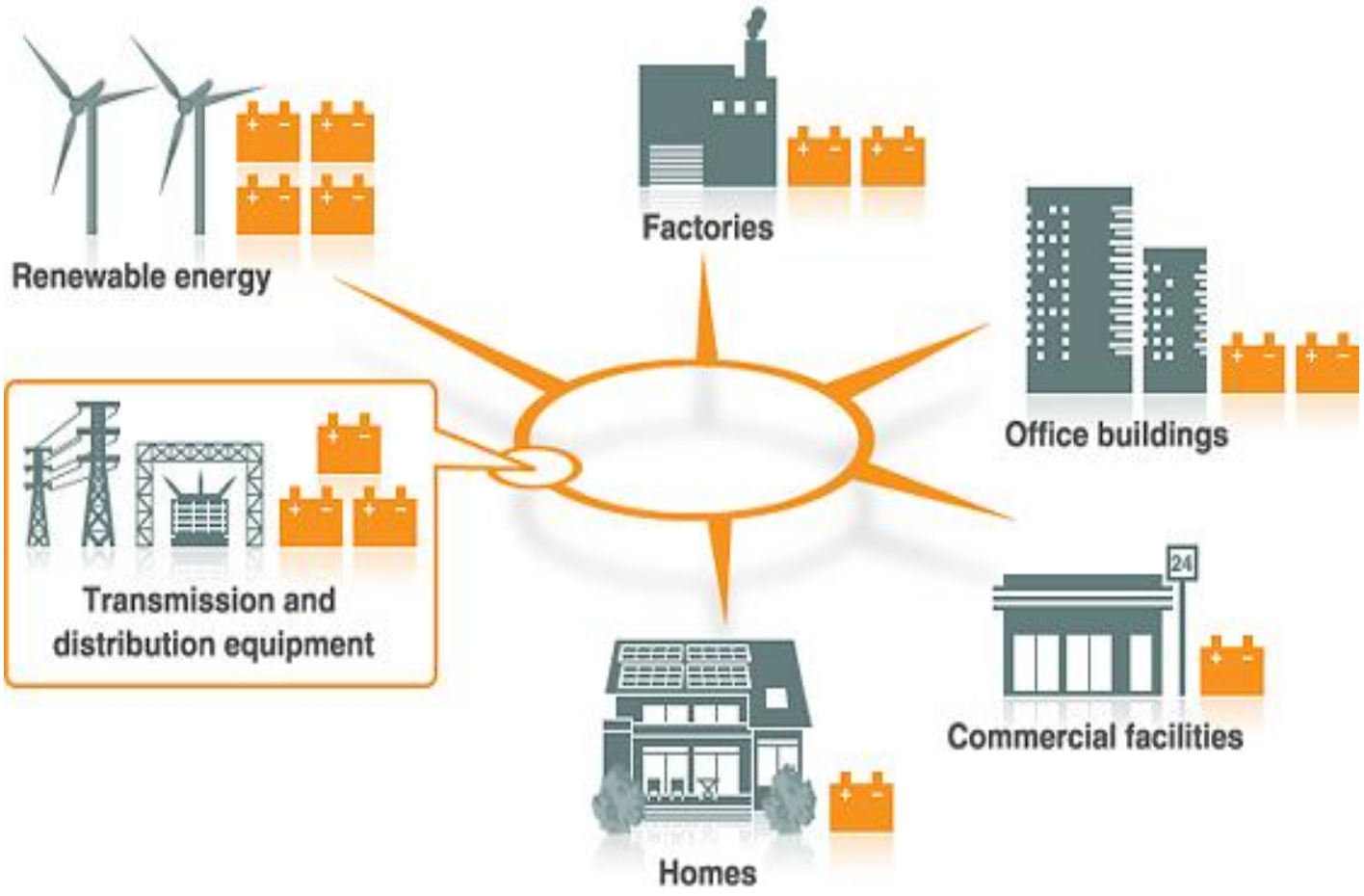
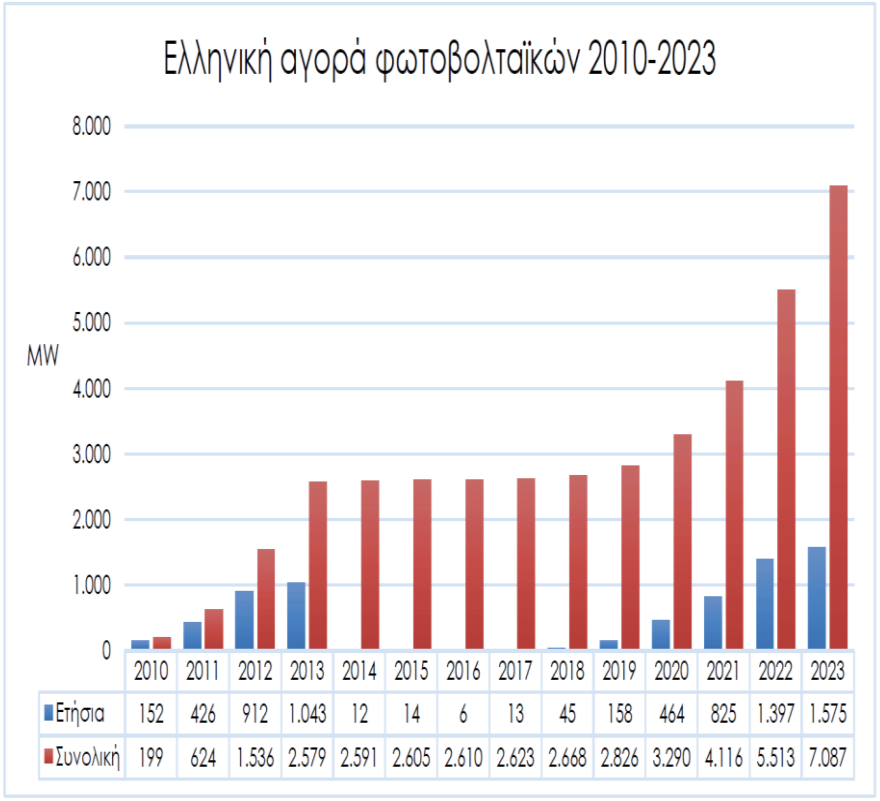
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



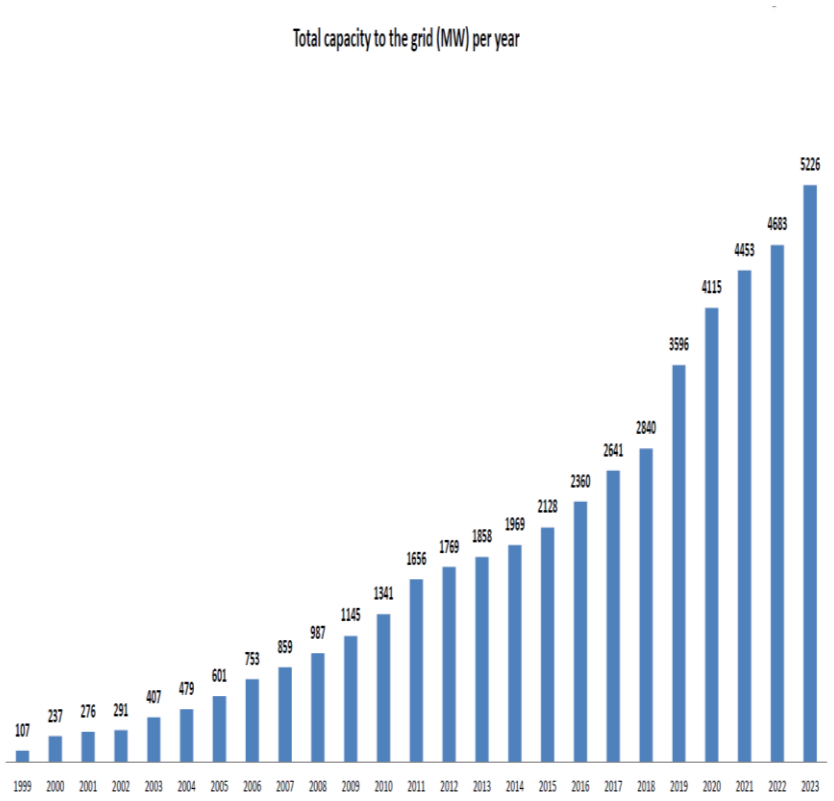
ENERGY STORAGE SYSTEMS

Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκων
2010 – 2023



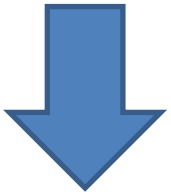
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Ετήσια	152	426	912	1.043	12	14	6	13	45	158	464	825	1.397	1.575
Συνολική	199	624	1.536	2.579	2.591	2.605	2.610	2.623	2.668	2.826	3.290	4.116	5.513	7.087

Εγκατεστημένη ισχύς ανεμογεννητριών
1999 - 2023



Η Ανάγκη για Αποθήκευση ενέργειας

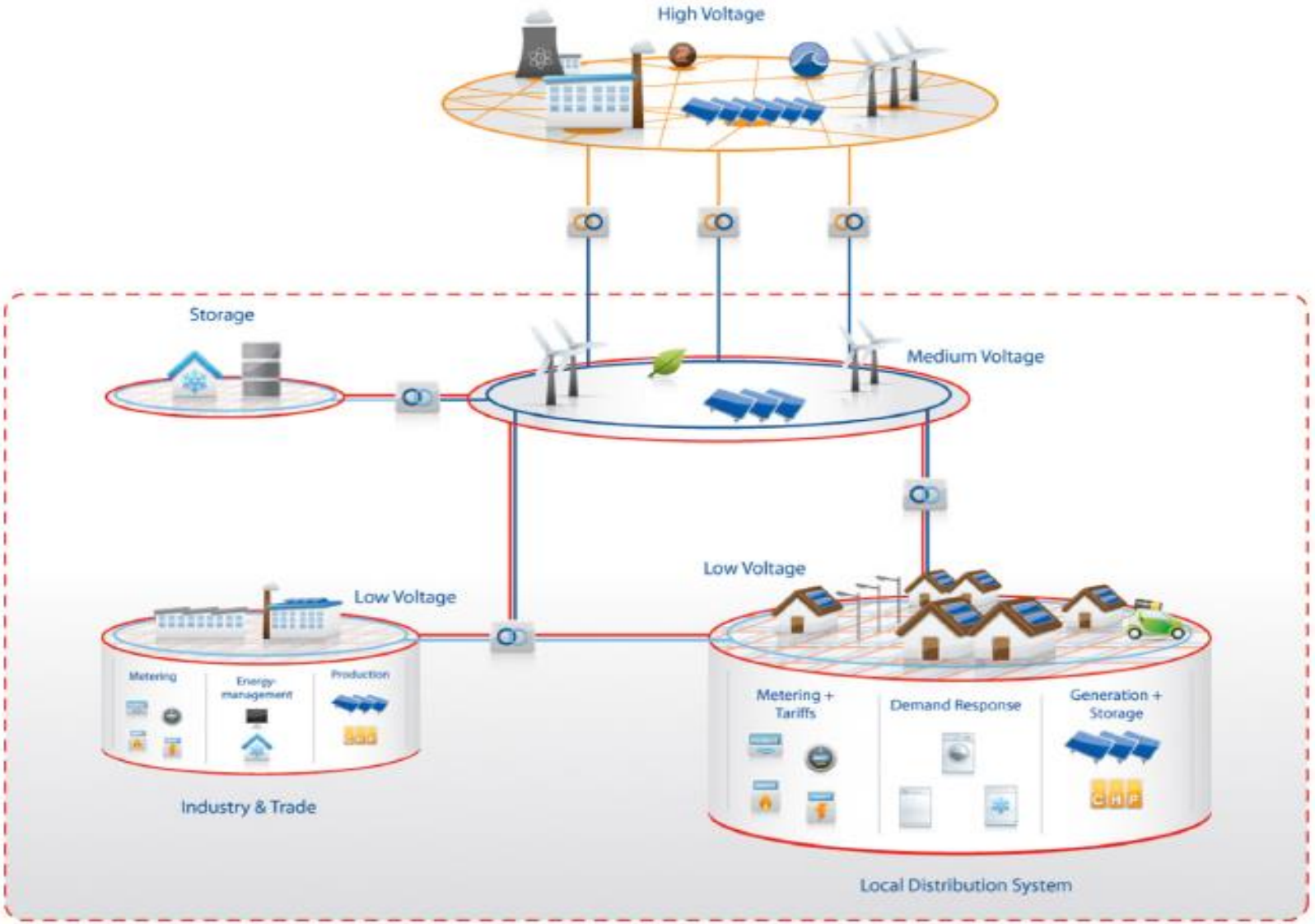
- Η ενέργεια που παράγεται από τις διατάξεις των ΑΠΕ, όπως είναι τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) πλαίσια και οι ανεμογεννήτριες, κυμαίνεται σημαντικά σε ωριαία, ημερήσια και εποχιακή βάση.

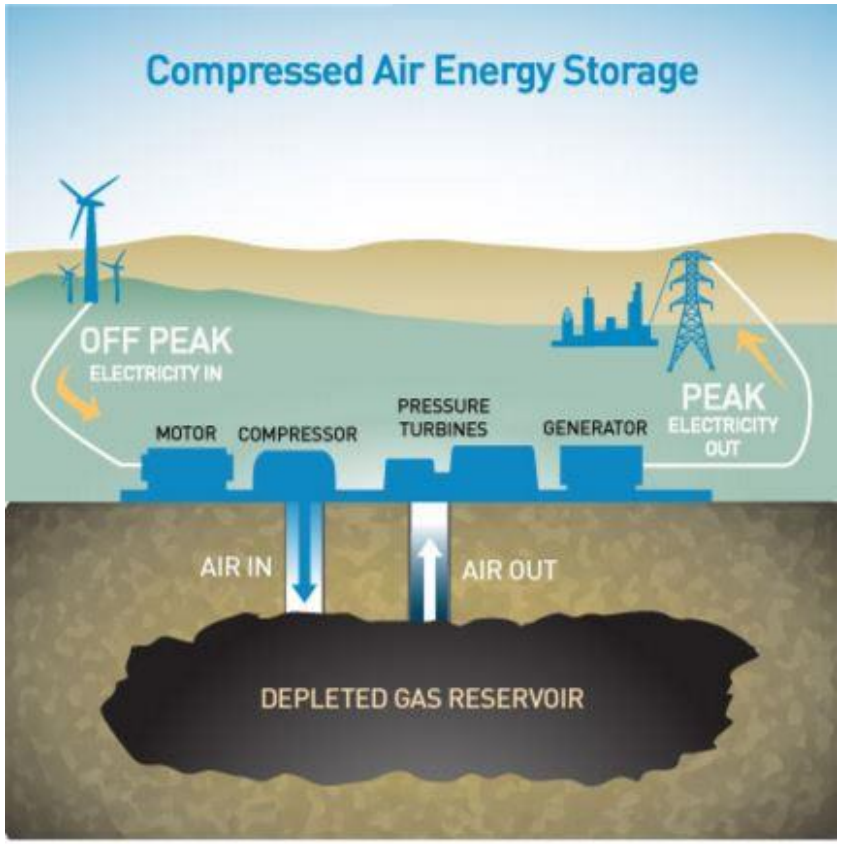


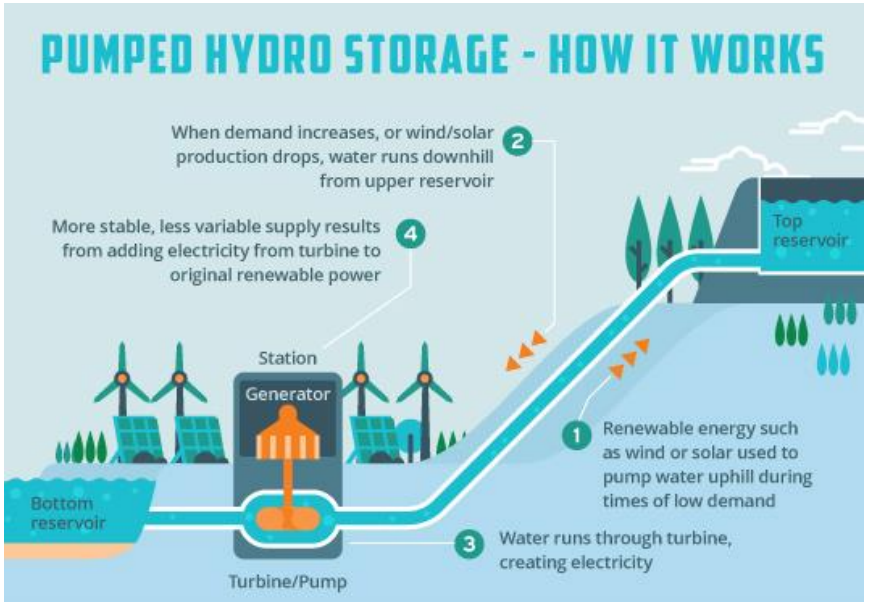
- Αναντιστοιχία της παραγωγής (προσφοράς), η οποία δεν επιδέχεται ανθρώπινο έλεγχο, με την κατανάλωση (ζήτηση) ενέργειας.



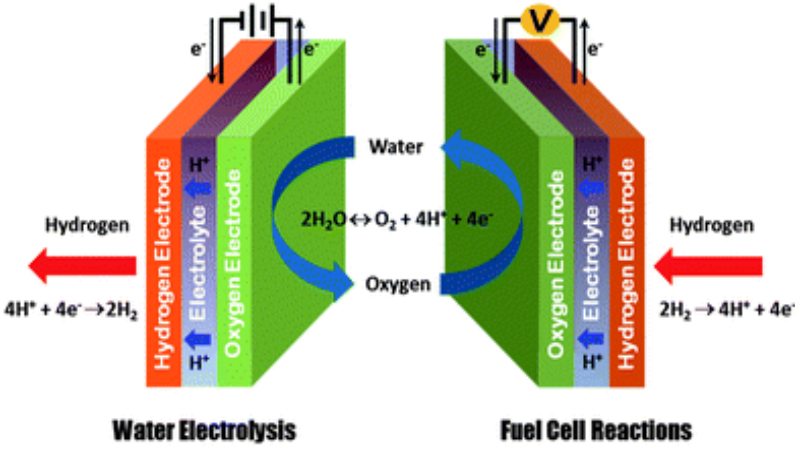
- Δημιουργείται, επομένως, η ανάγκη της ενσωμάτωσης της ενεργειακής αποθήκευσης στα συστήματα παραγωγής των ΑΠΕ

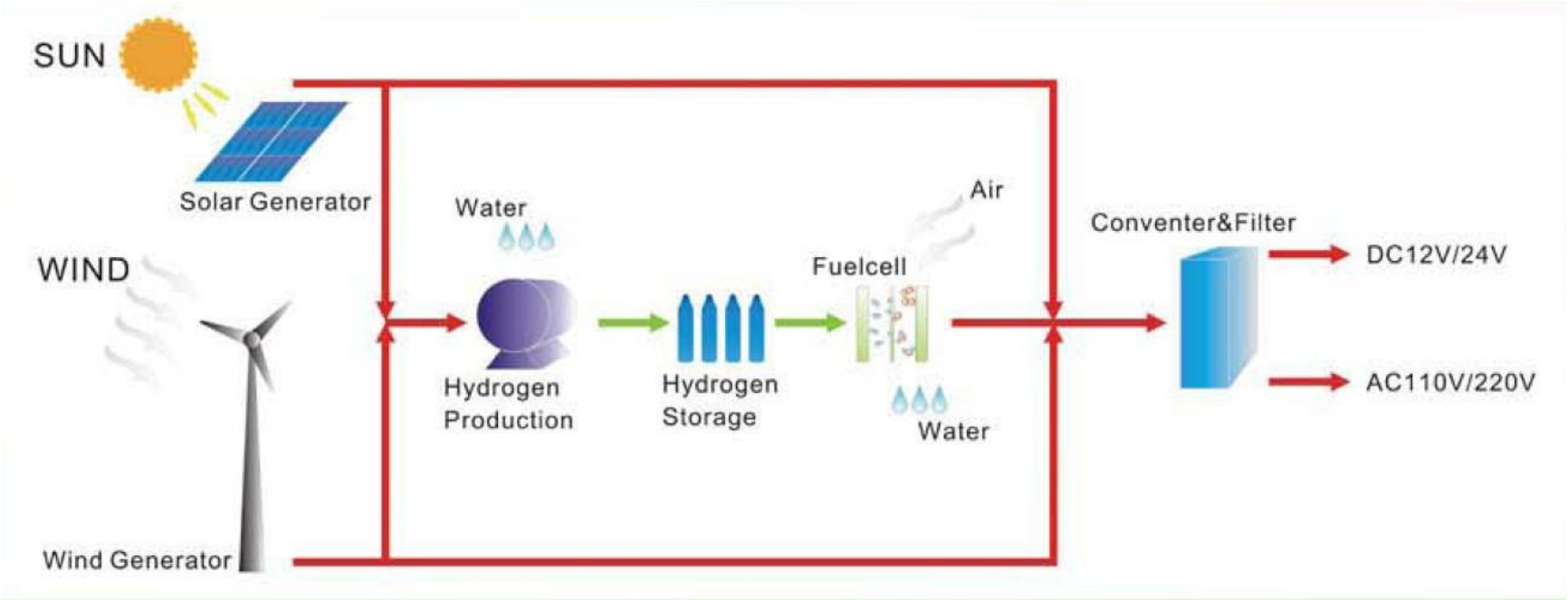

High Voltage
Storage
Medium Voltage
Low Voltage
Low Voltage
Metering
Energy-management
Production
Industry & Trade
Metering + Tariffs
Demand Response
Generation + Storage
C H P
Local Distribution System



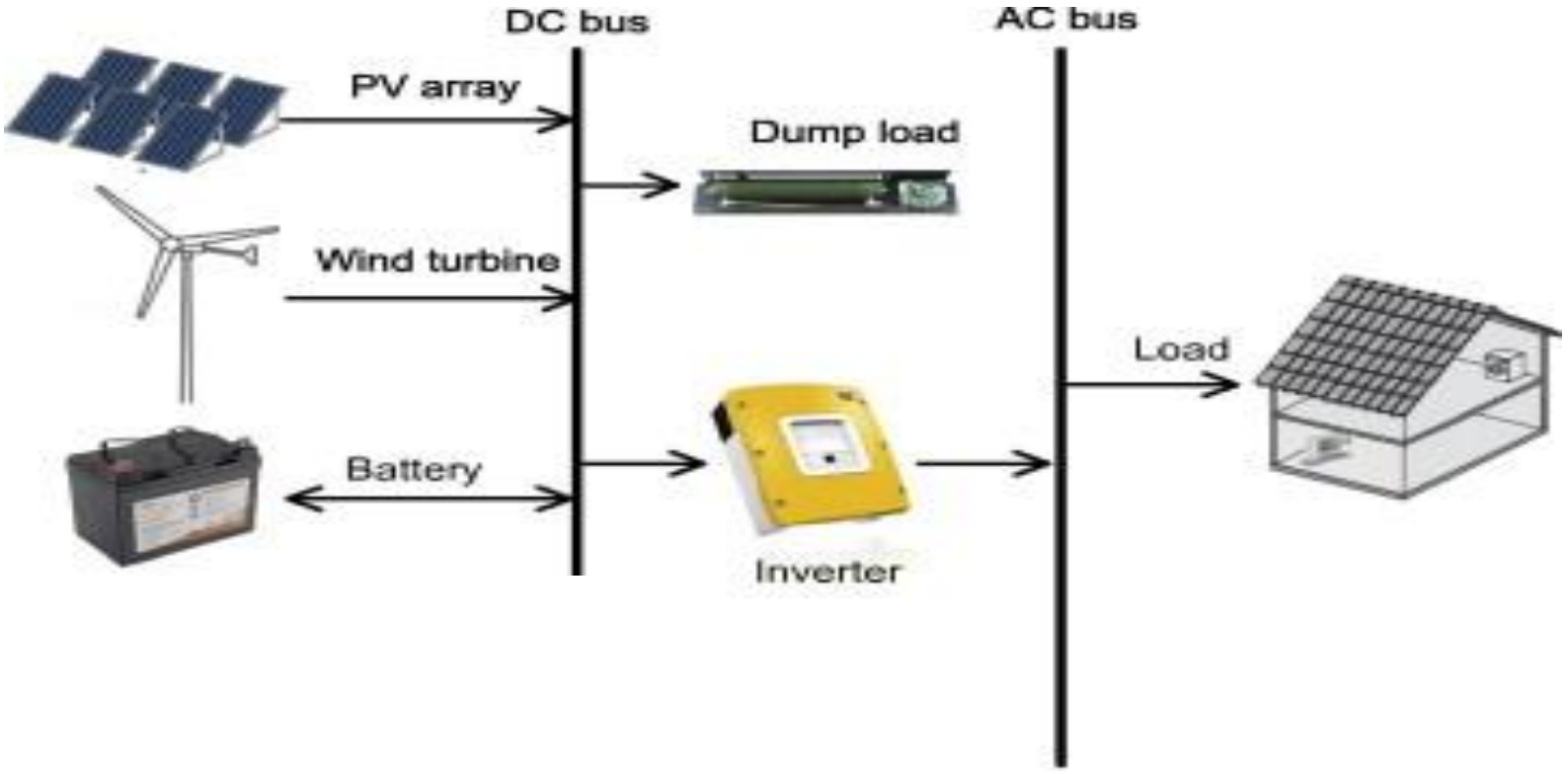


Μηχανική Αποθήκευση Ενέργειας





Χημική Αποθήκευση Ενέργειας

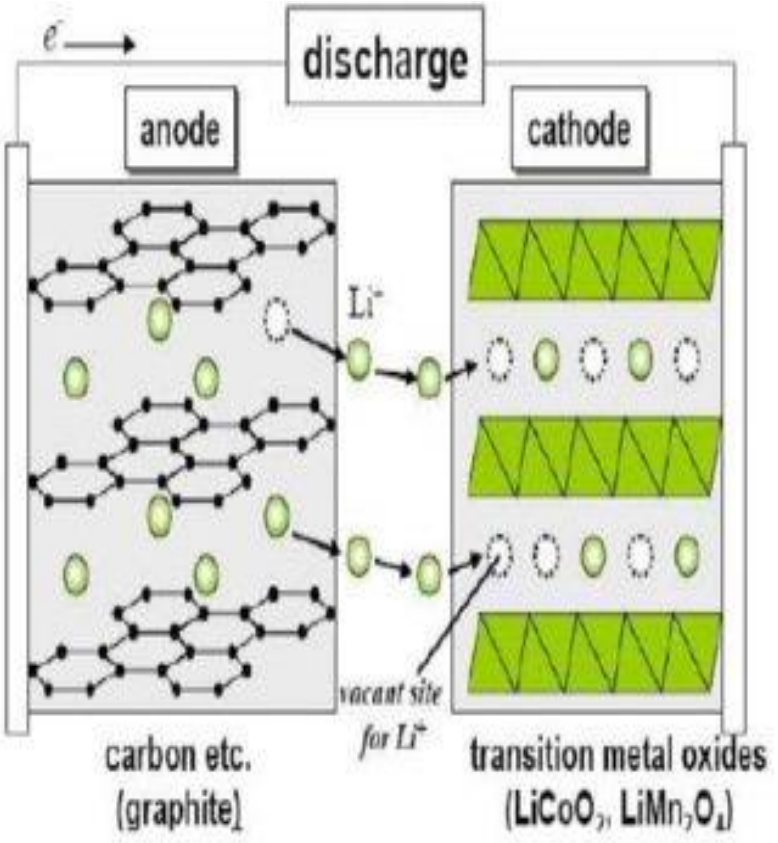


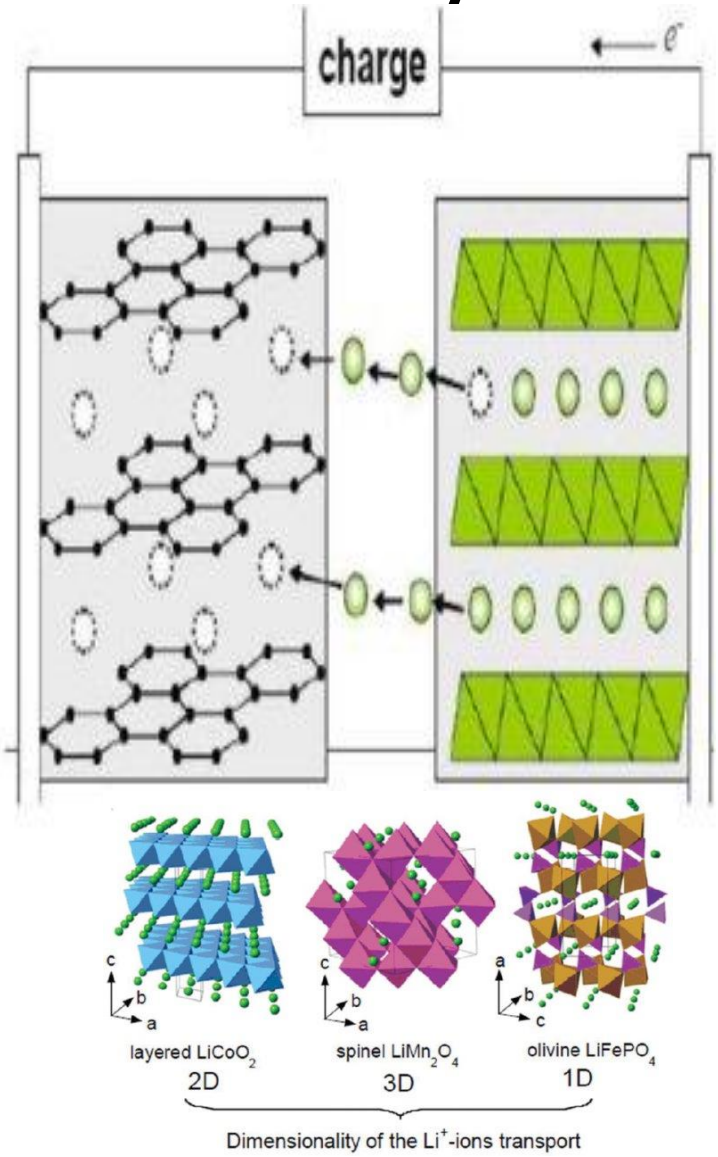
Ηλεκτροχημική Αποθήκευση Ενέργειας

Secondary Batteries commonly used in Hybrid Systems

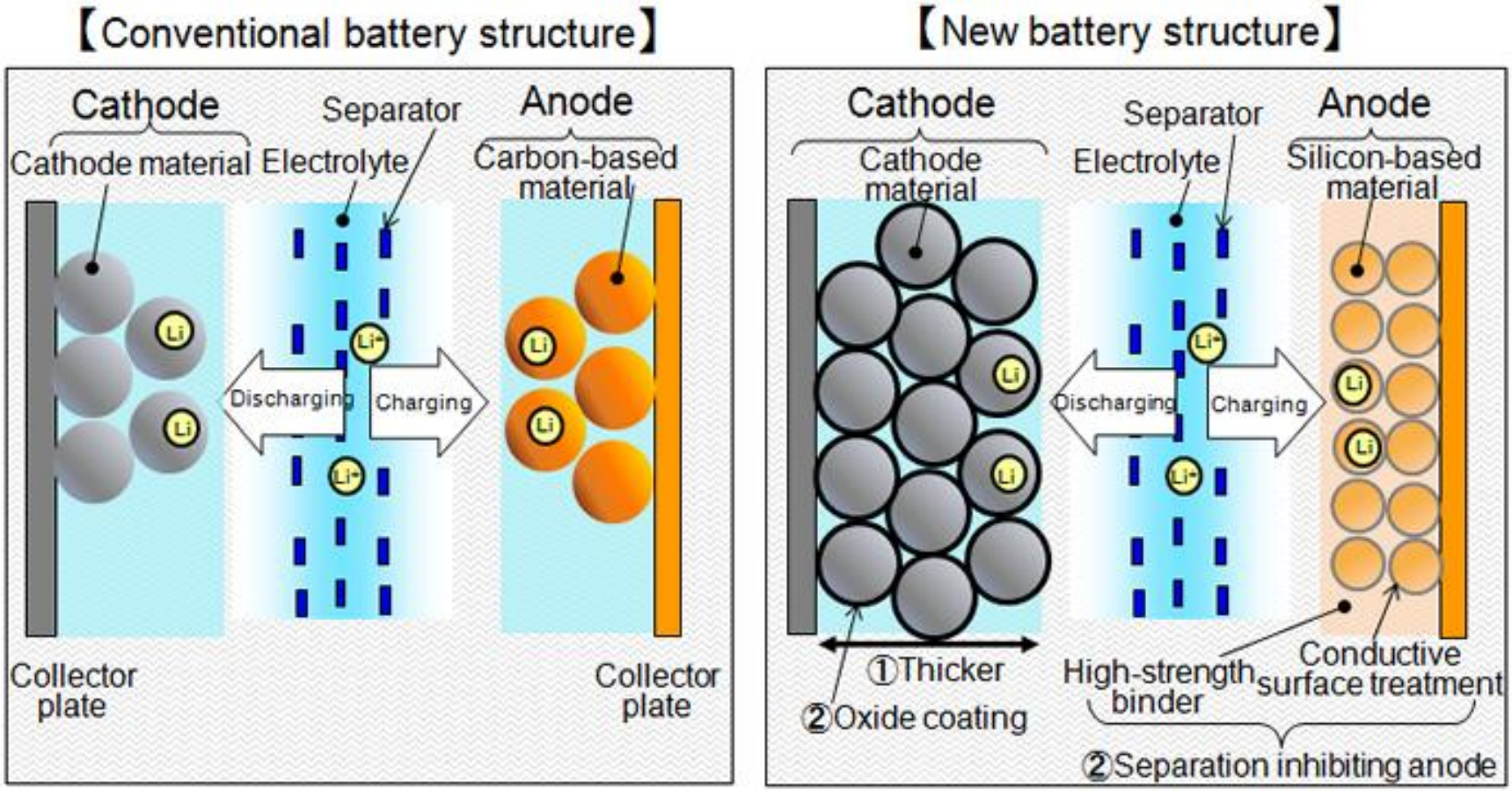
- Lead acid batteries
- Lithium ion Batteries

Charging and Discharging a Lithium - ion Battery

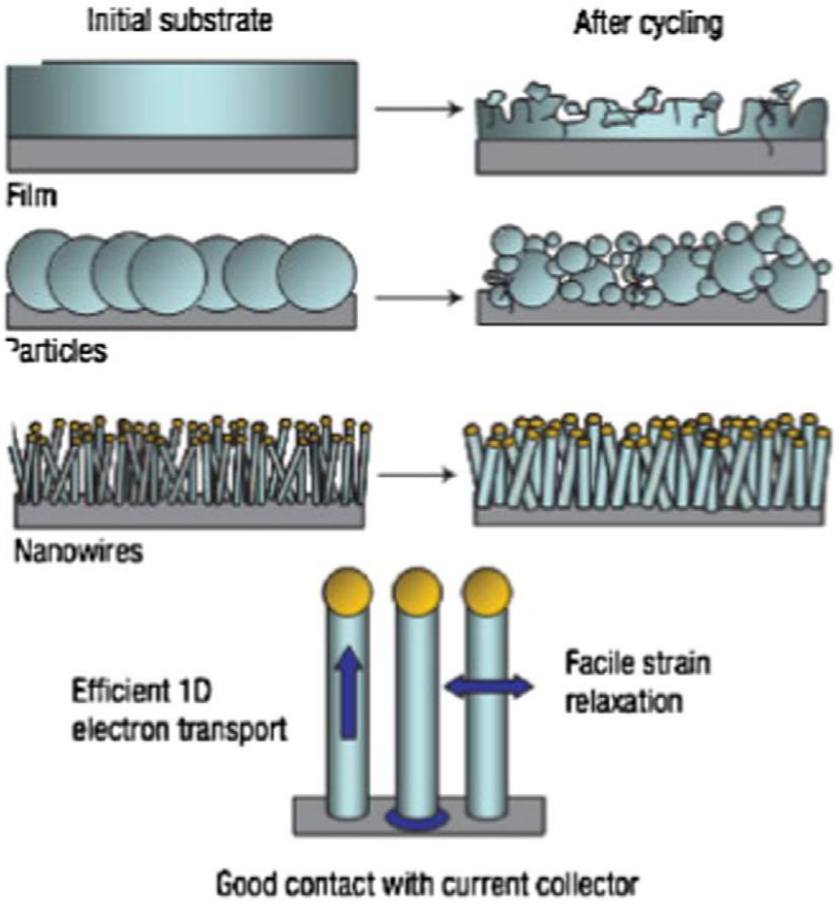




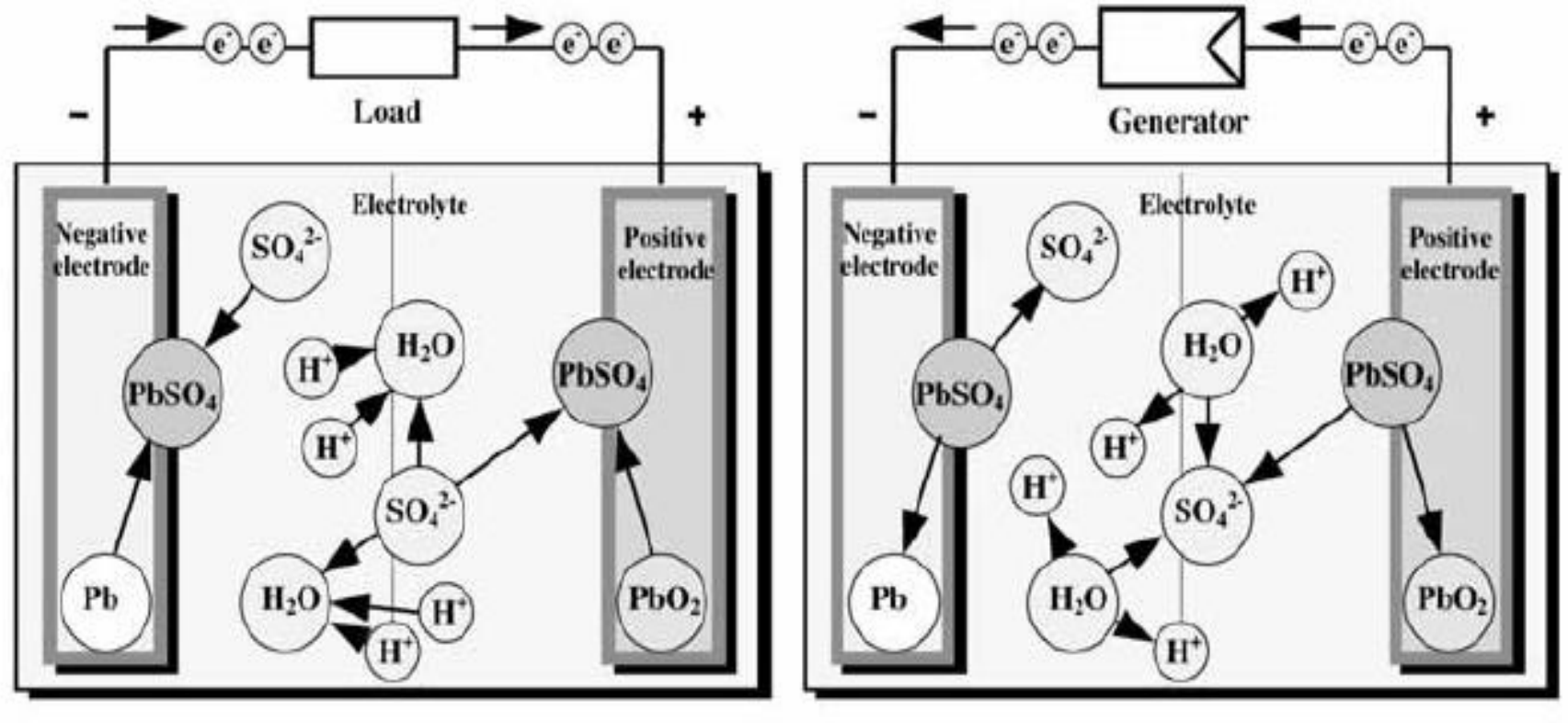
Charging and Discharging a Lithium - ion Battery



Schematic of morphological changes that occur in Si during electrochemical cycling.



Charging and Discharging a Lead–Acid Battery



Battery Specifications

- Voltage
- Battery Capacity and Energy
- Rate and Depth of Discharge
- Energy and Charge Efficiency
- Days of Autonomy
- Life Expectancy
- Environmental Conditions

Voltage Level

- Theoretical Voltage
- Open – circuit Voltage [f(SOC)]
- Closed – circuit voltage [f(SOC, T, I)]
- Nominal voltage
- Working voltage
- Average voltage (Aver of Working Voltage)
- The end of discharge voltage
- The end of charge voltage

ΤΥΠΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ =
ΑΝΟΔΟΣ (ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΟΞΕΙΔΩΣΗΣ) + ΚΑΘΟΔΟΣ (ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΑΝΑΓΩΓΗΣ)

- **Li – ion cell**

ΑΝΟΔΟΣ $Li\ C_6 \leftrightarrow C_6 + Li^+ + e^-$ +2.8V

ΚΑΘΟΔΟΣ $CoO_2 + Li^+ + e^- \leftrightarrow LiCoO_2$ +1.25V

ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ

$$Li\ C_6 + CoO_2 \leftrightarrow LiCoO_2 + C_6$$

ΤΥΠΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

2.8V + 1.25V = 4.05V

ΤΥΠΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ =
ΑΝΟΔΟΣ (ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΟΞΕΙΔΩΣΗΣ) + ΚΑΘΟΔΟΣ (ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΑΝΑΓΩΓΗΣ)

- **Lead – acid cell**

ΑΝΟΔΟΣ $Pb + SO_4^{2-} \leftrightarrow PbSO_4 + 2e^-$ +0.36V

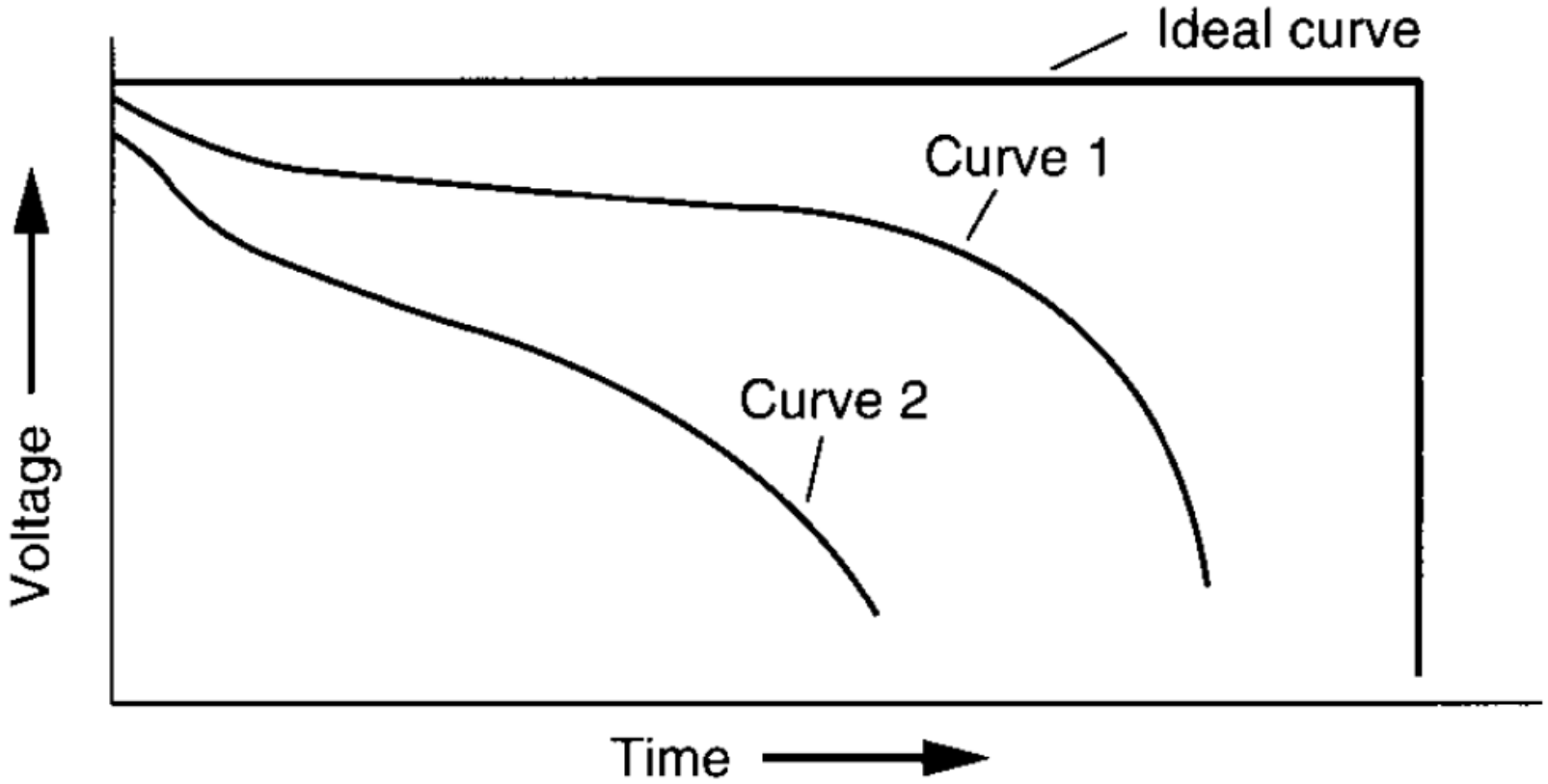
ΚΑΘΟΔΟΣ $PbO_2 + SO_4^{2-} + 4H^+ + 2e^- \leftrightarrow PbSO_4 + 2H_2O$ +1.69V

ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ

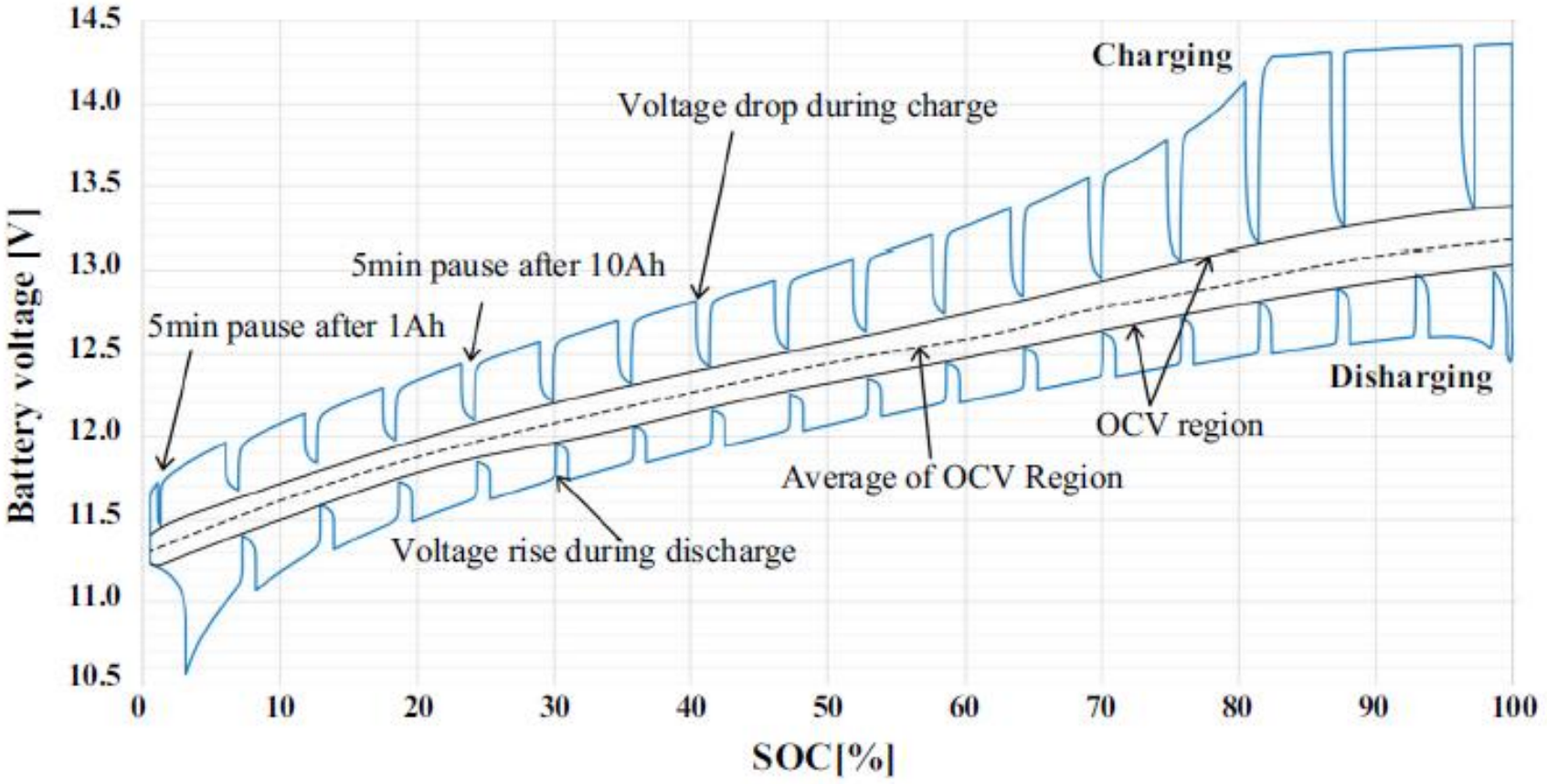
$$Pb + PbO_2 + 2H_2SO_4 \leftrightarrow 2PbSO_4 + 2H_2O$$

ΤΥΠΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

0.36V + 1.69V = 2.05V


Ideal curve
Curve 1
Curve 2
Voltage
Time

Open and Closed Circuit Voltage



Battery Capacity

- A battery's ***capacity*** *(in ampere-hours (Ah))* is the amount of electric charge it can deliver.
- Factors that affect battery capacity:
  - Rate of discharge
  - Depth of Discharge (DoD)
  - Temperature
  - Age
  - Recharging characteristics

Χαρακτηριστικά τυπικών υλικών ηλεκτροδίων

Material	Atomic or molecular weight, g	Standard reduction potential at 25°C, V	Valence change	Melting point, °C	Density, g/cm³	Electrochemical equivalents		
						Ah/g	g/Ah	Ah/cm³
Anode materials								
H_2	2.01	0	2	—	—	26.59	0.037	—
		−0.83†						
Li	6.94	−3.01	1	180	0.54	3.86	0.259	2.06
Na	23.0	−2.71	1	98	0.97	1.16	0.858	1.14
Mg	24.3	−2.38	2	650	1.74	2.20	0.454	3.8
		−2.69†						
Al	26.9	−1.66	3	659	2.69	2.98	0.335	8.1
Ca	40.1	−2.84	2	851	1.54	1.34	0.748	2.06
		−2.35†						
Fe	55.8	−0.44	2	1528	7.85	0.96	1.04	7.5
		−0.88†						
Zn	65.4	−0.76	2	419	7.14	0.82	1.22	5.8
		−1.25†						
Cd	112.4	−0.40	2	321	8.65	0.48	2.10	4.1
		−0.81†						
Pb	207.2	−0.13	2	327	11.34	0.26	3.87	2.9
$(Li)C_6$[§]	72.06	−−2.8	1	—	2.25	0.372	2.69	0.837
MH[¶]		−0.83†	2	—	—	0.305	3.28	—
CH_3OH	32.04	—	6	—	—	5.02	0.20	—
Cathode materials								
CuF_2	101.5	3.55	2			0.528	1.89	
O_2	32.0	1.23	4	—	—	3.35	0.30	
		0.40†						
Cl_2	71.0	1.36	2	—	—	0.756	1.32	
SO_2	64.0	—	1	—	—	0.419	2.38	
MnO_2	86.9	1.28‡	1	—	5.0	0.308	3.24	1.54
NiOOH	91.7	0.49	1	—	7.4	0.292	3.42	2.16
CuCl	99.0	0.14	1	—	3.5	0.270	3.69	0.95
FeS_2	119.9	—	4	—	—	0.89	1.12	4.35
AgO	123.8	0.57†	2	—	7.4	0.432	2.31	3.20
Br_2	159.8	1.07	2	—	—	0.335	2.98	
HgO	216.6	0.10†	2	—	11.1	0.247	4.05	2.74
Ag_2O	231.7	0.35†	2	—	7.1	0.231	4.33	1.64
PbO_2	239.2	1.69	2	—	9.4	0.224	4.45	2.11
$LiFePO_4$	163.8	~0.42	1	—	3.44	0.160	6.25	0.554
$LiMn_2O_4$ (spinel)	148.8	~1.2	1	—	4.1	0.120	8.33	0.492
Li_xCoO_2	98	~1.25	0.5	—	5.05	0.155	6.45	0.782
I_2	253.8	0.54	2	—	4.94	0.211	4.73	1.04

Theoretical Battery Capacity, Ah

- 1g-equivalent of any active battery electrode material produces 96,487 C or 26.8 Ah.

- 1g-equivalent is the atomic or molecular weight of the active material in grams divided by the number of electrons involved in a reaction.

Theoretical Battery Capacity, Ah

Li – ion cell

$Li\ C_6$ MB = 72

1g-equivalent = 72/1 $\rightarrow$ 26.8 Ah ή 0.372 Ah/g

CoO_2 MB = 98

1g-equivalent = 98/1 $\rightarrow$ 26.8 Ah ή 0.273 Ah/g

$$Li\ C_6 \quad + \quad CoO_2 \quad \leftrightarrow \quad LiCoO_2 + C_6$$

0.372 Ah/g 0.273 Ah/g

ή 2.69 g/Ah 3.66 g/Ah $\rightarrow$ 6.35 g/Ah ή **0.157 Ah/g**

Theoretical Battery Capacity, Ah

Lead – acid cell

Pb AB = 207.2

1g-equivalent = 207.2/2=103.6g $\rightarrow$ 26.8 Ah ή 0.26 Ah/g

PbO_2 MB = 239.2

1g-equivalent = 239.2/2=119.6g $\rightarrow$ 26.8 Ah ή 0.22 Ah/g

$$Pb + PbO_2 + 2H_2SO_4 \leftrightarrow 2PbSO_4 + 2H_2O$$

0.26 Ah/g 0.22 Ah/g

ή 3.85 g/Ah 4.55 g/Ah $\rightarrow$ 8.4 g/Ah ή **0.12 Ah/g**

Theoretical Specific Energy, Wh/kg

1. Li – ion cell

Specific Energy = (Voltage)x(Capacity) = 4.05Vx0.157Ah/g = 0,636 Wh/g ή **635 Wh/kg**

2. Lead – acid cell

Specific Energy = (Voltage)x(Capacity) = 2.05V X 0.12Ah/g = 0,246 Wh/g ή **246 Wh/kg**

Rate of Charge and Discharge

- The rate or current of charge or discharge a battery is typically expressed as a multiple of the battery capacity.

$$I\ (A) = MxC$$

- For example, a 1 C rate is the current expressed in amperes (A) that has equal numerical value to the battery capacity in Ah, i.e., it represents the current that would charge or discharge a battery in 1 h.
- A battery rated at 5 Ah, the specified current for a 10-h discharge, expressed as the 0.1C or C/10 C-rate, is 0.5 A.
- A 250 mAh battery, discharged at 50 mA, has a calculated C-rate as follows:

$$C\text{-rate} = \frac{0.05}{0.250} = \frac{C}{5}\ (\text{or } 0.2C)$$

Rate of Charge and Discharge

More examples

1. What is the C-rate if a current of 300 mA is used to charge a cell with a rated capacity of 1200 mAh?

$$M = I / C = 300 \text{ mA} / 1200 \text{ mAh} = 1/4$$

The current chosen is expressed as C/4 or 0.25 C. The battery would be fully charged using this current in 4 h.

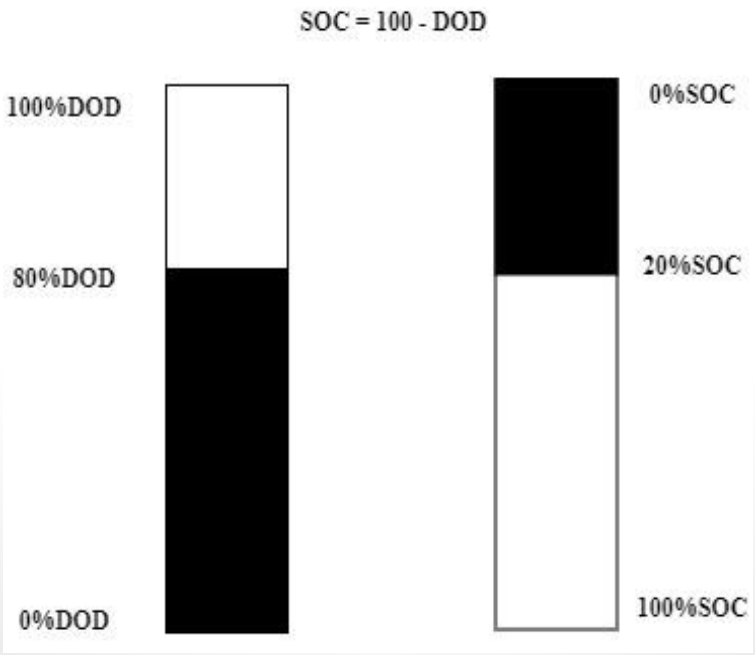
2. What is the C-rate if a battery has a capacity of 1200 mAh and is discharged using 2.4 A current?

$$M = 2400 \text{ mA} / 1200 \text{ mAh} = 2 \text{ or the C-rate is 2C}$$

The battery would be fully charged using this current in 0.5h.

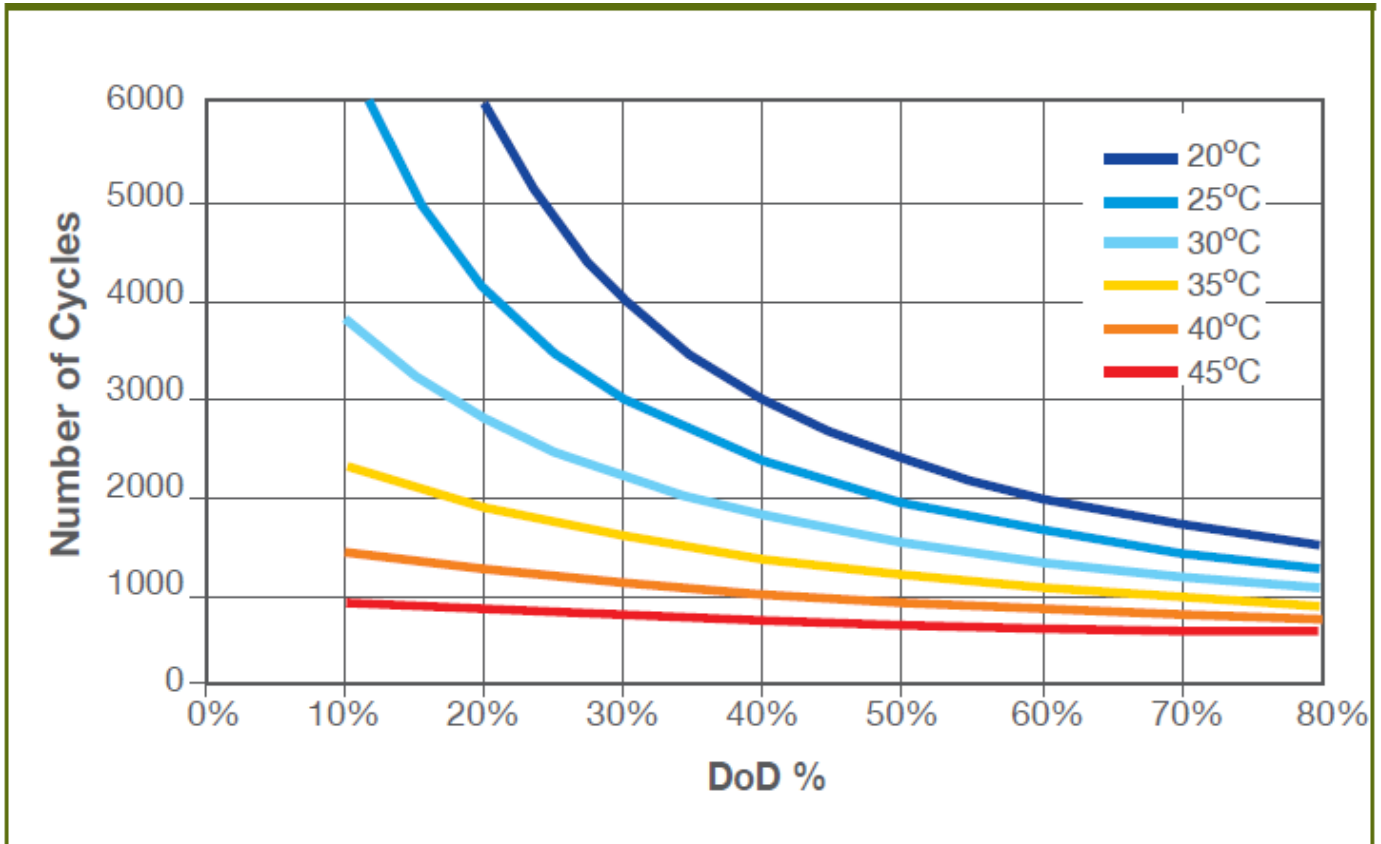
Depth of Discharge (DoD) and State of Charge (SOC)

- Depth of Discharge (DOD) refers to how much capacity will be withdrawn from a battery.
  - Battery life is directly related to how deep the battery is cycled.
- State of Charge (SOC) refers to how much capacity is available from a battery



Life Expectancy

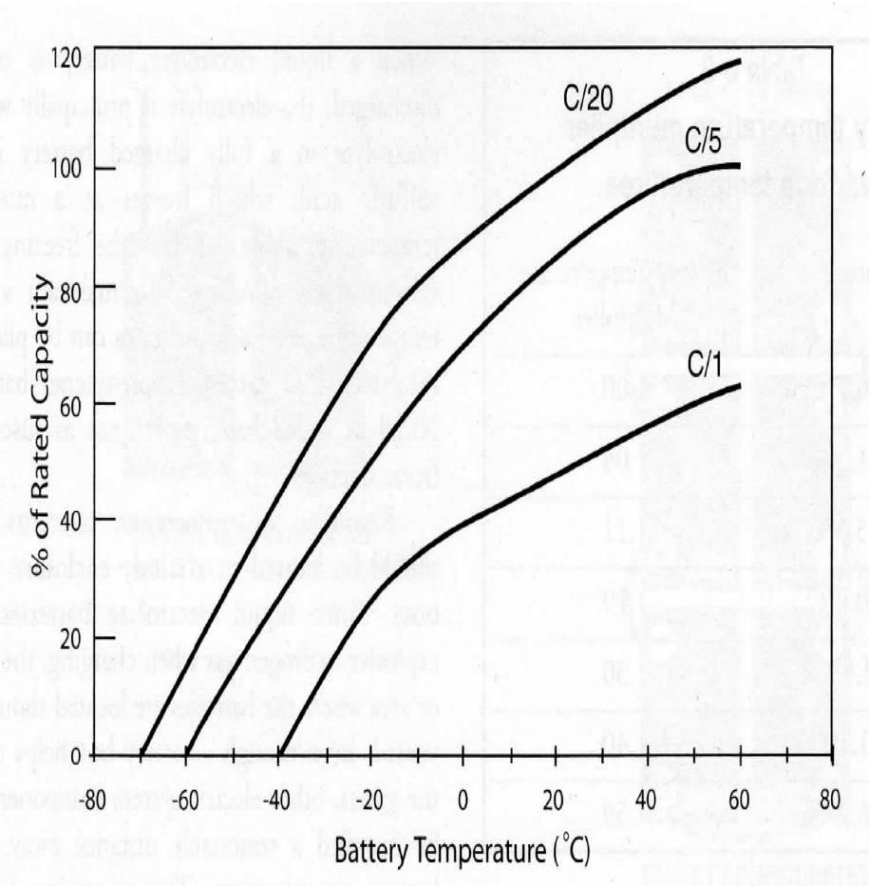
- Battery manufacturers specify life expectancy in terms of a quantity of cycles.
- Battery life (number of daily cycles) is affected by the depth of Discharge (in percent of battery capacity).

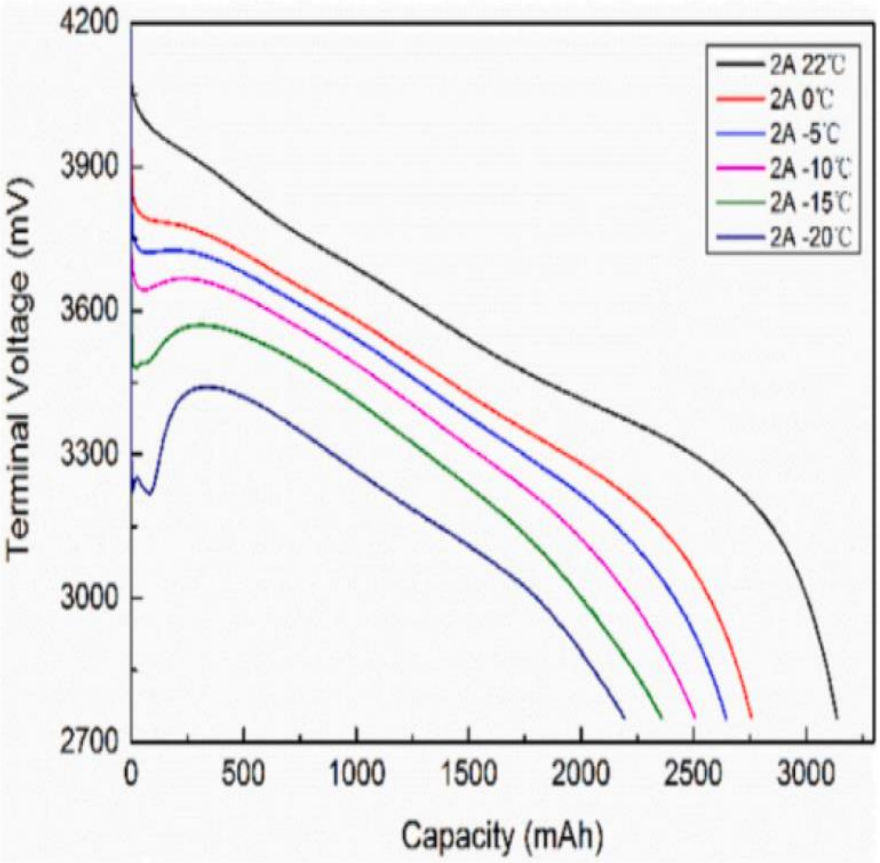


Environmental Conditions

- Batteries are affected by the environment's temperature
- Higher voltage charge termination points are required to complete charging as a battery's temperature drops (the opposite is true in warmer temperatures)
- Controllers with a temperature compensation feature can automatically adjust charge voltage based on a battery's temperature

Environmental Conditions

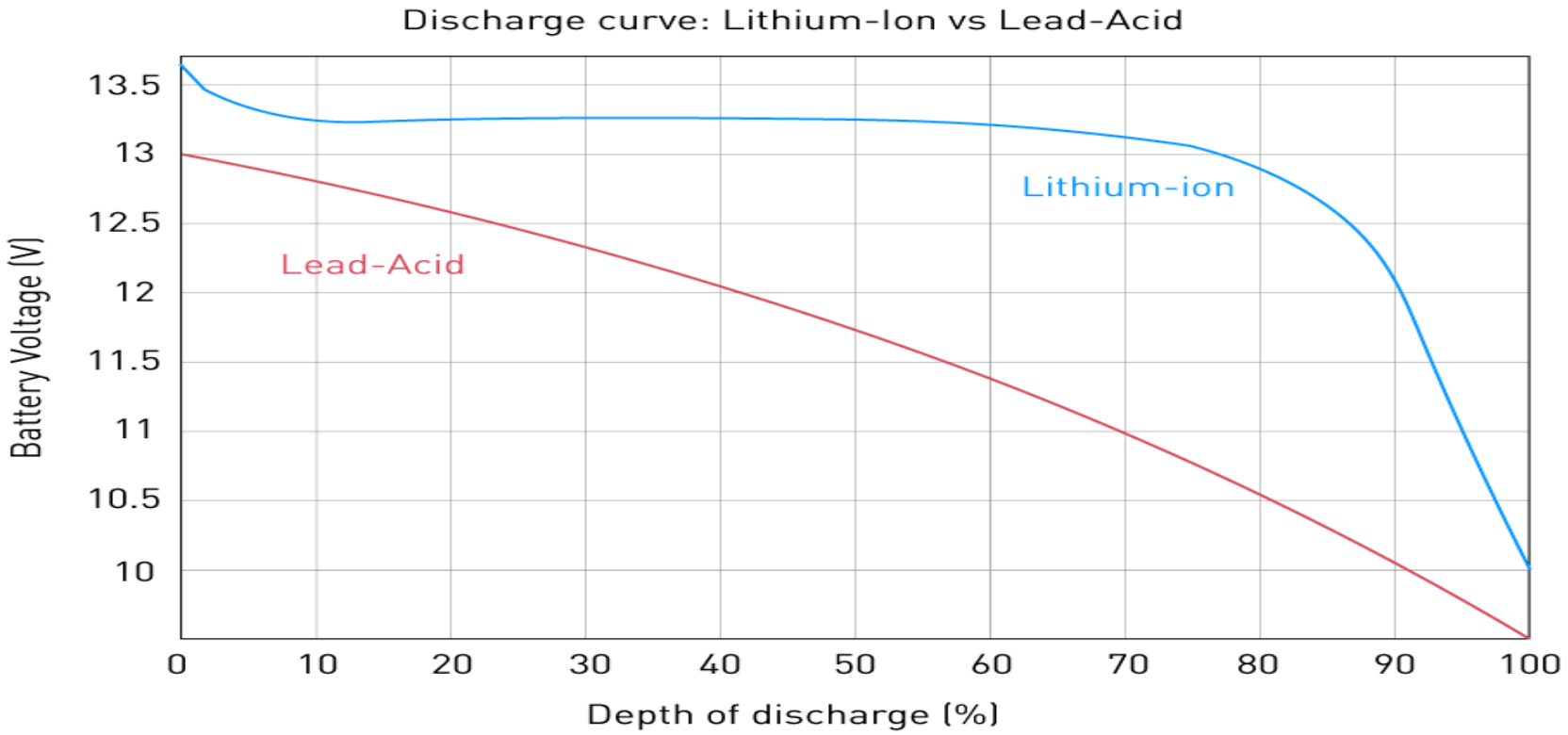




Effect of Temperature on Battery Discharge Capacity

Energy Efficiency

$$n_{en} = W_{disch} / W_{ch}$$ (95% Li-ion, 85% Lead-acid)



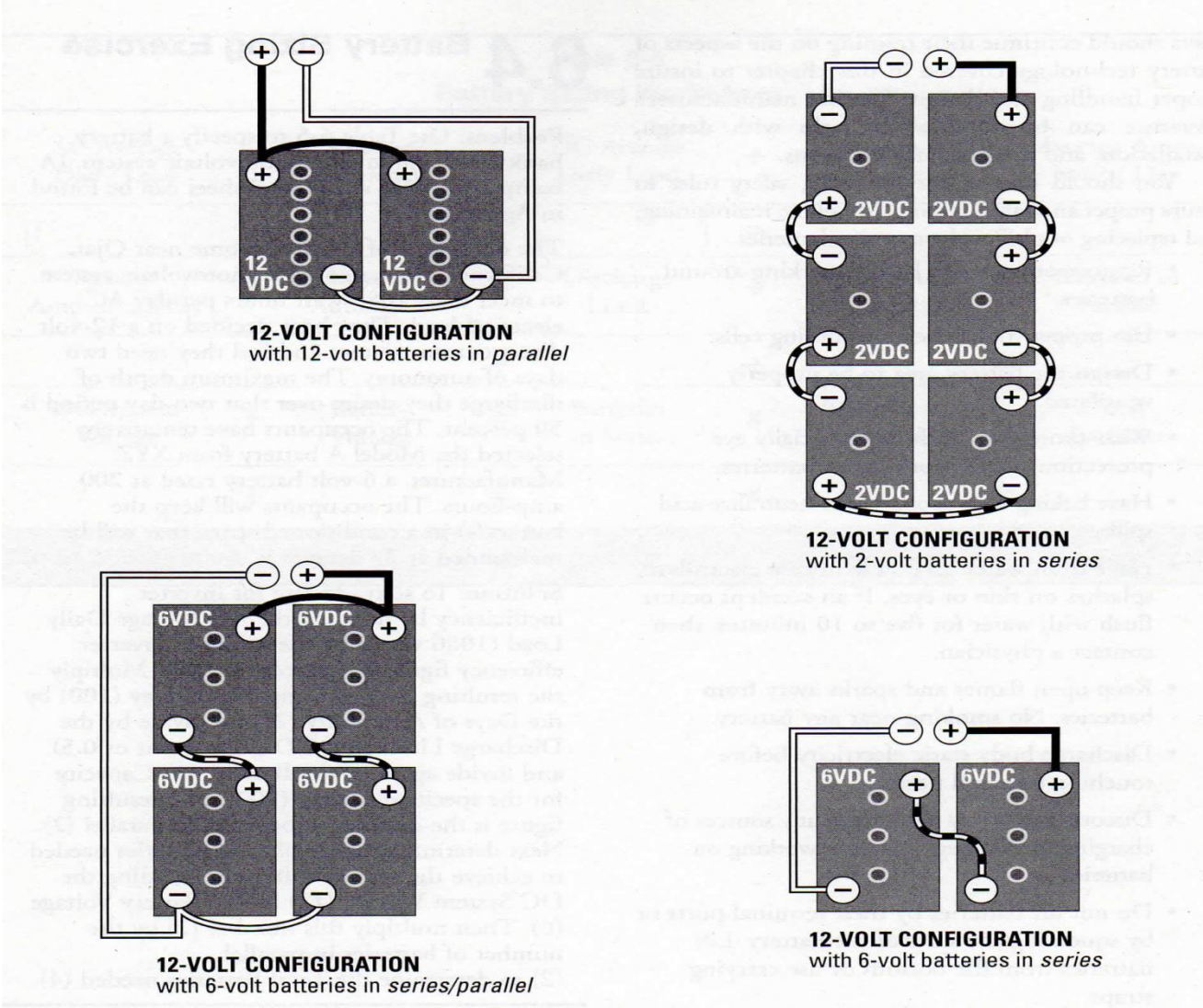
Days of Autonomy

- Autonomy refers to the number of days a battery system will provide a given load without being recharged.
- The number of days of autonomy is determined by
  - the location
  - total load
  - types of load
- The general range of autonomy is as follows:
  - 2 to 3 days for non-essential uses or systems with a generator back-up
  - 5 to 7 days for critical loads with no other power sources

Comparison Table of Secondary Batteries

Specifications	Lead Acid	Li-ion[1] Cobalt	Li-ion[1] Manganese	Li-ion[1] Phosphate
Specific energy (Wh/kg)	30–50	150–250	100–150	90–120
Internal resistance	Very Low	Moderate	Low	Very low
Cycle life[2] (80% DoD)	200–300	500–1,000	500–1,000	1,000–2,000
Charge time[4]	8–16h	2–4h	1–2h	1–2h
Overcharge tolerance	High	Low. No trickle charge		
Self-discharge/ month (room temp)	5%	<5% Protection circuit consumes 3%/month		
Cell voltage (nominal)	2V	3.6V[7]	3.7V[7]	3.2–3.3V
Charge cutoff voltage (V/cell)	2.40 Float 2.25	4.20 typical Some go to higher V		3.60
Discharge cutoff voltage (V/cell, 1C)	1.75V	2.50–3.00V		2.50V
Peak load current Best result	5C[8] 0.2C	2C <1C	>30C <10C	>30C <10C
Charge temperature	–20 to 50°C (–4 to 122°F)	0 to 45°C[9] (32 to 113°F)		
Discharge temperature	–20 to 50°C (–4 to °F)	–20 to 60°C (–4 to 140°F)		
Maintenance requirement	3–6 months[10] (toping chg.)	Maintenance-free		
Safety requirements	Thermally stable	Protection circuit mandatory[11]		
In use since	Late 1800s	1991	1996	1999
Toxicity	Very high	Low		
Coulombic efficiency[12]	~90%	99%		
Cost	Low	High[13]		

12 Volt Battery Configurations

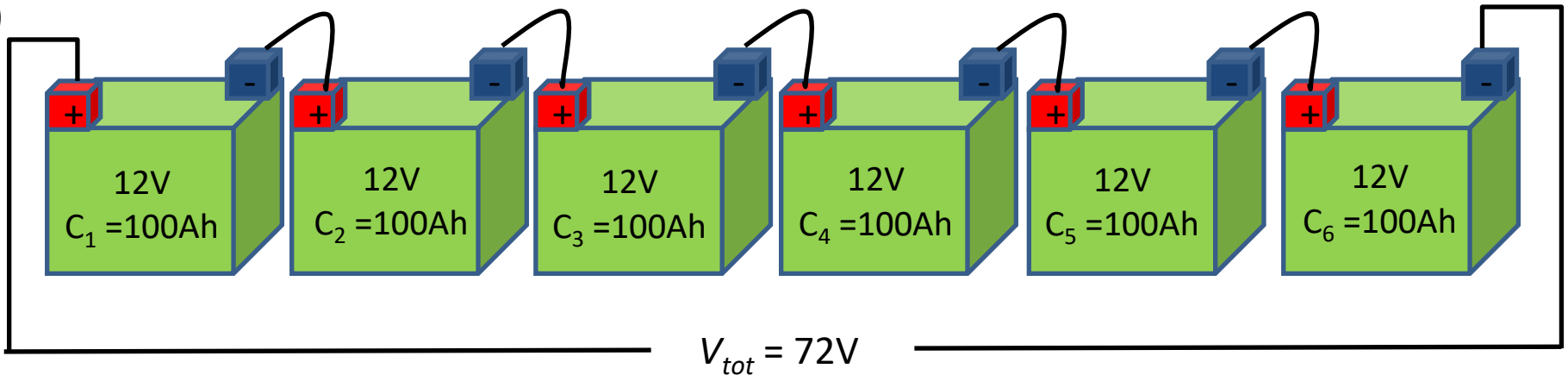


Πρόβλημα 1ο

Σε μια συστοιχία συσσωρευτών θα πρέπει να έχουμε τελική τάση εξόδου V_{tot} = 72V. Διαθέτουμε έξι συσσωρευτές με χαρακτηριστικά στοιχεία: V_{nom} = 12V και C_{nom} = 100Ah.

a) Να γίνει η συνδεσμολογία των συσσωρευτών, έτσι ώστε η ολική τάση της συστοιχίας να είναι 72V.
b) Ποια είναι η συνολική χωρητικότητα της συστοιχίας και ποια η συνολική αποθηκευμένη ενέργεια;
c) Αν το βάθος εκφόρτισης της συστοιχίας είναι ίσο με 0.8 και ο βαθμός απόδοσης ίσος με 0.85, να υπολογιστεί η ενέργεια που μπορούμε να πάρουμε από τη συστοιχία.
d) Ποιο είναι το ρεύμα εκφόρτισης της συστοιχίας (ολικό ρεύμα), αν η ισχύς της κατανάλωσης που τροφοδοτείται είναι 360W;
e) Ποιος είναι ο χρόνος με τον οποίο μπορεί η συγκεκριμένη συστοιχία να τροφοδοτεί συνεχώς με ενέργεια την κατανάλωση;

(a)



Οι συσσωρευτές που διαθέτουμε έχουν ονομαστική τάση V_{nom} = 12V και η συστοιχία μας θα πρέπει να έχει συνολική τάση V_{tot} = 72V. Άρα η συστοιχία θα αποτελείται από:

$$\frac{V_{tot}}{V_{mom}} = \frac{72}{12} = 6$$

(b) Εφόσον είναι συνδεδεμένες σε σειρά θα ισχύει $C_{tot} = C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = C_6 = 100Ah$
Η συνολική αποθηκευμένη ενέργεια είναι: $E = C_{tot} x V_{tot} = (100Ah)x(72V) = 7200Wh$ ή $7.2kWh$

(c) Η ενέργεια που μπορούμε να αντλήσουμε από τη μπαταρία υπολογίζεται από τη σχέση:

E_R = nxDODxE

Όπου n = 0.85 ο βαθμός απόδοσης
DOD = 0.8 το βάθος εκφόρτισης

E_R = 0.85x0.8x7200 = 4896 Wh

(d) Η ισχύς της μπαταρίας υπολογίζεται από τη σχέση:

P = V_{tot} x I

Όπου I το ρεύμα εκφόρτισης

$$I = \frac{P}{V_{tot}} = \frac{360W}{72V} = 5A$$

(e) Ο χρόνος t με τον οποίο μπορεί η συγκεκριμένη συστοιχία να τροφοδοτεί συνεχώς με ενέργεια την κατανάλωση θα υπολογιστεί από τη σχέση:

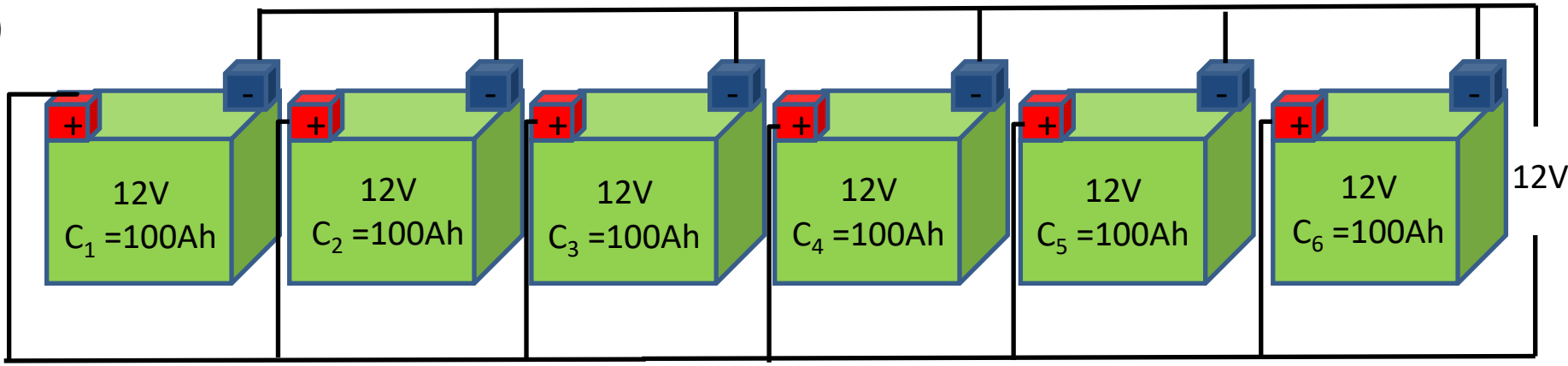
$$E_R = Pxt \Rightarrow t = \frac{E_R}{P} = \frac{4896\ Wh}{360W} = 13.6h$$

Πρόβλημα 2ο

Σε μια συστοιχία συσσωρευτών θα πρέπει να έχουμε ολική χωρητικότητα C_{tot} = 600Ah με ολική τάση V_{tot} = 12V. Διαθέτουμε έξι συσσωρευτές με χαρακτηριστικά στοιχεία V_{nom} = 12V και C_{nom} = 100Ah.

a) Να γίνει η συνδεσμολογία των συσσωρευτών, έτσι ώστε η ολική χωρητικότητα της συστοιχίας να είναι 600Ah.
b) Ποια είναι η συνολική αποθηκευμένη ενέργεια;
c) Αν το βάθος εκφόρτισης της συστοιχίας είναι ίσο με 0,8 και ο βαθμός απόδοσης είναι ίσος με 0,85, να υπολογιστεί η ενέργεια που μπορούμε να πάρουμε από τη συστοιχία.
d) Ποιο θα είναι το ρεύμα εκφόρτισης της συστοιχίας (ολικό ρεύμα) και ποιο το ρεύμα εκφόρτισης του κάθε συσσωρευτή, αν η ισχύς της κατανάλωσης που τροφοδοτείται είναι 360W;
e) Ποιος είναι ο χρόνος με τον οποίο μπορεί η συγκεκριμένη συστοιχία να τροφοδοτεί με ενέργεια την κατανάλωση;

(a)



Οι συσσωρευτές που διαθέτουμε έχουν ονομαστική χωρητικότητα C_i = 100Ah και η συστοιχία μας θα πρέπει να έχει συνολική χωρητικότητα C_{tot} = 600Ah. Άρα ο αριθμός των στοιχείων "n" που θα πρέπει να συνδεθούν παράλληλα ώστε η συστοιχία να έχει την απαιτούμενη χωρητικότητα είναι: $C_{tot} = n \times C_i \Rightarrow n = C_{tot} / C_i \Rightarrow n = 600 / 100 = 6$

(b) Η συνολική αποθηκευμένη ενέργεια είναι: $E = C_{tot} \times V_{tot} = (600Ah) \times (12V) = 7200Wh$ ή $7.2kWh$

(c) Η ενέργεια που μπορούμε να αντλήσουμε από τη μπαταρία υπολογίζεται από τη σχέση:

E_R = nxDODxE

Όπου n = 0.85 ο βαθμός απόδοσης
DOD = 0.8 το βάθος εκφόρτισης

E_R = 0.85x0.8x7200 = 4896 Wh

(d) Η ισχύς της μπαταρίας υπολογίζεται από τη σχέση:

P = V_{tot} x I

Όπου I το ρεύμα εκφόρτισης

$$I = \frac{P}{V_{tot}} = \frac{360W}{12V} = 30A$$

Επειδή τα στοιχεία είναι συνδεδεμένα παράλληλα το συνολικό ρεύμα προκύπτει από το άθροισμα των ρευμάτων των στοιχείων:

$$I = \sum_{i=1}^{6} I_i = 6I_c \Rightarrow I_c = \frac{I}{6} = \frac{30}{6} \Rightarrow I_c = 5A$$

(e) Ο χρόνος t με τον οποίο μπορεί η συγκεκριμένη συστοιχία να τροφοδοτεί συνεχώς με ενέργεια την κατανάλωση θα υπολογιστεί από τη σχέση:

$$E_R = Pxt \Rightarrow t = \frac{E_R}{P} = \frac{4896\,Wh}{360W} = 13.6h$$

Πρόβλημα 3ο

Σε μια συστοιχία συσσωρευτών θα πρέπει να έχουμε ολική τάση V_{tot} = 24V και ολική χωρητικότητα C_{tot} = 300Ah. Διαθέτουμε έξι συσσωρευτές με χαρακτηριστικά στοιχεία V_{nom} = 12V και C_{nom} = 100Ah.

a) Να γίνει η συνδεσμολογία των συσσωρευτών, έτσι ώστε η ολική τάση της συστοιχίας να είναι 24V και η ολική χωρητικότητα 300Ah.

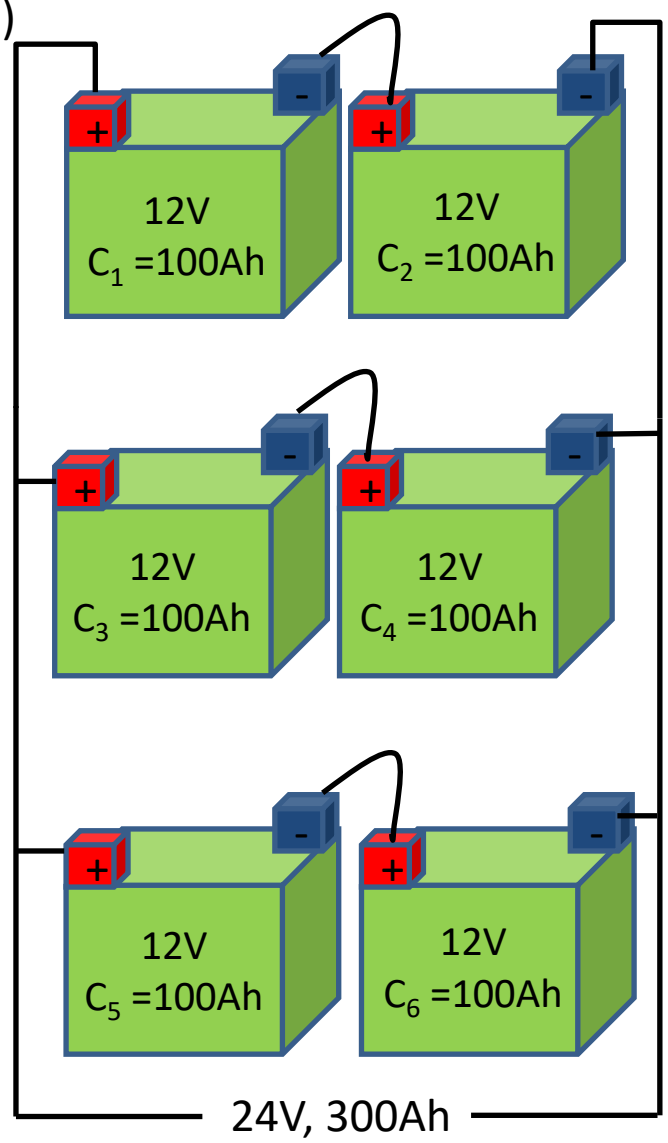
b) Ποια είναι η συνολική αποθηκευμένη ενέργεια;

c) Αν το βάθος εκφόρτισης της συστοιχίας είναι ίσο με 0.8 και ο βαθμός απόδοσης ίσος με 0.85, να υπολογιστεί η ενέργεια που μπορούμε να πάρουμε από τη συστοιχία.

d) Ποιο θα είναι το ρεύμα εκφόρτισης της συστοιχίας (ολικό ρεύμα) και ποιο το ρεύμα εκφόρτισης του κάθε συσσωρευτή, αν η ισχύς της κατανάλωσης που τροφοδοτείται είναι 360W;

e) Ποιος είναι ο χρόνος με τον οποίο μπορεί η συγκεκριμένη συστοιχία να τροφοδοτεί με ενέργεια την κατανάλωση;

(a)



Για να δημιουργήσουμε την τάση των 24V θα πρέπει να συνδέσουμε 2 στοιχεία των 12 V σε σειρά ενώ για τη δημιουργία μιας συστοιχίας με ονομαστική χωρητικότητα 300Ah θα πρέπει να συνδέσουμε τρία στοιχεία των 100Ah παράλληλα.

(b) Η συνολική αποθηκευμένη ενέργεια είναι: $E = C_{tot}\ xV_{tot} = (300Ah)x(24V) = 7200Wh$ *ή* $7.2kWh$

(c) Η ενέργεια που μπορούμε να αντλήσουμε από τη μπαταρία υπολογίζεται από τη σχέση:

E_R = nxDODxE

Όπου
n = 0.85 ο βαθμός απόδοσης
DOD = 0.8 το βάθος εκφόρτισης

E_R = 4896 Wh

(d) Η ισχύς της μπαταρίας υπολογίζεται από τη σχέση:

P = V_{tot} x I

Όπου I το ρεύμα εκφόρτισης

$$I = \frac{P}{V_{tot}} = \frac{360W}{24V} = 15A$$

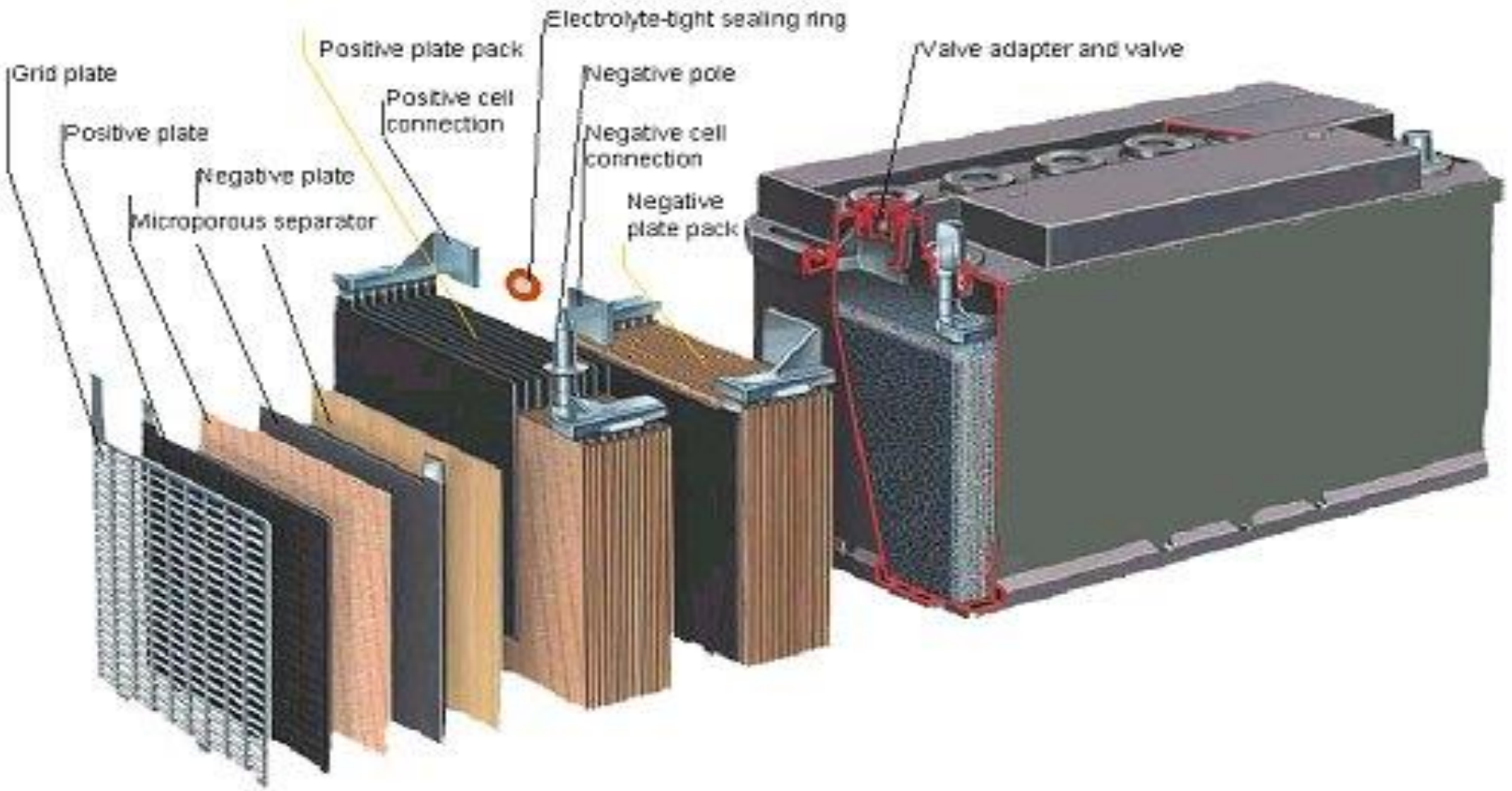
Επειδή τα στοιχεία ανά δύο είναι συνδεδεμένα παράλληλα το συνολικό ρεύμα προκύπτει από το άθροισμα των ρευμάτων των στοιχείων:

$$I = \sum_{i=1}^{3} I_i = 3I_c \Rightarrow I_c = \frac{I}{3} = \frac{15}{3} \Rightarrow I_c = 5A$$

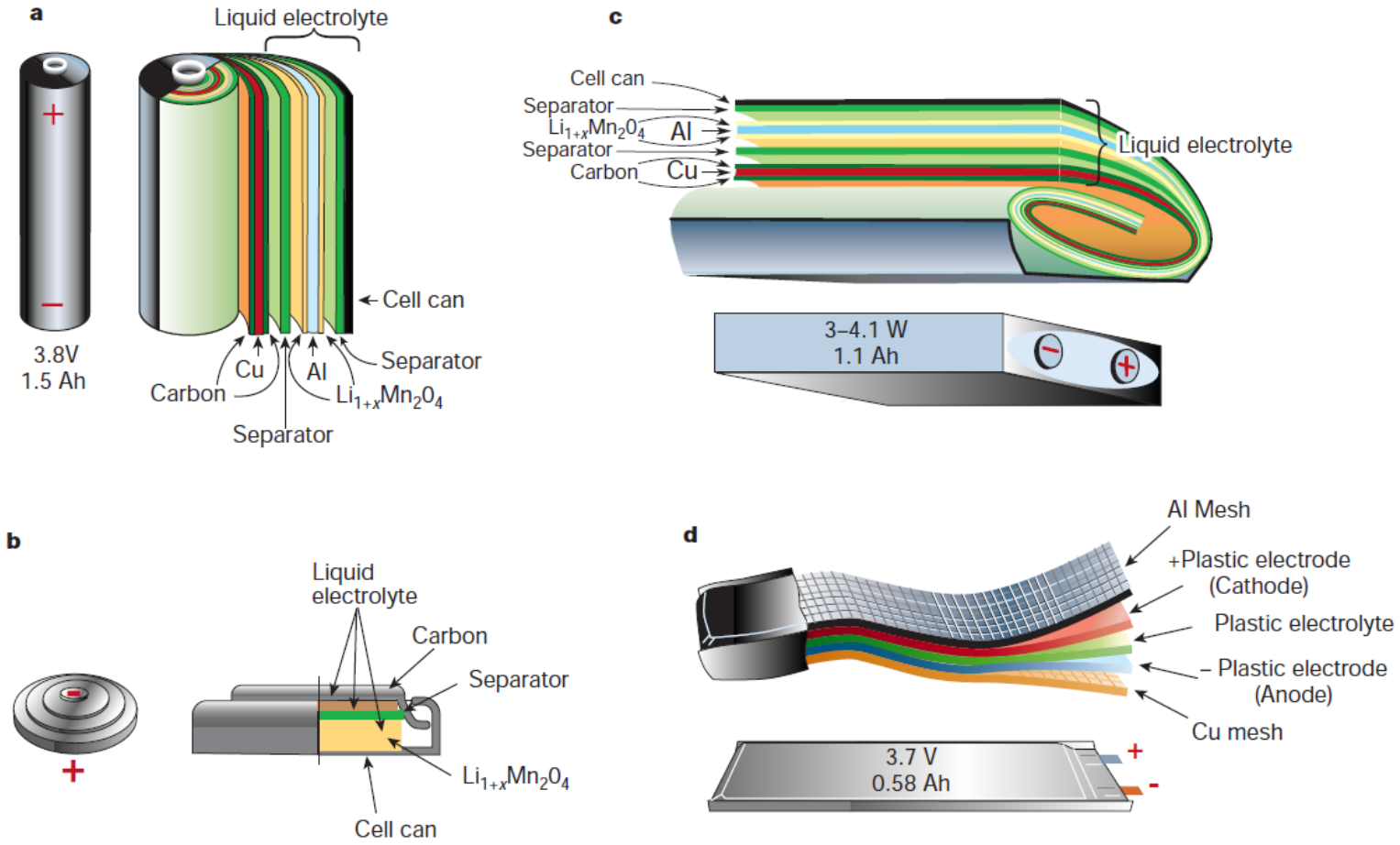
(e) Ο χρόνος t με τον οποίο μπορεί η συγκεκριμένη συστοιχία να τροφοδοτεί συνεχώς με ενέργεια την κατανάλωση θα υπολογιστεί από τη σχέση:

$$E_R = Pxt \Rightarrow t = \frac{E_R}{P} = \frac{4896\,Wh}{360W} = 13.6h$$

LEAD – ACID BATTERIES



Li-Ion Batteries



a. Cylindrical, **b.** coin, **c.** prismatic, and **d.** thin and flat.