μεγάλα νεκρά διαστήματα λόγω άπνοιας και ηλιακής ανεπάρκειας κατά την λειτουργία των Α/Γ και φωτοβολταϊκών συστημάτων ενώ ο μικρός βαθμός απόδοσης τους, αντισταθμίζεται με την χρησιμοποίηση μεγάλου αριθμού συσσωρευτών.

Το μέλλον των ΑΠΕ μάλλον μας δείχνει την αισιόδοξη πλευρά του, αρκεί να πιστέψουμε και να επενδύσουμε σε αυτό.