

تخزين الطاقة الكهربائية







منشورات جامعة دمشق  
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

## تخزين الطاقة الكهربائية

الدكتور

ياسر ديب

الدكتور

محمد هاشم أبو الخير

أستاذ في قسم هندسة الطاقة الكهربائية      مدرس في قسم هندسة الطاقة الكهربائية

هـ 1436-1435

م 2015-2014

جامعة دمشق



## الفهرس

15.....	مقدمة.....
21.....	1- اعتبارات عامة في تخزين الطاقة الكهربائية .....
21.....	1-1- أهمية تخزين الطاقة الكهربائية .....
22.....	1-2- أمثلة تجريبية على مصادر الطاقات المتعددة .....
25.....	1-3- وحدة تخزين الطاقة: المبدأ والمكونات والمحولات .....
25.....	1-3-1- آلية استخدام وسائل التخزين .....
27.....	2-3-1- مواضع ربط وسائل التخزين .....
28.....	3-3-1- مكونات وحدة تخزين الطاقة .....
31.....	4-1- أنواع تقنيات تخزين الطاقة الكهربائية .....
33.....	1-4-1- نظم تخزين الطاقة الكهربائية اللامركزية .....
35.....	1-4-2- نظم تخزين الطاقة الكهربائية المركزية .....
37.....	5-1- استطاعات نظم تخزين الطاقة المركبة عبر العالم .....
43.....	2- تخزين الطاقة الكهربائية بالمكثفات الكهربائية .....
43.....	1-2- التخزين بالمكثفات التقليدية .....
43.....	1-1-2- مبدأ المكثفات التقليدية وبنيتها .....
45.....	2-1-2- أنواع المكثفات .....
47.....	3-1-2- تطبيقات المكثفات الكهربائية .....
49.....	4-1-2- استخدام المكثفات في الشبكات الكهربائية .....
49.....	5-1-2- نبذة المكثفات الكهربائية .....
53.....	6-1-2- الخصائص الحرارية للمكثفات .....

55 .....	2-التخزين بالمكثفات فائقة السعة .....
55 .....	2-2-1-التطور التاريخي للمكثفات فائقة السعة .....
56 .....	2-2-2-مبدأ المكثفات فائقة السعة وبنيتها .....
58 .....	2-2-3-آلية الشحن والتغذية .....
60 .....	2-2-4-نمذجة المكثف فائق السعة .....
64 .....	2-2-5-قياس خصائص المكثفات فائقة السعة .....
73 .....	2-2-6-حساب مودولات المكثفات فائقة السعة .....
76 .....	2-2-7-تطبيقات المكثفات الكهربائية فائقة السعة .....
78 .....	2-2-8-تأثير درجة الحرارة على محددات المكثفات فائقة السعة .....
81 .....	3- تخزين الطاقة بالملفات فائقة الناقلة .....
81 .....	3-1-المبدأ الأساسي للموصلات فائقة الناقلة .....
82 .....	3-2-ملخص تاريخي عن الموصلات الفائقة .....
82 .....	3-3-بعض التطبيقات الهمامة .....
83 .....	3-4-مبدأ تخزين الطاقة في الموصلات فائقة ناقلة .....
86 .....	3-5-خصائص الموصلات فائقة الناقلة .....
87 .....	3-6-مبدأ عمل نظم تخزين الطاقة بالملفات فائقة الناقلة .....
89 .....	3-7-تطور نظم التخزين بالملفات فائقة الناقلة .....
93 .....	4- تخزين الطاقة الكهربائية بالمدخرات الكهربائية .....
93 .....	4-1-نبذة عن التطور التاريخي للمدخرات الكهربائية .....
95 .....	4-2-مكونات أقطاب المدخرات الكهربائية .....
97 .....	4-3-البنية وأآلية الشحن والتغذية .....

100 .....	4-4- طرز المدخرات الكهربائية.....
100 .....	1-4-4- حسب الكهرليت .....
101 .....	2-4-4- حسب قابلية الشحن .....
101 .....	5-4- خصائص المدخرات القابلة للشحن.....
101 .....	1-5-4- مدخرات الرصاص - الخامضية.....
106 .....	2-5-4- مدخراتnickel - كادميوم.....
109 .....	3-5-4- مدخرات نيكل - هيدريد المعادن .....
111 .....	4-5-4- مدخرات شوارد الليثيوم .....
114 .....	5-5-4- مقارنة خصائص المدخرات .....
117 .....	6-4- تعريف المحددات الأساسية في المدخرات الكهربائية .....
121 .....	7-4- طائق ودارات شحن وتفریغ المدخرات الكهربائية.....
121 .....	1-7-4- طائق شحن المدخرات.....
121 .....	2-7-4- معدلات الشحن .....
124 .....	3-7-4- أخطار زيادة الشحن .....
125 .....	4-7-4- الطائق المتبع لإنهاء عملية الشحن.....
126 .....	5-7-4- طائق تفريغ المدخرات .....
127 .....	6-7-4- دارات شحن المدخرات .....
133 .....	8-4- أثر نيار التفريغ على السعة .....
136 .....	9-4- تأثير درجة الحرارة على خصائص المدخرات الكهربائية .....
136 .....	1-9-4- تأثير درجة الحرارة على خصائص مدخرات الرصاص - حمض .....
136 .....	2-9-4- تأثير درجة الحرارة على سعة التفريغ لمدحرة نيكل - كادميوم .....

137	- تأثير درجة الحرارة على سعة التفريغ لمدخرة نيكل - هيدريد المعادن ... 4
138	- تأثير درجة الحرارة على سعة التفريغ لمدخرة شوارد الليثيوم ..... 4
139	- الظواهر الأساسية في المدخرات الكهربائية ..... 4
140	- النمذجة والمحاكاة للمدخرات الكهربائية..... 4
142	- حساب موديولات التخزين بالمدخرات الكهربائية في النظم الكهروضوئية .. 4
144	13- مدخرات القدرة الكهربائية ..... 4
145	14- مدخرات درجات الحرارة العالية: مدخرات الصوديوم - كبريت ..... 4
146	14-2- ميزات مدخرات صوديوم-كبريت ..... 4
150	15-4- مدخرات جريان الكهرباء ..... 4
150	15-1- تقنية مدخرات جريان الكهرباء ..... 4
151	15-2- مادة الفاناديوم ..... 4
152	15-3- مدخرات جريان الكهرباء الفاناديوم ..... 4
154	16-4- مكثفات شوارد الليثيوم ..... 4
154	16-1- مبدأ مكثفات شوارد الليثيوم ..... 4
155	16-2- بنية مكثفات شوارد الليثيوم ..... 4
157	16-3- شحن وتفرغ مكثف شوارد الليثيوم ..... 4
165	16-5- تخزين الطاقة بالهيدرجين ..... 5
165	1- الهيدرجين: طاقة الغد ..... 5
166	2- الخصائص الفيزيائية والكمبائية للهيدرجين ..... 5
167	3-5- الاستخدامات الحالية للهيدرجين ..... 5

168 .....	5-4- إنتاج الهيدرجين.....
168 .....	5-4-1- الطريقة الحرارو كيميائية لإنتاج الهيدرجين .....
170 .....	5-4-2- الطريقة الكهرو كيميائية لإنتاج الهيدرجين .....
176 .....	5-4-3- الطريقة الضوئية الكهرو كيميائية لإنتاج الهيدرجين .....
177 .....	5-4-4- الطريقة الحرارية لإنتاج الهيدرجين.....
177 .....	5-4-5- الطريقة الضوئية البيولوجية لإنتاج الهيدرجين.....
178 .....	5-4-6- الطريقة البيوكيميائية لإنتاج الهيدرجين .....
179 .....	5- تخزين الهيدرجين .....
180 .....	5-5-1- تخزين الهيدرجين على شكل غاز مضغوط .....
181 .....	5-2-5- تخزين الهيدرجين في الحالة السائلة.....
182 .....	5-3-5- تخزين الهيدرجين في الحالة الصلبة.....
184 .....	5-6- الخلايا الوقودية.....
184 .....	5-1-6- مقدمة تاريخية تعريفية بخلايا الوقود.....
186 .....	5-2-6- البنية الأساسية لخالية الوقود ومبدأ عملها .....
188 .....	5-3-6- طرز الخلايا الوقودية.....
203 .....	5-4-6- مزايا الخلايا الوقودية .....
205 .....	5-5-6- أداء الخلايا الوقودية .....
221 .....	5-6-6- منظومات الخلايا الوقودية .....
225 .....	5-7-6- تصميم الخلايا الوقودية.....
231 .....	6- التخزين الميكانيكي .....
231 .....	6-1- تخزين الطاقة بدولاب العطالة.....

231 .....	- مبدأ دولاب العطالة .....	1-1-6
232 .....	- المواد المستخدمة في دائير دولاب العطالة .....	1-6
232 .....	- المساند المقاومية .....	1-6
233 .....	- مكونات وحدة تخزين الطاقة بدولاب العطالة .....	1-6
234 .....	- مجالات استخدام نظم تخزين الطاقة بدولاب العطالة .....	1-6
238 .....	- تخزين الطاقة بالضخ المائي .....	2-6
238 .....	- مبدأ التخزين بالضخ المائي .....	2-6
238 .....	- آلية تخزين الطاقة بالضخ المائي .....	2-6
240 .....	- مشاريع عملية .....	2-6
245 .....	- تخزين الطاقة بالهواء المضغوط .....	7
245 .....	- اعتبارات عامة في الضغط .....	1-7
248 .....	- طائق تخزين الطاقة الكهربائية بالهواء المضغوط .....	2-7
248 .....	- هواء مضغوط في وعاء ضغط .....	2-7
249 .....	- هواء مضغوط في كهوف جوفية .....	2-7
252 .....	- حالات عملية لنظم التخزين بالهواء المضغوط .....	3-7
252 .....	- نظام التخزين في <b>Huntorf</b> .....	3-7
253 .....	- نظام التخزين في <b>McIntosh</b> .....	3-7
255 .....	- تطبيقات نظام التخزين بالهواء المضغوط في الطاقات المتعددة .....	4-7
255 .....	- نظام التخزين بالهواء المضغوط في ايوا <b>Iowa</b> .....	4-7
255 .....	- نظام التخزين بالهواء المضغوط في ساليرنو <b>Salerno</b> .....	4-7
257 .....	- نظام تخزين هجين هواء مضغوط - مكثفات فائقة السعة .....	5-7

261 .....	8- تخزين الطاقة بالحرارة.....
261 .....	- اعتبارات عامة.....1-8
262 .....	- التخزين بالحرارة المحسوسة.....2-8
262 .....	-1- وسائل التخزين السائلة.....2-8
263 .....	-2- وسائل التخزين الصلبة.....2-8
264 .....	-3- التخزين بالحرارة المحسوسة في درجات الحرارة العالية.....2-8
264 .....	-4- تجارب عملية في التخزين بالحرارة المحسوسة.....2-8
266 .....	-3- التخزين بالحرارة الكامنة.....8
266 .....	-1- التخزين بحرارة الانصهار والتجمد .....8
268 .....	-2- التخزين بحرارة التبخّر والتكيّف .....8
268 .....	-3- التخزين بالحرارة الكامنة في درجات الحرارة العالية.....8
269 .....	-4- تجارب عملية في التخزين بالحرارة الكامنة.....8
270 .....	المراجع .....
277 .....	اختصارات .....
279 .....	جدول بالرموز المستخدمة .....



مقدمة



## مقدمة

بالرغم من أن نظم القدرة الكهربائية تعمل في الوقت الحاضر بشكل فعال بدون تخزين الطاقة الكهربائية، فإن موثقتها محدودة، حيث إنه على سبيل المثال، في الشبكة السورية قد تضطر وزارة الكهرباء أحياناً لفصل الكهرباء جزئياً عن بعض المناطق في أوقات ذروة الحمولة، وبالتالي فإن أحد حلول تغطية هذه الذروة والحصول على موثوقية أعلى ومردود أكبر هو التخزين (Electric Energy Storage) ويختصر بـ(EEES). إذ إن نظام تخزين الطاقة (EES) يعمل على تخزين الطاقة المتاحة من الشبكة خارج أوقات الذروة، واستعادة هذه الطاقة المخترندة في أوقات الذروة، كما أن نظام تخزين الطاقة (EES) يساعد أيضاً على تنظيم توفر الشبكة وتردداتها، وحالياً تتجه جميع الدراسات والأبحاث نحو دراسة تخزين الطاقة الكهربائية وأدائها وتخفيض كلفتها، وقد سمح التطورات الحاصلة بإنتاج عناصر جديدة لتخزين الطاقة كهربائية ذات أداء متميز. وإن هذا الكتاب ليأتي ضمن هذا الإطار ليلاقي الضوء على طرائق وتقنيات تخزين الطاقة الكهربائية الجديدة، وما زال بعض هذه التقنيات قيد الدراسة والبحث.

تكتسب عملية تخزين الطاقة الكهربائية أهمية خاصة في تحسين أداء وكفاءة نظم الطاقات المتتجدة (renewable energies)، وتعد المفتاح الرئيسي لاستغلال هذه المصادر بصورة واسعة وعلى النطاق التجاري حيث ستزيد من مشاركتها في توفير المتطلبات وتقليل النفقات.

يمكن تخزين الطاقة المتتجدة لفترات قصيرة أو طويلة حسب المتطلبات، ويرافق ذلك آليتان أساسيتان هما التخزين والاستعادة (الشحن والتفرغ)، ويعتمد تصميم نظام التخزين على عدة متغيرات وعوامل أهمها أوقات توفر الطاقة ونوع وسيط التخزين المستخدم، ومقدار ضياعات الطاقة في أثناء عمليات التخزين والاستعادة، وكلفة منظومات التخزين والاستعادة والحمل الكهربائي المطلوب.

إن الطاقة الكهربائية صعبة التخزين مقارنة بأشكال الطاقة الأخرى كالطاقة الحرارية والطاقة الميكانيكية لذلك يجري تحويلها إلى أشكال أخرى من الطاقة أسهل من حيث التخزين. وعليه هناك أشكال مختلفة لتخزين الطاقة الكهربائية، من أهمها التخزين الحراري والتخزين الميكانيكي والتخزين الكهربائي والتخزين الكيميائي والتخزين المغناطيسي. فالطاقة الحرارية يمكن تخزينها بواسطة الحرارة المحسوسة والحرارة الكامنة، والطاقة الكهربائية تخزن عادةً في المكثفات، والطاقة الميكانيكية تخزن كطاقة حركية أو كطاقة كامنة في خزانات الهواء المضغوط أو خزانات المياه العالية أو في الحداقة (دولاب العطالة) والطاقة الكيميائية تخزن عادةً من خلال التفاعلات الكيميائية العكسية أو تخزين الوقود الناتج عن التفاعلات الكيميائية، والتخزين المغناطيسي يتم باستخدام موصلات فائقة التأثيرية مصنوعة من مواد ذات مقاومة صغيرة جدًا عند درجات الحرارة المنخفضة.

ومنه نجد أنه يتواجد الآن العديد من نظم تخزين الطاقة (EES) ومن أهمها، والتي سيجري دراستها:

- التخزين الكهربائي بالمكثفات الكهربائية (Capacitors EES)
- التخزين المغناطيسي (Magnetic EES)
- التخزين الكهروكيميائي (Electrochemical EES)
- التخزين بالهيدروجين<sup>1</sup> (Hydrogen EES)
- التخزين بدولاب العطالة (Flywheel EES)
- التخزين المائي (Pumped hydro EES)
- التخزين بالهواء المضغوط (Compressed Air EES)
- التخزين الحراري (Thermal EES).

<sup>1</sup> جرت العادة على استخدام مصطلح الهيدروجين ندلاً على  $H_2$  ولكن حسب مجمع اللغة العربية يفضل استخدام الهيدروجين أسوأ بالأكسجين.

استهل هذا الكتاب بعرض عام للمفاهيم المتعلقة بتقنيات تخزين الطاقة الكهربائية ليسهل التعامل معها باختلاف أنواعها مع التركيز على التقنيات الكهربائية منها. يلي ذلك عرض هذه الأخيرة بالتفصيل ومن زوايا متعددة.

في الفصل الأول، توضيح مبدأ التخزين الكهربائي وأهميته وخاصة في نظم الطاقات المتعددة، يلي ذلك تصنيف لمختلف تقنيات التخزين ومقارنة أهم خصائصها.

في الفصل الثاني، دراسة مفصلة عن التخزين المباشر للطاقة الكهربائية بالكهرباء الساكنة (الكهروساكنة)، حيث يتناول بالتفصيل تقنيات التخزين بالمكبات الكهربائية وطريقة عملها والبنية الداخلية لها وخصائصها الكهربائية وتطبيقاتها.

في الفصل الثالث، شرح المبدأ الكهرومغناطيسي في التخزين باستخدام المغناط فائقة الناقلية، يتناول بعد ذلك المواد المستخدمة في صناعة الملفات فائقة الناقلية مع عرض للتطور التاريخي لهذه المواد يليه شرح للمخطط العام لربط نظم التخزين هذه إلى الشبكة الكهربائية، وأهم التطبيقات العالمية في هذا المجال.

في الفصل الرابع، دراسة مفصلة عن التخزين الكهروكيميائي بالمدخرات الكهربائية، حيث يتناول بالتفصيل أنواع المدخرات ومبدأ شحنها وتفریغها والخصائص المختلفة للمدخرات، كما يتطرق إلى الأنواع الخاصة من المدخرات الكهربائية.

في الفصل الخامس، بحث مفصل عن التخزين بالهيبرجين بيدأ ببيان أهمية الهيدرجين ومزاياه كوسيلط ممتاز لتخزين الطاقة، وبخاصية الطاقة الكهربائية، يلي ذلك بيان مفصل لطرائق إنتاج الهيدرجين (استخلاصه) وطرائق تخزينه، ثم ينتقل إلى عرض وافٍ عن الخلايا الوقودية (fuel cells) -الوسيلة الأفضل ذات التقنية الصديقة للبيئة- لاستعادة الطاقة المخزنة في الهيدرجين.

في الفصل السادس، يجري الحديث عن التخزين الميكانيكي بنوعيه الكامن (تخزين مائي) والمحرك (دولاب العطالة)، كما يعرض بعض المشاريع المنجزة في هذا المجال.

في الفصل السابع، توضيح لمبدأ التخزين بالهواء المضغوط بأنواعه، مبيناً المبدأ العام، وعناصر النظام ومخطط ربطه إلى الشبكة الكهربائية.

وفي الفصل الثامن، يجري الحديث عن كيفية التخزين الحراري وبعض تطبيقاته العملية في مختلف أنحاء العالم.

أملين أن يكون هذا الكتاب قد غطى مفردات موضوع "تخزين الطاقة الكهربائية" المقرر لطلاب السنة الخامسة - طاقات متعددة، وأن يفيد منه الطلاب والمهندسون والباحثون في هذا المجال.

والله من وراء القصد

المؤلفان

دمشق في 26/8/2014

**الفصل الأول**  
**اعتبارات عامة**  
**في نظم تخزين الطاقة الكهربائية**  
**General Considerations**  
**in Electric Energy Storage Systems**



# 1- اعتبارات عامة في تخزين الطاقة الكهربائية

## General Considerations in Electric Energy Storage Systems

### 1-1- أهمية تخزين الطاقة الكهربائية

#### Importance of Electric Energy Storage

إنتاج الطاقة الكهربائية واستهلاكها: إن جريان الاستطاعة من المتابع الأولية (مصادر توليد الطاقة الكهربائية) بشكل عام ليس ثابتاً بل يعتمد على ظروف مختلفة مثل تغير الفصول (شتاء أو صيف)، والشروط الجوية إلخ. وبالمقابل نجد أن الاستهلاك متغير أيضاً ويعتمد على ظروف مماثلة، مثل النهار أو الليل والفصل وغير ذلك. إن تغير حمل الشبكة الكهربائية نابع من التطور الهائل في التطبيقات الكهربائية المعاصرة وأغلبها غير ثابتة من حيث قيمة الاستهلاك، مثل الإضاءة والتسمين. وهذا بدوره يضيف تعقيداً إلى منحنى الحمولة. كل هذا يجعل من الاستهلاك المثالي صعب التحقق من الناحية العملية. المقصود بالاستهلاك المثالي هو ثبات مستوى الاستطاعة المستهلكة لمدة طويلة. وبناءً عليه نحن بحاجة إلى وسيط بين طرف الإنتاج (consumption end) وطرف الاستهلاك (production end) بهدف التخفيف من التباين بين منحنى الطلب على الطاقة (الحمولة) ومنحنى الإنتاج.

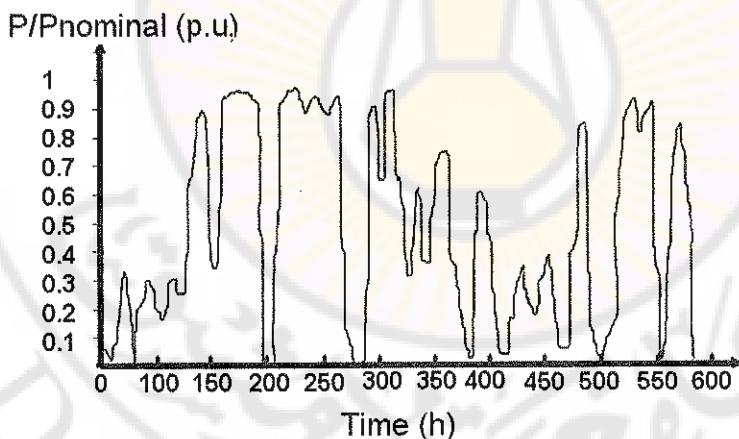
أثر دمج مصادر الطاقات المتجددة في الشبكة: توفر لنا مصادر الطاقات المتجددة مصدراً مهماً للطاقة وبدليلاً للمصادر التقليدية، حيث أصبح بالإمكان حالياً استخدام مصادر الطاقات المتجددة لتغذية مختلف الأحمال وخاصة بعد التطور الهائل في إلكترونيات القدرة، ولكن ما يزال ربطها مع الشبكة العامة من الناحية العملية مكلفاً جداً ويمكن أن يؤدي إلى اضطرابات كبيرة ولاسيما إذا كان العدد المضاف إلى قسم الإنتاج في الشبكة كبيراً جداً. إضافة إلى ما سبق ذكره أعلاه إن طرف الإنتاج أصبح أكثر تعقيداً مع إضافة عدد مهم من مصادر الطاقات المتجددة. إن التكلفة العالية في إنتاج الطاقة الكهربائية من مصادر الطاقات المتجددة يحدّ من التوسع في استخدامها

شكل أكبر، وإن من أهم مساوى مصادر الطاقات المتجددة هو أنها مصدر غير ثابت في إنتاج القراءة (الاستطاعة) الكهربائية. بمعنى أن مقدار الاستطاعة المنتجة من هذه المصادر متغير ولا يعتمد إنتاجها على الطلب بل على المصدر ذاته مثل الرياح والشمس.

## 1-2- أمثلة تجريبية على مصادر الطاقات المتجددة

### Experimental Examples of Renewable Energy Sources

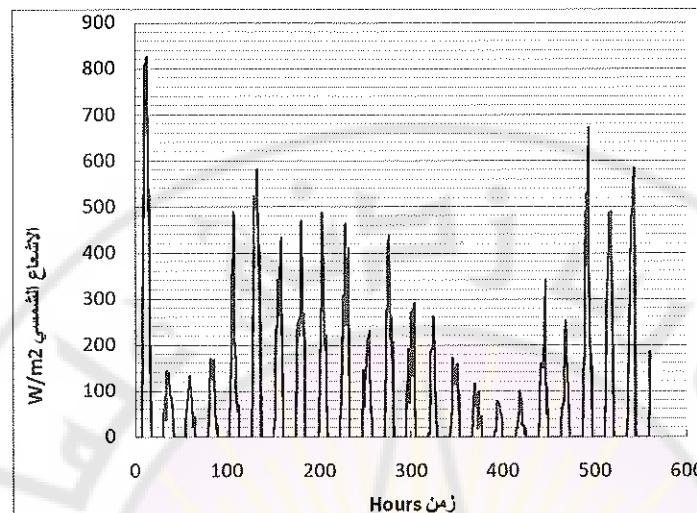
سوف نعرض مثلاً عملياً لتذبذبات الاستطاعة المستخلصة من طاقة الرياح (wind energy). ففي إحدى المزارع الريحية في فرنسا المستخدمة لإنتاج الطاقة الكهربائية، جرى تسجيل الاستطاعة خلال ما يقرب من ثلاثة أسابيع، وقد تمّ تسبّب القيمة اللحظية إلى القيمة الاسمية لتبيّان مقدار التقلب في الاستطاعة الناتجة عن إجمالي العنفات الريحية في المزرعة. يظهر الشكل (1-1) تغييراً كبيراً في الاستطاعة بسبب التغير الكبير في سرعة الرياح مع الزمن.



الشكل (1-1): منحنى الاستطاعة الناتجة عن مزرعة ريحية لمدة ثلاثة أسابيع [1]

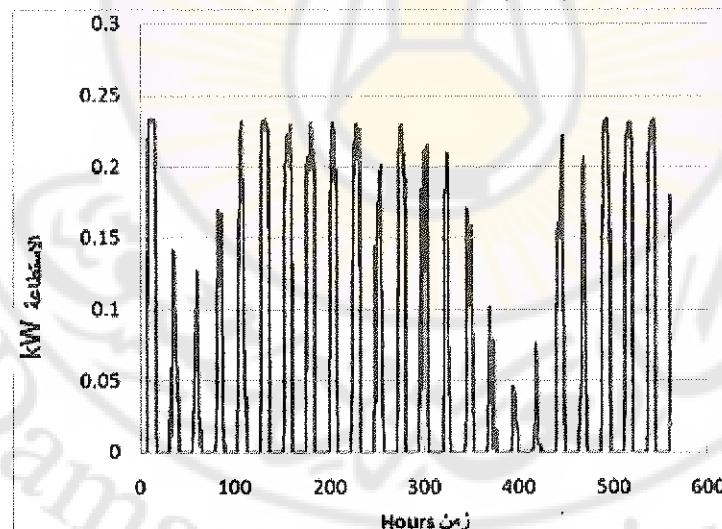
وفيما يلي مثال آخر على مصادر الطاقات المتجددة وهذه المرة مصدر شمسي. في الشكل (1-2) يظهر الإشعاع الشمسي (solar radiation) في شهر تشرين الأول.

نلاحظ أن الإشعاع الشمسي غير متطابق خلال أيام الأسبوع ويتغير خلال النهار وأحياناً بعض الظروف الجوية يمكن أن تسبب الانعدام الكلي للإشعاع الشمسي.



الشكل (1-2): الإشعاع الشمسي خلال شهر تشرين الأول [2]

لقد تم من الشكل السابق أعلاه حساب الاستطاعة الممكن الحصول عليها من الإشعاع الشمسي المتغير والشكل (3-1) يبين الاستطاعة اللحظية لموديول خلايا شمسية.



الشكل (3-1): استطاعة موديول خلايا شمسية وفق الإشعاع الشمسي أعلاه

وهكذا نجد أنه من غير الممكن التنبؤ بالاستطاعة الملحوظة من مصادر الطاقات المتتجددة كما في الرياح والشمس وإن التنبؤ في الاستطاعة المستخلصة من هذه المصادر تزيد من العوائق أمام تكامل واندماج هذه المصادر في الشبكات الكهربائية. إذ يصبح من الصعب تنظيم التوتر والتردد وغير ذلك والحفاظ على استقرار النظام والذي هو بالإضافة قائم على التوازن بين الاستهلاك والإنتاج. وبناء على ذلك، لم يعد العائق الوحيد في التوسيع في استخدام مصادر الطاقات المتتجددة في الشبكات الكهربائية هو النكفة العالية بل إن استخدام لمثل هذه المصادر من الطاقة سوف يكون مشروطاً بإيجاد وسيلة تساعد على التغلب على مشكلة التنبؤ في الاستطاعة.

ومنه يلاحظ أنه أصبح من الضروري استخدام نظم ثانوية لتخزين الطاقة والحد من تغيرات الاستطاعة الناتجة من مصادر الطاقات المتتجددة وبالتالي استخدام أوسع لمصادر الطاقات المتتجددة. لابد لوسائل التخزين من أن تتمتع بخصائص تناسب هذه المصادر الجديدة من الطاقة مثل السعة الكبيرة، القدرة على اختزان كميات كبيرة من الطاقة وإعادتها بدون مفاسيد كبيرة وبזמן يتناسب مع متطلبات الأحمال. إن مثل هذا الحل سوف يسمح بإدخال عدداً كبيراً من مصادر الطاقات المتتجددة مما يعني عدد أقل من المصادر التقليدية.

### 3-3- وحدة تخزين الطاقة: المبدأ والمكونات والمحددات

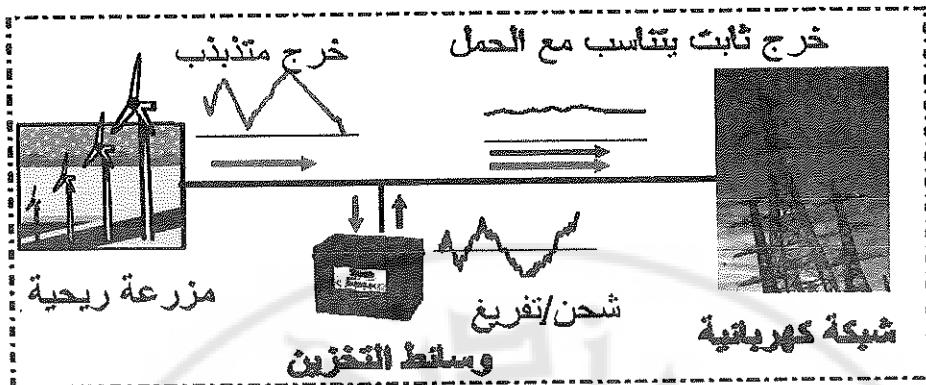
#### Energy Storage Unit: Principle, Components and Parameters

من خلال ما سبق وجدنا أنه من الضروري إنشاء وحدة وسيلة تربط المنتج بالمستهلك ذات مواصفات محددة. سوف نعرف هذه الوحدة بوحدة تخزين الطاقة الكهربائية. إن استخدام وحدات تخزين كهروكيميائية كما في المدخرات الكهربائية ليس جديداً، يعود استخدام أول تطبيق للمدخرات الكهربائية (power batteries) للعام 1890 في إحدى المدن الألمانية. في ذلك الوقت كانت نظم الطاقة الكهربائية مكونة من نظم تيار مستمر معزولة عن بعضها البعض. كانت المدخلة الكهربائية تزود الطاقة اللازمة في الذروة وتعمل كعنصر توليد عندما يكون المولد لا يعمل. وازداد استخدام المدخرات آنذاك مع توسيع نظم القدرة ولكن الانتقال إلى نظم التيار المتناوب حد من استخدام المدخرات على هذا النحو.

#### 1-3-1- آلية استخدام وسائل تخزين

نظراً لوجود فائض من بعض مصادر الطاقة في فترات زمنية معينة ونقصان في فترات أخرى وإن استهلاك الطاقة يتبع عادةً تغيراً زمنياً لا يكون بالضرورة مماثلاً لتوفير الطاقة لذا فإن الضرورة تستوجب تخزين الطاقة الفائضة لاستخدامها في الأوقات التي تدعى الحاجة إليها.

إن وسائل تخزين الطاقة الكهربائية تساعد على تحسين مردود نظام القدرة واستقراره لأنها عندما يكون الإنتاج أكبر من الاستهلاك تخزن وسائل تخزين الفائض من القدرة وعندما يكون الإنتاج أقل ببعض النقص. يظهر الشكل (1-4) آلية عمل وحدة تخزين الطاقة مع مصادر الطاقات المتعددة المرتبطة إلى الشبكة الكهربائية. في الطاقات المتعددة مثل طاقة الرياح يحاول نظام التخزين الحد من التغيرات الحاصلة على استطاعة العنفات الريحية فيختزن الزيادة في الاستطاعة مقارنة باستطاعة مرجعية معطاة من قبل منسق الشبكة وتعويض النقص الحاصل بسبب انخفاض سرعة الرياح.



الشكل (4-1): مخطط رمزي لآلية عمل وسائط تخزين الطاقة الكهربائية

ومن المعروف ضمن هذا السياق، استخدام مدخلات لتخزين الطاقة الكهربائية المولدة من الخلايا الشمسية نهاراً واستعادة الطاقة المخزنة عند الحاجة ليلاً، وهذا هو المبدأ العام في تخزين الكهرباء المولدة من الطاقات المتجددة.

ولكن علينا أن نذكر أن موضوع إدارة الطاقة يصبح أكثر صعوبة على عكس ما كنا نتوقع، لأن الطلب على الطاقة لحظي باستطاعات وثوابت زمنية مختلفة. بشكل عام، يجب على هذه الوحدة سوحدة التخزين - أن تمتلك الكثير من المواصفات منها [3]:

من حيث الإنتاج، نقل ما أنتج من الكهرباء من خارج أوقات الذروة off-peak إلى أوقات الذروة peak، مما يستكمل الوسائل الأخرى المستخدمة لهذه الغاية، من حيث الاستهلاك، تشجيع الزبائن على التحول من ساعات الذروة إلى خارج أوقات الذروة.

وهكذا يمكن القول إن مفهوم تخزين الطاقة الكهربائية يختلف عن توليد الطاقة الكهربائية فهو ليس مصدر توليد وإنما هو وحدة أو مجموعة عناصر يمكن أن تخزن الطاقة الكهربائية بشكل مباشر أو غير مباشر وتعيدها عند الحاجة. وبناءً عليه يمكن استخدام وحدات التخزين في نظم القدرة في مراحلها الثلاث: شحن charge، تخزين storage، تفريغ discharge. إن مدة كل مرحلة تخضع لمتطلبات نظام القدرة.

### 1-3-2- مواضع ربط وسائط التخزين

إن ربط وسائط تخزين الطاقة يمكن أن يتم في مواضع متعددة في نظام القدرة وكل موضع مزاياه وذلك بحسب طبيعة الأحمال ومصادر الطاقات المتعددة المستخدمة وغير ذلك من ظروف محیطة.

فعلى سبيل المثال يمكن ربطها بالقرب من الأحمال، حيث يظهر عند المستهلك التغير الأعظمي في الاستطاعة المستجدة من وسائط النقل والتحويل. غالباً ما تكون الاستطاعة العظمى المستجدة أكبر بكثير من الاستطاعة الوسطية. يتم حساب وسائط النقل والتحويل على قيم قريبة من القيمة العظمى للاستطاعة. وهذه الزيادة في استطاعة بعض عناصر النظام تسبب زيادة في التكاليف. إن توضع وسائط تخزين الطاقة الكهربائية بالقرب من المستهلك يقلص الفارق بشكل كبير جداً بين القيمة العظمى والوسطية مما ينعكس إيجاباً في تخفيف التكاليف وتحسين أداء النظام في حالة الأعطال حيث يمكن أن تغذي نظم تخزين الطاقة الأحمال القريبة.

يجب أن تملك وحدات تخزين الطاقة المركبة في نظام القدرة الكهربائية الاستطاعة والطاقة الكهربائية المناسبتين. قبل وضع آية وحدة تخزين في نظام القدرة يتوجب تحديد الوظيفة التي سوف تؤديها بدقة وطريقة عملها. يوجد العديد من المحددات (parameters) التي تدخل في اعتبارات تصميم نظم تخزين الطاقة الكهربائية من أهمها: معدل الاستطاعة، والطاقة، والكافأة، وزمن الشحن... إلخ.

تخزين الطاقة الكهربائية يمكن أن يستخدم لواحد من الأسباب التالية:

- مصدر القدرة المقاوب غير متاح،
- تحسين مردود عمل النظام،
- رفع مستوى أمان منبع القدرة.

### 3-3-1- مكونات وحدة تخزين الطاقة

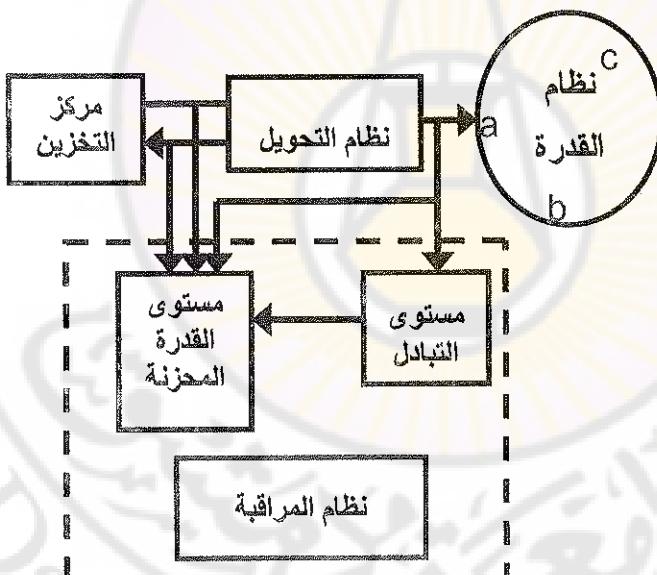
يمكن لوحدة تخزين الطاقة أن تتكون بشكل عام من الأجزاء التالية (انظر الشكل 1-5):

(1) مركز التخزين 'Cs' central store، الطاقة المخزنة فيه تسمى ذات  $E_s$ .

الاستطاعة بشقيها الفعلي  $P_s$  والردي  $Q_s$ . إن هذه الطاقة المخزنة لاتنفرغ بشكل كامل ولكن يبقى جزء منها في مركز التخزين،

(2) نظام التحويل 'PTS' power transformation system يمكن أن يحتوي على عناصر كهربائية مثل المحولات (transformer) والمبدلات الإلكترونية (electronics converters)

(3) نظام التحكم بالشحن والتفرير 'CDCS'، هذا الجزء هو المسؤول عن مراقبة سويات القدرة في نظام التخزين والتحكم بها وذلك بمساعدة الحاسوب وبرامج حاسوبية مخصصة.



الشكل (1-5): مخطط بنوي لنظام تخزين الطاقة

من جهة أخرى، بما أن نظام التخزين يعد جزءاً من نظام القدرة فلابد له من أن يعمل مع هذا النظام جنباً إلى جنب في جميع الحالات العادية والطارئة. في أي من هذه المراحل يجب أن تتحقق معادلة التوازن التالية:

$$\text{مجموع الاستطاعات الفعالة} = 0$$

$$\Leftrightarrow 0 = P_{gen} + P_s + P_{cum} \quad (1-1)$$

$$\text{مجموع الاستطاعات الرديمة} = 0$$

$$\Leftrightarrow 0 = Q_{gen} + Q_s + Q_{cum} \quad (2-1)$$

حيث:

$Q_{gen}, P_{gen}$ : استطاعة التوليد الفعالة والرديمة على الترتيب،

$Q_s, P_s$ : استطاعة التخزين الفعالة والرديمة على الترتيب،

$Q_{cum}, P_{cum}$ : استطاعة الاستهلاك الفعالة والرديمة على الترتيب.

على اختلاف طبيعة نظم تخزين طاقة الكهربائية، فإنه يوجد فيه ضياعات (losses) هذه الضياعات  $\delta E$  تشمل المفقود الحاصلة خلال الشحن  $\delta E_s$  والتخزين  $\delta E_d$  والتفرغ  $\delta E_f$  كما هو مبين في الشكل (1-6) ويعبر عنها بالمعادلة التالية [3]:

$$\delta E = \delta E_{ch} + \delta E_{st} + \delta E_{dch} \quad (3-1)$$

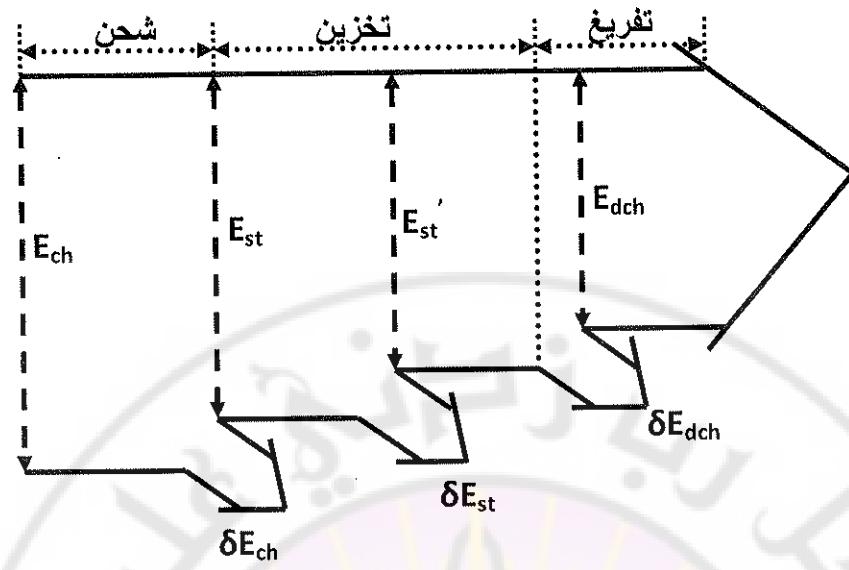
أو يمكن أن تحسب بالعلاقة التالية:

$$\delta E = E_{ch} - E_{dch} \quad (4-1)$$

حيث:

$E_{ch}$ : الطاقة المشحونة،

$E_{dch}$ : الطاقة المفرغة.



الشكل (1-6): مخطط الطاقة في نظام التخزين الكهربائي

إن المردود العام لوحدة التخزين يعبر عن علاقة بين الطاقة المستعادة (المفرغة) إلى الطاقة المشحونة كما تبين العلاقة التالية:

$$\eta = E_{dch} / E_{ch} \quad (5-1)$$

يمكن تعريف خصائص عملية التخزين بشكل مبسط كالتالي [4] :

- عدد دورات شحن- تفريغ ( $N_{cyc}$ ) (charge-discharge cycles) لنظام تخزين وهو العدد الأعظمي لدورات شحن- تفريغ لهذا النظم قبل أن يحدث التقادم الكامل له.

- سعة طاقة التخزين في نظام ما ( $E$ ) (storage energy capacity)، تعطى  $\text{Wh}$ ، تعبّر عن الطاقة المفيدة الممكّن استعادتها من أي نظام تخزين.
- الاستطاعة العظمى ( $P_{max}$ ): هي الاستطاعة العظمى خلال الشحن أو التفريغ حسب الاستخدام.

- الثابت الزمني  $\tau$  (time constant): هو بالتعريف النسبة بين الطاقة المفرغة والاستطاعة (العظمى)  $\tau = Ed/Ps$ . وهو يعبر عن زمن التفريغ باستطاعة عظمى أخذين بالحسبان عمق التفريغ وظروف التشغيل.
- التفريغ الذاتي (self-discharge): النسبة المئوية لانخفاض طاقة الكهربائية المخزنة في وحدة التخزين بدون استخدام كما في حالة التخزين.
- كثافة الطاقة (energy density) الكلية أو كثافة الطاقة الحجمية: تعبر عن الطاقة الممكن تفريغها من نظام التخزين منسوبة لوزن النظام أو حجمه.
- كثافة الاستطاعة (power density) الكلية أو كثافة الاستطاعة الحجمية: تعبر عن الاستطاعة الممكن تفريغها من نظام التخزين منسوبة لوزن النظام أو حجمه.

#### ٤-٤- أنواع تقنيات تخزين الطاقة الكهربائية

##### Types of Energy Storage Techniques

في السنوات الأخيرة جرى تطوير عدد كبير من وسائل تخزين الطاقة الكهربائية، ويمكن تقسيم هذه الوسائل من حيث المبدأ إلى تخزين مباشر وتخزين غير مباشر. جري في التخزين المباشر تخزين الطاقة الكهربائية مباشرةً بشكل مغناطيسي أو بشكل كهرباء ساكنة. وأما في التخزين غير المباشر فيتم تحويل الطاقة الكهربائية إلى شكل آخر من أشكال الطاقة قبل أن يتم تخزينها. الأشكال هي كيميائية وقودية وميكانيكية وضغط حرارية. وعليه يمكن تصنيف تقنيات التخزين كالتالي:

##### (١) تخزين مباشر direct storage

###### أ- تخزين مغناطيسي magnetic storage

- ملفات فائقة النقلية (superconducting coils)

- تخزين كهروساكن electrostatic storage

- مكبات تقليدية (classical capacitors)

- مكبات فائقة السعة (supercapacitors)

2) تخزين غير مباشر **indirect storage**

- تخزين كهروكيميائى **electrochemical storage**

- مدخلات تقليدية **classical batteries**
- مدخلات جريان الكهرباء **(redox fellow batteries)**
- مدخلات درجات الحرارة العالية **(high temperature batteries)**

ب- تخزين بالوقود **fuel storage**

- هيدروجيني **(hydrogen)**

ت- تخزين ميكانيكي **mechanical storage**

- ضخ المياه **(Pumped hydro-gravity hydraulic)**
- دولاب العطالة **(Flywheel)**

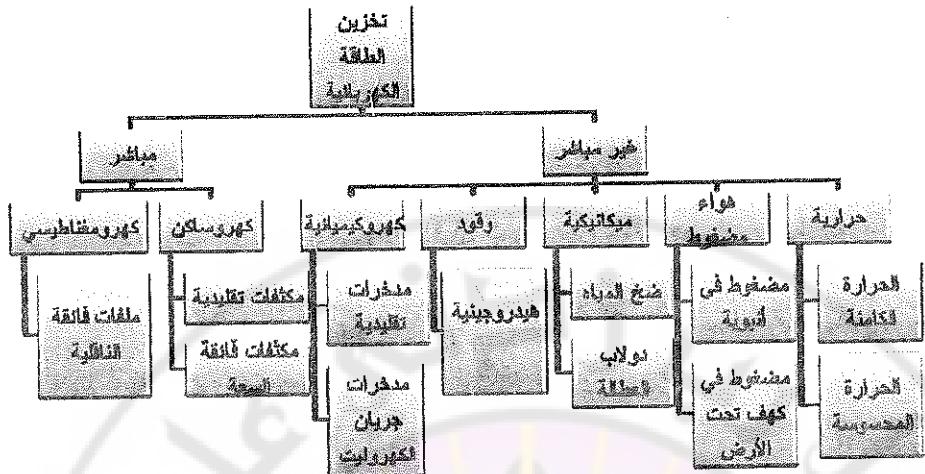
ث- تخزين بالهواء المضغوط **compressed air storage**

- هواء مضغوط في وعاء ضغط **(أنبوبة)** **(vessel)**

- هواء مضغوط في كهف جوفي **(compressed air in cavern)**

ج- تخزين حراري **thermal storage**

- الحرارة الكامنة **latent heat**
- الحرارة المحسوسة **sensible heat**



الشكل (1-7): مخطط تصنيف تقنيات تخزين الطاقة الكهربائية

حتى نستطيع مقارنة نظم التخزين تم تصنيفها إلى فئتين أساسيتين وسيجري مقارنة كثافة الطاقة والاستطاعة على أساس الحجم والوزن وهم عاملان أساسيان في تطبيقات تخزين الطاقة [5]:

#### 1-4-1- نظم تخزين الطاقة الكهربائية المركزية

##### Decentralized Energy Storage Systems

يمكن لهذه النظم أن تكون محمولة ومتقللة من مكان لآخر. نجد في هذه الفئة جميع تقنيات تخزين الطاقة كما يوضح الجدول (1-1). يقارن هذا الجدول خصائص نظم التخزين من حيث كثافة الاستطاعة وكثافة الطاقة وثابت الزمن (مدة الشحن أو التفريغ) والمربود وكلفة الكيلو واط ساعي. نجد من الجدول أن النظم ذات التخزين المباشر ذات كثافة طاقة بالنسبة للوزن منخفضة بينما النظم الأخرى مثل المدخرات والتخزين بالهيدروجين ذات كثافة طاقة أعلى، وينعكس ذلك على سعادتها (طاقتها الإجمالية القابلة للتحقيق) التي تكون مرتفعة ويمكن أن تصل إلى عدة ميغا واط ساعي

وأيضاً على كلفة الكيلو واط ساعي حيث تكون أقل. إلا أن هذه النظم (ذات التخزين غير المباشر) ذات ثوابت زمنية كبيرة أي تحتاج إلى زمن للشحن أو التفريغ أطول نسبياً من نظم التخزين المباشر.

إن عدد دورات الشحن والتفريغ  $N_{cycle}$  في نظم التخزين المباشر يكون مرتفع جداً سواءً في المكثفات فإنقة السعة أو في الموصلات فإنقة الناقلة أو في دولاب العطالة لأنه لا يوجد تأكل في أجزاء هذه النظم كما يحدث في أقطاب المدخرات الكهربائية. بما أن نظم التخزين المباشرة ذات استطاعات عالية فإنها ذات كلفة كيلو واط أقل من نظم التخزين غير المباشرة لذا تستخدم وكما سنوضح في التطبيقات التي تتطلب استطاعات عالية مثل وسائل النقل.

**جدول (1-1): خصائص نظم التخزين الالكترونية [6]**

Technology	SMES	Supercapacitors	Batteries
شكل الطاقة	مغناطيسية	كهرباء ساكنة	كيميائية
كثافة الطاقة Wh/kg	1-5	2-10	20-120
السعة	kWh بضعة	kWh بضعة	بضعة kWh إلى MWh بضعة
ثابت الزمن	من بضعة ثوانٍ إلى بضعة دقائق	من بضعة ثوانٍ إلى بضعة دقائق	من عشرات الدقائق إلى عشرات الساعات
عدد دورات الشحن والتفريغ	10000 - 100000	10000 - 100000	100- 2000
المردود	> 0.9	0.8 <> 0.9	0.7 <> 0.8
سعر الطاقة £/kWh	500 - 7200	10000 - 20000	Lead-acide 50 - 200 Lithium 700 - 1000

سعر الاستطاعة £/kW	300	300	250-1500
--------------------	-----	-----	----------

Technology	Flywheel	Compressed Air	Hydrogen
شكل الطاقة	ميكانيكية	غازية	وقود
كثافة الطاقة Wh/kg	1-5	1-3	300-600
السعة	بضعة 10Wh إلى kWh	بضعة 10Wh	-
ثابت الزمن	من بضعة دقائق إلى ساعة	من بضعة دقائق إلى ساعة	من ساعه إلى عدة أيام
عدد دورات الشحن والتغريغ	10000 - 100000	1000 - 10000	-
المردود	0.8 <> 0.9	0.8 <> 0.9	0.3 - 0.5
سعر الطاقة £/kWh	150 - 2000	300	15
سعر الاستطاعة £/kW	300-350	400-600	6000

#### ٤-٤-٢- نظم تخزين الطاقة الكهربائية المركزية

##### Centralized Energy Storage Systems

إن النظم في هذه الفئة ذات أوزان كبيرة ويجري التمييز بينها من حيث الأحجام ومن أهمها نظم التخزين المائية والتي تشغّل مساحات واسعة. إن نظم التخزين المركزية لديها سعات (طاقة) تخزين عالية جداً تمتد من MWh إلى الآلاف من MWh، وهذا بدوره يخفض من كلفة الكيلو واط ساعي الذي يكون أقل ممكناً وخاصة في نظم التخزين بالهواء المضغوط في الكهوف. بعض من نظم التخزين المركزية يتم

استخدامه بكثرة حالياً مثل التخزين المائي والبعض الآخر مازال قيد الدراسة والتطوير مثل التخزين الحراري.

**جدول (1-2): خصائص نظم التخزين المركزية [6]**

Technology	Pumped hydro	Compressed air in cavern	Power batteries
السعة القابلة للتحقيق	1000-100000 MWh	100-10000 MWh	1-40 MWh
الاستطاعة القابلة للتحقيق	100-1000 MW	100- 1000 MW	1 MW- 10 MW
كثافة الطاقة	1 kWh/ m <sup>3</sup> لأجل ارتفاع 360 m	12 kWh/ m <sup>3</sup>	بطاريات الرصاص 33kW/t بطاريات NaS 100kWh/t
المردود	65%-80%	50%	70%-90%
سعر الطاقة £/kWh	70-150	50-80	(رصاص) 200 (لثيوم) 2000
سعر الاستطاعة £/kW	600-1500	400-1200	(رصاص) 300 (لثيوم) 3000
الخبرة	جديدة	عدة تجارب	عدة تجارب

Technology	Redox flux batteries	Thermal
السعة القابلة للتحقيق	10-100 MWh	1000-100000 MWh
الاستطاعة القابلة للتحقيق	1- 10 MW	10-100 MW
كثافة الطاقة	33 kWh/ m <sup>3</sup>	200 kWh/ m <sup>3</sup>
المردود	70%-90%	0.8< 0.9

سعر الطاقة £/kWh	100-300	50
سعر الاستطاعة £/kW	1000-2000	350-1000
الخبرة	في مراحل متقدمة	في طور الدراسة

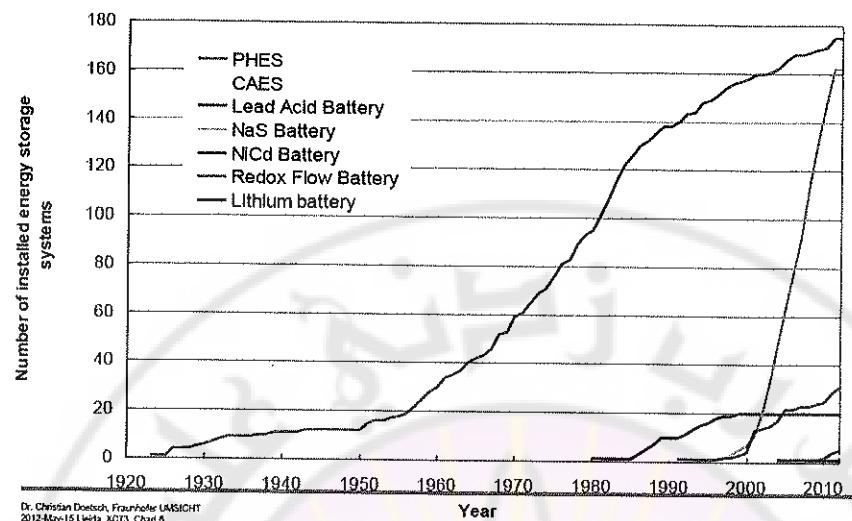
## ١-٥- استطاعات نظم تخزين الطاقة المركبة عبر العالم

### The capacity of Installed energy storage systems worldwide

في الماضي وقبل التوجه إلى الطاقات المتجددة كان استخدام نظم تخزين الطاقة الكهربائية في الشبكة الكهربائية العامة من الإنتاج إلى الاستهلاك مارأ بالنقل متواضعاً. بلغت استطاعة نظم تخزين الطاقة الكهربائية على مستوى العالم (حتى نهاية العام 2000) 90 جيغا واط من أصل 3400 جيغا واط أي 2.6% وفي فرنسا بلغت 6.3 جيغا واط من أصل 116 جيغا واط أي 5.6%. لربما كانت أسباب عدم استخدام نظم تخزين طاقة الكهربائية أن هذه النظم كانت مكلفة وغير موثوقة [6].

الشكل (١-٨) يبين التطور التاريخي لنظم تخزين الطاقة المركبة. نلاحظ أن التخزين المائي يحتل الصدارة وبدأ استخدامه منذ العام 1920 بليه مدخلات القدرة مثل الرصاص-حمض ومدخلات كبريت-صوديوم التي عرفت منذ العام 2000 انتشاراً واسعأ.

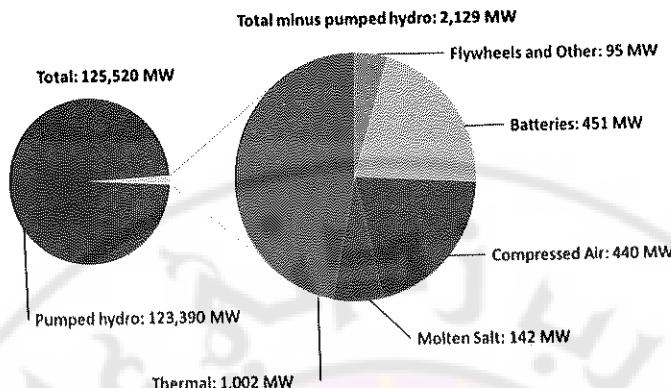
### Historical development of installed energy storage systems (2012)



الشكل (1-8): التطور التاريخي لنظم تخزين الطاقة المركبة في العالم [7]

أما الآن فإن نظم تخزين الطاقة الكهربائية حققت تطويراً جيداً من الناحيتين الفنية والاقتصادية، حيث تجاوزت استطاعة نظم التخزين المركبة إلى الشبكات الكهربائية عبر العالم في عام 2010 125GW ويبين الشكل (1-9) استطاعة نظم التخزين المركبة على الشبكات الكهربائية عبر العالم.

### Estimated Global Installed Capacity of Energy Storage



Source: StratGen Consulting, LLC research; thermal storage installed and announced capacity estimated by ICE Energy and Caimac.  
 Note: Estimates include thermal energy storage for cooling only. Figures current as of April, 2010.

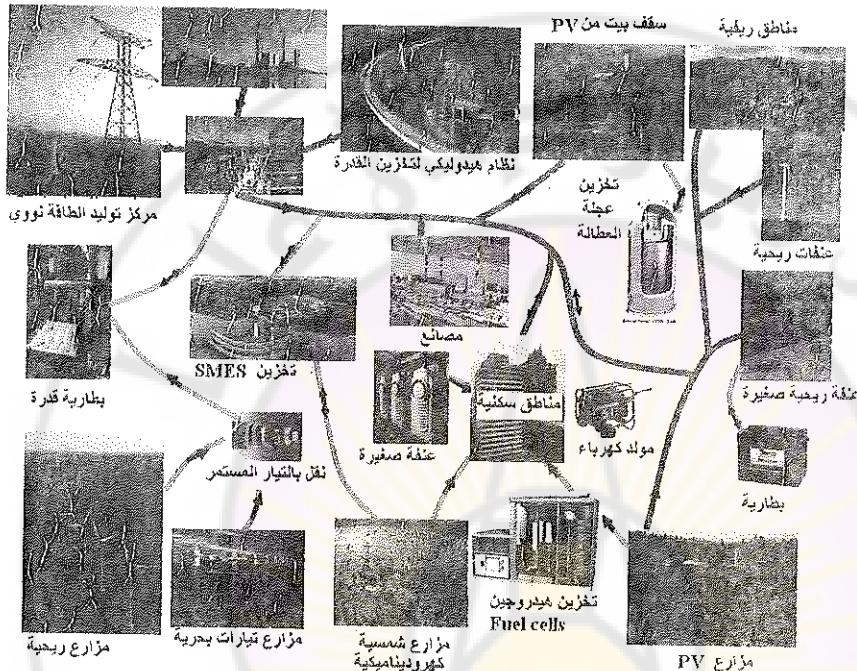
الشكل (9-1): استطاعة نظم التخزين المركبة عبر العالم [8]

نجد في الولايات المتحدة الأمريكية عام 2010 أن استطاعة تخزين الطاقة الكهربائية المركبة إلى الشبكة بلغت 23.25GW منها حوالي 96% تخزين مائي. الجدول (1-3) يوضح تفاصيل نظم تخزين الطاقة.

الجدول (1-3): استطاعة نظم تخزين الطاقة المركبة في الولايات المتحدة الأمريكية [8]

Storage Technology Type	Capacity (MW)
Pumped Hydro Power	22,000
Compressed Air	115
Lithium-ion Batteries	54
Flywheels	28
Nickel Cadmium Batteries	26
Sodium Sulfur Batteries	18
Other (Flow Batteries, Lead Acid)	10
Thermal Peak Shaving (Ice Storage)	1,000
Total:	23,251

ويظهر الشكل (10-1) نظام القدرة المنظور في المستقبل حيث يمكن أن يضم مختلف مصادر الطاقات المتعددة الموزعة جغرافياً في أماكن مختلفة ووصلة إلى شبكات تخزين الطاقة المناسبة.



الشكل (10-1): شكل لنظام القدرة الكهربائي المتوقع مستقبلاً

**الفصل الثاني**  
**التخزين بالمكثفات الكهربائية**  
**Capacitors Energy Storage**



## 2 - تخزين الطاقة الكهربائية بالمكثفات<sup>2</sup>

### Capacitors Energy Storage

هناك عنصران أساسيان يعتمدان على مبدأ الكهرباء الساكنة (electrostatic) في تخزين الطاقة الكهربائية هما المكثفات التقليدية والمكثفات فائقة السعة (يطلق عليها أحياناً اسم المكثفات الكهروكيميائية). سوف نعرض مراجعة للأول ونتناول الثاني بالتفصيل.

#### 2-1- التخزين بالمكثفات التقليدية

##### Classical Capacitors Energy Storage

###### 2-1-1- مبدأ المكثفات التقليدية وبنيتها

###### Principle and Structure of Classical Capacitors

يطلق على المكثفات التي اعتدنا على استخدامها المكثفات التقليدية وذلك حتى تميزها عن المكثفات الجديدة والتي نطلق عليها اسم المكثفات فائقة السعة نظراً لسعتها الكبيرة جداً مقارنة بالمكثفات التقليدية.

يتكون المكثف الكهربائي من حيث البنية من لبوسين مصنوعين من مادة ناقلة تفصل بينهما مادة عازلة كما هو مبين في الشكل (2-1)، ويتحدد نوع المكثف بحسب المادة العازلة المستخدمة في صناعته، فإذا كانت المادة العازلة الموجودة بين لبوسي المكثف هي الهواء فيطلق على المكثف في هذه الحالة اسم المكثف الهوائي، وإذا كانت مصنوعة من مادة البلاستيك سمي مكثفاً بلاستيكياً، وإذا كانت المادة العازلة من الميكا أطلق على المكثف اسم مكثف الميكا وإذا كانت المادة العازلة من السيراميك أطلق

<sup>2</sup> يمكن كتابة العنوان أيضاً بطريقة أخرى .Energy Storage by capacitors

على المكثف اسم مكثف السيراميك، أما إذا استخدم محلول كيميائي (كهرليت) كمادة عازلة بين لوحي المكثف فيطلق على المكثف اسم المكثف الكهربائي.

يعتمد مبدأ تخزين الطاقة الكهربائية في المكثفات التقليدية على مبدأ الكهرباء الساكنة.

يحدد نوع المادة العازلة الموجودة بين اللبوسين قيمة ثابت العازلية النسبي  $\epsilon_r$ . السعة في المكثف المستوى تعتمد على سماحية وثخانة العازل  $D$  والمساحة المشتركة (الفعالة) بين اللبوسين  $S$  كما في العلاقة التالية:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{D} \quad (1-2)$$

حيث:

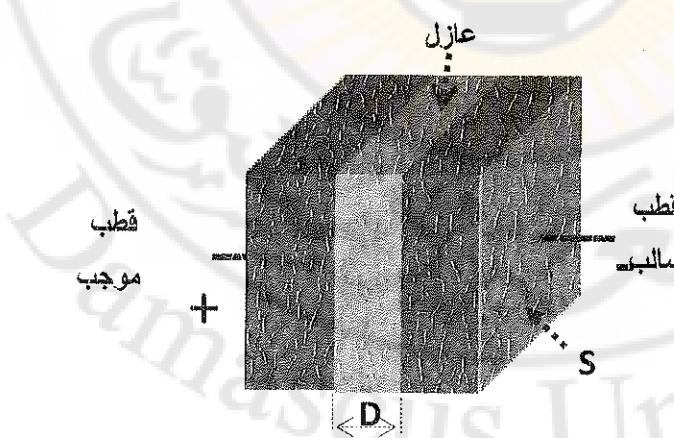
$C$ : السعة الكهربائية، تعرف بأنها قدرة المكثف على تخزين الشحنة الكهربائية ووحدة قياسها الفاراد.

$S$ : المساحة الفعالة.

$D$ : وسادة العازل.

$\epsilon_r$ : ثابت العازلية الكهربائية للهواء.

$\epsilon_0$ : ثابت العازلية النسبي للمادة العازلة المستخدمة.



الشكل (1-2): البنية الأساسية للمكثف التقليدي

إن الطاقة المخزنة في المكثف محدودة بالتوتر  $U_c$  والسعة  $C$  كما توضح العلاقة التالية:

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_c^2, \quad (2-2)$$

$$C = \frac{Q}{U_c}$$

ويمكن التعبير عن العلاقة بين التوتر والسعة والشحنة  $Q$  بالجزء الثاني من المعادلة السابقة وهذه العلاقة تتحقق فقط في الحالة الساكنة، أي عندما يمكن إهمال تغير السعة مع التوتر. يجري حالياً تطوير مكثفات تقليدية لتختزن طاقة مقدارها Wh/kg وتحمل شدة حقل كهربائي (متانة العازل) حتى  $e_d = 300V/\mu m$  مما يعني طاقة تخزين مرتفعة.

### 2-1-2 - أنواع المكثفات Capacitors Types

يمكن تصنيف المكثفات الكهربائية إلى عدة أنواع منها:

- حسب القطبية :

- المكثفات غير مستقطبة، لا يوجد فيها أقطاب ويمكن شحنها باتجاهات مختلفة دون أن يؤثر ذلك على عمرها الافتراضي.
- المكثفات المستقطبة وتتميز بوجود قطب موجب وقطب سالب، ويجب مراعاة قطبيتها عند شحنها لأن شحنها بالاتجاه السالب سيؤدي إلى إتلافها.

- حسب المادة العازلة المستخدمة :

المكثفات الهوائية، المكثفات الكيميائية، المكثفات متعددة الطبقة الخزفية، مكثفات التنتاليوم Tantalum، مكثفات السيراميك، مكثفات الميكا، مكثفات بولي بروبيلين Metallized polypropylene، مكثفات ذات رقائق بوليستر ملبسة بالمعدن Metallized polyester film، مكثفات ذات رقائق بوليستر polyester film، المكثفات الورقية، المكثفات الزيتية.

والجدول (2-1) يبين قيمة ثابت العازلية  $\epsilon_r$  والمثانة الكهربائية لبعض المواد المستعملة في صناعة المكثفات.

الجدول (2-1): ثابت العازلية للمواد المستعملة في صناعة المكثفات [9]

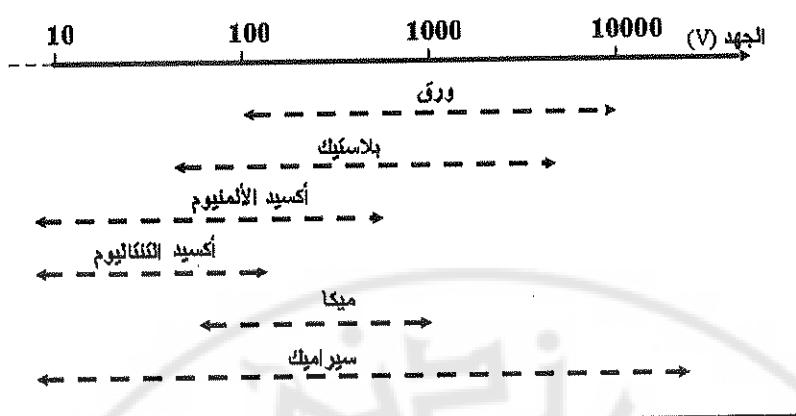
نوع المكثف	الغاز	شدّة الحقل الكهربائي $e_v$ (kV/cm)	قيمة ثابت العازلية النسبي $\epsilon_r$
هواء	هواء	21	1.00059
غشاء بلاستيك	بلاستيك	600 ... 4500	2.1 ... 6
(رقائق) ورق	ورق	300 ... 600	2 ... 6
كهرليت	أكسيد الالمونيوم (AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	6600 ... 7700	8 ... 10
	أكسيد التتاليوم (Ta <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	6600 ... 10000	10 ... 26
ميكا، زجاج	زجاج	100 ... 400	4.8 ... 9.9
ميكا، زجاج	ميكا	600 ... 1800	5.4 ... 8.7
سيراميك	سيراميك	200 ... 400	12 ... 20000

#### - حسب السعة:

المكثفات ذات السعات المنخفضة، المكثفات ذات السعات المتغيرة، المكثفات ذات السعات العالية والعالية جداً.

#### - حسب الاستخدام:

مكثفات تستخدم في مجال الترددات المنخفضة (كما في التخزين وتعييم التوتر)، مكثفات تستخدم في مجال الترددات المتوسطة والعالية (كما في المرشحات). يبين الشكل (2-2) مجال التوتر (الجهد) للمكثفات الكهربائية حسب المواد العازلة المستخدمة:



الشكل (2-2): مخطط يبين مجال الجهد للمكثفات الكهربائية حسب  
المواد العازلة المستخدمة [9]

### 3-تطبيقات المكثفات الكهربائية

#### Capacitors Applications

يمكن تلخيص أهم تطبيقات المكثفات الكهربائية في الجدول كما هو مبين في الجدول (2-2).

الجدول (2-2): الخصائص المختلفة لأنواع المكثفات التقليدية واستخداماتها بحسب المجال التردددي [9]

خصائص	الاستخدام	نوع المكثف	التردد
دقيق، قليل التأثر بدرجة الحرارة	رادار	(1pF à 200nF) ميكا (1pF à 10nF) زجاج	ترددات عالية أعلى من 100kHz
دقيق ومستقر		Type 1 سيراميك (1pF à 2nF)	
غير دقيق وغير مستقر	دارات التقطيع	Type 2 سيراميك (100pF à 470nF)	
مستخدم حتى توترات 1000 V	توترات عالية	ورق غير ملبس بالمعدن (1nF à 100μF)	ترددات منخفضة
يبدل شيئاً فشيئاً	دارات التقطيع	ورق ملبس بالمعدن	ومتوسطة

بالمكثفات ذات رفائق البلاستيك		(10nF à 200μF) بوليستر (1nF à 250μF)	
مستقر جداً، موثوقة عالية	دارات الربط	بولي كربورنات ( 1nF à 250μF )	
مقاومة سلسلية ضعيفة، يتحمل تيارات فعالة عالية	يستخدم مع المقطوعات	بولي بروبلين (100pF à 250μF )	
استقرار حراري عالٍ	يستخدم للعمل في درجات حرارة عالية	بولي سولفين مغلف بمعدن (1nF à 250μF)	
تيار تفريغ ذاتي من رتبة الميكروأمير، توفر عمل حتى 550 V	يستخدم للترشيح والقطع	أكسيد الألمنيوم السائل (1μF à 150000μF )	
حجم صغير مقارنة بأكسيد الألمنيوم، توفر عمل حتى 150 V	يستخدم للترشيح والقطع	أكسيد التنتاليوم الصلب (1μF à 1000μF )	
استقرار حراري عالٍ تيار تفريغ ذاتي من رتبة الميكروأمير	يستخدم للتخزين	أكسيد الألمنيوم صلب ( 1μF à 20000μF )	
توفر عمل حتى 125 V حجم صغير، مستقر مع النقادم	دارة RC	أكسيد التنتاليوم الصلب (10nF à 500μF )	ترددات أقل من 10kHz

## ٤-١-٤- استخدام المكثفات في الشبكات الكهربائية

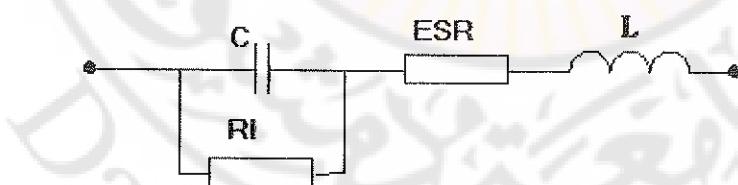
### Capacitors Using in Networks

تختار المكثفات الساكنة بأنها لاحتياج إلى زمن للإلاع نظراً لعدم احتواها على أجزاء دوار، كما أن ضياعاتها الذاتية منخفضة بشكل ملحوظ نظراً لاحتواها على عدد أصغر من المكونات ولا تحتوي على عناصر إلكترونية معقدة يصعب التعامل معها إضافة لكون بنيتها بسيطة. لذلك يمكن استخدامها لأغراض متعددة في الشبكة الكهربائية من أهمها تعويض الاستطاعة الردية (reactive power compensation). يمكن تغيير قيمة الاستطاعة الردية عن طريق استخدام المكثفات التي يمكن التحكم بها (switched-capacitor)، وبمعرفة الاستطاعة الردية المطلوبة يتم فصل أو وصل مراصف المكثفات (capacitor banks) حسب المطلوب.

تستخدم المكثفات التفرعية لتعويض الاستطاعة الردية وتحسين عامل الاستطاعة منذ عام 1914. حالياً تستخدم مراصف المكثفات على نحو واسع في شبكات التوزيع الكهربائية في سوريا وعلى توترات التوزيع المختلفة من التوتر 380V و 20kV وحتى توتر 66kV، حيث يجري استخدام مكثفات تستخدم الراتنج كمادة عازلة للتوترات المنخفضة 0.4kV والسيراميك والورق للتوترات المتوسطة 20kV ومادة البولي بروبيلين Polypropylene للتوتر 66kV.

## ٥-١-٢- نمذجة المكثفات الكهربائية

يمكن نمذجة المكثفات الكهربائية التقليدية بالدارة الكهربائية المبينة في الشكل (2-3).



الشكل (2-3): الدارة المكافئة RC للمكثف

حيث:

L: حثية المكثف ووحدة قياسه H (الهنري)،

ESR: المقاومة التسلسليّة المكافئة (equivalent serial resistance) وتقاس بالأوم  $(\Omega)$

$R_L$ : مقاومة التسريب وتقاس بالأوم  $(\Omega)$

C: سعة المكثف وتقاس بالفاراد  $(F)$ .

يمكن كتابة الممانعة للدارة الموضحة في الشكل أعلاه كما في العلاقة التالية:

$$Z(\omega) = \frac{R_L + ESR + ESR R_L^2 C^2 \omega^2}{1 + C^2 R_L^2 \omega^2} + j \frac{\omega L - \omega C R_L^2 + \omega^3 L C^2 R_L^2}{1 + C^2 R_L^2 \omega^2} \quad (3-2)$$

مسائل:

مسألة (1):

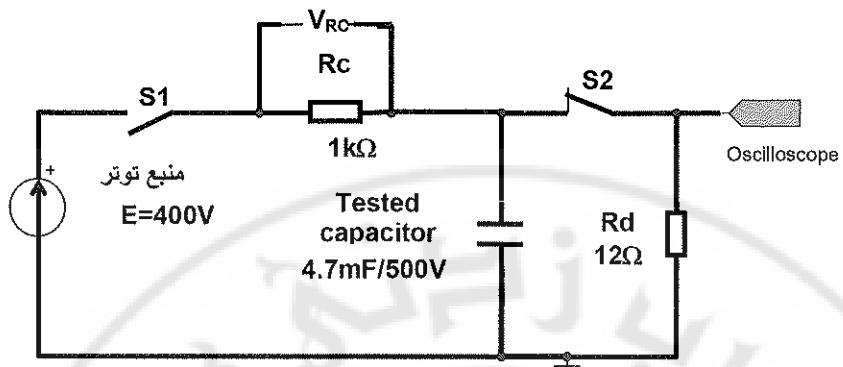
ارسم مخطط نايکوست للمكثف باستخدام المعطيات أدناه موضحاً عليها المناطق المختلفة حسب زاوية الطور، ماذا تلاحظ؟

ESR (1 kHz)= 0,08Ω, C (200 Hz)= 0, 92mF, L= 100nH, R<sub>L</sub>=50k Ω

مسألة (2):

مكثف كهربائي (أكسيد الألمنيوم) ذو القيم الاسمية (80mΩ, 4.7mF, 500V) يتم شحنه بإغلاق القاطع  $S_1$  كما في الدارة المبينة في الشكل (2-4) من منبع توثر مستمر  $E=400V$ ، ثم يتم تفريغه بفتح القاطع  $S_1$  وإغلاق القاطع  $S_2$ ، فإذا علمت أن:  $R_c=1k\Omega$ ,  $R_d=12\Omega$

.  
50



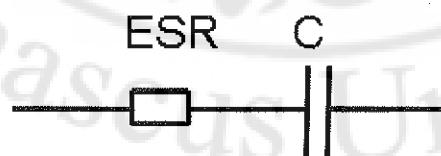
الشكل (4-20): دارة شحن وتفریغ المکثف التقليدي

لمطلوب مایلی:

- 1) ارسم الدارة الكهربائية المكافئة للمکثف التقليدي مهملاً التأثير التحريري.
- 2) احسب تيار الشحن الأعظمي مع وبدون استخدام مقاومة الشحن  $R_s$ ، ماذا تلاحظ؟
- 3) باعتبار أن مقاومة التفریغ  $R_d$  مثالية اكتب المعادلة التفاضلية المعتبرة عن تغير التوتر على أطراف المکثف  $(t)$  خلال التفریغ، ثم استنتج شكل التوتر خلال التفریغ وخلال الشحن.
- 4) احسب قيمة السعة الحقيقة للمکثف المذكور إذا علمت أن الطاقة الكهربائية الصناعية في المقاومة  $R_d$  بفعل جول تساوي  $J = 450$ ، ماذا تلاحظ؟ فسر ذلك.
- 5) اقترح طريقة مناسبة تعتمد على الدارة الكهربائية أعلاه لقياس مقاومة التسريب للمکثف  $R_L$ .

الحل

- 1) يمكن نمذجة المکثف التقليدي بالدارة الكهربائية التالية:



الشكل (5-2): الدارة المكافئة للمکثف التقليدي

(2)

أ- في حال عدم وضع مقاومة  $R$  نجد أن تيار الشحن  $I_s$  له القيمة التالية:

$$I_s = E/ESR = 400/0.08 = 500A$$

ب- في حال وضع مقاومة  $R_c$  نجد أن تيار الشحن  $I_s$  له القيمة التالية:

$$I_s = \frac{E}{R_c + ESR} = \frac{400}{1000 + 0.08} = 0.4A$$

(3) بتطبيق قانون كيرشوف خلال التفريغ على الدارة أعلاه يمكن كتابة المعادلة التالية:

$$u_c(t) + i_d(t)(ESR + R_d) = 0$$

$$i_d(t) = C \cdot \frac{du_c(t)}{dt}$$

$$u_c(t) + \frac{du_c(t)}{dt} \cdot C \cdot (ESR + R_d) = 0$$

وهي معادلة تقاضلية من الدرجة الأولى بدون طرف ثانٍ حلها أسي من الشكل التالي:

$$u_c(t) = u_{c0} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_d}}$$

حيث:  $\tau_d = R_d \cdot C$  ثابت التفريغ.

أما خلال الشحن نجد المعادلة التالية:

$$u_c(t) + \frac{du_c(t)}{dt} \cdot C \cdot (ESR + R_d) = E$$

وهي معادلة تقاضلية من الدرجة الأولى مع طرف ثانٍ حلها أسي من الشكل التالي:

$$u_c(t) = E \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_c}} \right)$$

حيث:  $\tau_c = R_c \cdot C$  ثابت الشحن.

(4) يمكن حساب قيمة سعة المكثف من العلاقة التالية:

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2; C = \frac{2 \times W}{U^2} = \frac{2 \times 450}{400^2} = 5.625 \mu F$$

نلاحظ أن قيمة السعة المحسوبة أكبر من القيمة الاسمية بنسبة 20%， وهذا ممكّن نتيجة لما يسمى بـ **تضاؤل التصنيع**.

5) بعد شحن المكثف لمدة كافية يصبح تيار الشحن منخفضاً جداً ومن رتبة تيار التفريغ. يمكن قياس هذا التيار من خلال قياس التوتر  $V_{RC}$  المبين في الشكل أعلاه ثم نقسمه على المقاومة  $R$ . وهذه الطريقة تسمى **floating**.

**مسألة (3):**

مكثف كهربائي سعته  $20\mu F$  مشحون بتوتر  $1000V$  وصل طرفاه بطرفين مكثف آخر سعته  $5\mu F$  مشحون بتوتر  $500V$ ، المطلوب مايلي:

1. حساب الشحنة على المكثف الأول قبل التوصيل.
2. اشرح حركة الشحنات خلال عملية شحن المكثف الثاني.
3. حساب فرق الكمون بين طرفي المكثف الثاني بعد التوصيل علماً أن الشحنة مصونة.
4. حساب الطاقة الكلية المخترنة فيهما بعد التوصيل.
5. حساب فرق الطاقة المخترنة قبل وبعد التوصيل، مادا تلاحظ؟ فسر ذلك؟
6. ارسم باستخدام برنامج حاسوبي العلاقة بين فرق الطاقة المشار إليه في الطلب 4 وسعة المكثف الثاني.

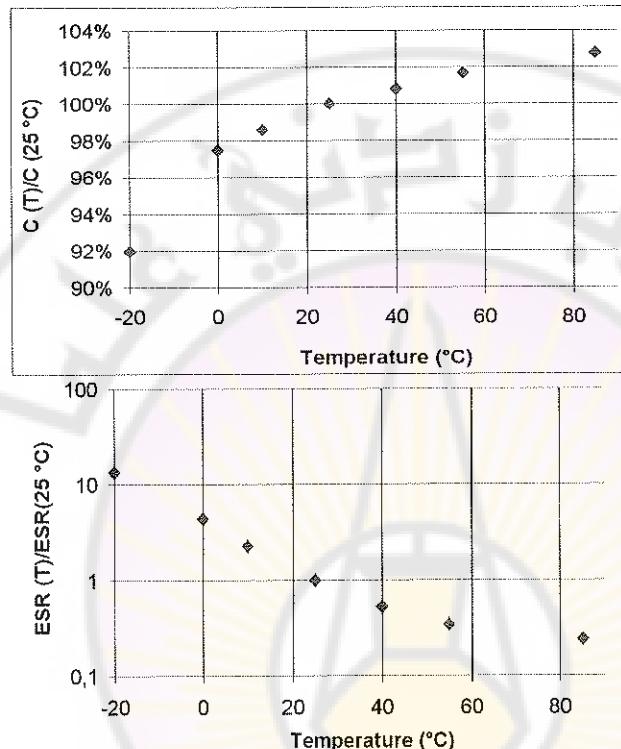
## 2-1-6- الخصائص الحرارية للمكثفات

### Thermal Characteristics of Capacitors

لتوضيح تأثير درجة الحرارة على خصائص المكثفات نأخذ مثال المكثفات الكهربائية والتي تشبه من حيث البنية العناصر الكهروكيميائية الأخرى مثل المكثفات فائقة السعة والمدخرات الكهربائية.

تتغير خصائص هذا النوع من المكثفات بتغير درجة الحرارة. لتقدير هذا التغير تم وضع المكثف الكهربائي المذكور أعلاه في غرفة ذات درجة حرارة ثابتة لمدة كافية

ثم جرى قياس خصائصه الكهربائية. وجد أن السعة تزداد مع ارتفاع درجة الحرارة بينما المقاومة ESR تنخفض بشكل كبير مع ارتفاع درجة الحرارة كما يوضح الشكل (6-2).



الشكل (6-20): تغير السعة والمقاومة ESR للمكثف فائق السعة مع تغير درجة الحرارة [10]

مع تغير درجة الحرارة تتغير المساحة المشتركة  $S$  بين اللبوسين نتيجة التمدد والتقلص، أضاف إلى ذلك أن خصائص المادة العازلة أكسيد الألمنيوم تتغير مع تغير درجة الحرارة. بينما تغير المقاومة ESR ناتج عن تغير لزوجة الكهربيليت، عندما تنخفض درجة الحرارة فإن ناقليه الكهربيليت تنخفض، وفي درجات الحرارة المنخفضة فإن ظاهرة تكتيف (condensation) الكهربيليت تظهر بوضوح مقيدة حركة الشوارد داخل الكهربيليت وبالتالي ترتفع المقاومة ESR بشكل كبير.

## Supercapacitors Energy Storage

### 2-1-التطور التاريخي للمكثفات فائقة السعة

#### Historical Evolution of Supercapacitors

اكتشف العالم Helmholtz نظرية الطبقة المضاعفة عام 1853، عند غمر قطبين ناقلين مطبق علىهما فرق كمون في سائل كهربائي فوجد أن الشوارد تنتقل إلى السطح البيني الموجود بين القطب (المشحون بشحنة معاكسة للشوارد) والسائل الكهربائي. وأول ما لوحظ تأثير المكثف ثانوي الطبقة الكهربائية في العام 1957 بتجربة من قبل مهندسي شركة جنرال إلكتريك (General Electric) لأجهزة يستعمل فيها قطب كربون كهربائي مسامي. فقد كان يعتقد بأن الطاقة تخزن في مسامات الكربون وأظهرت آنذاك "سعة عالية جداً"، بالرغم من أن آلية التخزين كانت مجهولة في ذلك الوقت. ولم يتثن لجنرال إلكتريك متابعة هذا العمل آنذاك.

إن النموذج الحديث من هذه المكثفات في نهاية المطاف طوره باحثون في شركة ستاندرد أويل أوهابيو (Standard Oil of Ohio) في عام 1966 عندما كانوا يعملون على تصاميم تجريبية تعمل بخلايا الوقود وتستخدم خلية مصممة من قطبين من الكربون المنشط المسامي تفصل بينهما مادة عازلة رقيقة جداً، وهذا التصميم الأساسي ظل الأساس لمعظم المكثفات الكهربائية فائقة السعة ( ذات الطبقة المزدوجة ) حتى يومنا هذا.

في عام 1978 عندما فشلت ستاندرد أويل في تسويق اختراعاتها منحت التراخيص أخيراً لشركة NEC (Nippon Electric Company)، التي قامت بتسويقها على أنها "supercapacitor" حيث تم استخدامها لتوفير الطاقة الكهربائية الاحتياطية للحفاظ على ذاكرة الحاسوب. وفي منتصف 1990 ونتيجة للتطورات التقنية المختلفة تم تحسين أداء المكثفات فائقة السعة وتخفيض لتكليفها بشكل كبير. إن الاستخدامات الأولى للمكثفات فائقة السعة في التطبيقات الصناعية قد كانت لدعم إمدادات الطاقة إلى الروبوتات.

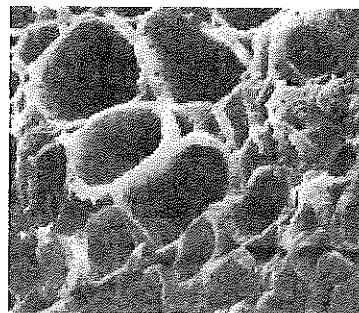
في عام 2005 قامت شركات التحكم (Diehl Luftfahrt Elektronik- GmbH) بإختيار ultracapacitors Boostcap لنظم الطاقة في حالات الطوارئ لتشغيل الأبواب وجرات الإخلاء في طائرات الركاب، بما في ذلك طائرات إيرباص الجديدة من طراز 380 وطائرات الجامبو.

وفي عام 2006، بدأت شركة Joel Schindall وفريق العمل في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا MIT (Massachusetts Institute of Technology) بالعمل على مدخنة "السوبر"، وذلك باستخدام تكنولوجيا الأنابيب النانوية (nano tube) لتحسين بنية المكثفات فائقة السعة.

## 2-2-2- مبدأ المكثفات فائقة السعة وبنيتها

### Principle and Structure of Supercapacitors

من علاقة حساب السعة للمكثف نرى أنه لزيادة السعة لابد من زيادة قيمة ثابت العازلية أو زيادة النسبة S/D. إن المبدأ الأساسي للمكثفات فائقة السعة يمكن في زيادة النسبة S/D. في المكثفات فائقة السعة تتوضع الشحنات الكهربائية (السلبية والموجبة) على مساحة كبيرة في اللبوسين. فباعتبار مساحة سطح كبيرة للقطب، ومسافة صغيرة جداً بين طبقتي الشحنات (الشوارد من السائل الكهروليتي والشحنات الكهربائية في القطب الصلب) فإننا نحصل على سعة كبيرة جداً. يمكن تحقيق ذلك باستخدام لبوسات ذات خاصية مسامية (porous electrode)، مثل الكربون الذي يتميز بهذه الخاصية المسامية وبمساحة سطح قد تصل إلى  $2000\text{m}^2/\text{gr}$ . ويظهر الشكل (2-7) صورة ميكروسโคبية في سطح أحد اللبوسات.

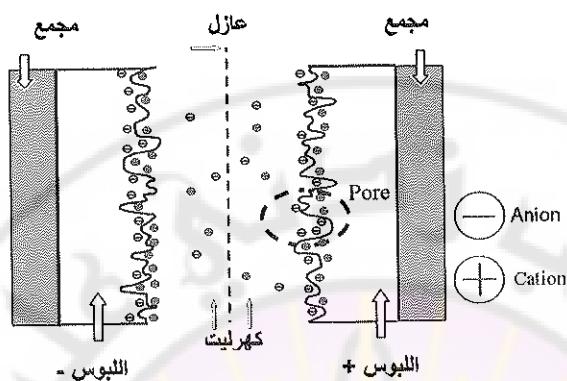


الشكل (2-7): البنية المسامية للبوس مكثف فائق السعة [11]

يجري حالياً العمل على تطوير مواد أخرى من الغرافين المعدل (CMG: chemically modified graphene) حيث يتميز هذا النوع بمساحة سطح تصل إلى  $2630\text{m}^2/\text{gr}$  ويتتمتع بناقلية عالية. يوجد حالياً نوعان من الكهربيليت: كهربيليت مشبع مثل حمض الكبريت، وكهربيليت عضوي مثل Acetonetrone أو كربونات البروبيلين.

من حيث البنية، تتكون المكثفات فائقة السعة من لبوسين لهما بنية مسامية ومن كهربيليت (electrolyte) ومن عازل مسامي (separator) من رتبة النانومتر. يسمح العازل بمرور الشوراد من دون الإلكترونات. يعتمد مبدأ المكثفات فائقة السعة على توزيع الشحنات الكهربائية بشكل متجلور في الحد الفاصل (interface) بين اللبوس الصلب والكهربيليت تحت تأثير الحقل الكهربائي المطبق. يظهر على الشكل (2-8) التوزع المتجلور للشحنات، فالشحنات الموجبة داخل اللبوس الموجب يقابلها شحنات سالبة داخل الكهربيليت، وعلى الجهة الأخرى من المكثف أي على اللبوس السالب نجد مقابلة الشحنات الموجبة. إن المسافة الفاصلة بين اللبوس والكهربيليت صغيرة جداً من رتبة النانومتر وهذا ما يسمى الطبقة الكهربائية المزدوجة electric double layer). ولذلك يسمى أحياناً هذا النوع من المكثفات بالمكثفات ذات الطبقة الكهربائية المضاعفة، في حين يطلق بعض المصنعين (مثل شركة ماكسويل) على هذه العناصر اسم (ultracapacitors). إن العازلية الكهربائية بين الأيونات المتعاكسة القطبية من

جهة اللبوس ومن جهة الكهربايت تتحقق بوجود طبقة من جزيئات solvent على الحد الفاصل من جهة الكهربايت.



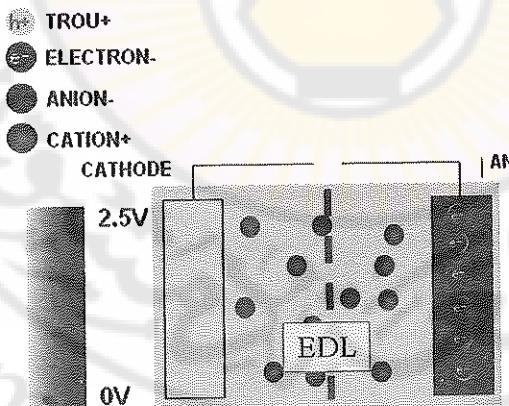
الشكل (2-8): بنية المكثف فائق السعة

### آلية الشحن والتفرير

#### Charge/Discharge Process

يمكن أن نلخص مراحل عمل المكثف فائق السعة في ثلاثة مراحل:

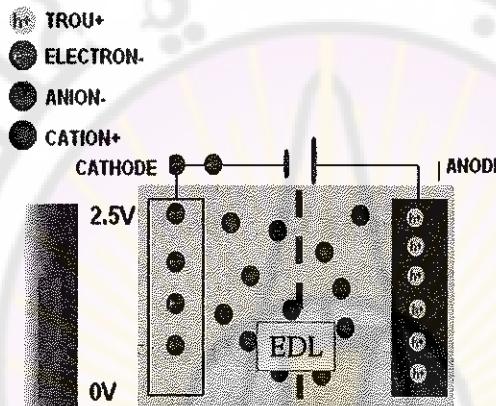
**حالة عشوائية:** عندما يكون التوتر على أطراف المكثف فائق السعة يساوي الصفر فإن الشوارد داخل الكهربايت تكون في حالة عشوائية كما يبين الشكل (2-9).



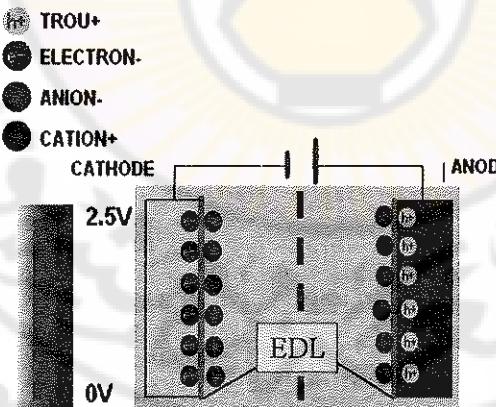
الشكل (2-9): حالة عشوائية للشوارد في مكثف فائق السعة

Thick, Trou<sup>+</sup>: أيون سالبة الشحنة, anion<sup>-</sup>: الكاتيون، Cation<sup>+</sup>: أيون موجب الشحنة

حالة الشحن: يتم الشحن بوصول منبع تيار مستمر إلى المكثف حيث قطب الموجب إلى القطب الموجب للمكثف وقطب السالب إلى القطب السالب للمكثف. نلاحظ ارتفاع تدريجي لنوترا المكثف حتى وصول التوتر إلى التوتر المطلوب كما يظهر الشكل (2-10-أ)، حيث يرافق ذلك تراكم تدريجي للشحنات في الطبقة الفاصلة (Interface) بين اللبوس والسائل الكهربائي، لتنظم الشحنات الموجبة جوار القطب السالب والشحنات السالبة جوار القطب الموجب كما يبين الشكل (2-10-ب). يرافق ذلك دائمًا هجرة ل الإلكترونات من القطب الموجب للمكثف إلى القطب السالب للمكثف عبر المنبع.

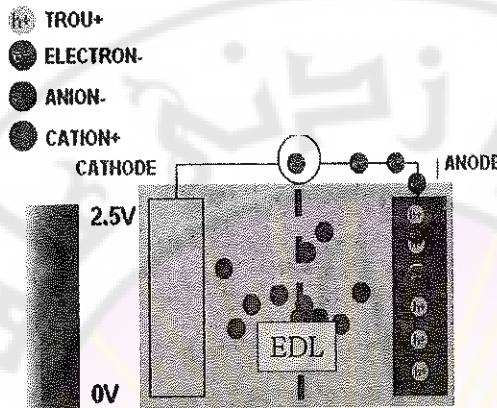


الشكل (2-10-أ): حالة الشوارد والإلكترونات في مكثف خلال الشحن



الشكل (2-10-ب): حالة الشوارد والإلكترونات في مكثف عند نهاية الشحن

حالة التفريغ: يتم بوصول حمل ما إلى طرفي المكثف فائق السعة. مع انخفاض توتر المكثف تعود الشحنات إلى الانتشار في السائل الكهربائي كما في الحالة الأولى (العشوانية) ويستمر توتر المكثف بالتناقص تدريجياً حتى يصل إلى الصفر، الشكل (11-2). تعود الإلكترونات إلى القطب الموجب عبر الدارة الخارجية لتحد مع التقويب عليه.



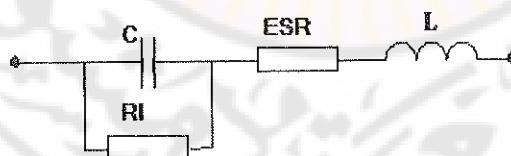
الشكل (11-2): حالة الشوارد والإلكترونات في المكثف عند التفريغ

#### 4-2-2 نمذجة المكثف فائق السعة

##### Modeling of Supercapacitors

يوجد عدة نماذج لتمثيل ووصف سلوك المكثفات فائق السعة منها ما هو رياضي ومنها ما يمكن تمثيلها كدارة مكافئة، ومن أبسط الدارات المكافئة للمكثف فائق السعة

دارة RLC الموضحة في الشكل التالي:



الشكل (0): دارة RLC المكافئة للمكثف فائق السعة

حيث:

L: حلبة المكثف والأسلام ووحدة قياسه H (الهنري).

ESR: المقاومة التسلسليّة المكافأة وتقاس بالأوم ( $\Omega$ ).

R: مقاومة التسريب وتقاس بالأوم ( $\Omega$ ).

C: سعة المكثف وتقاس بالفاراد (F).

مسألة نموذجية:

ارسم مخطط نايکوست للدارة الكهربائية الموضحة في الشكل (12-2) من أجل قيم

اختيارية للمكثف فائق السعة ومن أجل:

1) ترددات الرنين،

2) الترددات المنخفضة أقل من تردد الرنين وثم باعتبار التأثير التحربي،

3) الترددات العالية،

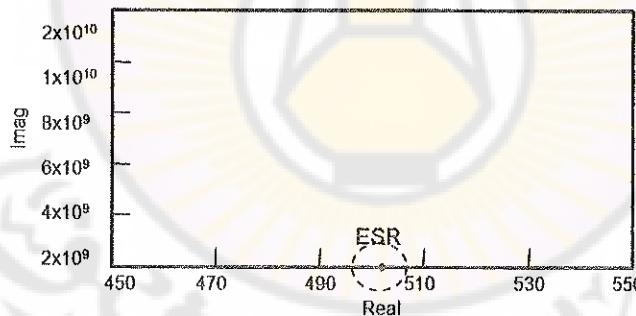
4) الترددات المنخفضة جداً.

الحل:

1) في تردد الرنين المفعالة التحربيّة تساوي المفعالة السعوية للمكثف لتصبح

الممانعة الكلية تساوي قيمة المقاومة ESR ويكون مخطط نايکوست كما هو مبين

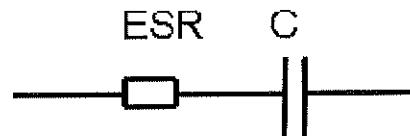
الشكل (13-2).



الشكل (13-2): مخطط نايکوست عند تردد الرنين

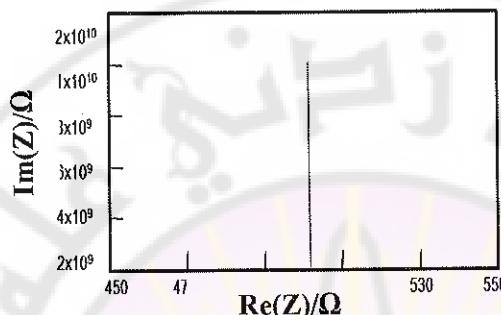
2) في الترددات المنخفضة أقل من تردد الرنين تصبح الدارة المكافأة للمكثف فائق

السعة كما هو مبين الشكل (14-2).



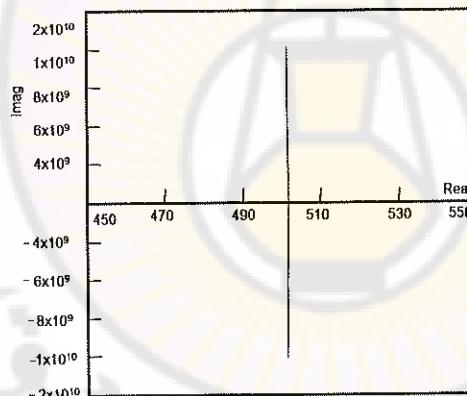
الشكل (14-2): الدارة المكافحة للمكثف فائق السعة عند الترددات المنخفضة

ويكون مخطط نايكوست كما يظهر الشكل (15-1) والمرسوم بمساعدة برنامج .Simplorer



الشكل (15-2): مخطط نايكوست عند الترددات المنخفضة

في حال اعتبار الملف يكون مخطط نايكوست كما هو مبين في الشكل (16-1).



الشكل (16-1): مخطط نايكوست عند الترددات المتوسطة

في الترددات المنخفضة جداً نجد أن ممانعة المكثف فائق السعة تصبح على الشكل التالي :

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{Z_{RI}} + \frac{1}{Z_C} = \frac{1}{R_I} + \frac{1}{(jwC)^{-1}} = \frac{1}{R_I} + jwC/I$$

ومنه،

$$Z = \left( \frac{1}{R_l} + jwC \right)^{-1} = \frac{R_l}{1+w^2 R_l^2 C^2} - j \frac{w R_l^2 C}{1+w^2 R_l^2 C^2}$$

ومن أجل تردد يسعى إلى الصفر نجد:

$$\operatorname{Re}(Z) = \frac{R_l}{1+w^2 R_l^2 C^2} = R_l$$

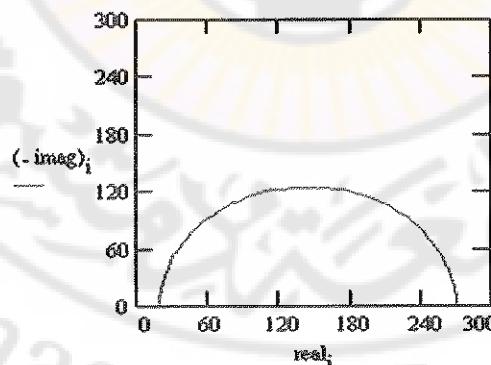
$$\operatorname{Im}(Z) = \frac{-w R_l^2 C}{1+w^2 R_l^2 C^2} = 0$$

في حال عدم إهمال المقاومة  $R_s$  تكون الدارة المكافئة ومخطط نايكوست كما هو مبين  
الشكل (17-2).

$$Z = Z_s + Z_C = R_s + Z_C$$

$$\begin{aligned} Z &= \left( \frac{1}{R_l} + jwC \right)^{-1} \\ &= \frac{R_l}{1+w^2 R_l^2 C^2} - j \frac{w R_l^2 C}{1+w^2 R_l^2 C^2} \end{aligned}$$

$$\operatorname{Re}(Z) = R_s + \frac{R_l}{1+w^2 R_l^2 C^2}$$



الشكل (17-2): مخطط نايكوست عند الترددات المنخفضة جداً

## 2-2-5- قياس خصائص المكثفات فائقة السعة

### Measurement of Supercapacitors' Characteristics

إن حساب خصائص المكثفات فائقة السعة مثل السعة والمقاومة يتطلب تقنيات خاصة نظرًا لصغرها. بالإضافة لذلك إن المكثفات فائقة السعة تولد ظواهر فيزيائية وكميائية محددة ومتداخلة فيما بينها إذ لا يمكن فصلها عن بعضها البعض.

يوجد الكثير من تقنيات قياس خصائص المكثفات فائقة السعة من أهمها:

- تقنية التحليل الطيفي للممانعة الكهروكميائية (Electrochemical Impedance Spectroscopy)

(Impedance Spectroscopy)

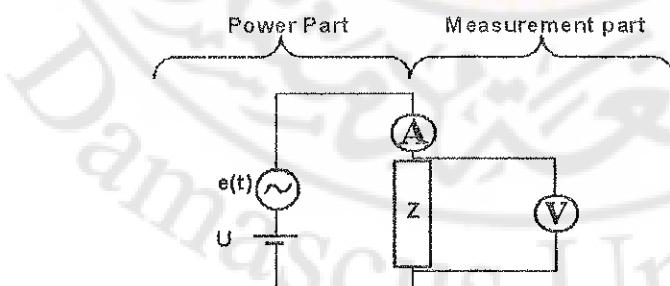
- تقنية التيار المستمر مثل الشحن والتفرغ بتيار ثابت أو توتر ثابت.

## 2-2-1- مبدأ قياس الطيف للممانعة الكهروكميائية

يتتألف من قسم للقياس وقسم للقدرة كما يوضح الشكل (2-18) أدناه. قسم القدرة يساعد على تطبيق توتر مستمر + موجة توتر متباوب. توتر الحقن المستمر (DC bias voltage) يساعد على استقطاب المكثف، نظرًا لاعتماد خصائص المكثف فائق السعة على التوتر المطبق على أطرافها. أما التوتر المتباوب فهو توتر ذو طولية ضعيفة بضعة ملي فولت وتتردد متغير.

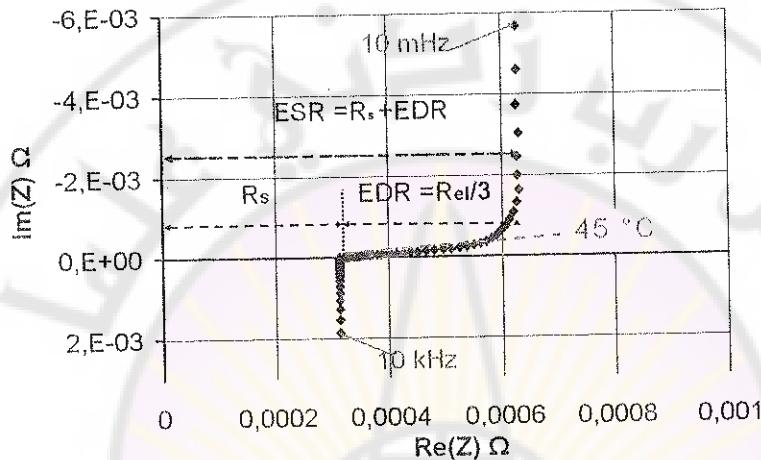
يتم قياس الممانعة وفق العلاقة التالية :

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} \quad (4-2)$$



الشكل (20-18): جهاز قياس الممانعة EIS

يمكن أن ترسم النتائج التي نحصل عليها على مخطط نايكوست كما في الشكل (19-20). وقد جرت العادة في نظم تخزين الطاقة الكهربائية ذات المبدأ الكهروكيميائي عند رسم مخطط نايكوست أن يتم رسم الجزء السالب في الأعلى لأن هذه الأنظمة ذات طبيعة سعوية أي الجزء المهم فيها يقع في الجزء السالب.



الشكل (19-20): مخطط نايكوست للمكثف فائق السعة [11]

من هذا المخطط يمكن تحديد محددات المكثف فائق السعة كما يلي:

$R_s$ : مقاومة الوصلات وتؤخذ عند تردد الرنين بالإسقاط على محور القسم الحقيقي لل嫗انعة  $Z$ .

$ESR$ : المقاومة التسلسلية المكافئة وتؤخذ عند تردد منخفضة بالإسقاط على المحور الحقيقي لل嫗انعة  $Z$ .

$EDR$ : مقاومة الكهرليت (Electrical Distributed Resistance) وتحسب من العلاقة التالية:

$$EDR = ESR - R_s \quad (5-2)$$

أما لحساب السعة فتحسب عند الترددات المنخفضة  $f=10\text{mHz}$  من العلاقة التالية:

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_c} \quad (6-2)$$

والمحارضة تحسب عند أكبر تردد ممكن مع الأخذ بالحسبان دقة القياس.

مثال : من أجل العنصر (BCAP0010) نجد من التجربة أعلاه القيم التالية:  
نجد أن قيمة المقاومة  $R_s=0.34\text{m}\Omega$ ، وقيمة المقاومة  $\text{ESR}=0.64\text{m}\Omega$ ، ومنه  
نستنتج قيمة  $\text{EDR}=0.30\text{m}\Omega$ . ومن أجل التردد  $10\text{mHz}$  نجد قيمة السعة  
.  $C=3100\text{F}$

### 2-5-2-2- تقنية التيار المستمر

توجد طرائق عدة تعتمد على هذا النوع من القياس فهي من حيث المبدأ تعدد المكثف  
فائق السعة مكتفأ خطياً موصولاً على التسلسل مع مقاومة.

في هذه الطريقة نشحن أو نفرغ المكثف فائق السعة بتيار ثابت ونسجل التوتر على  
أطراف المكثف فائق السعة. من نتائج تجربة التيار المستمر نحصل على منحني توتر  
وتيار المكثف فائق السعة كما يبين الشكل (2-20).

نحدد قيمة المقاومة  $\text{ESR}$  من العلاقة التالية:

$$\text{ESR} = \frac{\Delta U_0}{I} \quad (7-2)$$

حيث:

$I$ : قيمة تيار الشحن أو التفريغ،

$\Delta U_0$ : مقدار هبوط التوتر في نهاية الشحن وعند فصل تيار الشحن.

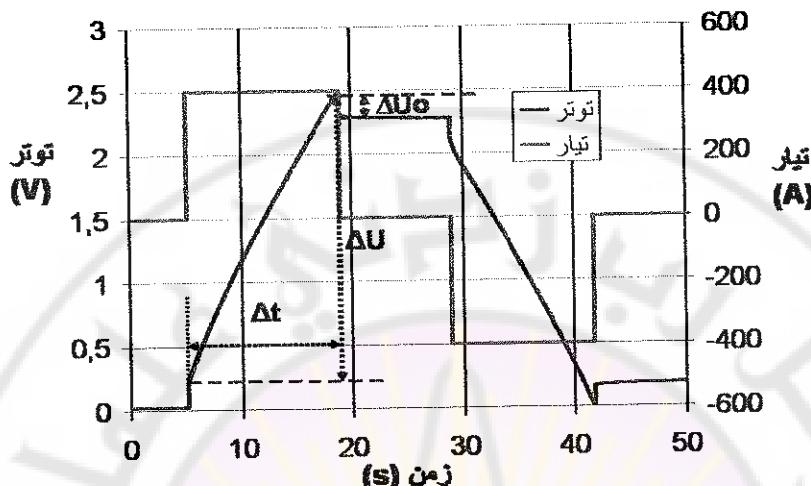
ما قيمة السعة فيمكن حسابها من العلاقة:

$$C = I \cdot \frac{\Delta I}{\Delta U} \quad (8-2)$$

حيث:

$\Delta U$ : مقدار ارتفاع التوتر خلال الشحن ،

$\Delta t$ : مقدار الزمن الموافق لارتفاع التوتر  $U$



الشكل (2-20): منحني شحن وتفریغ المکثف فائق السعة بتيار ثابت [11]

مسألة نموذجية:

في إحدى التطبيقات يجري شحن وتفریغ مکثف فائق السعة ذي القيم الاسمية التالية (2.5V, 2600F, 600A,) بتيار ثابت كما هو موضح في الشكل (2-21). علماً أن:

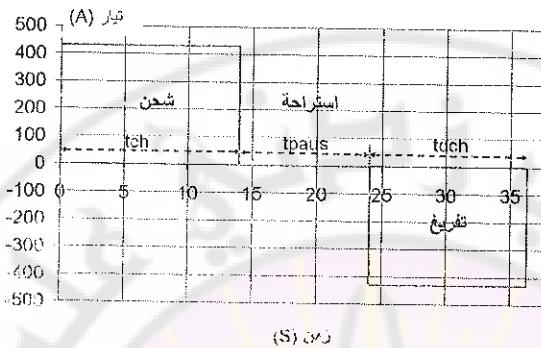
$t_{ch} = 14s$ ,  $t_{dch} = 12.3s$ ,  $t_{storage} = 10s$ ,  $I = \pm 430A$ ,  $U_{c0} = 0V$ ,  
 $ESR = 630\mu\Omega$

وبافتراض أن سعة العنصر خطية وبإهمال التأثير التحريري أجب عما يلي:

1) ارسم دارة كهربائية بسيطة مكافئة للمکثف فائق السعة، ثم ارسم مخطط نايكوست لهذه الدارة.

2) خلال الشحن ارتفع التوتر على أطراف المکثف من التوتر الابتدائي إلى التوتر الاسمي بزمن وقدره 14 ثانية، احسب قيمة السعة الحقيقية لهذا العنصر خلال الشحن و ماذا تلاحظ ؟

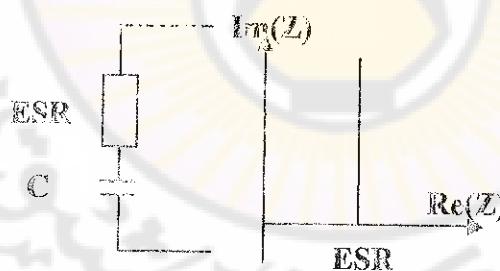
- (3) احسب التغير الزمني للتوتر على أطراف هذا العنصر (t) خلال كامل الدور ( $T = 38 \text{ s}$ ) باعتبار سعته الحقيقية، ثم ارسمه بدقة.
- (4) احسب قيمة الطاقة المخزنة في هذا العنصر في نهاية الشحن.
- (5) احسب المردود الكموني للمكثف.



الشكل (2-21): تيار شحن وتغذية المكثف، فائق السعة

الحل:

- باعتبار أن سعة العنصر خطية، وبإهمال التأثير التحرريضي والتغذية الذاتي في العنصر، نمثل المكثف فائق السعة بدارة بسيطة عبارة عن مكثف خطي موصول على التسلسل مع مقاومة  $ESR$ .



الشكل (2-22): مخطط زايكونومي للمكثف فائق السعة

$$Z = ESR + j 1/\omega C$$

$$Re(w) = ESR$$

$$Im(w) = -j 1/\omega C$$

2- خلال الشحن ارتفع التوتر على أطراف المكثف من التوتر الابتدائي إلى التوتر الاسمي، حساب قيمة السعة:

$$u(t) = I \cdot ESR + U_c$$

$$U_c = I \cdot \Delta t / C + U_{c0}$$

$$2.5 = 430 \times 630 \times 10^{-6} + 430/C \times 14$$

$$2.229I = 6020/C \Rightarrow C = 2700 [F]$$

نلاحظ أن السعة الحقيقية أكبر من السعة الاسمية لكنها ضمن تفاوت التصنيع المحدد من قبل المصنع بـ 20%.

3- حساب التغير الزمني للتوتر على أطراف العنصر خلال كامل الدور:

- خلال الشحن:  $0 < t < 14s$

$$\Delta u = I^* ESR = 0.27V$$

ثم يرتفع التوتر خلال الشحن حتى القيمة الاسمية 2.5V

ينخفض التوتر لحظياً بسبب هبوط التوتر على المقاومة بقيمة:

$$\Delta u = I \cdot ESR = 0.27V$$

أي يصبح التوتر خلال فترة الاستراحة  $U = 2.5 - 0.27 = 2.23V$

- خلال التفريغ :  $24s < t < 36.5s$

ينخفض التوتر لحظياً في البداية بقيمة 0.27V أي يصبح في بداية التفريغ متساوياً:

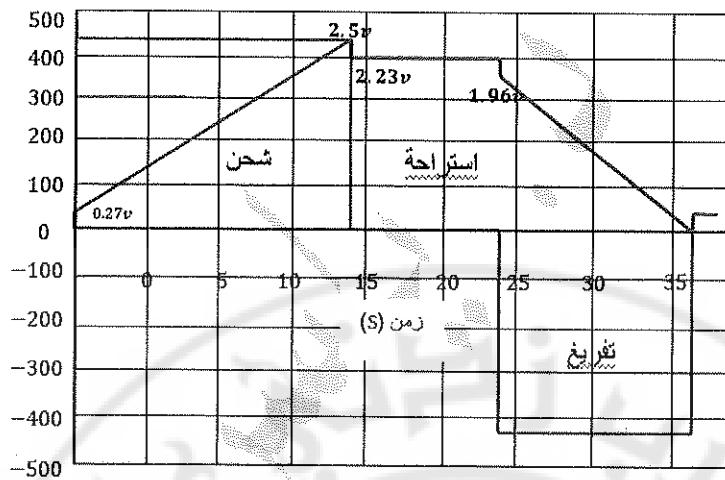
$$U = 2.23 - 0.27 = 1.96V$$

في نهاية فترة التفريغ يحسب كما يلي :

$$u(t) = I \cdot ESR + U_c$$

$$U_c = I \cdot \Delta t / C + U_{c0}$$

$$U = 1.96 - 1.96 = 0$$



الشكل (2-23): توتر المكثف فائق السعة

4- حساب قيمة الطاقة المختزنة في العنصر بنهاية فترة الشحن :

$$W_c = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (U_2^2 - U_1^2)$$

$$W_c = \frac{1}{2} \cdot 2700 \cdot (2.23^2 - 0) = 6.7 \text{ kJ}$$

5- حساب قيمة المردود من أجل التيار المذكور :

$$\eta = \frac{W_c - I^2 \cdot ESR \cdot t_{dch}}{W_c + I^2 \cdot ESR \cdot t_{ch}} = 63\%$$

## مسائل غير محلولة:

مسألة (1): في إحدى تطبيقات المكثفات يجرى شحن وتفریغ مکثف فائق السعة ذي القيمة الاسمية التالية (2.7V, 600A, 2600F) بتيار ثابت كما في الشكل أدناه. علماً أن

$$t_{ch}=11s, t_{dch}=11s, t_0=10s, t_{storage}=10s, I=600A, U_{c0}=0.1V \\ ESR=420\mu\Omega$$

و بافتراض أن سعة العنصر خطية أجب عمّا يلي:

- (1) ارسم دارة كهربائية بسيطة مكافئة للمكثف فائق السعة،
  - (2) خلال الشحن ارتفع التوتر من التوتر الابتدائي إلى التوتر الاسمي احسب قيمة السعة الحقيقية لهذا العنصر وماذا تلاحظ؟
  - (3) احسب التغير الزمني للتوتر على أطراف هذا العنصر خلال الدور كامل  $T=33s$  ثم ارسمه بدقة،
  - (4) احسب قيمة الطاقة المخزنة في هذا العنصر في نهاية الشحن،
  - (5) احسب مردود هذا العنصر بإهمال التفريغ الذاتي.
- 

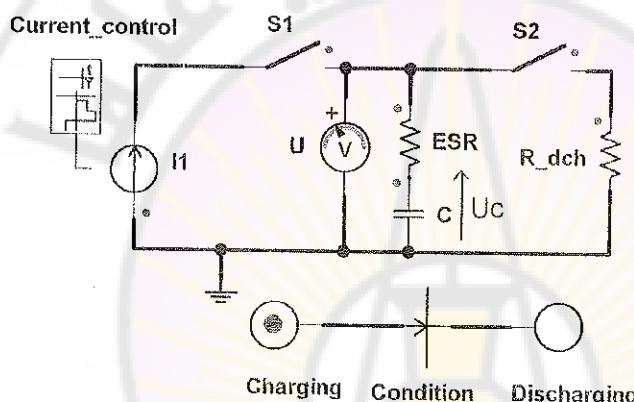
مسألة (2): باستخدام الدارة الكهربائية المبينة أدناه، يجري شحن وتفریغ مکثف فائق السعة ذي المواصفات التالية:  $2.7V, 300\mu\Omega, 2600F$ ، كمالي:

- مرحلة شحن بتيار ثابت: عند إغلاق القاطع  $S_1$  (القاطع  $S_2$  مفتوح) يمر تيار  $400A$ ، فيرتفع التوتر الكلي  $U$  على أطراف المكثف من توتر ابتدائي يساوي الصفر إلى توتر أقصى  $U_{max}$  وبזמן شحن  $t_{ch}=16.77s$
- مرحلة تخزين مقدارها  $t_{storage}=10s$ ، (القاطع  $S_1$  مفتوح والقاطع  $S_2$  مفتوح)
- مرحلة تفريغ بمقاومة ثابتة مقدارها  $R_{dch}=50m\Omega$ ، القاطع  $S_1$  مفتوح والقاطع  $S_2$  مغلق،

والمطلوب مايلي:

- (1) احسب توتر المكثف  $U_{max}$

- 2) في اللحظة أكبر بقليل من الزمن  $t=26.77\text{s}$ , احسب تيار التفريغ وهبوط التوتر على المقاومة المكافئة التسلسليّة للمكثف فائق السعة  $U_r$ .
- 3) بإهمال أثر المقاومة المكافئة التسلسليّة للمكثف فائق السعة على الحساب، احسب زمن التفريغ  $t_{dch}$ , باعتبار أن التفريغ ينتهي عندما ينخفض التوتر إلى 2% من قيمته الابتدائيّة (2% من قيمته في اللحظة  $t=26.77\text{s}$ ).
- 4) ارسم توتر وتيار المكثف فائق السعة خلال دور تشغيل كامل (شحن-تخزين-تفريغ).



الشكل (24-2): مخطط الدارة الكهربائيّة لشحن وتفریغ المكثف فائق السعة

## 6-2- حساب موديولات المكثفات فائقة السعة

### Sizing of Supercapacitors Modules

لا يوجد طريقة محددة لحساب موديولات المكثفات فائقة السعة ولكن ذلك يتبع المعطيات المتوافرة. سنعطي أمثلة نموذجية لشرح كيفية حساب موديولات المكثفات فائقة السعة.

مثال على استخدام نظام تخزين الطاقة بالمكثفات فائقة السعة:  
إن الهدف الأول لاستخدام نظام تخزين الطاقة في الحالات هو استعادة الطاقة الكهربائية.

أولاً، حساب الطاقة الممكن استعادتها من الكبح الكهربائي. إن الطاقة الحركية  $W$  مقدرة بالجول (kinetic energy) لحافلة تسير بسرعة ما تعطى بالعلاقة التالية:

$$W = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (9-2)$$

حيث:

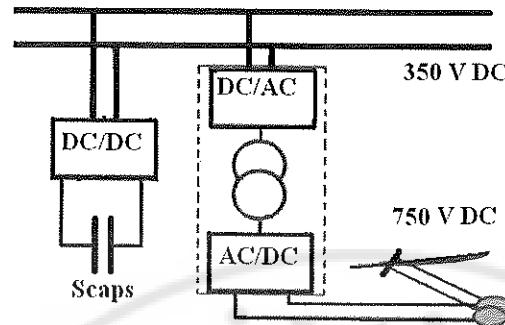
$m$ : كتلة الحافلة مع الركاب مقدرة بـ Kg،

$v$ : سرعة الحافلة وتقدر بـ  $\text{m.s}^{-1}$ .

من أجل القيم:  $m=20\text{ton}$  و  $v=15 \text{ m.s}^{-1}$  ( $54\text{km.h}^{-1}$ ) نجد أن الطاقة الحركية هي  $W=625\text{W.h}$ ، والطاقة المحسوبة، من أجل زمن تفريغ 15s، تكفي استطاعة عظمى تقارب  $625 \times 3600 / 15 = 150\text{kW}$ .

من الناحية الفنية لأجل استطاعة كبيرة من رتبة  $150\text{kW}$  (انظر الملحق (2)), يفضل تجزئة استطاعة الكبح إلى ثلاثة موديولات استطاعة كل منه  $(625/3=208 \text{ W.h})$ .  $50 \text{ kW}$ .

في الحافلة الكهربائية، يتم ربط نظام تخزين الطاقة بالمكثفات فائقة السعة إلى القصبان الداخلية للحافلة وعلى توتر مستمر وقدره  $350\text{V}$  عن طريق مبدل الكترونی-  
Buck-Boost يسمح بمرور الاستطاعة بالاتجاهين كما يظهر الشكل (25-2).



الشكل (2-25): مخطط ربط نظام تخزين مكثفات فائقة السعة في الحافلة الكهربائية

يمكن حساب الطاقة المفرغة بين توترين من العلاقة (10-2).

$$E = \frac{1}{2} \cdot C_{eq} \cdot (U_{sc_{max}}^2 - U_{sc_{min}}^2) \quad (10-2)$$

حيث،

$U_{sc_{max}}$ : القيمة العظمى للتوتر على أطراف نظام تخزين مكثفات فائقة السعة،

$U_{sc_{min}}$ : القيمة الصغرى للتوتر على أطراف نظام تخزين مكثفات فائقة السعة،

$C_{eq}$ : السعة المكافئة لنظام تخزين مكثفات فائقة السعة.

يجري عادةً تصميم موديول المكثفات فائقة السعة ليعمل من حيث الشحن والتفریغ ما

بين التوتر الاسمي للموديول  $U_{sc_{max}}=U_{sc_n}$  ونصف التوتر الاسمي له

$U_{sc_{min}}=U_{sc_n}/2$ ، ومنه تصبح العلاقة (10-2) على الشكل التالي:

$$E = \frac{3}{4} \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot C_{eq} \cdot U_{sc_n}^2 \right) \quad (11-2)$$

بافتراض أن التوتر الاسمي لمجموع المكثفات فائقة السعة الموصولة على التسلسل هو

300V نجد أن قيمة السعة المكافئة هي  $C_{eq}$ :

$$C_{eq} = \frac{E = W}{0.75 \cdot 0.5 \cdot U_{sc_n}^2} = \frac{208 \times 3600}{0.75 \times 0.5 \times 300^2} \approx 22F \quad (12-2)$$

وبناء عليه وباستخدام العنصر (انظر الشكل (26-2) ((2600 F, 2.7 V) MC2600)) والمنتجة حديثاً من قبل شركة MAXWELL-technology (في الجدول (2) أدناه الموصفات الاسمية للمكثف فائق السعة المذكور) نجد أن عدد العناصر الكلي المطلوب هو :

$$n = \frac{C(\text{cell})}{C_{eq}} = \frac{2600}{22} \approx 120 \text{ cells} \quad (13-2)$$



الشكل (26-2): صورة لمكثف فائق السعة MC2600

الجدول (3-2): الموصفات الاسمية للمكثف فائق السعة [12] MC2600

ESR (mΩ)	مجال درجة الحرارة	كثافة الطاقة بالوزن Wh/kg	كثافة الاستطاعة بالوزن kW/kg	عدد دورات الشحن والتفريغ
0.4	-40°C to 65°C	5.6	10.4	1 million

يمكن حساب عدد الخلية من المكثفات فائقة السعة اللازمة لتحمل التوتر المطلوب (300 V) ك Kamiyli (ونأخذ أيهما أكثر) :

$$n = \frac{U_{sc,n}(\text{module})}{U_n(\text{cell})} = 111 \text{ cells} \quad (14-2)$$

في صفحة الويب أدناه لعام 2012 نجد أن المصنع Arckell (Ercsteel) يقترح نظام تخزين قريب من المصمم وله الموصفات التالية:

- قدرة التخزين 250 Wh

- استطاعة  $W$  50 .
- توتر يتراوح من  $V$  300 إلى  $420 V$  .
- <http://www.ercteel.com/stockage>

#### مسألة:

يتم تغذية ترامویه باستخدام نظام تخزين بالمكثفات فائقة السعة. وجد أن الطاقة اللازمة لل ترامویه tramway للوصول من محطة توقف ركاب ما إلى محطة التوقف التالية هي  $3.5kW$  علماً أن توتر عمل المكثفات فائقة السعة لا يزيد عن  $750V$  المطلوب حساب عدد خلايا موديل المكثفات فائقة السعة (التسلسليّة والتفرعيّة) من العنصر ( $2.5V$ ,  $2600F$ ) حتى تؤمن وصول الترامویه من محطة ما إلى المحطة التالية.

#### 2-2-7- تطبيقات المكثفات الكهربائية فائقة السعة

في مجال المعلوماتية: تستخدم في دارات تغذية الذاكرة وتستخدم في مستقبلات الفضائيات وفي أجهزة التلفاز وفي الجوال ... الخ.

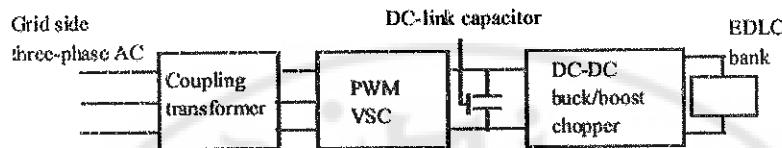
في مجال إلكترونيات القراءة: تستخدم كمعرضات الاستطاعة الريدية.

في وسائل النقل: تستخدم بكثرة مع المدخرات الكهربائية على سبيل المثال تستخدم لإقلاع المحركات الكهربائية في السيارات الكهربائية بالإضافة إلى استخدامها بالمركبات الكهربائية كما في الأمثلة السابقة.

وفي الوقت الحاضر دخلت المكثفات فائقة السعة جميع المجالات. نجد المكثفات فائقة السعة حالياً جنباً إلى جنب مع المدخرات الكهربائية و الخلايا الوقودية وذلك لتأمين الاستطاعات اللازمة في النظم الكهربائية حيث لا تستطيع البديل الأخرى تأمينها في زمن قصير جداً.

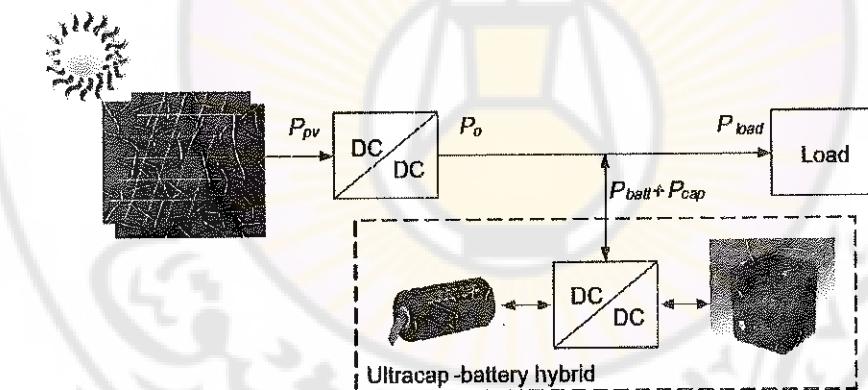
يجري العمل في كثير من الأبحاث على استخدام المكثفات فائقة السعة لتعزيز استطاعته الخرج في المزارع الريحية. حيث تمثل مصدراً لاستطاعتتين الريحية والحقيقة. يوضح

الشكل (27-2) مخطط ربط نظام تخزين بالمكثفات فائقة السعة إلى الباسبار المربوطة  
إليه العنفة الريحية.



الشكل (27-2): مخطط ربط المكثفات فائقة السعة في باسبار العنفات الريحية [13]

وأما في النظم الكهروضوئية حيث تغيرات الاستطاعة المولدة بطبيئة فإن استخدام المكثفات ينحصر بالحفاظ على توفر قسبان تجميع التيار المستمر ثابت (بمساعدة المدخرات الكهربائية) عند وجود أحمال تتطلب استطاعات لحظية كبيرة مثل حالة إقلاع المركبات، يبين الشكل (2-28) مخطط ربط المكثفات فائقة السعة في النظم الكهروضوئية.



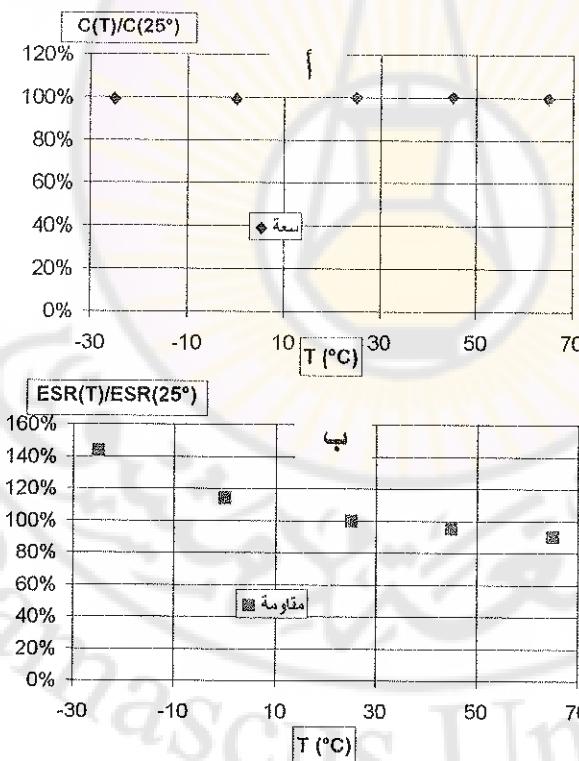
الشكل (2-28): مخطط ربط المكثفات فائقة السعة في النظم الكهروضوئية

## 2-2-8- تأثير درجة الحرارة على محددات المكثفات فائقة السعة

### Temperature Effect on Supercapacitors Parameters

لاتتغير سعة المكثفات فائقة السعة مع تغير درجة الحرارة وذلك يدل على أن قدرة هذه العناصر على اخزنان الطاقة لا تتأثر بتغير درجة الحرارة وحتى لو انخفضت درجة الحرارة مادون الصفر المئوي (انظر الشكل (2-29-أ)). وهذا ما تميّز به هذه العناصر عن المدخرات الكهربائية والتي لا تفرغ إلا جزءاً صغيراً من طاقتها المخزنة في درجات الحرارة السالبة.

تزداد مقاومات هذه العناصر مع انخفاض درجات الحرارة (انظر الشكل (2-29-ب))، وبالتالي هذا الازدياد ينخفض من قيمة القراءة المفرغة من العنصر مما يعني أن مردود الطاقة ينخفض نسبياً مع انخفاض درجة الحرارة.



الشكل (2-29): تغير السعة والمقاومة ESR للمكثف الكهربائي مع تغير درجة الحرارة

[11]

### **الفصل الثالث**

**تخزين الطاقة بال ملفات فائقة الناقبة**

**Superconducting Coils Energy  
Storage**



### ٣- تخزين الطاقة بال ملفات فائقة الناقلية

## Superconducting Coils Energy Storage

إن تخزين الطاقة مغناطيسياً بملفات (بالمغناط) فائقة الناقلية لديه أسماء مختلفة باللغة الانكليزية نذكر منها Superconducting Magnetic Energy Storage ويرمز اختصاراً SMES وهو مستخدم كثيراً وأيضاً Superconducting by Magnetic Energy Storage.

### ١-٣ المبدأ الأساسي للموصلات فائقة الناقلية

#### Basic Principle of Superconductors

تقسم المواد من حيث قدرتها على توصيل الكهرباء إلى عوازل (insulators) مثل الخشب، وأنصاف نوافل (semiconductors) مثل السيليكون، والنواقل (conductors) مثل النحاس، ولكن هناك نوع آخر من المواد الناقلة للكهرباء وهو ما يُعرف باسم الموصلات فائقة الناقلية (superconductors). والموصلات فائقة الناقلية سميت هكذا نظراً لأنها عند درجة حرارة معينة (منخفضة جداً) تصبح مقاومتها لمرور التيار مساوية ل الصفر ، وتصبح قدرتها على الناقلية فائقة جداً. درجة الحرارة المعينة هذه تسمى بدرجة الحرارة الحرجة (critical temperature). كما اكتشف كذلك أن هذه المواد عند درجة الحرارة الحرجة تصبح حساسة جداً للمجال المغناطيسي، حيث تُنْفَرُ الحقل المغناطيسي الخارجي أي أنها تعكس المجال المغناطيسي مهما ضعفت شدته (ظاهرة ميسنر) [15] . هاتان الخاصيتان فتحتا الأبواب أمام العلماء لاستغلالها في ابتكارات واختراعات ذات كفاءة عالية تدخل في معظم مجالات العلوم والتكنولوجيا، حيث أن هذه المواد سوف تحل محل أنصاف الموصلات التي تدخل الآن في صناعة الترانزistor والدورات الإلكترونية المتكاملة.

## 3- ملخص تاريخي عن الموصلات الفائقة

### Resume of Superconductors

قبل عام 1911 كان الاعتقاد السائد أن جميع المواد تصبح فائقة الناقلة للكهرباء فقط عند درجة حرارة الصفر المطلق أي  $0^{\circ}\text{C}$ . ولكن في تلك السنة لوحظ أن الزئبق النقي تصبح مقاومته متساوية للصفر عند درجة حرارة  $4\text{K}$  أي  $-269^{\circ}\text{C}$ . ويمكن الحصول على هذه الدرجات المنخفضة بإسالة غاز الهيليوم. لقد كان هذا الاكتشاف مثيراً لاهتمام الكثير من العلماء لإيجاد تفسير علمي لهذه الظاهرة وخاصة بعد أن وجد أن هناك مواد أخرى لها نفس الخاصية عندما تبرد وهذا ما هو مخالف للاعتقاد السائد آنذاك. إن إسالة غاز الهيليوم مكلف جداً من الناحية المادية، ولذلك كان البحث في هذا المجال محدوداً جداً إلى أن تم التوصل في عام 1986 إلى خليط فائق الناقلة، رمزه الكيميائي هو  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  عند درجة حرارة  $-180^{\circ}\text{C}$ . ويمكن الحصول على هذه الدرجة بإسالة غاز النيتروجين وهذا غير مكلف. ومن هنا بدأت البحوث والتجارب العلمية تنشط لمحاولة فهم هذه الظاهرة وكيفية استغلالها في التطبيقات الصناعية، وكذلك في البحث عن مواد تكون مقاومتها صفراء عند درجات حرارة الغرفة أي  $25^{\circ}\text{C}$ . ومع استمرار البحث تم التوصل إلى نوع من الموصلات الفائقة تسمى بالموصلات الفائقة الأكسيدية تعمل عند درجة حرارة أعلى كثيراً من درجة حرارة النيتروجين السائل. فالنيتروجين السائل يغلي عند درجة الحرارة 77 كلفن، مما يجعل إنتاجه أرخص كثيراً. بل إن سعر اللتر منه أصبح أرخص من سعر لتر الماء! ذلك لأنه موجود طبيعياً بنسبة 79% في الهواء! والتعامل معه أسهل بكثير من الهيليوم السائل الذي يبرد الموصلات الفائقة المعتادة.

### 3-3- بعض التطبيقات الهامة

إن اكتشاف مواد فائقة الناقلة للكهرباء عند درجات حرارة مرتفعة نسبياً سوف يجعلها تدخل في تركيب كل جهاز ممكن تصوره. أول هذه التطبيقات هو الحصول على وسيلة غير مكلفة لنقل التيار الكهربائي بشدة كبيرة، حيث أن التكاليف المادية لنقل

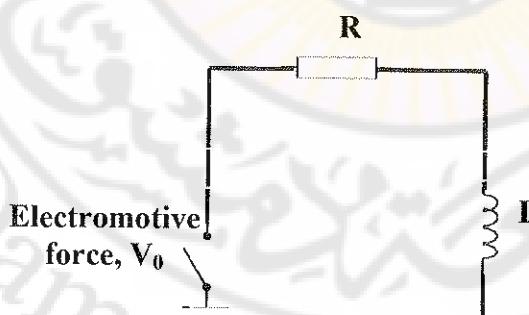
التيار عبر أسلاك النحاس مرتفعة نظراً لفقد الكبير في الطاقة على شكل حرارة متبددة نتيجة مقاومة السلك النحاسي، كذلك إذا ما قارنا قيمة التيار الذي يمكن نقله عبر السلك النحاسي حيث تبلغ شدته 100 أمبير لكل سنتيمتر مربع بينما في السلك المصنوع من مركب الـ  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  تبلغ 100000 أمبير لكل سنتيمتر مربع.

كذلك فإن لهذه المواد تطبيقات عديدة في مجال الإلكترونيات لما تمتاز به من قدرة عالية في فتح وإغلاق الدارات الكهربائية لتمرير التيار ومنعه، وهذا يشكل العنصر الأساسي في بنية الحاسوب والبحث جارٍ الآن لإدخال هذه المواد في صناعة السوبركمبيوتر [15]، وإذا ما توصل إلى ذلك فإن هذا سوف يؤدي إلى نطور كبير في مجال الحاسوب.

### 3-4- مبدأ تخزين الطاقة في الموصلات فائقة النافذية

#### Principle of Energy Storage in Superconductors

الفكرة الأساسية التي اعتمد عليها في تطوير الموصلات فائقة النافذية هي إمكانية تخزين كميات كبيرة من الطاقة في الحقل المغناطيسي. في البداية لنأخذ دارة كهربائية مكونة من مقاومة وملف ( $L$ ,  $R$ ) كدارة بسيطة لفهم مبدأ تخزين الطاقة المغناطيسية في الموصلات فائقة النافذية. كما هو موضح بالشكل (1-3).



الشكل (1-3): دارة  $LR$  مع منبع  $V_0$

حيث:

$R$ : هي المقاومة الكلية للدارة الكهربائية بين المنبع ذي التوتر ( $V_0$ ) والملف المغناطيسي ذي المحارضة الذاتية ( $L$ ). والمقاومة الكلية تتضمن المقاومة الداخلية للمنبع ومقاومة الملف.

عند إغلاق القاطع في الشكل (1-3) تبدأ عملية التخزين حيث يزداد التيار الكهربائي خلال عملية الشحن ويتناقص خلال عملية التفريغ وبالتالي فإن معادلة الحالة العابرة هذه سنكتب بالشكل التالي:

$$i(t) = (V_0 + e_s) / R \quad (1-3)$$

حيث:

$e_s$ : هي القوة الكهربائية المترسبة في الملف (EMF) وقيمتها هي:

$$e_s = -L \cdot di(t) / dt \quad (2-3)$$

بتعويض العلاقة (2-3) في المعادلة (1-3) وباعتبار الشروط الابتدائية: في اللحظة  $t=0$  إن  $i(0)=0$  نجد المعادلة التالية:

$$i(t) + \frac{L}{R} \cdot \frac{di(t)}{dt} = \frac{V_0}{R} \quad (3-3)$$

وهي معادلة تقاضلية من الدرجة الأولى بطرف ثانٍ حلها أسي من الشكل التالي:

$$i(t) = I_{max} \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \quad (4-3)$$

حيث إن قيمة  $I_{max}$  تعطى بالعلاقة  $I_{max}=V_0/R$  والثابت الزمني  $\tau$  يساوي  $\tau = L/R$ . بضرب كل جزء من معادلة الحالة العابرة (انظر المعادلة (3-3)) بالحد  $i(t) \cdot R \cdot dt$  نحصل على معادلة الطاقة التالية [3]:

$$V_0 \cdot i(t) \cdot dt = i^2(t) \cdot R \cdot dt + L \cdot i(t) \cdot di(t) \quad (5-3)$$

dw<sub>s</sub>      dw<sub>r</sub>      dw<sub>m</sub>

الطاقة المقدمة من المنبع الخارجي  $dw_s$  مولفة من جزأين أحدهما  $dw_r$  هي الطاقة الضائعة (مفاقيد جول) والأخرى  $dw_m$  هي الطاقة المخترنة في الحقل المغناطيسي. إن الطاقة المستخدمة لتكوين الحقل المغناطيسي  $dw_m$  يمكن أن تعاد مرة ثانية خلال عملية التفريغ كتيار كهربائي إلى دارة الحمل، وتكون معادلة الطاقة المخترنة في الحقل المغناطيسي بالشكل التالي وذلك بفرض ثبوت  $L$ :

$$W_m = L \int_0^{I_{max}} i(t) \cdot di(t) = 0.5 \cdot L \cdot I_{max}^2 \quad (6-3)$$

ويمكن أن تعطى الطاقة المخترنة بدلالة الحجم المحيط بالملف كما يلي [5]:

$$W_m = 0.5 \cdot L \cdot I_{max}^2 = \int_V \frac{B^2}{2 \cdot \mu_0} \cdot dV = 0.5 \cdot V \cdot B^2 / \mu_0 \quad (7-3)$$

حيث:

$V$ : الحجم الممagnet المحيط بالملف مقدراً بـ  $m^3$ ,

$\mu_0$ : ثابت النفادية المغناطيسية للهواء ويساوي  $4\pi \times 10^{-7}$  Henry/metre

$B$ : التحريض المغناطيسي مقدراً بـ Tesla.

يمكن أن تحسب الكثافة الحجمية للطاقة المخترنة بالعلاقة التالية:

$$W = \frac{I}{2 \cdot \mu_0} \cdot B^2 \quad (8-3)$$

### 3- خصائص الموصلات فائقة الناقلة

#### Superconductors Characteristics

إن كثافة الطاقة الممكن تخزينها في حقل مغناطيسي ذي تحريض  $B = 2\text{Tesla}$  تساوي  $W_m = 2 \times 10^6 \text{J/m}^3$  وهي تقريباً أكبر من الطاقة الموجودة في الحقل الكهربائي الساكن ومع ذلك فإنها لاتزال منخفضة بالمقارنة مع المدخرات. وبما أن المواد الفيرومغناطيسية لاتعطي تحريضاً مغناطيسياً أعلى من  $3\text{Tesla}$  [3]، فلتخزين الطاقة المغناطيسية في الموصلات فائقة الناقلة توضع عادةً في وسط كالهواء أو الفراغ بمعامل نفاذية  $\mu = 1$  لكي نحصل على أعلى قيم  $W_m$  لتيار الملف المعطى  $I$ . من جهة أخرى يجب أن تكون المحارضة الذاتية الكلية لوسط التخزين  $L$  عالية قدر الإمكان عن طريق الإختيار الهندسي الملائم للملف.

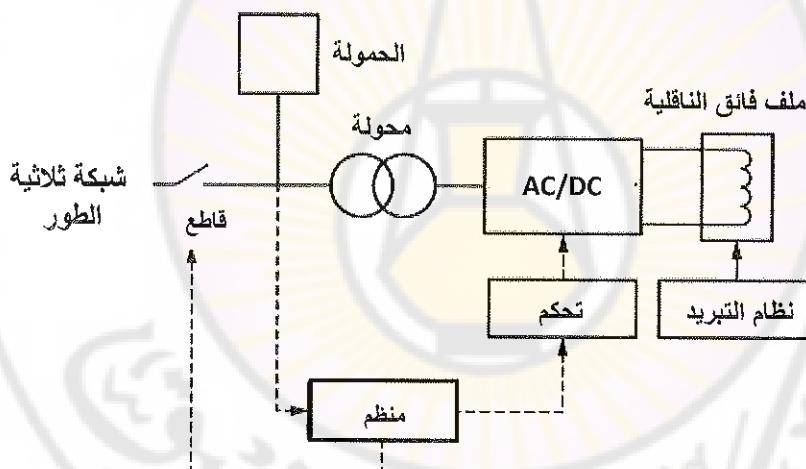
إن الملف فائق الناقلة (الذي هو عبارة عن ملف مقاومته الداخلية مساوية تقريباً للصفر) يمكن أن يربط مع منبع تغذية تيار مستمر وطالما إن تيار الملف يزداد، فإن الحقل المغناطيسي أيضاً يزداد، وكذلك الطاقة الكهربائية الكلية المخزنة في الحقل المغناطيسى. وعندما يصبح التيار أعظمياً فإن التوتر على طرف الوشيعة ينخفض إلى الصفر. في هذه المرحلة يكون الملف مشحوناً بشكلٍ كامل والطاقة في هذه الحالة يمكن أن تخزن لفترة طويلة. وعلى النقيض من ذلك فإن الملف التقليدي المصنوع من موصلات نحاسية بمقاومة معينة يتطلب منبع تغذية مستمر لإستمرار تدفق التيار حتى الشحن الكامل للملف وذلك لتعويض ضياعات جول في مقولته (أي من أجل نفس الطاقة المخزنة إن الملف المصنوع من موصلات عادية يحتاج إلى طاقة شحن أكبر). وكما نعلم إن الموصلات الفائقة تبدي تقريباً مقاومة مهملة لمرور التيار المستمر عند درجات حرارة منخفضة لذلك فإن الحرارة الناتجة عن مفعول جول تكون مهملة، بينما في التطبيقات التي تستخدم التيار المتناوب، يبقى هناك بعض الضياعات الكهربائية.

كل هذه العوامل يجعل الموصلات فائقة الناقلة ذات تطبيقات مجده في نظم القدرة الكهربائية. تصنع تقنيات الموصلات فائقة الناقلة من  $iNbT$  أو  $Nb_3Sn$ . حالياً الموصلات فائقة الناقلة المصنوعة من  $Nb_3Ti$  هي الأكثر استخداماً بسبب سهولة

تصنيعها. وذلك بالرغم من درجة حرارتها الحدية المنخفضة التي تصل حتى  $4K$  إلا أنها ذات تحريض مغناطيسي منخفض يصل في هذه الأعلى إلى  $5\text{Tesla}$  وهذا يعد من النوع القديم، إذ يوجد نوع أكثر حداً في درجات الحرارة الحدية أعلى وتتراوح بين  $30 \div 20K$  كما أن شدة التحريض المغناطيسي تصل حتى  $10\text{Tesla}$  أي كثافة الطاقة الكهربائية هنا أعلى وهذا يستخدم موصلات مصنوعة من  $\text{BaCuO}$  أو  $[\text{5}] \text{ BSCCO}$ .

### 3-6- مبدأ عمل نظم تخزين الطاقة بالملفات فائق الناقالية

إن نظام تخزين الطاقة المغناطيسية بالملفات فائق الناقالية النموذجي يحتوي على أربعة أجزاء: ملف فائق الناقالية، وحدة تبديل القدرة (محولة ومبدل إلكترونيات القدرة)، وجهاز التبريد، ووحدة التحكم كما هو مبين في الشكل (3-2) [5].



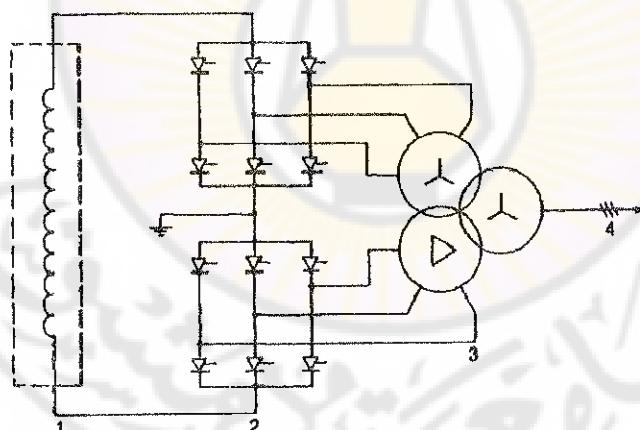
الشكل (3-2): مخطط عام لنظم تخزين الطاقة بالملفات فائق الناقالية المرتبطة إلى الشبكة

إن تشغيل هذا النظام يبدأ من خطوط نقل القدرة حيث يتم تخفيض التوتر المنقول في خطوط نقل القدرة من مئات الكيلوفولتات إلى بضع مئات من الفولتات عن طريق محولة خاضعة للتواتر، ثم يقوم هذا التوتر وبديل إلى توتر مستمر ليحقن في الملف.

عندما تتدفق الاستطاعة إلى الملف، يقوم التوتر المستمر بشحن الملف ذي الناقلة الفائقة وتخزين الطاقة في الملف، وعندما تتطلب شبكة النقل أو الحمل قدرة ما، أي عند حدوث هبوط أو تغيرات أو عدم استقرار في التوتر أو التردد يقوم الملف بتفریغ شحنته ويتصرف على أنه منبع للقدرة. التوتر المستمر يتم تحويله مجدداً إلى توتر متزاوب عن طريق المخرج ويتحقق في الشبكة.

الملفات فائقة الناقلة هي في الحقيقة منبع تيار مستمر متغير، ولربط هذا المنبع إلى نظام قدرة كهربائية متزاوبة ذي توتر ثابت فإنه يتطلب نظام تبديل خاص وهو مكون من مقوم (DC/AC) ومخرج (DC/AC) يستخدمان لتبديل القدرة من مستمرة إلى متزاوبة وبالعكس.

يحتوي الشكل النموذجي لنظام تخزين الطاقة بالملفات فائقة الناقلة على جسر غريش موصولين على التسلسلي (كل جسر يحتوي على ستة ثايرستورات) إلى الملف فائقة الناقلة في الجزء المستمر من الجسر أما الجزء المتزاوب من الجسر فيربط إلى نظام القدرة الكهربائي عن طريق محولة كما هو موضح في الشكل (3-3) [3].



الشكل (3-3): دارة رابط نظام تخزين الطاقة بالملفات فائقة الناقلة إلى نظام القدرة

- الملف فائق الناقلة، 2 - جسر تقويم AC-DC
- محول نجمي-مثلي، 4 - إلى نظام القدرة ثلاثي الطور.

إن المبدل مستهلك للطاقة الرديبة ويعد جزءاً رئيسياً من نظام التحويل "PTS" الم مشروع أعلاه (انظر الفقرة (1-2)). من المميزات الهامة للمبدل هو المردود العالي حيث تقدر الضياعات المنسوبة إلى جسر التبديل مابين 3% إلى 8% من الطاقة الكلية المختزنة.

يتم حساب زاوية التأخير في الطور في تيار الملف المعطى من أجل الحصول على الاستطاعة الفعلية  $P$  والرديبة  $Q$  المطلوبتين. ويجرى هذا الحساب بتفاصيل زمني كل 30 ملي ثانية. عندما تكون زاوية التأخير في الطور أقل من 90 درجة يعمل الجسر كمقوس، ويتصرف كحمل نسبة لنظام القدرة ويستهلك استطاعة ظاهرية  $S=P+jQ$ . أما إذا كانت الزاوية أكبر من 90 درجة، فإن التوتر المتوسط للمبدل يصبح سالباً (الجسر يعمل كعاكس inverter)، والاستطاعة الفعالة  $P$  تتغير إشارتها ويصبح الجسر متبعاً للطاقة بالتوازي مع نظام القدرة.

### 3-7- تطور نظم التخزين بالملفات فائقة الناقلة

إن الطرح الأولى لنظم التخزين ذات الموصلات ذات فائقة الناقلة كانت عام 1969 والتي قام بها العالم Ferrier وقد اقترح بناء ملف حلقي كبير قادر على تخزين وتأمين الطاقة الكهربائية بشكل يومي لفرنسا بأكملها، ولكن اقتراحه هذا قوبل بالرفض بسبب ارتفاع كلفة المشروع المقترن. وفي عام 1971 بدأت الأبحاث في الولايات المتحدة الأمريكية في جامعة ويسكونسن لفهم المبادئ الأساسية والعلاقة بين وحدة تخزين الطاقة وشبكة الكهرباء العامة وذلك عن طريق جسور متعددة، وهذا قاد إلى بناء أول وحدة تخزين ذات موصلات ذات فائقة الناقلة.

من جهة أخرى قامت شركة هيتشاشي ببناء وتجريب نظام تخزين بالملفات فائقة الناقلة باستطاعة 5 ميجا جول في عام 1986، والذي كان موصلاً مع خط التغذية ذي التوتر 6.6 كيلو فولط الواسط للشركة وذلك لتجريب وتنقية عمل النظام ودراسة آثاره على الاستقرار. في عام 1998 تم بناء نظام تخزين باستطاعة 100 كيلو وات في اليابان عن طريق برنامج (International Superconductivity Technology Center) ISTEC [5]. ويمكن الملاحظة الآن أن هذه النظم تتمو بشكل

متسارع وسوف تستخدم في المستقبل القريب لتخزين كميات كبيرة من الطاقة بشكل فعال.

يظهر الشكل (4-3) صورة لملف فائق الناقلية مُصنَّع من قبل شركة GmbH ذي الموصفات التالية [6]:

- الأبعاد الهندسية: ارتفاع D= 600mm, H= 760mm، قطر .Supra LTC NbTi
- المواد المستخدمة: الخصائص الكهربائية: استطاعة 200kW، طاقة 0.5kWh، تيار 1000A، حيث H 4.1H، تحرير مغناطيسي 4.5T



الشكل (4-3): صورة لملف فائق الناقلية

إن هذه النظم ذات مردود عالي لعملية تخزين الطاقة وقد يتجاوز مردودها 97% ويمكن أن يصل عمرها إلى 20-30 سنة وعدد دورات عمل كبير جداً و تستطيع هذه النظم تأمين استطاعة ردية أو حقيقة وتبدو مناسبة جداً للتطبيقات التي تتطلب استطاعات نسبية أعلى من 1MVA [5]. تستخدم هذه النظم لزيادة استقرار شبكات الكهرباء في نظم التوزيع ولتأمين طاقة ذات نوعية ممتازة وخاصة للمصانع التي تتطلب كهرباء ذات جودة عالية، كمعامل تصنيع الإلكترونيات الميكروية. وقد بدأت الأبحاث تتجه حالياً نحو استخدام هذه النظم لتعزيز استطاعة الخرج الناتجة عن المزارع الريحية.

## الفصل الرابع

تخزين الطاقة بالمُدخرات الكهربائية

Electrical <sup>3</sup>Batteries Energy Storage

---

<sup>3</sup> يطلق عليها أحياناً . Accumulators



## ٤- تخزين الطاقة الكهربائية بالمخراط

### الكهربائية

## Electrical Batteries Energy Storage

### ٤-١ نبذة عن التطور التاريخي للمخراط الكهربائية

تعرف المخراط بأنها عنصر كهروكيميائي يعتمد على مبدأ تحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية وبالعكس، وذلك بواسطة تفاعلات الأكسدة والإرجاع Reduction.

لقد شهدت المخراط الكهربائية تطوراً كبيراً عبر التاريخ من حيث البنية والأنواع. ففي العام 1780 لاحظ العالم الإيطالي لوبيجي غالفاني أن سيلان الضفدع المشرحة ترتعش عندما تضرب بشرارة من مصدر كهربائي خارجي. في العام 1791 نشر العالم غالفاني تقريراً حول "الكهرباء الحيوانية" حيث قام بصنع دارة كهربائية تتكون من ساقى الضفدعه ومعدنين مختلفين: ألف وباء، وكل معدن يلامس أحد ساقيه، المتلاصقة، وبالتالي تنتج الدارة ألف - ساق - باء - ألف - ساق - باء ... الخ [14].

بالمصطلاحات الحديثة الضفدعه كانت بمثابة كل من الكهرباء والمعدان بمثابة الأقطاب الكهربائية. وقد لاحظ غالفاني أنه على الرغم من أن الضفدع كان ميتاً، فإن ساقيه ترتعشان عند لمسهما بالمعدان.

في شخصون سنة أدرك فولتا الإيطالي أيضاً أن أنسجة الضفدعه الرطبة يمكن الاستعاضة عنها بورق مقوى مغمور في مياه مالحة، وأن استجابة عضلات الضفدعه يمكن الاستعاضة بشكل آخر من أشكال الكشف الكهربائي.

توأت بطلب الخلية يسمى القوة المحركة الكهربائية (EMF-electromotive force)، وأيما نفس الواحدة للقوتين الكهربائي ووحدة قياسها فولت، تكريماً للعالم فولتا.

في عام 1800 اخترع فولتا المخراط عن طريق وضع العديد من الخلايا الفلطية على الترتيب، بذلك يسمى واحدة فوق الأخرى. هذا الكبس الفولطي أعطى قوة محركة

كهربائية معززه بشكل كبير للمجموعة، مع توتر حوالي 50 فولت لكدس من 32 خلية.

لم يقدر فولتا أن التوتر كان بسبب التفاعلات الكيميائية، بل كان يعتقد أن الخلايا تشكل مصدراً لاينصب للطاقة، وأن الآثار الكيميائية التي ترتبط بها (الصداً على سبيل المثال) كانت مصدر إزعاج فقط، بدلاً من أن تكون نتيجة لأمفر منها لتشغيلها.

كما أظهر مايكل فراداي في عام 1834 أن الأيونات الموجبة الشحنة (cation) (الكاتيون) تتجذب إلى المهبط (cathode)، والأيونات السالبة الشحنة (anion) (الأيون) تتجذب إلى المصعد (anode).

على الرغم من أن المدخرات الأولى كانت ذات قيمة كبيرة لأغراض تجريبية، إلا أن توترها غير ثابت عملياً ولا تستطيع توفير تيار كهربائي كبير وثابت لفترة طويلة.

وفي وقت لاحق بدءاً من خلية دانيال عام 1836 قدمت المدخرات تيارات أكثر موثوقية واعتمدت من قبل الصناعة لاستخدامها في الأجهزة الثابتة، لاسيما في شبكات التلغراف حيث كانت المصدر الوحيد العملي للكهرباء، حيث أن شبكات التوزيع الكهربائية لم تكن موجودة حينئذ. هذه الخلايا الرطبة كانت تستخدم الكهروليت السائل والتي كانت عرضة للتسرب والانسكاب إذا لم يتم التعامل معها بشكل صحيح. كما استخدم الكثيرون أوعية زجاجية لحمل مكوناتها مما جعلها هشة. هذه الخصائص جعلت الخلايا الرطبة غير صالحة للاستخدام في الأجهزة المحمولة.

في نهاية القرن التاسع عشر تم اختراع مدخرات الخلايا الجافة، التي أحلت العجينة محل الكهروليت (الإليكتروليت)، أدت إلى جعل الأجهزة الكهربائية المحمولة عملية. للخص في الجدول (1-4) التالي التسلسل الزمني لاختراع وتطور المدخرات [15].

**الجدول (4-1): التسلسل الزمني لاختراع وتطور المدخرات [15]**

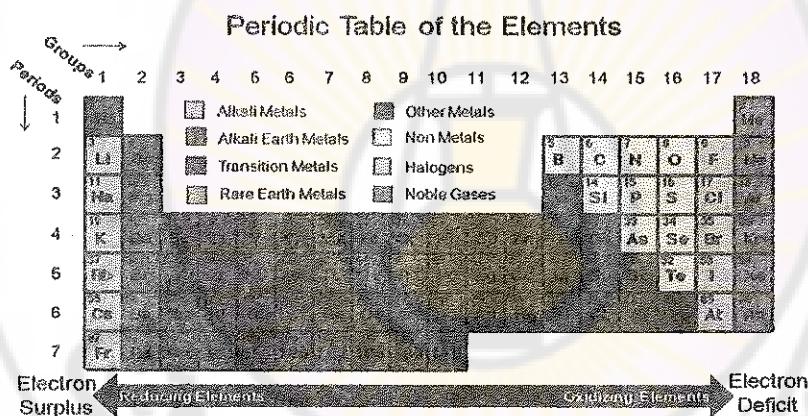
العمل	اسم المخترع	السنة
اكتشاف الكهرباء الحيوية	غالافاني (إيطاليا)	1791
اختراع خلية فولت	فولتا (إيطاليا)	1800
اختراع خلية دانيال	دانييل (إنكلترا)	1836
اختراع خلية الرصاص-حمض	بلانت (فرنسا)	1859
اختراع خلية ليكلاش	ليكلاش (فرنسا)	1868
اختراع مدخرة نكيل كاديوم	جونغر (السويد)	1899
اختراع مدخرة نكيل حديد	أديسون (الولايات المتحدة الأمريكية)	1901
نجاح مدخرة نكيل كاديوم المغلقة	نويمان (فرنسا)	1947
تطوير مدخرة قلوية أولية	شركة Union Carbide (USA)	Mid 1960
تطوير مدخرة الرصاص-حمض ذات الصمام المنتظم	شركة Union Carbide (USA)	Mid 1970
تقديم مدخرة النikel - معدن الهيدروجينية لأول مرة تجاريًا	شركة سانيو (اليابان)	1990
تقديم مدخرة شوارد الليثيوم لأول مرة تجاريًا	شركة سوني (اليابان)	1999

## ٤-٢- كمونات أقطاب المدخرات الكهربائية

### Electrodes Potentials of Batteries

إن التوتر المتولد من الخلية الكهروكيميائية يرتبط بشكل مباشر مع نوعية المواد المستخدمة في صناعة الأقطاب. إنَّ ميل المادة لمنح الإلكترونات أو اكتساب الإلكترونات يتحدد من خلال عدد الإلكترونات الموجود على المدار الخارجي للذرة والذي يعرف بمدار التكافؤ (valence shell). كما أن عدد الإلكترونات في المدار الخارجي يحدد طبيعة المادة كأن تكون قابلة للأكسدة Oxidation (منح الإلكترونات) أو قابلة للإرجاع Reduction (اكتساب الإلكترونات) [16].

يوضح الجدول الدوري للعناصر المبين بالشكل (٤-١) العناصر ذات قابلية الإرجاع، والعناصر ذات قابلية الأكسدة وهي مرتبة ضمن 18 مجموعة، لكل مجموعة نفس عدد الإلكترونات في مدار التكافؤ.



الشكل (٤-١) الترتيب الدوري للعناصر الكيميائية [16]

كما يتم قياس الكمون الكهروكيميائي لكل عنصر من العناصر بالنسبة لقطب الهيدروجين المرجعي وذلك ضمن شروط معيارية من درجة حرارة، وضغط جوي، وتركيز كهربائي. يوضح الجدول (٤-٢) التوترات الكهروكيميائية لعدد من العناصر.

الجدول (4-2) التوترات الكهروكيميائية لبعض العناصر [16]

Cathode (Reduction) Half-Reaction	Standard Potential $E^\circ$ (volts)
$\text{Li}^+ (\text{aq}) + \text{e}^- \rightarrow \text{Li}(\text{s})$	-3.04
$\text{K}^+ (\text{aq}) + \text{e}^- \rightarrow \text{K}(\text{s})$	-2.92
$\text{Ca}^{2+} (\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ca}(\text{s})$	-2.76
$\text{Na}^+ (\text{aq}) + \text{e}^- \rightarrow \text{Na}(\text{s})$	-2.71
$\text{Zn}^{2+} (\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Zn}(\text{s})$	-0.76
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	0
$\text{Cu}^{2+} (\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}(\text{s})$	0.34
$\text{O}_3^+ (\text{g}) + 2\text{H}^+ (\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}_2 (\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l})$	2.07
$\text{F}_2 (\text{g}) + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{F}^- (\text{aq})$	2.87

### 4-3- البنية وآلية الشحن والتفرير

#### Structure and Charge/Discharge Process

من حيث البنية تتكون الخلية (المدخرة) من العناصر الأساسية التالية [16]:

**القطب الموجب (positive electrode):** غالباً ما يكون مصنوعاً من أكسيد المعدن أو الأوكسجين، وهو يعطي الإلكترونات إلى الدارة الخارجية.

**القطب السالب (negative electrode):** يكون مصنوعاً عادةً من المعدن أو من الهيدروجين، وهو يستقبل الإلكترونات من الدارة الخارجية.

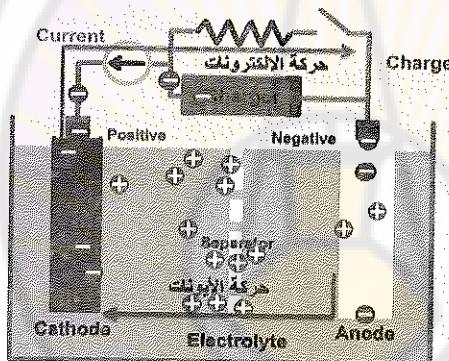
**الكهرليت (electrolyte):** هو الوسط الذي يسمح بانتقال الشوارد (الإيونات) داخلياً بين القطبين.

**العزل الفاصل (separator):** هو عازل كهربائي يسمح بمرور الشوارد من دون الإلكترونات كما في المكثفات فائقة السعة.

**المجمع (collector):** يستخدم لتجمیع التيار على طول القطب السالب والمحبب، يستخدم عادة النحاس لربط المصعد إلى الخارج والألمنيوم لربط المهيبط.

يعتمد مبدأ عمل المدحرة على الحركة الخارجية للإلكترونات عبر المنبع (أو الحمل) وعلى الحركة الداخلية للشوارد (الأيونات) ضمن الكهرباء [16]. حيث يجري شحن الخلية بوصولها إلى منبع تيار مستمر يسمى الشاحن (charger)، حيث يصل القطب<sup>4</sup> الموجب للشاحن للقطب الموجب للمدحرة والقطب السالب للشاحن للقطب السالب للمدحرة.

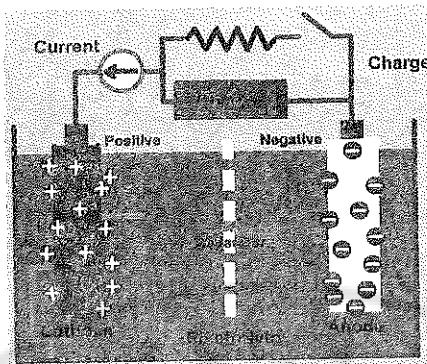
يوضح الشكل (4-2) حركة الشحنات خلال عملية الشحن حيث تنتقل الإلكترونات من القطب الموجب للمدحرة عبر الدارة الخارجية إلى القطب السالب للمدحرة (عكس اتجاه التيار كما هو موضح في الشكل (4-2)) وفي داخل المدحرة تنتقل الشحنات الموجبة من القطب السالب إلى القطب الموجب عبر الكهرباء حتى تمام الشحن.



الشكل (4-2): حركة الشحنات خلال عملية الشحن

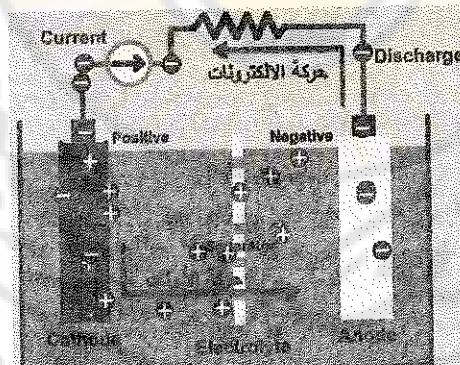
يظهر الشكل (4-3) الشحنات في نهاية عملية الشحن حيث تنتظم الإلكترونات على القطب السالب والشحنات الموجبة على القطب الموجب.

<sup>4</sup> إن المصعد والمهبط هو اصطلاح ويتبدل حسب الحالة شحن أو تفريغ فيصبح المصعد مهبطاً والمهبط مصعداً عند الانتقال من شحن لتفريغ.



الشكل (3-4): انتهاء عملية شحن المدخرة

لتغريب المدخرة يجري فصل دارة الشاحن ووصل حمل (مقاومة تغريب) على أطراف المدخرة. ويبين الشكل (4-4) حركة الشحنات خلال عملية التغريب. عندما تبدأ عملية التغريب تحدث تفاعلات الأكسدة على القطب السالب مما يؤدي إلى فقدان الإلكترونات من هذا القطب. تخرج الإلكترونات الناتجة عن الأكسدة من القطب السالب مروراً بالدائرة الخارجية (حمل المدخرة) وصولاً إلى القطب الموجب وتشارك في تفاعلات الإرجاع عليه، إن حركة الشوارد داخل الكهربائي تكون مكملاً لحركة الإلكترونات ولكن يعتمد في تفاصيله على المواد المكونة للكهربائي والأقطاب وسنوضح هذا لاحقاً (انظر الفقرة (2-1-5-4)).



الشكل (4-4): حركة الشحنات خلال عملية التغريب

#### ٤-٤-٤ طرز المدخرات الكهربائية Types of batteries

يمكن تصنيف المدخرات الكهربائية إلى نوعين أساسيين [16]:

##### ٤-٤-٤-١ حسب الكهرليت

خلايا رطبة (gel): الخلايا الرطبة يكون فيها الكهرليت عبارة عن سائل. وهي خلايا مغمورة حيث أن السائل يغطي جميع الأجزاء الداخلية للخلية. الخلايا الرطبة كانت تمهدأً للخلايا الجافة وقد شاع استخدامها كأدلة للتعلم في الكيمياء الكهربائية وغالباً ما تستخدم في المختبرات لتوضيح كيفية عمل الخلايا الكهروكيميائية. وهناك نوع خاص من الخلايا الرطبة المعروفة باسم خلية التركيز وهي مهمة في فهم عملية التأكل. الخلايا الرطبة قد تكون خلية أولية (غير قابلة لإعادة الشحن) أو خلية ثانوية (قابلة لإعادة الشحن). أصلًا جميع المدخرات الأولية مثل خلية دانيال بنيت على النحو كخلايا رطبة في وعاء زجاجي مفتوح السقف. الخلايا الأولية الرطبة الأخرى هي خلية ليكلانش Leclanché cell، خلية غروف Grove cell، خلية بنسن، خلية حمض الكروم، خلية كلارك وخلية ويستون.

لا تزال الخلايا الرطبة تستخدم في مدخرات السيارات وتؤمن الطاقة في وضع الاستعداد للوحات المفاتيح، أو الاتصالات التلفونية. كما تستخدم خلايا الرصاص الحمضية أو النبيكل -كامديوم في العديد من التطبيقات الشائعة.

خلايا جافة (dry): الخلايا الجافة يكون فيها الكهرليت مثبت كعجينة مع رطوبة كافية في العجينة للسماح بحركة الشحنات وتدفق التيار. مقارنة بالخلايا الرطبة، يمكن تشغيل الخلية في أي وضع كان عمودي أو أفقي أو مائل دون أن ينسكب الكهرليت. وبالتالي فإنها تتمتع بميزة عدم احتوائها على سائل قد يتسرّب أو ينقط خارجاً عندما تقلب أو تستخدم بقسوة، مما يجعلها مناسبة للاستخدام في الأجهزة الكهربائية الصغيرة المحمولة.

وللمقارنة أيضاً فإن الخلايا الأولى الرطبة كانت عبوات زجاجية هشة مع قضبان رصاص، وتحتاج إلى التعامل الحذر لتجنب التسرب، بينما الخلية الجافة لا تتسرّب.

من المدخرات الجافة المشهورة مدخرة الزنك كربون، يستخدم فيها خلية تسمى أحياناً خلية ليكلانش الجافة dry Leclanché cell، مع توتر اسمي 1.5 فولت.

#### 2-4-4 - حسب قابلية الشحن

**خلايا أولية primary cell:** هي خلايا غير قابلة للشحن (unrechargeable) فيها التفاعلات الكهروكيميائية غير عكوسة. خلال التفريغ تستند المكونات الكيميائية الأساسية بشكل متدرج مع تحول الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية حتى النفاد الكامل. ولهذا فإن الخلايا من هذا النوع تستخدم لمرة واحدة.

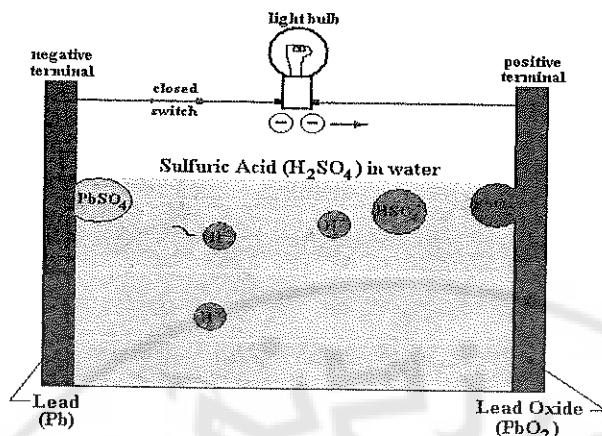
**خلايا ثانية secondary cell:** هي خلايا يمكن إعادة شحنها (rechargeable)، حيث يمكن أن تعكس التفاعلات الكيميائية والمكونات الكيميائية الأساسية فيها، لذا يمكن أن تُعاد إلى حالتها قبل التفريغ تحت تأثير توتر الشحن المطبق على الأقطاب. هذا يؤدي إلى حفظ طاقة إلى الخلية وتخزينها بشكل كيميائي. ومن أهمها مدخرات الرصاص-حمض ونيكل كاديوم ومدخرات النيكل-معدن-هيدروجين ونيكل-زنك ونيكل-هيدروجين ونيكل حديد وشوارد الليثيوم بأنواعها المختلفة.

#### 4-5 - خصائص المدخرات القابلة للشحن

##### 1-5-4 - مدخرات الرصاص - الحامضية Lead - Acid

###### 1-1-5-4 - بنية مدخرات الرصاص - الحامضية

تتألف خلية الرصاص-حمض كما يبين الشكل (4-5) من قطب سالب مصنوع من مادة الرصاص Pb، وقطب موجب مصنوع من ثاني أكسيد الرصاص  $PbO_2$ ، مغمورين في محلول كهربائي هو حمض الكبريت الممدد  $H_2SO_4$ . يتولد بين طرفيها توتر كهربائي يساوي 2V نتيجة تحول التفاعلات الكيميائية إلى طاقة كهربائية [16].



الشكل (4-5): بنية مدخرة الرصاص-حمض [16]

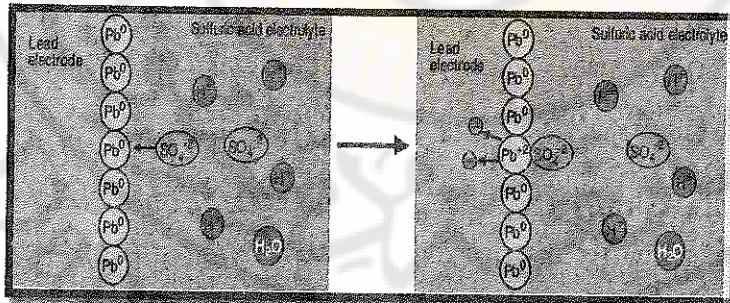
#### 4-1-5-4 -آلية عمل مدخلات الرصاص-حمض

**خلال التفريغ:** توصل المدخرة بحمل ما ليكمل الدارة الخارجية:

**على القطب السالب:** تتفاعل شوارد (أيونات) الكبريت السالبة الموجودة في السائل الكهربائي مع ذرات الرصاص الموجودة على سطح القطب السالب كما في الشكل (4-6)، وينتج عن هذا التفاعل تحول ذرات الرصاص إلى أيونات موجبة وتتصدر كل ذرة رصاص إلكترونيين حسب التفاعل التالي [17]:

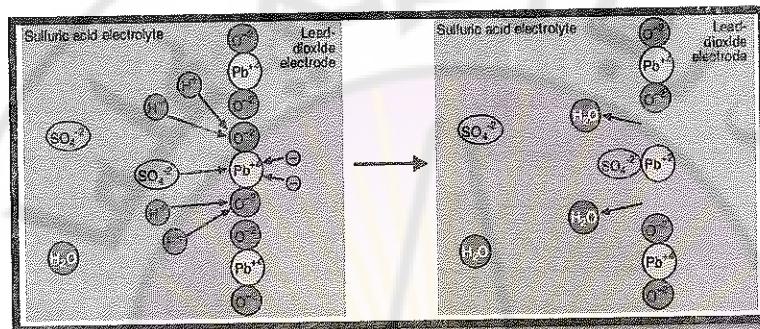


يتجه الإلكترونون المحرران إلى القطب الموجب مروراً بالحمل.



الشكل (4-6): التفاعل الكيميائي على القطب السالب [17]

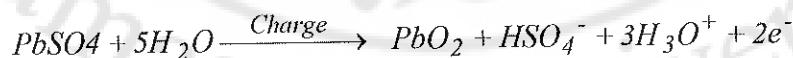
على القطب الموجب: تتفاعل كل من أيونات الكبريت وأيونات الهيدروجين مع أكسيد الرصاص بالإضافة لإناثرنتين القادمين من القطب السالب على هذا القطب كما يبين الشكل (7-4) فينتج اتحاد كيميائي بين أيون الرصاص السالب وأيون الكبريت الموجب بالإضافة إلى تشكيل مول من ذرتى ماء كما في التفاعل التالي [17]:



الشكل (7-4): التفاعل الكيميائي على القطب الموجب [17]

إن أهم عامل في المعادلات السابقة هو الشوارد الحمضية ( $SO_4^{2-}$ ) والتي تنشأ في المحلول عندما تكون المدخلة مشحونة بشكل كامل وينتهي بها المطاف لترسب على كل من القطبين كملح كبريتات الرصاص أثناء التفريغ.

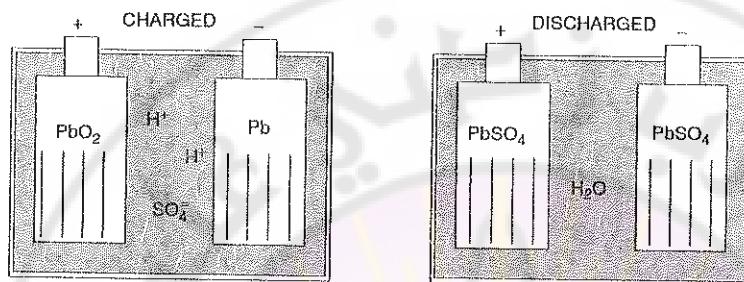
**خلال الشحن:** توصل المدخلة إلى منبع تيار مستمر مع مراعاة القطبية.  
إن التفاعلات الكيميائية التي تجري أثناء عمليات الشحن هي عكس التفاعلات السابقة تماماً. في هذه الحالة القطب الموجب هو الذي يحرر إناثرنتين يتوجهان إلى القطب السالب عبر الدارة الخارجية كما توضح المعادلة التالية:



يستقبل القطب السالب الإناثرنتين كما في المعادلة التالية:



فأثناء الشحن سوف يزال الكبريتات عن الصفائح ويعاود الدخول إلى المحلول كشوارد كبريتية كما يوضح الشكل (4-8).



A lead-acid battery in its charged and discharged states.

#### الشكل (4-8): مدخراً الرصاص-حمض في وضعية الشحن والتفرير

تفقد الخلية قدرتها على توليد التيار الكهربائي بالتدريج نتيجة تحول حمض الكبريت إلى ماء، كما أنه مع تكرار عمليات الشحن والتفرير يبقى بعض كبريتات الرصاص على القطب دون أن تتحل في الكهربان وتتشكل مادة عازلة تغطي الأجزاء الفعالة لجسم القطب وتدعى هذه العملية بالسلفنة وهي السبب الرئيسي لمحدودية عمر المدخرة . [18]

#### 4-1-5-3- خصائص مدخرات الرصاص - الحامضية

إن أهم شيء يحدد عمر المدخرة هو الأقطاب الموجبة التي تعتبر العنصر الأقل كفاءة في المدخرة بسبب سرعة تقادمها. عند تفريغ الخلية تزداد المقاومة الداخلية لها ويهبط توتر المدخرة إلى قيمة دون المستوى المطلوب.

يوجد نوعان من هذه المدخرات هما [19]:

مدخرات الرصاص - الحامضية المختومة (SLA) Sealed Lead Acid ويندرج ضمنها نوعان:

• المدخرات ذات العازل المصنوع من الألياف الماصة (AGM)

.Glass Mat

• المدخرات ذات الكهربايت المصنوع من مادة ذات قوام متamasك Gel.

مدخرات الرصاص - الحامضية السائلة Flooded Lead-Acid

تتميز المدخرات من نوع SLA بسعة تتراوح بين  $(0.2 \div 100) Ah$  و تستعمل في وحدات عدم انقطاع القدرة UPS (uninterruptible power supply) التي تستخدم للحواسيب، وفي وحدات إنارة الطوارئ الصغيرة، وفي الكراسي المتحركة وفي التجهيزات الطبية. أما المدخرات من نوع Flooded فتتميز بسعات تبدأ من 30Ah و تصل حتى عدة kAh حيث تستعمل في التطبيقات الثابتة مثل وحدات عدم انقطاع القدرة المركزية، و مقاسات الهاتف و مراكز التوزيع الكهربائية ... إلخ.

#### 4-1-5-4- استخدام مدخرات الرصاص - الحامضية

تستخدم مدخرات الرصاص-حمض بشكل واسع لاقلاع محركات الاحتراق الداخلي عن طريق محرك التيار المستمر (المقلع stater)، وفي المقاسات الهاتفية، وفي وحدات عدم انقطاع القدرة UPS وفي محطات توليد القدرة الكهربائية حيث تكون مناسبة للتطبيقات التي لا يشكل فيها الوزن أية عائق. كما يجري تطويرها حالياً ليتم استعمالها مستقبلاً في السيارات الهجينة. يوضح الشكل (9-4) صورة لمجموعة كبيرة من المدخرات موصولة مع بعضها.



الشكل (9-4): صورة لمجموعة كبيرة من مدخرات

الرصاص-حمض موصولة مع بعضها

#### **4-5-1-5- ميزات مدخلات الرصاص - حمض**

إن بساطة مدخلات الرصاص-حمض وموثقتها بالإضافة لانخفاض سعرها مقارنة مع الأنواع الأخرى جعلها مناسبة للاستخدام في التطبيقات التي تتطلب استطاعات عالية. كما أنها تتميز بتحملها النسبي لمختلف ظروف التشغيل من حرارة مرتفعة وتيارات شحن أو معدلات تفريغ عالية مما يعني عدم الحاجة لوجود عناصر حماية إضافية، كما تعتبر مدخلات الرصاص - الحامضية بأنواعها المختلفة قليلة التأثر بزيادة عمق التفريغ مقارنة مع مدخلات شوارد الليثيوم، كما يوجد منها أنواع خاصة تستخدم للتطبيقات التي تتطلب عمق تفريغ قد يصل لـ 100% مثل النوع المستخدم في القوارب البحرية.

#### **4-5-1-6- حدود استخدام مدخلات رصاص - حمض**

إن تعرض هذا النوع من المدخلات إلى زيادة الشحن أي توتر زاد (overvoltage) يؤدي إلى توليد فقاعات غازية وبالتالي حدوث تبخّر للماء الأمر الذي يؤدي إلى انخفاض السعة بشكل ملحوظ ويسوء إلى عمل المدخّرة، كما أن انخفاض كثافة طاقتها ونقل وزنها يحد من استخدامها الواسع.

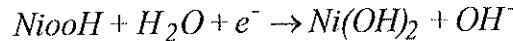
كما إن التفريغ العميق يؤدي إلى تأكل المواد الفعالة للأقطاب ونقصان سعتها مع الزمن، وللحافظة على عمر المدخّرة يجب أن تعمل عند درجة حرارة بحدود 25°C، كما وُجد أن سرعة التفاعلات غير المرغوبة (الطفيلية) ستتضاعف مع زيادة درجة الحرارة بمقدار عشر درجات مما يؤدي إلى تسريع عملية التقادم للمدخّرة [16].

#### **4-5-2- مدخلات النيكل - كادميوم Nickel – Cadmium**

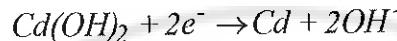
##### **4-5-2-1- بنية مدخلات النيكل - كادميوم**

يشكل هيدروكسيد النيكل القطب الموجب للمدخّرة بينما يشكل الكادميوم القطب السالب، والكهرليت هو هيدروكسيد البوتاسيوم. التوتر الاسمي للخلية الواحدة هو 1.2V.

إن هيدروكسيد البوتاسيوم لا يدخل في التفاعلات على الأقطاب، حيث يجري على القطب الموجب التفاعل التالي [20]:

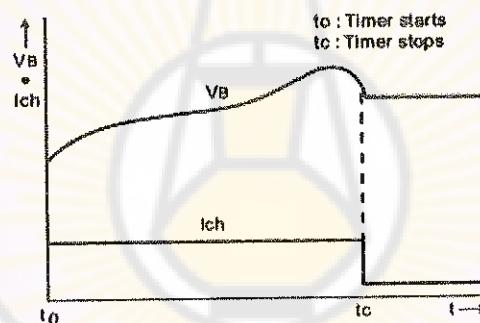


وأما على القطب السالب فيجري التفاعل:



#### 5-2-5-4 - خصائص الشحن لمدخراتnickel - كادميوم

عند شحن الخلية بتيار ثابت فإن توتر الخلية يبدأ بالزيادة التدريجية، ومع الاستمرار في عملية الشحن فإن قيمة التوتر كما يوضح الشكل (4-10) تبدأ بالانخفاض وذلك بسبب زيادة الحرارة الداخلية للخلية وعند هذه النقطة يجب إيقاف عملية الشحن. إن هذا النوع من المدخرات له خاصية فريدة خلال عملية الشحن يتميز بها عن الأنواع الأخرى حيث يبدأ التوتر بالانخفاض بعد وصوله لقيمة معينة [20].

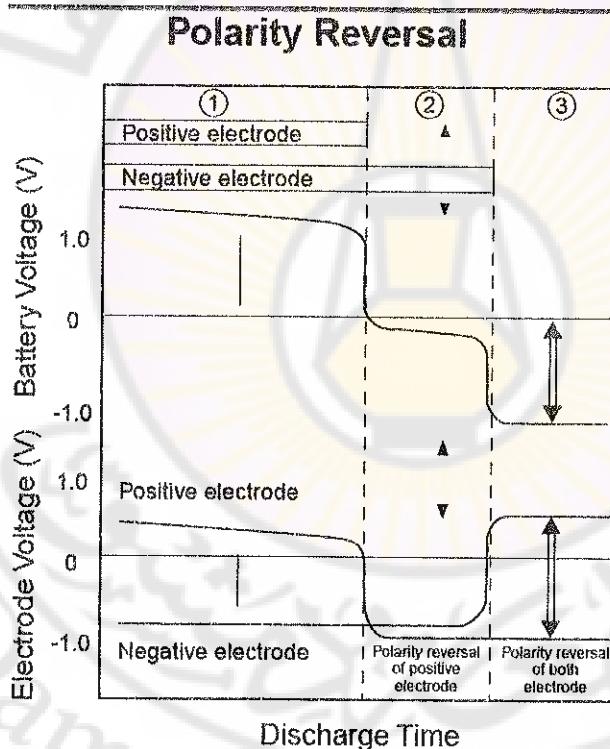


الشكل (4-10): منحني الشحن (توتر وتيار بدلالة الزمن) لخلية نيكيل-كادميوم [20]

#### 5-2-5-4 - خصائص التفريغ لمدخراتnickel - كادميوم

مع ازدياد تيار التفريغ يزداد هبوط التوتر على المقاومة الداخلية مما يؤدي إلى ارتفاع درجة حرارة الخلية وانخفاض السعة المفرغة. حسب المواصفات الفياسية يجب أن لا ينخفض توتر التفريغ لهذا النوع من المدخرات عن  $1.0V/Cell$ . يبين الشكل (4-11) منحني التوتر لخلية نيكيل-كادميوم خلال فترة التفريغ وأيضاً منحني التوتر الهاابط على كل قطب. في المنطقة الأولى وهي حالة تفريغ طبيعي حيث يوجد مواد فعالة على

كلا القطبين الموجب والسلالب للمعاونة في التفاعلات العكوسة، في المنطقة الثانية تكون المواد الفعالة الموجودة على القطب الموجب قد استُنفدت ويبداً القطب الموجب بـ توليد غاز الهيدروجين، حيث يستطيع القطب السالب امتصاص الهيدروجين المتولد في هذه المرحلة وينخفض توتر الخلية إلى ( $-0.4V \div -0.2V$ ). في حال استمرت عملية التفريغ كما توضح المنطقة الثالثة عندها يبدأ القطب السالب بـ توليد غاز الأوكسجين مما يؤدي لزيادة الضغط الداخلي وانعكاس القطبية وتصبح الخلية عرضة للاحتجاج، تكمن خطورة انعكاس القطبية في حالات ربط عدة خلايا على التسلسل بحيث تصبح الخلية ذات السعة الأقل عرضة لانعكاس قطبيتها مما يؤدي لحدوث الأعطال [20].



الشكل (11-4): منحنى التوتر في خلية نikel-كادميوم خلال التفريغ الزائد وانعكاس القطبية [20]

#### ٤-٢-٤-٤- ميزات واستخدامات مدخرات النيكل - كادميوم

لدى هذا النوع من المدخرات الميزات التالية:

- زمن شحن قصير نسبياً.

- تتميز بمنخفضي تفريغ مسطح لكنه يهبط بسرعة عند انتهاء عملية التفريغ.

- العمر الافتراضي حوالي 500 دورة شحن وتفريج.

- طبيعة التفاعل الكيميائي فيها تكون ماصة للحرارة مما يسمح بشحذتها بسرعة.

استخدمت مدخرات النيكل - كادميوم في الأجهزة المحمولة كالهواتف الجوال وجميع التجهيزات الرقمية حتى ظهرت مدخرات النيكل - هيدروجين وبدأت تحل محلها.

#### ٤-٢-٥- حلول استخدام مدخرات نيكل - كادميوم

تعاني مدخرات النيكل - كادميوم من أثر الذاكرة (memory effect) حيث أنه بعد تفريغ المدخرة بشكل جزئي لعدة مرات فإن المدخرة لا تستطيع التفريغ لمستوى أعمق في المرات اللاحقة، وذلك يرجع إلى زيادة حجم البالورات المكونة للمادة الفعالة للأقطاب مما يزيد ممانعتها ويعندها من التفريغ إلى مستوى أعمق كما وأنه يؤدي إلى زيادة التفريغ الذاتي. فيها كثافة الطاقة منخفضة (low specific energy) [20].

#### ٣-٥-٤- مدخرات نيكل - هيدрид المعادن Nickel-Metal Hydride

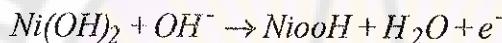
##### ١-٣-٥-٤- مركبات مدخرات نيكل - هيدريد المعادن

لقد أجريت أبحاث واختبارات عديدة حتى تم الوصول إلى مدخرات النيكل - هيدريد المعادن عوضاً عن مدخرات النيكل كادميوم حيث يعتبر الكادميوم من المواد السامة، وتمت صناعة القطب السالب في هذا النوع من المدخرات من خليطة معدنية تحتوي على هيدريد المعادن (Metal Hydride)، وهذه الخليطة هي إما  $AB_5$  أو  $AB_2$  حيث تتألف الخليطة  $AB_2$  من معدين هما التيتانيوم والرزيكونيوم والخليطة  $AB_5$  تتألف من فلزات أرضية نادرة مع (Lanthanum Nickel) وتعتبر الأنواع المعتمدة على الخليطة  $AB_5$  هي المستخدمة بشكل كبير على المستوى التجاري. ويُصنع القطب

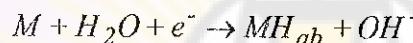
الموجب من مادة النikel كما يكون الكهربايت من نوع هيدروكسيد البوتاسيوم القلوي (Alkaline Potassium Hydroxide) [20].

يستخدم هذا النوع من المدخرات على نطاق واسع في التجهيزات الرقمية من الهواتف الخلوية والكاميرات الرقمية بالإضافة إلى استخدامها في السيارات الهجينة.

4-5-3-2- آلية العمل لمدخرات النikel - هيدريد المعادن  
إن التفاعلات التي تحدث على القطب الموجب في كل من عمليتي الشحن والتفريج موضحة حسب الآتي [20]:  
على القطب الموجب:



والتفاعلات التي تحدث على القطب السالب في كل من عمليتي الشحن والتفريج هي:



التفاعل الكلي على القطب السالب والموجب خلال عمليتي الشحن والتفريج هو:



M:Hydrogen-absorbing alloy ; H<sub>ab</sub>: absorbed hydrogen

4-3-3-5-4- ميزات وعيوب مدخرات نيكيل - هيدريد المعادن

- أثر الذكرة يكون أقل تأثيراً من حالة مدخرات النikel-كادميوم.
- كثافة الاستطاعة فيها أكبر من مدخرات النikel-كادميوم.
- لا تحتوي على مواد سامة (مثل الكادميوم).
- عمر المدحرة ينخفض بشكل كبير عند زيادة عمق التفريج.
- أقل تحملًا من مدخرات النikel كادميوم من جهة تعرضها لاجهاد زيادة الشحن.

- التفاعل الكيميائي لهذا النوع هو ناشر للحرارة مما يجعلها عرضة لارتفاع درجة حرارتها خلال الشحن.
- أفضل أداء للمدخرة عندما تكون نسبة التفريغ  $C(0.5 \div 0.2)$ .
- التفريغ الذاتي أعلى من مدخرات النيكل- كادميوم على الرغم من تجاوز هذا العيب بتعديل المواد المستخدمة في تصنيع الأقطاب.

#### 4-5-4- مدخرات شوارد الليثيوم **Lithium-ion**

##### 4-1-4-5-4- تطور واستخدام مدخرات شوارد الليثيوم

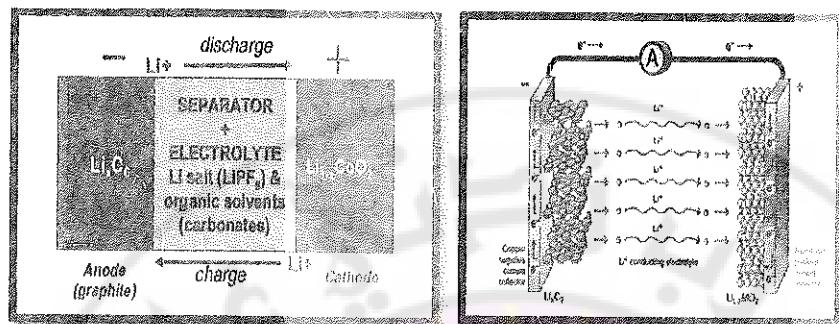
إن أول ظهور لمدخرات شوارد الليثيوم غير القابلة للشحن كان في عام 1970، وبعد هذا التاريخ جرت عدة محاولات لتطويرها وجعلها قابلة للشحن، لكن هذه المحاولات باعت بالفشل وذلك لأسباب تتعلق بالاستقرار الكيميائي لمعدن الليثيوم. في عام 1991 نجحت شركة Sony بطرح خلية شوارد الليثيوم القابلة لإعادة الشحن. يُعتبر الليثيوم من أخف المعادن ويملك أكبر كمون كهروكيميائي بين جميع المعادن إذ أن التوتر الطرفي لكل خلية هو  $3.6V$  أي أكبر بثلاث مرات من مدخرات  $Ni-MH$  و  $Ni-Cd$ . كما أن الخلية الواحدة كثافة استطاعة تتفوق فيها على جميع الأنواع السابقة. ونتيجة الميزات المتعددة لهذا النوع من المدخرات تم استخدامها بشكل كبير في جميع التطبيقات الحديثة وبشكل خاص في السيارات الكهربائية والهجينة، وباعتبار هذا النوع من المدخرات ما زال حديثاً نسبياً فإن تكلفته ما زالت مرتفعة نسبياً أيضاً [20].

تُستخدم مدخرات شوارد الليثيوم بشكل كبير في أجهزة الهواتف الخلوية، الحواسب المحمولة، الأجهزة الطبية بالإضافة إلى استعمالها في السيارات الكهربائية والهجينة، والأقمار الصناعية.

##### 4-4-5-4- مبدأ عمل مدخرات شوارد الليثيوم

تنتقل الأيونات خلال عملية التفريغ من القطب السالب المصنوع من الكربون وتنتشر عبر الكهربايت والغاز المسامي حتى تصل لقطب الموجب المصنوع من الليثيوم

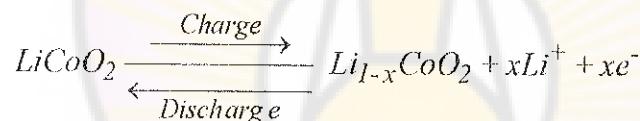
المُشاب، بينما تقوم الإلكترونات المُنبثة من القطب السالب بتشغيل الحمل الخارجي لتصل عبره إلى القطب الموجب كما هو موضح بالشكل (12-4) [21].



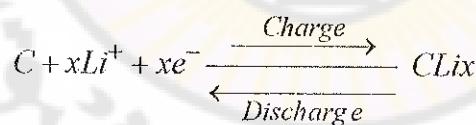
الشكل (4-12): انتقال الشحنات في خلية شوارد الليثيوم [21]

وتبين المعادلات التالية التفاعلات الكيميائية الحاصلة في كل من دوري الشحن والتفریغ [21].

على القطب الموجب يحدث التفاعل التالي:



على القطب السالب يحدث التفاعل التالي:



إن وزن خلية Li-ion هو تقريباً نصف وزن خلية نيكل هيدرید المعادن عند نفس السعة، وحجمها أصغر من حجم خلية NI-MH بـ (20÷30)% وأصغر من خلية Ni-Cd بـ (40÷50)% [16].

في مدخلات شوارد الليثيوم عادةً ما يتم صناعة القطب السالب من الغرافيت أو من الفحم بينما يصنع القطب الموجب من خلائط أكسيد المعادن مع الليثيوم (lithium) كما يبين الجدول (3-4). metal oxides

الجدول (3-4) المواد المستخدمة في إشابة القطب الموجب [22]

الرمز	المادة المستخدمة في إشابة القطب الموجب
LiCoO <sub>2</sub>	Lithium Cobalt Oxide
LiNiO <sub>2</sub>	Lithium Nickel Oxide
LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Lithium Manganese Oxide
LiFePO <sub>4</sub>	Lithium Iron Phosphate

يتم إشابة القطب الموجب بالمواد المذكورة في الجدول (3-4) وذلك لتحقيق مواصفات أفضل وتكلفة أقل حيث يوضح الجدول (4-4) بعض الفروقات بين خصائص هذه الخلائط:

الجدول (4-4) ميزات ومساوي إشابة القطب الموجب [22]

المساوي	الميزات	المادة المستخدمة لإشابة القطب الموجب
كثافة استطاعة منخفضة - دورات شحن أقل من الأنواع المذكورة	قليل التأثير نسبياً بظروف التشغيل القاسية	lithium manganese oxide
نفريغ ذاتي مرتفع نسبياً	الكلفة النسبية منخفضة	Lithium cobalt oxide
غير آمن	سعة كبيرة نسبياً	lithium nickle oxide

### 3-4-5-4- ميزات مدخلات شوارد الليثيوم

- لا تعاني من أثر الذكرة.
- إمكانية الشحن بتيار عالي.
- توفر الخلية الواحدة هو ثلاثة أضعاف التوتر الخلية نيكل - هيدрид المعادن.
- كثافة استطاعة أكبر من الأنواع السابقة.

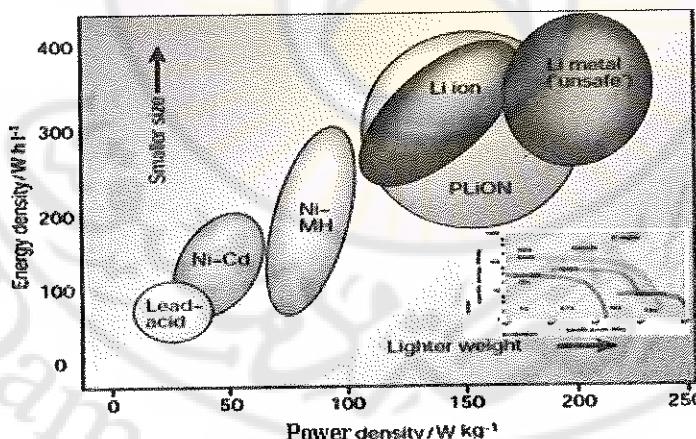
### 4-4-4- حدود استخدام مدخلات شوارد الليثيوم

إن زيادة الشحن أو التفريغ أو درجة الحرارة عن الحدود المسموحة يؤدي إلى إنفاس عمر المدخلة بشكل كبير لذلك يجب دمج تقنيات مراقبة لإيقاف عملية الشحن والتفريغ في الوقت المناسب مما يزيد من الكلفة الكلية.  
ما نزال كلفة هذا النوع من المدخلات عالية نسبياً.

### 5-5-4- مقارنة خصائص المدخلات

#### Comparing of Batteries Characteristics

يُظهر الشكل (13-4) مخطط راغون (Rageon diagram) الذي يبين كثافة الطاقة وكثافة الاستطاعة لكل نوع من أنواع المدخلات.



الشكل (13-4): مخطط راغون لمختلف المدخلات الكهربائية [23]

يظهر من الشكل (4-13) أن مدخلات الليثيوم تتصدر أعلى قيم لكل من كثافة الطاقة وكثافة الاستطاعة، ويُظهر الجدول (4-5) تفاصيل الخصائص لكل نوع من أنواع المدخلات المذكورة. حيث يلاحظ من هذا الجدول أن مدخلات شوارد الليثيوم بأنواعها المختلفة لها توفر أكبر من المدخلات الأخرى كما وتتميز مدخلات شوارد الليثيوم بتقريباً ذاتي منخفض بالإضافة إلى تحقيقها عدد دورات شحن وتقريباً أكبر من الأنواع الأخرى هذا مع إمكانية عملها ضمن مجال حراري واسع كما لا يوجد لهذا النوع من المدخلات أضرار على الصحة أو على البيئة كما في حالة مدخلات المصنعة من النikel أو الرصاص.

**الجدول (5-4) مقارنة بين خصائص بعض المدخلات الكهربائية [16]**

Commercialized batteries المدخلات المسوقة	Lead-acid	Ni-Ca	Ni-M-H	Li-ion
Electrolyte كهروليت	$\text{H}_2\text{SO}_4$	KOH	KOH	$\text{LiPF}_6$
Self Discharge per month تقريباً ذاتي (%)	3-4	10-20	20-30	1-10
Energy efficiency مردود الطاقة (%)	75	60	50	70
Energy density كثافة الطاقة ( $\text{Wh kg}^{-1}$ )	20-35	40-60	60-80	100-200
Power densities كثافة الاستطاعة	Peak (W/kg)	120	300	440
	Sustained (W/kg)	25	140	220
				360

Cycle life (Cycle) دورة الحياة	200- 2000	500-2000	<3000	500-2500
Operating life temperatures درجة حرارة العمل (°C)	-20 to 60	-40 to 60	10 to 50	-20 to 60
Average Energy Cost \$/kWh متوسط تكلفة الطاقة	150	400-800	250	300
Cell Voltage V توتر الخلية	2	1.2	1.2	3.6
Max discharge rate معدل التفريغ الأعظمي	10C	-	20C	40C
Recharge Time Hours زمن الشحن	>10	8	6	<3

#### 4-6- نعريف المحددات الأساسية في المدخرات الكهربائية

#### Definition of Fundamental Parameters of Batteries

- السعة Capacity: كمية الطاقة التي تقدمها المدخرة للحمل عند شروط محددة وتقاس بـ Ah.
- حالة الشحن (SOC) (state of charge): تعبّر عن كمية الشحنات الموجودة في المدخرة، ويعبّر عنها كنسبة مئوية من السعة الكلية.
- عمق التفريغ (DOD) (depth of discharge): كمية الشحنات المأخوذة من المدخرة وتكون كنسبة مئوية من السعة الكلية.
- حالة عمر المدخرة (SOH) (state of health): مؤشر يدل على تقادم وعمر المدخرة مقارنةً مع مدخرة جديدة.
- الطاقة النوعية (specific energy): الطاقة المخزنة في واحدة الكتلة من المدخرة وتقاس بـ Wh/Kg.
- الاستطاعة النوعية (specific power): الاستطاعة المخزنة في واحدة الكتلة من المدخرة وتقاس بـ W/Kg.
- المقاومة الأومية للمدخرة: وتتضمن مقاومة الأقطاب ومجموعات التيار للأقطاب وأسلاك التوصيل.
- المقاومة الكيميائية: وهي مقاومة الكهرباء لحركة الشحنات ضمنه.
- عدد دورات العمل (الحياة) (cycle life): عدد دورات الشحن والتفریغ التي يمكن أن تخضع لها المدخرة وتكون خلالها قادرة على تأمين القدرة اللازمة لتشغيل الحمل.
- معدل التفريغ (C-Rate) (discharging rate): وهي تمثل تيار التفريغ منسوباً لسعة المدخرة الاسمية. فمثلاً مدخراً سعتها 100Ah فإن تفريغها بنسبة 1C يكافئ تفريغها بتيار مساوٍ لـ 100A وتفریغها بتيار 5A يكافئ نسبة تفريغ 0.05C.
- مردود المدخرة (battery efficiency): يُعرف مردود المدخرة على أنه نسبة كمية الطاقة الكهربائية المفرغة من المدخرة عند حالة شحن معينة، إلى كمية

الطاقة اللازم حفتها بالمدخرة حتى الوصول إلى حالة شحن مماثلة لحالة ما قبل التفريغ، ويعطى بالمعادلة التالية [24]:

$$\eta_E = \frac{E_d}{E_C} \quad (1-4)$$

حيث:

$E_d$ : الطاقة الكهربائية المفرغة من المدخرة.

$E_c$ : الطاقة الكهربائية المحقونة في المدخرة.

إن الطاقة الكهربائية المفرغة من المدخرة تعطى بالعلاقة:

$$E_d = \int v_{batt} (-i_{batt}) \cdot dt = V_d \cdot I_d \cdot T_d \quad (2-4)$$

إن الطاقة الكهربائية المحقونة بالمدخرة تعطى بالعلاقة:

$$E_c = \int v_{batt} (i_{batt}) \cdot dt = V_c \cdot I_c \cdot T_c \quad (3-4)$$

حيث:

$V_d$ : توتر التفريغ للمدخرة.

$V_c$ : توتر الشحن للمدخرة.

$I_d$ : تيار التفريغ للمدخرة.

$I_c$ : تيار الشحن للمدخرة.

$T_d$ : زمن التفريغ للمدخرة.

$T_c$ : زمن الشحن للمدخرة.

بعد تعويض قيم  $E_c$  و  $E_d$  في المعادلة أعلاه يكون المردود مساوياً لـ:

$$\eta_E = \left( \frac{V_d}{V_c} \right) \cdot \left( \frac{I_d \cdot T_d}{I_c \cdot T_c} \right) \quad (4-4)$$

يمكن كتابة المعادلة السابقة بالشكل :

$$\eta_E = (\text{Voltage Efficiency}) \cdot (\text{Coulomb Efficiency}) \quad (5-4)$$

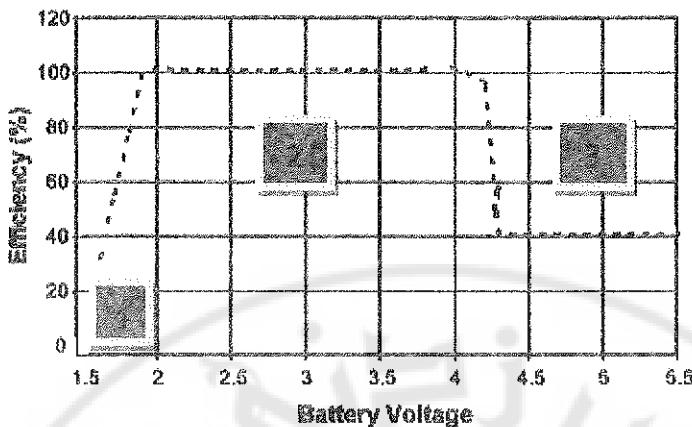
أي أن المردود الكلي هو حاصل جداء حدين:

- الحد الأول: مردود التوتر voltage efficiency: إن مردود التوتر يساوي توتر التفريغ على توتر الشحن، فمثلاً لخلية شوارد الليثيوم يكون توتر التفريغ مساوياً لـ 3.7V، بينما توتر الشحن يكون مساوياً لـ 4.2V وبالتالي يكون المردود الكموني:

$$\text{Voltage Efficiency} = \frac{3.7}{4.2} = 88\%$$

- الحد الثاني: مردود كولومب coulomb efficiency: إن مردود كولومب له قيم متعددة خلال مراحل الشحن كما يبين الشكل (14-4):

  - المرحلة الأولى: في هذه المرحلة يكون المردود منخفض وذلك لأن الطاقة الكهربائية المقدمة للمدخلة تصرف من أجل تحفيز بدء التفاعلات الكيميائية.
  - المرحلة الثانية: في هذه المرحلة يكون المردود أعلى ما يمكن وكل الطاقة الكهربائية المقدمة للمدخلة تتحول إلى شحنات مختزنة ضمنها.
  - المرحلة الثالثة: تمثل هذه المرحلة زيادة الشحن حيث تصرف الطاقة المقدمة للمدخلة على تفكك الروابط الكيميائية في الكهربيليت بدون زيادة للشحنات المختزنة ضمن المدخلة. ويكون المردود في هذه المرحلة منخفضاً أيضاً. بشكل عام تعطى قيمة وسطية لمردود كولومب لخلية شوارد الليثيوم حوالي 90% [25].



الشكل (14-4): مردود كولومب خلال مراحل عملية الشحن [25]

ويكون المردود الكلي لخلية شوارد الليثيوم:

$$\eta_E = 88\% \times 90\% = 79.2\%$$

يتنااسب المردود بشكل عكسي مع حالة الشحن ومع نسبة تيار الشحن وهي عوامل يجب أخذها في الحسبان عند تحديد سعات المدخرات المستخدمة ولاسيما في النظم الكهروضوئية (Photovoltaic) [26].

#### 4-7-4 - طرائق ودارات شحن وتفریغ المدخرات الكهربائية

#### Batteries Charging-Discharging Methods and Circuits

إن الطريقة المثلثي في شحن المدخرة هي التي تأخذ بالحسبان الطبيعة الخاصة للمدخرة الكهربائية، أي أن تُشحن المدخرة بمعدل يناسب طبيعتها الكهروكيميائية وأن يتوقف هذا الشحن عند الإشباع للتفاعلات الكهروكيميائية.

يوجد ثالث عمليات أساسية في عملية التحول الكيميائي للمواد الفعالة في المدخرة

: [27]

- انتقال الشحنة (charge transfer) وهي التفاعل الكيميائي الفعلي الذي يحدث

على الحد الفاصل بين القطب والكهربait و هو نسبياً سريعاً.

- نقل وانتشار الكلمة (mass transport-diffusion) وفي هذه العملية المادة المتفاعلة في العملية الأولى تتحرك من وإلى سطح القطب. وهي عملية بطئية وتأخذ بعض الوقت حتى كامل المادة الفعالة تحول.

- دخول وولوج الايونات (intercalation process) إلى الشبكة البلورية في القطب كما في مدخرات شوارد الليثيوم.

#### 4-7-1 - طرائق شحن المدخرات

يوجد عدة طرائق لشحن المدخرات منها [16]:

##### 4-7-1-1 - الشحن بتوتر ثابت Constant Voltage Charging

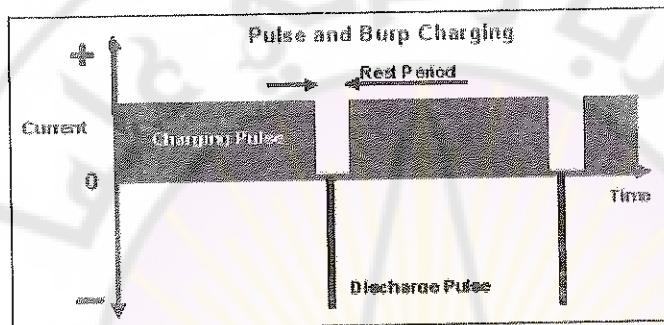
إنها من أبسط الطرائق والتي تستخدم منبع توتر ثابت متحكم به. وهي طريقة مستخدمة بكثرة مع مدخرات الرصاص-حمض كما في السيارات ولكن في مدخرات شوارد-اللithium تحتاج إلى الكثير من العناية حيث تحتاج إلى دارات حماية من التوترات الزائدة (overvoltage).

##### 4-7-1-2 - الشحن بتيار ثابت Constant Current Charging

في هذه الطريقة يتم شحن المدخرة بتيار ثابت وعند وصول توتر المدخرة إلى القيمة النهائية يتم إيقاف عملية الشحن وهي طريقة شائعة ومستخدمة بكثرة.

#### 3-1-7-4 الشحن النبضي Pulsed Charge

في هذا النوع من الشحن يتم تطبيق التيار على المدخلة على شكل نبضات مما يعطينا إمكانية التحكم بعملية الشحن وذلك من خلال التحكم بعرض النبضة والتي عادةً ما تكون حوالي 1Second، ويخلل عملية الشحن فترات استراحة بمقدار (20÷30)mSec كفاسد زمني بين نبضات الشحن كما هو موضح بالشكل [16] (15-4).



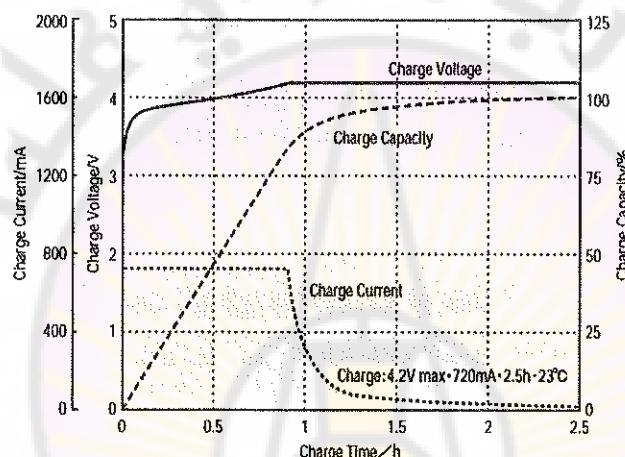
الشكل (15-4): منحني التيار خلال الشحن النبضي [16]

إن فترة الاستراحة تقوم بتنقيل التفاعلات الكيميائية غير المرغوب بها ضمن المدخلة (حدوث غازات أو تشكيل بلورات على الأقطاب) كما وتؤدي إلى حدوث تطابق بين التفاعلات الكيميائية داخل المدخلة من جهة، وبين الشحنات الكهربائية المقدمة من الشاحن من جهة أخرى. كما يتم في بعض الأحيان تطبيق نبضات شحن سالبة لمدة 5mSec بمطال من 2-3 مرات من تيار الشحن وذلك لإزالة الفقاعات التي تتكون على الأقطاب نتيجة عمليات الشحن كما تؤدي إلى الاستقرار في عمليات الشحن.

#### 4-1-7-4 الشحن بتيار ثابت وتواتر ثابت

في هذه الطريقة يتم شحن المدخلة في البداية بتيار ثابت كما في الشكل (4-16) حتى يصل تواتر المدخلة إلى قيمة محددة مسبقاً وفي نهاية هذه المرحلة تكون المدخلة قد شُحنت بـ 70% من سعتها، بعدها يتم شحن المدخلة بتواتر ثابت وينخفض التيار المار

ضمن المدخرة، وعند وصوله إلى قيمة محددة مسبقاً وعادة تكون 10% من قيمة التيار الأسماي يتم إنهاء عملية الشحن. على الرغم من أنه في هذه المرحلة يتم شحن 30% المتبقية من السعة إلا أنها تأخذ وقتاً أطول من المرحلة السابقة. بهذه الطريقة تكون قد ضمننا التعادل الكهربائي والتوازن الكيميائي بشكل متساوٍ بين جميع الخلايا في المدخرة. إن التوترات والتيارات الحدية تكون محددة مسبقاً حيث تعتمد على نوع المدخرة، فمثلاً في مدخلات الرصاص-حمض يحدد توتر نهاية المرحلة الأولى بحيث يكون أقل من توتر حدوث الغازات (14.4 V للمدخلات ذات ست خلايا) [16].



الشكل (16-4): منحنيات التوتر والتيار والسعبة في عملية الشحن بتيار ثابت - توتر ثابت [29]

#### Float Charge الشحن العائم 4-7-1-5

في هذا النوع من الشحن يقوم الشاحن بإعطاء المدخرة تيار شحن صغير ( $0.03 \div 0.05 C$ ) بحيث يقوم بتعويضها عن فقدان الشحنة الناتج عن التفريغ الذاتي كما أن طريقة الشحن بالتنقيط قد تكون المرحلة الأخيرة من شاحن متعدد المراحل بحيث تبقى المدخرة على اتصال دائم بالشاحن وهو بدوره يزودها بتيار حدي يحول دون اجهادها أو رفع درجة حرارتها مع محافظتها على سعتها ثابتة [16].

## 2-7-4- معدلات الشحن Charging Rates

يمكن شحن المدخرات بمعدلات مختلفة حسب التطبيق وال الحاجة. وبشكل عام يمكن تصنيف معدلات الشحن إلى [16]:

- **الشحن البطيء Slow Charge:** يتم الشحن بنسبة  $0.1C$ .
- **الشحن السريع Quick Charge:** يتم الشحن بنسبة  $0.3C$  ويتم إنتهاء الشحن عبر مؤقت زمني.
- **الشحن السريع جداً Fast Charge:** يتم الشحن بتيار ثابت وبقيمة متساوية  $-1C$ ، هذا يعني أن المدخلة المفرغة بالكامل ستتشحن خلال ساعة واحدة تقريباً وأحياناً يتم شحن المدخلة بنسبة  $4C$  أي مدة الشحن ستكون نظرياً بحدود 15 دقيقة فقط، إلا أن هذه الطرائق لا تعطي شحناً كاملاً للمدخلة كما يجب أن يجهز الشاحن في هذه الحالة بحساسات لارتفاع التوتر ودرجة الحرارة وذلك لإنتهاء دورة الشحن.

## 3-7-4- أخطار زيادة الشحن Risk of Overcharging

يجب بشكل عام تجنب عدة نقاط عند عمل المدخلة من أهمها [16]:

- توتر زائد (overvoltage) ويطلق عليه أيضاً الشحن الزائد (overcharging)، أي شحن المدخلة بتوتر أعلى من التوتر المسموح به ولمدة طويلة.
- تسخين زائد (overheating) تزيد فيه درجة حرارة العنصر عن الحدود الموضوعة من قبل المصنع وهذا يمكن أن ينتج عن تيارات عالية و/أو درجة حرارة وسط محيط عالية.
- تيار زائد خلال الشحن أو التفريغ. إن التيارات الزائدة تؤدي إلى درجات حرارة عالية.
- درجة حرارة وسط محيط عالية.
- قصر طرفي المدخلة والذي يؤدي إلى تيارات زائدة.

- تفريغ المدخرة إلى مستويات منخفضة، أي إلى عمق تفريغ DOD تحت القيمة الحدية.

#### - ضغوط داخلية عالية.

إن زيادة شحن المدخرة (أو تسخين زائد) يؤدي إلى حدوث تفاعلات كيميائية غير عكوسة ينتج عنها اتلاف للمدخرة والسبب في ذلك هو إيجار المدخرة على تلقي طاقة كهربائية زائدة تؤدي إلى انهيار المواد الكيميائية المشكّلة لبنيّة أقطاب المدخرة وتصبح غير قادرة على أداء التفاعلات الكيميائية العكوسة المطلوبة منها. كما أن زيادة الشحن تؤدي إلى زيادة درجة الحرارة والضغط الداخلي مما يؤدي إلى حدوث انفصال للمدخرة (أو للخلايا الداخلية المكونة لها) أو حدوث دارة قصر بين الأقطاب وعندها يجب إنهاء عملية الشحن كي تتجنب حدوث انفجار في المدخرة وإطلاقها أبخرة وغازات قد تكون سامة. لذلك لابد أن يجري دائمًا مراقبة توتر درجة المدخرة خلال الشحن والتفرغ [16].

#### 4-7-4- الطرائق المتّبعة لإنهاء عملية الشحن

##### Charge Termination Methods

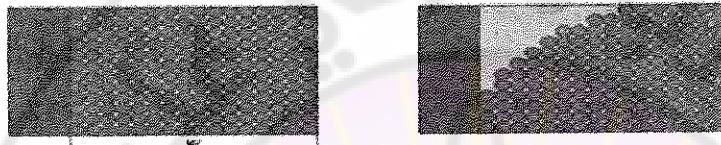
كل نوع من المدخرات ولكل خوارزمية شحن طريقة مناسبة خاصة بها لإنهاء عملية الشحن، من هذه الطرائق [16] :

- إنهاء عملية الشحن باستخدام مؤقت زمني.
- إنهاء عملية الشحن عند وصول درجة الحرارة لحدود معينة.
- إنهاء عملية الشحن عندما يصبح الفرق بين حرارة الوسط المحيط وحرارة المدخرة متساوية لقيمة محددة مسبقاً.
- إنهاء عملية الشحن عند ازدياد معدل تغير درجة الحرارة بالنسبة للتغيير الزمني  $\Delta T/\Delta t$  عن قيمة محددة مسبقاً.
- إنهاء عملية الشحن عند وصول التوتر لقيمة عظمى محددة مسبقاً.
- إنهاء عملية الشحن عند انخفاض التيار إلى قيمة محددة مسبقاً.

#### ٤-٧-٥- طرائق تفريغ المدخلات

عندما تكون المدخلة بحالة دارة مفتوحة فإن تركيز المواد الفعالة (active species) على الحد الفاصل بين سطح القطب والكهرليت يكون منتظمًا كما يوضح الشكل (4-17a). وعندما يتم استجرار تيار فإن المواد الفعالة على الحد الفاصل بين اللبوس والكهرليت تصرف (تستهلك) بواسطة تفاعل كيميائي ويحل مكانها مواد فعالة تتحرك من مكان أبعد وتتجه إلى جوار سطح القطب عبر ما يسمى بعملية الانتشار [30].

■ Electrode ■ Electrolyte ■ Electro-Active-Species



- a -

- b -

الشكل (4-17): تركيز المواد الفعالة بجوار القطب [30]

a - توزيع منتظم للمواد الفعالة على كامل مساحة القطب،

b - توزيع غير منتظم للمواد الفعالة على مساحة القطب.

في حال زاد استجرار التيار إلى قيم أكبر يظهر أثر القطبية (polarization effect) ويصبح معدل الانتشار للمواد الفعالة عبر الكهرليت غير متزامن مع معدل استهلاك التيار من المدخلة وتصبح المساحة المشتركة بين سطح اللبوس والكهرليت أصغرية كما في الشكل (4-17b) وينخفض توتر المدخلة إلى توتر العتبة ويتدخل نظام إدارة التفريغ لفصل المدخلة وذلك على الرغم من توافر شحنة متبقية بالمدخلة لكنها موزعة ضمن كامل الكهرليت وليس بجوار القطب من هنا نستنتج طريقتين للتفريغ [30]:

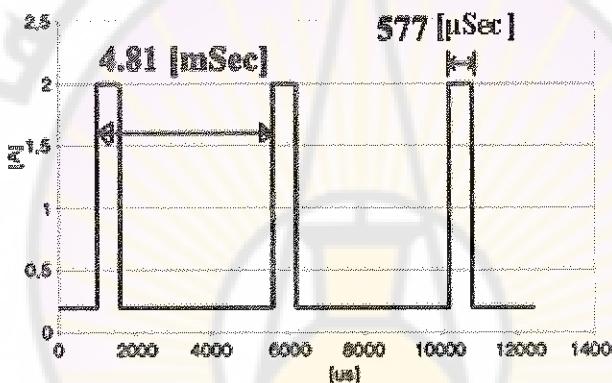
#### ٤-٥-٧-١- التفريغ المستمر بتيار ثابت

ويتم تغذية الحمل بتيار ثابت ومستمر حتى تصل المدخلة للتوتر الحدي للفصل (Cut-off Voltage) وهذا التفريغ يستخدم على سبيل المثال في التجهيزات التماضية.

#### 4-7-5-2- التفريغ النبضي

يتم في هذه الطريقة التفريغ على شكل نبضات (On-Off) وخلال فترة الراحة بين نبضتي تفريغ متتاليتين، فإن عمليات الانتشار الحاصلة تزيد من تركيز الكهرباء بجوار الأقطاب وهذا ما يسمى بتأثير الاستعادة (recovery effect) وفيها تظهر المدخرة وكأنها اكتسبت شحنة زادت من سعتها [30].

يستخدم التفريغ النبضي في كثير من التطبيقات منها نظام (Global System (GSM Mobile) حيث يتم إعطاء نبضات لها دور متساوي لـ  $4.81\text{ms}$  بعرض  $577\mu\text{s}$  للنبضة الواحدة ومطال التيار حوالي  $2\text{A}$  في فترة العمل و  $0.2\text{A}$  في فترة الاستراحة كما يبين الشكل (4-18) [27].



الشكل (4-18): منحني تيار التفريغ النبضي في نظام GSM [27]

يمتاز التفريغ النبضي بما يلي:

- تستطيع المدخرة تقديم تيار تفريغ نبضي أكبر منه في حالة التفريغ بتيار ثابت.
- تزداد السعة ويزداد معها عمر المدخرة لأنها في هذه الحالة تكون قد ابتعدت عن حالات زيادة التفريغ.

#### 4-7-6- دارات شحن المدخرات Charger

كل نوع من المدخرات له دارة شحن خاصة به وبمواصفات محددة حيث إن استعمال الدارة المناسبة للمدخرة يجعل عملية الشحن مثالية ويزيد من عمر المدخرة. كما أنه

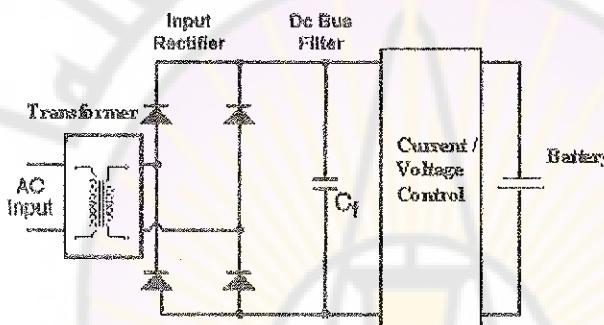
يوجد عدد من طرائق الشحن المستخدمة لشحن المدخرات، تختلف هذه الطرائق عن بعضها بالتكلفة وبالسعة المسترجعة للمدخرة.

#### 4-7-1- بنية دارة الشحن

تتألف دارة شحن المدخرة بشكلها البسيط كما يوضح الشكل (4-19) من ثلاثة

مراحل:

- مرحلة خفض التوتر من توتر الشبكة إلى توتر يناسب توتر الشحن.
- مرحلة تقويم التوتر من توتر متناوب إلى توتر مستمر.
- مرحلة التحكم بالتيار والتوتر لتنفيذ خوارزمية الشحن.

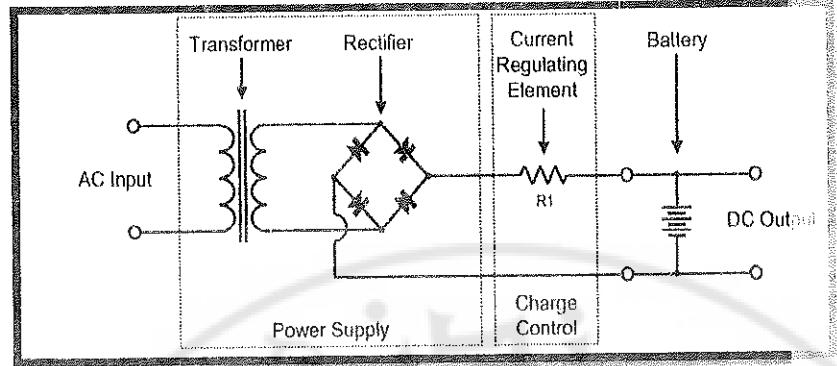


الشكل (4-19): المخطط العام لدارة شحن المدخرات الكهربائية

يوجد لشواحن المدخرات عدة أنواع منها:

#### 4-7-2- الشواحن الخطية Linear Charger

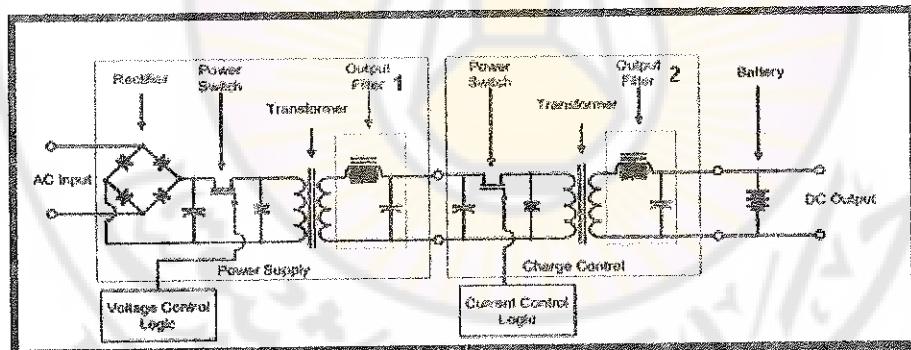
تتألف كما يبين الشكل (4-20) من محولة خاضصة للتوتر وجسر تقويم حيث تتم عملية التنظيم عبر عنصر غير فعال (مقاومة) لتحديد التيار المار في المدخرة كما يمكن استعمال عنصر فعال (ترانزستور) ل القيام بنفس المهمة [28].



الشكل (4-20): مخطط عام شاحن خطى للمدخرة [28]

#### 4-3-6-7-4 الشواحن ذات نمط التقطيع Charger with Chopper

يتم فيها التحكم بكل من التوتر والتيار عن طريق المقطعات (chopper) كما يبين الشكل (4-21) حيث تستخدم هذه الشواحن في التطبيقات المحمولة كالحواسب الشخصية والمساعدات الرقمية وتكلفتها المرتفعة تحول دون استخدامها للاستطاعات العالية [28].



الشكل (4-21): بنية الشاحن ذو نمط التقطيع [28]

تتعرض المدخلات خلال عملها في مختلف التطبيقات إلى ظروف تشغيل متعددة تؤثر على أدائها وعمرها. إن معرفة هذه الظروف ودراسة تأثيرها السلبي والعمل على تجنبها يسهم في رفع كفاءة وأداء المدخرة وإطالة عمرها.

### مسائل محلولة:

مسألة (1): يتم تغذية حافلة كهربائية من مدخراً كهربائياً سعتها 300Ah وتوترها U=12V (مدخراً رصاصـحمض) باعتبار أنَّ السعة لا تتغير مع تغير التيار والمطلوب ماليٍ:

- 1- احسب قيمة التيار اللازم لتفرير هذه المدخراً بزمن 8h.
- 2- ما هو الزمن اللازم لتفرير هذه المدخراً بتيار 10A.
- 3- إذا علمت أنَّ المدخراً يمكن تفريغها إلى التوتر  $U_{min}=9.6V$  احسب قيمة سعتها بالفاراد (السعوية المكافئة للمدخراً)  $C_{bulk}$ .

### الحل

1- يمكن حساب التيار من العلاقة التالية:

$$I_{dch} = \frac{C_{Ah}}{t(h)} = \frac{300}{8} = 37.5A$$

2- يحسب الزمن كماليٍ:

$$t(h) = \frac{C_{Ah}}{I_{dch}} = \frac{300}{10} = 30h$$

3- يوجد علاقتان لحساب الطاقة المختبرة في المدخراً هما:

$$W = \frac{1}{2} \cdot C_{bulk} \cdot (U^2 - U_{min}^2)$$

$$W = C_{Ah} \cdot U \times 3600$$

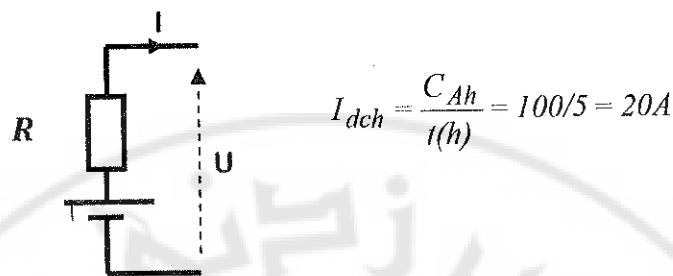
بمساواة العلقتين نجد قيمة السعوية المكافئة للمدخراً  $C_{bulk}(F)$  تساوي ماليٍ:

$$C_{bulk} = 2 \times C_{Ah} \cdot U \times \frac{3600}{U^2 - U_{min}^2} = 500kF$$

مسألة (2): مدخراً نيكل كاديوم توترها U=12.5V وسعتها 100Ah وذلك عندما يتم تفريغها بزمن قدره 5h والمطلوب احسب التوتر على أطراف هذه المدخراً عندما يجري تفريغها بتيار قدره 50A علماً أنَّ توتر الدارة المفتوحة  $V_{oc}=13V$ .

### الحل

باعتبار دارة ثيفينين المبسطة وهي أبسط الدارات المكافئة للمدخرة الكهربائية والمولفة من مقاومة  $R$  على التسلسل مع توتر الدارة المفتوحة  $V_{oc}$ .



وبحسب كيرشوف يمكن أن نكتب العلاقة التالية:

$$U = V_{oc} - I \cdot R$$

ومنه نجد:

$$R = \frac{V_{oc} - U}{I} = \frac{13 - 12.5}{20} = 0.025\Omega$$

بإهمال تغير سعة المدخرة مع تيار التفريغ وتعويض التيار بقيمه 50A نجد مايلي:

$$U = V_{oc} - I \cdot R = 13 - 50 \times 0.025 = 11.75V$$

**مسألة (3):** يراد تغذية ملف بتيار 300mA خلال زمن قدره 100h باستخدام مدخرة كهربائية، فإذا علمت أن مقاومة الملف تساوي  $R=20\Omega$  والمطلوب مايلي:

1-حساب عدد الخلايا اللازم وضعها من خلية  $U_{cell}=1.5V$  وكيف يمكن وصلها للأداء المطلوب.

2-إذا كان الزمن اللازم للتغذية الملف هو 250h ما هو العدد اللازم استخدامه وكيف يجب وصل هذه الخلايا، مع العلم بأن سعة كل خلية هي 30Ah.

الحل:

1-سعة كل خلية هو 30Ah وتوترها 1.5V

تيار الخلية الواحدة هو:

$$I_{cell} = \frac{C_{cell}}{t} = \frac{30Ah}{100h} = 0.3A$$

توتر وتيار الموديول يحسب كمائي:

$$U = R \cdot I = 20 \times 0.3 = 6V$$

وبالتالي عدد الخلايا التي يجب وصلها على التسلسل للحصول على التوتر المطلوب

هو:

$$n_s = \frac{U}{U_{cell}} = \frac{6}{1.5} = 4 \text{ cells}$$

ولالحتاج أكثر من كُس واحد لأن تيار الموديول يساوي تيار الخلية.

ويمكن حساب سعة الموديول مباشرة من الحمل من العلاقة التالية:

$$C = I \cdot t = 300 \times 10^{-3} \times 100 = 30Ah$$

وبالتالي سعة الموديول تساوي الخلية.

2- تيار الخلية الواحدة يمكن أن يحسب من العلاقة التالية:

$$I_{cell} = \frac{C}{t} = \frac{30Ah}{250h} = 0.12A$$

وبالتالي عدد الخلايا الازمة على التفرع هو:

$$n_p = \frac{I}{I_{cell}} = \frac{0.3}{0.12} = 2.5 \text{ branches}$$

وبالتقريب لابد من وصل 3 أكُس على التفرع وكل كُس يحتوي على 4 خلايا،

وعندما يكون عدد الخلايا الازمة هو 12 خلية.

ويمكن حساب سعة الموديول مباشرة من الحمل من العلاقة التالية:

$$C = I \cdot t = 300 \times 10^{-3} \times 250 = 75Ah$$

$$n_p = \frac{C}{C_{cell}} = \frac{75}{30} = 2.5 \text{ branches} \Rightarrow n_p = 3 \text{ branches}$$

ومنه نجد عدد الخلايا الازمة:

$$n = n_s \cdot n_p = 3 \times 4 = 12 \text{ cells}$$

#### ٤-٨- أثر تيار التفريغ على السعة

#### Impact of Discharging Current on Capacitance

من ضمن العلاقات غير الخطية التي تميز بها المدخرات العلاقة بين السعة المفرغة وتيار التفريغ، فعلى سبيل المثال عند تفريغ مذكرة الرصاص-حمض بمعدل تفريغ 0.05C فإن السعة المفرغة تساوي جداء تيار التفريغ بزمن التفريغ كما تبين العلاقة التالية:

$$0.05C \times 20h = 100\% \text{ Capacity}$$

أما عند التفريغ بنسبة 0.17C و زمن تفريغ 5.5h (قيم تجريبية مستقاة من المرجع [31]) فإن السعة المفرغة تساوي:

$$0.17C \times 5.5h = 93.5\% \text{ Capacity}$$

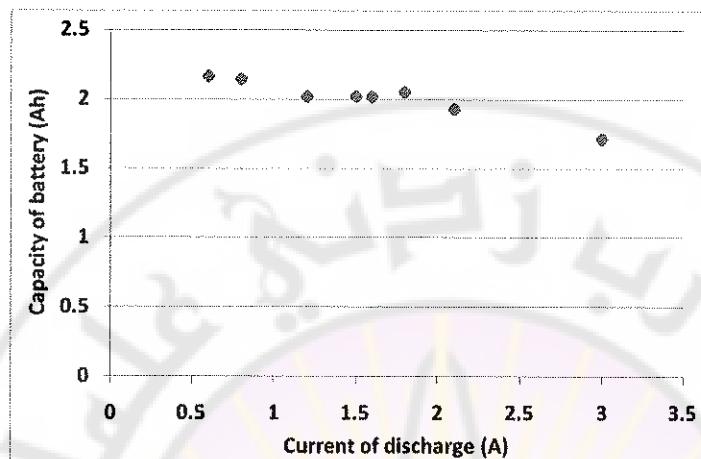
يوضح الشكل (٤-٢٢) السعة المفرغة بدلالة تيار التفريغ لمذكرة الليثيوم-أيون ذات القيم الاسمية التالية:

جدول (٤-٦): القيم الاسمية لمذكرة ليثيوم-أيون

Nominal voltage V	3.7
C <sub>5</sub> Ah	2.5
Charge voltage V	4.2
Minimum discharge end voltage V	2.9
Maximum charge voltage V	4.2
Maximum continuous charge current A	1.5
Internal impedance mΩ @1KHz	150

يوضح الشكل (٤-٢٢) العلاقة اللاخطية بين السعة المفرغة وتيار التفريغ فكلما زاد تيار التفريغ تخفض السعة المفرغة. لا يوجد تفسير دقيق لهذه الظاهرة لكن يمكن القول أنه بالإضافة لزيادة ضياعات جول مع زيادة التيار (ضياعات جول تتاسب طرداً مع زرع التيار المار في مقاومة المذكرة) يوجد أسباب كهروكيميائية، منها أن اسنجابية

وسرعة التفاعلات الكيميائية محددة ولاتتناسب مع متطلبات الحمل (تيار التفريغ)  
وخاصةً لانتشار المواد الفعالة على كامل سطح القطب.



الشكل (22-4): السعة المفرغة بدلالة تيار التفريغ لمدخرة شوارد الليثيوم

علمًا بأن هذه النتائج تم الحصول عليها خلال العام 2012-2013 في مخبر قسم هندسة الطاقة الكهربائية، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية في جامعة دمشق ضمن بحث الماجستير للمهندس معتصم وهبي ثم قام المشرف الدكتور ياسر دياب بمعالجتها واستخراج النتائج الموضحة في الشكل أعلاه.

قام العالم بيكرت Peukert بتوضيح هذه العلاقة بين السعة المفرغة وتيار التفريغ، حيث وجد أن العلاقة بينهما هي علاقة عكسية وغير خطية كما توضح معادلة بيكرت:

$$t = \frac{C_p}{I^n} \quad (6-4)$$

حيث:

$t$ : زمن التفريغ للمدخرة مقاس بـ.h

$C_p$ : تمثل سعة بيكرت للمدخرة مقاسة بـ.Ah

I: التيار المستجر مقاس بـ A.

n: ثابت بيكرت تتحدد قيمته تجريبياً حسب نوع المدخرة، حيث إن القيمة المرتفعة لثابت بيكرت تدل على أن المدخرة شديدة التأثير بزيادة تيار التفريغ ويبين الجدول (4-7) القيم المختلفة لهذا الثابت.

جدول (4-7): قيم ثابت بيكرت لعدة أنواع من المدخرات [32]

ثابت بيكرت	نوع المدخرة
1.05÷1.15	Lead -Acid AGM
1.1÷1.25	Lead -Acid Gel
1.2÷1.6	Lead-Acid Flooded
1.05>	Li-ion

إن أثر بيكرت ينطبق على جميع أنواع المدخرات ولكن بدرجات متفاوتة، تعتبر مدخرات الرصاص - الحامضية من أكثر أنواع المدخرات تأثيراً بزيادة تيار التفريغ، بينما يكون هذا التأثير أقل نسبياً في مدخرات شوارد الليثيوم والتي تتميز بطبيعة تفاعلات كيميائية أسرع [33].

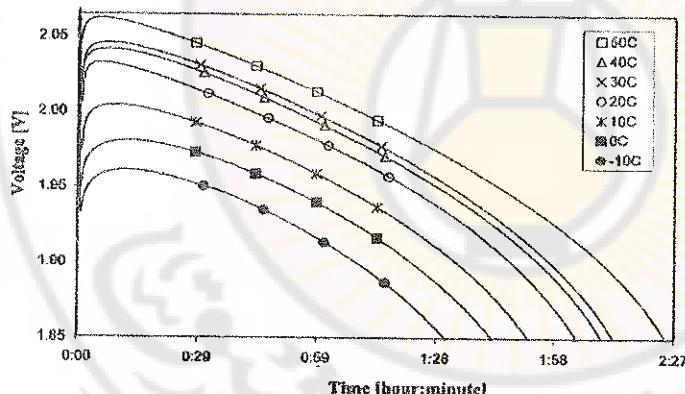
#### ٤-٩-٣- تأثير درجة الحرارة على خصائص المدخرات الكهربائية

#### Influence of Temperature on Batteries Characteristics

يؤثر تغير درجة الحرارة على أداء المدخرة وفيما يلي توضيح لتأثير درجة الحرارة على أنواع المدخرات المختلفة.

#### ٤-٩-٤- تأثير درجة الحرارة على خصائص مدخرات الرصاص-حمض

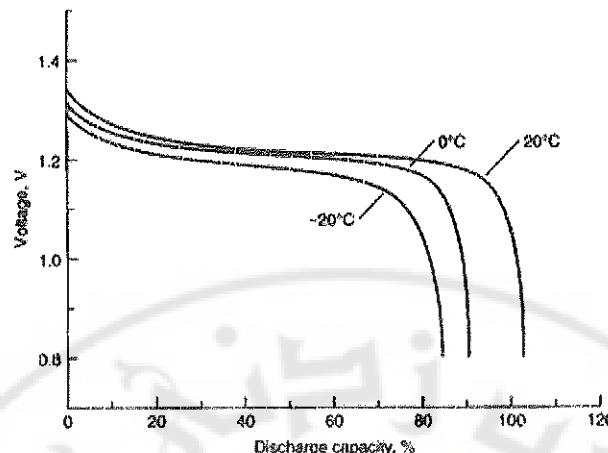
إن خصائص المدخرات الكهربائية (الرصاص-حمض) تتغير مع تغير درجة الحرارة. يوضح الشكل (٤-٢٣) منحني التفريغ لمدخرات الرصاص - الحامضية في درجات حرارة مختلفة، حيث نلاحظ أنه مع انخفاض درجة الحرارة تزداد قيمة المقاومة الداخلية للمدخرة (يزداد انخفاض التوتر الطرفي للمدخرة) وكذلك انخفاض زمن التفريغ أي انخفاض سعة التفريغ. ومرد ذلك إلى أنه مع الانخفاض في درجة الحرارة يبدأ الكهرباء دخول المدخرة بالتجمد مما يعني صعوبة حركة الأيونات ضمته، مما ينعكس سلباً على التفاعلات الكيميائية الحاصلة [٢٠].



الشكل (٤-٢٣): منحني التفريغ لمدخرة الرصاص - الحامضية في درجات حرارة مختلفة [٢٠]

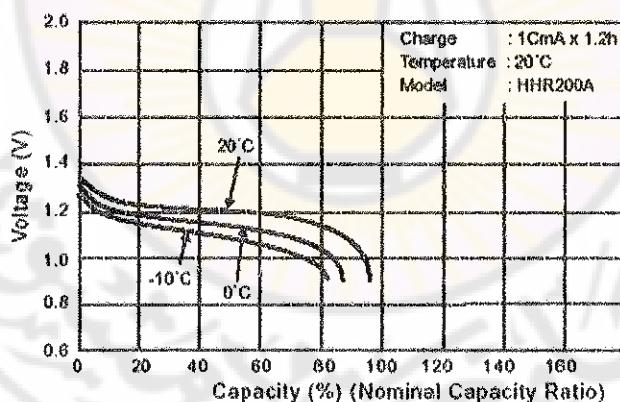
#### ٤-٩-٤- تأثير درجة الحرارة على سعة التفريغ لمدخرة نيكل - كادميوم

إن زيادة درجة الحرارة تؤدي إلى زيادة السعة المفرغة، حيث يلاحظ من الشكل (٤-٢٤) أنه عند درجة حرارة مساوية لـ  $20^{\circ}\text{C}$  تكون السعة المفرغة 100% من سعة المدخرة بينما تتناقص إلى حوالي 80% عند درجة حرارة  $0^{\circ}\text{C}$  [٢٠].



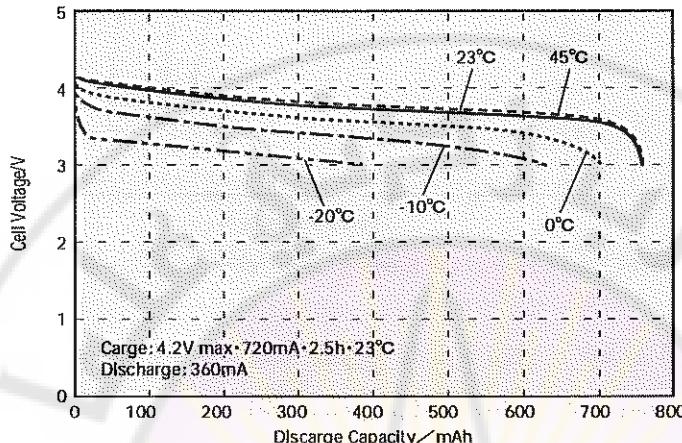
الشكل (4-24): منحني التفريغ لخلية نيكل-كادميوم في درجات حرارة مختلفة [20]

٤-٣-٤- تأثير درجة الحرارة على سعة التفريغ لمدحرة نيكل - هيدرید المعادن كما وضّحنا في أنواع المدخرات السابقة فإن انخفاض درجة الحرارة يؤدي إلى إزاحة منحني التوتر للأسفل (زيادة قيمة المقاومة الداخلية) ويتم الوصول إلى توفر القطع بسرعة أكبر كما يُظهر الشكل (25-4) [20].



الشكل (4-25): منحني التفريغ لخلية نيكل-هيدرید المعادن في درجات حرارة مختلفة [20]

٤-٩-٤- تأثير درجة الحرارة على سعة التفريغ لمدخرة شوارد الليثيوم  
 إن زيادة درجة الحرارة تؤدي إلى انخفاض قيمة المقاومة الداخلية للمدخرة ( ازدياد التوتر الطرفي للمدخرة) بالإضافة إلى زيادة السعة المفرغة كما هو موضح الشكل . [34] (26-4)



الشكل (26-4): منحني التفريغ لمدخرة شوارد الليثيوم في درجات حرارة مختلفة [34]

مسألة: مركبة كهربائية وزنها 1000kg (من دون المدخلات الكهربائية) مصممة لقطع مسافة 50km في مسار داخل المدينة. المركبة مجهزة بمدخلات كهربائية جديدة وزنها 500kg ومتوسط استهلاك الطاقة من المدخلات هو 0.3kWh/km. للوصول إلى سرعة 36km/h التسارع المطلوب هو  $2.0\text{m/s}^2$  والاستطاعة المطلوبة للتغلب على صياغات الاحتكاك هي ثلث الاستطاعة الكلية.

المطلوب:

- احسب متوسط كثافة الطاقة للمدخلات الجديدة.
- احسب متوسط كثافة الاستطاعة للمدخلات الجديدة.
- ما هو نوع المدخلات التي تستطيع تلبية هذه المتطلبات.

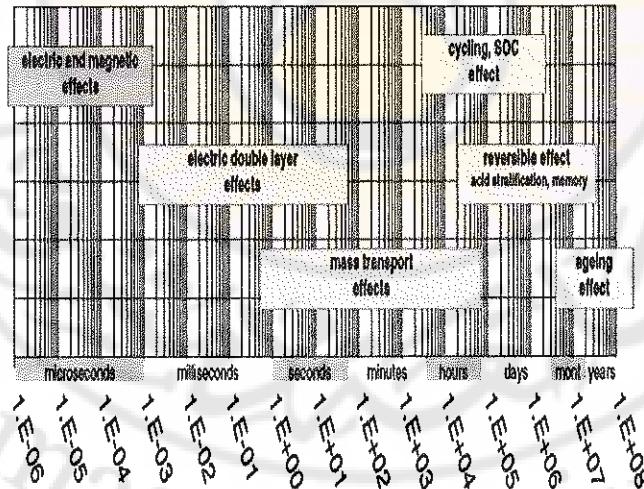
#### 4-10-4- الظواهر الأساسية في المدخرات الكهربائية

##### Fundamental phenomena in batteries

يوجد الكثير من الظواهر المداخلة في المدخرات الكهربائية وهذه الظواهر تحدد سلوك المدخرات وتمتد زمنياً من أجزاء الثانية وتصل حتى السنوات. يوضح الشكل

(27-4) مخطط زمني لهذه الظواهر حسب ترتيبها الزمني وهي [27]:

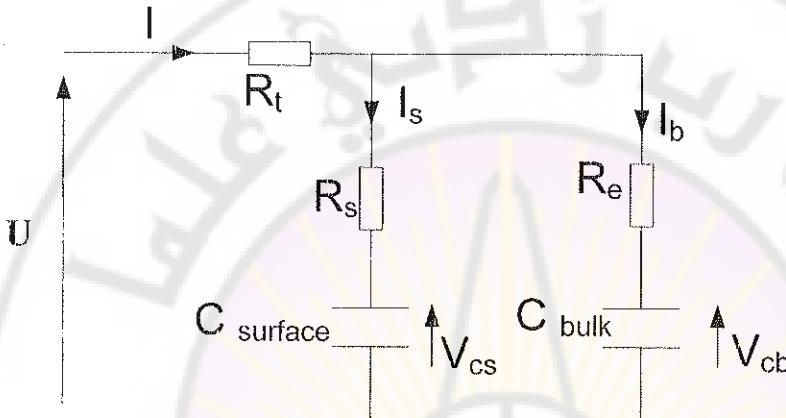
- التأثيرات الكهربائية والمغناطيسية وتقع في مجال زمني يتراوح بين الميكروثانية والميلي ثانية وعادةً ما يهم تأثيرها لصغرها.
- ظاهرة ثنائية (ازدواجية) الطبقة الكهربائية (electric double layer) على الحد الفاصل بين القطب والكهرليت وتظهر في مجال زمني يتراوح بين الميلي ثانية والدقائق.
- ظاهرة انتقال الشحنة (charge transfer) عبر الكهرليت ويشير تأثيرها في المجال الزمني بين الميلي ثانية والساعات.
- تأثيرات التقادم وأنخفاض السعة وانعكاس القطبية تقع ضمن مجال زمني يستمر حتى سنوات.



الشكل (27-4): مخطط زمني لتسلسل الظواهر الأساسية في المدخرات الكهربائية [27]

#### ٤-١١- النمذجة والمحاكاة للمدخرات الكهربائية

إن الظاهرتين الأساسيةتين المسيطرتين على عمل المدخرات الكهربائية هما: ظاهرة ثنائية الطبقة الكهربائية وظاهرة انتقال الشحنة. لأخذ السلوك الزمني للمدخرات الناتج عن ظاهرة ثنائية الطبقة، وعن ظاهرة انتقال الشحنة بالحساب سوف نستخدم نموذج الفرعين (two branches model) للدارة المكافئة المبينة في الشكل (4-28).



الشكل (4-28): دارة الفرعين المكافئة للمدخرة الكهربائية [35]

حيث:

$R_t$ : مقاومة الوصلات والأقطاب،

$R_s$ : مقاومة سطح القطب (مقاومة منسوبة لظاهرة ثنائية الطبقة الكهربائية)،

$R_e$ : مقاومة منسوبة لتفاعلات الأكسدة والإرجاع (redox)،

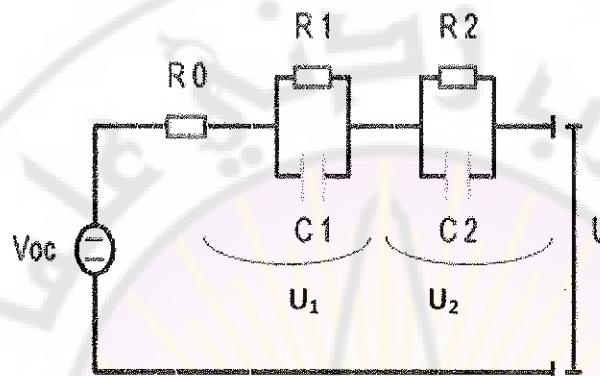
$C_s$ : سعة سطح القطب (سعة ثنائية الطبقة الكهربائية)،

$C_{bulk}$ : السعوية المكافئة للمدخرة (السعية المخزنة بواسطة التفاعلات الأكسدة والإرجاع)،

$U$ : التوتر على أطراف المدخرة.

يستخدم نموذج الفرعين للمدخرة المبين في الشكل (4-28) أعلاه في أزمنة التشغيل طويلة الأمد للمدخرة أما من أجل التشغيل الديناميكي للمدخرة فإنه يمكن تمثيل المدخرة

بالدارة الكهربائية المبينة في الشكل (4-29)، حيث يعبر الفرع  $R_1C_1$  عن الظواهر قصيرة الأمد (استقطاب التكثيل (activation polarization))، بينما يمثل الفرع  $R_2C_2$  الظواهر طويلة الأمد (استقطاب التركيز (concentration polarization))، كما تمثل المقاومة  $R_0$  المقاومة الأومية.



الشكل (4-29): النموذج الديناميكي للمدخلة [36]

فيما يلي نوضح عناصر النموذج المبين في الشكل (4-29):

$V_{oc}$ : توتر الدارة المفتوحة للمدخلة.

$R_0$ : المقاومة الأومية لكل من مجموعات التيار وأقطاب التوصيل في المدخلة.

$R_1$ : المقاومة الناتجة عن انتقال الشحنات على الحد الفاصل بين الكهرليت وسطح القطب.

$C_1$ : السعة الناتجة عن انفصال الشحنات على الحد الفاصل بين الكهرليت وسطح القطب.

$R_2$ : المقاومة الناتجة عن انتقال الشحنات بين قطبي المدخلة عبر الكهرليت.

$C_2$ : السعة الناتجة عن تخزين الشحنات ضمن الحجم الكلي للمدخلة.

$U$ : التوتر على أطراف المدخلة.

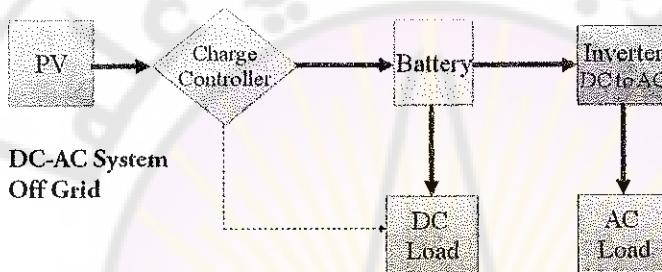
$R_1C_1$ : ثابت يعبر عن استقطاب التنشيط (activation polarization).

$R_2C_2$ : ثابت يعبر عن استقطاب التركيز (concentration polarization).

## 4-12-حساب مودولات التخزين بالمدخرات الكهربائية في النظم الكهروضوئية

### Battery Module Sizing for Photovoltaic Systems

يمكن استخدام المدخرات الكهربائية بطرق مختلفة مع النظم الكهروضوئية من هذه الاستخدامات هي تغذية أحمال تيار مستمر وأحمال تيار متاوب كما يظهر الشكل (4-30) ويستخدم هذا المخطط في النظم صغيرة الامكانيات لتغذية المنازل في المناطق النائية لعدم توافر الشبكة الكهربائية العامة.



الشكل (4-30): مخطط ربط المدخرات إلى نظم PV

يمكن حساب عدد الخلايا الكهربائية اللازمة في النظم الكهروضوئية كمالي [37]:

- تحديد عدد أيام التخزين المطلوبة DOS (Days of Storage).
- تحديد توتر المدخلة  $V_B$  (Voltage of Battery) تبعاً لتوتر النظام وسعة التخزين الإجمالية لنظام التخزين.
- تحديد سعة المدخلة  $C_B$  (Capacitay of Battery) (تؤخذ من المواصفات الفنية للمدخلة التي تم اختيارها عند تيار تفريغ C20).
- تحديد عمق التفريغ للمدخلة DOD (يؤخذ عادةً في هذه النظم DOD=20-30%)
- تحديد معامل درجة الحرارة ونسبة التفريغ ويؤخذ من المواصفات الفنية للمدخلة TDR (temperature and discharge rate).
- حساب القيمة المفيدة للتخزين US (Useful Storage) من العلاقة التالية:

$$US = Total\_Load \cdot DOS (Ah) \quad (7-4)$$

- حساب سعة التخزين الكلية (Total Storage Capacity) TSC :

$$TSC = \frac{US}{DOD \cdot TDR} (Ah) \quad (8-4)$$

- حساب القيمة الفعلية للتخزين Actual C :

$$Actual\_C = \frac{Total\_Load(Wh)}{Module\_voltage \cdot DOD} (Ah) \quad (9-4)$$

- حساب عدد المدخرات في الكدس (السلسلة الواحدة)  $N_S$  :

$$N_S = \frac{Module\_voltage}{V_B} \quad (10-4)$$

- حساب عدد السلسل التفرعية للمدخرات  $N_P$  :

$$N_P = \frac{TSC}{C_B} \quad (11-4)$$

مثال: احسب عدد المدخرات الكهربائية اللازمة لتغذية إحدى المكتبات الجامعية ولليوم واحد مع العلم:

$$C_B = 1854 Ah, V_B = 2V, DOD = 0.25, TDR = 0.94,$$

$$Total\_Load = 1725 Ah \times 24V = 41400 Wh$$

بالتعمييض بالعلاقات أعلاه نجد:

$$US = 1725 \times 1 = 1725 (Ah/day)$$

$$TSC = \frac{1725}{0.25 \times 0.94} = 7340 (Ah)$$

$$N_S = 24/2 = 12 cells$$

$$N_P = 7340/1854 = 4 branches$$

ومنه فإن عدد المدخرات اللازم هو 48 خلية.

#### 13-4- مدخلات القدرة الكهربائية Power Batteries

يمكن أن تستخدم المدخلات المذكورة في الاستطاعات العالية من خلال تجميع عدد كبير من الخلايا على التسلسル والتفرع. وقد جرى عبر التاريخ استخدام مدخلات الرصاص-حمض في بعض التطبيقات التجارية الكبيرة. إن أكبر نظام من مدخلات الرصاص-حمض أنشئ في كاليفورنيا عام 1988 ويعطي كمية طاقة 40MWh وقادر على تغذية المستهلك حوالي أربع ساعات. كما وضعت بالخدمة لاحقاً مدخلات من هذا النوع في عدة بلدان مثل جنوب أفريقيا لتطبيقات UPS باستطاعة 4MW وطاقة 7MWh. جرى أيضاً استخدام الأنواع الأخرى من المدخلات مثل النيكل-كاديوم، حيث تم في Alaska عام 2003 وضع نظام يوزن 1000tons من هذه المدخلات بسعة 40MW و 4.7MWh [5].

فيمايلي مقارنة بين أنواع من المدخلات التي مازالت قيد الدراسة والتطوير. بعض من هذه المدخلات يعمل عند درجات حرارة مرتفعة تقع بين 300-400°C.

**الجدول (4-8) مقارنة بين خصائص بعض المدخلات الكهربائية الحديثة [6]**

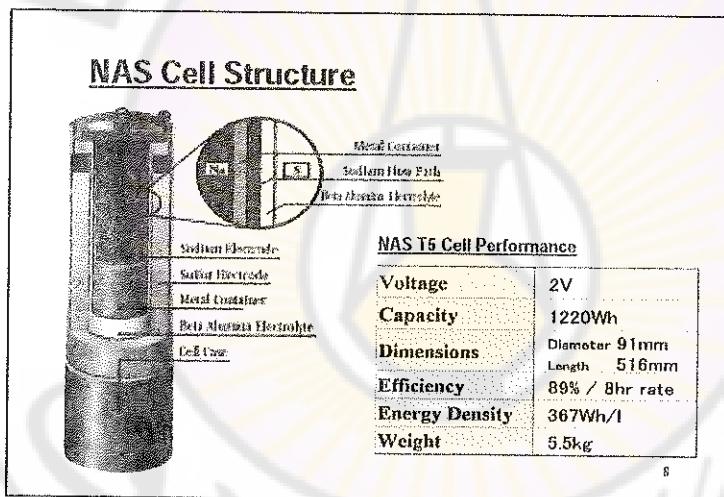
Batteries under developement	Sodium-sulphur	Lithium-sulphide	Zinc-chlorine	Lithium-polymer
Electrolyte	$\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$	KOH	KOH	$\text{LiPF}_6$
Energy efficiency (%)	70	75	65	70
Energy density (Wh/kg)	120	130	120	200
Power densities	Peak (W/kg)	240	200	100
	Sustained (W/kg)	120	140	-
Cycle life (Cycle)	2000	200	-	>1200
Operating life temperatures (°C)	300 to 400	430 to 500	0	-20 to 60

## ١٤-٤ - مدخلات درجات الحرارة العالية: مدخلات الصوديوم - كبريت Sodium Sulfur (NaS) Batteries

١-١٤-٤ - مبدأ وبنية مدخلات الصوديوم-كبريت  
مدخلات الصوديوم كبريت هي مدخلات عالية الاستطاعة وتعمل في درجات حرارة عالية والتفاعل الأساسي لها هو [37]:



وهي تتالف من كبريت سائل (منصهر) في القطب الموجب ومن صوديوم سائل في القطب السالب وهما المادتان الفعالتان والمحلول الكهربائي الخاص بالمدخلة هو ثاني ألومنيات السيراميك ( $\beta\text{-AL}_2\text{O}_3$ ) وهو صلب وناقل جيد لאיونات الصوديوم (انظر الشكل (31-4)).



الشكل (31-4): بنية مدخلات صوديوم-كبريت [37]

إنشاء التفريغ تتدفق الأيونات الموجبة للصوديوم عبر الكهربait وتتدفق الإلكترونات في الدارة الخارجية للمدخلة منتجة حوالي 2 فولت. وهذه العملية عكوسية فعند الشحن تتفكك كبريتات الصوديوم المتشكلة في القطب السالب معطية الأيونات الموجبة للصوديوم التي تعود عبر المادة الكهربائية لتحد مع القطب السالب (الصوديوم).

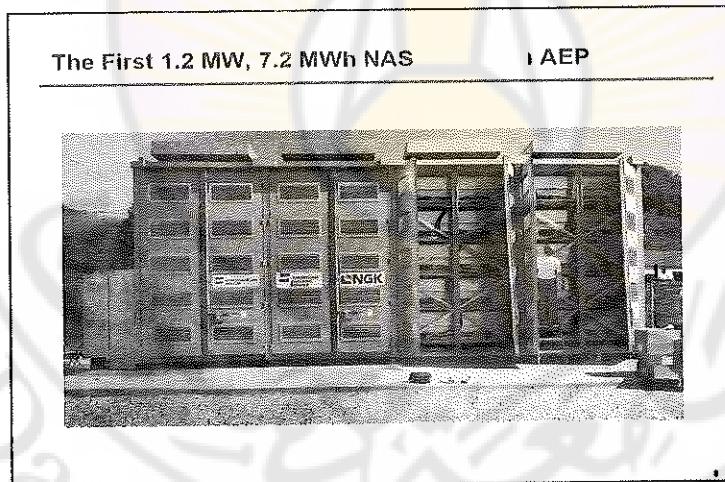
تحفظ هذه المدخرة المغلقة بإحكام عند درجة حرارة حوالي  $300^{\circ}\text{C}$  وتعمل عند شروط معينة حيث يجب أن تبقى المادتان الفعاليتان في القطبين بشكل سائل أما المادة الكهربائية فيجب أن تبقى صلبة عند هذه الدرجة من الحرارة، وبما أنَّ كلاً من المادتين الفعاليتين ذات رد فعل سريع ولأن المقاومة الداخلية منخفضة، فإن هذه المدخرة ستعمل بشكل جيد. وبفضل انعكاس عمليتي الشحن والتفرغ فإن المدخرة يمكن استخدامها باستمرار.

#### 2-14-4- ميزات مدخرات صوديوم-كربونات

تمتاز هذه المدخرات بما يلي:

1- ذات سعة كبيرة: بواسطة وصل عدة مدخرات من رتبة  $\text{MW}$  بسهولة لتشكيل بنية جديدة ويبين الشكل التالي نوع منتج من قبل شركة NGK بالمواصفات التالية:

1.2 MW–7.2 MWh (20 modules), L : 10m, H : 4.7m, W : 3.6 m,  
Prix : 2,5M€

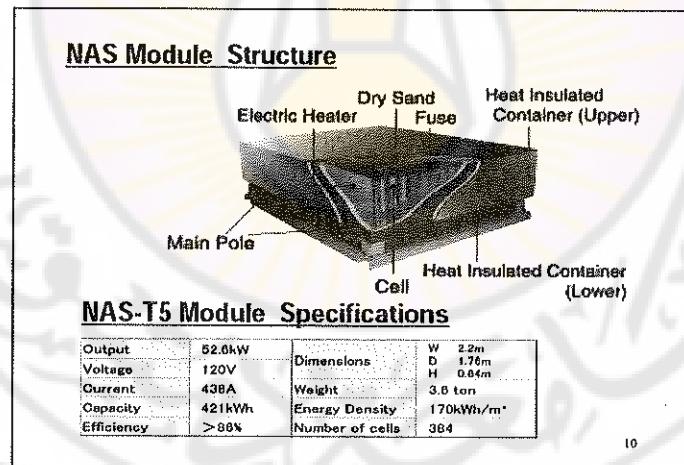


الشكل (32-4): صورة موديل لمدخرات صوديوم-كربونات [37]

و هذه المدخرات تصنع حالياً على نطاق ضيق، حيث توجد شركة واحدة فقط تصنع مدخرات الصوديوم كبريت وهي شركة NGK في اليابان و تنتجها بسعة 1 و 2 ميغا واط ساعي.

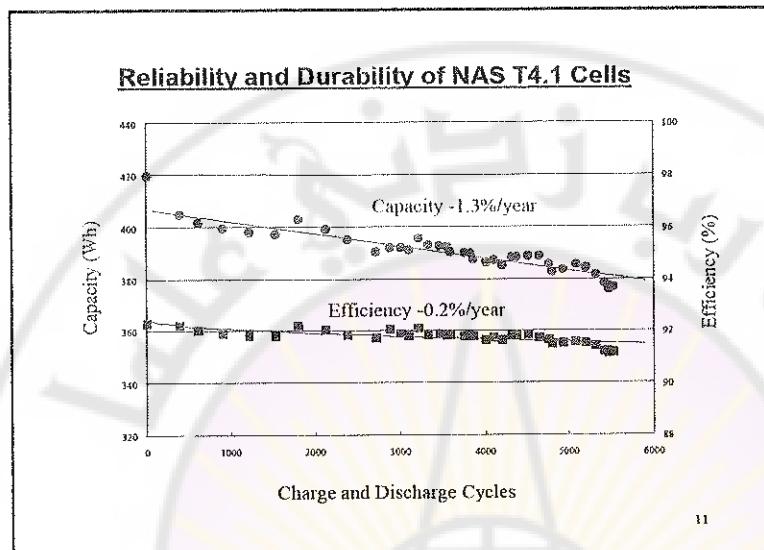
**14-2-2- ذات حجم صغير:** لديها امكانية إعطاء استطاعة أكبر بست مرات من الاستطاعة الاسمية وذلك لفترة زمنية مقدارها 30 ثانية. وهذه السمة تمكّن المدخرات أن تكون ذات استخدام اقتصادي ومناسب للإقلاعات. يمتاز هذا النوع من المدخرات بأن كثافة طاقتها عالية جداً  $170\text{kWh/m}^3$  مقابل  $40\text{kWh/m}^3$  لمدخرات الرصاص-حمض. وبالتالي تحتاج إلى مساحة للتركيب تساوي تقريرياً ربع المنطقة اللازمة لمدخرات الرصاص-حمض.

يتم تجميع الخلايا بشكل مودولات ضمن حافظة حرارية (thermal enclosure) ويتم تأمين الحرارة الداخلية ( $300^\circ\text{C}$ ) عن طريق سخانات كهربائية ويتم تجميع الخلايا وتنبيتها عن طريق الرمل والذي يقوم أيضاً بحمايتها من حالات الحرائق. ويتم توصيل الخلايا داخلياً بحيث نحصل على التوتر المطلوب.



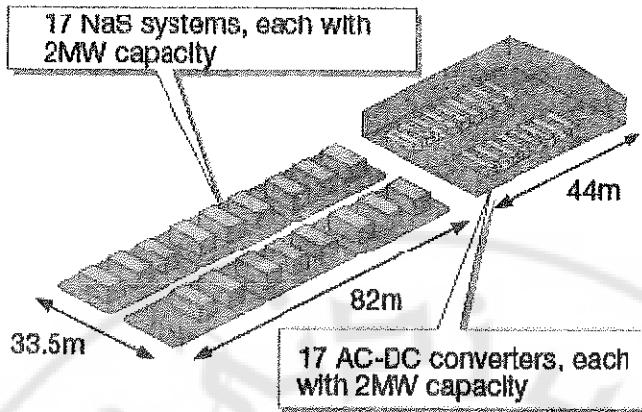
الشكل (4-33): الحافظة لمدخرات صوديوم-كبريت

.90% .-3-14-4 ذات كفاءة عالية: يمكن أن تصل كفاءة خلايا هذه المدخرة إلى 90%.  
يبين الشكل التالي كيفية تناقص الكفاءة والسعنة مع زيادة عدد مرات الشحن والتغريغ (سنويًا) أي يحدث التقادم لخصائص المدخرة.



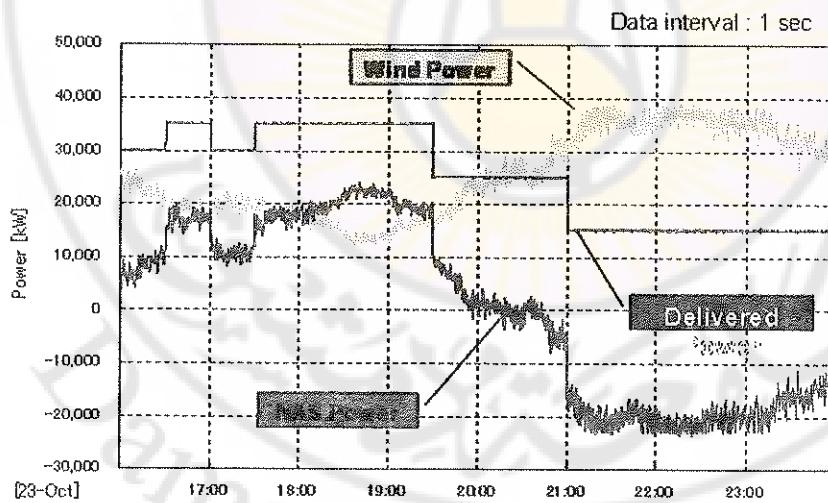
الشكل (34-4): تقادم خصائص مدخرات صوديوم-كربونت [37]

.-4-14-4 ذات عمر طويل الأمد: العمر الافتراضي بحدود 15 سنة بعدد دورات عمل تتجاوز 2500cycle (مقابل 1500cycle لمدخرات الرصاص الحامضية).  
لقد تم في العام 2008 في طوكيو استخدام هذه المدخرات لتنعيم الاستطاعة الناتجة عن مزرعة ريحية 51MW مستخدمين موديل W (245MWh) 34MW حيث يبين الشكل (35-4) مخطط عام لنظام المدخرات المستخدمة.



الشكل (35-4): مخطط عام لنظام التخزين بمخازن صوديوم-كربونات المستخدم باستطاعة 34MW

يظهر الشكل (36-4) منحني خرج المزرعة المذكورة مع منحني نظام التخزين بمخازن NAS خلال زمن مقدر 8h. نلاحظ أن الاستطاعة المقدمة إلى الحمل ذات تغيرات لحظية شبه معدومة على الرغم من التغيرات المهمة لاستطاعة خرج المزرعة الريحية.



الشكل (36-4): منحني استطاعة خرج المزرعة المذكورة مع منحني استطاعة نظام التخزين [38]

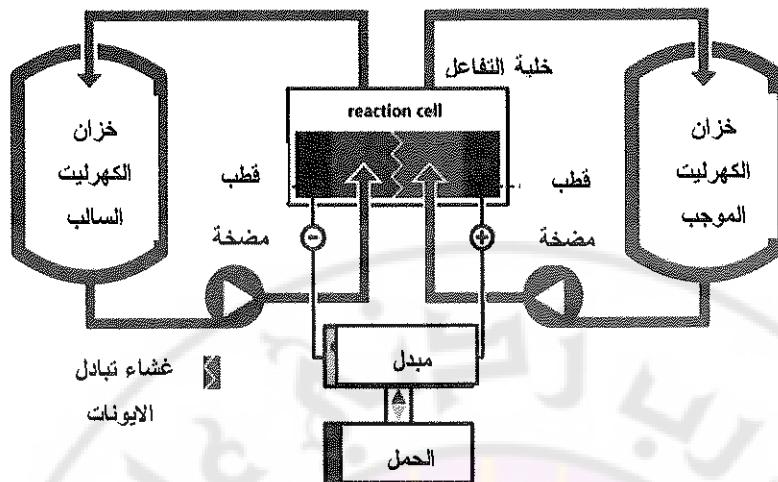
## 15-4- مدخلات جريان الكهرباء

### Redox Flow Batteries

#### 15-4-1- تقنية مدخلات جريان الكهرباء

مدخلات جريان الكهرباء هي نوع من المدخلات القابلة للشحن التي تكون فيها الطاقة مخزنة كيميائياً في خزانات الكهرباء السائل على خلاف المدخلات التقليدية التي تخزن كل موادها التفاعلية ضمن الخلايا. يوجد فيها نوعان من الكهرباء: الأول للتفاعل الإيجابي والثاني للتفاعل السلبي. الكهرباء الإيجابي والسلبي لا يتم خلطهما سوية في الخلية لكن يفصلان عن بعضهما ضمن الخلية بغضائ رقيق جداً (interseparator) يسمح فقط للأيونات بالجريان من خلاله (دون الإلكترونات). يوجد أيضاً في هذه الخلايا أقطاب كربون مسامية ومستقرة. بينما التفاعلات لا تؤثر على الأقطاب الكهربائية فيزيائياً وكيميائياً لذا يمكن الحصول على عدد كبير من دورات الشحن والتفرير دون حدوث أي نقصان في الأقطاب. المواد المتفاعلة تبقى جيدة لعدد أدنى من دورات الشحن يقدر بـ 2000 دورة وما يقارب 10000 دورة [39].

كما يظهر الشكل (37-4) إن مدخلات جريان الكهرباء تحتوي على مضخات وأنابيب وخزانات للكهرباء وأكdas من الخلايا الكهروكيميائية. خلال عملية الشحن والتفرير تتدفق المواد المتفاعلة من كلا الطرفين المتعاكسين للخلية ويتم تدوير السائل الكهربائي عبر أكdas الخلايا حيث يحدث التفاعل الكيميائي. يمكن تخزين الجزيئات المشحونة ضمن الأكdas وضمن الخزان. في مثل هذه الأنواع من المدخلات تتحدد سعة المدخلة بواسطة كثافة المواد المتفاعلة ولكن يمكن رفع أو خفض السعة بواسطة تغيير حجم الخزان.



الشكل (37-4): مخطط عام لمدخرات جريان الكهرباء

تكون عموماً الخلايا مجتمعة في كتل (blocks) الخلايا في كل كتلة مرتبطة مع بعضها كهربائياً على التسلسل لذا سوف يجمع توتر كل خلية مع الخلية المرتبطة معها ليكون التوتر النهائي هو مجموع توترات الخلايا كلها.

يتوافر ثلاثة أنواع من مدخرات الجريان هي مدخرات الزنك- بروم ومدخرات الفاناديوم - ريدوكس ونظام مدخرات Regensys. والجزئيات الفعالة هي الفاناديوم ضمن عدة حالات من الأكسدة. أما نظام Regensys فيستخدم جزيئاتكبريتية كجزئيات فعالة.

#### 15-2-4 مادة الفاناديوم

الفاناديوم Vanadium اكتشف مرتين أول مرة عام 1801 من قبل العالم اندریس مانویل وسمّاه البذرة الحمراء وبعد ذلك وجد شكل آخر للفاناديوم مجرد من معدن الكروم وبعد ذلك تم اكتشافه في عام 1803.

عزل هنري روسكو المعدن عام 1867 من ديكلوريد الفاناديوم وفي عام 1925 حصل على الفاناديوم الصافي بتخفيض خامس أوكسيد الفاناديوم بمعدن الكالسيوم.

الفاناديوم عنصر طبيعي في الأرض رمزه الكيميائي V وترتيبه في الجدول الدوري للعناصر 23. الفاناديوم مركب يوجد في الطبيعة بلون أبيض ويتحول إلى لون رمادي ويوجد في أغلب الأحيان كبلورات، يندمج عادة مع العناصر الأخرى مثل O<sub>2</sub> أو Na أو S.

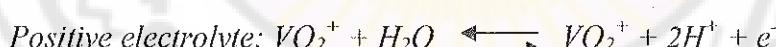
مركبات الفاناديوم يمكن أن توجد في قشرة الأرض وفي الصخور وبعض الحديد الخام. يكون الفاناديوم على شكل أكسيد الفاناديوم يستعمل في الأنواع الخاصة من الفولاذ، كما يستعمل في صناعة بعض أجزاء السيارات وأغلب الفاناديوم يستعمل لصناعة الفولاذ. أكسيد الفاناديوم هو مسحوق برتقالي. الفاناديوم يخلط أيضاً بالحديد لصناعة أجزاء مهمة من محركات الطائرات.

#### 4-15-3- مدخلات جريان الكهربائية الفاناديوم

##### Vanadium Redox Flow Battery

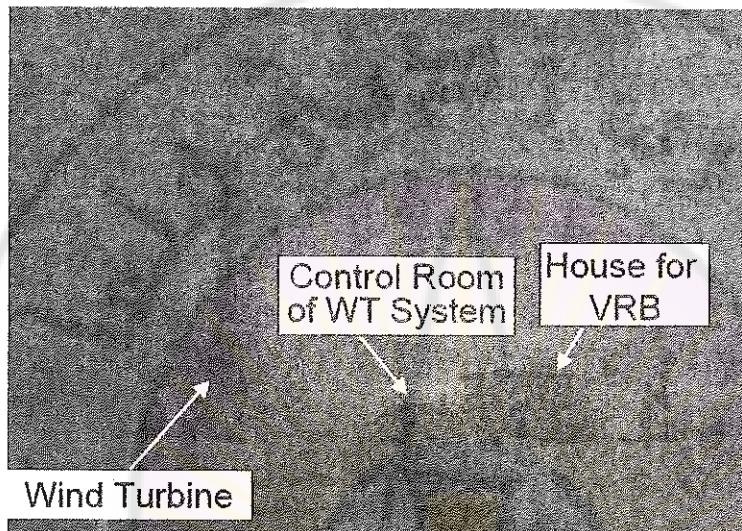
تصنف مدخلات الفاناديوم ضمن الأكسدة القليلة في المدخلات التي تحتوي كل المكونات الشبيهة والتي تذوب في المنحل الكهربائي. مدخلات الفاناديوم تستعمل أملاح الفاناديوم في الكهربائية. يحتوي الكهربائي حمض الكبريت وهو نفس الحمض الموجود في المدخلات التقليدية.

التفاعلات الكهربائية التي تحدث في هذه المدخلات [39]:



يؤثر التفريغ كما هو مبين بالمعادلات أعلاه على الجانب اليسار والشحن على اليمين ذلك لأن الكهربائية يرجع إلى نفس الحالة في نهاية كل دورة قد تستعمل ثانية بشكل غير محدد.

وقد تم على سبيل التجربة تركيب نظام مدخلات قانديوم ريدوكس بسعة تخزين 6h - 170kW على طرف مولد رئيسي تجريبي باستطاعة 275kW في محطة هوكيابو في اليابان كما يظهر الشكل (4-38) صورة لموقع التخزين بمدخلات القانديوم.



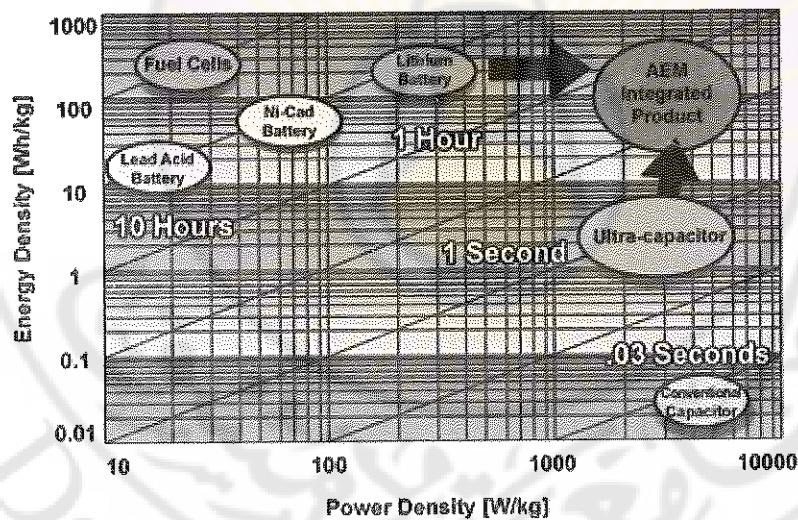
الشكل (4-38): صورة لمدخلات القانديوم المركبة في محطة هوكيابو [39]

## 4-16-4- مكثفات شوارد الليثيوم<sup>5</sup>

### 4-16-4-1- مبدأ مكثفات شوارد الليثيوم

نشرت جامعة فرانش كونتيه (Franche-Comté) بالتعاون مع الشركة اليابانية (J.M. Energy) وبمشاركة جامعة دمشق في العام 2008 مقالة عن عناصر قيد التجربة "مكثفات شوارد الليثيوم" (Lithium ion capacitors) ذات مواصفات جديدة، حيث يدمج مبدأ الكهرباء الساكنة المستخدم في المكثفات فائقة السعة ومبدأ التخزين الكهروكيميائي (redox) في المدخلات [40].

مكثفات شوارد الليثيوم هي عناصر تخزين جديدة تتمتع بخصائص كهربائية مميزة حيث أن كثافة الاستطاعة وكثافة القدرة عالية جداً بالمقارنة مع المكثفات فائقة السعة التقليدية فهي تملك كثافة طاقة أكبر بأربع مرات من المكثفات فائقة السعة التقليدية. يبين مخطط راكون التالي (الشكل (4-39)) هذه المميزات.



الشكل (4-39): مخطط راكون لمكثفات شوارد الليثيوم الهجينية

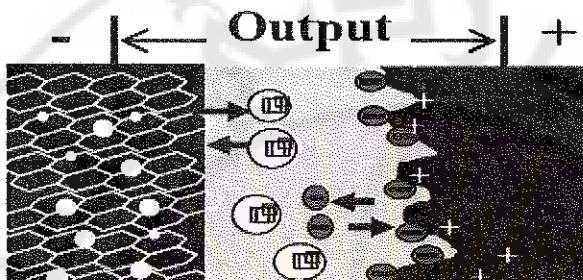
<sup>5</sup> يطلق اسم مكثفات شوارد الليثيوم على هذه العناصر الجديدة ولكنها من حيث البنية هي مزيج بين المكثفات فائقة السعة والمدخلات لذلك يمكن أن يطلق عليها أسماء أخرى.

## 4-16-2- بنية مكثفات شوارد الليثيوم

### Structure of Lithium Ion Capacitors

تتكون مكثفات شوارد الليثيوم من حيث البنية من قطبين، القطب الموجب يتشكل من الكربون النشط (الفعال) كما هو في المكثف فائق السعة والسلب يستخدم فيه شوارد الليثيوم المشوبة بالكربون كما هو المدخرات شوارد الليثيوم كما يوضح الشكل (4-4).

.(40)



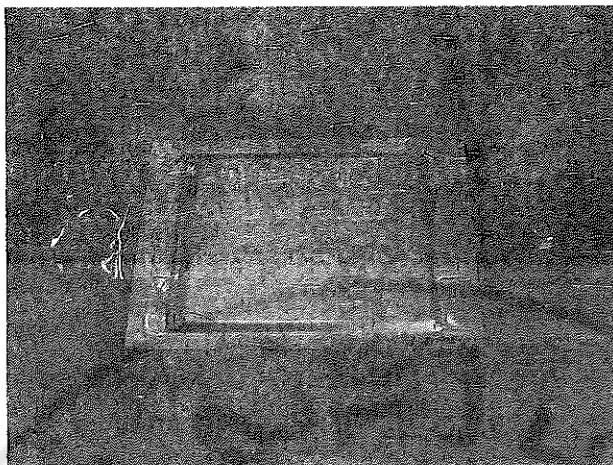
**Li-doped Electrolyte Activated Carbon**

الشكل (4-4): بنية مكثف شوارد الليثيوم [40]

إن السعة المكافئة لهذا العنصر تتشكل من سعة اللبوس الموجب (carbon C<sub>dl</sub>) (carbon lithium) C<sub>Li</sub> على التسلسل مع سعة اللبوس السالب (carbon double layer) يمكن أن يعبر عنها بالمعادلة التالية:

$$\frac{I}{C_{eq}} = \frac{I}{C_{Li}} + \frac{I}{C_{dl}} ; C_{Li} \gg C_{dl} \Rightarrow C_{eq} \approx C_{dl} \quad (12-4)$$

إن الشكل (41-4) يبين نموذجاً مخبرياً لمكثف شوارد الليثيوم ذي المحددات الموضحة في الجدول (9-4).



الشكل (4-41): نموذج مخبري لمكثف شوارد الليثيوم السعة الاسمية 2000F، الحجم 124ml، الوزن 208g، القيمة العظمى للتوتر 3.8V.

يبين الجدول (9-4) أهم الخصائص الكهربائية لمكثفات شوارد الليثيوم وللموادتين : 1000F ، 2000F ،

الجدول (4-9) الخصائص الكهربائية لمكثف شوارد الليثيوم [41]

المواصفات	نموذج 2000F	نموذج 1000F
درجة حرارة التشغيل	70°C - 20°C إلى	70°C - 20°C إلى
التوتر الاسمي	الأعظمي 3.8V	الأصغرى 3.8V
السعة عند 25°C	2200F	1100F
السعة عند -20°C	60%	60%
السعة عند 70°C	100%	100%
المقاومة	1KHz @ ESR 1.4mΩ	2.5 mΩ
كثافة الطاقة الكتيلية	14Wh\Kg	12Wh\Kg
كثافة الطاقة الحجمية	24Wh\L	21 Wh\L

يعمل هذا العنصر كما يبين الجدول (4-9) عند درجة حرارة من ( $-20^{\circ}\text{C}$  - إلى  $70^{\circ}\text{C}$ ) وهو مجال كبير بالمقارنة مع المدخرات الكهربائية التقليدية وهو قريب من المكثفات فائقة السعة. بالنظر إلى الجدول أعلاه نلاحظ انخفاض السعة عند درجات الحرارة السالبة فمثلاً عند درجة حرارة  $20^{\circ}\text{C}$  - تنخفض السعة إلى 60% نسبة إلى السعة عند  $25^{\circ}\text{C}$ . ويبين أيضاً أن للعنصر توتر أعظمي  $3.8\text{V}$  وتوتر أصغرى  $2.2\text{V}$  كما في مدخرات شوارد الليثيوم.

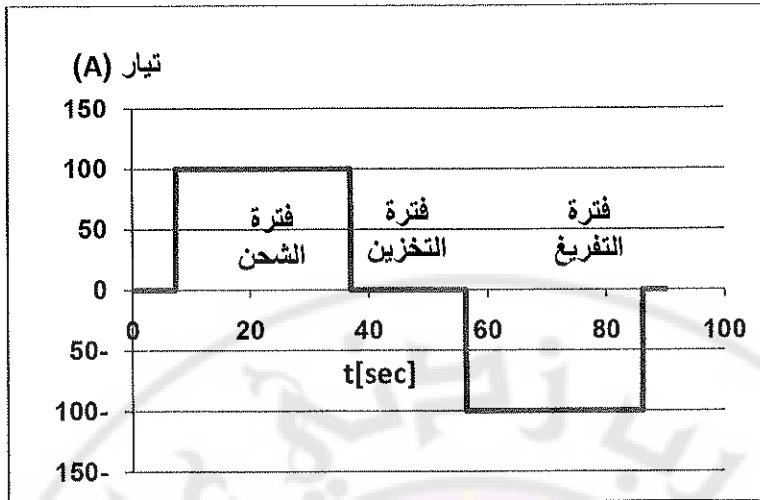
وهكذا نجد أن هذا العنصر حسن من الخصائص الكهربائية مقارنة بالمكثفات فائقة السعة كما يبين الجدول (4-10):

الجدول (4-10) مقارنة بين المكثفات فائقة السعة ومكثفات شوارد الليثيوم [41]

المكثفات فائقة السعة	مكثفات شوارد الليثيوم
تغريغ ذاتي كبير	تغريغ ذاتي أقل
توتر منخفض نسبياً	توتر أعلى
كثافة طاقة كهربائية منخفضة	كثافة طاقة كهربائية عالية
درجة الحرارة تصل حتى صفر درجة مئوية	درجة حرارة تصل حتى $40^{\circ}\text{C}$

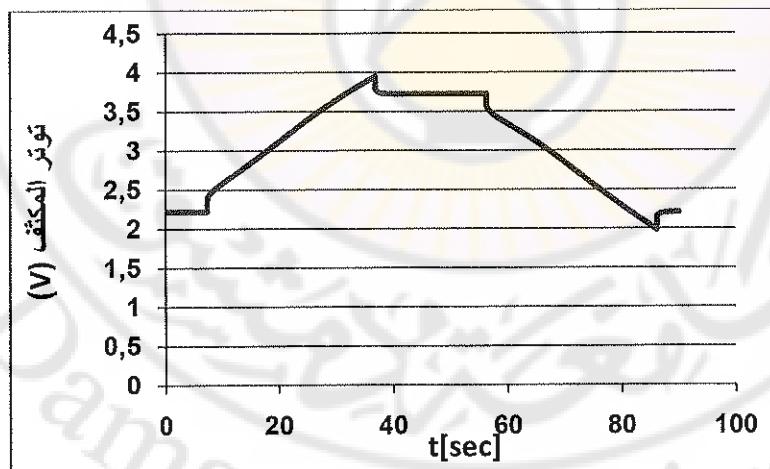
### 3-16-4- شحن وتغريغ مكثف شوارد الليثيوم

عند شروط ابتدائية درجة الحرارة  $25^{\circ}\text{C}$  وتوتر ابتدائي  $2.2\text{V}$  تم شحن وتغريغ المكثف ذي المواصفات المبينة في الشكل (4-4) بواسطة تيار ثابت ( $100\text{A}$ ) كما يظهر الشكل (4-4).



الشكل (4-42): شكل التيار المطبق على العنصر خلال التجربة [41]

نلاحظ من هذا المنحني أن موجة التيار تمر بثلاث فترات ، الفترة الأولى هي فترة الشحن بتيار ثابت قيمته 100A ، وال فترة الثانية فترة تخزين يكون فيها التيار المطبق معدوماً ، وال فترة الثالثة هي فترة التفريغ حيث يكون التيار فيها يساوي 100 A . ومنه نجد أن شكل التوتر على أطراف العنصر هو كما يوضح الشكل (4-43).



الشكل (4-43): شكل التوتر الناتج على أطراف العنصر خلال التجربة [41]

من الشكل (43-4) نلاحظ أن التوتر مرّ بثلاث مراحل:

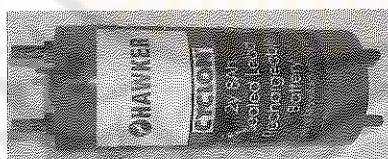
- 1- فترة الشحن: وفي هذه الفترة يتم شحن المكثف كما هو واضح حتى التوتر  $3.8V$  تقربياً وبזמן لا يتجاوز 30 ثانية.
- 2- فترة التخزين: وهي الفترة التي يكون فيها التيار معدوماً ويكون فيها التوتر ثابتاً على أطراف المكثف لكن مع ملاحظة هبوط طفيف في قيمة التوتر في هذه الفترة ناتج عن ظاهرة انتشار الشحنات في البنية المسامية للقطب.
- 3- فترة التفريغ: وهي الفترة التي يتم فيها تفريغ المكثف حتى توتر  $2.2V$  وبזמן لا يتجاوز 30 ثانية أيضاً. نلاحظ أن السلوك الزمني لهذا العنصر هو خليط بين سلوك المكثف فائق السعة مثل زمن الشحن أو التفريغ هو نفسه ولكن التوتر محصور بين قيمتين عظمى وصغرى مثل مدخلات شوارد الليثيوم.

#### مسألة م حلولة (1):

من أجل المدخرة المبينة في الشكل أدناه (رصاص-حمض  $2V$ ,  $8Ah$ ) أحسب السعوية المكافئة للمدخرة  $C_{bulk}$  بالفاراد مستعيناً بالقيم الاسمية والقيم الحدية المعروفة لمدخرة رصاصية-حامضية. باعتبار القيم التالية لبقية عناصر الدارة المكافئة:

$$(C_s=79F; R_e=3.75m\Omega; R_s=3.75m\Omega; R_i=2.74m\Omega)$$

احسب المقاومة المكافئة التسلسنية للمدخرة الكهربائية ESR ثم ارسم مخطط نايكوست لها موضحاً عليه مختلف المناطق.



الشكل (44-4): صورة لمدخرة رصاص-حمض  $2V$ ,  $8Ah$

الحل:

- 1- يمكن حساب سعوية المدخرة بالفاراد باستخدام العلاقة التالية:

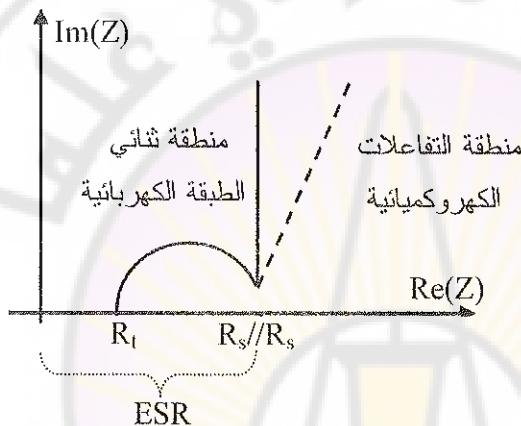
$$C_{bulk} = 2 \times C_{Ah} \cdot U \cdot \frac{3600}{U^2 - U_{min}^2}$$

$$= 2 \times 8 \times 2 \times \frac{3600}{2^2 - 1.6^2} = 80kF$$

-يمكن أن نقدر قيمة المقاومة ESR كماليي:

$$ESR = R_t + \frac{R_s \cdot R_e}{R_s + R_e} = 4.6m\Omega$$

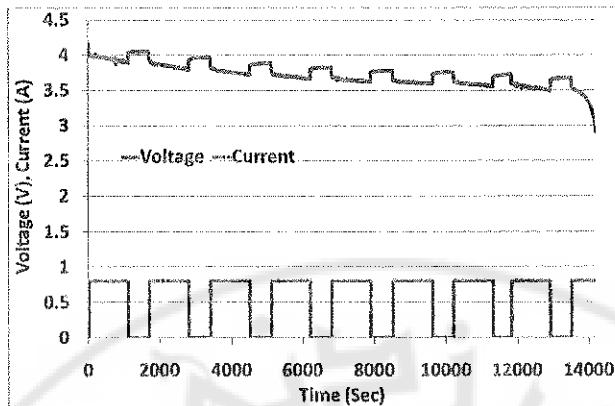
إن مخطط نايكوست لمدحرة رصاص-حمض موضح في الشكل (45-4)



الشكل (45-4): مخطط نايكوست لمدحرة رصاص-حمض

: مسألة (2)

لدينا مدحرة كهربائية من نوع ليثيوم-ليون ذات القيم الاسمية الموضحة في الجدول (6-4). يجري تفريغ المدحرة من التوتر الأعظمي إلى التوتر الأصغر بتيار نبضي 0.8A فيه زمن التفريغ 1100s وزمن التخزين 600s. فيكون شكل منحنى التوتر والتيار للمدحرة كما يوضح الشكل (46-4).



الشكل (4-46): تيار وتوتر المدخرة المدروسة خلال مرحلة التفريغ

باعتبار الدارة المكافئة المبينة في الشكل (29-4)، والمطلوب مايلي:

- 1- اكتب المعادلة التقاضية للتواترات على أطراف عناصر الدارة المكافئة (الفرع  $R_1C_1$ ، وللفرع  $R_2C_2$ ) باعتبار أن التيار المار في المدخرة خلال التفريغ هو تيار ثابت وقيمة  $I$  (هو تيار نبضي أما  $I$  أو صفر).
- 2- استنتج قيمة التواترات والتبارات لكل عنصر من عناصر الدارة المكافئة والتوفير الكلي على أطراف المدخرة ثم ارسمها بدقة من أجل الشروط الابتدائية أعلاه ولدور كامل  $T=1700s$ .

مع العلم أن:  $V_{oc}=4.2V, I=0.8A, R_0=0.125m\Omega, R_I=0.1m\Omega, R_2=0.05m\Omega, C_1=200F, C_2=7000F$



**الفصل الخامس**

**تخزين الطاقة بالهيدروجين**

**Hydrogen Energy Storage**



## ٥- تخزين الطاقة بالهيدروجين

### Hydrogen Energy Storage

#### ١-٥- الهيدروجين: طاقة الغد

في الوقت الذي قاربت فيه شمس الوقود الأحفوري (fossil fuel) على الانحسار يشهد العالم ولادة مصدر آخر للطاقة ستكون له القدرة على إعادة صياغة شكل الحضارة الإنسانية، ألا وهو الهيدروجين، ذلك العنصر الخفيف الأكثر توافراً على وجه الأرض، أجل ستتبقى مع منتصف القرن الحالي - كما يقدر الخبراء - حضارة اقتصادية واجتماعية جديدة هي حضارة الهيدروجين (hydrogen culture) وسوف يشهد العالم انقلاباً اقتصادياً جديداً فوامنه الهيدروجين سيحدث تغييراً جذرياً في الأوضاع الاقتصادية والاجتماعية وحتى السياسية، تماماً كما فعل الفحم والبخار في بداية الثورة الصناعية .

إذن نحن على اعتاب نمط جديد من الاقتصاد العالمي هو اقتصاد الهيدروجين (hydrogen economy) ومن الدوافع الرئيسية للتحول إلى هذا الاقتصاد الجديد - اقتصاد الهيدروجين - تلك الآثار المدمرة على البيئة والمناخ والصحة العامة الناجمة عن حرق الوقود الأحفوري، الأمر الذي يستدعي الإسراع في تطوير تقنيات ذات كفاءة عالية لاستغلال مصادر الطاقات المتعددة لإنتاج الهيدروجين بكميات وفيرة وتكليف أقل.

فالهيدروجين هو بحق الوقود الشامل والأبدي الذي لاينفذ مع مر العصور، وهو الوقود الذي لاينتج عن حرقه أي انبعاثات ملوثة أو ضارة ، كما أنه يمتلك أعلى قيمة حرارية (heating value) في وحدة الكتلة من بين جميع حوامل الطاقة المتوفرة على وجه الأرض [42]، ودرجة حرارة لهب احتراقه عالية جداً (أعلى من  $2200^{\circ}\text{C}$ ). إضافة إلى ما تقدم من مزايا، فالهيدروجين يخدم وسيطًا ممتازًا لتخزين الطاقة الكهربائية وهو موضوع بحثنا في هذا الفصل. وقبل أن نبحث في ذلك يلزم أن لا التعرف على خصائص الهيدروجين الفيزيائية والكيميائية .

## 5-2- الخصائص الفيزيائية والكيميائية للهيدروجين

الهيدروجين غاز عديم اللون والطعم والرائحة غير سام وهو أخف العناصر الموجودة في الطبيعة كثافته ( كثافة الحجمية ) في الشروط النظامية  $\rho_{H_2}=0.09\text{g/l}$  فهو أخف من الهواء بحوالي 14 مرة ، لذا فله قدرة كبيرة على الانتشار بسرعة في الجو إلى الأعلى وبذلك ينخفض تركيزه في الجو بسرعة.

الوزن الذري له يساوي 1.0079 وله ثلاثة نظائر :

الأولى وتسمى الهيدروجين العادي رمزها النووي  $^1H^1$  ونسبة توافرها في الطبيعة ، %99.985

الثانية وتسمى الديتريوم رمزها النووي  $^2H^1$  وهي غير متواجدة في الطبيعة ، %0.015

الثالثة وتسمى التريتيوم رمزها النووي  $^3H^1$  وهي غير متواجدة في الطبيعة ، القيمة الحرارية الدنيا له :  $120\text{MJ/kg}$  L.H.V. وتقابل  $10.8\text{MJ/m}^3$  ، القيمة الحرارية العليا له :  $142\text{MJ/kg}$  H.H.V وتقابل  $12.8\text{MJ/m}^3$ .

لابد من توضيح أن الهيدروجين يدخل في تركيب أكثر من 75% من مكونات الكون فهو يدخل في تركيب جميع مصادر المياه (المحيطات والبحار والأنهار والبحيرات والجبال الجليدية ..... ) وفي تركيب جسم الإنسان والحيوان والنبات، كما يدخل في تركيب جميع المواد الهيدروكربونية وفي تركيب القشرة الأرضية أيضاً. علمًا بأن الهيدروجين يوجد بصورة حرجة في الجو الشمسي وفي الغازات البركانية، كما يوجد في الغلاف الجوي الأرضي ولكن بنسبة ضئيلة جداً أقل من واحد بال مليون ( 1 ) نسبة حجمية.

### 5-3- الاستخدامات الحالية للهيدرجين

للهيدرجين استخدامات عديدة ، إضافة لكونه وسليطاً ممتازاً لتخزين الطاقة، فهو يستخدم في المجالات التالية:

- 1- في الصناعات الكيميائية: إنتاج الأمونيا (النشادر) وهي المادة الأولية لصناعة الأسمدة.
- 2- في الصناعات البتروكيميائية: تكرير النفط وإنتاج الميثanol وغيرها.
- 3- في الصناعات الغذائية والدوائية: هدرجة الزيوت ومواد التجميل وغيرها.
- 4- في الصناعات الإلكترونية: إنتاج أنيف النواقل والألياف البصرية وغيرها.
- 5- في عمليات التعدين وصناعة الزجاج المقسى.
- 6- في تبريد المولدات الكهربائية في محطات التوليد الكبيرة، حيث يستخدم الهيدرجين وسيط تبريد عالي الأداء.
- 7- في توليد الطاقة الحرارية بحرقه المباشر في مراجل المحطات الحرارية.
- 8- في برامج الفضاء وقوداً دفعياً للصواريخ، وفي الأغراض العسكرية كالغواصات وغيرها.
- 9- في مفاعلات الاندماج النووي (nuclear fusion reactors) وقوداً نووياً.
- 10- في توليد الطاقة الكهربائية بواسطة الخلايا الوقودية Fuel Cells والتي تعد تقنية حديثة وفعالة لاستعادة الطاقة المخزنة في الهيدرجين، وستنطرق لها بالتفصيل في الفصول اللاحقة.

تقدر حالياً النسبة المستهلكة من الهيدرجين المنتج عالمياً بحوالي 50% في إنتاج الأمونيا و37% في مصافي تكرير النفط و8% في إنتاج الميثanol والباقي (حوالي 6%) للاستخدامات الأخرى المذكورة آنفاً [43].

## 5-4- إنتاج الهيدروجين Hydrogen Production

هناك ست طرائق معروفة في الوقت الحاضر لإنتاج الهيدروجين وهي :

(1) الطريقة الحراروكيميائية Thermochemical Method

(2) الطريقة الكهروكيميائية Electrochemical Method

(3) الطريقة الضوئية الكهروكيميائية Photo electrochemical Method

(4) الطريقة الحرارية Thermal Method

(5) الطريقة الضوئية البيولوجية Photo biological Method

(6) الطريقة البيوكيميائية Biochemical Method

وفيما يلي عرض لكل من هذه الطرق الست:

### 5-4-1- الطريقة الحراروكيميائية لإنتاج الهيدروجين

يتم إنتاج الهيدروجين بهذه الطريقة من أنواع الوقود الأحفوري (الغاز أو النفط أو الفحم الحجري) عند درجات حرارة مرتفعة نسبياً (900°C - 1200°C)، حيث يجري تحويل الهيدروكربونات ( $C_mH_n$ ) الموجودة فيها إلى مزيج غازي غني بالهيدروجين وذلك باستخدام البخار للأصناف الخفيفة كالغاز الطبيعي Natural gas والنفط Naphtha، وتشتمي عملية التحويل عند ذلك بإعادة التشكيل بالبخار (steam reforming)، أو باستخدام الهواء (الأكسجين) للأصناف الثقيلة كالزيت التقيل (heavy oil) وبقية المشتقات الائتمان (petroleum residuals) وتسمى عملية التحويل في هذه الحالة بـ **بالأكسدة الجزئية (partial oxidation)**:

أ - التحويل بإعادة التشكيل بالبخار

في هذه الطريقة - إعادة التشكيل بالبخار والتي تسمى مهنياً بـ " التكسير بالبخار" - يمزج الوقود الخفيف بالبخار عند درجة حرارة 900°C وباستخدام مادة حفازة مناسبة يجري التفاعل التالي :



والناتج عبارة عن مزيج غازي من الهيدروجين وأول أكسيد الكربون CO بشكل أساسي إضافة إلى ثاني أكسيد الكربون  $CO_2$  والميثان  $CH_4$  بنساب ضئيلة.

و عند استخدام الميثان تصبح معادلة التحويل بصورة خاصة كمالي :



وهكذا نرى أنه لإنتاج المتر المكعب الواحد من الهيدرجين يلزمنا في هذه الحالة طاقة لاتقال عن  $2.54\text{kWh}$ ، ولكن هذا نظرياً فعلياً نحتاج إلى أكثر من  $3\text{kWh}$  لإنتاج المتر المكعب الواحد من الهيدرجين [44].

#### بـ - التحويل بالأكسدة الجزيئية

في هذه الحالة يمرر الهواء على الوقود الثقيل المسخن إلى ماقوى  $1000^{\circ}\text{C}$  فيجري التفاعل التالي :



حيث يلاحظ أن عدد جزيئات CO الناتجة مرتفع، لذا فإن نسبة CO أكبر من نسبة  $\text{H}_2$  في المزيج الغازي الناتج وتجاور  $50\%$  مقابل  $35\%$  للهيدرجين مقارنة بـ  $10\%$  لـ CO و  $75\%$  للهيدرجين الناتجة في الحالة الأولى - حالة إعادة التشكيل بالبخار للوقود الخفيف .

وهكذا نرى أن عملية إعادة التشكيل للوقود الخفيف ذات مردود أعلى من حيث كمية الهيدرجين المنتج بالمقارنة مع عملية الأكسدة الجزيئية للوقود الثقيل إضافة إلى كونها أبسط من حيث التنفيذ وأقل من حيث التكاليف، لذا فقد تم التوجه إلى استخدام الأصناف الخفيفية من الوقود وبخاصة الغاز الطبيعي أو الميثان لإنتاج الهيدرجين، وقد أصبحت هذه العملية - إعادة التشكيل بالبخار - الطريقة الأكثر انتشاراً في مختلف أنحاء العالم لإنتاج الهيدرجين، حيث يشكل الهيدرجين المنتج بهذه الطريقة أكثر من 48% من إجمالي إنتاج الهيدرجين في العالم تليها عملية الأكسدة الجزيئية للمشتقات النفطية الثقيلة بنسبة حوالي 30% وبعدها عملية تغويز الفحم (الأكسدة الجزيئية للفحم الحجري) بنسبة لا تزيد عن 16% من إجمالي الإنتاج العالمي للهيدرجين [43].

وبهذا تكون الطريقة الحراروكيميائية هي الطريقة السائدة حول العالم بإنتاج مايزيد عن 94% من إجمالي الهيدرجين المنتج في العالم.

يمكن أيضاً تطبيق عملية الأكسدة الجزئية على الفحم لتحويله إلى غاز CO الذي بدوره يحول إلى هيدرجين في عملية لاحقة، وتسمى عملية تحويل الفحم هذه إلى غاز ستغويز الفحم coal gasification ويجري ذلك بإمرار الهواء على الفحم المسخن حتى  $^{\circ}\text{C}$  1200 فيحصل التفاعل التالي [43]:



كما يمكن تطبيق عملية الأكسدة الجزئية على الفحم باستخدام البخار بدلاً عن الهواء، حيث يمرر البخار على الفحم المسخن إلى أعلى من  $^{\circ}\text{C}$  1250 لنحصل على التفاعل التالي :



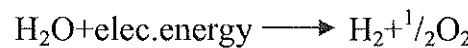
إن غاز CO الناتج عن أي من عمليات التحويل المذكورة أعلاه منتج ملوث غير مرغوب فيه، لذا يلزم معالجته والاستفادة منه بتحويله إلى هيدرجين وذلك باستخدام بخار الماء أيضاً ولكن عند درجة حرارة أقل ( $^{\circ}\text{C}$  500-300 مئوية حسب نوع المحفز) وفق التفاعل التالي:



وتسمى عملية التحويل هذه بالتحويل الإزاحي shift conversion يجري بعدها فصل  $\text{CO}_2$  في عملية غسيل لاحقة للحصول على الهيدرجين الخالص. مما سبق نرى أن عملية إنتاج الهيدرجين من الفحم الحجري عملية معقدة وذات تكاليف عالية بالإضافة إلى مردودها المنخفض من حيث كمية الهيدرجين الناتجة لذا لا يلتجأ إليها إلا في حال عدم توافر الغاز أو النفط بتكليف معقولة .

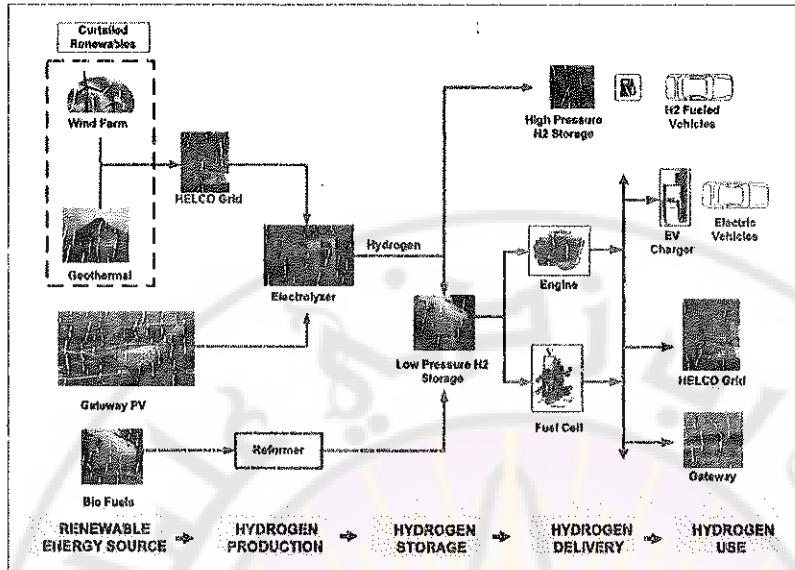
#### 5-4-5 - الطريقة الكهروكيميائية لانتاج الهيدرجين

تعتمد هذه الطريقة على التحليل الكهربائي للماء water electrolysis لانتاج الهيدرجين ، وهي طريقة قديمة ومعروفة منذ بداية القرن التاسع عشر باستخدام التيار الكهربائي المستمر لتحليل الماء إلى مركبتيه الهيدرجين والأكسجين :



والمزية الرئيسية لهذه الطريقة في إنتاج الهيدرجين أنها لا تسبب إصدار أي ملوثات، فهي عملية صديقة للبيئة خالية من الكربون (carbon-free) ، كما أنها تنتج هيدروجينًا ذا نقاوة عالية (أعلى من 99%) وكذلك الأكسجين الناتج. وهناك مزية أخرى لطريقة التحليل الكهربائي هذه وهي أن الهيدروجين المنتج يمكن أن يولّد بضغط عال نسبياً (حتى 30atm أو أكثر) وبذلك يغني عن استخدام الوسائل الميكانيكية الازمة لتخزينه تحت ضغط عال أو يقلل من الطاقة المصروفة على تخزينه ويخفض من تكاليف عملية التخزين.

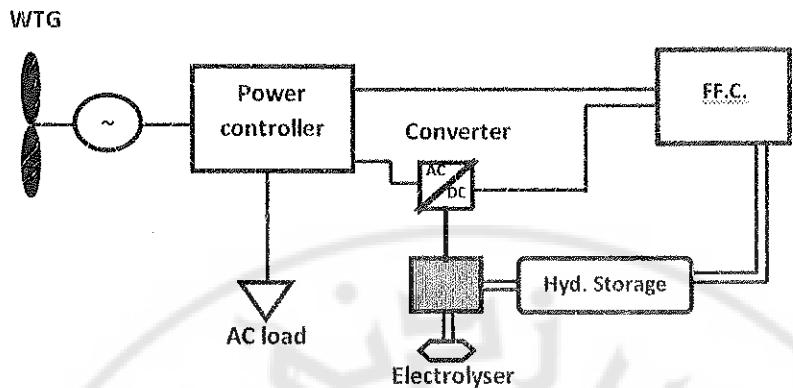
أما عيوب هذه الطريقة فهي أنها تتطلب قدرًا كبيراً من الطاقة الكهربائية أكثر من 4.5 كيلو واط ساعي لكل متر مكعب من الهيدروجين [43]، كما أنها تتطلب مصدرًا وفيراً من المياه إذ تحتاج إلى حوالي 0.8 لتر من الماء لكل متر مكعب من الهيدروجين، لذا تعد هذه الطريقة مرتفعة الكلفة إذا ما قورنت بالطريقة الحراروكييمائية، ولهذا السبب فإن استخدامها مازال محدوداً (نسبة الهيدروجين المنتج في الوقت الحاضر بهذه الطريقة لا يتجاوز ـ 5% من إجمالي الإنتاج العالمي للهيدروجين)، إلا أنها تبقى الطريقة الأفضل من وجهة نظر الحفاظ على البيئة، وهذه مزية مهمة جداً في هذا الوقت الذي بلغت فيه معدلات التلوث البيئي حد الخطر، كما أنها تعد الطريقة المثلثة لإنتاج الهيدروجين عند توافر إمكانات استغلال مصادر الطاقات المتعددة في توليد الطاقة الكهربائية الازمة لتحليل الماء، ويبين الشكل (5-1) مصادر الطاقات المتعددة التي يمكن الاستفادة منها في إنتاج الهيدروجين.



الشكل (1-5): إنتاج الهيدروجين باستغلال مصادر الطاقات المتجددة

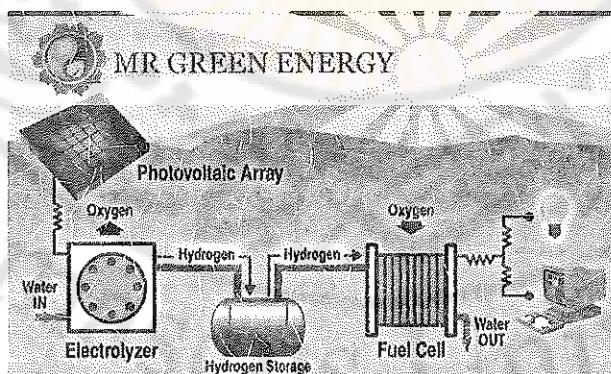
إن أكثر مصادر الطاقات المتجددة استغلالاً في الوقت الحاضر هما طاقة الرياح والطاقة الشمسية وذلك بفضل التقدم الكبير الحاصل في تطوير تقنيات توليد الطاقة الكهربائية من هذين المصادرين.

ففي حال نظم التوليد الريحي ، وبخاصة تلك المنفردة غير المرتبطة بالشبكة العامة (stand-alone) يمكن استغلال الطاقة الكهربائية الفائضة خلال أوقات التوليد الأعظمي في تحليل الماء لإنتاج الهيدروجين وتخزينه ليعاد استخدامه في خلايا الوقود وتوليد الطاقة الكهربائية من جديد. إن ذلك يخدم بديلاً ممتازاً صديقاً للبيئة عن المدخلات أو مجموعات الديزل لتأمين احتياجات الطلب على الطاقة في أوقات السرعات المتبدلة للرياح، ويبين الشكل (5-2) مخططاً رمزاً لهذا النظام والذي يسمى " بالنظام الريحي - الهيدروجيني " .



الشكل (5-2) : مخطط رمزي لنظام ريعي - هيدروجيني

أما في حال النظم الكهروشمسية PV-Systems ف تكون الطاقة الكهربائية الملتقطة أعظمية في منتصف النهار، في حين يكون الطلب الأعظمي على الطاقة في الصباح الباكر أو المساء الباكر، وعليه فإن وجود آلية لتخزين الطاقة الكهربائية الفائضة عن الطلب في وسط النهار أمر عقلاني وضروري لتغطية الطلب على الطاقة في أوقات الاستهلاك الأعظمي، وأفضل وسيلة في هذا السياق هي التخزين بالهيدروجين مع خلايا الوقود - التخزين بتحليل الماء لإنتاج الهيدروجين الذي يعاد استخدامه في خلايا الوقود - كما يظهر الشكل (3-5)، ويسمى هذا النظام الهجين عندئذ " بالنظام الشمسي - الهيدروجيني" ، كما يدعى الهيدروجين المنتج من تحليل الماء باستخدام الطاقة الشمسية "بالهيدروجين الشمسي" (solar hydrogen).



الشكل (3-5) : مخطط رمزي لنظام شمسي - هيدروجيني

## أنواع محلات الماء Types of Water Electrolyzers

تصنف أجهزة التحليل الكهربائي للماء - أو اختصاراً محلات الماء - عادة حسب نوع الكهربait، والأنواع التي تم تطويرها حتى الآن هي ثلاثة [43]:

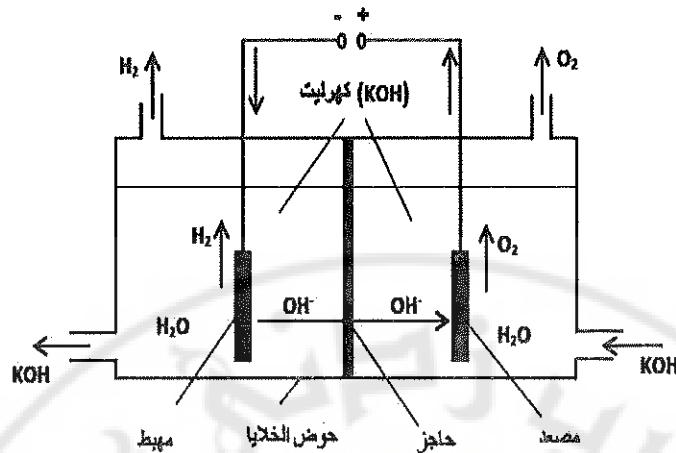
- 1- محلات ذات المحلول القلوي Alkaline Electrolyzers
- 2- محلات ذات الغشاء البوليمرية Polymer (PEM) Electrolyzers
- 3- محلات ذات الأكسيد الصلب Solid oxide Electrolyzers

إن النوع الأكثر استخداماً على نطاق تجاري واسع هو النوع الأول ذو المحلول القلوي (ذو الكهربait القلوي)، حيث أن النوع الثاني البوليمرية مازال، على الرغم من تفوقه بتحمله كثافات تيار عالية، محدود الانتشار بسبب حاجته إلى ماء عالي النقاوة وإلى مواد حفازة من المعادن النبيلة noble غالياً الثمن كالبلاتين، أما النوع الثالث فمازال قيد البحث والتطوير .

### محلات الماء القلوية Alkaline Water Electrolyzers

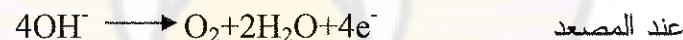
لا تختلف بنية محلات الماء القلوية عن البنية الأساسية لأي خلية كهروكيميائية، فهي تتكون من قطبين (الكترودين) : مصعد Anode ومهبط Cathode وكهربait Electrolyte بينهما، يضاف إلى ذلك المادة المحفزة Catalyst المناسبة.

الكهربait في هذا النوع هو محلول قلوي من هيدروكسيد البوتاسيوم KOH بتركيز 35-25% ويعمل هذا الكهربait ناقلاً لحاملات الشحنة وهي أيونات (شوارد) الهيدروكسيل (OH<sup>-</sup>) ، والشكل (4-5) يوضح مبدأ عمل الخلية القلوية لتحليل الماء.



الشكل (4-5) : مبدأ عمل الخلية القلوية لتحليل الماء

حيث يستقبل المهبط الإلكترونات الآتية من المصعد عن طريق المنبع وبمساعدة المحفز يتحلل الماء المحاط به محراً الهيدروجين وأيونات الهيدروكسيل  $\text{OH}^-$  التي ترحل عبر الكهربائي إلى المصعد حيث تتفكك هناك - بفعل المحفز أيضاً - مطلاة الأكسجين ومشكلة الماء ومحررة الإلكترونات كما في التفاعلات التالية:



وهكذا نرى أن الهيدروجين ينطلق عند المهبط والأكسجين عند المصعد، لذا يلزم وجود حاجز في وعاء التحليل ليفصل بين المصعد والمهبط فصلاً تماماً كما هو مبين في الشكل (4-5).

إن كمية الطاقة اللازمة لتطبيقاتها حتى يحدث هذا التفاعل يجب أن تكون أكبر من تغير الانفعالي  $\Delta H$  والذي يقدر حسب الجداول الستيكومترية بـ 286KJ/Mole. وتنوقف قيمتها بشكل كبير على نوع المادة الحفازة وعلى نقاوة الماء المستخدم، كذلك يجب أن لا يقل التوتر المستمر المطبق عن 1.482V، وعملياً يكون أكبر من ذلك لتعطية

هبوطات التوتر الناتجة عن مختلف المقاومات الداخلية لمكونات المحلل، ويكون للمحللات العملية عادةً بين 1.75 و 2 فولت.

تصنع أقطاب محللات القلوية من خليط أكسيد النيكل والكوبالت للمصدع، والنيكل أو الفولاذ غير القابل للصدأ للمهبط، أما للمحفزات فلا حاجة لاستخدام معادن ثمينة غالبية الشمن وإنما تكفي الخلائط ذات الأساس النيكلي.

تعمل محللات الماء القلوية عادة عند درجة حرارة من  $70^{\circ}\text{C}$  إلى  $90^{\circ}\text{C}$ ، وبفضل عملها تحت الضغط (حتى 30atm) لتقليل الطاقة المستهلكة في عمليات تخزين الهيدرجين.

هذا وللمحللات القلوية شكلان من التصميم:

أ- التصميم وحيد القطبية monopolar ويأخذ شكل الخزان tank-type.

ب- التصميم ثنائي القطبية Bipolar ويأخذ شكل الفلتر filter-press.

في البداية كانت محللات الماء ذات التصميم الأول الأحادي القطبية هي السائدة، لكن مع تطور تقانة محللات الماء تم التحول إلى التصميم الثنائي القطبية حتى أصبح هو الغالب في معظم التطبيقات العملية حول العالم.

يمتاز التصميم الثنائي عن الأحادي أنه يسمح بالحصول على كثافات تيار أعلى لذات التوتر المطبق ويمكن أن تصل إلى  $3500 \text{ A/m}^2$  في حين أن محللات الأحادية تعمل عادة في المجال  $1000-2000 \text{ A/m}^2$ ، لذا فإن حجم محللات الثنائية يكون أصغر لذات الطاقة الإنتاجية من الهيدرجين [43].

الميزة الثانية للتصميم الثنائي هو إمكانية إنتاج الهيدرجين تحت ضغط أعلى بكثير من الضغط الجوي مما يسهل عملية تخزينه ويقلل من تكاليفها. والسيئة الوحيدة لهذا التصميم الثنائي هي وجوب إيقاف كامل المحلل عن العمل عند الحاجة لصيانة أو إصلاح أي خلية منه، وذلك بخلاف التصميم الأحادي.

### 3-4-5- الطريقة الضوئية الكهروكيميائية لإنتاج الهيدرجين

لاتختلف هذه الطريقة في مبدأ عملها عن طريقة التحليل الكهربائي للماء إلا في مصدر الطاقة اللازمة للتحليل، فمصدر الطاقة هنا ضوء الشمس بدلاً عن التيار الكهربائي،

حيث تتفاعل الفوتونات مع المواد الكيميائية المذابة في الماء منتجةً أصنافاً مفعمة deactivated species)، والتي بدورها تعود إلى حالتها الأولى (activated species) بتحرير الهيدروجين من الماء، وباختصار إنها عملية تحليل كهربائي للماء بطاقة مستمدة من الشمس.

إن إنتاج الهيدروجين بهذه الطريقة مازال محدوداً، ولكن يتوقع لها انتشاراً أوسع نظراً لمزيتها المهمة وهي اعتمادها على مصادر الطاقات المتتجدد وعدم حاجتها إلى حرق وقود أحفورى.

#### 4-4-5 - الطريقة الحرارية لإنتاج الهيدروجين

تعتمد هذه الطريقة في إنتاج الهيدروجين على التفكك الحراري للماء thermal decomposition of water)، ويتم ذلك بأسلوبين [45]: الأول بتعريض الماء بشكل مباشر إلى حرارة عالية  $2500^{\circ}\text{C}$  وما فوق فيتفكك الماء إلى مركبته الهيدروجين والأكسجين، وهذه العملية تبدو غير مرغوبة على الغالب بسبب حاجتها إلى درجات حرارة عالية لضمان الحصول على نسبة مقبولة من الماء المفك (أعلى من  $3000^{\circ}\text{C}$ ) وبالتالي على كمية معقولة من الهيدروجين الناتج، كما أن توفير المواد التي تتحمل هذه الدرجات العالية من الحرارة أمر مكلف وليس بالسهل.

الأسلوب الثاني لتفكيك الماء بهدف الحصول على هيدروجين هو باستخدام عملية قوس البلازما (plasma arc process) حيث يسخن الماء إلى حوالي  $5000^{\circ}\text{C}$  بواسطة الحقل الكهربائي فيتفكك إلى النواتج:  $\text{H}_2\text{O}$  ,  $\text{HO}_2$  ,  $\text{OH}$  ,  $\text{O}_2$  ,  $\text{O}$  ,  $\text{H}_2$  ,  $\text{H}$  ويمكن الحصول على نسبة هيدروجين ناتج من هذا المزيج حتى 50% حجماً، إلا أن هذه العملية مكلفة جداً إذا ما قورنت بالطرق الأخرى لإنتاج الهيدروجين، لذا فهي محدودة الانتشار.

#### 5-4-5 - الطريقة الضوئية البيولوجية لإنتاج الهيدروجين

تستخدم هذه الطريقة ضوء الشمس مصدراً للطاقة، فهواسطة عملية التركيب الضوئي (photosynthetic) بعض الكائنات الحية كالطحالب التي تنمو في المياه تمنص ضوء

الشمس وتشكل أنزيمًا (enzyme) خاصاً يعمل على تحفيز عملية التفكك الضوئي الكيميائي (photochemical decomposition) للماء لتحرير الهيدروجين [45]. هذه الطريقة محدودة الانتشار أيضاً بسبب انخفاض معدل إنتاجها للهيدروجين و حاجتها إلى مساحات واسعة لإنتاج كميات معقولة من الهيدروجين، ولكن تبقى لها ميزة أنها صديقة للبيئة لانتساب في إصدار أي ملوثات إضافة إلى انخفاض تكاليفها نسبياً.

#### 6-4-5 الطريقة البيوكيميائية لإنتاج الهيدروجين

وتعتمد على تخمير مختلف أنواع المخلفات الحيوية (الذفایات البشرية والحيوانية والنباتية) بمعزل عن الهواء anaerobic digestion وبإضافة أنواع معينة من المخمرات تطلق هذه المخلفات بعد زمن معين مزيجاً غازياً غنياً بالهيدروجين [43]. تعد هذه الطريقة غير فعالة لإنتاج الهيدروجين فهي تحتاج إلى أحجام ومساحات كبيرة ولا تنتج الهيدروجين إلا بمعدلات منخفضة وتتطلب وقتاً كبيراً لإنتاج كميات معقولة منه، لذا فقد اقتصر استخدامها على المناطق الزراعية النائية حيث الحاجة إلى الطاقة محدودة.

## 5- تخزين الهيدرجين Hydrogen Storage

يعد الهيدرجين، كما ذكر سابقاً، من أفضل وسائل تخزين الطاقة الكهربائية، فالطاقة المراد تخزينها بواسطته تصرف على إنتاجه بإحدى الطرق المذكورة في الفقرة السابقة ومن ثم لا بد من تخزينه لفترة معينة لحين الحاجة إلى استعادة الطاقة المخزنة فيه.

يجري تخزين الهيدرجين في الوقت الحاضر على ثلاثة أشكال:

- على شكل غاز مضغوط compressed gas
- على شكل سائل مبرد cryogenic form
- على شكل هيدrides المعادن metal hydrides

ولكن قبل أن ننطرق لكل من أشكال التخزين هذه بالتفصيل يلزم أولاً تعرف خصائص التعامل مع الهيدرجين وماينجم عنه من مشكلات وأخطار لأخذها بالحسبان وتجنبها في أثناء إجراء عمليات التخزين والاستعادة [45].

- الهيدرجين عنصر خفيف جداً بل هو أخف العناصر على الإطلاق وأبسطها، وذرته صغيرة جداً مما يجعله يتسرّب حتى من أشد الأوعية أحكماماً.
- الهيدرجين غاز شديد الفعالية فهو عندما يلامس سطوح المعادن تتكثّف جزيئاته إلى ذرات تخترق المعدن لصغرها الشديد، وهذا يتسبّب في جعل المعادن هشة.
- الكثافة (الكتلة الحجمية) للهيدرجين وهو في حالته الغازية صغيرة جداً، لذا فكثافة الطاقة التي يمكن تخزينها فيها منخفضة جداً.
- الهيدرجين السائل يتبخّر بمعدل عالٍ نسبياً مهما كان عزل الخزان وإحكامه جيداً.
- للهيدرجين قدرة عالية على النفاذ من خلال الأغشية والمواد المسامية، لذا فهو مادة خطيرة على الإنسان ويلزم اتباع متطلبات الأمان في أثناء التعامل معه، وتعد تعليمات الأمان المتبعة في وكالة ناسا (NASA) الأميركيّة المرجع الأساس في هذا المجال، حيث تنص على:

- إن الهيدرجين الغاز يشتعل بلهب غير مرئي ذي درجة حرارة عالية، لذا يجب الحذر الشديد من أن يلمس الجلد. وأبسط طريقة للكشف عنه لدى الشك بوجوده هو استخدام مكبسه جافة من الفرش ذات ذراع طويلة.
- إن الهيدرجين السائل يؤدي بسبب حرارته المنخفضة جداً إلى حدوث ماليسما بالحرق البارد وهو أشد تأثيراً وضرراً من الحرق العادي بالحرارة، لذا يجب تجنب التلامس معه وأخذ الحفطة بارتداء الملابس الواقية المخصصة لذلك.
- إن الهيدرجين من أكثر العناصر نفاذية، لذا يجب ارتداء الملابس الواقية وكذلك القفازات وواقيات الوجه عند عمليات التعبئة أو التفريغ أو عند إجراء عمليات الصيانة.
- إن استنشاق الهيدرجين خطير ويسبب حروقاً في الجهاز التنفسي.

#### 5-5-1- تخزين الهيدرجين على شكل غاز مضغوط

إن عملية تخزين الهيدرجين بحالته الغازية ذات كثافة طاقة تخزين منخفضة جداً وذلك بسبب صغر كثافته (كتلته الحجمية)، فالقيمة الحرارية للهيدرجين الغاز أقل بحوالي 3 مرات من الغاز الطبيعي حجماً ( $10.8/32\text{MJ/m}^3$ )، لذا للحصول على كثافة طاقة تخزين معقولة لابد من ضغط الهيدرجين وبالتالي تخزينه في أوعية ضغط vessels. تتوقف شدة ضغط الهيدرجين على حجم الاستخدام وطبيعته، حيث تكون بحدود 130-150 بار للاستخدامات الصغيرة وترتفع إلى 500 بار للاستخدامات ذات المقاييس الكبيرة.

فللاستخدامات بالمقاييس الصغيرة كالسيارات والحافلات والمشاريع الصناعية الصغيرة يخزن الهيدرجين عادة في اسطوانات من الفولاذ غير القابل للصدأ عند ضغط حوالي 140 بار، سعة الاسطوانة الواحدة 40 ليترأً وزونها حوالي 10 كغم منها فقط نصف كيلو غرام هيدرجين، وبهذا نرى أنه نتيجة لضغط الهيدرجين إلى bar 140 قد أصبحت كثافته تساوي  $12.5 \text{ gr/lt}$  أي أنها زادت بحوالى 140 مرة مما يرفع كثافة

الطاقة المخزنة بذات النسبة تفريباً (ارتفعت إلى 1500KJ/lt بعد أن كانت 10.8 KJ/lt).

ولزيادة الضغط بهدف زيادة كثافة الطاقة المخزنة أكثر من ذلك فقد تم تطوير مواد خفيفة تحمل ضغوطاً أكبر كالألمنيوم المقوى بالألياف الزجاجية والمركبات الكربونية، وبذلك يمكن رفع الضغط حتى 350 بار [43].

أما لاستخدامات الكبيرة كمحطات توزيع الهيدرجين والمشاريع الصناعية الكبيرة فتستخدم خزانات كبيرة فوق أو تحت أرضية بضغط يتراوح ما بين 100 و 500 بار وسعة تصل إلى 250 متراً مكعباً.

تقدر الطاقة اللازمة لضغط الهيدرجين بحدود 10% من الطاقة المخزنة فيه، هذا مع الانتباه إلىأخذ تكاليف الإشاء لنظام الضغط والتخزين بالحساب عند إجراء الدراسات الاقتصادية.

#### 5-5-2- تخزين الهيدرجين في الحالة السائلة

لزيادة كثافة الطاقة المخزنة في الهيدرجين بنسب كبيرة جداً يُعد إلى تمييعه liquefaction بتبريده إلى 253 درجة مئوية وعندما تصبح كثافته بحدود 70gr/lt أو أكثر قليلاً وترتفع كثافة الطاقة المخزنة إلى lt 8400KJ/lt بعد أن كانت 10.8KJ/lt في حالة الغاز غير المضغوط، وبالمقارنة الوزنية مع البنزين نجد أن كثافة الطاقة التي يمكن تخزينها في الهيدرجين السائل أكبر بحوالي 2.8 مرة منها للبنزين (120MJ/kg للهيدرجين السائل مقابل 43MJ/kg للبنزين)، لذا فالهيدرجين السائل يعد أكثر أنواع الوقود تركيزاً للطاقة بعد الوقود النووي [43].

إن معظم استخدامات الهيدرجين السائل لأبحاث الفضاء والأغراض العسكرية، فالهيدرجين السائل يعد الوقود المثالي لدفع الصواريخ، كما يستخدم وقوداً عالي الكثافة الطاقية لخلايا الوقود التي تمد المركبات الفضائية وكذلك الغواصات البحرية بالطاقة الكهربائية والماء النقي، فعند ناسا (NASA) الأمريكية أكبر خزان للهيدرجين السائل سعته 3 ملايين لتر.

إن العيب الرئيس لتخزين الهيدرجين بهذه الطريقة هو صعوبة تبريده إلى هذه الدرجة المتدينة من الحرارة (قرب الصفر المطلق) والحفظ عليها، فهي عملية معقدة و تستهلك كمية كبيرة من الطاقة تقدر بأكثر من ثلث الطاقة المخزنة (حوالى 35%) علاوة على تكاليفها التأسيسية المرتفعة.

كما أن معدل التبخر العالي للهيدرجين السائل يضيف مشكلة أخرى لهذه الطريقة من التخزين، ويجب اتخاذ كل التدابير لنقليل معدل التبخر هذا إلى أقل حد ممكن.

### 5-5-3- تخزين الهيدرجين في الحالة الصلبة

تستخدم في هذه الطريقة مساحيق المعادن لتخزين الهيدرجين على شكل هيدrides المعادن metal hydrides، وهناك الكثير من المعادن أو خلائطها يمكنها أن تمتلك الهيدرجين وتتحدد معه مشكلة هيدrides ومطلقة قدرًا معيناً من الطاقة.

ومن أفضل الخلائط لهذا الغرض الخلائط التالية:  $Mg - Ni$  ,  $La - Ni$  ,  $Fe - Ti$  يخزن الهيدرجين هنا بحقنه تحت الضغط في الخزان المملوء بالجزيئات الدقيقة (بشكل مسحوق) من هذه الخلائط، وسبب جعل المادة على شكل مسحوق هو تكبير سطحها المعرض لتيار الهيدرجين، فيرتبط الهيدرجين بالخلطه مشكلاً الهيدريد ومطلقاً كمية معينة من الحرارة التي علينا أن نعيدها للهيدрид المتشكل إذا أردنا استعادة الهيدرجين منه، وذلك بتتسخينه بواسطة وشيعة كهربائية مثلاً.

إن كثافة الطاقة المخزنة بهذه الطريقة منخفضة نسبياً إذا مقارنت بالطريقتين السابقتين، ولكن من الممكن الوصول عند ظروف مناسبة من الضغط والحرارة إلى كثافات عالية تصاهي طريقة التخزين بالهيدرجين الغاز المضغوط كما في الطريقة الأولى، ولكن تمتاز عنها بدرجة أمانها العالية.

هذا ويجب الانتباه إلى أن حجم المادة (الخلطه) سيزداد قليلاً بسبب امتصاصها للهيدرجين، كما أن وزنها سيزداد أيضاً.

الميزة الأساسية لهذه الطريقة أنها أكثر طرائق تخزين الهيدرجين أماناً، إذ إنه لا يتسرّب أي هيدرجين في الحالات الطارئة وعند الحوادث، كما أن فعالية الهيدرجين تقل كثيراً بعد ارتباطه مما يخفّف من مشكلات احتوائه والتعامل معه.

أما عيوب هذه الطريقة فهي الوزن الثقيل للمعدن، وهذا يعد مشكلة حقيقة بالنسبة للتطبيقات المتنقلة كالسيارات والمركبات الأخرى. والعيب الثاني هو ارتفاع تكاليفها بسبب ارتفاع ثمن المعادن وخلائطها وتكاليف تحضيرها كالسحق والضغط وغيره.

## 5-6- الخلايا الوقودية Fuel Cells

الخلايا الوقودية وسيلة فعالة صديقة للبيئة لاستعادة الطاقة المخزنة في الهيدروجين على هيئة طاقة كهربائية. ونظرًا لكونها تقنية حديثة للتوليد المباشر للطاقة الكهربائية وبكفاءة عالية فقد تم التركيز عليها في الفترات أدناه.

### 5-6-1- مقدمة تاريخية تعريفية بخلايا الوقود

إن مفهوم خلية الوقود (Fuel Cell) ليس بالحديث العهد، فخلايا الوقود معروفة منذ القرن التاسع عشر عندما كشفها العالم البريطاني وليام غروف Sir William Grove في عام 1839.

وعلى الرغم من قدم مفهوم خلية الوقود لتوليد الطاقة الكهربائية مازال الكثيرون يعودونها من المصادر غير التقليدية للطاقة، ويعزو بعضهم ذلك إلى أن أوساط الصناعة التقليدية والجديدة للطاقة لم تألفها بعد، إذ إن جوهر تقانة خلية الوقود يعتمد على التقانات الكيميائية وعلم المواد، في حين تعتمد المصادر التقليدية لتوليد الطاقة الكهربائية على الطواهير الفيزيائية والهندسية الميكانيكية والكهربائية بصورة عامة.

تمتاز خلية الوقود، بالمقارنة مع التقنيات الأخرى لتوليد الطاقة الكهربائية، بكونها سليمة نسبياً (غير ضارة) من الناحية البيئية، فهي قليلة الاصدارات الملوثة ومعدومة الضجيج ويمكنها العمل على مختلف أنواع الوقود الأحفوري، هذا بالإضافة إلى كونها ذات فعالية عالية، فقد وصل مردود الجيل الأول منها إلى حوالي 40% ومن المتوقع أن يرتفع مردود الجيل الثاني والثالث منها إلى 50%-60%.

لهذا السبب اكتسبت خلية الوقود تأييداً واسعاً في الآونة الأخيرة وبدأت بتأمين الطاقة الكهربائية لمجموعات صغيرة من المتاجر والمشافي والفنادق ومحطات الاتصالات وغيرها من المؤسسات التجارية والخدمة في كل من اليابان والولايات المتحدة الأمريكية. وفي مجال الاستخدامات ذات الاستطاعات الكبيرة دخلت خلية الوقود حيز التطبيق في مؤسسات الكهرباء، فهناك العديد من مؤسسات الكهرباء اليابانية كشركة كهرباء طوكيو (Tepco) وشركة كهرباء كنساي (Kepco) وشركة كهرباء تشوبو

(Cepco) التي بدأت باستخدام خلايا الوقود في مراكز التوزيع كوسيلة فعالة تمكن من تأجيل إجراء التوسعات الكبيرة اللازمة لمواجهة تطور الطلب على الطاقة، وبالتالي تعفي المؤسسة، ولو لفترة من الزمن، من صرف التكاليف الكبيرة لإجراء التوسعات اللازمة من خطوط ومحولات وقواطع الخ. إذ أصبح بالإمكان الآن إقامة مجموعات من خلايا الوقود في مراكز التوزيع يمكن أن تتعدي حتى 20MW. كذلك من المتوقع في المستقبل القريب أن تحل خلايا الوقود المتطورة ذات الاستطاعات الأكبر محل العنفات التقليدية في محطات التوليد المركزية.

لقد اقتصر استخدام خلايا الوقود - في البدايات وبسبب ارتفاع ثمن المواد اللازمة لبنيتها - اقتصر استخدامها على الأغراض الخاصة كتوليد الطاقة الكهربائية في المركبات والملاكيات الفضائية. فمنذ السنتين من القرن الماضي تستخدمنا الولايات المتحدة الأمريكية لتزويد المركبتين الفضائيتين جيميني وأبولو (Gemini and Apollo) بالطاقة الكهربائية. كما أن اليابانيين بدأوا باستخدامها لتغذية محطات الراديو. غير أن تطوير مواد أرخص ومصادر للهيدرجين أقل كلفة قد مهد الطريق لاستخدام خلايا الوقود بحجم أكبر. فعلى سبيل المثال فإن التقدم في علم المواد قد مكن من استخدام الأقطاب الكربونية المطلية بكميات ضئيلة من المعادن النادرة لتحمل الأقطاب المحمولة بالبلاتين، وقد أدى ذلك إلى خفض التكاليف بصورة ملحوظة.

إن استخدام خلايا الوقود مصدرًا مباشرًا للطاقة الكهربائية باستطاعات تصل حتى 50kW للمركبات الفضائية وللروافع الشوكية وغيرها من الآلات المتحركة بما فيها السيارات الكهربائية قد أثبت جدارته على مدى سنين طويلة كبديل جيد للمدخرات العادية، كما أن الخلايا القلوية (AFC) مازالت تستخدم منذ السنتين وعلى نطاق واسع في الغواصات كمصدر للطاقة الكهربائية باستطاعات حتى 200kW.

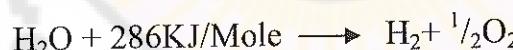
لم يقتصر المستقبل الواعد لخلايا الوقود بالطبع على هذه التطبيقات محدودة الاستطاعة، إذ بلغت الاستطاعات المركبة من وحدات خلايا الوقود حداً يتجاوز ذلك بكثير، وخاصة المحطات الثابتة (stationary power plants)، فالاهتمام الجاد بخلايا الوقود والتركيز على تطويرها لاستخدامات الثابتة وبخاصة لمحطات التوليد

التجارية قد بدأ في أواخر السنتينيات من القرن الماضي في الولايات المتحدة، وذلك من خلال العديد من برامج التطوير. أما في اليابان فقد بدأت الأبحاث باتجاه تطوير خلايا الوقود لصالح مؤسسات توليد الكهرباء مع بداية مشروع (ضوء القمر moonlight) هذا البرنامج الذي كانت تديره وتشرف عليه وزارة الصناعة والتجارة اليابانية (MITI) وبتمويل يتجاوز 25Million دولار سنوياً كان هدفه الأساسي تطوير الطرز الرئيسية لخلايا الوقود وتخفيض تكاليف صنعها بالإضافة إلى اختبار مدى ملائمتها للاستخدام في مؤسسات الكهرباء (على الشبكات)، أو عند المستهلك مصدرأً للتوليد الاحتياطي أو المشارك (cogeneration).

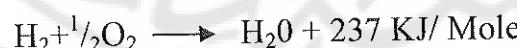
#### 5-6-2- البنية الأساسية ل الخلية الوقود ومبدأ عملها

الخلية الوقودية هي في جوهرها خلية كهروكيميائية تقوم بتحويل الطاقة الكيميائية للوقود المغذي لها (كالهيدرجين أو الغاز الطبيعي) بشكل مباشر إلى طاقة كهربائية. لا تختلف البنية الأساسية ل الخلية الوقود عن البنية الأساسية لأي خلية كهروكيميائية أخرى كالمدخرات وأجهزة التحليل الكهربائي للماء، فهي تتكون من قطبين: مصعد ومهبط وكهربليت بينهما بالإضافة إلى المتممات.

أما مبدأ عملها فهو عكس مبدأ عمل وعاء التحليل الكهربائي للماء، حيث يقوم هذا الأخير بتحليل الماء إلى مركبيه الهيدروجين والأكسجين ماصاً (مستهلكاً) قدرأً معيناً من الطاقة الكهربائية:



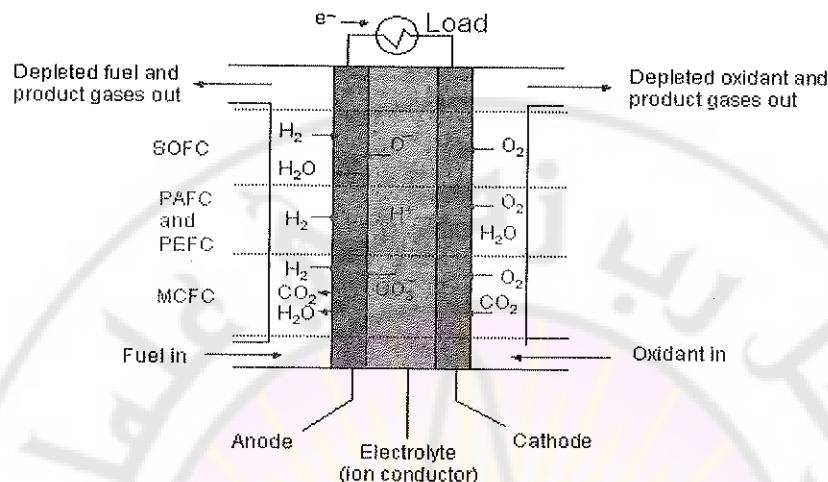
بينما تقوم خلية الوقود بتركيب الماء من الهيدروجين والأوكسجين مصدرة قدرأً معيناً من الطاقة الكهربائية:



و عليه فإن ل الخلية الوقود ناتجاً ثانوياً مفيداً جداً وهو الماء النقي، والذي يكون إما بحالته السائلة ماءً ساخناً أو على هيئة بخار، وذلك حسب درجة حرارة عمل الخلية كما

سنرى لا حقاً لدى دراسة الطرز المختلفة لخلايا الوقود. والشكل التالي رقم (5-5) يبين المخطط التمثيلي لبنيّة خلية الوقود ومبدأ عملها:

#### FC REACTANTS AND PRODUCTS

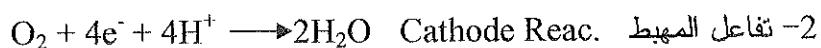
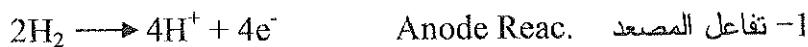


الشكل (5-5): البنية الأساسية لخلية الوقود

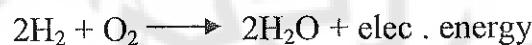
تجري تغذية خلية الوقود بالهيدروجين من جهة المصعد (anode) لذا يسمى هذا القطب "قطب الوقود" (fuel electrode) وعنه تتفصل إلكترونات الهيدروجين عن بروتوناته بفعل المحفز مخلفة أيونات (شوارد) الهيدروجين  $H^+$  ترحل بدورها عبر الكهرباء إلى المهدب، أما الإلكترونات فلا يمررها الكهرباء فتضطر إلى التدفق عبر دارة خارجية (الحمل مثلاً) لتهبط على القطب الآخر للخلية وهو المهدب (cathode)، وهذا ما يشكل مرور التيار الكهربائي الذي يزودنا بالطاقة الكهربائية.

أما عند القطب الآخر - المهدب - فتغذى الخلية بالهواء لتوفير الأكسجين اللازم لعملها، لذلك يسمى المهدب هنا "قطب الهواء" (air electrode)، وعند هذا القطب تعود الإلكترونات الهيدروجين الآتية عبر الدارة الخارجية للتدمج مع أيونات الهيدروجين الآتية عبر الكهرباء، ومن ثم يتفاعل الهيدروجين الناتج عن هذا الاندماج مع الأكسجين الآتي من هواء التغذية ليشكل الماء.

وعليه فإنه يمكن اعتبار التفاعل الكهروكيميائي داخل الخلية مؤلفاً من قسمين: الأول عند المصعد والثاني عند المهبط:



والتفاعل الإجمالي للخلية:



الكهروليت Electrolyte كما هو معروف في الخلية الكهروكيميائية يجب أن يكون ناقلاً للأيونات (الشوارد)، وغير ناقل للإلكترونات.

### 3-6-5- طرز الخلية الوقودية F.C.Types

لقد حظيت الخلية الوقودية في الآونة الأخيرة باهتمام كبير من قبل المؤسسات والهيئات المعنية بصناعة الطاقة الكهربائية وتقنيات توليدها وتخزينها، فقد تم حتى الآن تطوير أكثر من تسع طرز (types) ذكر منها فيما يلي الطرز الأكثر استخداماً وانتشاراً على المستويين العملي والتجاري :

1- خلية الوقود القلوية AFC

2- خلية الوقود ذات الحمض الفوسفوري PAFC

3- خلية الوقود ذات الكربونات المصهورة MCFC

4- خلية الوقود ذات ذات الغشاء البوليمرية PEMFC

5- خلية الوقود ذات الأكسيد الصلب SOFC

وهناك عدة طرز مازالت قيد التطوير أو الاختبار لثبات ذات كالطراز -DMFC خلية الميثanol المباشر، والطراز ZAFC - خلية الزنك / الهواء، والطراز RSOFC - خلية الأكسيد الصلب العكوسية، والطراز SAFC - خلية الحمض الصلب.

وهكذا نرى أن تسمية الطراز لخلية الوقود تعود في المقام الأول إلى طبيعة كهربائيتها، فالخلايا القلوية كهربائتها وسط قلوي من هيدروكسيد البوتاسيوم (KOH)، وخلايا الحمض الفوسفورى كهربائتها حمض الفوسفور المركز، وخلايا الكربونات المصهورة كهربائتها مزيج من كربونات الليثيوم والبوتاسيوم المصهورة وهكذا ... كما تصنف الخلايا الوقودية حسب درجة حرارة عملها، فهناك خلايا الوقود ذات درجات الحرارة المنخفضة (حتى  $200^{\circ}\text{C}$ ) مثل:

- خلايا الوقود القلوية AFC

- خلايا حمض الفوسفور PAFC

- خلايا الغشاء البوليمرى PEMFC

وخلايا درجات الحرارة المرتفعة (أعلى من  $600^{\circ}\text{C}$ ) مثل:

- خلايا الكربونات المصهورة MCFC

- خلايا الأكسيد الصلب SOFC

تحتاج خلايا درجات الحرارة المنخفضة عادةً إلى مادة محفزة (catalyst) للمساعدة على إقلاع التفاعلات وتسريعها سواءً على المصعد أو على المهبط، وذلك بخلاف الخلايا عالية الحرارة، فالحرارة المرتفعة لل الخلية كافية لبدء التفاعلات وتسريعها. والميزة الثانية لخلايا درجات الحرارة المرتفعة أنها لا تحتاج إلى معالج خارجي external reformer للوقود، ففضل درجات الحرارة العالية تصبح نظم الخلايا الوقودية قادرة على معالجة الوقود الهيدروكربوني (الوقود الأحفورى) داخلياً واستخلاص الهيدرجين اللازم لعمل الخلية، وبذلك يكون معالج الوقود في هذه الحالة من النوع (in – built).

أما خلايا درجات الحرارة المنخفضة فتحتاج إلى معالج وقود خارجي (منفصل) ليقوم بتزويدها بالهيدرجين اللازم، وذلك للمحطات الثابتة، أما لوحدات خلايا الوقود المستخدمة في التطبيقات المتنقلة (калссият и الأجهزة المحمولة) فتستخدم خزانات هيدرجين صغيرة مضغوطة محمولة تسمى "بالاسطوانات أو خراطيش الهيدرجين".

إن الجيل الأول من خلايا الوقود وهم الطرازان AFC و PAFC يستخدم كهربائياً سائلاً ولتحاشي مشكلات الكهرباء السائل من تسرب وغيره طور طراز ثالث كهربائي غير سائل وهو الطراز PEMFC تلاه الطراز الرابع MCFC، لذا فإن هذين الطرازيين يعدان من الجيل الثاني لخلايا الوقود.

أما الجيل الثالث لخلايا الوقود فهي خلايا الأكسيد الصلب SOFC التي تتلافى معظم مساوئ ومشكلات الأجيال السابقة، ونظراً لطبيعة الكهرباء الصلبة السيراميكية فإنه يمكن رفع درجة حرارة عمل الخلية إلى  $1000^{\circ}\text{C}$  أو أعلى من ذلك، الأمر الذي يؤدي إلى رفع مردود هذا الطراز والحصول على كثافة استطاعة عالية من الخلية بالإضافة إلى إمكانية الوصول إلى استطاعات مركبة كبيرة تصل إلى رتبة الميجا واط من هذا الطراز.

إن الطراز الأول وهو الخلايا القلوية مازالت، على الرغم من قدمها، تُستخدم حتى الآن حيث لها استخداماتها الخاصة في مركبات الفضاء وفي الغواصات والأغراض العسكرية الأخرى.

أما خلايا الحمض الفوسفورني وخلايا الكربونات المصهورة فقد ازدهرت صناعتها وانتشر استخدامها بشكل واسع ما بين السبعينيات والتسعينيات من القرن الماضي، ولكن بسبب عيوبها ومشكلاتها الكثيرة تضاعل استخدامها ولم تعد تصنع منذ نهاية القرن الماضي.

وعليه فالخلايا المستخدمة في الوقت الحاضر هي خلايا الغشاء البوليمرية PEMFC للتطبيقات الصغيرة والنقلة، وخلايا الأكسيد الصلب SOFC للتطبيقات الكبيرة والثابتة كمحطات التوليد العادمة والهجينة، لذا سنأخذ هذين الطرازيين بشيء من التفصيل في الفقرات المقبلة.

### 5-6-3-1- خلايا الوقود القلوية (AFC)

تعد الخلايا القلوية أول طراز تم تطويره وتطبيقه عملياً، فمنذ ستينيات القرن الماضي تستخدمه وكالة الفضاء الأمريكية (ناسا) لتزويد المركبات والمأكاك الفضائية بالطاقة

الكهربائية وبالماء النقي، بعد ذلك امتد استخدامه إلى الغواصات والمنشآت البحرية والعسكرية الأخرى.

الكهربيليت في هذه الخلايا عبارة عن محلول قلوي (على غرار وعاء التحليل الكهربائي) وهو هيدروكسيد البوتاسيوم (KOH)، فعند تشغيل الخلية تنتقل حاملات الشحنة، وهي هنا أيونات الهيدروكسيل ( $\text{OH}^-$ ) المحررة عند المهبط بمساعدة المحفز، لتسرى عبر الكهربيليت إلى المصعد فتقابل مع هيدروجينه (هيدروجين التغذية) مشكلة الماء ومقطقة الإلكترونات التي ستتدفق إلى الدارة الخارجية محدثة التيار الكهربائي اللازم. أما عند المهبط فيجري تفاعل الأكسجين الداخل إليه (أكسجين التغذية) مع الماء ومع الإلكترونات الآتية من المصعد (عبر الدارة الخارجية) ليشكل أيونات الهيدروكسيل التي ستنتقل بدورها إلى المصعد عبر الكهربيليت وهكذا كما في التفاعلات التالية:



والتفاعل الإجمالي للخلية :



المزاية الفريدة لهذا الطراز من الخلايا الوقودية أنها يمكن أن تعمل عند درجة حرارة الغرفة (25°C) إذا كان تركيز الكهربيليت مناسباً، ويمكن رفع درجة الحرارة عملها حتى 100°C أو أعلى، وذلك بهدف رفع مردودها الذي قد يصل إلى 45%.

إن أهم عيوب الخلايا القلوية أنها حساسة جداً لغاز  $\text{CO}_2$  الذي قد يكون موجوداً في الوقود أو الهواء المغذي إليها، فهذا الغاز عند دخوله الخلية سرعان ما يتفاعل مع كهربيليتها ويسبب تلوثه ومن ثم تلفه الأمر الذي يؤدي إلى انخفاض أداء الخلية بشكل كبير، ولتجنب ذلك يجب أن تغذى هذه الخلية بهيدروجين نقي وأكسجين نقي أيضاً. ومن الملوثات الأخرى التي تخفض من أداء هذه الخلية هو أول أكسيد الكربون CO والميثان  $\text{CH}_4$ ، لذا يفضل أن تعمل الخلايا القلوية في بيئة مغلقة كالفضاء الخارجي أو تحت الماء، وذلك لضمان حسن أدائها وارتفاع مردودها.

لهذه الأسباب - أسباب التلوث المبنية أعلاه - ولارتفاع تكاليف هذا الطراز لم ينتشر استخدام الخلايا القلوية في وسائل النقل ولا في التطبيقات الأرضية الأخرى، وإنما انحصر استخدامها في برامج الفضاء ولأغراض العسكرية الأخرى كما ذكر سابقاً.

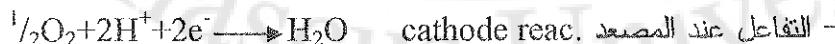
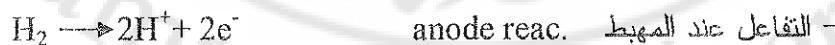
### 5-6-3-2- خلايا الوقود ذات الحمض الفوسفوري

#### Phosphoric Acid F.C(PAFC)

يأتي هذا الطراز من الخلايا الوقودية في المرتبة الثانية من التسلسل التاريخي لتطوير خلايا الوقود، فنظراً لما ذكر أعلاه من محدودية مجال استخدام الخلايا القلوية وعدم ملائمتها للاستخدامات الأرضية كان لابد من تطوير طراز يصلح للعمل بأداء جيد في البيئات المفتوحة ويقاوم الملوثات التي قد يتعرض لها عند استخدامه، فكان هذا الطراز - PAFC - أول طراز توفر على المستوى التجاري.

إن كهربايت هذا الطراز من حمض الفوسفور المركز ( $H_3PO_4$ ) والذي يصبح ناقلاً جيداً للأيونات في درجة حرارة أعلى من  $200^\circ C$ ، لذا يفضل أن تكون درجة حرارة عمل هذا الطراز في المجال  $180 - 220$  درجة مئوية، حيث أنه بانخفاض درجة الحرارة عن ذلك تنخفض الناقلة الأيونية لحمض الفوسفور، وبالتالي ينخفض أداء الخلية.

حاملات الشحنة في خلايا حمض الفوسفور هي أيونات الهيدروجين ( $H^+$ ) التي تنشأ عند المصعد نتيجة لتفكك ذرات هيدروجين التغذية بفعل المحفز، ومن ثم تسرى عبر الكهربايت إلى الميهبط، أما الإلكترونات فتتدفق عبر الدارة الخارجية (الحمل) مشكلة تياراً كهربائياً مفيداً ومتوجهة إلى الميهبط، حيث تعود هذه الإلكترونات وتتجدد هناك مع أيونات الهيدروجين (الآتية من المصعد عبر الكهربايت) ومع أكسجين هواء التغذية لتشكيل الماء كما في التفاعلات التالية :



والتفاعل الإجمالي للخلية :

تصنع أقطاب هذا الطراز من الغرافيت والمادة الحفازة من البلاتين، أما القالب الذي يحمل الكهربait فهو من كاربيد السيليكون.

مميزات خلية حمض الفوسفور وعيوبها:  
المزايا

1) خفيفة التأثير بغاز ثاني أكسيد الكربون  $\text{CO}_2$  وبمركبات الكبريت التي قد تكون موجودة في الوقود المغذي إليها.

2) بنيتها بسيطة وكهربaitها عالي الاستقرار بالمقارنة مع الحموض الأخرى.

3) حرارة تشغيلها منخفضة نسبياً، وبذلك يمكننا استخدام المواد الإنسانية الشائعة من أجل بناء المتممات في المحطات .Balance of Plant (POB)

4) حرارة عملها المنخفضة تعطي مرونة كبيرة في تصميم نظام التحكم بالحرارة.

5) يمكن الاستفادة من حرارة عادمتها في تطبيقات التوليد المشارك (cogeneration) وبذلك يرتفع مردودها الإجمالي وقد يصل إلى 70%.

المساوى

1) تتطلب استخدام مادة حفازة غالية الثمن (البلاتين).

2) تتطلب معالجة وقود خارجية كاملة (Refomer مع Shifter) لمعالجة غاز  $\text{CO}$ ، وذلك للحصول على أداء جيد.

3) تفرض طبيعة حمض الفوسفور استخدام مواد حاوية غالية الثمن ذات مقاومة عالية للتآكل.

4) تتطلب إعادة تزويد المصعد بالمادة الحفازة.

### 3-3-3-3-6-5 - خلية الكربونات المصهرة (MCFC)

يستخدم في هذه الخلية نوع من الكهربait يستطيع نقل أيون الكربونات ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) كأملاح الكربونات القلوية، إذا فكهرليت هذا الطراز عبارة عن مزيج من كربونات الليثيوم مع كربونات البوتاسيوم أو كربونات الليثيوم مع كربونات الصوديوم، وهذا المزيج لا يصبح نافلاً جيداً لأيون الكربونات إلا عند رفع درجة حرارته إلى ماقوقة

600°C، حيث عند هذه الدرجة تتصهر الكربونات لتشكل ملحًا مائعاً ذا ناقلية أيونية عالية، لذا فإن درجة حرارة عمل هذه الخلايا يجب أن تكون ما بين 600°C و 650°C. فعند المصعد (قطب الوقود) يتفاعل هيدروجين الوقود المغذي إلى الخلية مع أيونات الكربونات الآتية من المهبط مشكلاً الماء وغاز CO<sub>2</sub> ومطلقاً الإلكترونات التي ستتدفق عبر الدارة الخارجية محدثة تياراً كهربائياً ومتوجهة إلى المهبط (قطب الهواء) حيث تتفاعل هناك مع أكسجين هواء التخفيض ومع غاز CO<sub>2</sub> المغذي إلى المهبط أيضاً مشكلة أيونات الكربونات CO<sub>3</sub><sup>-2</sup> التي بدورها سترحل عبر الكهربيليت إلى المصعد لتنقل مع هيدروجينه وهكذا كما في التفاعلات التالية:



التفاعل الإجمالي للخلية:



يصنع المصعد في هذا الطراز من النيكل، أما المهبط فيصنع من أكسيد النيكل.

مميزات خلايا الكربونات المصهرة وعيوبها:

المزايا

- 1) لا تحتاج لاستخدام مواد حفازة غالية الثمن .
- 2) لا تحتاج إلى معالج خارجي للوقود (external reformer) ففضل ارتفاع درجة حرارة التشغيل بإمكان هذه الخلايا معالجة الغاز الطبيعي داخلياً لاستخلاص الهيدروجين اللازم، لذا بإمكان هذا الطراز العمل مباشرة على الغاز الطبيعي.
- 3) بإمكانها العمل على أنواع الوقود منخفضة القيمة الحرارية كغاز CO وعوادم المصانع وغيرها.
- 4) بساطة العناصر المتممة لمحطات التوليد (BOP).
- 5) يمكن الاستفادة من حرارة عادمها في توليد بخار ذي ضغط عال يستخدم في العديد من الأغراض الصناعية والخدمية.

6) ذات مردود مرتفع نسبياً يصل إلى 50% وذلك بفضل ارتفاع درجة حرارة عملها.

7) يمكن استغلال حرارة عادمها في تسخين المياه للأغراض الخدمية أو توليد البخار للأغراض الصناعية وعندما يرتفع المردود الإجمالي للنظام حتى 80%. المساوى

1) تبدي الكربونات مما يستدعي إعادة تزويد الخلية بالكربونات بشكل دائم.

2) تتطلب وجود مصدر لـ  $\text{CO}_2$  لتزويد المهبط به، وعادةً ما يعاد استخلاصه من عادم المصعد الأمر الذي يتطلب عناصر متممة إضافية، كما يستلزم وجود تحكم مستمر في كمية  $\text{CO}_2$  الموجودة في هواء التغذية للخلية.

3) ذات إقلاع بطيء بسبب حاجتها للحرارة العالية اللازمة لصهر الكربونات.

4) تمتلك مقاومات داخلية عالية مما يحد من كثافة الاستطاعة الكهربائية المنتجة من الخلية.

5) تتأثر بشدة بالمركبات الكبريتية، فالمصعد لا يتحمل نسبة تلوث أعلى من 5ppm.

6) عمرها الفني قصير نسبياً.

#### 4-3-6-5 - خلايا الغشاء البوليمرية

##### Polymer Electrolyte Membrane F.C (PEMFC)

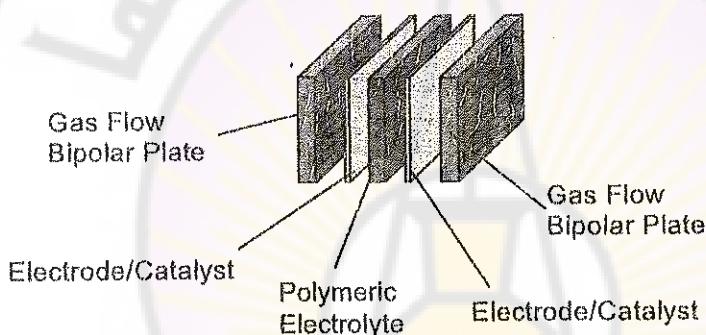
ويسمى هذا الطراز أيضاً بـ "خلايا غشاء التبادل البروتوني Proton F.C" (Proton Exchange Membrane) ولعل هذا الطراز هو أنساب طرز الخلايا الوقودية للتطبيقات الصغيرة (حتى 200kW) وبخاصة لاستخدامات المتنقلة وعلى رأسها وسائل النقل، فقد شاع في الآونة الأخيرة استخدام خلايا PEM في السيارات الكهربائية، كما شاع استخدام هذا الطراز في تطبيقات نظم الطاقات المتتجدددة لاستعادة الطاقة المخزنة على هيئة هيدروجين شمسي (solar hydrogen).

الكهربائيت في هذا الطراز هو عبارة عن غشاء بوليمرية صلب (غشاء بلاستيكي رقيق) يحتوي على حمض السلفون المفلور الرطب أو المميه (Hydrated)

أو أي بوليمر مشابه يقوم بنقل البروتون (أيون الهيدرجين  $H^+$ ).

إن عملية ترطيب (تمبيه) هذا الكهربايت ضرورية للحفاظ على ناقلة جيدة للبروتونات، فـأداء الخلية يتـأثر بشكل كبير بكمية الماء المتـواجدة في الغشاء، لـذا يجب أن لا يكون معدل تـبخر هذا الماء أكبر من معدل تـزوـيـده، الأمر الذي يستـوجـب أن تكون درجة حرارة عمل الخلية أقل من  $C^{100}$ ، والمجال الأفضل لها هو بين 60 و80 مئوية. تصنـع أقطـاب هذا الطراز من الغرافـيت المضاف إليه البلاطـين كـمادة حـفـازـة.

يبـين الشـكـل (5-6) التـركـيـة الأـسـاسـيـة لـخـلـيـة وـقـود مـفـرـدـة مـنـ هـذـاـ طـراـزـ ، فـالـمـكونـاتـ الأساسية لها هي (من الـيسـارـ إـلـىـ الـيمـينـ):



[44] الشـكـل (5-6): المـكونـاتـ الأساسية لـخـلـيـة

(1) صـفـيـحةـ جـريـانـ الغـازـ (gas flow plate) وـتـكـونـ إـمـاـ شـائـيـةـ التـخـديـدـ (bipolar) أيـ أنـ مـجـارـيـ جـريـانـ الغـازـ مـحـفـورـةـ عـلـىـ وجـهـيهـاـ إـذـاـ كـانـتـ خـلـيـةـ ضـمـنـ الـكـدـسـ in-stack cell، أوـ أحـادـيـةـ التـخـديـدـ فـيـ حـالـ خـلـيـةـ المـفـرـدـةـ single cell أوـ كـانـتـ خـلـيـةـ فـيـ بـداـيـةـ الـكـدـسـ أوـ نـهـاـيـةـ.

ولـهـذـهـ الصـفـيـحةـ عـدـدـ وـظـائـفـ فـيـ الـخـلـيـةـ:

- تـوزـيعـ الـوقـودـ (الـهـيـدـرـجـينـ) وـالـهـوـاءـ الدـاخـلـ إـلـىـ الـخـلـيـةـ.
- الفـصلـ بـيـنـ الـخـلـيـاـ فـيـ الـكـدـسـ الـواـحـدـ.

- تجميع التيار لتوصيله إلى الدارة الخارجية.
- ترطيب الغازات.
- جريان الماء في الخلية.
- الحفاظ على الخلية مبردة.

(2) القطب الأول (المصعد) مع المحفز electrode/catalyst .

(3) الكهربائي البوليمرية polymeric electrolyte .

(4) القطب الثاني (المهبط) مع المحفز electrode/catalyst .

وبعد ذلك تأتي صفيحة جريان الغاز ثم الخلية التالية، وهكذا.

أما آلية التفاعل في هذا الطراز فهي كما في خلايا الحمض الفوسفورى، حيث تتفاكم ذرات الهيدروجين المغذي إلى المصعد (بفعل المحفز) إلى بروتونات وإلكترونات. تتجه البروتونات والتي هي عبارة عن أيونات الهيدروجين ( $H^+$ ) عبر الكهربائي إلى المهبط، أما الإلكترونات فتتفاكم عبر الدارة الخارجية إلى المهبط محدثة بذلك تياراً كهربائياً مفيداً. وعند المهبط حيث تجري تغذية الخلية بأكسجين الهواء تعود الإلكترونات الهيدروجين الآتية من المصعد عبر الدارة الخارجية لتقديم مع أيوناته الآتية عبر الكهربائي ومن ثم تتفاعل مع الأكسجين المغذي لتشكل الماء ، ويمكن تلخيص ذلك بالتفاعلات:



- التفاعل عند المصعد Anode Reac.



- التفاعل الإجمالي للخلية:



ميزات خلايا الغشاء البوليمرية وعيوبها:

المزايا

1) كهربائيتها الصلبة يجنبنا مشكلات التسرب والتآكل وإعادة التزويد الأمر يتطلب بالكهرباء السائل.

- (2) حرارة عملها المنخفضة تسمح بعملية إقلاع سريعة.
- (3) تنتج كثافة استطاعة مرتفعة نسبياً إذا ما قورنت بالطرز السابقة.
- (4) عمرها الفني طويل نسبياً.

#### المساوي

- (1) المجال الضيق لحرارة التشغيل يجعل من عملية التحكم الحراري (thermal managing) صعبة خصوصاً عند الكثافات العالية للاستطاعة.
- (2) تحتاج آلية تحكم دقيقة بكمية الماء، حيث يلزم تحقيق ترطيب كافٍ للكهربايت البوليمرى دون أن يتشرب كمية كبيرة من الماء.
- (3) تتأثر بشكل كبير بأحادي أكسيد الكربون CO الذي يؤدي إلى خفض مستوى أدائها وهذا يتطلب أن تتم عملية معالجة الوقود بشكل كامل خارج الخلية.
- (4) وقودها يقتصر على الهيدروجين، لذا فإنها تحتاج إلى معالج خارجي للوقود (external reformer) في حال الوحدات الكبيرة، أما الوحدات الصغيرة فتتغذى من عبوات الهيدروجين الجاهزة.
- (5) تحتاج لمواد حفازة غالية الثمن مثل البلاتين.

#### 5-6-3-5 - خلايا الأكسيد الصلب (SOFC)

ينتمي هذا الطراز إلى فئة الخلايا ذات الكهربايت الصلب عالية الحرارة، ولعله يعد من أفضل طرز الخلايا المتاحة على المستوى التجاري باستطاعات كبيرة (من رتبة الميجا واط).

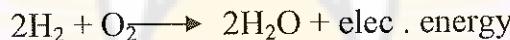
تتميز هذه الخلايا بأنها تعمل بفعالية عالية عند الضغط الجوي ودرجات حرارة عالية تصل إلى  $1000^{\circ}\text{C}$ ، وتنعم بمقدرة جيدة على معالجة الغاز الطبيعي بإعادة تشكيله (natural gas reforming)، وعلى الاستخدام المباشر لأنواع الوقود الملوثة كغاز CO والغاز المستخلص من الفحم الحجري والمشتقات النفطية التقليدة. كذلك فإن درجة حرارة الغازات العادمة لهذه الخلايا تتراوح ما بين  $600^{\circ}\text{C}$  و $900^{\circ}\text{C}$ ، مما يسمح بالاستفادة من هذه الحرارة العادمة في توليد إضافي للطاقة الكهربائية (عن

طريق FC/GT) أو لأغراض التدفئة والتسيين أو لتوليد البخار للأغراض الصناعية الأمر الذي يؤدي إلى رفع مردودها الإجمالي إلى أكثر من 85%.

يتكون الكهربايت في هذا الطراز من طبقة خزفية (سيراميكية) رقيقة جداً من أكسيد المعادن، غالباً ماتكون من أكسيد الزركونيوم المثبت بأكسيد الإيتريوم ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) وعند درجة حرارة أعلى من  $600^\circ\text{C}$  تصبح هذه المادة ناقلة للأيونات السالبة مثل أيونة الأكسجين ( $\text{O}^{2-}$ ) ، لذا فإن المجال الأفضل لعمل هذه الخلايا هو مابين  $800^\circ\text{C}$  و  $1000^\circ\text{C}$  مئوية، حيث يصبح كهربايتها هذا ناقلاً جيداً لأيونات الأكسجين التي تنتج عند المهبّط بسبب التقاط كل ذرة من ذرات أكسجين التغذية إلكترونات من الإلكترونات الآتية إلى المهبّط من المصعد عبر الدارة الخارجية. إن أيونات الأكسجين السالبة هذه الناتجة عند المهبّط تتجه عبر الكهربايت الصلب إلى المصعد لتفاعل عنده مع هيدروجين التغذية مشكلة الماء ومطافحة إلكترونات تتدفق عبر الدارة الخارجية متوجهة إلى المهبّط كما هو مبين في التفاعلات الآتية:



والتفاعل الإجمالي للخلية:



يُصنّع قطب المصعد في هذا الطراز من سبيكة سيراميكية مسامية من التيلكيل مع أكسيد الزركونيوم ( $\text{Ni-ZrO}_2$ )، أما قطب المهبّط فيُصنّع من منغنيت اللانثانيوم المعجون بالسترونتيوم ( $\text{Sr-doped La MnO}_3$ ) وهي مادة مسامية أيضاً.

تصمم خلايا الأكسيد الصلب على شكلين:

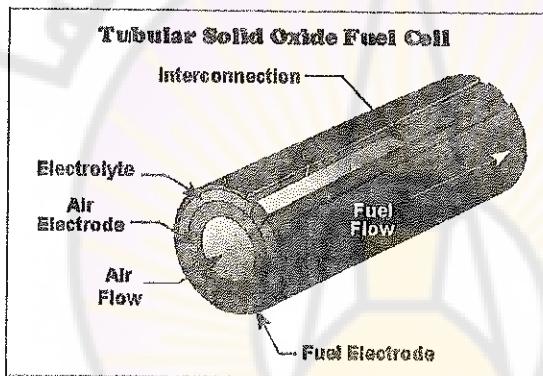
- الأنبوبي .tubular

- المستوي .planar

### أ- التصميم الأنبوبي

في هذا التصميم يتم تصنيع كل من المهبط والمصعد بشكل أنبوبي متمحور بحيث يكون المهبط من الجهة الداخلية والمصعد من الجهة الخارجية تفصل بينهما طبقة الكهرباء.

يمرر الهواء داخل الأنوب، في حين أن الوقود يمرر بشكل ملائم للسطح الخارجي للمصعد. وبهذا التصميم لخلية لن تحتاج لمواد إحكام فهو قادر على الفصل بين الوقود والهواء، لكنه يعاني من مشكلتين أساستين: ارتفاع تكاليف التصنيع وانخفاض كثافة الاستطاعة. ويبين الشكل (7-5) المكونات الأساسية لهذا التصميم وهي:



الشكل (7-5): المكونات الأساسية ل الخلية SOFC بتصميم أنبوبي [46]

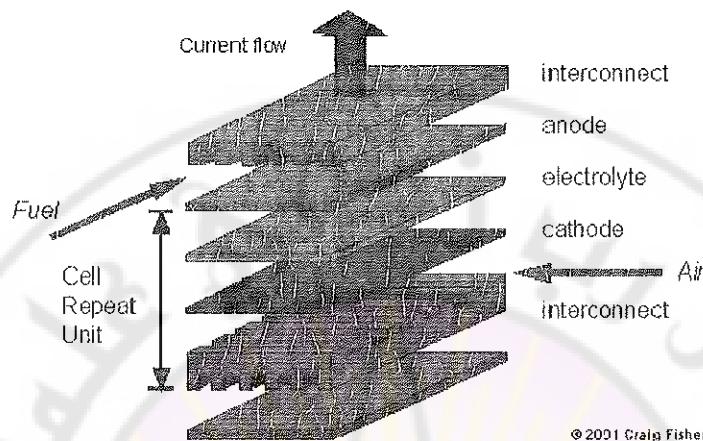
- قطب الوقود fuel electrode وهو المصعد،
- الكهرباء electrolyte
- قطب الهواء air electrode وهو المهبط،
- صفيحة التوصيل البيني interconnection.

### ب- التصميم المستوي

يتميز هذا التصميم لخلايا الأكسيد الصلب ببساطة تصنعيه وتركيبيه مما يسهل عمليات التكديس والتوصيل بين الأقطاب إضافة إلى تعدد سبل تمرير الغازات (باتجاه واحد أو اتجاهين متعاكسين أو بشكل متضاد)، والمزية الأهم هي انخفاض المقاومة الداخلية

بسبب قصر طريق حاملات الشحنة الأمر الذي يتيح الحصول على كثافة استطاعة أعلى مقارنة بالتصميم الأنبوبي.

ويبين الشكل (8-5) المكونات الأساسية لهذا التصميم وهي:



الشكل (8-5): المكونات الأساسية لخلية SOFC بتصميم مستوي [46]

- المصعد، anode
- الكهربait، electrolyte
- المهبط، cathode
- صفيحة التوصيل البني، interconnect

ميزاًياً الأكسيد الصلب وعيوبها  
المزايا:

- 1) البناء السيراميكي الصلب للخلية يلغى مشكلات التسرب والتساكل.
- 2) إن طبيعة الكهربait السيراميكة الصلبة تسمح بتصميم الخلية بأشكال مختلفة مما يسهل عمليات تصنيعها وتطويرها.
- 3) إمكانية استخدام غاز CO كوقود بشكل مباشر.
- 4) إمكانية استخدام أنواع مختلفة من الوقود الأحفوري وحتى الملوثة منها وكذلك من المشتقات النفطية الثقيلة.

5) لاتحتاج إلى مادة حفازة، فدرجة الحرارة العالية للخلية كافية لإقلال عمليات التفاعل وتسريعها.

6) ذات مردود عالي بالمقارنة مع الطرز الأخرى ويصل إلى 55%.

7) تصلح للاستخدام في محطات التوليد المركزية الكبيرة والتوليد الموزع على السواء.

8) حرارة عادمها المرتفعة تسمح بتوليد إضافي للطاقة الكهربائية من خلال النظم الهجينة (FC/GT).

المتساوية:

1) درجة حرارة التشغيل العالية تفرض اعتبارات معينة على مواد بناء الخلية مما يرفع من تكاليفها.

2) مقاومة كهرليتها الأيونية كبيرة نسبياً مما ينعكس سلباً على أداء الخلية في أثناء تحميela وبخاصة عند كثافات التيار العالية.

3) بطئ الإقلاع بسبب ارتفاع درجة حرارة تشغيلها.

في نهاية هذا العرض الموجز لطرز الخلايا الوقودية نورد جدو لا بأهم خصائص هذه الطرز الخمسة المذكورة أعلاه (الجدول 1-5).

**الجدول (1-5): خصائص طرز الخلايا الوقودية**

الطرز						
PEMFC	SOFC	MCFC	PAFC	AFC		
غشاء التبادل البروتوني	أكسيد الزركونيوم المثبت بأكسيد البيريريوم	الكريبونات المصهورة	حمض الفوسفور	هيدروكسيد البوتاسيوم	الكهرولييت	
$H^+$	$O^{2-}$	$CO_3^{2-}$	$H^+$	$OH^-$	حاملات الشحنة	
95-60	1000-800	650-600	220-180	100-25	حرارة التشغيل °C	

$H_2$	$H_2, CO$ والهيدروكربونات	$H_2, CO$ والهيدروكربونات	$H_2$	$H_2$	الوقود
غاز الطبيعى، LPG، الميثanol والنفط والفتا	غاز الطبيعى، LPG، الميثanol، النفط وغاز الفحم	غاز الطبيعى، LPG، الميثanol، النفط وغاز الفحم	غاز الطبيعى، LPG، الميثanol والنفط	$H_2$	المادة الخام للوقود
45-35	55-50	50-45	45-35	45-35	مردود التوليد %
1KW-250KW	5KW-3MW	500KW-5MW	250KW-5MW	<1KW-100KW	الاستطاعات

#### 5-4-6-5 مزايا الخلايا الوقودية

يمكن تصنيف تطبيقات استخدام الخلايا الوقودية في مجالين رئيسيين:

- أ- مجال توليد الطاقة الكهربائية.
- ب- مجال النقل والمواصلات.

وفي كل من هذين المجالين تقدم خلايا الوقود مزايا عده بيئية وفنية واقتصادية بالمقارنة مع التقنيات التقليدية كوحدات التوليد الحرارية ومحركات الاحتراق الداخلي:

##### أ- في مجال توليد الطاقة الكهربائية

(1) بإمكانها العمل على أنواع مختلفة من الوقود الأحفوري (غاز طبيعى NG، غاز مسال LPG، فحم، بروبان، فتا وغيرها) كما يمكنها العمل على الوقود الحيوي (biofuel).

(2) تمتلك مردوداً عالياً، يصل إلى 55% في الطراز SOFC، نظراً لعدم خضوعها لقيود فوانين термодинاميك التي تحد من المردود الحراري، كما ويمكن أن يصل مردودها إلى 85% في محطات التوليد المشترك (CHP).

- (3) منخفضة الضجيج نظراً لعدم احتوائها على آلات دوارة فهي بديل ممتاز لوحدات الديزل خصوصاً في المناطق الأهلية وبهذه الميزة يمكن لخلايا الوقود العمل بالقرب من المستهلك وبخاصة في المشافي والفنادق.
- (4) تمتلك جاهزية عالية جداً تصل إلى 96% أعلى من أي تقنية من تقنيات الطاقة البديلة.
- (5) بما أنها تستخدم أنواعاً مختلفة من الوقود فإنها قابلة للاستخدام في أماكن متعددة مثل المصانع والمعامل وكذلك لتزويد المدن بالطاقة الكهربائية وغيرها من الأماكن المكتظة والريفية المنعزلة على حد سواء.
- (6) لا تحتاج إلى احتياطي (Backup) فهي ذات موثوقية عالية وتخدم مصدر احتياطياً موثقاً جداً كما أنها تصلح بذلك لتغذية مستهلكي الفئة الأولى.
- (7) عملية إقلاعها سهلة وسريعة فهي تصلح لتغذية أحمال الذروة والأحمال المتقطعة ولحالات الطوارئ وأزمات تأمين القدرة.
- (8) يمكن الاستفادة من حرارة عوادمها لتوليد الحرارة لأغراض التدفئة وتسخين المياه وكذلك لتوليد الطاقة الكهربائية.
- (9) من الممكن استخدامها في محطات التوليد المركزية بالإضافة إلى استخدامها في التوليد الموزع والتوليد المحيطي.
- (10) ذات زمن إنشاء منخفض.
- (11) تقدم طاقة كهربائية بنوعية عالية.
- (12) معدل انخفاض التوتر مع الزمن يتأثر التقادم ضئيل.
- (13) مردودها ضعيف التأثير بتغير الحمل فهي مناسبة جداً لمناطق الريفية والنائية حيث الفروقات بين الحمل الأعظمي والأصغرى كبيرة.
- (14) حاجتها للصيانة منخفضة جداً.
- (15) تمتاز بإمكانية جيدة لتنبيح الأحمال.
- (16) يمكنها العمل في الأنظمة المكشوفة أو المغلقة.
- (17) تمتاز بسرعة البناء والتركيب والوضع في الخدمة.

(18) تمتلك إمكانية التركيب في موديولات (modules) مما يجعل عملية التوسيع بسيطة وسريعة.

(19) لها قابلية ممتازة للتكامل مع نظم الطاقات المتعددة لتوليد الهيدرجين وتتخزينه.

(20) تبقى الميزة الأهم وهي انخفاض تلوثها للبيئة إلى حد كبير، فهي تعد من التقنيات النظيفة والمصدقة للبيئة، وذلك نظراً لارتفاع مردودها الذي سينعكس على نسبة الانبعاثات الملوثة الصادرة عنها.

#### بـ- في مجال وسائل النقل

(1) انخفاض الانبعاثات الضارة وكذلك الضجيج منخفض جداً.

(2) درجات حرارة عمل منخفضة وضغط منخفضة أيضاً.

(3) كثافة استطاعة خرج عالية وبالتالي حجم صغير نسبياً.

(4) متممات أقل وأبسط بالمقارنة مع المتممات الازمة لمحركات الاحتراق الداخلي .

(5) حاجة أقل إلى التهوية والتبريد.

(6) حاجة أقل إلى الصيانة والإصلاح.

(7) عمر فني طويل نسبياً.

### 5-5-6-5 - أداء الخلايا الوقودية F.C. Performance

للحصول على تشغيل أفضل لخلايا الوقود من الناحيتين الفنية والاقتصادية يلزم الإلمام الجيد بخصائص أداء هذه الخلايا عند الظروف المختلفة لعملها من حرارة وضغط وكثافة التيار المستجر منها.

سوف نركز عند دراسة أداء خلايا الوقود على الناحية الطافية والمحددات الكهربائية دون الغوص في التفاصيل الترموديناميكية لآليات تفاعلاتها الكهروكيميائية، كما سنقتصر في دراسة الأداء هذه على الطرازين الآخرين - خلايا الغشاء البوليمرية PEMFC وخلايا الأكسيد الصلب SOFC كونها الأكثر استخداماً وشيوعاً في الوقت الحاضر كما بيننا ذلك سابقاً.

### 5-6-1- أداء الخلية في حالة اللاحمل - توتر جيبس وتوتر نيرنست

إن القوة المحركة الكهربائية المنتجة في خلية الوقود والتي هي عبارة عن توتر الدارة المفتوحة لها ( $E_{o..c}$ ) تتلقى بظروف عمل الخلية من حرارة وضغط، إذ تعتمد قيمتها بشكل مباشر على مقدار تغير طاقة جيبس الحرّة (Gibbs free energy) للتفاعل الكهروكيميائي الحاصل ضمن الخلية، فهي تُحدّد من علاقـة توازن الطاقة التالية [47]:

$$\Delta G = -n.F.E_{o.c.}$$

ومنه:

$$E_{o.c.} = -\Delta G/nF \quad (1-5)$$

حيث:

$\Delta G$ : تغير طاقة الجيبس الحرّة وقدر بالجول لكل مول (J/Mol).

n: عدد الإلكترونات المشاركة في التفاعل والموجودة في كل مول من الوقود، وقيمتها للهيذرجين تساوي 2.

F: ثابت فاراديّ وهو يساوي 96487 كولون لكل مول من الإلكترونات.

$E_{o.c}$ : القوة المحركة الكهربائية المنتجة في الخلية عند درجة حرارة وضغط تشغيل معينين، وتقدر بالفولت، وهي التي يطلق عليها في بعض المراجع تسمية "التوتر المثالي" (ideal potential) للخلية.

ويمكن الحصول على قيمة  $\Delta G$  من تابع الحالة الحرارية التالي [47]:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (2-5)$$

حيث:

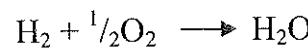
$\Delta H$ : تغير الانتالبي وهو يمثل الطاقة الحرارية الكلية المتاحة من التفاعل (J/Mol).

T: درجة حرارة التفاعل (K).

T: تمثل الطاقة الحرارية الصناعية والناتجة عن تغير انترافيسي الجملة.

$\Delta S$ : هي عبارة عن كمية الحرارة المنقولة إلى الوسط المحيط (J/Mol).

إن قيم  $\Delta H$  و  $\Delta G$  لتفاعلات الكهروكيميائية في الخلايا الوقودية تتعلق بكل من درجة حرارة وضغط تشغيل الخلية، وتعطى عادة في جداول خاصة، والجدول (2-5) يعطي هذه القيم لتفاعل:



وذلك عند الضغط الجوي ولدرجات حرارة تشغيل مختلفة [47]:

الجدول (2-5): قيم كل من تغير الانتالبي وتغير طاقة جيبس الحرارة عند درجات حرارة

مختلفة وعند ضغط 1atm

G (KJ/Mol)	H (KJ/Mol)	حالة $\text{H}_2\text{O}$ الناتج	درجة الحرارة (°C)
-228.6	-241.8	بخار (LHV)	25
-237.2	-285.9	ماء (HHV)	
-226.2	-242.3	بخار (LHV)	80
-233.7	-283.8	ماء (HHV)	
-223.9	-242.8	بخار (LHV)	130
-230.4	-282.1	ماء (HHV)	
-219.1	-243.8	بخار (LHV)	200
-198.1	-247.2	بخار (LHV)	600
-175.8	-249.4	بخار (LHV)	1000

والإشارة السالبة هنا لقيم  $\Delta H$  و  $\Delta G$  ناجمة عن كون تفاعلات الخلايا الوقودية تفاعلات مصدرة للطاقة (exoergic reactions).

### 5-1-1-5-6-5 - توتر جيبس لخلية الوقود Gibbs Potential

بعد معرفة قيمة G لتفاعل خلايا الوقود الهيدرجيني أصبح بالإمكان حساب قيمة القوة المحركة الكهربائية (أو ماليسمي بالتوتر المثالي للخلية) باستخدام العلاقة (1) بعد تبديل قيمة n للهيدروجين:

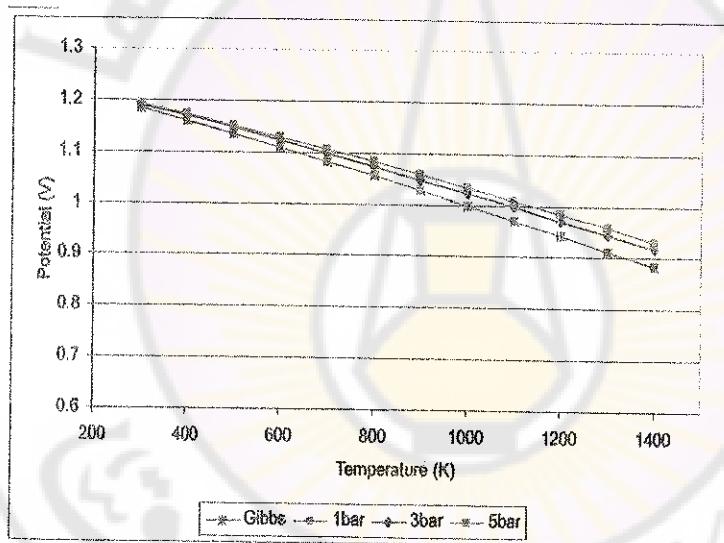
$$E_{o.c.} = -\Delta G / 2F \quad (3-5)$$

وذلك عند درجة حرارة وضغط تشغيل معينين.

وفي الحالة الخاصة عندما لا يحتسب تأثير ضغط التشغيل تصبح تسميتها هذه "توتر جيبس" ( $E_G$ ) (gibbs potential) وهو مصطلح تجمع عليه معظم المراجع لتوتر الدارة المفتوحة لخلية الوقود عندما لا يؤخذ تأثير الضغط بالحسبان وإنما فقط تأثير درجة الحرارة، وعليه يكون:

$$E_G = -\Delta G / 2F \quad (4-5)$$

وبهذا يصبح  $E_G$  تابعاً فقط لدرجة حرارة التشغيل كما هو مبين في الشكل (9-5).



الشكل (5-9): علاقة توتر جيبس وتوتر نيرنست مع درجة الحرارة [49]

### 5-6-5-2-1-2- توتر نيرنست لخلية الوقود Nernst Potential

لاحتساب تأثير الضغط على القوة المحركة الكهربائية المنتجة في الخلية الوقودية يضاف إلى العلاقة (3-5) حد جديد يتعلق بالضغوط الجزيئية للغازات ضمن الخلية

ويدعى "حد نيرنست" فتصبح العلاقة العامة للتوتر على أطراف الخلية في حالة الدارة المفتوحة ، والذي يرمز له في هذه الحالة  $E_N$ ، كما يلي [48]:

$$E_N = -\frac{\Delta G}{2 \cdot F} + \left( \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \right) \cdot \ln \left( \frac{P_{H2} \cdot P_{O2}}{P_{H2O}} \right)^{1/2} \quad (5-5)$$

حيث:

$E_N$ : توتر نيرنست Nernst potential وهو التوتر النظري أو المثالي للخلية في حالة الدارة المفتوحة (ideal open circuit potential) عند درجة حرارة وضغط تشغيل معينين.

$R$ : ثابت الغازات العام 8.314 J/Mol.K

$T$ : درجة حرارة التشغيل K.

$P_{O2}$ : الضغط الجزيئي للأكسجين ضمن المادة المؤكسدة (الهواء).

$P_{H2}$ : الضغط الجزيئي للهيدروجين في الوقود.

$P_{H2O}$ : الضغط الجزيئي لبخار الماء الناتج.

ويبين الشكل (5-9) المأخذ من المرجع [49] علاقة كل من توتر نيرنست وتوتر جييس مع درجة الحرارة وذلك عند ضغوط تشغيل مختلفة، حيث نلاحظ انعدام حد نيرنست عند الضغط 1 bar أي يصبح  $E_N = E_G$ .

### 5-5-6-2- أداء خلية الوقود تحت الحمل F.C. Actual Performance

#### 1- منحنى الاستقطاب ل الخلية الوقود

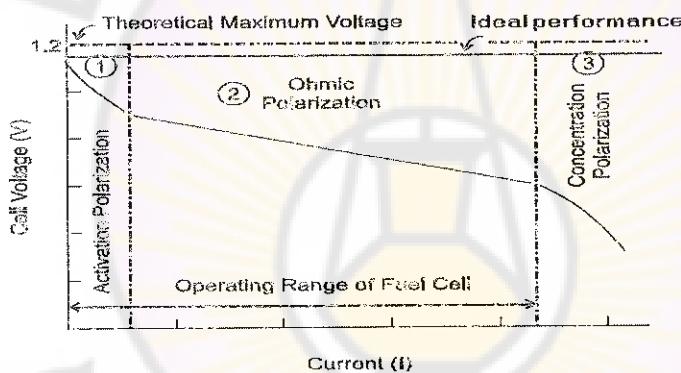
إن خلية الوقود، شأنها شأن أي مولد كهربائي، يؤدي تحملها إلى هبوطات في التوتر وضياعات في الطاقة، وإن عملية حدوث هبوط في توتر الخلية لدى تحملها تدعى بظاهرة "استقطاب الخلية" (F.C.Polarization)، وذلك على غرار ظاهرة الاستقطاب في المدخرات الكهربائية، وإن المنحنى الذي يرسم العلاقة بين التوتر على أطراف الخلية والتيار المستجر منها (I-V curve) يسمى "منحنى الاستقطاب"

للخلية، وهو يعد أهم مميز يصف أداء خلية الوقود تحت الحمل.

إن التوتر على أطراف الخلية في حالة الدارة المفتوحة هو، كما بين في الفقرة السابقة، إما أن يكون توتر جيبس ( $E_G$ ) في حال عمل الخلية عند الضغط الجوي، أو توتر نيرنست ( $E_N$ ) في حال عمل الخلية عند ضغط مخاير، وفي الحالة العامة يعتمد توتر نيرنست:

$$E_{o..c.} = E_N \text{ عند درجة حرارة وضغط معينين.}$$

عند تحمل الخلية تبدأ ظاهرة الاستقطاب بالتأثير وينخفض التوتر على أطراف الخلية بشكل يتناسب مع تيار التحمل، والشكل (10-5) يبين المنحني النمطي لمنحنى الاستقطاب لخلايا الوقود.



الشكل (10-5): الشكل النمطي لمنحنى استقطاب الخلية الوقودية [47]

وهكذا نرى أن التوتر الفعلي للخلية (actual voltage) والذي سيرمز له لاحقاً  $V_{cell}$  يقل عن التوتر المثالي أو مايسمى بتوتر نيرنست لها بسبب حدوث ضياعات (هبوطات) في التوتر، وهذه الضياعات على ثلاثة أنواع:

- ضياع الاستقطاب الناجم عن التفعيل (activation polarization) ويسمى أيضاً بضياع التفعيل (activation loss).

- ضياع الاستقطاب الناجم عن التركيز (concentration polarization) ويسمى أيضاً بضياع التركيز (concentration loss).

- ضياع الاستقطاب الناجم عن المقاومة الأومية (ohmic polarization) ويسمى أيضاً بالضياع الأومي (ohmic loss).

هذه الضياعات جميعها ضياعات توتر (هبوط توتر) وتقدر بالفولط أو الميلي فولت، لذلك سيرمز لها بـ  $V_{act}$  و  $V_{ohm}$  و  $V_{con}$  على التوالي. وبالتالي يعطى التوتر الفعلي بالعلاقة التالية:

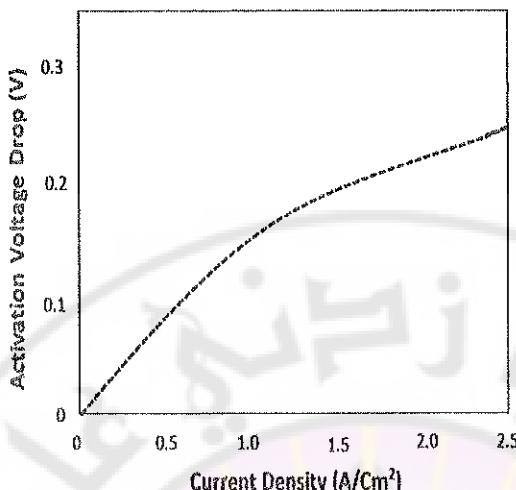
$$V_{cell} = E_N - V_{act} - V_{con} - V_{ohm} \quad (6-5)$$

## 2- هبوط التفعيل Activation Voltage Drop

لكل تفاعل كيماوي عتبة من الطاقة يجب تجاوزها لكي يبدأ التفاعل، تدعى هذه العتبة "طاقة التفعيل" ولابد من صرف هذا القدر من الطاقة ليبدأ التفاعل وهذا ما يؤدي إلى هبوط في توتر خرج الخلية، ومقدار هذا الهبوط يتعلق بكثير من العوامل أهمها: نوع التفاعل، نوع المادة الحفازة المستخدمة، فاعلية المواد المتفاعلة، تصميم الخلية، درجة حرارة التشغيل، كثافة التيار.

وبشكل عام يتأثر هبوط التفعيل بتغير درجة حرارة تشغيل الخلية ذلك لأن سرعة التفاعل تكون كبيرة عند درجات الحرارة المرتفعة، كما هو الحال في خلايا SOFC، لذلك فارتفاع درجة الحرارة يؤدي إلى الحد من هذا الهبوط.

من جهة أخرى يزداد هبوط التفعيل هذا مع زيادة كثافة تيار التحميل بعلاقة لوغاريتمية كما هو مبين في الشكل (11-5)، حيث يكون معدل زيادته في البداية كبيراً يتناقص بعدها بشكل ملحوظ عند القيم العليا لكثافة التيار.



الشكل (5-11): علاقة هبوط التفعيل بكتافة تيار التحميل عند درجة حرارة تشغيل معينة [50]

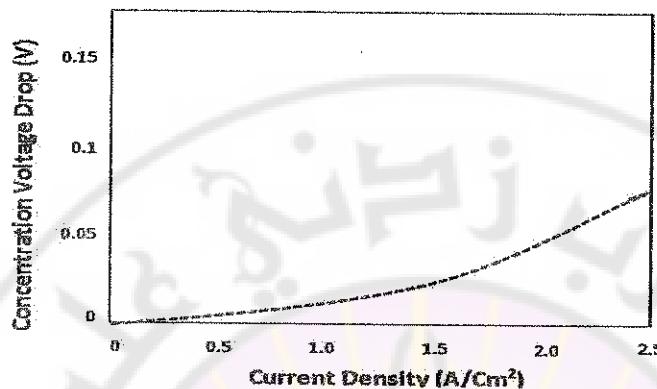
### 3 - هبوط التركيز Concentration or Mass transport Voltage Drop

ينتج هذا الهبوط عن تغير تركيز المواد المتفاعلة أو الناتجة بسبب عملية انتقال الكتلة (mass transport) خلال طبقات الخلية ويكون تأثيرها كبيراً عندما يكون معدل التزويد بالمواد المتفاعلة و/أو معدل سحب المواد الناتجة أقل من المعدل المطلوب لانتاج تيار بشدة معينة. وتعتمد قيمة هذه المركبة بشكل أساسي على كثافة التيار المستجر، لذا فإن تأثيرها لا يظهر بوضوح إلا عند القيم الكبيرة لكتافة تيار التحميل كما هو ظاهر في الشكل (5-12)، كما تعتمد قيمة هذه المركبة على خواص الانتقال للجزيئات المتفاعلة وعلى تصميم الأقطاب.

أما عن علاقة هذه المركبة بدرجة حرارة تشغيل الخلية فقد لوحظ أنها تزداد بشكل قريب من الطردي مع ارتفاع درجة حرارة التشغيل [50].

وقد تبين تجريبياً أن تأثير مركبة الهبوط هذه يظهر على شكل منحنى الاستقطاب -I (V curve) فيجعل تغيره حاداً ومحدداً عند كثافات التيار المرتفعة لذاك لا يفضل تحميل الخلية بهذه القيم المرتفعة من كثافات التيار، في حين تتحفظ قيمتها في مجال كثافات التيار المنخفضة وحتى المتوسطة (حتى  $1.5 \text{ A.cm}^{-2}$ ) لذا يمكن إهمال تأثيرها عند

تشغيل الخلية، وبخاصة الخلايا الحديثة، في هذه المجالات من قيم كثافة التيار المستجر .[50]



الشكل (5-12): علاقة هبوط التركيز بكثافة تيار التحميل عند درجة حرارة تشغيل معينة [50]

#### 4- الهبوط الأومي Ohmic Voltage Drop

ينخفض توتر خرج الخلية لدى تحميلها بتأثير المقاومة التي تتعرض لها كل من الأيونات في أثناء مرورها عبر الكهرباء والإلكترونات عبر الأقطاب. يخضع هذا الهبوط لقانون أوم وبذلك يمكن التعبير عنه وفق العلاقة:

$$\Delta V_{ohm} = I \cdot R_{ohm} \quad (7-5)$$

حيث:

I: شدة التيار المستجر من الخلية (A).

$R_{ohm}$ : مقاومة الخلية الكلية ( $\Omega$ ) وتتألف من ثلاثة مركبات:

$$R_{ohm} = R_{electronic} + R_{ionic} + R_{intercon} \quad (8-5)$$

حيث:

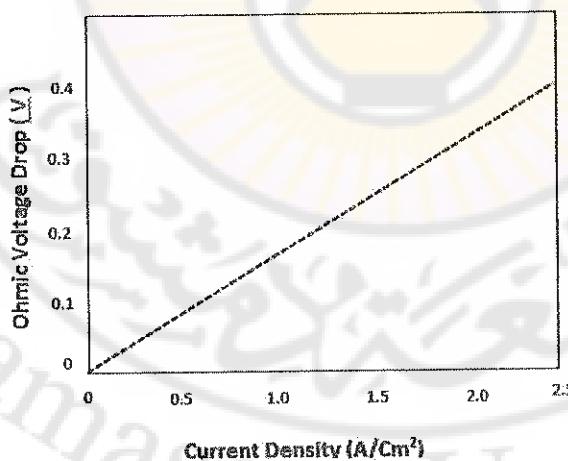
$R_{electronic}$ : المقاومة الإلكترونية، وهي مقاومة مرور الإلكترونات عبر الأقطاب التي تكون عادة ذات مقاومة نوعية منخفضة (low resistivity).

$R_{ionic}$ : المقاومة الأيونية، وهي عبارة عن مقاومة مرور الأيونات عبر طبقة الكهرباء التي تكون عادة ذات مقاومة نوعية عالية (high resistivity).  $R_{intercon}$ : مقاومة التوصيل البيني (interconnection).

ويمكن لأي مركبة من هذه المركبات أن تسيطر على قيمة المقاومة الكلية الأولية وذلك تبعاً لنوع الخلية، فمثلاً في خلية SOFC المستوية ذات الكهرباء ذات الدعم تكون المقاومة الأيونية هي المسسيطرة، أما في النوع الاسطوانى فإن المقاومة الإلكترونية تكون هي الغالبة.

إن قيمة  $R_{ohm}$  تتعلق ببعض مكونات الخلية (سمك الأقطاب والكهرباء) وكذلك بنوع المواد المستخدمة وتقنيات التصنيع، وتتعلق أيضاً بدرجة الحرارة، فهي تنخفض بارتفاع درجة الحرارة [50].

أما الهبوط الأولي  $\Delta V_{ohm}$  فهو يتناسب طرداً مع كثافة التيار المستجر ويمكن اعتباره خطياً كما هو ظاهر في الشكل (5-13) أدناه، حيث تكون مقاومة الخلية الأولية ثابتة تقريباً مع تغير كثافة تيار التحميل ، وذلك عند درجة حرارة تشغيل معينة.



الشكل (5-13): علاقة هبوط التفعيل بكتافة تيار التحميل عند درجة حرارة تشغيل معينة [50]

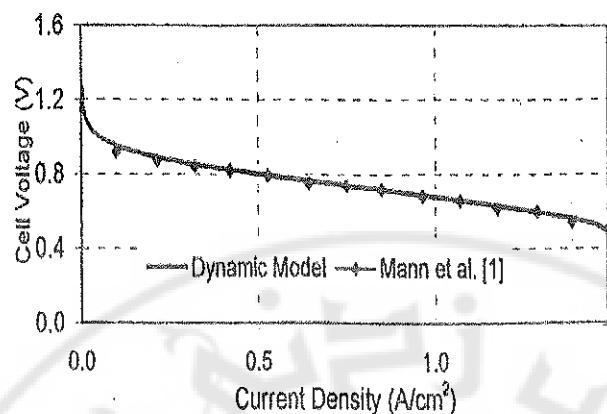
## 5- الشكل العملي لمنحنى الاستقطاب Actual Polarization curve

في التطبيقات العملية لخلايا الوقود يُحاول دوماً تحسين شكل منحنى الاستقطاب، الذي هو عبارة عن منحنى I-V لها، وذلك من خلال تخفيف أثر هبوطي التفعيل والتركيز إلى أقل حد ممكн بهدف الحصول على خواص I-V محسنة للخلية وبالتالي على أداء أفضل لها.

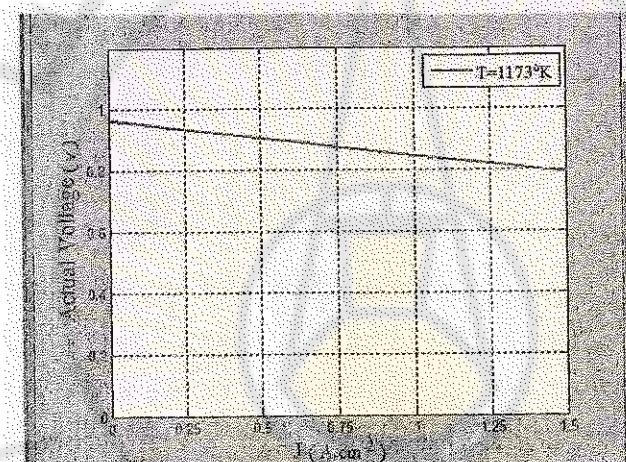
يمكن تقليل قيمة هبوط التفعيل (activation drop) بالاختيار الصحيح لنوع المادة الحفازة وتحسين تصميم الخلية، هذا مع العلم أن ارتفاع درجة حرارة عمل الخلية يحد كثيراً من تأثير هذا الهبوط إلى حد يمكن معه إهماله كما هو الحال في خلايا الأكسيد الصلب SOFC.

أما هبوط التركيز فيكتفي لتخفيف أثره التقيد بالحدود المعقولة (المنطقية) لكتافة تيار التحميل، إذ بينت نتائج التطبيقات العملية في هذا المجال أن حتى  $1.5A/cm^2$  يبقى تأثير هذا الهبوط محدوداً ويمكن إهماله بدقة مقبولة [50].

وبهذا نرى أنه في مجال التحميل المنطقي لخلايا الوقود (حتى  $1.5A/cm^2$ ) يكون النوع الثالث من الهبوط (الهبوط الأولي) هو الغالب والسيطر على شكل منحنى الاستقطاب ليجعله قريباً جداً من الخط المستقيم، والشكلان (14-5) و (15-5) يبينان شكل منحنى الاستقطاب لخالية من طراز PEMFC وأخرى من طراز SOFC قد تم الحصول عليهما تجربياً من خلال دراسة عملية لخصائص كل من هذين الطرازين قام بها الباحثون المذكورون في ثبت المراجع.



[51] الشكل (14-5): الشكل العملي لمنحنى الاستقطاب لخلية PEMFC



[52] الشكل (15-5) : الشكل العملي لمنحنى الاستقطاب لخلية SOFC

#### 6- منحنى الاستطاعة المقدمة من الخلية F.C. Power curve

تتغير الاستطاعة المقدمة من الخلية بتغير كل من توتر الخلية  $V_{cell}$  والتيار المستجر  $I$  منها:

$$P = V_{cell}I \quad (9-5)$$

وحيث أنه يفضل تقدير الاستطاعة لخلايا الوقود وكذلك التيار المستجر بالكثافة (لوحدة السطح الفعال من الخلية):

$$P = V_{cell}J \quad (10-5)$$

حيث:

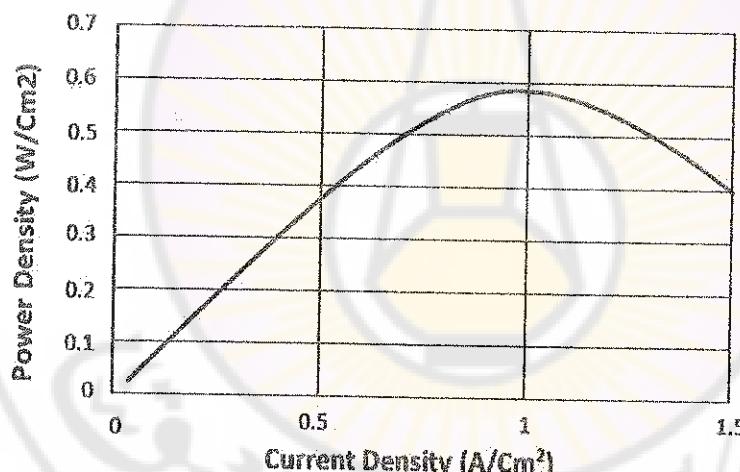
$P$ : كثافة الاستطاعة المقدمة من الخلية  $(W/cm^2)$

$J$ : كثافة التيار المستجر  $(A/cm^2)$

إن التوتر على أطراف الخلية  $V_{cell}$  يتغير كما بين سابقاً وفقاً لمنحنى استقطاب الخلية فينخفض بزيادة التيار المستجر، وهذا يعني أن هناك نهاية عظمى للاستطاعة التي يمكن استجرارها من الخلية تبدأ بعدها الاستطاعة المقدمة من الخلية بالانخفاض بالرغم من زيادة التيار المستجر، وذلك بسبب الهبوط الحاد في توتر الخلية الناجم عن الزيادة الكبيرة في هبوطات الاستقطاب التي يسببها التحميل الزائد للخلية.

والشكل (5-16) يبين نموذجاً لمنحنى كثافة الاستطاعة المقدمة من خلية وقود طراز

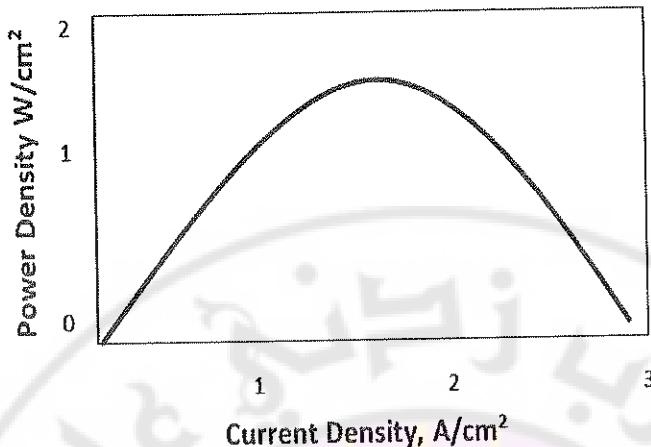
PEMFC عند ضغط  $1atm$  وحرارة  $70^\circ C$ .



الشكل (5-16) : منحنى كثافة الاستطاعة ل الخلية من طراز PEMFC [53]

أما الشكل (5-17) فيبين نموذجاً لمنحنى كثافة الاستطاعة المقدمة من خلية وقود

طراز SOFC عند ضغط  $1atm$  وحرارة  $900^\circ C$ .



الشكل ( 5-17 ) : منحنى كثافة الاستطاعة من طراز SOFC [53]

### 5-5-6-5-3- المردود المثالي والمردود الفعلي لخلية الوقود

#### F.C. Ideal and Actual Efficiency

##### 1- المردود المثالي ل الخلية الوقود :

إن المردود المثالي - أو مايسما في بعض المراجع بالمردود النظري - ل الخلية الوقود هو المردود الترموديناميكي ، ويدعى أيضاً المردود الحراري ، ويتعلق بخصائص الوقود المستخدم وضغط ودرجة حرارة التشغيل، ويعبر عنه بنسبة الطاقة المفيدة المحصلو علية إلى الطاقة المتاحة لعملية التحويل وهي مقدار التغير في الانتالبي  $H$ :

$$\eta_{ideal} = \text{Useful energy}/\Delta H \quad (11-5)$$

تقوم خلية الوقود بتحويل الطاقة الكيماوية للوقود إلى طاقة كهربائية بشكل مباشر، لذلك فإن التعبير عن الطاقة المفيدة يكون من خلال تغير طاقة حبس الحرارة عند درجة حرارة وضغط تشغيل للخلية ، وعليه يعبر عن المردود المثالي للخلية بالعلاقة التالية :

$$\eta_{ideal} = \eta_{th} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{\Delta H - T \cdot \Delta S}{\Delta H} = 1 - \frac{T \cdot \Delta S}{\Delta H} \quad (12-5)$$

عند الشروط المعيارية  $T = 25^\circ\text{C}$  و  $P = 1\text{atm}$  والماء الناتج في الحالة السائلة فإن

قيمة  $G$  ولتفاعل أكسدة الهيدرجين هي حسب الجدول (2-5) :

$$\Delta H = 285.9 \text{ KJ/Mol}$$

$$\Delta G = 237.2 \text{ KJ/Mol}$$

وبالتالي فإن المردود المثالي عند استخدام الهيدرجين والأكسجين في الحالة النقية:

$$\eta_{ideal} = 237.2 / 285.9 = 0.83\%$$

إن هذه القيمة المثالية (النظرية) للمردود هي قيمة ستيكومترية وهي تمثل الحد الأعلى للمردود الذي لا يمكن تجاوزه لخلايا الهيدرجين - الأكسجين عند ذات الشروط من الحرارة والضغط.

### 2- المردود الفعلي لخلية الوقود F.C. Actual Efficiency

من الطبيعي عند تحمليل الخلية أن ينخفض مردودها الفعلي عن المردود المثالي لها وذلك بسبب نشوء عوامل خافضة للمردود أهمها ضياعات الاستقطاب وعدم تفاعل كامل كمية الوقود (الهيدرجين) المغذي للخلية بالإضافة إلى احتمال كونه غير نقي 100% وكذلك الأكسجين المغذي للخلية.

وعليه فإن المردود الإجمالي الفعلي للخلية يتكون بصورة أساسية من المركبات الثلاث:

1. المردود الترموديناميكي: وهو كما ذكر سابقاً يتعلق بخصائص الوقود وضغط ودرجة حرارة التشغيل ويُعطى بالعلاقة (9-5).

2. مردود التوتر: إن التوتر الفعلي للخلية، يكون كما بين سابقاً، أقل من التوتر النظري (المثالي) بسبب هبوطات الاستقطاب، ومنه يمكن التعبير عن مردود التوتر بالعلاقة:

$$\eta_v = V_{cell} / E_{ideal} \quad (13-5)$$

3. مردود التيار: ينخفض مردود الخلية إذا لم يتم تفاعل كامل كمية الوقود الداخلة ، أي إذا شارك جزء منها في تفاعلات غير منتجة للتيار والتي تدعى بالتفاعلات الطفيلية (parasitic reactions) كالتأكل وغيرها أو بسبب عدم النقاوة التامة للهيدرجين المغذي .

إن المقوم الأساسي لمردود التيار في خلايا الوقود هو عامل الانتفاع بالوقود (fuel utilization) وعليه يمكن اعتماد المساواة التالية:

$$\eta_I = U_f$$

وإن المجال الأفضل من الناحيتين الفنية والاقتصادية لقيم  $U_f$  هو ما بين 80% - 85% ، علمًا بأن نتائج اختبارات التشغيل العملية قد أظهرت أن القيم المرتفعة لـ  $U_f$  (أكبر من 90%) تؤدي إلى ضياعات استقطاب تركيزية عالية [47] . وبالنهاية يكون المردود الفعلي الإجمالي للخلية :

$$\eta_{actual} = \eta_{ideal} \cdot \eta_v \cdot \eta_I \quad (14-5)$$

وبالتبديل:

$$\eta_{actual} = \eta_{ideal} \cdot \frac{V_{cell}}{E_{ideal}} \cdot U_f \quad (15-5)$$

وباعتبار  $E_{ideal} = E_G$  أي بإهمال حد ثيرنست اللوغاريتمي ، وبخاصة عند العمل بضغط غير عالي ، يصبح المردود الإجمالي الفعلي :

$$\eta_{actual} = \eta_{ideal} \cdot \frac{V_{cell}}{E_G} \cdot U_f \quad (16-5)$$

وهكذا نرى أن مردود التوتر لوحدة لايكفي لتقدير أداء الخلية بصورة صحيحة (كما تعتمد إلى ذلك بعض المراجع في هذا المجال) وأنه يلزم إدخال تأثير التيار في علاقة المردود ، إذ إن تغير التيار المستجر من الخلية سيؤدي إلى تغير واضح في توتر الخلية (بفعل هبوطات الاستقطاب) وهذا ما يؤدي في النهاية إلى تغير المردود الفعلي للخلية.

كذلك فإن هذه العلاقة (5-15) تبينا أنه عند شروط تشغيل معينة للخلية فإن مردودها الفعلي يصبح تابعاً مباشراً لتوتر الخلية  $V_{cell}$ ، إذ إن قيم كل من  $\Delta H$  و  $\Delta G$  يمكن الحصول عليها من الجداول الخاصة بها كالجدول (5-2)، أما  $E_G$  فيمكن تحديدها من العلاقة (4-5).

فعلى سبيل المثال لخلايا الهيدرجين والأكسجين عند الحرارة والضغط النظاميين  $(P=1\text{ atm}, T=298\text{ K})$  والماء الناتج في الحالة السائلة نجد من الجدول (5-2) أن:

$$\Delta H = 285.9 \text{ KJ/MOL}$$

$$\Delta G = 237.2 \text{ KJ/MOL}$$

وعليه فإن:

$$E_{o.c.} = E_{ideal} = E_N = E_G = 237.2 \times 10^3 / (2 \times 96487) = 1.229v$$

وذلك بفرض أن كلاً من الهيدرجين والأكسجين نقيان تماماً.

وبالتبديل في العلاقة (5-16) تصبح علاقة المردود الفعلي لخلايا الهيدرجين -

أكسجين كما يلي :

$$\eta_{actual} = \frac{0.83}{1.229} \cdot V_{cell} \cdot U_f \quad (17-5)$$

وباعتبار القيمة النمطية لـ  $U_f$  وهي 0.85 يصبح:

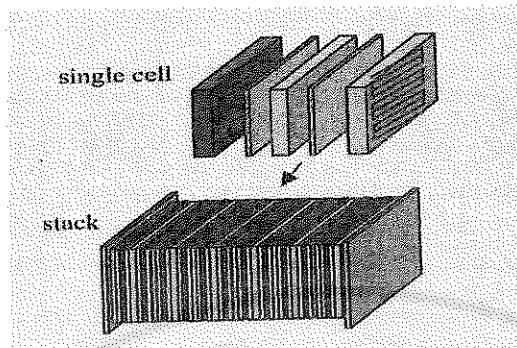
$$\eta_{actual} = 0.574 \cdot V_{cell} \quad (18-5)$$

#### 5-6-6- منظومات الخلايا الوقودية F.C. Systems

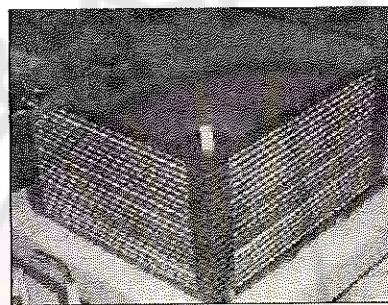
إن الخلية الوقودية هي عنصر توليد منخفض التوتر ، توفرها الفعلي أقل من 1 فولت،

لذا فللحصول على التوتر المناسب يلزم ربط عدد معين من الخلايا على التسلسل

لشكل مايسمي بالكُنس (F.C.Stack) كما هو مبين بالشكليين (5-18) و (5-19):



[ 48 ] الشكل ( 18-5 ) : كدس خلايا وقود من طراز PEMFC



[ 47 ] الشكل ( 19-5 ) : كدس خلايا وقود من طراز SOFC

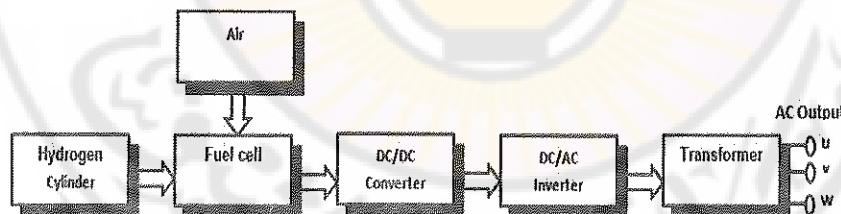
واللحصول على التيار اللازم (الاستطاعة اللازمة) يُعد إلى ربط الأكdas على التفرع لتشكل مysisى بالموديول (F.C. Module) والذي يمكن أن تصل استطاعته إلى رتبة الميغا واط من خلايا الأكسيد الصلب SOFC. وفي محطات التوليد الكبيرة تتكون وحدات التوليد من عدد معين من هذه الموديولات تبعاً لاستطاعة المحطة.

في الحياة العملية نادراً ماتصادف أكdas الخلايا الوقودية بمفردها إنما تعمل ضمن منظومة متكاملة من التجهيزات المتممة التي لابد منها للتحكم بمدخلات الكس ومخرجاته للحصول على أفضل أداء وأعلى مردود. وتعتمد درجة تعقيد هذه المتممات وتعدد وظائفها على طبيعة الطراز المستخدم ودرجة حرارة عمله (انخفاض الحرارة كالـ PEMFC أو (عالي الحرارة كالـ SOFC) وكذلك على مقدار الاستطاعة المطلوبة، كما تختلف هذه التجهيزات المتممة باختلاف الغرض من استخدام منظومة خلايا الوقود هذه.

- وعلى الرغم من اختلاف هذه المتممات فإنها تشتراك في التجهيزات الأساسية التالية:
- 1- وحدات تخزين الوقود كاسطوانات الهيدرجين وغيرها من الخزانات، وذلك لخلايا الحرارة المنخفضة (خلايا PEM)، أما لخلايا الحرارة المرتفعة (SOFC) فيستعاض عنها بمعالج الوقود (fuel reformer).
  - 2- مضخات تغذية الوقود.
  - 3- مراوح أو ضواغط هواء التغذية.
  - 4- وحدات تكييف الطاقة (power conditioners) كالمبدلات DC- converters والمعرجات DC-AC inverters ومحولات القدرة وغيرها.
  - 5- وحدات التحكم بالحرارة والرطوبة.

يضاف إلى هذه المتممات تجهيزات الاستفادة من حرارة العادم في حال الخلايا مرتفعة الحرارة.

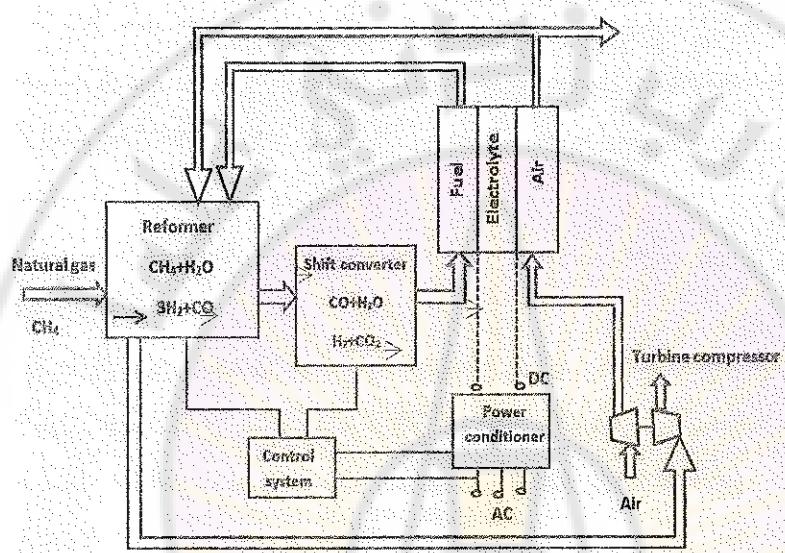
الشكل (5-20) يبين مخططًا صنديقًا لمنظومة خلايا وقودية تتغذى بالهيدروجين الخالص مباشرةً من خزان خاص كاسطوانات أو عبوات الهيدرجين، ويصلح هذا النموذج من منظومات الخلايا الوقودية لتغذية التطبيقات المتنقلة (mobile application) كالسيارات والرافعات الشوكية وغيرها من الآليات المتحركة، وإن الطراز الأقرب لهذه التطبيقات هو خلايا الغشاء البوليمرية (PEMFC).



الشكل (5-20): المخطط الصنديقى لمنظومة خلايا وقود منخفضة الحرارة [47]

أما للتطبيقات الثابتة (stationary application) والتي تكون عادة بمقاييس كبيرة (من رتبة الميجا واط أو أكثر) فالطراز SOFC هو المسائد لها، والشكل (5-21) يبين

مخططًا نمطيًا (typical scheme) لمنظومة خلايا وقودية عالية الحرارة ، وتدعي هذه المنظومة عادة "محطة التوليد بالخلايا الوقودية" (F.C. power plant)، كما تدعى جميع التجهيزات المتممة (إلى جانب كبس أو موديل الخلايا الوقودية) بـ "بقية المحطة" (balance of plant) والتي يرمز لها عادة بـ "BOP".



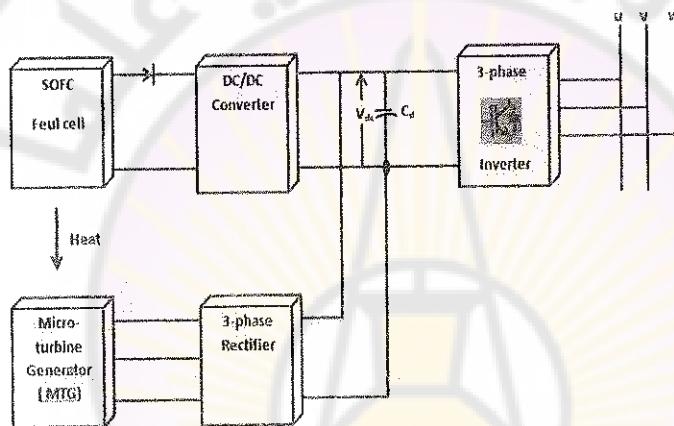
[54] الشكل (5-21): المخطط النمطي لمنظومة توليد بالخلايا الوقودية عالية الحرارة

وبما أن درجة حرارة عالم أكاس خلايا SOFC مرتفعة جداً قد تصل إلى  $900^{\circ}\text{C}$  لذا فإنه من العقلانية والحكمة الاستفادة من هذه الحرارة، ويكون ذلك على وجهين:

- أـ في تسخين المياه أو توليد البخار للأغراض الخدمية أو الصناعية .
- بـ - في توليد الطاقة الكهربائية.

في الحالة الأولى يستخدم خرج الخلايا من البخار في تسخين المياه لأغراض التدفئة المركزية وللخدمات الخدمية وذلك بواسطة مبادل حراري (heat exchanger) مناسب، أو لانتاج البخار اللازم للأغراض الصناعية، وفي هذه الحالة تسمىمنظومة الخلايا بـ "محطات التوليد المشتركة للحرارة والكهرباء" CHP (combined heat and power).

(cogeneration) كما تسمى أيضاً بـ "محطات التوليد المشارك" (and power generation). ونتيجة لذلك يرتفع المردود الإجمالي لهذه المنظومة ليصل إلى 85%. أما في الحالة الثانية فيستفاد من حرارة عادم الخلايا في توليد الطاقة الكهربائية باستخدام عنفة غازية صغيرة (micro-turbine generator) مع تطبيق دورة برليتون الحرارية (brayton cycle)، وتسمى المنظومة في هذه الحالة بـ "المحطة الهجينة". (Hybrid P.S). ويرمز لها عادة بـ "FC/GT P.S."، ويبيّن الشكل (22-5) مخططاً صنديوقياً لهذه المنظومة الهجينة.



[47] الشكل (22-5): المخطط الصنديوقي لمنظومة توليد هجينة [47]

ومن الطبيعي أن يرتفع المردود الإجمالي لهذه المنظومة الهجينة ليصل إلى 70% أو أكثر [55].

#### 7-6-5 - تصميم الخلايا الوقودية F.C. Design Calculations

إن موضوع تصميم خلايا الوقود وحساب محددات مكوناتها واسع ومعقد ويتعدى المستوى المفترض في إطار "مقرر تخزين الطاقة الكهربائية"، لذا سنقتصر في دراستنا هنا فقط على كيفية تحديد مأيلزم من مدخلات الخلية ومخرجاتها لدى عملها كوسيلة

لاستعادة الطاقة المخزنة في الهيدرجين، حيث سننطلق من تحديد عدد مولات الهيدرجين اللازمة لتوليد التيار المطلوب استناداً إلى الخلية كمالياً:

$$n_{H_2} = \frac{\text{charge of single ampere}}{\text{charge of single mole of electrons} \times 2} \quad (18-5)$$

$$= \frac{1 \text{ Coul/Sec}}{q \cdot N_A \cdot 2}$$

حيث:

$q$ : شحنة الإلكترون الواحد وتساوي  $1.6021 \times 10^{-19}$  Coulomb/electron

$N_A$ : عدد أفراد الكاربو ويتساوي  $6.0223 \times 10^{23}$  electrons/Mol

وبالتالي تصبح العلاقة (17-5) كالتالي:

$$n_{H_2} = \frac{1 \text{ Coul/Sec}}{2 \cdot 96487 \text{ Coul/Sec}} = 5.182 \times 10^{-6} \text{ Mol / Sec}$$

وفي الساعة الواحدة :

$$N_{H_2} = 5.182 \times 10^{-6} \times 3600 = 18.655 \times 10^{-3} \text{ Mol/hr}$$

ومنه نجد أنه لتوليد 1kA يلزم من تيار من الهيدرجين تدفقه 18.655 مول من الهيدرجين في الساعة.

وحيث أن كتلة المول الواحد من الهيدرجين = 2.0158 gr/Mol ، وهو مايسمي بالمول الغرامي للهيدرجين ، نجد أنه لتوليد 1kA يلزم من 37.6 gr من الهيدرجين في الساعة

أو  $0.418 \text{ m}^3$  من الهيدرجين في الساعة

بعد تحديد عدد مولات الهيدرجين اللازمة لتوليد تيار معين، أصبح بالامكان تحديد عدد مولات الأكسجين اللازمة، فهو ببساطة يساوي نصف عدد مولات الهيدرجين:

$$N_{O_2} = 1/2 N_{H_2} = 9.3276 \text{ Mol/kA.hr}$$

وحيث أن كتلة المول الواحد من الأكسجين = 32 gr ، نجد أنه لتوليد 1kA يلزم من 298.5 gr من الأكسجين في الساعة

أو

0.209 m<sup>3</sup> من الأكسجين في الساعة

إن القيم الناتجة أعلاه لتدفق كل من الهيدرجين والأكسجين اللازم لتوليد 1KA هي في نظرية تفترض تفاعل كامل كمية الهيدرجين المغذي للخلية وكذلك كامل الأكسجين المغذي الأمر الذي لا يتحقق عملياً، فهناك عامل استعمال المؤكسد  $U_{Ox}$  كما هو الحال في عامل استعمال الوقود  $U_f$  ، وإن القيمة النمطية لـ  $U_{Ox}$  هي 25% [47] ، وعليه فإن القيم الناتجة أعلاه لتدفق كل من الهيدرجين والأوكسجين يجب أن تزداد بمقدار  $1/U_f$  و  $1/U_{Ox}$  على التوالي:

- معدل تدفق الهيدرجين اللازم:

وزناً:  $37.6/U_f$  gr/KA.hr

حجماً:  $0.418/U_f$  m<sup>3</sup>/KA.hr

- ومعدل تدفق الأكسجين اللازم:

وزناً:  $298.5/U_{Ox}$  gr/KA.hr

حجماً:  $0.209/U_{Ox}$  m<sup>3</sup>/KA.hr

أما معدل تدفق الهواء اللازم لعمل الخلية فيمكن حسابه بسهولة بعد معرفة نسبة الأكسجين في الهواء المحيط.

#### مسألة مطلولة:

موديول خلايا وقودية من طراز SOFC استطاعته 1200kW عند توتر 60 فولت، فإذا كانت الاستطاعة التي تقدمها الخلية الواحدة 750 واط عند توتر 0.75 فولت، فالمطلوب مايلي:

1. تحديد عدد الأكاداس اللازم وصلتها على التفرع لهذا الموديول.
2. تقدير تدفق الهيدرجين اللازم لتشغيل هذا الموديول عند قيمة وسطية لعامل استعمال الوقود بمقدار 0.8.

**الحل:**

- [١- تحديد عدد الأكdas: لتحديد عدد الأكdas يلزم أو لا تحديد تيار الكدس الواحد وهو نفسه تيار الخلية:

$$I_{cell} = \frac{Cell\ power}{Cell\ Voltage} = \frac{750}{0.75} = 1kA$$

والتيار الكلي للموديول:

$$I_m = \frac{Module\ power}{Module\ Voltage} = \frac{1200}{60} = 20kA$$

إذن عدد الأكdas اللازم وصلها على التفرع:

$$n = \frac{20}{1} = \frac{1200}{60} = 20\ stack$$

- ٢-تقدير تدفق الهيدرجين اللازم يلزم أو لا تحديد حجم الهيدرجين اللازم لكل خلية وعدد خلايا هذا الموديول:
- حجم الهيدرجين اللازم ل الخلية الواحدة:

$$V_{cell} = 0.418 \times 1kA / 0.8 = 0.5225m^3 / n$$

حجم خلايا الموديول:

$$n_{cell} = \frac{1200}{0.750} = 1600\ Cells$$

تدفق الهيدرجين اللازم ل التشغيل الموديول:

$$V_m = 0.5225 \times 1600 = 836m^3 / h$$

الفصل السادس

التخزين الميكانيكي للطاقة

Mechanical Energy Storage



## 6- التخزين الميكانيكي للطاقة

### Mechanical Energy Storage

يمكن أن نميز نوعين لتخزين الطاقة الكهربائية على شكل طاقة ميكانيكية: طاقة حركية في دوّاب العطالة (أو الحدافة) وطاقة كامنة في نظم ضخ المياه.

#### 6-1- تخزين الطاقة بدوّاب العطالة

##### Flywheel Energy Storage (FES)

يستخدم دوّاب العطالة منذ مئات السنين في التطبيقات الميكانيكية، ولكن في عام 1970 ظهرت لأول مرة فكرة استخدام دوّاب العطالة كوسيلة لتخزين الطاقة في المركبات الكهربائية. بعدها أصبح دوّاب العطالة شيئاً فشيئاً عنصراً منافساً لتخزين الطاقة الكهربائية، وذلك بسبب عوامل كثيرة مثل تطور مركبات الفايبر (fibre composite) وظهور المساند المغناطيسية (magnetic bearings) والتطور الهائل في الكترونيات القدرة.

#### 6-1-1- مبدأ دوّاب العطالة Principle of Flywheel

يمكن من حيث المبدأ تخزين الطاقة على شكل حركة دورانية وذلك في ظل ضياعات احتكاك منخفضة. إن دوّاب العطالة كأي عنصر دوار بإمكانه تبادل الاستطاعة بالاتجاهين امتصاصاً (استقبالاً) أو إعطاءً عبر محور دورانه، ويتم تخفيض الضياعات باستخدام مساند ذات كفاءة عالية وأيضاً بوضع الكتلة الدوارة ضمن مجال مفرغ جزئياً من الهواء أو يمكن مليء هذا المجال بغازات خاملة [3].

إن كمية الطاقة المخزنة  $W$  في جسم دوار ذي توزع كثلي ( $x$ ) حول محور ثابت ويدور بسرعة زاوية  $\omega$  (angular velocity) هي:

$$W = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad (1-6)$$

حيث عزم العطالة  $J$  (moment of inertia) يحسب من العلاقة:

$$J = \int \rho(x) \cdot r^2 \cdot dx \quad (2-6)$$

يظهر من هذه المعادلة أن السرعة الزاوية العالية وتوضع المادة على مسافات كبيرة  $r$  من محور الدوران ستؤدي إلى زيادة كمية الطاقة المخزنة.

### 6-1-2- المواد المستخدمة في دائر دولاب العطالة

#### Rotor of Flywheel Materials

يوجد صنفان أساسيان للمواد التي يصنع منها دائر دولاب العطالة. الصنف الأول يستخدم خلائط متقدمة مثل الكربون - فيبر (carbon-fiber) والجرافييت (graphite). هذه المواد لديها متانة شد عالية (high strength) نسبة لوزنها والذي يعطي دولاب العطالة القدرة على امتلاك طاقة نوعية عالية. أما الصنف الثاني فيستخدم الفولاذ (steel) كمادة أساسية في دائر الدولاب. هذا الصنف موجود في تصاميم دولاب العطالة التقليدية والتي تكون ذات قطرات كبيرة وتدور ببطء وفيها كثافة الطاقة والاستطاعة منخفضة. في دولاب العطالة الحديثة بدأ استخدام الدائير الكهرومغناطيسية والذي يحقق كثافة استطاعة تخزين عالية قريبة من الصنف الأول مع تكلفة أقل [3].

### 6-1-3- المسائد المغناطيسية Magnetic Bearing

إن العائق الأساسي لاستخدام المسائد الميكانيكية في دولاب العطالة هو الاحتكاك (friction) العالي والعمر القصير نسبياً وخاصة في السرعات العالية، والحل التقليدي لهذه الضياعات هو عمل الدولاب في الفراغ. ولتجنب استخدام أي شكل من أشكال المسائد الميكانيكية تم مؤخراً استخدام المسائد (الحوامل) المغناطيسية حتى وحدات يوزن 200ton وذلك باستخدام مغناط دائمة أو مغناط كهربائية مصنوعة من مركبات الكوبالت الخام.

إن الحوامل المغناطيسية ليس لها أي احتكاك مع المحور ولا آية ملحقات دوارة ولا تحتاج آية أدوات للتزييت، وهي تتآلف من مغناطيس دائمة والذي يزيد من وزن

الجسم الدوار و تساعد أيضاً على تحقيق استقرار دو لاب العطالة ولكنها تحتاج الى دارة قيادة معقدة نسبياً [3].

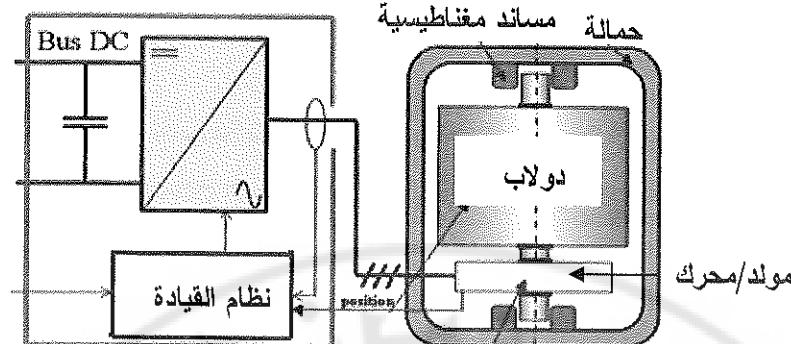
ومن أفضل المساند تلك المصنوعة من الموصلات فائقة الناقلية ذات درجات الحرارة العالية HTS (high-temperature superconducting) وهي من الممكن أن تعمل بشكل تلقائي دون الحاجة لتزويدها بالطاقة الكهربائية [14]. حيث تساعد ظاهرة الطفو floating في الموصلات فائقة الناقلية ببقاء دو لاب العطالة طافياً (معلقاً) مسافة ما عن سطح المساند مما يعني ضياعات احتكاك معدومة تماماً. لكن هذه التواقل بطبيعة الحال تحتاج إلى تبريد عن طريق الترددات السائل مما يزيد في كلفة نظام التخزين الإجمالية [56].

#### 6-1-4- مكونات وحدة تخزين الطاقة بدو لاب العطالة

##### Components of FES Unite

يوضح الشكل (6-1) مخطط بنوي لوحدة تخزين بدو لاب العطالة. يتكون هذا النظام من كتلة عطالة مربوطة إلى آلة (محرك-مولد) (موصل إلى الشبكة عن طريق مبدل إلكتروني) ومساند خاصة (غالباً مغناطيسية) والجميع موضوع في حاملة ذات ضغط منخفض للتقليل من ضياعات التفريغ الذاتي (self-discharge). بالنسبة للمحرك (والذي يعمل مولد حسب اتجاه الاستطاعة) مولد المستخدم لتزويد دو لاب العطالة فله أشكال وأنواع مختلفة ومن أهمها الآلات ذات المغناطيس الدائم والآلات التحريرية التقليدية [3].

<sup>6</sup> ينبع من جراء رفض الموصلات الفائقة لمجالات المغناطيسية وتمتنعها المعانكس ما يسمى بظاهرة الطفو، إن ظاهرة الطفو تحصل عندما يتم محاولة وضع قطعة مغناطيس في أعلى موصل فائق أو العكس. فسوف يظل الجسم العلوي معلقاً في الهواء (طافياً) سواء كان المغناطيس أو الموصل نفسه.

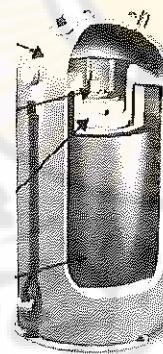


الشكل (1-6): مخطط لوحدة تخزين الطاقة بدولاب العطالة

#### ٦-١-٥- مجالات استخدام نظم تخزين الطاقة بدولاب العطالة

لقد انتشر استخدام نظم التخزين بدولاب العطالة في الفضاء (المحطات الفضائية، والأقمار الصناعية) وفي المركبات الكهربائية لتقديم نسبات الاستطاعة كما في الإقلاع.

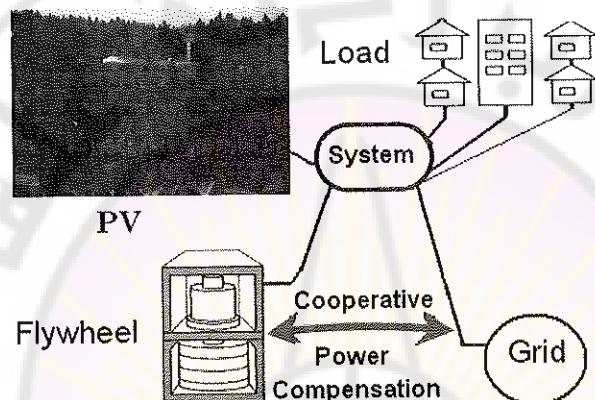
يظهر الشكل (2-6) صورة لدولاب العطالة المستخدم في نظام الاتصالات (Beacon) Power Systems (وله المواصفات التالية:  $P_{max}=2kW$ ,  $E_{max}=6kWh$  وسرعة دوران  $2500r.p.m$ <sup>7</sup>، ودائر مصنوع من فيبر وارتفاعه  $1.2m$  ونصف قطره  $68cm$  وكتلته  $800kg$  وعمره الافتراضي  $20years$ ).



الشكل (2-6): صورة لدولاب العطالة

[www.beaconpower.com](http://www.beaconpower.com)<sup>7</sup>

لقد جرى تركيب نظام تخزين بدولاب العطالة في إحدى بلدات جنوب ولاية تكساس في الولايات المتحدة الأمريكية. يظهر الشكل (6-3) مخطط رمزاً للنظام الكهربائي (حمل محلي - شبكة - نظام كهروضوئي - نظام التخزين بدولاب العطالة) في هذه البلدة وفيه يتعاون نظام التخزين والشبكة الكهربائية على تعويض الفرق الحاصل بين منحني الحملة المحلية والاستطاعة المولدة من النظام الكهروضوئي.



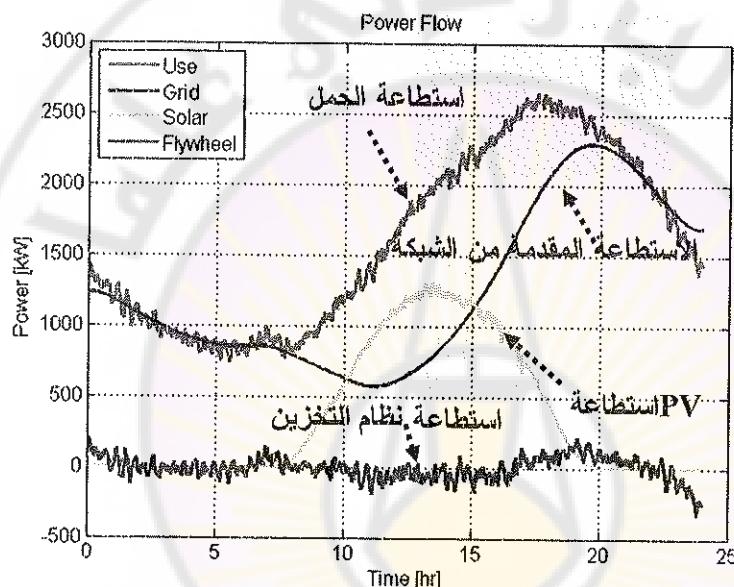
الشكل (6-3): مخطط رمزي للنظام الكهربائي حمل-شبكة-نظام كهروضوئي-نظام دولاب العطالة

الاستطاعة العظمى لحمل هذه البلدة كانت 2500kW وتغذى من نظام كهروضوئي PV باستطاعة عظمى تصل لـ 1500kW ومن الشبكة الكهربائية العامة. وفي يوم من شهر آب لعام 2011 (Data from ERCOT) تم تسجيل النتائج الموضحة في الجدول (6-1) [58].

جدول (6-1): مواصفات الحمل ونظام التخزين بدولاب العطالة المركب [58]

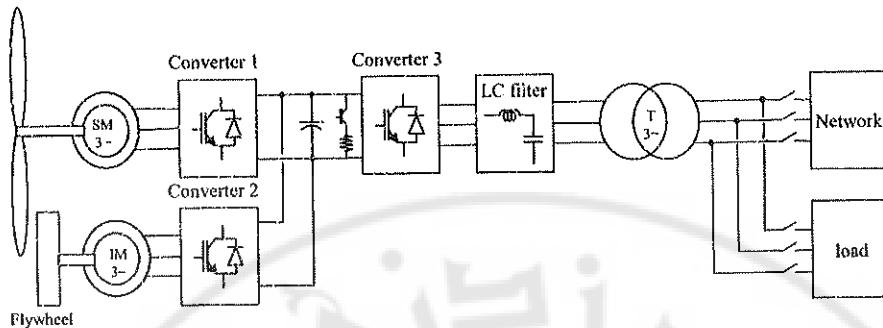
نظام التخزين النهاري المطلوب	استطاعة التخزين المطلوبة	استطاعة حمل عظمى	
15 kWh / 6 kW	2 kWh / 6.2 kW	5.7 kW (average)	منزل
5.9 MWh / 1200 kW	450 kWh / 300 kW	2500 kW	البلدة (741 منزل)

إن الهدف الذي من أجله جرى تركيب نظام التخزين بدولاب العطالة باستطاعة 300kW هو لتعويض التغيرات السريعة في استطاعة الحملة. يوضح الشكل (4-6) الاستطاعات المسجلة خلال 24 ساعة، وهي استطاعة الحمل، واستطاعة النظم الكهروضوئية، والاستطاعة المقدمة من الشبكة، واستطاعة نظام دولاب العطالة. وهذه الأخيرة تأخذ قيماً موجبة أي حقن بالحمل وقيماً سالبة أي شحن.



الشكل (4-6): (التغير الزمني لاستطاعات النظام المدروس [58]

من جهة أخرى، يجري استخدام نظم التخزين بدولاب العطالة بكثرة لتدعيم خرج العنفات الريحية. وتظهر أهمية هذه النظم من أجل تغيرات في سرعة الرياح من رتبة الثانية حتى ثلات دقائق. يوضح الشكل (5-6) مخطط عام لربط نظام التخزين بدولاب العطالة إلى قضبان تجميع التيار المستمر (DC-link) للعنفات الريحية ويتم ذلك الربط عن طريق مقطع Buck-boost عكوس بالتيار.



الشكل (5-6): مخطط عام لربط نظام التخزين بدولاب العطالة إلى خرج العنفات الريحية

من أجل عنفة متغيرة السرعة فإن التوتر على خرجها يتغير بتغير سرعة الرياح. فمهمة نظام التخزين بدولاب العطالة (وكذلك بالنسبة للمكبات فائقة السعة) هنا تكمن في التخفيف من تغيرات التوتر بسبب التغيرات في سرعة الرياح.

هناك عدة دراسات أجريت بهذا الخصوص مثل الدراسة التي أجريت في ليتوانيا. فمن أجل تخفيض تذبذب الاستطاعة الناتجة عن مزرعة ريحية ذات استطاعة اسمية 30 ميجاواط تم تركيب نظام تخزين مكون من ثلاثين وحدة باستطاعة 3 ميجاواط والطاقة 0.75 ميجاوات ساعي [59].

إن قدرة نظم التخزين (دولاب العطالة والمكبات فائقة السعة والملفات فائقة الناقلة) على تنظيم التوتر على خرج عنفة متغيرة السرعة يجعلها مفيدة أيضاً في تخفيض هبوطات التوتر الناتجة الأعطال الكهربائية في الشبكات الكهربائية.

وعلى الرغم من الخصائص المميزة لهذه النظم مثل سرعة الاستجابة والعمر الافتراضي الطويل الذي يمكن أن يصل إلى 20 سنة وعدد دورات الشحن والتفرير الكبير (أكثر من مليون دورة) إلا أن التكلفة العالية لها تحد من استخدامها وتطويرها بشكل أكبر.

## 6-2- تخزين الطاقة بالضخ المائي

### Pumped Hydroelectric Energy Storage

إن نظم تخزين الطاقة بالضخ المائي والتي تسمى اختصاراً (PHES) تستفيد من الجاذبية الأرضية في توليد الطاقة. فالطاقة الكامنة المخزنة في الماء تولد طاقة كهربائية لدى سقوطها من حوض علوي إلى حوض سفلي وتخزن طاقة لدى رفعها بالعكس. إن هذه النظم ماهي إلا مراكز ضخ - توليد وتستخدم للطاقات العالية (بضعة أو مئات MW).

#### 6-2-1- مبدأ التخزين بالضخ المائي Principle of PHES

إن العمل المبذول  $W$  الذي تقوم به كتلة  $m$  عندما تهبط مسافة  $h$  يعطى بالعلاقة التالية:

$$W = \frac{m \cdot g \cdot h}{3600} (Wh) \quad (3-6)$$

حيث:

$g$ : الجاذبية الأرضية.

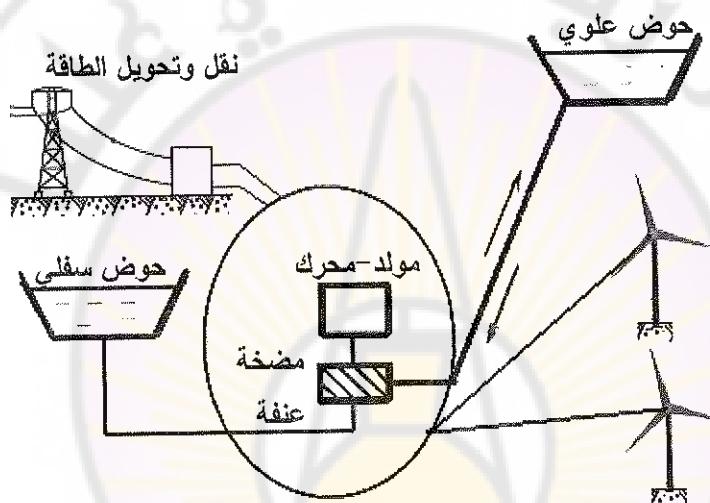
بحسب هذه العلاقة أعلاه يمكن لكتلة 1ton تسقط لمسافة 100m أن تنتج عملاً مقداره فقط 0.272 kWh [57]. وعليه يجب استخدام كتلة ضخمة من الماء من أجل الحصول على استطاعة عالية تعمل فقط لمدة ساعة واحدة، ولايمكن أن نجد مثل هذه الكتلة الضخمة إلا في السدود الكبيرة (barrages). هذا النوع من السدود يجمع المياه في أحواض كبيرة في سفوح عالية وتتبع الطاقة المنتجة من هذه السدود احتياجات الشبكة الكهربائية. حيث يمكن استخدام بعض هذه الطاقة في ساعات الذروة.

#### 6-2-2- آلية تخزين الطاقة بالضخ المائي

### Process of Energy Storage By Pumped-Hydro

إذا أردنا تخزين الطاقة الكهربائية، فيجب استخدام المياه باتجاهين (انظر الشكل (6-3)) من وإلى الحوضين وبشكل دوري عن طريق العنفة المائية والتي تصبح مضخة عند رفع المياه.

إن المبدأ العام لعمل هذا النظام معروف ويعتمد على طلب الطاقة. في الأوقات التي يكون فيها الطلب على الطاقة عالياً كأوقات الذروة، تُسَيِّل الماء من الحوض العلوي إلى السفلوي مروراً بالعنفة لتوليد الطاقة الكهربائية وثم نحقن الطاقة في الشبكة عبر محولة وخطوط النقل. أما في الأوقات التي يكون فيها الطلب على الطاقة منخفضاً (أي يوجد فائض في الطاقة المولدة) مثل منتصف الليل، يجري رفع المياه من الحوض السفلي إلى العلوي باستخدام المضخات والتي تعمل بمحركات مغذاة من الشبكة أو من مصادر طاقات متعددة.



الشكل (3-6): مخطط نظام تخزين مائي مربوط لمصدر طاقات متعددة

في بلد مثل كيبيك Quebec (كندا) ينصح الخبراء بوضع العنفات الريحية بجانب الأحواض المائية حيث الطاقة المنتجة من الرياح تتكامل بشكل جيد مع الطاقة المولدة من الضخ المائي، في الخريف تكون الأحواض شبه فارغة بعد أشهر من الحر والرياح قوية والطلب على الطاقة مرتفعاً وخاصة خلال النهار. وفي الربيع يكون العكس حيث الرياح ضعيفة والأحواض العلوية ممتلئة [57].

### 6-3-2- مشاريع عملية

تقوم عدة دول بتخزين كميات كبيرة من الطاقة - ما يقارب 22GW في الولايات المتحدة (انظر في الفصل الأول الجدول (3-1)) - باستخدام طريقة الضخ المائي. وفي هذا البلد ثمة 38 منشأة للضخ المائي تستطيع تخزين ما يزيد عن 2 بالمئة من استطاعة التوليد الكهربائية العظمى. وتُعد هذه النسبة صغيرة مقارنة بمثيلاتها في أوروبا (حيث تقارب النسبة 5 في المائة)، أو في اليابان (نحو 10 في المائة).

في العام 1998 وفي جزيرة أوكيناوا Okinawa (اليابان) تم بناء مشروع نظام التخزين بالضخ المائي من النوع المشار إليه بالشكل (3-6) باستطاعة 30MW حيث يجري في هذا المشروع استخدام مياه البحر. يُخزن الماء في حوض بسعة 600000m<sup>3</sup> وبارتفاع 150m عن سطح البحر، ومعدل كمية المياه الداخلة إلى العنفة هو  $25\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ . [60]

ومن بين أكثر البرامج طموحاً في الولايات المتحدة مشروع إيكل ماونتن لتخزين الطاقة بالضخ المائي (Eagle Mountain Pumped Storage Project) جنوب كاليفورنيا. ويرمي هذا المشروع إلى تحويل منجم مهجور إلى خزانين بغية تخزين الطاقة المستمدّة من العلفات الريحية والمزارع الشمسية المحلية، وهذا من شأنه أن يخزن استطاعة كهربائية مقدارها 1.3GW، أي ما يعادل استطاعة محطة نووية ضخمة لتوليد الطاقة الكهربائية. أما في ولاية مونتانا، فيُنتظر من مشروع گراسلاندز للطاقة التجددية (Grasslands Renewable Energy)، المقترن لتخزين الطاقة بالضخ المائي، أن يخزن طاقة الرياح المستمدّة من السهول العظمى (Great Plains)<sup>8</sup> في بحيرة صناعية ستقام على قمة هضبة منعزلة شديدة الانحدار، يبلغ مسقط انحدارها 400 متر [61].

<sup>8</sup>: سهول مرتفعة تقع في الجزء الغربي من وسط الولايات المتحدة الأمريكية والجزء الغربي من كندا شرق جبال روكي، تبلغ مساحتها 2,900,000 كيلومتر مربع.

في العقد الأخير عرف التخزين المائي تطوراً كبيراً حيث ارتفعت الاستطاعة من عشرات الكيلو واط الى 1000MW والارتفاعات من 100m الى 1200m وحقق المردود تطوراً كبيراً أيضاً من 40% الى 80%. لذا تتطلع بلدان مثل اليابان إلى التوسع في استخدام تخزين الطاقة بالضخ المائي ليصل في عام 2030، كما هو متوقع، إلى 30%÷40% من إجمالي الاستطاعة المركبة، حيث الطبيعة الجغرافية تسمح بشكل كبير بالتخزين المائي.



الفصل السابع

تخزين الطاقة بالهواء المضغوط

Compressed Air Energy Storage



## 7- تخزين الطاقة بالهواء المضغوط

### Compressed Air Energy Storage

لقد تطورت نظم تخزين الطاقة حتى أصبح بالإمكان استخدام الهواء ليكون وسيطاً لتخزين الطاقة، حيث يجري تحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية ثم إلى غاز مضغوط وبعكسه. تعرف هذه النظم بنظام تخزين الطاقة بالهواء المضغوط CAES والتي تعرف اختصاراً بـ Compressed Air Energy Storage.

#### 7-1- اعتبارات عامة في الضغط

لحساب مقدار الطاقة المخزنة في هواء مضغوط سوف نعرض مراجعة مختصرة لحسابات القوانيين الأساسية في الترموديناميكي.

عندما يقوم المكبس بضغط الغاز تبدأ عملية تخزين الطاقة وعند تمدد الغاز تتحرر هذه الطاقة لأداء عمل مفيد بواسطة عكس حركة المكبس. إن قانون الغاز المثالي يتعلق بالضغط  $P$  والحجم  $V$  وبدرجة الحرارة  $\theta$ ، كما في العلاقة التالية:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot \theta \quad (1-7)$$

حيث:

$n$ : عدد المولات،

$R$ : ثابت غازي (ويؤخذ مساوياً للثابت العام للغازات).

إلا أنه عملياً لا تسلك الغازات الحقيقة سلوك الغاز المثالي بل تنحرف قليلاً عنه، ويمكن بشكل عام إهمال هذه الانحراف.

ووفقاً لقانون الأول في الترموديناميكي، الذي يعطي بالعلاقة أدناه، فإن أي عمل مبذول (مفید) يُخزن بشكل طاقة داخلية في الغاز، وجزء منه يتتحول إلى حرارة.

$$Q = \partial E + W \quad (2-7)$$

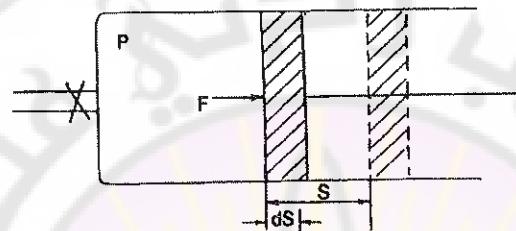
حيث:

Q: كمية الحرارة،

$\delta E$ : التغير في الطاقة الداخلية،

W: العمل المفيض.

من جهة أخرى لنفرض أن المكبس يمكنه الحركة كما يوضح الشكل (1-7) ودون احتكاك.



الشكل (1-7): مكبس يتحرك تحت تأثير القوة

عندما يُدفع المكبس بقوة  $F$  مسافة  $ds$  عنصرية  $ds$  ضاغطاً الغاز فإنه ينجز عملاً يساوي جداء القوة المطبقة  $F$  بالمسافة  $ds$  كما في العلاقة التالية:

$$W = \int F \cdot ds \quad (3-7)$$

إن الضغط هو بالتعريف نسبة القوة  $F$  إلى المساحة  $A$  (مساحة الهواء المضغوط)  $(P=F/A)$  ومنه تصبح علاقة العمل بالشكل التالي:

$$W = \int P \cdot A \cdot ds = \int P \cdot dV \quad (4-7)$$

حيث أن الحجم المضغوط يساوي  $dV = A \cdot ds$ .

ومن أجل درجة حرارة ثابتة يمكن أن تصبح علاقة العمل المنجز بين حجمين (من  $V_1$  إلى  $V_2$ ) كمالي:

$$W = n \cdot R \cdot \theta \cdot \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = n \cdot R \cdot \theta \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (5-7)$$

فعلى سبيل المثال، من أجل حجم ابتدائي  $V_1=1\text{m}^3$  وضغط  $P_0=2.03\text{bar}$  وحجم نهائي  $V_2=0.4\text{m}^3$  ودرجة حرارة ثابتة فإن كثافة الطاقة المخزنة في المتر المكعب تساوي  $1.86 \times 10^5 \text{J}$ .

إن موضوع ترموديناميك الغازات معقد ومتداخل ولن ندخل في تفاصيله في هذا الكتاب الأكاديمي ولكن لابد أن نشرح أشكال نظم التخزين لهذا النوع. يوجد شكلان أساسيان لتخزين الطاقة بالهواء المضغوط هما [61]:

Adiabatic Isothermal Compressed Air Energy Storage و Compressed Air Energy Storage. لفهم ذلك نميز نوعين من الفرضيات بين درجة الحرارة والضغط عند إجراء عملية ضغط الغاز في حجم ما:

## 1. فرضية ضغط متساوي الحرارة

### Isothermal Compression Hypothesis

يفترض أن الغاز المضغوط يبقى عند درجة حرارة ثابتة طوال عملية الضغط أو عملية التمدد. وهي حالة مثالية، ويفترض فيها أن معدل نقل الحرارة إلى الغاز المضغوط متساوٍ أي الحرارة الناتجة عن العمل الميكانيكي المبذول لإجراء عملية ضغط الغاز تساوي الحرارة المنتشرة إلى الوسط المحيط وكل العمل الميكانيكي المبذول يتتحول إلى طاقة داخلية.

يمكن فهم هذه الفرضية أي إجراء عملية ضغط الغاز عند حرارة متساوية (أو تمديد الهواء لاستعادة الطاقة المخزنة) عندما يكون الضاغط لديه سطح تبادل حراري مع الوسط المحيط كبير. ولكن في الواقع لا يمكن الحفاظ على حرارة متساوية خلال كامل عملية الضغط.

## 2. فرضية ضغط ثابت الحرارة

### Adiabatic Compression Hypothesis

يففترض أنه لا يتم نقل أية حرارة (طاقة) من أو إلى الغاز في أثناء عملية الضغط ويتم تخزين كل العمل الميكانيكي المبذول على هيئة طاقة داخلية في الغاز، مما يؤدي إلى

زيادة درجة الحرارة والضغط . وعلى العكس، عندما يتمدد الغاز تحت حرارة ثابتة، إن الضغط ودرجة الحرارة ينخفضان معاً من دون زيادة أو نقصان في الحرارة. إن عملية الضغط (أو التمدد) ثابتة الحرارة يمكن أن تعبّر عن الحالة الحقيقة عندما يكون الضاغط معزول حرارياً. ولكن دائماً في الحالة الحقيقة يكون هناك كمية من الحرارة، مهما كانت صغيرة، تتنشر من الغاز المضغوط إلى الوسط المحيط عبر العازل الحراري وذلك لأن العازل المثالي غير موجود في الواقع.

طبعاً الحالات المذكورة هي حالات مثالية لا يمكن تحقيقها بشكل مطلق، وإن أحد العوائق العملية لتطبيق تقنية تخزين الطاقة بالهواء المضغوط هو كون الهواء يسخن عندما يُضغط ويبرد عندما يتمدد، وهذا يعني أن بعض الطاقة التي تصرف في عملية الضغط تضيع على شكل حرارة.

## 7-2- طرائق تخزين الطاقة الكهربائية بالهواء المضغوط

يمكن تخزين الطاقة الكهربائية بالهواء المضغوط بطريقتين هما:

- هواء مضغوط في وعاء ضغط (قفيتة) Compressed Air in Bottle )

،(or Vessel

- هواء مضغوط في كهوف جوفية (Compressed Air in Cavern)

### 7-2-1- هواء مضغوط في وعاء ضغط

في هذه الطريقة يكون الهواء مضغوطاً في وعاء ضغط (مع بنية مركبة مصنوعة من فيبر fiber) حيث يسمح المكبس بضغط الهواء حتى 300bars في وعاء عن طريق ضاغط كهربائي يمكن أن يصبح مولداً كهربائياً عند استعادة الطاقة المخزنة في الهواء (انظر الشكل (2-7)). يرافق عملية ضغط الهواء ضياعات مهمة ويصبح المردود متوسط القيمة ويمكن تخفيض هذه الضياعات بشكل جيد باستخدام سائل مثل الزيت أو الماء حيث المحرك يضغط السائل الذي بدوره يضغط الهواء [57].

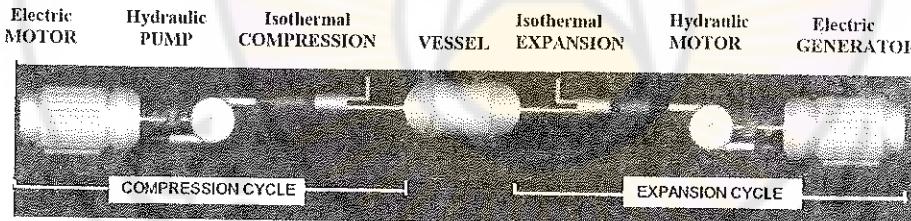
على سبيل المثال من أجل ضغط 200bars فإن الطاقة الحجمية المخزنة في الهواء المضغوط تكون  $6\text{Wh/liter}$ . عبوة تحت ضغط 200bars فيها هواء  $100\text{kg}$  حجمه  $140\text{liter}$  فإن الطاقة المخزنة تكون تقريباً  $800\text{Wh}$  أي  $8\text{Wh/kg}$  [57].

تستخدم هذه التقنية مع العنفات الريحية على مستوى العنفة الواحدة ومن أجل المزارع الريحية تستخدم تقنية الهواء المضغوط في الكهوف.

يوضح الشكل (7-2) مخططاً عاماً لنظام تخزين في وعاء ضغط والذي يمر بمرحلتين:

1. دورة تخزين (compression cycle) أي ضغط الهواء، فعند وجود فائض في الطاقة نغذي محركاً كهربائياً (electric motor) ليدير مضخة هيدروليكيه (pump hydraulic)، تضغط الهواء تحت حرارة متساوية (isothermal compression) في وعاء ضغط.

2. دورة تعدد الهواء (expansion cycle) أي استعادة الطاقة المخزنة، يُدبر الهواء المضغوط (high pressure gas storage) بمساعدة محرك هيدروليكي مولدة كهربائية (electric generator) تنتج الطاقة الكهربائية.



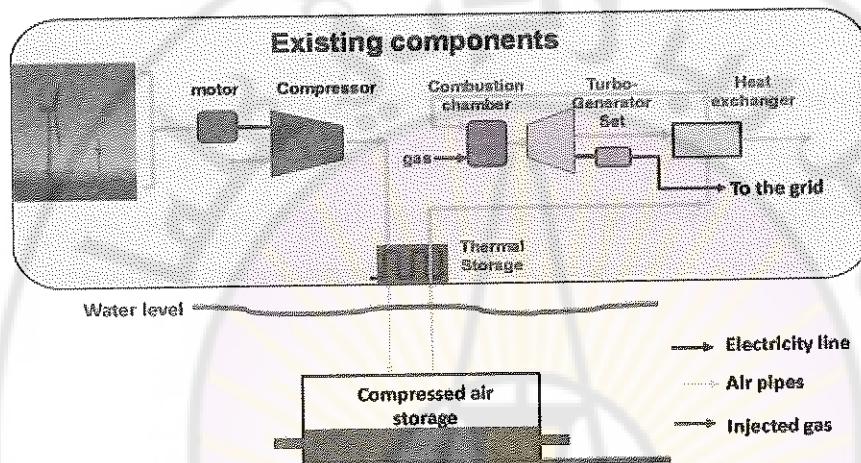
الشكل (7-2): مخطط رمزي لنظام تخزين في وعاء ضغط

#### 2-2-7 - هواء مضغوط في كهوف جوفية

اكتشفت تقنية تخزين الهواء المضغوط في الكهوف من قبل Stal Laval في عام 1949. ومنذ ذلك الوقت أنشئت مؤسستان تجاريتان هما Huntrof CAES في ألمانيا، و McIntosh CAES في أمريكا.

في هذه النظم، يجري تخزين الهواء تحت ضغط أعلى من 40bar إلى 70bar وفي درجة حرارة الوسط المحيط بهدف تخفيف حجمه الكتلتى وتخفيف سعة خزان الهواء. ومع ذلك يبقى الحجم عاملًا مهمًا في هذه النظم. يمكن أن تكون هذه النظم مربوطة إلى عنفات ريحية كما يظهر الشكل (3-7).

## Schematic Drawing



الشكل (3-7) : مخطط ربط نظام تخزين الطاقة بالهواء المضغوط في الكهوف إلى الشبكة العامة [63]

يبين الشكل (3-7) أن نظام التخزين CAES يمكن أن يحتوي على المكونات التالية : [3]

- المحرك: مغذي من منبع تيار كهربائي (طاقة متتجدد مثلاً) يحرك الضاغط.
- الضاغط compressor: يقوم بضغط الهواء الجوي ونقله بواسطة الأنابيب إلى خزان الهواء.
- المبادل الحراري heat exchanger: بعد ضغط الهواء ترتفع درجة حرارته لذلك يتم تبريده باستخدام مبادل حراري يعتمد على الهواء كوسيل تبريد.

4- صمام التوصيل air pipe: يوجد هذا الصمام عند مدخل خزان الهواء، حيث

يسمح للهواء بالمرور إلى الخزان أو الانتقال مباشرةً إلى التوربين لتوليد الكهرباء.

5- حجرة الاحتراق combustion chamber: يتم في حجرة الاحتراق مزج الهواء

المضغوط مع الغاز الذي يمكن أن يكون غازاً طبيعياً أو غازاً حيوياً.

6- مجموعة عنفة- مولد turbo set -generator: يتم توجيه غازات الاحتراق

الناتجة من حجرة الاحتراق على عنفة غازية لتدير مولداً كهربائياً.

7- خزان هواء gas vessel

- يجب أن يتحمل الخزان ضغط الهواء العالي (في حال كان الضغط 70bar

يكون الخزان بسماكه 10cm من الفولاذ)،

- يمكن أن يكون خزان الهواء أباراً ناضبة أو كهوفاً ملحية،

- يعتبر الخزان العنصر الأكثر تكلفة في النظام لذلك لا يفضل استخدام نظم الهواء

المضغوط للتخزين طويلاً الأمد ما لم يتتوفر خزان طبيعي.

#### مجالات استخدام نظم التخزين بالهواء المضغوط:

يمكن أن تستخدم نظم التخزين بالهواء المضغوط فيما يلي:

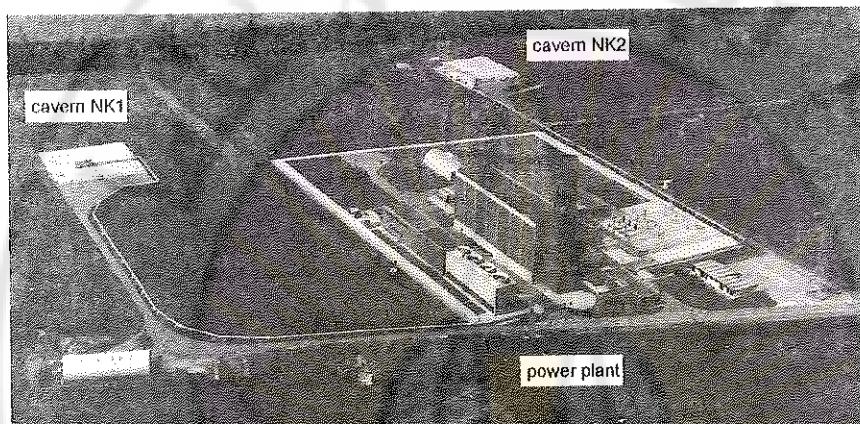
- ثلبيّة الطلب على الذروة في نظام القدرة أو في النظم الشمسيّة الكهروضوئية للتغذية خلال ساعات الليل. يُعرف هذا النوع من التخزين بالتخزين قصير الأمد.

- التحكم بالاستطاعة المقدمة من العنفات الريحية بشكل خاص نظراً لانقلابات الرياح. يمكن أن يكون هذا التخزين متوسط الأمد (أي لأسابيع) وغالباً ما تستخدم النظم ذات الهواء المضغوط في الكهوف لهذا الغرض. أو يمكن أن يكون تخزينها طويلاً الأمد وذلك لتعطية تغيرات الرياح الفصلية.

### 7-3- حالات عملية لنظم التخزين بالهواء المضغوط

#### 7-3-1- نظام التخزين في Huntorf

وكما ذكرنا سابقاً أن أكبر نظامين لتخزين الطاقة بالهواء المضغوط موجودان في ألمانيا والولايات المتحدة. سنتطرق لدراسة الحالة الألمانية أولاً، حيث يوضح الشكل (4-7) صورة لموقع نظام التخزين هذا. لقد تم تركيب هذا النظام منذ العام 1978 في Kraftwerk- Germany (في شمال ألمانيا) كأول محطة من هذا النوع في العالم، وذلك لتغذية أحمال الدروة [62].



الشكل (4-7): صورة لموقع نظام التخزين في Huntorf

وقد جرى بناؤه استجابة لازدياد الطلب على طاقة الرياح في ألمانيا وازدياد أهمية ما يسمى بـ "احتياطي الدقيقة" الذي يشير إلى الزمن اللازم بالدقيق لوضع نظام التخزين في الخدمة. بعد عدة سنوات من الخدمة تم توسيع كهف الهواء في نظام التخزين هذا ليصل إلى  $310,000\text{m}^3$ . وقد تم تخزين الهواء في كهفين لأسباب فنية.

وقد حسم عمق الكهوف بطريقة تضمن الاستقرار والتوازن لعدة أشهر بين الضغط الداخلي والضغط الجوي، وكذلك ليتحمل ضغط أكبر من 100bar. ويسمح التصميم المختار أيضاً بمعدلات استرجاع للهواء المخزن عالية من رتبة 417kg/s (مقابل معدل ضغط 108kg/s) وبتضييعات منخفضة (انظر الجدول (7-1)). ولمنع خطر

تأكل جدران الغلاف الأخير للكهف بسبب رطوبة الهواء فإنها تُبطن بالفولاذ وبجدران سميكه [62].

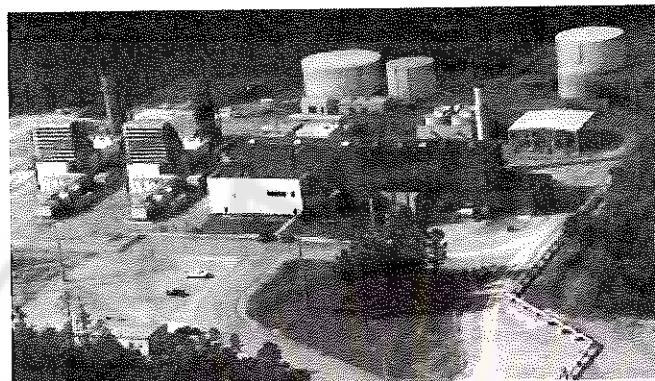
**الجدول (7-1): مواصفات نظام Huntorf للتخزين بالهواء المضغوط [62]**

- output خرج النظام	290 MW (< 3 hrs) 60 MW (< 12 hrs)
- air flow rates معدل تدفق الهواء	417 kg/s 108 kg/s air mass flow ratio in/out 1/4
- number of air caverns عدد الكهوف	2
- air cavern volumes (single) حجم الكهوف (single) total cavern volume	~140 000 m <sup>3</sup> ~170 000 m <sup>3</sup> ~310 000 m <sup>3</sup>
- cavern location موقع الكهف	~650 m ~800 m
- maximum diameter القطر	~ 60m
- cavern pressures الضغوط في الكهوف	1 bar 20 bar 43 bar 70 bar
maximum pressure reduction rate	15 bar/h

### 7-3-2- نظام McIntosh

تم في عام 1991، الإعلان عن إنشاء نظام تخزين CAES باستطاعة 110MW في ماكينتوش McIntosh، في الولايات المتحدة الأمريكية. يستخدم هذا النظم كهفاً تحت الأرض لتخزين الهواء المضغوط، وقد شُكل كهف التخزين عن طريق ضخ المياه من وإلى الكهف من أجل حل الملح الموجود فيه سابقاً وتشكيل الكهف. عمق

الكهف هو 220 قدم وقطره 1000 قدم، والحجم الكلي 10 مليون قدم مكعب تحت ضغط 45-74bar. ومعدل استرجاع الهواء (خروج) هو 154 كيلوغرام بالثانية [64].



الشكل (7-5): صورة لنظام CAES في ماكينتوش، في الولايات المتحدة الأمريكية [64]

يغذي الهواء المضغوط الخارج من الكهف عنفات غازية باستطاعة 100MW. ومقارنة بعنفات الاحتراق التقليدية، يمكن للنظام CAES أن يقلع بـ 15 دقيقة بدلاً من 30 دقيقة، ويستخدم 30% إلى 40% فقط من الهواء، و يمكن أن يعمل بطاقة الكاملة أو بجزء منها ( حوالي 25% من الحمل الكامل).

لقد أجرى نظام التخزين McIntosh تحسينات على تصميم Huntorf من خلال الاستفادة من حرارة العنفات لتسخين الهواء الخارج الكهف. كما تغلب على بعض مشكلات الإقلاع مما رفع موثوقية النظام لأكثر من 95%.

لقد أظهر كلا هذين النظامين الجدوى الفنية لنظام التخزين CAES في الشبكة الكهربائية من خلال توفير وسيط مساعد باستطاعة عالية وسريعة نسبياً مقارنة بالمحطات الغازية التقليدية.

وعلى الرغم من نجاحهما من وجهة النظر الفنية، إلا أن هناك القليل من نظم التخزين CAES التي تم إنشاؤها في أوروبا حتى العام 2011.

#### 7-4- تطبيقات نظام التخزين بالهواء المضغوط في الطاقات المتجددة

إن الكفاءة العالية التي تميز بها نظم التخزين بالهواء المضغوط بفضل انخفاض معدلات تغير الحرارة فيها مقارنة بالعنفات الغازية التقليدية واستجابة أسرع بسبب طريقة التحكم المتطورة بالعنفة، جعلتها مناسبة جداً لتعويض تغيرات الاستطاعة الحاصلة في الطاقات المتجددة وخاصة طاقة الرياح وفيما يلي بعض المشاريع المنفذة في هذا المجال:

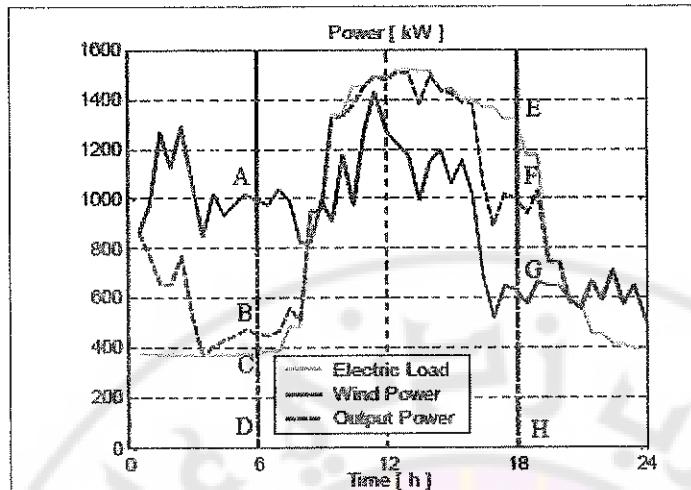
##### 7-4-1- نظام التخزين بالهواء المضغوط في ايوا Iowa

إن آخر مشروع تم تنفيذه في الطاقات المتجددة كان في ولاية ايوا عام 2011 (وبدعم من وزارة الطاقة في الولايات المتحدة (DOE)) وقد هدف إلى تطوير مزرعة طاقة جديدة (energy park) التي من شأنها أن تدمج مزرعة ريحية باستطاعة 75 - 150 ميجاواط مع نظام تخزين CAES وبتكلفة 200 مليون دولار مع استطاعة تخزين بالهواء المضغوط 200 ميجاوات، أي ما يكفي ولاية ايوا لعدة أيام [64].

##### 7-4-2- نظام التخزين بالهواء المضغوط في ساليرنو Salerno

في إحدى الدراسات التي تمت في جامعة ساليرنو Salerno في إيطاليا، جرى تركيب نظام تخزين بالهواء المضغوط بالقرب من الجامعة في كهف حجمه  $3^3 \text{m}^3$  للعمل مع عنفة ريحية استطاعتها الاسمية 1.5MW وتغذي هذه العنفة حملًا محليًا استطاعته العظمى تساوي 1.5MW [65].

يظهر الشكل (6-7) الاستطاعات المسجلة خلال أربع وعشرين ساعة وهذه الاستطاعات هي الاستطاعة المستهلكة من الحمل (electric load) والاستطاعة المولدة من العنفة والاستطاعة المسمى (output power) وتعني مجموع الاستطاعات المقدمة للحمل وللشبكة.



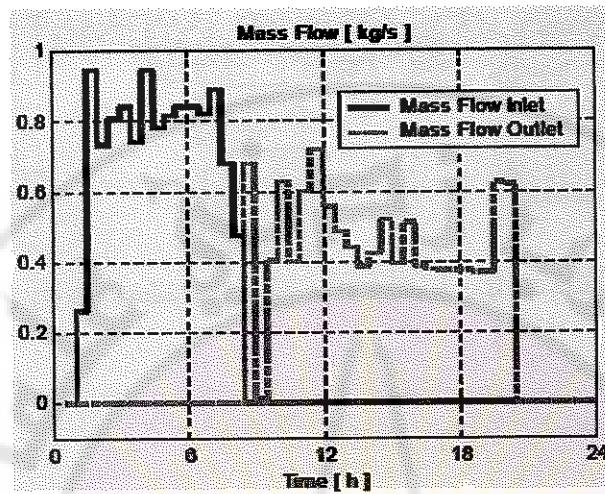
الشكل (7-6): منحنيات الاستطاعة للنظام المدروس [65]

لفهم سلوك نظام التخزين هذا سوف نحلل الشكل (7-6) في ثلاثة أوقات مختلفة:

- في الساعة 6 صباحاً، الاستطاعة المولدة من العنفة الريحية تزيد عن استطاعة الحمولة، فالحمولة تعطى الاستطاعة التي تحتاجها (C-D) والباقي يعطى للضاغط لتخزينه (A-B) وجزء صغير بيع للشبكة (B-C).
- في الساعة 6 مساءً استطاعة الحمل تزيد عن الاستطاعة المولدة من العنفة (G-H) أي استطاعة العنفة غير كافية، فالطاقة المختزنة تغطي جزءاً من الحمولة (F-G) ويجري شراء الجزء الآخر من الشبكة (B-C).
- في منتصف الليل استطاعة العنفة أعلى من استطاعة الحمل فالجزء الفائض لا يخزن بل بيع للشبكة حتى مابعد الساعة الواحدة ليبدأ بعدها تخزين الطاقة.

يمكن فهم عمل نظام التخزين من خلال الشكل (7-7)، والذي يوضح معدل جريان الهواء الداخل (inlet air mass flow) أو الخارج (outlet) من الكهف (الخزان). فالتخزين أي دخول الهواء إلى الكهف يتم خلال الليل (من بعد منتصف الليل وحتى الساعة الثامنة صباحاً). وأما استرجاع الطاقة المختزنة أي خروج الهواء فيتم

لتعويض الفرق الحاصل بين منحنى الحمولة ومنحنى استطاعة العنفة الريحية ويكون ذلك خلال النهار.

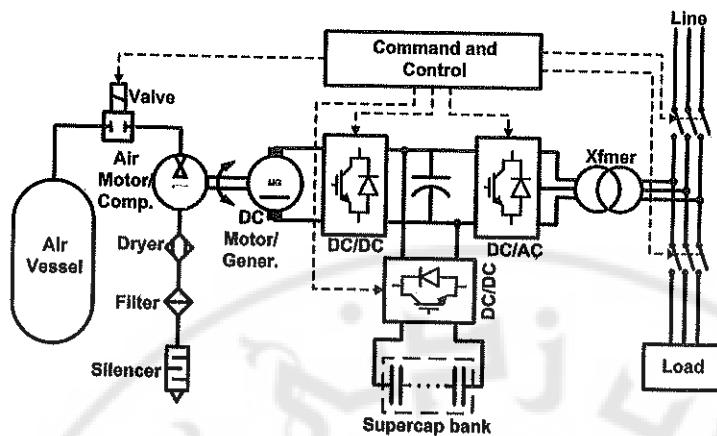


الشكل (7-7): معدل جريان الهواء الداخل أو الخارج من كهف التخزين [65]

#### 7-5- نظام تخزين هجين هواء مضغوط- مكثفات فائقة السعة

إنها التقنية الناضجة بعد الصخ بال المياه والقدرة على تخزين كميات كبيرة من الطاقة الكهربائية.

نقترح إحدى الدراسات في سويسرا ربط نظام التخزين بالهواء المضغوط بوعاء ضغط مع مكثفات فائقة السعة كما يبين الشكل (7-8). يتم ربط نظام التخزين بالهواء المضغوط إلى قضبان تجميع تيار مستمر موصول إليها نظام التخزين بالمكثفات فائقة السعة. الهدف من هذا التجرين هو التحكم بالاستطاعة والتوتر معاً. وقد تم اختبار هذا النظام تجريبياً مع نظام كهروضوئي وأظهر نتائج مشجعة لإجراء هذا النوع من التجرين [66].



الشكل (7-8): مخطط نظام هجين هواء مضغوط ومكثفات قائمة السعة“

**الفصل الثامن**  
**تخزين الطاقة بالحرارة**  
**Thermal energy storage**



## 8- تخزين الطاقة بالحرارة

### Thermal energy storage

#### 8-1- اعتبارات عامة

يمكن تخزين الحرارة في الأجسام الصلبة أو السوائل وحتى في حالة درجات الحرارة المنخفضة نسبياً (نظرياً عندما تكون درجة الحرارة  $T^{\circ}\text{C} < 0$ ) ولكن لا يمكن استعادة الطاقة المخزنة في هذه الأجسام إلا على شكل حرارة. منذ العصور القديمة يُستخدم كلٌ من الصخور الساخنة وقرميد الموقد كوسائل تخزين حرارة أساسية. ومانزال هذه الطريقة متبعة في الأفران الصناعية وفرن الخبز الكهربائي حيث تستخدم الكهرباء الرخيصة (في بعض الدول تسعيره الكهرباء نهاراً أعلى منها ليلاً) لتسخين الفرن في أثناء الليل.

يمكن استخدام التخزين الحراري ذي درجات الحرارة العالية خلال العمليات الصناعية والمحركات الحرارية حيث يجري الاستفادة من الحرارة مباشرة، وكمثال على ذلك منبع التغذية في محركات ستيرلينغ (Stirling engines).

يمكن تخزين الطاقة الحرارية كحرارة محسوسة أو تخزينها كحرارة كامنة أو بواسطة الدمج بين الطريقتين. ويتم التخزين بالحرارة المحسوسة بزيادة درجة حرارة وسط التخزين عند الشحن وسحب الحرارة منه عند التفريغ. أما التخزين بالطاقة الكامنة فيتم بتغيير طور المادة من حالة إلى أخرى تحت درجة حرارة ثابتة.

يتكون نظام التخزين الحراري من: وسيط التخزين (medium)، وحاوية لوسط التخزين (container)، وعزل حراري (insulation) لقليل الضياعات، ومبادل حراري (heat exchanger)، ومائع التبادل الحراري (fluid)، ومحششات أو دافعات هواء (pumps) وأجهزة مراقبة (controlling).

## 8-2- التخزين بالحرارة المحسوسة

تنبدل درجة الحرارة المحسوسة المكتسبة أو المفقودة بواسطة مادة من درجة حرارة مقدارها  $T_1$  إلى درجة حرارة أخرى مقدارها  $T_2$ ، ويمكن التعبير عنها بالمعادلة التالية

: [67]

$$E = m \cdot \int_{\theta_1}^{\theta_2} C_p \cdot dT \quad (1-8)$$

حيث:

$m$ : كتلة المادة المستخدمة .kg

$C_p$ : الحرارة النوعية للمادة .kJ/Kg.C°

$\theta_1$ : درجة الحرارة الابتدائية .C°

$\theta_2$ : درجة الحرارة النهائية .C°

### 8-2-1- وسائل التخزين السائلة Liquid Heat Mediums

إن الماء هو المادة الشائعة الاستخدام في تخزين الحرارة المحسوسة، وهناك سوائل أخرى تستخدم على نطاق ضيق لهذا الغرض ويبين الجدول (1-8) أهم السوائل المستخدمة كوسائل للتخزين ومواصفاتها.

جدول (1-8): وسائل التخزين السائلة المحسوسة [67]

النوعية W/m.C°	الطاقة الحرارية J/Kg.C°	الكثافة عند درجة حرارة الغليان Kg/m³	تكلفة المادة \$/Kg	درجة الحرارة C°		وسط التخزين
				التبر	الذوبان	
0.63	420	960	0	100	0	الماء
0.106	2740	750	2	343	27	الترمينول 66 (Therminol/66)
0.112	2200	867	0.22	260	12	دوايرم (Dowtherm A)

0.57	1560	1680	0.44	540	142	Hitec هيتك (Hitec) 4NaNO <sub>3</sub> , 7NaNO <sub>3</sub> , 53KNO
0.57	1560	1733	0.25	540	220	ملح ذاتي Draw salt 46NaNO <sub>3</sub> , 54KNO <sub>3</sub>
67.5	1260	960	0.57	760	98	الصوديوم

يستخدم الماء عادةً في درجات الحرارة المنخفضة (أقل من 100°C) وهي الدرجات الملائمة لأغراض التدفئة والتبريد.

#### 2-2-8- وسائل التخزين الصلبة Solid Heat Mediums

تتميز المواد اللاعضوية الصلبة بضغطها المنخفض في درجات الحرارة العالية، وحملها الكيميائي، ورخص سعرها. ولكن لمعظم هذه المواد حرارة نوعية وناقلة حرارية منخفضة، ولذا فإنها تتطلب حجوم تخزين كبيرة، ومنظومات تبادل حراري معقدة. يبين الجدول (2-8) أن الصخور ومادة الرمل أفضل المواد المستخدمة وذلك لسعتها الحرارية المقبولة ورخص سعرها.

جدول (2-8): الوسائل الصلبة لتخزين الحرارة المحسوسة

السعر \$/Kg	درجة الذوبان C°	السعه الحرارية J/Kg.C°	الكتافة Kg/m³	وسيط التخزين
0.01	1200.0	880.0	2640.0	الصخور
0.01	1728.0	910.0	2650.0	الرمل
0.66	1535.0	837.0	7900.0	مقاطع حديد الصب Fe
0.32	2700.0	1130.0	3580.0	أوكسيد المنغنيز MgO
0.43	2015	1010.0	3970.0	أوكسيد الألمنيوم (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )

### 8-2-3- التخزين بالحرارة المحسوسة في درجات الحرارة العالية

#### High Temperature Sensible Thermal Energy Storage

في نظم التخزين بالحرارة المحسوسة عند درجات الحرارة العالية من الممكن استخدام ثلاثة أنواع من وسائل التخزين هي: الماء والزيت، الأملام المذابة ومحاليلها، المواد الصلبة.

ومن الواضح أن الماء هو أفضل وسائل التخزين في درجات الحرارة المنخفضة وذلك لكون حرارته النوعية أعلى بكثير من بقية المواد. ولكن الماء يفقد إيجابياته في درجات الحرارة العالية لكونه يحتاج إلى حجم تخزين كبير وخرانات تتحمل ضغطاً عالياً عند تحوله إلى بخار، ولهذا فإن الزيت وبعض المواد الأخرى كالصوديوم والثربينول هي الأكثر استخداماً في مثل هذه الدرجات. ومن المواد المستخدمة أيضاً خليط من الأملام اللاعضوية المذابة وتعتبر مادة الهيبتك مثالاً جيداً لهذه المواد. أما بالنسبة إلى المواد الصلبة فالمواد الأكثر استخداماً هو الرمل والصخور لأن سعة تخزين هذه المواد مناسبة وسعرها منخفض جداً مقارنة بالمواد الصلبة الأخرى.

#### 8-2-4- تجارب عملية في التخزين بالحرارة المحسوسة

إن عملية التخزين مكونة من مرحلة تخزين الطاقة بتسخين الجسم من دون تغير حالته وذلك في حال وجود فائض من الطاقة، ومرحلة استعادة الطاقة المخزنة وفيها يستفاد من الحرارة المخزنة بإنتاج بخار الماء الذي يدور مجموعة عنفة-منوبة.

يوضح الشكل (1-8) مخطط نظام تخزين حراري محسوس قيد الدراسة تصل فيه الطاقة إلى 100GWh وباستطاعة 100MW ومردد مرتفع يمكن أن يصل إلى 60%.

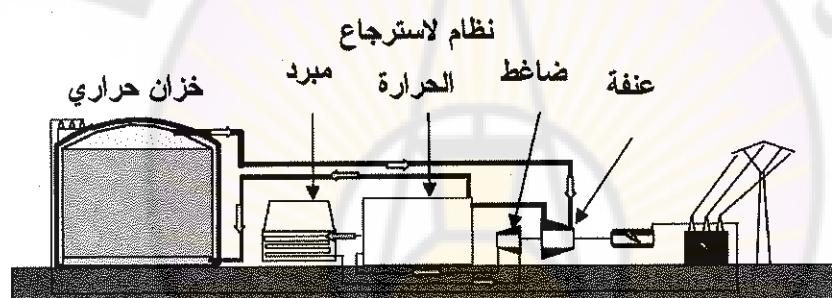
إن تخزين الحرارة في درجة حرارة عالية باستخدام عنفة بخارية تعتبر تقنية جديدة في التخزين تحت حرارة محسوسة ولكنها مازالت قيد الدراسة. وتطلب لتحقيقها مالي (انظر الشكل (1-8)):

- تخزين الكهرباء المحولة إلى حرارة بواسطة مقاومات كهربائية في خزان حراري.

- تحويل الحرارة إلى كهرباء بحقن البخار المسخن إلى داخل عنفة غازية بغرض استعادة الطاقة المختزنة فيه.

إن تطوير هذه التقنية منتظر قريباً بعد إنتاج عنفات غازية ذات درجات حرارة أعلى من  $1400^{\circ}\text{C}$  والذي يساعد بالحصول على مردود (كهرباء-حرارة) من رتبة 60%. في هذا المستوى من درجة الحرارة تصل كثافة الطاقة الممكن احتراها في المرجل إلى  $500\text{kWh}$ . [57]

إن العناصر الازمة لتطوير هذا النظام متوافرة حالياً: المقاومات الكهربائية موجودة، الخزانات الضرورية لتخزين الحرارة موجودة، والعزل الحراري فيها عند درجات الحرارة العالية متطور. لذا بإمكان هذا النظام تخزين كميات كبيرة من الطاقة من دون مخاطر حقيقة والتفريغ الذاتي (تسرب الحرارة) فيه منخفض.



الشكل (1-8): مخطط نظام تخزين حراري محسوس يستخدم عنفة غازية

لابد من الإشارة هنا إلى أن تكلفة الكيلو واط ساعي في هذه النظم تتعلق بدرجة الحرارة العالية فكلما كانت درجة الحرارة عالية كانت التكلفة منخفضة.

### 8-3- التخزين بالحرارة الكامنة Latent Heat Storage

إن الحرارة الكامنة هي كسب وفقد الحرارة لمادة بواسطة تغير صفاتها الفيزيائية، أي بتغيير طورها، من حالة إلى أخرى تحت درجة ثابتة. وهناك ثلاث حالات يمكن استخدامها لتخزين وتغريغ الطاقة هي:

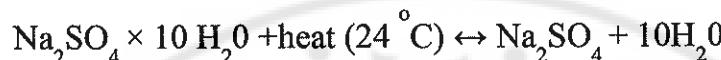
- أ- التغير من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة وبالعكس، والذي ينبع بدوره حرارة الانصهار والتجمد خلال عمليتي الشحن والتغريغ.
- ب- التغير من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية وبالعكس، والذي يمتص أو ينبع بدوره حرارة التبخر والتكييف خلال عمليتي الشحن والتغريغ.
- ج- التغير من الحالة الصلبة إلى حالة صلبة أخرى وبالعكس، والذي يمتص أو ينبع بدوره حرارة حرارة خلال عمليتي الشحن والتغريغ.

إن المواد التي يتغير طورها من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة، وبالعكس، هي المستخدمة في معظم التطبيقات وذلك لكون التغيير من الحالة السائلة أو الغازية يحتاج إلى حجوم كبيرة، وبالتالي ستكون كلفة المنظومة عالية. وكذلك فإن التغيير من حالة صلبة إلى حالة صلبة أخرى ينبع كمية حرارة قليلة مقارنة ببقية الطرائق.

#### 8-3-1- التخزين بحرارة الانصهار والتجمد

إن المواد التي يتغير طورها في درجات حرارة مناسبة وذات كمية حرارة انصهار كبيرة مع بقاء مواصفاتها ثابتة بعد دورات عديدة من الانصهار والتجمد هي المواد المناسبة في هذا النوع من التخزين، وذلك لكونها ستساهم في تقليل حجمه وكلفته. ومن المواد المستخدمة في هذا المجال قسم من الأملاح وشمع البرافين (paraffin). ومن الأملاح المستخدمة هيدرات كلوريد الكالسيوم ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) والذي من صفات أنه يذوب بانتظام، ولا تبقى فيه كمية من المواد الصلبة عالقة في الأسفل، كما يمكن كبسه في قفاني أو ألواح بلاستيكية أو معدنية. ومن سلبياته أن درجة حرارة

انصهاره منخفضة نوعاً ما، ولكنه يمكن أن يستخدم لأغراض التدفئة. ومن المواد التي درست بكثرة لهذا الاستخدام هو ملح جلوبير (Glauber salt) ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) وذلك لكونه رخيصاً جداً، وكمية حرارة انصهاره كبيرة مقارنة ببعض المواد. إن عملية تشكيل ملح جلوبير تجري حسب المعادلة التالية [68]:



وتحت عملية التخزين بواسطة هذا التفاعل الذي يجري من اليسار إلى اليمين بعد إضافة الحرارة. وتعتمد الطاقة المضافة على مستويات درجة الحرارة المضافة إلى المادة. والحرارة المضافة تتضمن حرارة محسوسة لرفع درجة حرارة الملح إلى درجة الذوبان ثم إلى حرارة كامنة وذلك لتغير طور المادة ومن ثم إلى حرارة محسوسة أخرى لرفع درجة حرارة الملح المذاب إلى درجة الحرارة النهائية. وعند تفريغ الحرارة من الخزان تجري عملية عكسية ويتم التفاعل من اليمين إلى اليسار والتأثير الحراري السابق يكون معكوساً. إن مشكلة هذا الملح الرئيسية هي عدم انتظام ذوبانه وبهذا فإنه سيفقد قسماً كبيراً من حرارة انصهاره بعد عدة دورات من عمله بسبب الأجزاء الصلبة المتبقية التي لا تذوب. وتُستخدم أنواع مختلفة من شمع البرافين لأغراض التخزين الحراري حيث تذوب بانتظام ويمكن وضعها في حلويات معدنية أو بلاستيكية. وهذه الشموع تذوب بدرجات حرارة مختلفة مناسبة لأغراض التدفئة والتبريد، ولكن هذه الميزات قليلة الشأن لكون كمية حرارة انصهار هذه الأنواع قليلة وموصليتها الحرارية ضعيفة. وأكثر أنواع الشمع استخداماً هو شمع البرافين (Sunco P-116). كما تُستخدم أيضاً أنواع عديدة من البوليمرات العضوية التي لها كمية حرارة انصهار عالية وتتصهر بدرجات حرارة تتراوح من 110 إلى 130 درجة مئوية.

### 8-3-2- التخزين بحرارة البخار والتكييف

إن التخزين بواسطة الطاقة الكامنة بتبخير السوائل ينتج حرارة عالية بالنسبة لوحدة تخزين معينة، ولكن احتياجها إلى خزانات كبيرة بسبب حجم البخار الكبير يجعلها غير عملية من الناحية الاقتصادية.

### 8-3-3- التخزين بالحرارة الكامنة في درجات الحرارة العالية

#### High Temperature Latent Thermal Energy Storage

تتوفر عدة مواد لها حرارة انصهار مناسبة لأغراض التخزين في درجات الحرارة العالية منها بعض الأملاح اللاعضوية والسبائك المعدنية. ويبين الجدول (3-8) مواصفات بعض هذه المواد. وتلعب الخواص الكيميائية للمواد في درجات الحرارة العالية دوراً مهماً في بيان فائدة وعمر الأملاح المذابة والسبائك المعدنية. ومن أهم هذه الاعتبارات مكونات الخليط ووجود الشوائب، واستقرارية الوسيط، ومشاكل صدأ حاويات التخزين.

جدول (3-8): الخواص الفيزيائية الحرارية لبعض مواد التخزين بالحرارة الكامنة في درجات الحرارة العالية [67]

الحرارة النوعية (سائل) Cal/g. $^{\circ}$ C	حرارة الانصهار (Cal/g)	درجة حرارة الانصهار $^{\circ}$ C	اسم المادة
0.38	138	685	- أملاح فلوريد البوتاسيوم وفلوريد الصوديوم وفلوريد المغنيسيوم
0.25	67	500	- كلوريد الصوديوم وكلوريد الكالسيوم
0.25	76	318	- هيدروكسيد الصوديوم
0.33	64	588	- كربونات الصوديوم

			وكلوريد البوتاسيوم
0.44	41	307	- نترات الصوديوم
0.04	5.5	327	- الرصاص (Pb)
0.25	94	658	- الالمنيوم (Al)
0.28	48	651	- المغنيسيوم (Mg)

#### 8-3-4- تجارب عملية في التخزين بالحرارة الكامنة

هناك عدة تجارب عملية تمت في الولايات المتحدة الأمريكية وفي فرنسا منذ العام 1960 على عدد مركبات البوتاسيوم وكربونات الصوديوم في درجة حرارة عالية  $300^{\circ}\text{C}$ ، وقد بيّنت أن كربونات الصوديوم سائل جيد للتخزين إلا أنه يسبب التآكل وينسب عاليّة. إن ملح كربونات الصوديوم ذو درجة حرارة ذوبان مرتفعة وناقليّة حراريّة عاليّة واستقرار جيد في درجات الحرارة المرتفعة وضغط تبخّر منخفض، له بين درجة حرارة  $120^{\circ}\text{C} - 360^{\circ}\text{C}$  سعة تخزين حراريّة نوعيّة (حجميّة أو كتليّة) تصل إلى  $744 \text{ MJ/t}$  أو  $1332 \text{ MJ/m}^3$ . [57]

## المراجع

- [1] Y. Diab, "Using Energy Storage Systems for Improving the Renewable Energies Performance", 1<sup>st</sup> conference Franco-Syrian on the renewable energies, Damascus, 2010.
- [2] simplorer™ simulation system, version 7.0.1, Ansoft corporation.
- [3] Ter-Gazarian, Andrei. Energy storage for power systems. No. 6. (Iet Power and Energy Series), ISBN: 0863412645, 1994.
- [4] B. Multon And H. Ben Ahmed, "Le stockage stationnaire d'énergie électrique : pourquoi et comment ?," Revue 3E.I, Mar. 2007, p. pp. 18-29.
- [5] J.P. Anzano, P. Jaud, And D. Madet, "Stockage de l'électricité dans le système de production électrique," Techniques de l'ingénieur, traité de Génie Électrique, D4030, 1989.
- [6] MULTON, Bernard, and Jacques RUER. "Stocker l'électricité: oui, c'est indispensable et c'est possible. Pourquoi, où, comment?" Publication ECRIN en contribution au débat national sur l'énergie (2003).
- [7] Doetsch, Fraunhofer Umsicht. 2012-May-15 Lleida, XC73, Chart 6. "Historical development of installed energy storage systems ", (2012).
- [8] Energy Storage Activities in the United States Electricity Grid, FINAL\_DOE\_Report-Storage\_Activities\_5-1-11.pdf,
- [9] F. PERISSE, "Etude et analyse des modes de défaillance des condensateurs électrolytiques à aluminium et des thyristors, appliqués aux systèmes de protection du large hadron collier", Université Claude Bernard, Lyon, (Doctoral dissertation, Lyon 1) 2003.

- [10] I. Laïd, Y. Diab, " Vieillissement des condensateurs électrolytiques à l'aluminium ", Université Claude Bernard, Lyon, 2008.
- [11] Diab, Y. (2009). Etude et modélisation des supercondensateurs: applications aux systèmes de puissance (Doctoral dissertation, Lyon 1).
- [12] Maxwell Technologies, "Ultracapacitor product guide", doc. internet [www.maxwell.com](http://www.maxwell.com), (2011) .
- [13] Muyeen, S. M., Tamura, J., & Murata, T. (2009). Stability augmentation of a grid-connected wind farm. Berlin: Springer.
- [14] [www.marefa.org](http://www.marefa.org), (2010), superconductors.
- [15] Bushmann,I. (2001) "Batteries in a Portable world "Second Edition.
- [16] <http://www.mpoweruk.com>, (2010) doc. Battery and Energy Technologies,.
- [17] Lead-acid batteries:  
<http://ecee.colorado.edu/~ecen4517/materials/Battery.pdf>
- [18] Bode, H. (1977). "Lead acid Batteries. " Wiley. ISBN 0-471-08455-7.
- [19] Bindner,H.-Cronin,T.-Lundsager,P.-Manwell,J.F.-Abdulwahid,U.-Baring-Gould,I. (2005) "Lifetime Modeling of Lead Acid Batteries"Riso National Laboratory, ISBN 87-550-3441-1.
- [20] Linden,D.- Reddy,T.B. (2002) "Handbook of Battery" McGraw-Hill, Third Edition , ISBN 0-07-135978-8.
- [21] <http://www.nexeon.co.uk/technology/about-li-ion-batteries/> (2013).
- [22] [http://batteryuniversity.com/learn/article/types\\_of\\_lithium\\_ion](http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion) (2013).
- [23] Bruno,G.- Shangc,J.L.(2011)"Current status of hybrid, battery and fuel cell electric vehicles: From electrochemistry to market prospects" Journal of Power Sources. Volume 84.

- [24] John, W.- Garth, P.(2008) "A Study of Lead-Acid Battery Efficiency Near Top-of-Charge"Sandia National Laboratories. Photovoltaic System Applications Department and the Impact on PV System Design.
- [25] Buck/Boost Charge-Pump Regulator Powers White LEDs from a Wide 1.6V to 5.5V Input.
- [26] John, W.- Garth, P.(2008) "A Study of Lead-Acid Battery Efficiency Near Top-of-Charge"Sandia National Laboratories. Photovoltaic System Applications Department and the Impact on PV System Design.
- [27] Jossen,A.(2006)"Fundamentals of Battery Dynamics"Journal of Power Sources 154 (2006) 530–538.
- [28] Geist,T.- Kamath,H.- Porter,S.F.- Ostendorp,P.(2006) "Designing Battery Charger System for Improved Energy Efficiency" California Energy Commission.
- [29] Panasonic Data Sheet, (2012), "<http://www.panasonic.com/industrial/battery>
- [30] Martin,L.T.(1999)" Balancing Batteries, Power, and Performance: System Issues in CPU Speed-Setting for Mobile Computing" Doctoral Thesis in electrical and computer engineering - Carnegie Mellon university.
- [31] Kutluay,K.- Çadirc,I.- (2005) "A New Online State-of-Charge Estimation and Monitoring System for Sealed Lead-Acid Batteries in Telecommunication Power Supplies", IEEE, 0278-0046.
- [32] Vasebi,A.- Partovibakhsh,M.- Bathae,M.T.(2007) "A novel combined battery model for state-of-charge estimation in lead-acid batteries based on extended Kalman filte for hybrid electric vehicle applications"Journal of Power Sources 174 (2007) 30–40.
- [33] Pop,V.-H J Bergveld,H.J.-Notten,P.H.-Regtien,P.L(2005)" State-of-the-art of battery state-of-charge determination" Institute of Physics Publishing.
- [34] Babé,G.L.- Feito,J.S.(2009)"Nonlinear dynamic per-unit models for electrochemical energy systems. Application to a hardware-in-the-loop hybrid simulation" Doctoral Thesis,

Electrical Engineering Department , Universidad Carlos III de Madrid.

- [35] B. S. Bhangu, P. Bentley, D. A. Stone, C. M. Bingham. "Nonlinear Observers for Predicting State-of-Charge and State-of-Health of Lead-acid Batteries for Hybrid Electric Vehicles", IEEE Trans. Vehicular Technology Vol. 54, No. 3, pp. 783-794, (2005).
- [36] Min Chen, and Gabriel A. Rinc'on-Mora, Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I-V Performance, IEEE transactions on energy conversion, VOL. 21, NO. 2, june 2006.
- [37] Kawakami, Noriko, et al. "Development' and field experiences of stabilization system using 34MW NAS batteries for a 51MW wind farm." Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium on. IEEE, 2010.
- [38] IEC - White Paper - Electrical Energy Storage, doc. On [www.iec.ch/whitepaper/energy](http://www.iec.ch/whitepaper/energy) (2014).
- [39] Shigematsu, T., Kumamoto, T., Deguchi, H., & Hara, T. (2002, October). Applications of a vanadium redox-flow battery to maintain power quality. In Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES (Vol. 2, pp. 1065-1070). IEEE.
- [40] Gualous, H., Alcicek, G., Diab, Y., Hammar, A., Venet, P., Adams, K., ... & Marumo, C. (2008, November). Lithium Ion capacitor characterization and modelling. In Proceeding of the 3rd European Symposium on Super Capacitors & Application.
- [41] مصطفى العقال وأحمد الملاوي وممدوح البلخي، مشروع تخرج بعنوان "مكثفات شوارد الليثيوم" بإشراف، الدكتور ياسر دياب، قسم هندسة الطاقة الكهربائية، جامعة دمشق، 2009-2010.
- [42] Dunn, S. (2002). Hydrogen futures: toward a sustainable energy system. International journal of hydrogen energy, 27(3), 235-264.

- [43] S. Srinivasan And J. Ogden Hydrogen: The Ideal Fuel plenum press 2005.
- [44] Nikolai V. Khartchenko energietechnik vogel verlag und druck, GmbH, Wurzburg, 2000.
- [45] Fuel cell handbook 7th ed. Appendix hydrogen U.S. Department of Energy office of fossil energy November 2004.
- [46] Singhal, Subhash. High-temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals, Design and Applications: Fundamentals, Design and Applications. Elsevier, Ltd, Oxford, 2003.
- [47] Fuel cell handbook 7<sup>th</sup> ed. U.S. Department of Energy office of fossil energy November 2004.
- [48] S. Srinivasan and P. Costamagna modeling analysis from half cell to system Plenum press 2005.
- [49] Ben Todd , fuel Cell Knowledge Cambridge university Engineering Department, 2003.
- [50] Patcharavorachot, Yaneeporn, Amornchai Arpornwichanop, and Anon Chuachuensuk. "Electrochemical study of a planar solid oxide fuel cell: Role of support structures." Journal of Power Sources 177, no. 2 (2008): 254-261.
- [51] Mann, Ronald F., John C. Amphlett, Michael AI Hooper, Heidi M. Jensen, Brant A. Peppley, and Pierre R. Roberge. "Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell." Journal of Power Sources 86, no. 1 (2000): 173-180.
- [52] سعاد جزدان، "دراسة تقييمية لأداء محطات التوليد بالخلايا الوقودية"، رسالة ماجستير في هندسة الطاقة الكهربائية، إشراف الدكتور محمد هاشم أبو الخير، قسم هندسة الطاقة الكهربائية، جامعة دمشق، 2010.
- [53] Corrêa, Jeferson M., Felix A. Farret, Luciane N. Canha, and Marcelo Godoy Simoes. "An electrochemical-based fuel-cell model suitable for electrical engineering

- automation approach." *Industrial Electronics, IEEE Transactions* on 51, no. 5 (2004): 1103-1112.
- [54] Anahara, Rioji, Sumio Yokokawa, and Masahiro Sakurai. "Present status and future prospects for fuel cell power systems." *Proceedings of the IEEE* 81, no. 3 (1993): 399-408.
- [55] Hossein Ghezel-Ayagh, "Direct Fuel Cell Turbine Power Plant", fuell cell Energy INC. INC. Danbury CT, USA, 2006.
- [56] Bolund, B., Bernhoff, H., & Leijon, M. (2007). Flywheel energy and power storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(2), 235-258.
- [57] H. IBRAHIM, "Solutions de stockage de l'énergie éolienne", Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne, Université du Québec, Jan. 2006.
- [58] Derx, M. I., & Undergraduate, A. G. Low-Cost Flywheel Energy Storage for Mitigating the Variability of Renewable Power Generation.
- [59] Ažubalis, M., Baranauskas, A., & Tamulis, G. (2013). Wind Power Balancing using Flywheel Energy Storage System. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 19(1), 19-22.
- [60] Riffonneau, Y., Barruel, F., & Bacha, S. (2008). Problématique du stockage associé aux systèmes photovoltaïques connectés au réseau. *Revue des Energies Renouvelables*, 11(3), 407-422.
- [61] <http://www.oloommagazine.com/Articles/ArticleDetails.aspx?ID=2674>, Vol. 28, December, 2012.
- [62] Simon Pockley, "Compressed Air Energy Storage", Prepared for Intro. to Renewable Energy, 19/05/2008
- [63] <http://www.greenprophet.com> (July, 2012), "Arothron's Underwater Compressed Air Storage Could Fill Gaps in the Grid".
- [64] Barnes, F. S., & Levine, J. G. (Eds.). (2011). "Large energy storage systems handbook. CRC Press".

- [65] Arsie, I., Marano, V., Nappi, G., & Rizzo, G. (2005, January). A model of a hybrid power plant with wind turbines and compressed air energy storage. In ASME 2005 Power Conference (pp. 987-1000). American Society of Mechanical Engineers.
- [66] Lemofouet-Gatsi, S. (2006). Investigation and optimisation of hybrid electricity storage systems based on compressed air and supercapacitors (Doctoral dissertation, ECOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE).
- [67] Ataer, O. E. (2006). Storage of thermal energy. Encyclopedia of Life Support.
- [68] Faninger, G. (2004). Thermal energy storage. Faculty for Interdisciplinary Research and Continuing Education, IFF-University of Klagenfurt, Austria.

# اختصارات

<b>ABBREVIATION</b>	
AFC	Alkaline Fuel Cells
AC	Alternating Current
Ah	Ampere-hour of the battery capacity
POB	Balance Of Plant
BE	Battery Efficiency
C/d	Charge/discharge of the battery
CDCS	Charge-Discharge Control System
CHE	Charger Efficiency
CHP	Combined Heat And Power
CAES	Compressed Air Energy Storage
DOS	Days Of Storage
DOD	Depth of discharge of the battery
Gmbh	Diehl Luftfahrt Elektronik, German for "company with limited liability"
DC	Direct Current
EDLC	Electric Double Layer Capacitance
EES	Electric Energy Storage
EDR	Electrical Distributed Resistance
EIS	Electrochemical Impedance Spectroscopy
EMF	Electromotive Force
ESR	Equivalent Serial Resistance
FES	Flywheel Energy Storage
F.C.	Fuel Cells
GW	Giga Watt
Gwh	Giga Watt Hour
HTS	High-Temperature Superconducting
H <sub>2</sub>	Hydrogen

ISTEC	International Superconductivity Technology Center
Kw	Kilo Watt
Kwh	Kilo Watt Hour
Pbs04	Lead-Acid
Li-Ion	Lithium-Ion
MW	Mega Watt
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cells
NiCd	Nickel Cadmium
NiMH	Nickel Metal Hybrid
NEC	Nippon Electric Company
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cells
PV	Photovoltaic
PEMFC	Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells
PTS	Power Transformation System
PHES	Pumped Hydroelectric Energy Storage
Redox	Reduction-Oxidation
NaS	Sodium Sulfur
SOFC	Solid Oxide Fuel Cells
SOC	State of Charge of the battery
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage
TDR	Temperature and Discharge Rate
TES	Thermal Energy Storage
TSC	Total Storage Capacity
US	Useful Storage
VRB	Vanadium Redox Flow Battery
Yr	Year
Zn-Br	Zinc-Bromine

## جدول بالرموز المستخدمة

ثابت النقادية المغناطيسية للهواء	$\mu_0$
التحريض المغناطيسي	B
السعة الكهربائية	C
السعوية المكافأة للمدخرة	$C_{bulk}$
سعة بيكرت للمدخرة	$C_p$
ثخانة العازل	d, D
عمق التفريغ	DOD
طاقة التخزين	E
الطاقة المشحونة	$E_{ch}$
المفاقيد خلال الشحن	$\delta E_c$
المفاقيد خلال التفريغ	$\delta E_d$
المفاقيد خلال التخزين	$\delta E_s$
الطاقة المفرغة	$E_{dch}$
المكثف ذو الطبقة الكهربائية المزدوجة	EDLC
مقاومة الكهرباء	EDR
توتر جيسي	$E_G$
القوة المحركة الكهربائية	EMF
توتر نيرنست	$E_N$
توتر الدارة المفتوحة	$E_{o.c}$
المقاومة التسلسلية المكافأة	ESR
المفاقيد خلال التخزين	$\delta E_s$
شدة الحقل الكهربائي	$e_v$
ضياعات الطاقة	$\delta E$

ثابت فارادي	F
تسارع الجاذبية الأرضية	g
تغير طاقة الجيس الحرة	$\Delta G$
تغير الانتالبي	$\Delta H$
التيار	I
عزم العطالة	J
المحارضة	L
كتلة الجسم	m
عدد دورات شحن - تفريغ	$N_{\text{cycl}}$
ثابت العازلية الكهربائية للهواء	$\epsilon_0$
استطاعة الاستهلاك الفعالة	$P_{\text{cum}}$
استطاعة التوليد الفعالة	$P_{\text{gen}}$
الاستطاعة العظمى	$P_{\text{max}}$
استطاعة التخزين الفعالة	$P_s$
استطاعة التخزين الفعالة	$P_s$
الشحنة الكهربائية	Q
استطاعة الاستهلاك الردية	$Q_{\text{cum}}$
استطاعة التوليد الردية	$Q_{\text{gen}}$
استطاعة التخزين الردية	$Q_s$
ثابت الغازات العام	R
مقاومة التسريب	$R_t$
مقاومة الوصلات	$R_s$
ثابت العازلية النسبي للمادة العازلة المستخدمة	$\epsilon_r$
المساحة الفعالة	S
حالة الشحن	SOC

درجة حرارة التفاعل (K)	T
التوتر	V
هبوط التفعيل	$V_{act}$
هبوط التركيز	$V_{con}$
الهبوط الأومي	$V_{ohm}$
ثابت العازلية	$\epsilon$
سرعة الخطية الجسم	v
الثابت الزمني للشحن أو تفريغ	$\tau$
سرعة زاوية	$\omega$

**اللجنة العلمية:**

- الأستاذ الدكتور هاكون بوغوص.
- الأستاذ الدكتور نديم مخول.
- الأستاذ الدكتور حسان سويدان.

**المدقق اللغوي:**

الأستاذ الدكتور حسن الأحمد.

حقوق الطبع والترجمة والنشر محفوظة لمديرية الكتب والمطبوعات الجامعية



Damascus University

