



تخزين الطاقة الكهربائية





منشورات جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

تخزين الطاقة الكهربائية

الدكتور

ياسر دياب

الدكتور

محمد هاشم أبو الخير

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

1435-1436 هـ

2014-2015 م

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 المتجددة
25	1-3 وحدة تخزين الطاقة: المبدأ والمكونات والمحددات
25	1-3-1 آلية استخدام وسائط التخزين
27	1-3-2 مواضع ربط وسائط التخزين
28	1-3-3 مكونات وحدة تخزين الطاقة
31	1-4 أنواع تقنيات تخزين الطاقة الكهربائية
33	1-4-1 نظم تخزين الطاقة الكهربائية اللامركزية
35	1-4-2 نظم تخزين الطاقة الكهربائية المركزية
37	1-5 استطاعات نظم تخزين الطاقة المركبة عبر العالم
43	2- تخزين الطاقة الكهربائية بالمكثفات الكهربائية
43	2-1 التخزين بالمكثفات التقليدية
43	2-1-1 مبدأ المكثفات التقليدية وبنيتها
45	2-1-2 أنواع المكثفات
47	2-1-3 تطبيقات المكثفات الكهربائية
49	2-1-4 استخدام المكثفات في الشبكات الكهربائية
49	2-1-5 نمذجة المكثفات الكهربائية
53	2-1-6 الخصائص الحرارية للمكثفات

- 55.....2-2-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 والتفريغ
- 60.....2-2-4-نمذجة المكثف فائق السعة
- 64.....2-2-5-قياس خصائص المكثفات فائقة السعة
- 73.....2-2-6-حساب موديلات 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 الناقلية
- 81.....3-1-المبدأ الأساسي للموصلات فائقة الناقلية
- 82.....3-2-ملخص تاريخي عن الموصلات الفائقة
- 82.....3-3-بعض التطبيقات الهامة
- 83.....3-4-مبدأ تخزين الطاقة في الموصلات فائقة ناقلية
- 86.....3-5-خصائص الموصلات فائقة الناقلية
- 87.....3-6-مبدأ عمل نظم تخزين الطاقة بالملفات فائقة الناقلية
- 89.....3-7-تطور نظم التخزين بالملفات فائقة الناقلية
- 93.....4-تخزين الطاقة الكهربائية بالمدخرات الكهربائية
- 93.....4-1-نبذة عن التطور التاريخي للمدخرات الكهربائية
- 95.....4-2-كُمونات أقطاب المدخرات الكهربائية
- 97.....4-3-البنية وآلية الشحن والتفريغ

100	4-4- طُرُز المدخرات الكهربائية
100	4-4-1- حسب الكهرليت
101	4-4-2- حسب قابلية الشحن
101	4-5- خصائص المدخرات القابلة للشحن
101	4-5-1- مدخرات الرصاص - الحامضية
106	4-5-2- مدخرات النيكل - كادميوم
109	4-5-3- مدخرات نيكل - هيدريد المعادن
111	4-5-4- مدخرات شوارد الليثيوم
114	4-5-5- مقارنة خصائص المدخرات
117	4-6- تعريف المُحددات الأساسية في المدخرات الكهربائية
121	4-7- طرائق ودارات شحن وتفريغ المدخرات الكهربائية
121	4-7-1- طرائق شحن المدخرات
121	4-7-2- معدلات الشحن
124	4-7-3- أخطار زيادة الشحن
125	4-7-4- الطرائق المتبعة لإنهاء عملية الشحن
126	4-7-5- طرائق تفريغ المدخرات
127	4-7-6- دارات شحن المدخرات
133	4-8- أثر تيار التفريغ على السعة
136	4-9- تأثير درجة الحرارة على خصائص المدخرات الكهربائية
136	4-9-1- تأثير درجة الحرارة على خصائص مدخرات الرصاص-حمض
136	4-9-2- تأثير درجة الحرارة على سعة التفريغ لمدخرة نيكل - كادميوم

- 4-9-3- تأثير درجة الحرارة على سعة التفريغ لمدخرة نيكل - هيدريد المعادن 137
- 4-9-4- تأثير درجة الحرارة على سعة التفريغ لمدخرة شوارد الليثيوم 138
- 4-10- الظواهر الأساسية في المدخرات الكهربائية 139
- 4-11- النمذجة والمحاكاة للمدخرات الكهربائية 140
- 4-12- حساب مودبولات التخزين بالمدخرات الكهربائية في النظم الكهروضوئية .. 142
- 4-13- مدخرات القدرة الكهربائية 144
- 4-14- مدخرات درجات الحرارة العالية: مدخرات الصوديوم - كبريت 145
- 4-14-1- مبدأ وبنية مدخرات الصوديوم-كبريت 145
- 4-14-2- ميزات مدخرات صوديوم-كبريت 146
- 4-15- مدخرات جريان الكهرليت 150
- 4-15-1- تقنية مدخرات جريان الكهرليت 150
- 4-15-2- مادة الفانديوم 151
- 4-15-3- مدخرات جريان الكهرليت الفانديوم 152
- 4-16- مكثفات شوارد الليثيوم 154
- 4-16-1- مبدأ مكثفات شوارد الليثيوم 154
- 4-16-2- بنية مكثفات شوارد الليثيوم 155
- 4-16-3- شحن وتفريغ مكثف شوارد الليثيوم 157
- 5- تخزين الطاقة بالهيدرجين 165
- 5-1- الهيدرجين: طاقة الغد 165
- 5-2- الخصائص الفيزيائية والكيميائية للهيدرجين 166
- 5-3- الاستخدامات الحالية للهيدرجين 167

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

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

261	8- تخزين الطاقة بالحرارة
261	8-1- اعتبارات عامة
262	8-2- التخزين بالحرارة المحسوسة
262	8-2-1- وسائط التخزين السائلة
263	8-2-2- وسائط التخزين الصلبة
264	8-2-3- التخزين بالحرارة المحسوسة في درجات الحرارة العالية
264	8-2-4- تجارب عملية في التخزين بالحرارة المحسوسة
266	8-3- التخزين بالحرارة الكامنة
266	8-3-1- التخزين بحرارة الانصهار والتجمد
268	8-3-2- التخزين بحرارة التبخر والتكثيف
268	8-3-3- التخزين بالحرارة الكامنة في درجات الحرارة العالية
269	8-3-4- تجارب عملية في التخزين بالحرارة الكامنة
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 موثوقيتها محدودة، حيث إنه على سبيل المثال، في الشبكة السورية قد تضطر وزارة الكهرباء أحياناً لفصل الكهرباء جزئياً عن بعض المناطق في أوقات ذروة الحمل، وبالتالي فإن أحد حلول تغطية هذه الذروة والحصول على موثوقية أعلى ومردود أكبر هو التخزين (Electric Energy Storage) ويختصر بـ (EES). إذ إن نظام تخزين الطاقة (EES) يعمل على تخزين الطاقة المتاحة من الشبكة خارج أوقات الذروة، واستعادة هذه الطاقة المخزنة في أوقات الذروة، كما أن نظام تخزين الطاقة (EES) يساعد أيضاً على تنظيم توتر الشبكة وترددها، وحالياً تتجه جميع الدراسات والأبحاث نحو دراسة تخزين الطاقة الكهربائية وأدائها وتخفيض كلفتها، وقد سمحت التطورات الحاصلة بإنتاج عناصر جديدة لتخزين الطاقة الكهربائية ذات أداء متميز. وإن هذا الكتاب ليأتي ضمن هذا الإطار ليلقي الضوء على طرائق وتقنيات تخزين الطاقة الكهربائية الجديدة، وما يزال بعض هذه التقنيات قيد الدراسة والبحث.

تكتسب عملية تخزين الطاقة الكهربائية أهمية خاصة في تحسين أداء وكفاءة نظم الطاقات المتجددة (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 المتجددة لفترات قصيرة أو طويلة حسب المتطلبات، ويرافق ذلك آليتان أساسيتان هما التخزين والاستعادة (الشحن والتفريغ)، 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 تختزن عادةً في المكثفات، والطاقة الميكانيكية تختزن كطاقة حركية أو كطاقة كامنة في خزانات الهواء المضغوط أو خزانات المياه العالية أو في الحداقة (دولاب العطالة) والطاقة الكيميائية تختزن عادةً من خلال التفاعلات الكيميائية العكوسة أو تخزين الوقود الناتج عن التفاعلات الكيميائية، والتخزين المغناطيسي يتم باستخدام موصلات فائقة الناقلية مصنوعة من مواد ذات مقاومة صغيرة جداً عند درجات الحرارة المنخفضة.

ومنه نجد أنه يتوافر 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 بالهيدروجين¹ (Hydrogen EES)،
- التخزين بدولاب العطالة (Flywheel EES)،
- التخزين المائي (Pumbed hydro EES)،
- التخزين بالهواء المضغوط (Compressed Air EES)،
- التخزين الحراري (Thermal EES).

¹ جرت العادة على استخدام مصطلح الهيدروجين لدلالة على H_2 ولكن حسب مجمع اللغة العربية يفضل استخدام الهيدروجين أسوةً 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 المتجددة، 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 بالمكثفات 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 وتفريغها والخصائص المختلفة للمدخرات، كما يتطرق إلى الأنواع الخاصة من المدخرات الكهربائية.

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

في الفصل السادس، يجري الحديث عن التخزين الميكانيكي بنوعيه الكامن (تخزين مائي) والمتحرك (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.

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

والله من وراء القصد

المؤلفان

دمشق في 2014/8/26

The background of the slide features a large, faint watermark of the Damascus University logo. The logo is circular, with a central emblem depicting a stylized building or monument. The text "جامعة دمشق" (Damascus University) is written in Arabic script around the top half of the circle, and "Damascus University" is written in English around the bottom half.

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 المصادر 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 والتسخين. وهذا بدوره يضيف تعقيداً إلى منحنى الحمل. 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 (production end) وطرف الاستهلاك (consumption end) بهدف التخفيف من التباين بين منحنى الطلب على الطاقة (الحملة) ومنحنى الإنتاج.

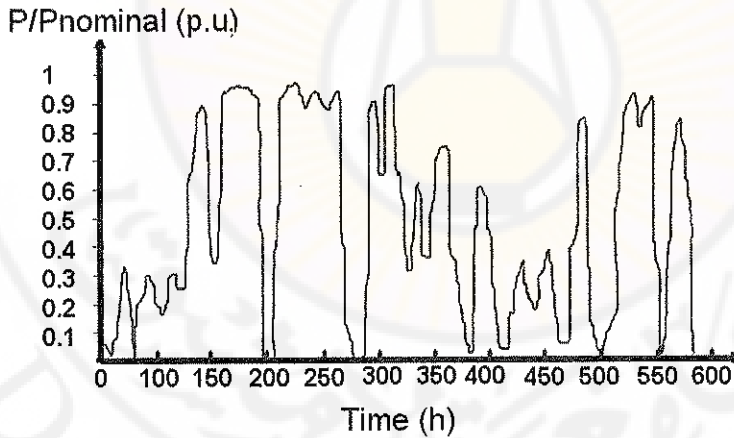
أثر دمج مصادر الطاقات المتجددة في الشبكة: توفر لنا مصادر الطاقات المتجددة مصدراً مهماً للطاقة وبدلاً للمصادر التقليدية، حيث أصبح بالإمكان حالياً استخدام مصادر الطاقات المتجددة لتغذية مختلف الأحمال وخاصة بعد التطور الهائل في إلكترونيات القدرة، ولكن ما يزال ربطها مع الشبكة العامة من الناحية العملية مكلفاً 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 يحد من التوسع في استخدامها

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

2-1- أمثلة تجريبية على مصادر الطاقات المتجددة

Experimental Examples of Renewable Energy Sources

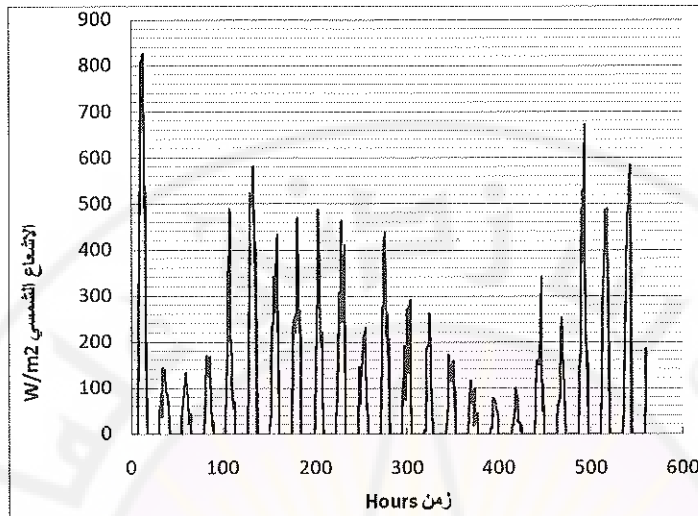
سوف نعرض مثالاً عملياً لتذبذبات الاستطاعة المستخلصة من طاقة الرياح (wind energy). ففي إحدى المزارع الريحية في فرنسا المستخدمة لإنتاج الطاقة الكهربائية، جرى تسجيل الاستطاعة خلال ما يقرب من ثلاثة أسابيع، وقد تمّ نسب القيمة اللحظية إلى القيمة الاسمية لتبيان مقدار التقلب في الاستطاعة الناتجة عن إجمالي العنفات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



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

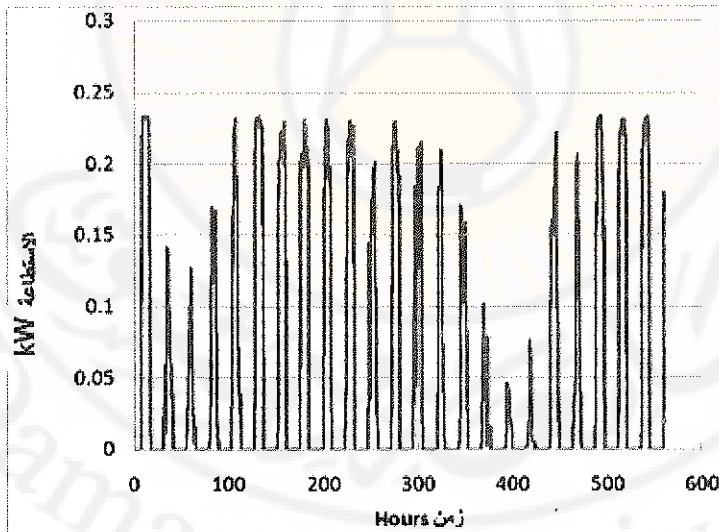
وفيما يلي مثال آخر على مصادر الطاقات المتجددة وهذه المرة مصدر شمسي. في الشكل (2-1) يظهر الإشعاع الشمسي (solar radiation) في شهر تشرين الأول.

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



الشكل (2-1): 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 الملتقطة من مصادر الطاقات المتجددة كما في الرياح والشمس وإن التذبذب 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 بالأساس قائم على التوازن بين الاستهلاك والإنتاج. وبناء على ذلك، لم يعد العائق الوحيد في التوسع في استخدام مصادر الطاقات المتجددة في الشبكات الكهربائية هو التكلفة العالية بل إن الاستخدام لمثل هذه المصادر من الطاقة سوف يكون مشروطاً بإيجاد وسيلة تساعد على التغلب على مشكلة التذبذب في الاستطاعة.

ومنه يلاحظ أنه أصبح من الضروري استخدام نظم ثانوية لتخزين الطاقة والحد من تغيرات الاستطاعة الناتجة من مصادر الطاقات المتجددة وبالتالي استخدام أوسع لمصادر الطاقات المتجددة. 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 مفايد كبيرة وبزمن يتناسب مع متطلبات الأحمال. إن مثل هذا الحل سوف يسمح بإدخال عدداً كبيراً من مصادر الطاقات المتجددة مما يعني عدد أقل من المصادر التقليدية.

1-3- وحدة تخزين الطاقة: المبدأ والمكونات والمحددات

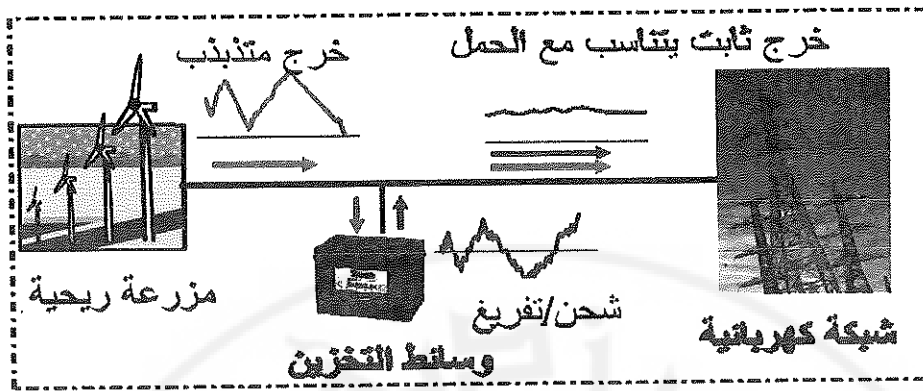
Energy Storage Unit: Principle, Components and Parameters

من خلال ما سبق وجدنا أنه من الضروري إنشاء وحدة وسيطة 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 المدخرة الكهربائية تزود الطاقة اللازمة في الذروة وتعمل كعنصر توليد عندما يكون المولد لا يعمل. وازداد استخدام المدخرات آنذاك مع توسع نظم القدرة ولكن الانتقال إلى نظم التيار المتناوب حدّ من استخدام المدخرات على هذا النحو.

1-3-1- آلية استخدام وسائط التخزين

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

إن وسائط تخزين الطاقة الكهربائية تساعد على تحسين مردود نظام القدرة واستقراره لأنه عندما يكون الإنتاج أكبر من الاستهلاك تختزن وسائط التخزين الفائض من القدرة وعندما يكون الإنتاج أقل يعوض النقص. يظهر الشكل (1-4) آلية عمل وحدة تخزين الطاقة مع مصادر الطاقات المتجددة المربوطة إلى الشبكة الكهربائية. في الطاقات المتجددة 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 (1-4): مخطط رمزي لآلية عمل وسائط تخزين الطاقة الكهربائية

ومن المعروف ضمن هذا السياق، استخدام مدخرات 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 -وحدة 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 الوسائط 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 تختزن 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 ولكل موضع مزاياه وذلك بحسب طبيعة الأحمال ومصادر الطاقات المتجددة المستخدمة وغير ذلك من ظروف محيطية.

فعلى سبيل المثال يمكن ربطها بالقرب من الأحمال، حيث يظهر عند المستهلك التغير الأعظمي في الاستطاعة المستجرة من وسائط النقل والتحويل. غالباً ما تكون الاستطاعة العظمى المستجرة 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 تخفيض 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 المناسبين. قبل وضع أية 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، والكفاءة، وزمن الشحن... إلخ.

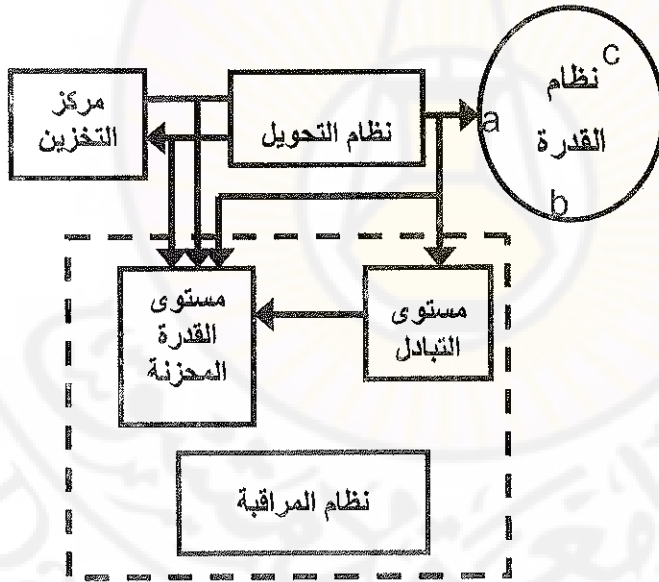
تخزين الطاقة الكهربائية يمكن أن يستخدم لواحد من الأسباب التالية:

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

1-3-3- 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 بـ E_s ذات الاستطاعة بشقيها الفعلي P_s والردي Q_s . إن هذه الطاقة المخزنة لاتفرغ بشكل كامل ولكن يبقى جزء منها في مركز التخزين،
- (2) نظام التحويل 'PTS' power transformation system يمكن أن يحتوي هذا الجزء على عناصر كهربائية مثل المحولات (transformer) والمبدلات الإلكترونية (electronics converters)،
- (3) نظام التحكم بالشحن والتفريغ charge-discharge control system 'CDCS'، هذا الجزء هو المسؤول عن مراقبة سويات القدرة في نظام التخزين والتحكم بها وذلك بمساعدة الحاسوب و برامج حاسوبية مختصة.



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

من جهة أخرى، بما أن نظام التخزين يعدّ جزءاً من نظام القدرة فلا بد 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:

مجموع الاستطاعات الفعالة = 0

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

مجموع الاستطاعات الردية = 0

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

حيث:

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

P_s, Q_s : استطاعة التخزين الفعالة والردية على الترتيب،

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

على اختلاف طبيعة نظم تخزين طاقة الكهربائية، فإنه يوجد فيه ضياعات (losses)، هذه الضياعات δE تشمل المفاقد الحاصلة خلال الشحن δE_c والتخزين δE_s والتفريغ δE_d كما هو مبين في الشكل (1-6) و يعبر عنها بالمعادلة التالية [3]:

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

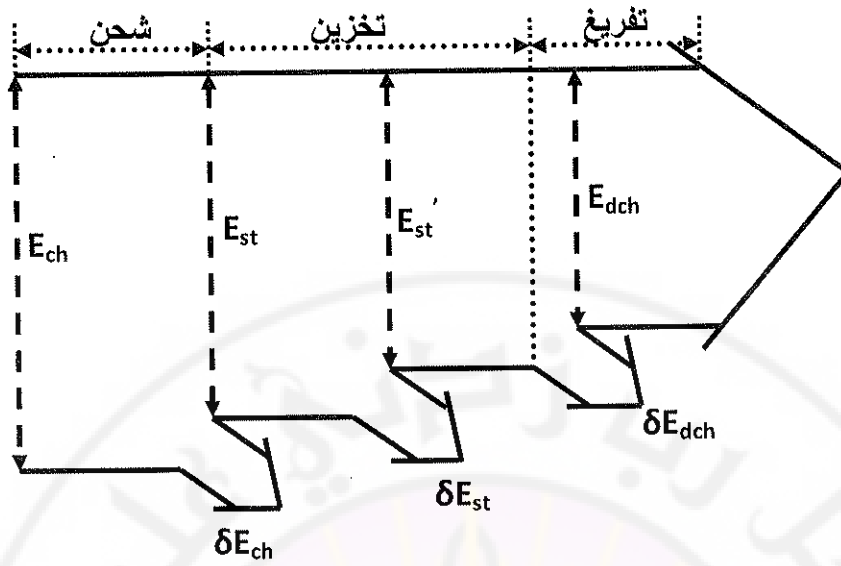
أو يمكن أن تحسب بالعلاقة التالية:

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

حيث:

E_{ch} : الطاقة المشحونة،

E_{dch} : الطاقة المفرغة.



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

إنّ 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 كمايلي [4] :

- عدد دورات شحن- تفريغ N_{cycl} (charge-discharge cycles) لنظام تخزين وهو العدد الأعظمي لدورات شحن- تفريغ لهذا النظام قبل أن يحدث التقادم الكامل له.
- سعة طاقة التخزين في نظام ما E (storage energy capacity)، تعطى بـ Wh ، تعبر عن الطاقة المفيدة الممكن استعادتها من أي نظام تخزين.
- الاستطاعة العظمى P_{max} : هي الاستطاعة العظمى خلال الشحن أو التفريغ حسب الاستخدام.

- الثابت الزمني τ (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 المخترنة في وحدة التخزين بدون استخدام كما في حالة التخزين.
- كثافة الطاقة (energy density) الكتلية أو كثافة الطاقة الحجمية: تعبر عن الطاقة الممكن تفريغها من نظام التخزين منسوبة لوزن النظام أو حجمه.
- كثافة الاستطاعة (power density) الكتلية أو كثافة الاستطاعة الحجمية: تعبر عن الاستطاعة الممكن تفريغها من نظام التخزين منسوبة لوزن النظام أو حجمه.

1-4- أنواع تقنيات تخزين الطاقة الكهربائية

Types of Energy Storage Techniques

في السنوات الأخيرة جرى تطوير عدد كبير من وسائط تخزين الطاقة الكهربائية، ويمكن تقسيم هذه الوسائط من حيث المبدأ إلى تخزين مباشر وتخزين غير مباشر. يجري 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 وحرارية. وعليه يمكن تصنيف تقنيات التخزين كمايلي:

1) تخزين مباشر direct storage

أ- تخزين مغناطيسي magnetic storage

- ملفات فائقة الناقلية (superconducting coils)

ب- تخزين كهروساكن electrostatic storage

- مكثفات تقليدية (classical capacitors)
- مكثفات فائقة السعة (supercapacitors)

(2) تخزين غير مباشر indirect storage

أ- تخزين كهروكيميائي electrochemical storage

- مدخرات تقليدية classical batteries
- مدخرات جريان الكهرليت (redox fellow batteries)
- مدخرات درجات الحرارة العالية (high temperature batteries)

ب- تخزين بالوقود fuel storage

- هيدروجيني (hydrogen)

ت- تخزين ميكانيكي mechanical storage

- ضخ المياه (Pumbed hydro-gravity hydraulic)
- دولاب العطالة (Flywheel)

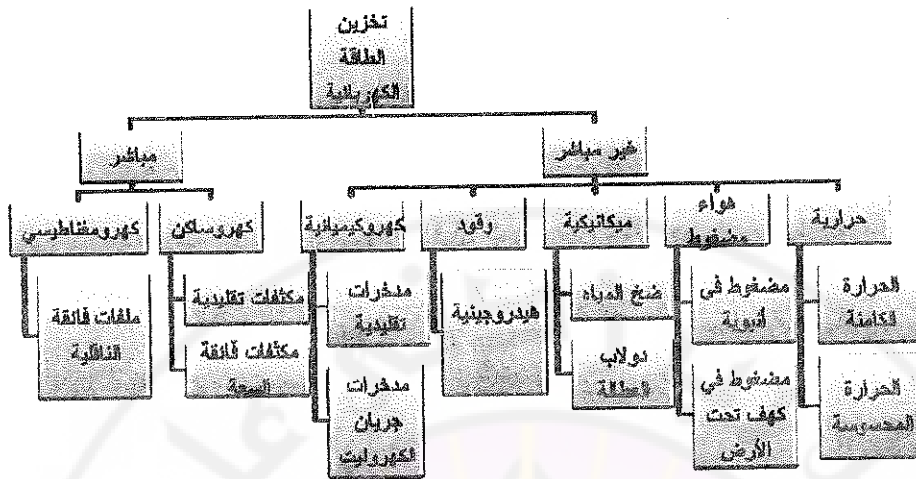
ث- تخزين بالهواء المضغوط compressed air storage

- هواء مضغوط في وعاء ضغط (أنبوبة) (compressed air in 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 وهما عاملان أساسيان في تطبيقات تخزين الطاقة [5]:

1-4-1- نظم تخزين الطاقة الكهربائية اللامركزية

Decentralized Energy Storage Systems

يمكن لهذه النظم أن تكون محمولة ومتنقلة 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) والمردود 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 ساعاتها (طاقاتها 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 فائقة السعة أو في الموصلات فائقة الناقلية أو في دوالاب العطالة لأنه لا يوجد تآكل 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 وسائط النقل.

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

Technology	SMES	Supercapacitors	Batteries
شكل الطاقة	مغناطيسية	كهربية ساكنة	كيميائية
كثافة الطاقة Wh/kg	1-5	2-10	20-120
السعة	بضعة kWh	بضعة kWh	بضعة kWh إلى بضعة MWh
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	10Wh بضعة إلى kWh	بضعة 10Wh	-
ثابت الزمن	من بضعة دقائق إلى ساعة	من بضعة دقائق إلى بضعة أيام	من ساعة إلى عدة أيام
عدد دورات الشحن والتفريغ	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

1-4-2- 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 تشغل مساحات واسعة. إن نظم التخزين المركزية لديها ساعات (طاقة) تخزين عالية جداً تمتد من MWh إلى الآلاف من MWh، وهذا بدوره يخفض من كلفة الكيلو واط ساعي الذي يكون أقل ما يمكن وخاصة في نظم التخزين بالهواء المضغوط في الكهوف. بعض من نظم التخزين المركزية يتم

استخدامه بكثرة حالياً مثل التخزين المائي والبعض الآخر ما يزال 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 ³ لأجل ارتفاع 360 m	12 kWh/ m ³	بطاريات الرصاص 33kW/t بطاريات NaS 100kW/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	جيدة	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 ³	200 kWh/ m ³
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

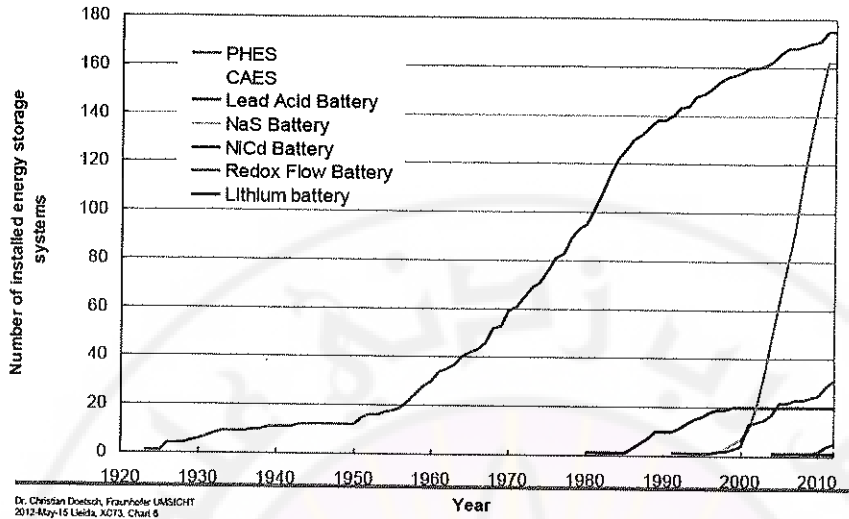
1-5- استطاعات نظم تخزين الطاقة المركبة عبر العالم

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 ماراً 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%. وربما كانت أسباب عدم استخدام نظم تخزين طاقة الكهربائية أن هذه النظم كانت مكلفة وغير موثوقة [6].

الشكل (1-8) يبين التطور التاريخي لنظم تخزين الطاقة المركبة. نلاحظ أن التخزين المائي يحتل الصدارة وبدأ استخدامه منذ العام 1920 يليه مدخرات القدرة مثل الرصاص-حمض ومدخرات كبريت-صوديوم التي عرفت منذ العام 2000 انتشاراً واسعاً.

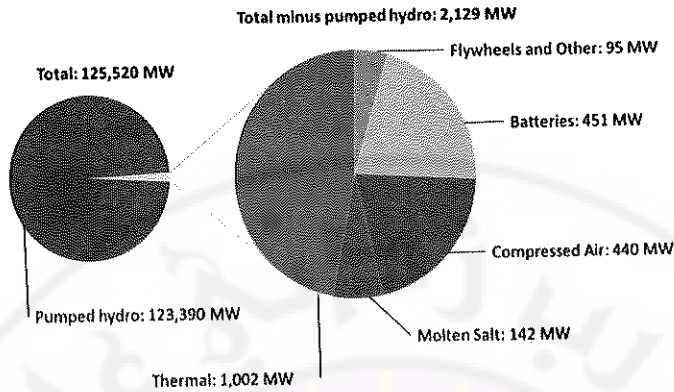
Historical development of installed energy storage systems (2012)



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

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

Estimated Global Installed Capacity of Energy Storage



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

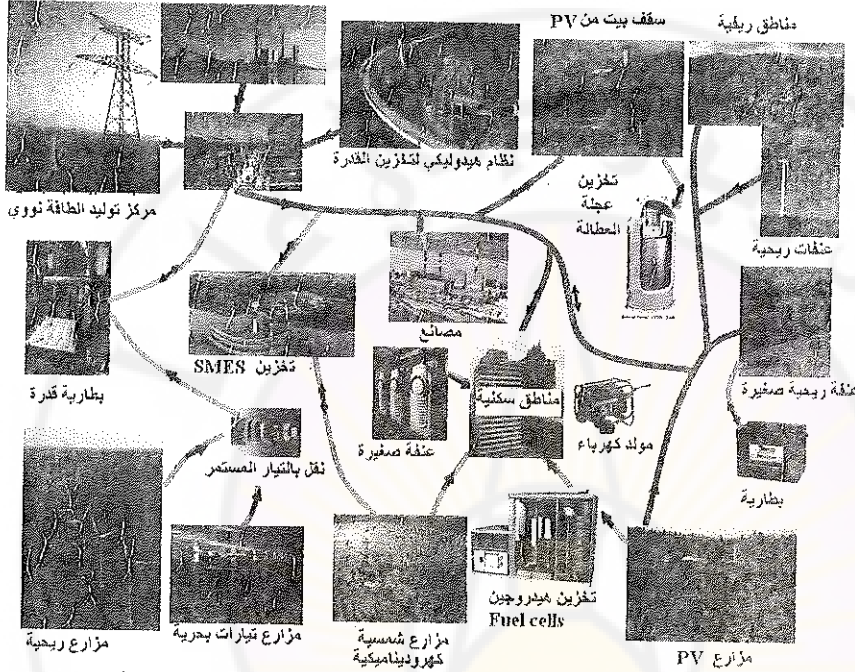
الشكل (9-1): استطاعة نظم التخزين المركبة عبر العالم [8]

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

الجدول (3-1): 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 المتجددة الموزعة جغرافياً في أماكن مختلفة وموصلة إلى نظم تخزين الطاقة المناسبة.



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

The background of the slide features a large, faint watermark of the Damascus University logo. The logo is circular, with the university's name in Arabic 'جامعة دمشق' at the top and 'Damascus University' at the bottom. In the center is a stylized yellow lamp with radiating lines.

الفصل الثاني
التخزين بالمكثفات الكهربائية
Capacitors Energy Storage



2- تخزين الطاقة الكهربائية بالمكثفات الكهربائية²

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 نميزها 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

² يمكن كتابة العنوان أيضاً بطريقة أخرى Energy Storage by capacitors.

على المكثف اسم مكثف السيراميك، أما إذا استخدم محلول كيميائي (كهرليت) كمادة عازلة بين لوحَي المكثف فيطلق على المكثف اسم المكثف الكهرليتي.
يعتمد مبدأ تخزين الطاقة الكهربائية في المكثفات التقليدية على مبدأ الكهرباء الساكنة. يحدد نوع المادة العازلة الموجودة بين اللبوسين قيمة ثابت العازلية النسبي ϵ_r . السعة في المكثف المستوي 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:

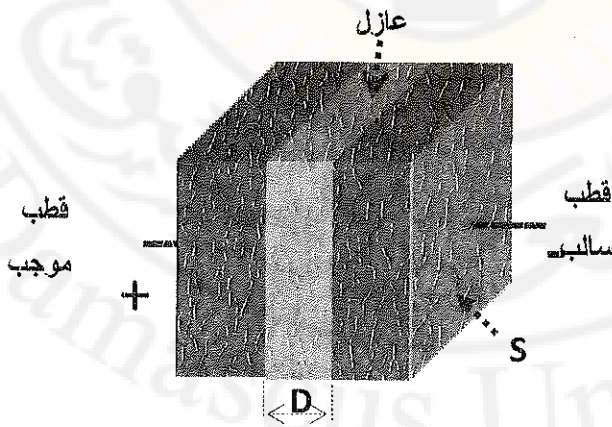
C : السعة الكهربائية، تعرف بأنها قدرة المكثف على تخزين الشحنة الكهربائية ووحدة قياسها الفاراد.

S : المساحة الفعالة.

D : ثخانة العازل.

ϵ_0 : ثابت العازلية الكهربائية للهواء.

ϵ_r : 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 توضّح 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 لتخزن طاقة مقدارها Wh/kg $W_{kg} = 0.5$ 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 polypropylene، مكثفات ذات رقائق بوليستر ملبسة بالمعدن Metallized polyester film، مكثفات ذات رقائق بوليستر polyester film، المكثفات الورقية، المكثفات الزيتية.

والجدول (1-2) يبين قيمة ثابت العازلية ϵ_r والتمانة الكهربائية لبعض المواد المستعملة في صناعة المكثفات.

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

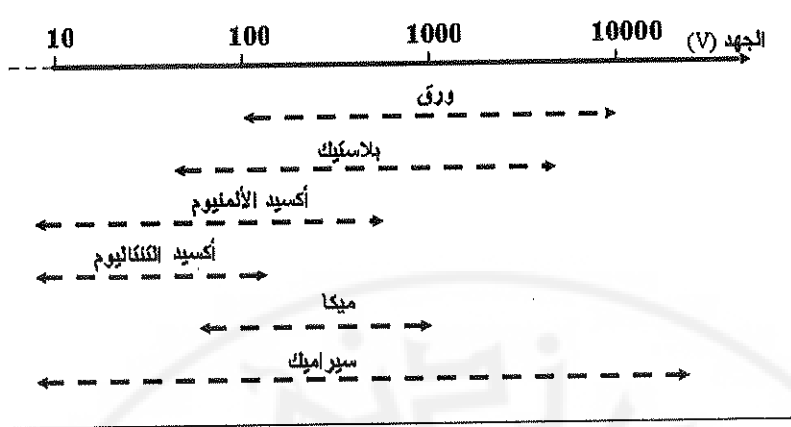
نوع المكثف	العازل	شدة الحقل الكهربائي e_v (kV/cm)	قيمة ثابت العازلية النسبي ϵ_r
هواء	هواء	21	1.00059
غشاء (رقائق)	بلاستيك	600 ... 4500	2.1 ... 6
	ورق	300 ... 600	2 ... 6
كهرليت	أكسيد الألمنيوم (AL ₂ O ₃)	6600 ... 7700	8 ... 10
	أكسيد التنتاليوم (Ta ₂ O ₃)	6600 ... 10000	10 ... 26
ميكا،	زجاج	100 ... 400	4.8 ... 9.9
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 وتنعيم 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]

3-1-2- 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 الترددي [9]

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

بالمكثفات ذات رقائق البلاستيك		(10nF à 200µF) بوليستر (1nF à 250µF)	
مستقر جداً، موثوقية عالية	دارات الربط	بولي كربونات (1nF à 250µF)	
مقاومة تسلسلية ضعيفة، يتحمل تيارات فعالة عالية	يستخدم مع المقطعات	بولي بروبيلين (100pF à 250µF)	
استقرار حراري عالٍ	يستخدم للعمل في درجات حرارة عالية	بولي سولفين مغلف بمعدن (1nF à 250µF)	
تيار تفريغ ذاتي من رتبة الميكروأمبير، توتر عمل حتى 550 V	يستخدم للترشيح والنقطيع	أكسيد الألمنيوم السائل (1µF à 150000µF)	ترددات أقل من 10kHz
حجم صغير مقارنة بأكسيد الألمنيوم، توتر عمل حتى 150 V	يستخدم للترشيح والنقطيع	أكسيد التنتاليوم الصلب (1µF à 1000µF)	
استقرار حراري عالٍ، تيار تفريغ ذاتي من رتبة الميكروأمبير	يستخدم للتخزين	أكسيد الألمنيوم صلب (1µF à 20000µF)	
توتر عمل حتى 125 V، حجم صغير، مستقر مع التقادم	دائرة RC،	أكسيد التنتاليوم الصلب (10nF à 500µF)	

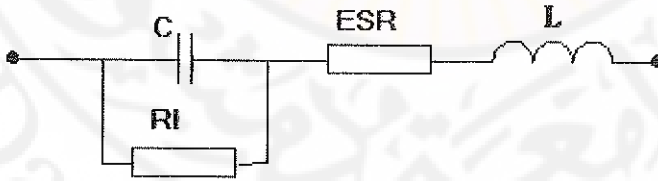
2-1-4- استخدام المكثفات في الشبكات الكهربائية

Capacitors Using in Networks

تمتاز المكثفات الساكنة بأنها لا تحتاج إلى زمن للإقلاع نظراً لعدم احتوائها على أجزاء دوارة، كما أن ضياعاتها الذاتية منخفضة بشكل ملحوظ نظراً لاحتوائها على عدد أصغري 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 مرافق المكثفات (capacitor banks) حسب المطلوب. تستخدم المكثفات التفرعية لتعويض الاستطاعة الردية وتحسين عامل الاستطاعة منذ عام 1914. وحالياً تستخدم مرافق المكثفات على نحو واسع في شبكات التوزيع الكهربائية في سورية 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.

2-1-5- نمذجة المكثفات الكهربائية Modeling of capacitors

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 التسلسلية المكافئة (equivalent serial resistance) وتقاس بالأوم (Ω) ،

R_l : مقاومة التسريب وتقاس بالأوم (Ω) ،

C: سعة المكثف وتقاس بالفاراد (F).

يمكن كتابة الممانعة للدائرة 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 نايكوست للمكثف باستخدام المعطيات أدناه موضحاً عليها المناطق المختلفة حسب زاوية الطور، ماذا تلاحظ؟

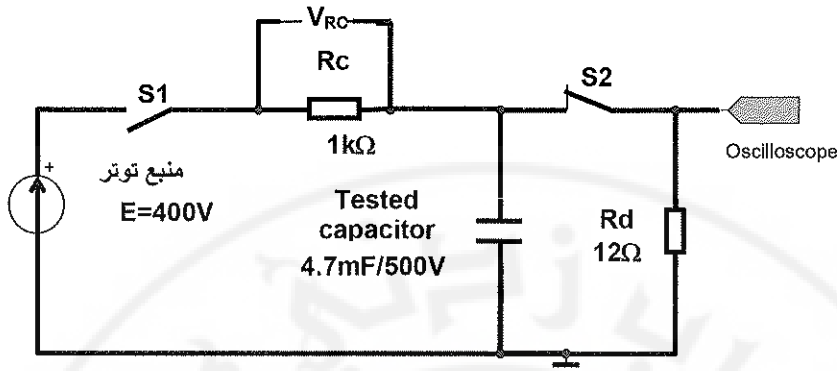
ESR (1 kHz)= 0,08 Ω , C (200 Hz)= 0, 92mF, L= 100nH, R_l =50k Ω

مسألة (2):

مكثف كهربي (أكسيد الألمنيوم) ذو القيم الاسمية (80m Ω , 4.7mF, 500V) يتم شحنه بإغلاق القاطع S_1 كما في الدارة المبينة في الشكل (2-4) من منبع توتر مستمر

$E=400V$ ، ثم يتم تفريغه بفتح القاطع S_1 وإغلاق القاطع S_2 ،

فإذا علمت أن: $R_c=1k\Omega$, $R_d=12\Omega$.



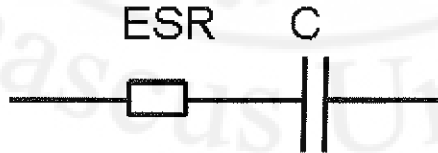
الشكل (20-4): دائرة شحن وتفريغ المكثف التقليدي

لمطلوب مايلي:

- (1) ارسم الدارة الكهربائية المكافئة للمكثف التقليدي مهماً التأثير التحريضي.
- (2) احسب تيار الشحن الأعظمي مع وبدون استخدام مقاومة الشحن R_c ، ماذا تلاحظ؟
- (3) باعتبار أن مقاومة التفريغ R_d مثالية اكتب المعادلة التفاضلية المعبرة عن تغير التوتر على أطراف المكثف $u_c(t)$ خلال التفريغ، ثم استنتج شكل التوتر خلال التفريغ وخلال الشحن.
- (4) احسب قيمة السعة الحقيقية للمكثف المذكور إذا علمت أن الطاقة الكهربائية الضائعة في المقاومة R_d بفعل جول تساوي 450 J، ماذا تلاحظ؟ فسّر ذلك.
- (5) اقترح طريقة مناسبة تعتمد على الدارة الكهربائية أعلاه لقياس مقاومة التسريب للمكثف R_L .

الحل

- (1) يمكن نمذجة المكثف التقليدي بالدارة الكهربائية التالية:



الشكل (2-5): الدارة المكافئة للمكثف التقليدي

(2)

أ- في حال عدم وضع مقاومة R_c 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:

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

$$i_d(t) = C \cdot \frac{du_c(t)}{dt} \quad \text{باعتبار أن}$$

$$u_c(t) + \frac{du_c(t)}{dt} \cdot C \cdot (ESR + R_d) = 0 \quad \text{نجد المعادلة التالية:}$$

وهي معادلة تفاضلية 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 تفاضلية 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:

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

نلاحظ أن قيمة السعة المحسوبة أكبر من القيمة الاسمية بنسبة 20%، وهذا ممكن نتيجة لما يسمى بتفاوت 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_c . وهذه الطريقة تسمى بـ floating.

مسألة (3):

مكثف كهربائي سعته $20\mu F$ مشحون بتوتر $1000V$ وصل طرفاه بطرفي 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 المختزنة فيهما بعد التوصيل.
5. حساب فرق الطاقة المختزنة قبل وبعد التوصيل، ماذا تلاحظ؟ فسّر ذلك؟
6. ارسم باستخدام برنامج حاسوبي العلاقة بين فرق الطاقة المشار إليه في الطلب 4 وسعة المكثف الثاني.

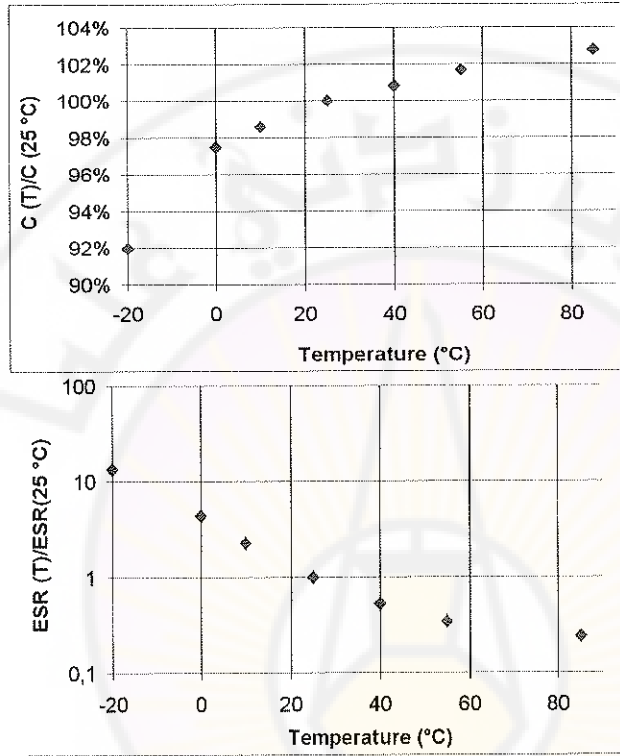
2-1-6- الخصائص الحرارية للمكثفات

Thermal Characteristics of Capacitors

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

تتغير خصائص هذا النوع من المكثفات بتغير درجة الحرارة. لتقدير هذا التغير تمّ وضع المكثف الكهرليتي 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 ازدياد 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 والنقلص، أضف إلى ذلك أن خصائص المادة العازلة أكسيد الألمنيوم تتغير مع تغير درجة الحرارة. بينما تغير المقاومة ESR ناتج عن تغير لزوجة الكهرليت، عندما تنخفض درجة الحرارة فإن ناقلية الكهرليت تنخفض، وفي درجات الحرارة المنخفضة فإن ظاهرة تكثيف (condensation) الكهرليت تظهر بوضوح مقيدة حركة الشوارد داخل الكهرليت وبالتالي ترتفع المقاومة ESR بشكل كبير.

Supercapacitors Energy Storage

2-2-1-التطور التاريخي للمكثفات فائقة السعة

Historical Evolution of Supercapacitors

اكتشف العالم Helmholtz نظرية الطبقة المضاعفة عام 1853، عند غمر قطبين ناقلين مطبق عليهما فرق كمون في سائل كهربي في فوجد أن الشوارد تنتقل إلى السطح البيني الموجود بين القطب (المشحون بشحنة معاكسة للشوارد) والسائل الكهربي.

وأول ما لوحظ تأثير المكثف ثنائي الطبقة الكهربائية في العام 1957 بتجريب من قبل مهندس شركة جنرال إلكتريك (General Electric) لأجهزة يستعمل فيها قطب كربون كهربائي مسامي. فقد كان يعتقد بأن الطاقة تختزن في مسامات الكربون وأظهرت آنذاك "سعة عالية جداً"، بالرغم من أن آلية التخزين كانت مجهولة في ذلك الوقت. ولم يتسن لجنرال إلكتريك متابعة هذا العمل آنذاك.

إن النموذج الحديث من هذه المكثفات في نهاية المطاف طوره باحثون في شركة ستاندر أوليف أوف أوهايو (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 ستاندر أوليف 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 لتكاليفها بشكل كبير. إن الاستخدامات الأولى للمكثفات فائقة السعة في التطبيقات الصناعية قد كانت لدعم إمدادات الطاقة إلى الروبوتات.

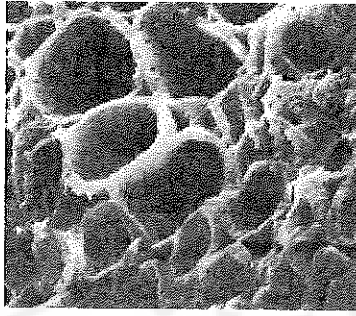
في عام 2005 قامت شركات التحكم (Diehl Luftfahrt Elektronik- GmbH) باختيار ultracapacitors Boostcap لنظم الطاقة في حالات الطوارئ لتشغيل الأبواب وحجرات الإخلاء في طائرات الركاب، بما في ذلك طائرات إيرباص الجديدة من طراز 380 وطائرات الجامبو.

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 يكمن في زيادة النسبة S/D . في المكثفات فائقة السعة تتوضع الشحنات الكهربائية (السالبة والموجبة) على مساحة كبيرة في اللبوسين. فباعتبار مساحة سطح كبيرة للقطب، ومسافة صغيرة جداً بين طبقتي الشحنات (الشوارد من السائل الكهرليتي 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 ميكروسكوبية في سطح أحد اللبوسات.

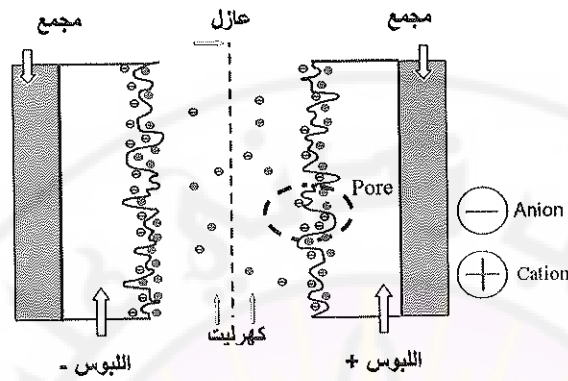


الشكل (2-7): البنية المسامية لللبوس مكثف فائق السعة [11]

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

من حيث البنية، تتكون المكثفات فائقة السعة من لبوسين لهما بنية مسامية ومن كهرليت (electrolyte) ومن عازل مسامي (separator) من رتبة النانومتر. يسمح العازل بمرور الشوارد من دون الإلكترونات. يعتمد مبدأ المكثفات فائقة السعة على توزيع الشحنات الكهربائية بشكل متجاور في الحد الفاصل (interface) بين اللبوس الصلب والكهرليت تحت تأثير الحقل الكهربائي المطبق. يظهر على الشكل (2-8) التوزيع المتجاور للشحنات، فالشحنات الموجبة داخل اللبوس الموجب يقابلها شحنات سالبة داخل الكهرليت، وعلى الجهة الأخرى من المكثف أي على اللبوس السالب نجد مقابلة الشحنات الموجبة. إن المسافة الفاصلة بين اللبوس والكهرليت 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 المتعكسة القطبية من

جهة اللبوس ومن جهة الكهرليت تتحقق بوجود طبقة من جزئيات solvent على الحد الفاصل من جهة الكهرليت.

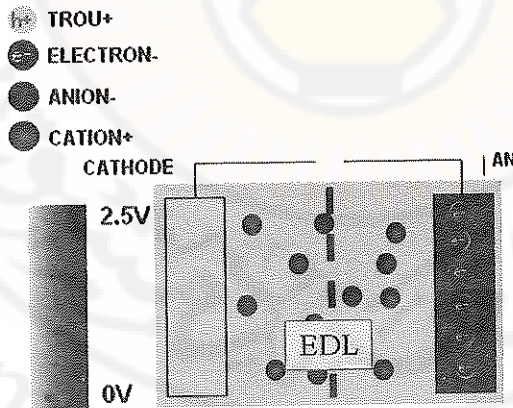


الشكل (8-2): بنية المكثف فائق السعة

3-2-2- آلية الشحن والتفريغ

Charge/Discharge Process

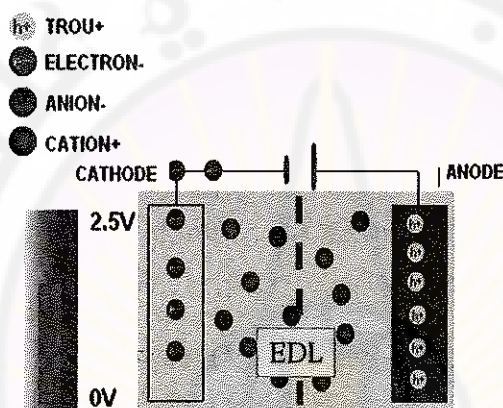
يمكن أن نلخص مراحل عمل المكثف فائق السعة في ثلاث مراحل: حالة عشوائية: عندما يكون التوتر على أطراف المكثف فائق السعة يساوي الصفر فإن الشوارد داخل الكهرليت تكون في حالة عشوائية كما يبين الشكل (9-2).



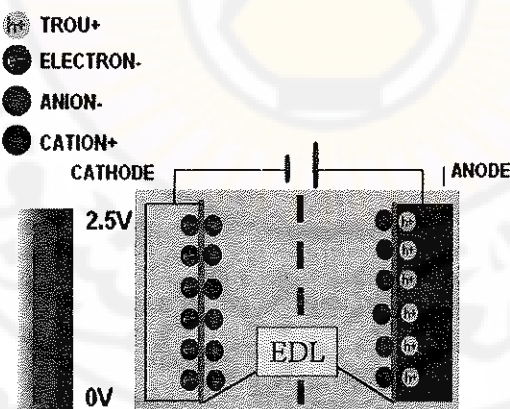
الشكل (9-2): حالة عشوائية للشوارد في مكثف فائق السعة

Trou+: ثقب، anion-: أيون سالبة الشحنة، cation+: الكاتيون، أيون موجب الشحنة

حالة الشحن: يتم الشحن بوصل منبع تيار مستمر إلى المكثف حيث قطبه الموجب إلى القطب الموجب للمكثف وقطبه السالب إلى القطب السالب للمكثف. نلاحظ ارتفاع تدريجي لتوتر المكثف حتى وصول التوتر إلى التوتر المطلوب كما يظهر الشكل (2-10-أ)، حيث يرافق ذلك تراكم تدريجي للشحنات في الطبقة الفاصلة (Interface) بين الليوس والسائل الكهرليتي، لتتنظم الشحنات الموجبة جوار القطب السالب والشحنات السالبة جوار القطب الموجب كما يبين الشكل (2-10-ب). يرافق ذلك دائماً هجرة للإلكترونات من القطب الموجب للمكثف إلى القطب السالب للمكثف عبر المنبع.

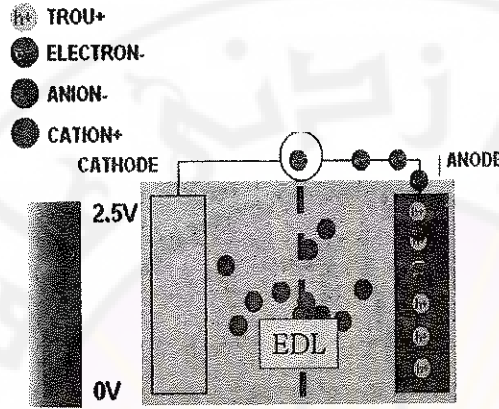


الشكل (2-10-أ): حالة الشوارد والإلكترونات في مكثف خلال الشحن



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

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

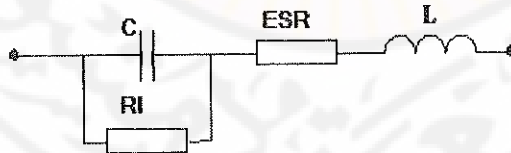


الشكل (11-2): حالة الشوارد والإلكترونات في المكثف عند التفريغ

2-2-4- نمذجة المكثف فائق السعة

Modeling of Supercapacitors

يوجد عدة نماذج لتمثيل ووصف سلوك المكثفات فائقة السعة منها ما هو رياضي ومنها ما يمكن تمثيلها كدارة مكافئة، ومن أبسط الدارات المكافئة للمكثف فائق السعة دائرة RLC الموضحة في الشكل التالي:



الشكل (0): دائرة RLC المكافئة للمكثف فائق السعة

حيث:

L : حثية المكثف والأسلاك ووحدة قياسه H (الهنري).

ESR: المقاومة التسلسلية المكافئة وتقاس بالأوم (Ω).

R_L : مقاومة التسريب وتقاس بالأوم (Ω).

C: سعة المكثف وتقاس بالفاراد (F).

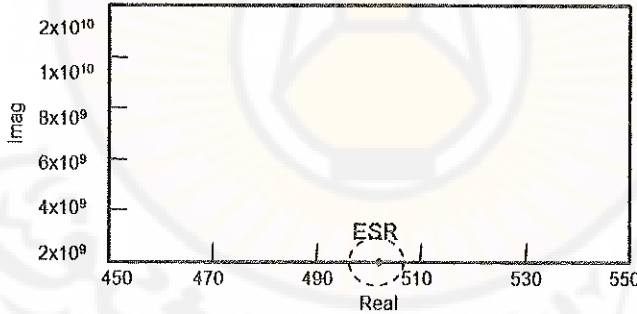
مسألة نموذجية:

ارسم مخطط نايكوست للدائرة الكهربائية الموضحة في الشكل (2-12) من أجل قيم اختيارية للمكثف فائق السعة ومن أجل:

- (1) ترددات الرنين،
- (2) الترددات المنخفضة أقل من تردد الرنين وثم باعتبار التأثير التحريضي،
- (3) الترددات العالية،
- (4) الترددات المنخفضة جداً.

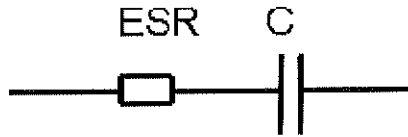
الحل:

(1) في تردد الرنين المفاعلة التحريضية تساوي المفاعلة السعوية للمكثف لتصبح الممانعة الكلية تساوي قيمة المقاومة ESR ويكون مخطط نايكوست كما هو مبين الشكل (2-13).

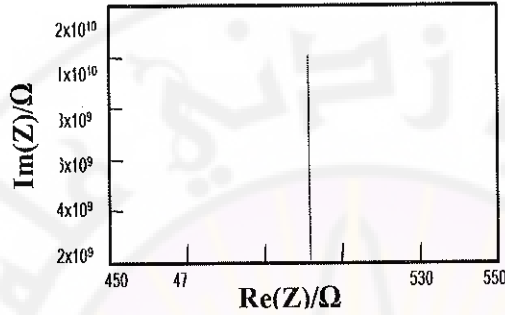


الشكل (2-13): مخطط نايكوست عند تردد الرنين

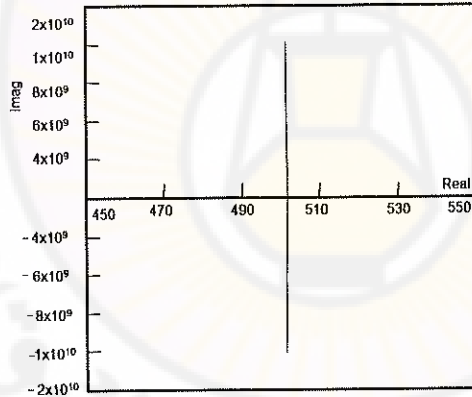
(2) في الترددات المنخفضة أقل من تردد الرنين تصبح الدائرة المكافئة للمكثف فائق السعة كما هو مبين الشكل (2-14).



الشكل (2-14): الدارة المكافئة للمكثف فائق السعة عند الترددات المنخفضة
 ويكون مخطط نايكوست كما يظهر الشكل (2-15) والمرسوم بمساعدة برنامج
 .Simplorer



الشكل (2-15): مخطط نايكوست عند الترددات المنخفضة
 في حال اعتبار الملف يكون مخطط نايكوست كما هو مبين الشكل (2-16).



الشكل (2-16): مخطط نايكوست عند الترددات المتوسطة
 في الترددات المنخفضة جداً نجد أن ممانعة المكثف فائق السعة تصبح على الشكل
 التالي:

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{Z_{Rl}} + \frac{1}{Z_C} = \frac{1}{R_l} + \frac{1}{(j\omega C)^{-1}} = \frac{1}{R_l} + j\omega C_l$$

ومنه،

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

ومن أجل تردد يسعى إلى الصفر نجد:

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

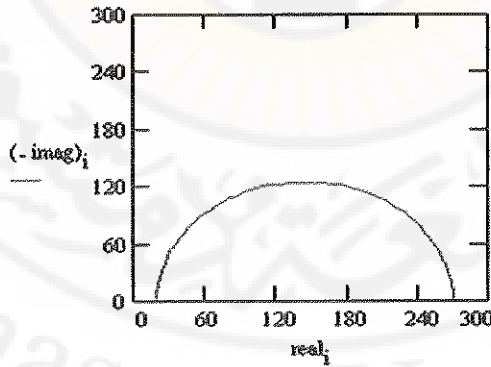
$$\text{Im}(Z) = \frac{-\omega R_l^2 C}{1 + \omega^2 R_l^2 C^2} = 0$$

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

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

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

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



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

2-2-5- قياس خصائص المكثفات فائقة السعة

Measurement of Supercapacitors' Characteristics

إن حساب خصائص المكثفات فائقة السعة مثل السعة والمقاومات يتطلب تقنيات خاصة نظراً لصغرها. بالإضافة لذلك إن المكثفات فائقة السعة تولد ظواهر فيزيائية وكيميائية معقدة 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 الكهروكيميائية (Electrochemical

(Impedance Spectroscopy

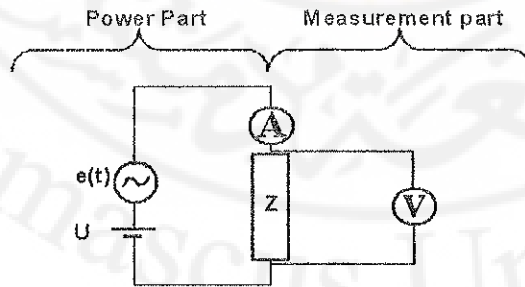
• تقنية التيار المستمر مثل الشحن والتفريغ بتيار ثابت أو توتر ثابت.

2-2-5-1- مبدأ مقياس الطيف للممانعة الكهروكيميائية

يتألف من قسم للقياس وقسم للقدرة كما يوضح الشكل (2-18) أدناه. قسم القدرة يساعد على تطبيق توتر مستمر + موجة توتر متناوب. توتر الحقن المستمر (DC bias voltage) يساعد على استقطاب المكثف، نظراً لاعتماد خصائص المكثف فائق السعة على التوتر المطبق على أطرافها. أما التوتر المتناوب فهو توتر ذو طولية ضعيفة بضعة ميلي فولت وتردد متغير.

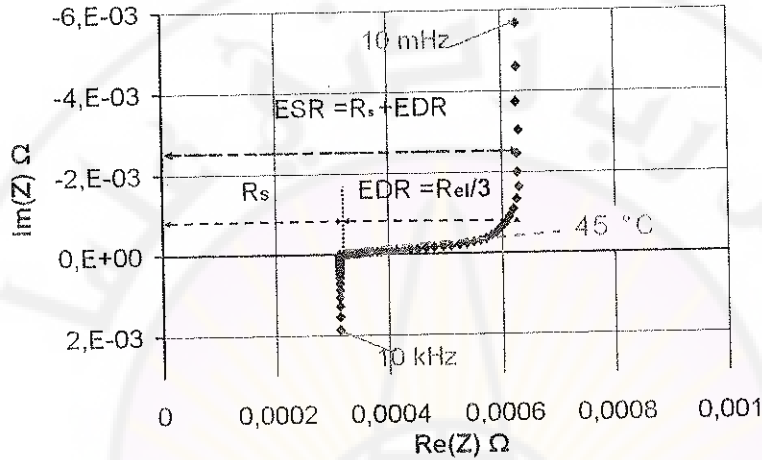
يتم قياس الممانعة وفق العلاقة التالية :

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



الشكل (20-18): جهاز قياس الممانعة EIS

يمكن أن ترسم النتائج التي نحصل عليها على مخطط نايكوست كما في الشكل (2-19). 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 للممانعة Z .

ESR : المقاومة التسلسلية المكافئة وتؤخذ عند تردد منخفضة بالإسقاط على المحور الحقيقي للممانعة Z .

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

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

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

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

والمحاضرة 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 10mHz 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 تعدّ المكثف فائق السعة مكثفاً 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 منحنى توتر وتيار المكثف فائق السعة كما يبين الشكل (2-20).

نحدد قيمة المقاومة ESR من العلاقة التالية:

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

حيث:

I : قيمة تيار الشحن أو التفريغ،

ΔU_0 : مقدار هبوط التوتر في نهاية الشحن وعند فصل تيار الشحن.

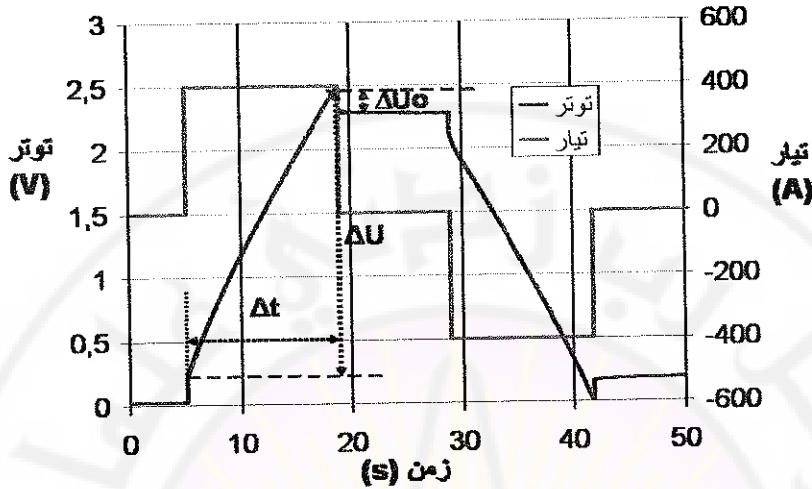
ما قيمة السعة فيمكن حسابها من العلاقة:

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

حيث:

ΔU : مقدار ارتفاع التوتر خلال الشحن،

Δt : مقدار الزمن الموافق للارتفاع التوتر ΔU .



الشكل (20-2): منحنى شحن وتفريغ المكثف فائق السعة بتيار ثابت [11]

مسألة نموذجية:

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

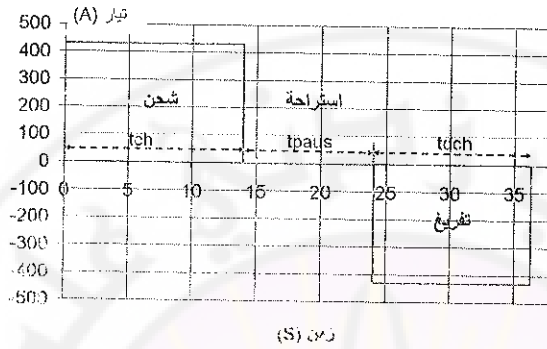
$$t_{ch} = 14s, t_{dch} = 12.3s, t_{storage} = 10s, I = \pm 430A, U_{c0} = 0V, \\ ESR = 630\mu\Omega$$

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

(1) ارسم دائرة كهربائية بسيطة مكافئة للمكثف فائق السعة، ثم ارسم مخطط نايكوست لهذه الدارة.

(2) خلال الشحن ارتفع التوتر على أطراف المكثف من التوتر الابتدائي إلى التوتر الاسمي بزمناً وقدره 14 ثانية، احسب قيمة السعة الحقيقية لهذا العنصر خلال الشحن وماذا تلاحظ ؟

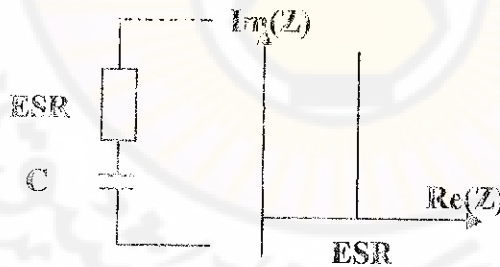
- 3) احسب التغير الزمني للتوتر على أطراف هذا العنصر $u(t)$ خلال كامل الدور T ($=38\text{ s}$) باعتبار سعته الحقيقية، ثم ارسمه بدقة.
- 4) احسب قيمة الطاقة المخزنة في هذا العنصر في نهاية الشحن.
- 5) احسب المردود الكموني للمكثف.



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

الحل:

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



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

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

$$Re(w) = ESR$$

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

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

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

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

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

$$2.2291 = 6020/C \Rightarrow C = 2700 [F]$$

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: $0 < t < 14s$

$$\Delta u = I \cdot ESR = 0.27V \text{ يرتفع التوتر لحظياً بقيمة}$$

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 مساوياً:

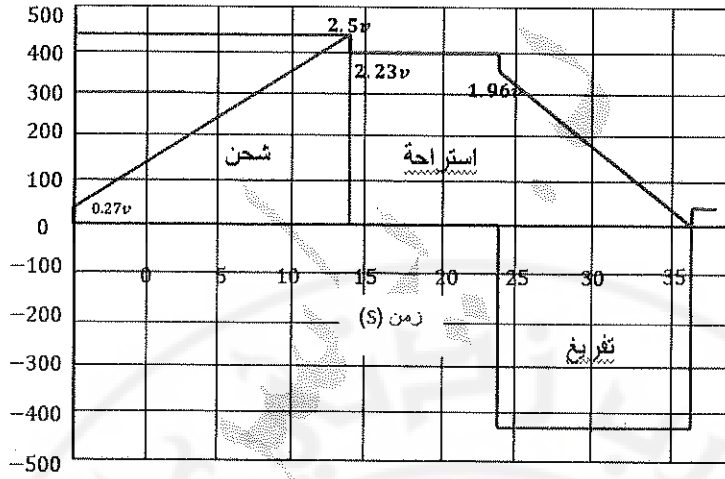
$$U = 2.23 - 0.27 = 1.96V$$

وفي 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 المخزنة 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 وتفريغ مكثف فائق السعة ذي القيم الاسمية التالية (2.7V, 2600F, 600A) 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 عما يلي:

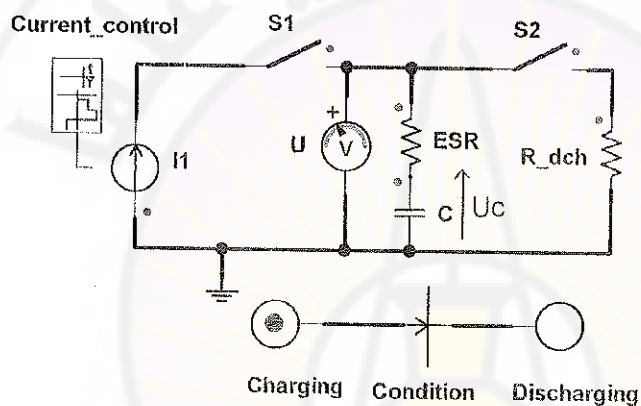
- (1) ارسم دائرة كهربائية بسيطة مكافئة للمكثف فائق السعة،
- (2) خلال الشحن ارتفع التوتر من التوتر الابتدائي إلى التوتر الاسمي احسب قيمة السعة الحقيقية لهذا العنصر وماذا تلاحظ؟
- (3) احسب التغير الزمني للتوتر على أطراف هذا العنصر خلال الدور كامل $T=33s$ ثم ارسمه بدقة،
- (4) احسب قيمة الطاقة المختزنة في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

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

- 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 أعظمي U_{max} وبزمن 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 $t=26.77s$ ، احسب تيار التفريغ وهبوط التوتر على المقاومة المكافئة التسلسلية للمكثف فائق السعة U_r .
- (3) بإهمال أثر المقاومة المكافئة التسلسلية للمكثف فائق السعة على الحساب، احسب زمن التفريغ t_{dch} ، باعتبار أن التفريغ ينتهي عندما ينخفض التوتر إلى 2% من قيمته الابتدائية (2% من قيمته في اللحظة $t=26.77s$)،
- (4) ارسم توتر وتيار المكثف فائق السعة خلال دور تشغيل كامل (شحن-تخزين-تفريغ).



الشكل (2-24): مخطط الدارة الكهربائية لشحن وتفريغ المكثف فائق السعة

Sizing of Supercapacitors Modules

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

مثال على استخدام نظام تخزين الطاقة بالمكثفات فائقة السعة:

إن الهدف الأول لاستخدام نظام تخزين الطاقة في الحافلات 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 $m.s^{-1}$.

من أجل القيم: $m=20\text{ton}$ و $v=15 m.s^{-1}$ (54km.h^{-1}) نجد أن الطاقة الحركية هي

$W=625\text{W.h}$ ، والطاقة المحسوبة، من أجل زمن تفريغ 15s، تكافئ استطاعة عظمى

تقارب $625 \times 3600 / 15 = 150\text{kW}$.

من الناحية الفنية لأجل استطاعة كبيرة من رتبة 150kW (انظر الملحق (2))، يفضل

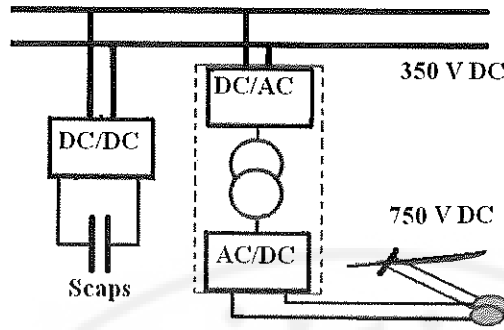
تجزئة استطاعة الكبح إلى ثلاثة موديوالات استطاعة كل منه $(625/3=208 \text{ W.h})$

50 kW.

في الحافلة الكهربائية، يتم ربط نظام تخزين الطاقة بالمكثفات فائقة السعة إلى القضبان

الداخلية للحافلة وعلى توتر مستمر وقدره 350V عن طريق مبدل الكترولني Buck-

Boost يسمح بمرور الاستطاعة بالاتجاهين كما يظهر الشكل (2-25).



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

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

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

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 والتفريغ 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 (2-10) 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 C_{eq} هي:

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

وبناء عليه وباستخدام العنصر (انظر الشكل (26-2)) MC2600 (2600 F, 2.7 V) والمنتجة حديثاً من قبل شركة MAXWELL-technology (في الجدول (2) أدناه المواصفات 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): المواصفات الاسمية للمكثف فائق السعة MC2600 [12]

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

يمكن حساب عدد الخلايا من المكثفات فائقة السعة اللازمة لتحمل التوتر المطلوب (300 V) كمايلي (ونأخذ أيهما أكثر):

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

في صفحة الويب أدناه لعام 2012 نجد أن المصنع اركتل (Erctel) يقترح نظام تخزين قريب من المصمم وله المواصفات التالية:

- قدرة التخزين 250 Wh

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

مسألة:

يتم تغذية ترامويه باستخدام نظام تخزين بالمكثفات فائقة السعة. وُجدَ أن الطاقة اللازمة للترامويه tramway للوصول من محطة توقف ركاب ما إلى محطة التوقف التالية هي 3.5kW علماً أن توتر عمل المكثفات فائقة السعة لايزيد عن 750V. المطلوب حساب عدد خلايا موديل المكثفات فائقة السعة (التسلسلية والتفرعية) من العنصر (2.5V, 2600F) حتى نؤمن وصول الترامويه 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.

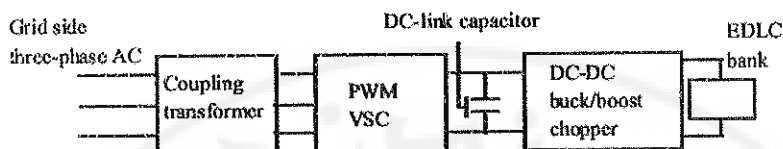
في مجال إلكترونيات القدرة: تستخدم كمعوضات الاستطاعة الردية.

في وسائط 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 البدائل الأخرى تأمينها في زمن قصير جداً.

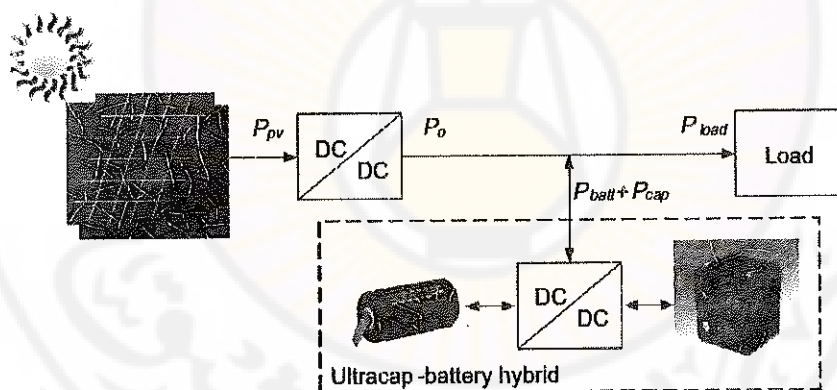
يجري العمل في كثير من الأبحاث على استخدام المكثفات فائقة السعة لتعديم استطاعة الخرج في المزارع الريحية. حيث تمثل مصدراً للاستطاعتين الردية والحقيقية. يوضح

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 بطيئة فإن استخدام المكثفات ينحصر بالحفاظ على توتر قضبان تجميع التيار المستمر ثابت (بمساعدة المدخرات الكهربائية) عند وجود أحمال تتطلب استطاعات لحظية كبيرة مثل حالة إقلاع المحركات. يبين الشكل (28-2) مخطط ربط المكثفات فائقة السعة في النظم الكهروضوئية.



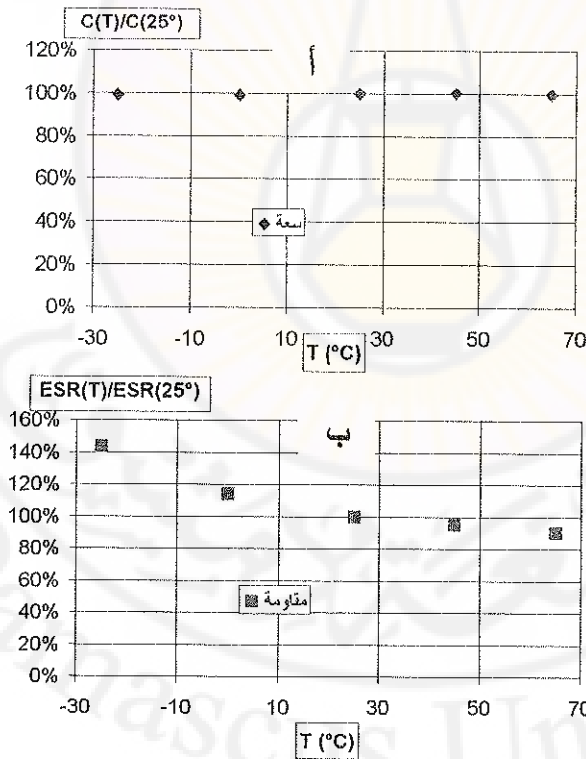
الشكل (28-2): مخطط ربط المكثفات فائقة السعة في النظم الكهروضوئية

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

Temperature Effect on Supercapacitors Parameters

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

تزداد مقاومات هذه العناصر مع انخفاض درجات الحرارة (انظر الشكل (2-29-ب))، وبالتالي هذا الازدياد يخفض من قيمة القدرة 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 بالملفات فائقة الناقلية

Superconducting Coils Energy Storage



3- تخزين الطاقة بالملفات فائقة الناقلية

Superconducting Coils Energy Storage

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

3-1- المبدأ الأساسي للموصلات فائقة الناقلية

Basic Principle of Superconductors

تقسم المواد من حيث قدرتها على توصيل الكهرباء إلى عوازل (insulators) مثل الخشب، وأنصاف نواقل (semiconductors) مثل السيليكون، والنواقل (conductors) (الموصلات) مثل النحاس، ولكن هناك نوع آخر من المواد الناقلة للكهرباء وهو ما يعرف باسم الموصلات فائقة الناقلية (superconductors). والموصلات فائقة الناقلية سميت هكذا نظراً لأنها عند درجة حرارة معينة (منخفضة جداً) تصبح مقاومتها لمرور التيار مساوية للصفر، 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 تُتَفَرَّ 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 الترانزيستور والدارات الإلكترونية المتكاملة.

2-3- ملخص تاريخي عن الموصلات الفائقة

Resume of Superconductors

قبل عام 1911 كان الاعتقاد السائد أن جميع المواد تصبح فائقة الناقلية للكهرباء فقط عند درجة حرارة الصفر المطلق أي -273.15°C . ولكن في تلك السنة لوحظ أن الزئبق النقي تصبح مقاومته مساوية للصفر عند درجة حرارة 4k أي -269°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 الناقلية، رمزه الكيميائي هو $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ عند درجة حرارة -180°C ، ويمكن الحصول على هذه الدرجة بإسالة غاز النيتروجين وهذا غير مكلف. ومن هنا بدأت البحوث والتجارب العلمية تنتشط لمحاولة فهم هذه الظاهرة وكيفية استغلالها في التطبيقات الصناعية، و كذلك في البحث عن مواد تكون مقاومتها صفراً عند درجات حرارة الغرفة أي 25°C . ومع استمرار البحث تمّ التوصل إلى نوع من الموصلات الفائقة تسمى بالموصلات الفائقة الأكسيدية تعمل عند درجة حرارة أعلى كثيراً من درجة حرارة النيتروجين السائل. فالنيتروجين السائل يغطي 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 الهليوم السائل الذي يبرّد الموصلات الفائقة المعتادة.

3-3- بعض التطبيقات الهامة

إن اكتشاف مواد فائقة الناقلية 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 بشدات كبيرة، حيث أن التكاليف المادية لنقل

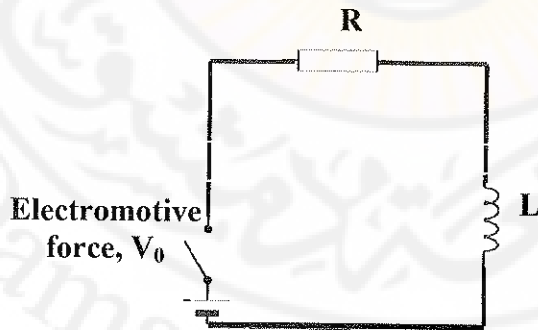
التيار عبر أسلاك النحاس مرتفعة نظراً للفقد الكبير في الطاقة على شكل حرارة متبددة نتيجة مقاومة السلك النحاسي، كذلك إذا ما قارنا قيمة التيار الذي يمكن نقله عبر السلك النحاسي حيث تبلغ شدته 100 أمبير لكل سنتيمتر مربع بينما في السلك المصنوع من مركب الـ $YBa_2Cu_3O_7$ تبلغ 100000 أمبير لكل سنتيمتر مربع.

كذلك فإن لهذه المواد تطبيقات عديدة في مجال الإلكترونيات لما تتمتع 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 تطور كبير في مجال الحاسوب.

3-4- مبدأ تخزين الطاقة في الموصلات فائقة ناقلية

Principle of Energy Storage in Superconductors

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



الشكل (1-3): دائرة LR مع منبع V_0

حيث:

R: هي المقاومة الكلية للدائرة 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 ستكتب بالشكل التالي:

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

حيث:

e_s : هي القوة الكهربائية المتحرضة 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 $i(t)=0$ نجد المعادلة التالية:

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

وهي معادلة تفاضلية 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 τ 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]:

$$V_0 \cdot i(t) \cdot dt = \underbrace{i^2(t) \cdot R \cdot dt}_{dw_s} + \underbrace{L \cdot i(t) \cdot di(t)}_{dw_r} \quad (5-3)$$

الطاقة المقدمة من المنبع الخارجي dw_s مؤلفة من جزأين أحدهما dw_r هي الطاقة الضائعة (مفايد جول) والأخرى dw_m هي الطاقة المختزنة في الحقل المغناطيسي. إن الطاقة المستخدمة لتكوين الحقل المغناطيسي dw_m يمكن أن تعاد مرة ثانية خلال عملية التفريغ كتيار كهربائي إلى دائرة الحمل، وتكون معادلة الطاقة المختزنة 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 تعطي الطاقة المختزنة بدلالة الحجم المحيط بالملف كما يلي [5]:

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

حيث:

V : الحجم الممغنط المحيط بالملف مقدراً بـ m^3 ،

μ_0 : ثابت النفاذية المغناطيسية للهواء ويساوي $4\pi \times 10^{-7}$ Henry/metre،

B : التحريض المغناطيسي مقدراً بـ Tesla.

يمكن أن تحسب الكثافة الحجمية للطاقة المختزنة بالعلاقة التالية:

$$W = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot B^2 \quad (8-3)$$

3-5- خصائص الموصلات فائقة الناقلية

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 لا تزال منخفضة بالمقارنة مع المدخرات. وبما أن المواد الفيرومغناطيسية لا تعطي تحريضاً مغناطيسياً أعلى من 3 Tesla [3]، فلتخزين الطاقة المغناطيسية في الموصلات فائقة الناقلية توضع عادةً في وسط كالهواء أو الفراغ بمعامل نفاذية $\mu_r = 1$ 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 الاختيار الهندسي الملائم للملف.

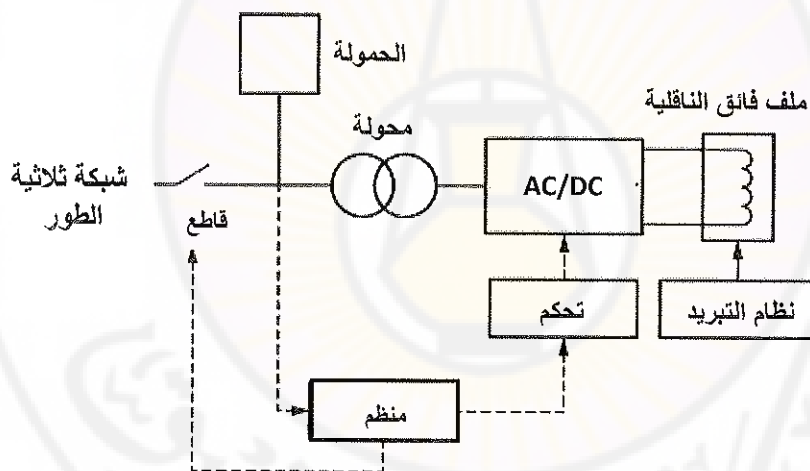
إن الملف فائق الناقلية (الذي هو عبارة عن ملف مقاومته الداخلية مساوية تقريباً للصفر) يمكن أن يربط مع منبع تغذية تيار مستمر وطالما إن تيار الملف يزداد، فإن الحقل المغناطيسي أيضاً يزداد، وكذلك الطاقة الكهربائية الكلية المخزنة في الحقل المغناطيسي. وعندما يصبح التيار أعظماً فإن التوتر على طرفي الوشيجة ينخفض إلى الصفر. في هذه المرحلة يكون الملف مشحوناً بشكل 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 مقاومته (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 مهمة لمرور التيار المستمر عند درجات حرارة منخفضة لذلك فإن الحرارة الناتجة عن مفعول جول تكون مهمة، بينما في التطبيقات التي تستخدم التيار المتناوب، يبقى هناك بعض الضياعات الكهربائية.

كل هذه العوامل تجعل الموصلات فائقة الناقلية ذات تطبيقات مجدية في نظم القدرة الكهربائية. تصنع تقنيات الموصلات فائقة الناقلية من iNbT أو Nb_3Sn . وحالياً الموصلات فائقة الناقلية 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 حده الأعلى الى 5Tesla وهذا يعد من النوع القديم، إذ يوجد نوع أكثر حداثة فيه درجات الحرارة الحدية أعلى وتتراوح بين 20K÷30 كما أن شدة التحريض المغناطيسي تصل حتى 10Tesla أي كثافة الطاقة الكهربائية هنا أعلى وهذا يستخدم موصلات مصنوعة من BaCuO أو BSCCO [5].

3-6- مبدأ عمل نُظْم تخزين الطاقة بالملفات فائقة الناقلية

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



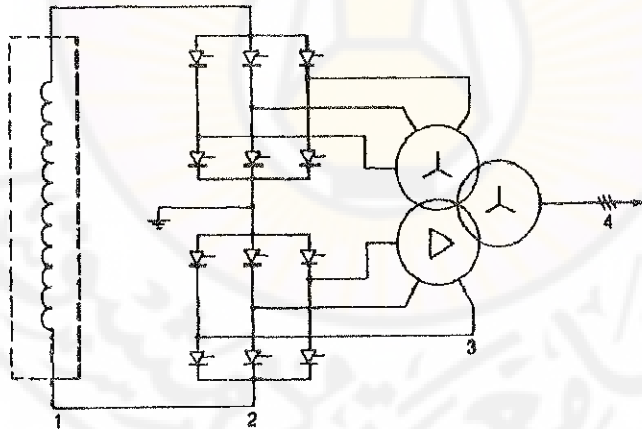
الشكل (2-3): مخطط عام لنُظْم تخزين الطاقة بالملفات فائقة الناقلية المربوطة الى الشبكة

إنَّ 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 خافضة للتوتر، ثم يقوم هذا التوتر وببديل إلى توتر مستمر ليحقن في الملف.

عندما تتدفق الاستطاعة إلى الملف، يُقوَم التوتر المستمر بشحن الملف ذي الناقلية 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 بتفريغ شحنته ويتصرف على أنه منبع للقدرة. التوتر المستمر يتم تحويله مجدداً إلى توتر متناوب عن طريق المعرج ويحقن في الشبكة.

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

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



الشكل (3-3): دائرة رابط نظام تخزين الطاقة بالملفات فائقة الناقلية الى نظام القدرة

- 1- الملف فائق الناقلية، 2- جسر تقويم AC-DC،
- 3- محول نجمي-مثلثي، 4- إلى نظام القدرة ثلاثي الطور.

إن المبدل مستهلك للطاقة الرديئة ويعدّ جزءاً رئيسياً من نظام التحويل "PTS" المشروح أعلاه (انظر الفقرة (1-2)). من المميزات الهامة للمبدل هو المردود العالي حيث تقدر الضياعات المنسوبة إلى جسر التبديل ما بين 3% إلى 8% من الطاقة الكلية المخترنة.

يتم حساب زاوية التأخير في الطور في تيار الملف المعطى من أجل الحصول على الاستطاعة الفعلية P والرديئة Q المطلوبتين. ويجرى هذا الحساب بفواصل زمني كل 30 ميلي ثانية. عندما تكون زاوية التأخير في الطور أقل من 90 درجة يعمل الجسر كمقوم، 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 تغير إشارتها ويصبح الجسر منبعاً للطاقة بالتوازي مع نظام القدرة.

3-7- تطور نظم التخزين بالملفات فائقة الناقلية

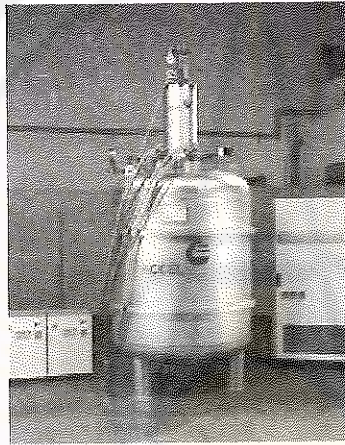
إن الطرح الأولي لنظم التخزين ذات الموصلات فائقة الناقلية كانت عام 1969 والتي قام بها العالم Ferrier وقد اقترح بناء ملف حلقي كبير قادر على تخزين وتأمين الطاقة الكهربائية بشكل يومي لفرنسا بأكملها، ولكن اقتراحه هذا قوبل بالرفض بسبب ارتفاع كلفة المشروع المقترح. وفي عام 1971 بدأت الأبحاث في الولايات المتحدة الأمريكية في جامعة ويسكنسون 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 فائقة الناقلية.

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

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

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

- الأبعاد الهندسية: ارتفاع $H=760\text{mm}$ ، قطر $D=600\text{mm}$ ،
- المواد المستخدمة: Supra LTC NbTi.
- الخصائص الكهربائية: استطاعة 200kW ، طاقة 0.5kWh ، تيار 1000A ، حثيه 4.1H ، تحريض مغناطيسي 4.5T .



الشكل (3-4): صورة لملف فائق الناقلية

إن هذه النظم ذات مردود عالٍ لعملية تخزين الطاقة وقد يتجاوز مردودها الـ 97% ويمكن أن يصل عمرها إلى 20-30 سنة وعدد دورات عمل كبير جداً وتستطيع هذه النظم تأمين استطاعة ردية أو حقيقية وتبدو مناسبة جداً للتطبيقات التي تتطلب استطاعات نبضية أعلى من IMVA [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 لتنعيم استطاعة الخرج الناتجة عن المزارع الريحية.

الفصل الرابع
تخزين الطاقة بالمدخرات الكهربائية
Electrical ³Batteries Energy Storage

³ يطلق عليها أحياناً Accumulators .



4- تخزين الطاقة الكهربائية بالمدخرات الكهربائية

Electrical Batteries Energy Storage

4-1- نبذة عن التطور التاريخي للمدخرات الكهربائية

تُعرف المدخرة بأنها عنصر كهروكيميائي يعتمد على مبدأ تحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية وبالعكس، وذلك بواسطة تفاعلات الأكسدة والإرجاع Oxidation-Reduction.

لقد شهدت المدخرات الكهربائية تطوراً كبيراً عبر التاريخ من حيث البنية والأنواع. ففي العام 1780 لاحظ العالم الإيطالي لويجي غالفاني أن سيقان الضفدعة المشرحة ترتعش عندما تضرب بشدرة من مصدر كهربائي خارجي. في العام 1791 نشر العالم غالفاني تقريراً حول "الكهرباء الحيوانية" حيث قام بصنع دائرة كهربائية تتألف من ساقى الضفدعة ومعدنين مختلفين: ألف وباء، وكل معدن يلمس أحد ساقى الضفدعة، وبالتالي تنتج الدارة ألف-ساق-باء-ألف -ساق-باء... الخ [14]. بالمصطلحات الحديثة الضفدعة كانت بمثابة كل من الكهرليت والمعادن بمثابة الأقطاب الكهربائية. وقد لاحظ غالفاني أنه على الرغم من أن الضفدع كان ميتاً، فإن ساقيه ترتعشان عند لمسهما بالمعادن.

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

توتر قطب الخلية يسمى القوة المحركة الكهربائية (EMF-electromotive force)، وأما نفس الواحدة للتوتر الكهربائي ووحدة قياسها فولت، تكريماً للعالم فولتا.

في عام 1800 اخترع فولتا المدخرة عن طريق وضع العديد من الخلايا الفلزية على التوالي، بتكديسهم واحدة فوق الأخرى. هذا الكدس الفولطي أعطى قوة محرك

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

لم يقدّر فولتا أن التوتر كان بسبب التفاعلات الكيميائية، بل كان يعتقد أن الخلايا تشكل مصدراً لا ينضب للطاقة، وأن الآثار الكيميائية التي ترتبط بها (الصدأ على سبيل المثال) كانت مصدر إزعاج فقط، بدلاً من أن تكون نتيجة لامفر منها لتشغيلها. كما أظهر مايكل فراداي في عام 1834 أن الأيونات الموجبة الشحنة (cation) (الكاتيون) تتجذب إلى المهبط (cathode)، والأيونات السالبة الشحنة (anion) (الأنيون) 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 الكهرليت 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 تمّ اختراع مدخرات الخلايا الجافة، التي أحلت العجينة محل الكهرليت (الأليكتروليت)، أدت إلى جعل الأجهزة الكهربائية المحمولة عملية. نلخص في الجدول (4-1) التالي التسلسل الزمني لاختراع وتطور المدخرات [15].

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

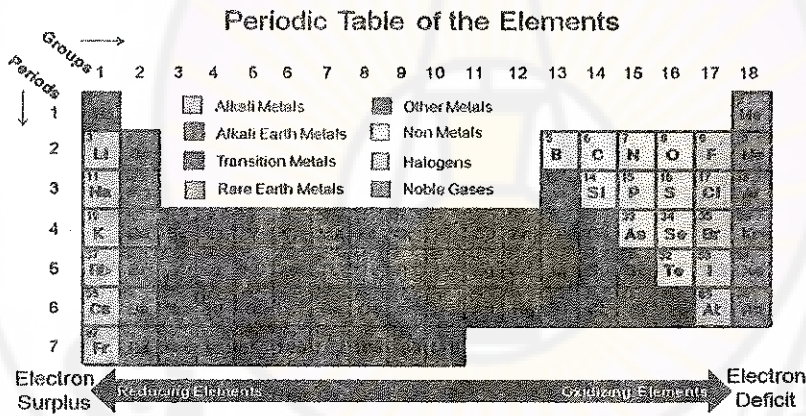
السنة	اسم المخترع	العمل
1791	غالافاني (إيطاليا)	اكتشاف الكهرباء الحيوية
1800	فولتا (إيطاليا)	اختراع خلية فولت
1836	دانييل (انكلترا)	اختراع خلية دانيال
1859	بلانت (فرنسا)	اختراع خلية الرصاص-حمض
1868	ليكلانش (فرنسا)	اختراع خلية ليكلانش
1899	جونغر (السويد)	اختراع مدخرة نكيل كاديوم
1901	أديسون (الولايات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

4-2- كمونات أقطاب المدخرات الكهربائية

Electrodes Potentials of Batteries

إن التوتر المتولد من الخلية الكهروكيميائية يرتبط بشكل مباشر مع نوعية المواد المستخدمة في صناعة الأقطاب. إن ميل المادة لمنح إلكترونات أو اكتساب إلكترونات 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 إلكترونات) أو قابلة للإرجاع Reduction (اكتساب الإلكترونات) [16].

يوضح الجدول الدوري للعناصر المبين بالشكل (4-1) العناصر ذات قابلية الإرجاع، والعناصر ذات قابلية الأكسدة وهي مرتبة ضمن 18 مجموعة، لكل مجموعة نفس عدد الإلكترونات في مدار التكافؤ.



الشكل (4-1) الترتيب الدوري للعناصر الكيميائية [16]

كما يتم قياس الكمون الكهروكيميائي لكل عنصر من العناصر بالنسبة لأقطاب الهيدروجين المرجعي وذلك ضمن شروط معيارية من درجة حرارة، وضغط جوي، وتركيز كهربي. يوضح الجدول (4-2) التوترات الكهروكيميائية لعدد من العناصر.

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

Cathode (Reduction) Half-Reaction	Standard Potential E ° (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

3-4- البنية وآلية الشحن والتفريغ

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 إلكترونات إلى الدارة الخارجية.

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

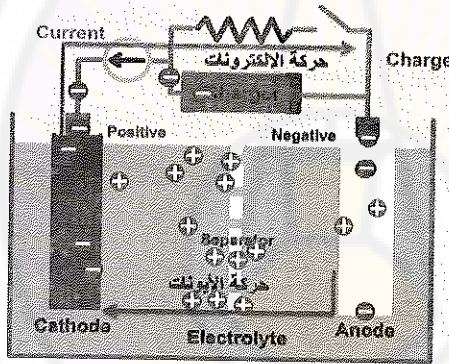
الكهرليت (electrolyte): هو الوسط الذي يسمح بانتقال الشوارد (الأيونات) داخلياً بين القطبين.

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

المجمع (collector): يستخدم لتجميع التيار على طول القطب السالب والموجب، يستخدم عادةً النحاس لربط المصعد إلى الخارج والألمنيوم لربط المهبط.

يعتمد مبدأ عمل المدخرة على الحركة الخارجية للإلكترونات عبر المنبع (أو الحمل) وعلى الحركة الداخلية للشوارد (الأيونات) ضمن الكهرليت [16].
يجري شحن الخلية بوصلها إلى منبع تيار مستمر يسمى الشاحن (charger)، حيث يوصل القطب⁴ الموجب للشاحن للقطب الموجب للمدخرة والقطب السالب للشاحن للقطب السالب للمدخرة.

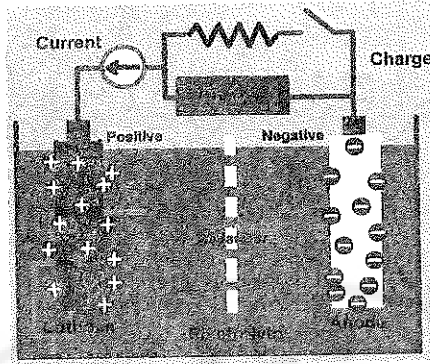
يوضح الشكل (2-4) حركة الشحنات خلال عملية الشحن حيث تنتقل الإلكترونات من القطب الموجب للمدخرة عبر الدارة الخارجية إلى القطب السالب للمدخرة (عكس اتجاه التيار كما هو موضح في الشكل (2-4)) وفي داخل المدخرة تنتقل الشحنات الموجبة من القطب السالب إلى القطب الموجب عبر الكهرليت حتى تمام الشحن.



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

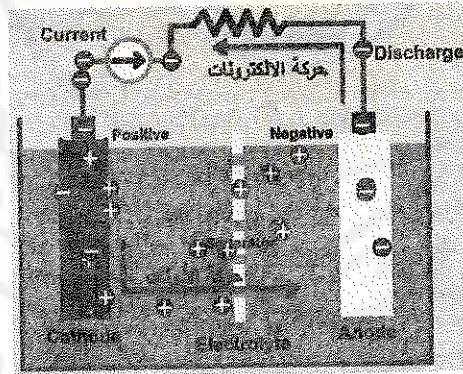
يظهر الشكل (3-4) الشحنات في نهاية عملية الشحن حيث تنتظم الإلكترونات على القطب السالب والشحنات الموجبة على القطب الموجب.

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



الشكل (4-3): انتهاء عملية شحن المدخرة

لتفريغ المدخرة يجري فصل دائرة الشاحن ووصل حمل (مقاومة تفريغ) على أطراف المدخرة. ويبين الشكل (4-4) حركة الشحنات خلال عملية التفريغ. عندما تبدأ عملية التفريغ 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 الكهرليت تكون مكتملة لحركة الإلكترونات ولكن يعتمد في تفاصيله على المواد المكونة للكهرليت والأقطاب وسنوضح هذا لاحقاً (انظر الفقرة (4-5-1-2)).



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

4-4- طرز المدخرات الكهربائية Types of batteries

يمكن تصنيف المدخرات الكهربائية إلى نوعين أساسيين [16]:

4-4-1- 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 تمهيداً للخلايا الجافة وقد شاع استخدامها كأداة 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 التآكل. الخلايا الرطبة قد تكون خلية أولية (غير قابلة لإعادة الشحن) أو خلية ثانوية (قابلة لإعادة الشحن). أصلاً 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 وتأمين الطاقة في وضع الاستعداد للوحدات المفاتيح، أو الاتصالات التليفونية. كما تستخدم خلايا الرصاص الحمضية أو النيكل-كادميوم في العديد من التطبيقات الشائعة.

خلايا جافة (dry): الخلايا الجافة يكون فيها الكهرليت مثبت كعجينة مع رطوبة كافية في العجينة للسماح بحركة الشحنات وندفق التيار. مقارنةً 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 يتسرب 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 تتسرب.

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

4-4-2- حسب قابلية الشحن

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

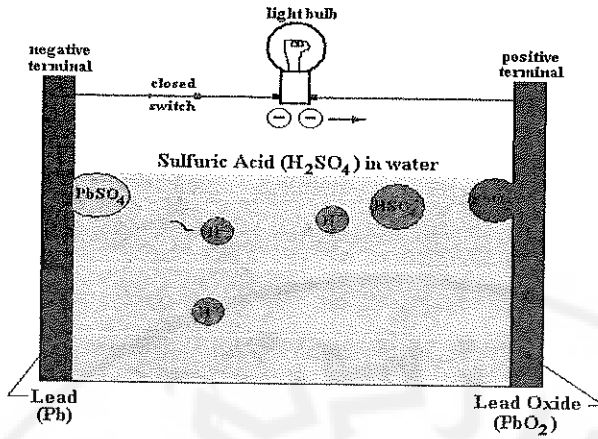
خلايا ثانوية **secondary cell**: هي خلايا يمكن إعادة شحنها (rechargeable)، حيث يمكن أن تعكس التفاعلات الكيميائية والمكونات الكيميائية الأساسية فيها، لذا يمكن أن تُعاد إلى حالتها قبل التفريغ تحت تأثير توتر الشحن المطبق على الأقطاب. هذا يؤدي إلى حقن طاقة إلى الخلية وتخزينها بشكل كيميائي. ومن أهمها مدخرات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

4-5- خصائص المدخرات القابلة للشحن

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

4-5-1-1- 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 PbO₂، مغمورين في محلول كهربي هو حمض الكبريت الممدد H₂SO₄. يتولد بين طرفيها توتر كهربائي يساوي 2V نتيجة تحول التفاعلات الكيميائية إلى طاقة كهربائية [16].



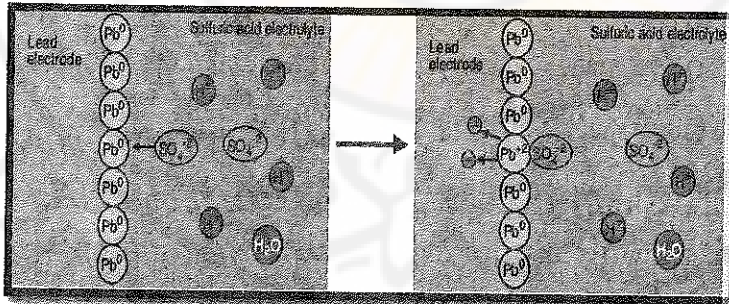
الشكل (4-5): بنية مدخرة الرصاص-حمض [16]

4-5-1-2- آلية عمل مدخرات الرصاص-حمض

خلال التفريغ: توصل المدخرة بحمل ما ليكمل الدارة الخارجية:
على القطب السالب: تتفاعل شوارد (أيونات) الكبريت السالبة الموجودة في السائل الكهرليتي مع ذرات الرصاص الموجودة على سطح القطب السالب كما في الشكل (4-6)، وينتج عن هذا التفاعل تحول ذرات الرصاص إلى أيونات موجبة وتصدر كل ذرة رصاص إلكترونين حسب التفاعل التالي [17]:

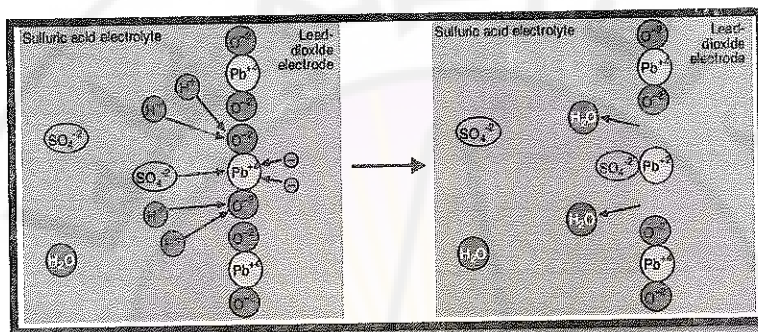
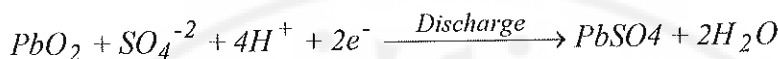


يتجه الإلكترونان المحرران إلى القطب الموجب مروراً بالحمل.



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

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

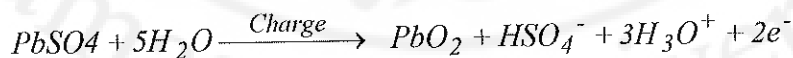


الشكل (7-4): التفاعل الكيميائي على القطب الموجب [17]

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

خلال الشحن: توصل المدخرة إلى منبع تيار مستمر مع مراعاة القطبية.

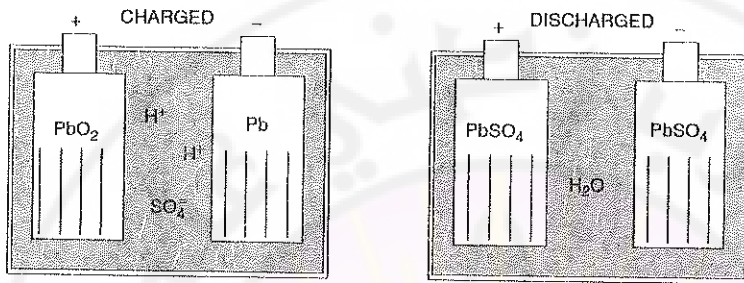
إن التفاعلات الكيميائية التي تجري أثناء عمليات الشحن هي عكس التفاعلات السابقة تماماً. في هذه الحالة القطب الموجب هو الذي يحرر إلكترونين يتجهان إلى القطب السالب عبر الدارة الخارجية كما توضح المعادلة التالية:



يستقبل القطب السالب الإلكترونات كما في المعادلة التالية:



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



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

الشكل (8-4): مدخرة الرصاص-حمض في وضعية الشحن والتفريغ

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

4-5-1-3- 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 (Sealed Lead Acid (SLA) ويندرج ضمنها نوعان:

• المدخرات ذات العازل المصنوع من الألياف الماصة (AGM) Absorbed
.Glass Mat

• المدخرات ذات الكهرليت المصنوع من مادة ذات قوام متماسك Gel.

مدخرات الرصاص - الحامضية السائلة Flooded Lead-Acid.

تتميز المدخرات من نوع SLA بسعة تتراوح بين (0.2÷100)Ah وتستعمل 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 وتصل حتى عدة kAh حيث تستعمل في التطبيقات الثابتة مثل وحدات عدم انقطاع القدرة المركزية، ومقاسم الهاتف ومراكز التوزيع الكهربائية...إلخ.

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

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



الشكل (4-9): صورة لمجموعة كبيرة من مدخرات الرصاص-حمض موصولة مع بعضها

4-5-1-5- ميزات مدخرات الرصاص - حمض

إن بساطة مدخرات الرصاص-حمض وموثوقيتها 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 والتيارات شحن أو معدلات تفريغ عالية مما يعني عدم الحاجة لوجود عناصر حماية إضافية، كما تعتبر مدخرات الرصاص - الحامضية بأنواعها المختلفة قليلة التأثير بزيادة عمق التفريغ مقارنة مع مدخرات شوارد الليثيوم، كما يوجد منها أنواع خاصة تُستخدم للتطبيقات التي تتطلب عمق تفريغ قد يصل لـ 100% مثل النوع المستخدم في القوارب البحرية.

4-5-1-6- حدود استخدام مدخرات رصاص - حمض

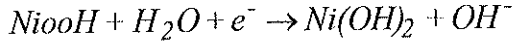
إن تعرض هذا النوع من المدخرات إلى زيادة الشحن أي توتر زائد (overvoltage) يؤدي إلى توليد فقاعات غازية وبالتالي حدوث تبخر للماء الأمر الذي يؤدي إلى انخفاض السعة بشكل ملحوظ ويسبب إلى عمل المدخرة، كما أن انخفاض كثافة طاقتها وتقل وزنها يحد من استخدامها الواسع.

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

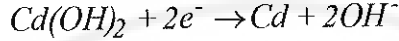
4-5-2- مدخرات النيكل - كادميوم Nickel - Cadmium

4-5-2-1- بنية مدخرات النيكل - كادميوم

يُشكل هيدروكسيد النيكل القطب الموجب للمدخرة بينما يُشكل 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]:

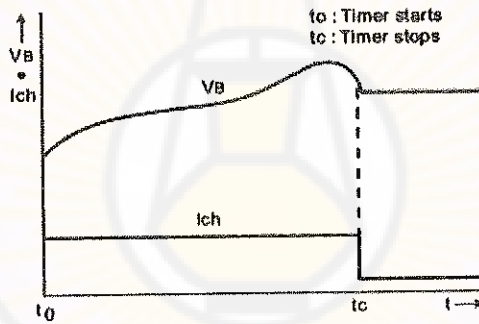


وأما على القطب السالب فيجري التفاعل:



4-2-2-5- خصائص الشحن لمدخرات النيكل - كاديوم

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].

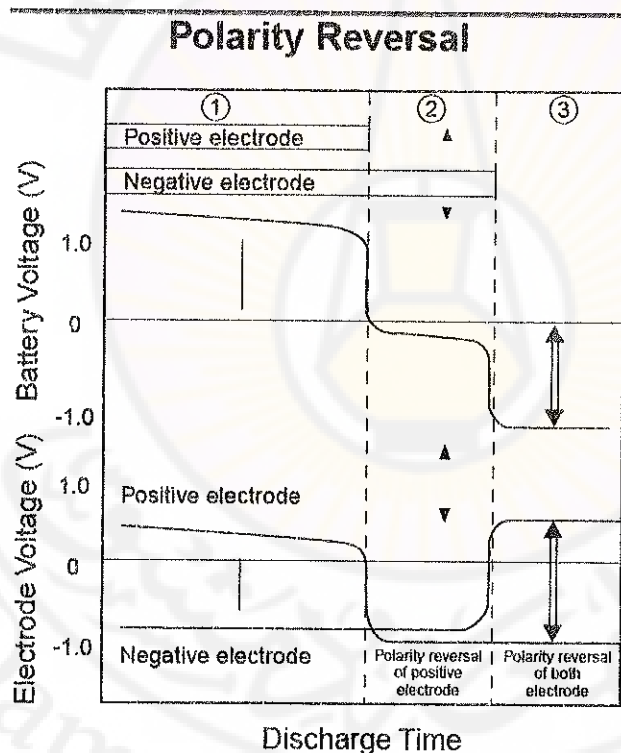


الشكل (4-10): منحنى الشحن (توتر وتيار بدلالة الزمن) لخلية نيكل-كاديوم [20]

4-2-5-3- خصائص التفريغ لمدخرات نيكل - كاديوم

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

كلا القطبين الموجب والسالب للمساهمة في التفاعلات العكوسة، في المنطقة الثانية تكون المواد الفعالة الموجودة على القطب الموجب قد استنفدت ويبدأ القطب الموجب بتوليد غاز الهيدروجين، حيث يستطيع القطب السالب امتصاص الهيدروجين المتولد في هذه المرحلة وينخفض توتر الخلية الى $(-0.4V \div -0.2V)$. في حال استمرت عملية التفريغ كما توضح المنطقة الثالثة عندها يبدأ القطب السالب بتوليد غاز الأوكسجين مما يؤدي لزيادة الضغط الداخلي وانعكاس القطبية وتصبح الخلية عرضة للانفجار، 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 (4-11): منحنى التوتر في خلية نيكل-كادميوم خلال التفريغ الزائد وانعكاس القطبية [20]

4-5-2-4- ميزات واستخدامات مدخرات النيكل - كادميوم

لدى هذا النوع من المدخرات الميزات التالية:

- زمن شحن قصير نسبياً.
 - تتميز بمنحني تفريغ مسطح لكنه يهبط بسرعة عند انتهاء عملية التفريغ.
 - العمر الافتراضي حوالي 500 دورة شحن وتفريغ.
 - طبيعة التفاعل الكيميائي فيها تكون ماصة للحرارة مما يسمح بشحنها بسرعة.
- استُخدمت مدخرات النيكل - كادميوم في الأجهزة المحمولة كالهواتف الجوال وجميع الأجهزة الرقمية حتى ظهرت مدخرات النيكل -هيدروجين وبدأت تحل محلها.

4-5-2-5- حدود 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 البلورات المكونة للمادة الفعالة للأقطاب مما يزيد ممانعتها ويمنعها من التفريغ إلى مستوى أعمق كما وأنه يؤدي إلى زيادة التفريغ الذاتي. فيها كثافة الطاقة منخفضة (low specific energy) [20].

4-5-3- مدخرات نيكل - هيدريد المعادن Nickel-Metal Hydride

4-5-3-1- مركبات مدخرات نيكل - هيدريد المعادن

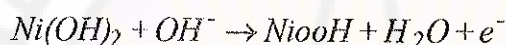
لقد أجريت أبحاث واختبارات عديدة حتى تم الوصول إلى مدخرات النيكل - هيدريد المعادن عوضاً عن مدخرات النيكل كادميوم حيث يُعتبر الكادميوم من المواد السامة، وتمت صناعة القطب السالب في هذا النوع من المدخرات من خليطة معدنية تحتوي على هيدريد المعادن (Metal Hydride)، وهذه الخليطة هي إما AB_5 أو AB_2 حيث تتألف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

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

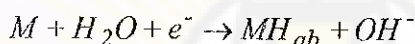
يستخدم هذا النوع من المدخرات على نطاق واسع في التجهيزات الرقمية من الهواتف الخلوية والكاميرات الرقمية بالإضافة إلى استخدامها في السيارات الهجينة.

4-5-3-2- آلية العمل لمدخرات النيكل - هيدريد المعادن

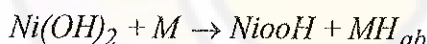
إن التفاعلات التي تحدث على القطب الموجب في كل من عمليتي الشحن والتفريغ موضحة حسب الآتي [20]:
على القطب الموجب:



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



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



M: Hydrogen-absorbing alloy ; H_{ab} : absorbed hydrogen

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

- أثر الذاكرة يكون أقل تأثيراً من حالة مدخرات النيكل-كادميوم.
- كثافة الاستطاعة فيها أكبر من مدخرات النيكل-كادميوم.
- لا تحتوي على مواد سامة (مثل الكادميوم).
- عمر المدخرة ينخفض بشكل كبير عند زيادة عمق التفريغ.
- أقل تحملاً من مدخرات النيكل كادميوم من جهة تعرضها لإجهاد زيادة الشحن.

- التفاعل الكيميائي لهذا النوع هو ناشر للحرارة مما يجعلها عرضة لارتفاع درجة حرارتها خلال الشحن.
- أفضل أداء للمدخرة عندما تكون نسبة التفريغ $C(0.2 \div 0.5)$.
- 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

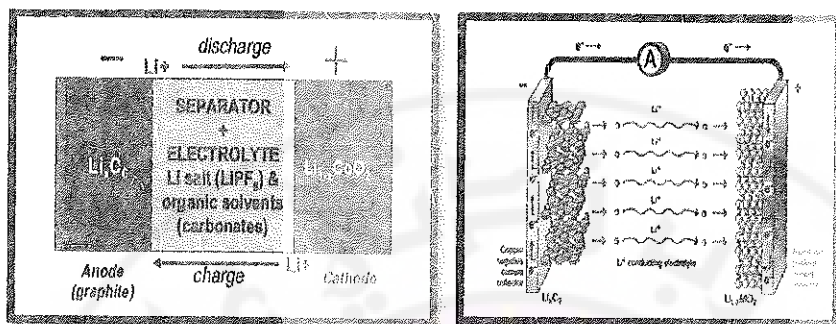
4-5-4-1 تطور واستخدام مدخرات شوارد الليثيوم

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 باءت 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 للخلية 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 الخليوية، الحواسيب المحمولة، الأجهزة الطبية بالإضافة إلى استعمالها في السيارات الكهربائية والهجينة، والأقمار الصناعية.

4-5-4-2 مبدأ عمل مدخرات شوارد الليثيوم

تنتقل الأيونات خلال عملية التفريغ من القطب السالب المصنوع من الكربون وتنتشر عبر الكهرليت والعازل المسامي حتى تصل للقطب الموجب المصنوع من الليثيوم

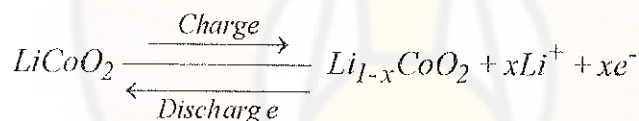
المُشاب، بينما تقوم الإلكترونات المنبعثة من القطب السالب بتشغيل الحمل الخارجي لتصل عبره إلى القطب الموجب كما هو موضح بالشكل (4-12) [21].



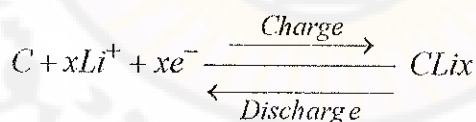
الشكل (4-12): انتقال الشحنات في خلية شوارد الليثيوم [21]

وتبين المعادلات التالية التفاعلات الكيميائية الحاصلة في كل من دورتي الشحن والتفريغ [21].

على القطب الموجب يحدث التفاعل التالي:



على القطب السالب يحدث التفاعل التالي:



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

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

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

الرمز	المادة المستخدمة في إشابة القطب الموجب
LiCoO ₂	Lithium Cobalt Oxide
LiNiO ₂	Lithium Nickel Oxide
LiMn ₂ O ₄	Lithium Manganese Oxide
LiFePO ₄	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) مميزات ومساوئ إشابة القطب الموجب [22]

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

4-5-4-3- ميزات مدخرات شوارد الليثيوم

- لا تعاني من أثر الذاكرة.
- إمكانية الشحن بتيار عالي.
- توتر الخلية الواحدة هو ثلاثة أضعاف التوتر لخلية نيكل - هيدريد المعادن.
- كثافة استطاعة أكبر من الأنواع السابقة.

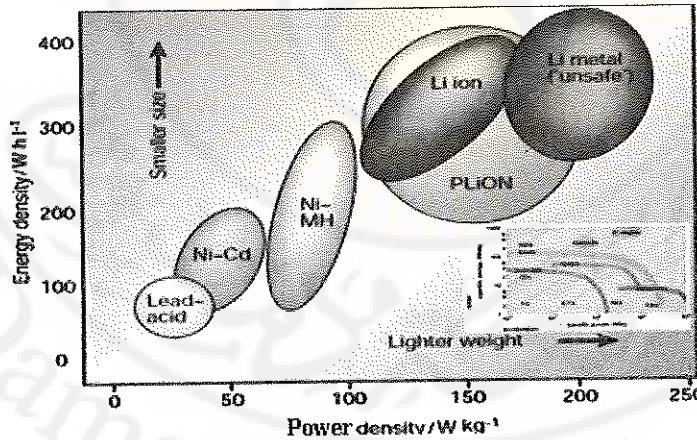
4-5-4-4- حدود استخدام مدخرات شوارد الليثيوم

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

4-5-5- مقارنة خصائص المدخرات

Comparing of Batteries Characteristics

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



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

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

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

Commercialized batteries المدخرات المُسوَّقة		Lead- acid	Ni-Ca	Ni-M-H	Li-ion
Electrolyte كهريليت		H ₂ SO ₄	KOH	KOH	LiPF ₆
Self Discharge per month % تفريغ ذاتي		3-4	10-20	20-30	1-10
Energy efficiency (%) مردود الطاقة		75	60	50	70
Energy density (Wh kg ⁻¹) كثافة الطاقة		20-35	40-60	60-80	100-200
Power -densities كثافة الاستطاعة	Peak (W/kg)	120	300	440	720
	Sustained (W/kg)	25	140	220	360

Cycle life (Cycle) دورة الحياة	200- 2000	500-2000	<3000	500-2500
Operating life temperatures (°C) درجة حرارة العمل	-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- تعريف المُحددات 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): تعبر عن كمية الشحنات الموجودة في المدخرة، ويعبر 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 ومجمعات التيار للأقطاب وأسلاك التوصيل.
- المقاومة الكيميائية: وهي مقاومة الكهرليت لحركة الشحنات ضمنه.
- عدد دورات العمل (الحياة) (cycle life): عدد دورات الشحن والتفريغ 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 مدخرة سعتها 100Ah فإن تفريغها بنسبة 1C يكافئ تفريغها بتيار مساوٍ لـ 100A وتفريغها 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 حقنها 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_d و E_C 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 :

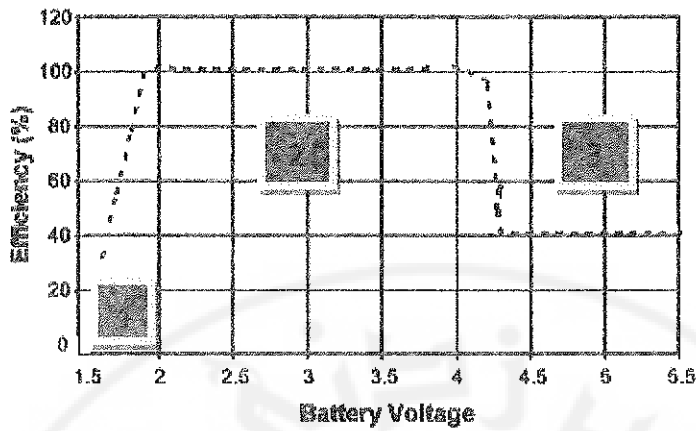
$$\eta_E = (\text{Voltage Efficiency}) \cdot (\text{Coulomb Efficiency}) \quad (5-4)$$

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 ليثيوم يكون توتر التفريغ مساوياً لـ 3.7V، بينما توتر الشحن يكون مساوياً لـ 4.2V بالتالي 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 (4-14):
 - **المرحلة الأولى:** في هذه المرحلة يكون المردود منخفض وذلك لأن الطاقة الكهربائية المقدمة للمدخرة تُصرف من أجل تحفيز بدء التفاعلات الكيميائية.
 - **المرحلة الثانية:** في هذه المرحلة يكون المردود أعلى ما يمكن وكل الطاقة الكهربائية المقدمة للمدخرة تتحول إلى شحنات مخزنة ضمنها.
 - **المرحلة الثالثة:** تمثل هذه المرحلة زيادة الشحن حيث تُصرف الطاقة المقدمة للمدخرة على تفكيك الروابط الكيميائية في الكهرليت بدون زيادة للشحنات المخزنة ضمن المدخرة. ويكون المردود في هذه المرحلة منخفضاً أيضاً. بشكل عام تعطى قيمة وسطية لمردود كولومب لخلية شوارد الليثيوم حوالي 90% [25].



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

ويكون المردود الكلي لخلية شوارد الليثيوم:

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

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

4-7- طرائق ودارات شحن وتفريغ المدخزات الكهربائية

Batteries Charging-Discharging Methods and Circuits

إن الطريقة المثلى 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 ثلاث 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 والكهرليت وهو نسبياً سريع.
- نقل وانتشار الكتلة (mass transport-diffusion) وفي هذه العملية المادة المتفاعلة في العملية الأولى تتحرك من وإلى سطح القطب. وهي عملية بطيئة وتأخذ بعض الوقت حتى كامل المادة الفعالة تتحول.
- دخول وولوج الأيونات (intercalation process) إلى الشبكة البلورية في القطب كما في مدخزات شوارد الليثيوم.

4-7-1- طرائق شحن المدخزات

يوجد عدة طرائق لشحن المدخزات منها [16]:

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

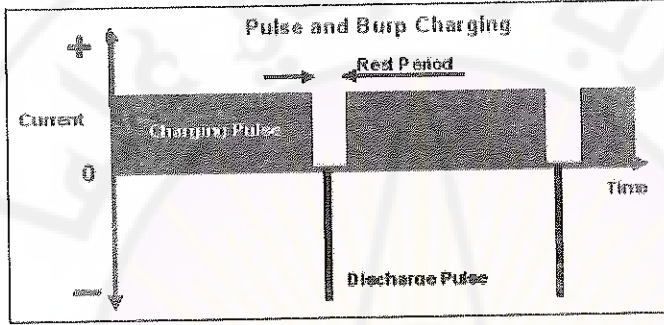
إنها من أبسط الطرائق والتي تستخدم منبع توتر ثابت متحكم به. وهي طريقة مستخدمة بكثرة مع مدخزات الرصاص-حمض كما في السيارات ولكن في مدخزات شوارد-الليثيوم تحتاج إلى الكثير من العناية حيث تحتاج إلى دارات حماية من التوترات الزائدة (overvoltage).

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- Pulsed Charge الشحن النبضي

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



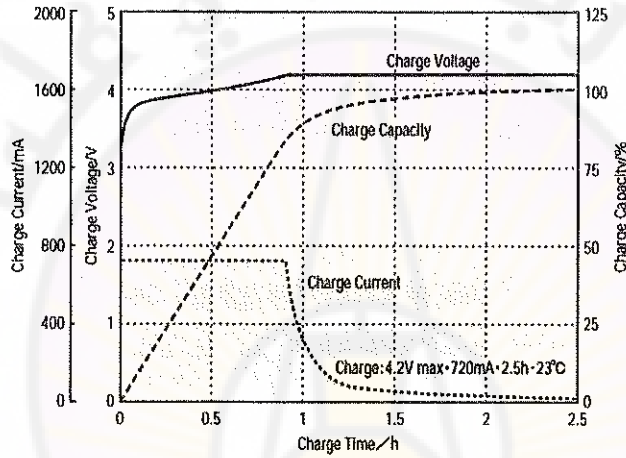
الشكل (15-4): منحنى التيار خلال الشحن النبضي [16]

إن فترة الاستراحة تقوم بتقليل التفاعلات الكيميائية غير المرغوب بها ضمن المدخرة (حدوث غازات أو تشكل بللورات على الأقطاب) كما وتؤدي إلى حدوث تطابق بين التفاعلات الكيميائية داخل المدخرة 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 وتوتر ثابت

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

ضمن المدخرة، وعند وصوله إلى قيمة محددة مسبقاً وعادةً تكون 10% من قيمة التيار الاسمي يتم إنهاء عملية الشحن. على الرغم من أنه في هذه المرحلة يتم شحن الـ 30% المتبقية من السعة إلا أنها تأخذ وقتاً أطول من المرحلة السابقة. بهذه الطريقة نكون قد ضمنا 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 مدخرات الرصاص-حمض يُحدد توتر نهاية المرحلة الأولى بحيث يكون أقل من توتر حدوث الغازات (14.4 V للمدخرات ذات ست خلايا) [16].



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

4-7-1-5- Float Charge الشاحن العائم

في هذا النوع من الشحن يقوم الشاحن بإعطاء المدخرة تيار شحن صغير $C(0.03 \div 0.05)$ بحيث يقوم بتعويضها عن فقدان الشحنة الناتج عن التفريغ الذاتي كما أن طريقة الشحن بالتقسيط 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 محافظته على سعتها ثابتة [16].

4-7-2- معدلات الشحن Charging Rates

يمكن شحن المدخرات بمعدلات مختلفة حسب التطبيق والحاجة. 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 إنهاء الشحن عبر مؤقت زمني.

• الشحن السريع جداً Fast Charge: يتم الشحن بتيار ثابت وبقيمة مساوية لـ 1C، هذا يعني أن المدخرة المفرغة بالكامل ستشحن خلال ساعة واحدة تقريباً وأحياناً يتم شحن المدخرة بنسبة 4C أي مدة الشحن ستكون نظرياً بحدود 15 دقيقة فقط، إلا أن هذه الطرائق لا تعطي شحناً كاملاً للمدخرة كما يجب أن تجهز الشاحن في هذه الحالة بحساسات لارتفاع التوتر ودرجة الحرارة وذلك لإنهاء دورة الشحن.

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

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

- توتر زائد (overvoltage) ويطلق عليه أيضاً الشحن الزائد (overcharging)، أي شحن المدخرة 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 المدخرة والذي يؤدي إلى تيارات زائدة.

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

- ضغوط داخلية عالية.

إن زيادة شحن المدخرة (أو تسخين زائد) يؤدي إلى حدوث تفاعلات كيميائية غير عكوسة ينتج عنها إتلاف للمدخرة والسبب في ذلك هو إجبار المدخرة على تلقي طاقة كهربائية زائدة تؤدي إلى انهيار المواد الكيميائية المشكلة لبنية 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 انتفاخ المدخرة (أو للخلايا الداخلية المكونة لها) أو حدوث دارة قصر بين الأقطاب وعندها يجب إنهاء عملية الشحن كي نتجنب حدوث انفجار في المدخرة وإطلاقها أبخرة وغازات قد تكون سامة. لذلك لابد أن يجري دائماً مراقبة توتر ودرجة المدخرة خلال الشحن والتفريغ [16].

4-7-4- الطرائق المتبعة لإنهاء عملية الشحن

Charge Termination Methods

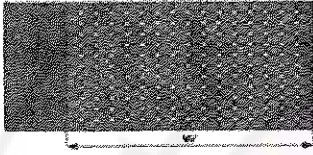
لكل نوع من المدخرات ولكل خوارزمية شحن طريقة مناسبة خاصة بها لإنهاء عملية الشحن، من هذه الطرائق [16]:

- 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 مساوية لقيمة محددة مسبقاً.
- إنهاء عملية الشحن عند ازدياد معدل تغير درجة الحرارة بالنسبة لتغير الزمن $\Delta T/\Delta t$ عن قيمة محددة مسبقاً.
- إنهاء عملية الشحن عند وصول التوتر لقيمة عظمى محددة مسبقاً.
- إنهاء عملية الشحن عند انخفاض التيار إلى قيمة محددة مسبقاً.

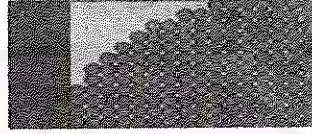
4-7-5- طرائق تفريغ المدخرات

عندما تكون المدخرة بحالة دارة مفتوحة فإن تركيز المواد الفعالة (active species) على الحد الفاصل بين سطح القطب والكهرليت يكون منتظماً كما يوضح الشكل (4-4) -a). وعندما يتم استجرار تيار فإن المواد الفعالة على الحد الفاصل بين اللبوس والكهرليت تُصرف (تستهلك) بواسطة تفاعل كيميائي ويحل مكانها مواد فعالة تتحرك من مكان أبعد وتنتج 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 المدخرة وتصبح المساحة المشتركة بين سطح اللبوس والكهرليت أصغرية كما في الشكل (4-17-b) وينخفض توتر المدخرة إلى توتر العتبة ويتدخل نظام إدارة التفريغ لفصل المدخرة وذلك على الرغم من توافر شحنة متبقية بالمدخرة لكنها موزعة ضمن كامل الكهرليت وليس بجوار القطب من هنا نستنتج طريقتين للتفريغ [30]:

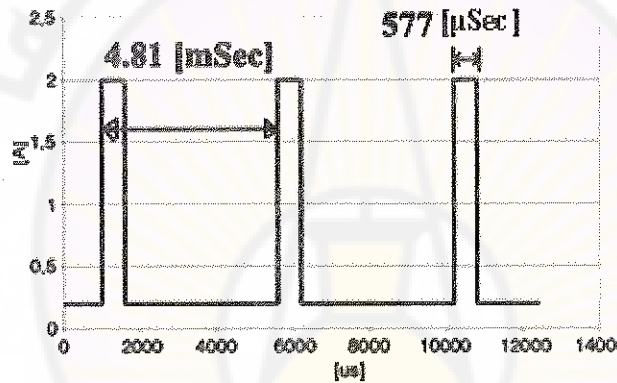
4-7-5-1- التفريغ المستمر بتيار ثابت

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

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 الكهرليت 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 Mobile) حيث يتم إعطاء نبضات لها دور مساوي لـ 4.81ms بعرض 577μs للنبضة الواحدة ومطال التيار حوالي 2A في فترة العمل و0.2A في فترة الاستراحة كما يبين الشكل (4-18) [27].



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

يمتاز التفريغ النبضي بمايلي:

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

4-7-6- دارات شحن المدخرات Charger

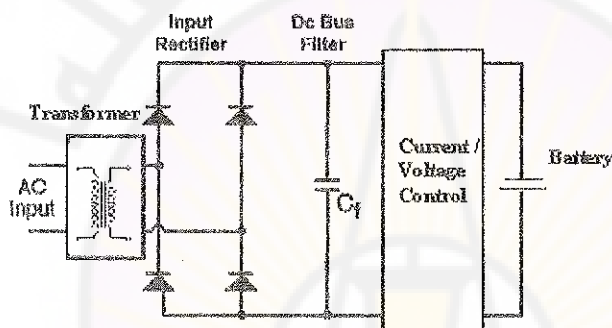
كل نوع من المدخرات له دائرة شحن خاصة به وبمواصفات محددة حيث إن استعمال الدائرة المناسبة للمدخرة يجعل عملية الشحن مثالية ويزيد من عمر المدخرة. كما أنه

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

4-7-6-1- بنية دائرة الشحن

تتألف دائرة شحن المدخرة بشكلها البسيط كما يوضح الشكل (4-19) من ثلاث 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.

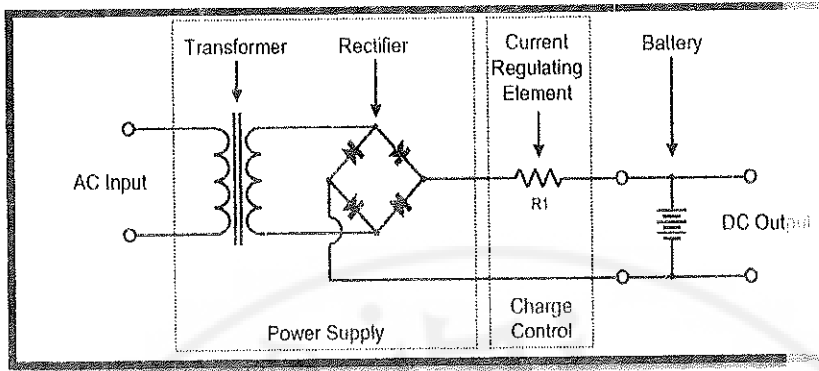


الشكل (4-19): المخطط العام لدائرة شحن المدخرات الكهربائية

يوجد لشواحن المدخرات عدة أنواع منها:

4-7-6-2- الشواحن الخطية Linear Charger

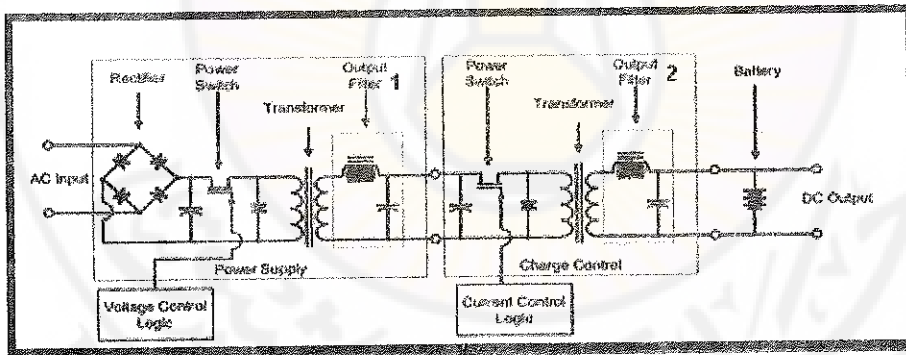
تتألف كما يبين الشكل (4-20) من محولة خافضة للتوتر وجسر تقويم حيث تتم عملية التنظيم عبر عنصر غير فعال (مقاومة) لتحديد التيار المار في المدخرة كما يمكن استعمال عنصر فعال (ترانزستور) للقيام بنفس المهمة [28].



الشكل (4-20): مخطط عام شاحن خطي للمدخلة [28]

4-7-6-3- 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 كالحواسيب الشخصية والمساعدات الرقمية وتكلفتها المرتفعة تحول دون استخدامها للاستطاعات العالية [28].



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

تتعرض المدخرات خلال عملها في مختلف التطبيقات إلى ظروف تشغيل متنوعة تؤثر على أدائها وعمرها. إن معرفة هذه الظروف ودراسة تأثيرها السلبي والعمل على تجنبها يساهم في رفع كفاءة وأداء المدخلة وإطالة عمرها.

مسائل محلولة:

مسألة (1): يتم تغذية حافلة كهربائية من مدخرة كهربائية سعتها 300Ah وتوترها $U=12V$ (مدخرة رصاص-حمض) باعتبار أن السعة لا تتغير مع تغير التيار والمطلوب مايلي:

- 1- احسب قيمة التيار اللازم لتفريغ هذه المدخرة بزمان 8h.
- 2- ماهو الزمن اللازم لتفريغ هذه المدخرة بتيار 10A.
- 3- إذا علمت أن المدخرة يمكن تفريغها إلى التوتر $U_{min}=9.6V$ احسب قيمة سعتها بالفاراد (السعوية المكافئة للمدخرة) 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 كمايلي:

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

3- يوجد علاقتان لحساب الطاقة المختزنة في المدخرة هما:

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

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

بمساواة العلاقتين نجد قيمة السعوية المكافئة للمدخرة $C_{bulk}(F)$ تساوي مايلي:

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

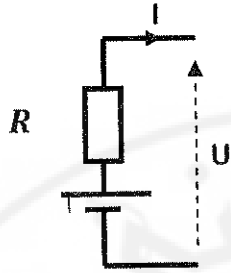
مسألة (2): مدخرة نيكل كاديوم توترها $U=12.5V$ وسعتها 100Ah وذلك عندما

يتم تفريغها بزمان قدره 5h والمطلوب احسب التوتر على أطراف هذه المدخرة عندما

يجري تفريغها بتيار قدره 50A علماً أن توتر الدارة المفتوحة $V_{oc}=13V$.

الحل:

باعتبار دائرة ثيفينين المبسطة وهي أبسط الدارات المكافئة للمدخلة الكهربائية والمؤلفة من مقاومة R على التسلسل مع توتر الدارة المفتوحة V_{oc} .



$$I_{dch} = \frac{CAh}{t(h)} = 100/5 = 20A$$

وحسب 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 المدخلة مع تيار التفريغ وتعويض التيار بقيمته 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 مدخلة

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 لتغذية الملف هو 250h ماهو 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 كمايلي:

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

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

هو:

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

ولانحتاج أكثر من كُدس 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 اللازمة على التفرع هو:

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

وبالتقريب لابد من وصل 3 أكُداس على التفرع وكل كُدس يحتوي على 4 خلايا،

وعندها يكون عدد الخلايا اللازمة 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 اللازمة:

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

4-8- أثر تيار التفريغ على السعة

Impact of Discharging Current on Capacitance

من ضمن العلاقات غير الخطية التي تتميز بها المدخرات العلاقة بين السعة المفرغة و تيار التفريغ، فعلى سبيل المثال عند تفريغ مدخرة الرصاص-حمض بمعدل تفريغ $0.05C$ فإن السعة المفرغة تساوي جداء تيار التفريغ ب زمن التفريغ كما تبين العلاقة التالية:

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

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

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

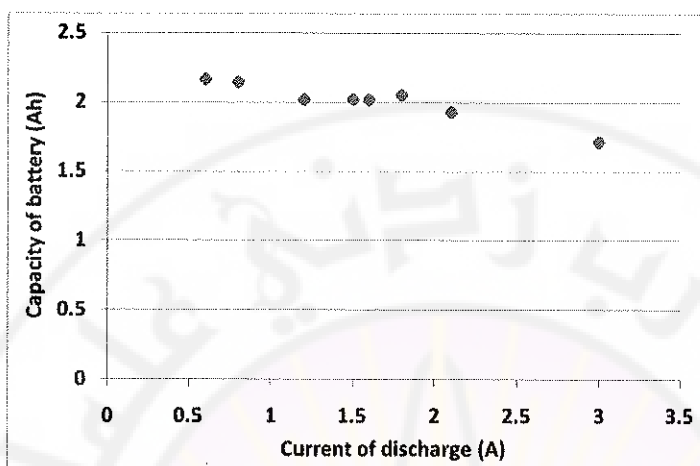
يوضح الشكل (4-22) السعة المفرغة بدلالة تيار التفريغ لمدخرة الليثيوم-أيون ذات القيم الاسمية التالية:

جدول (4-6): القيم الاسمية لمدخرة ليثيوم-أيون

Nominal voltage V	3.7
C_5 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 $m\Omega @ 1KHz$	150

يوضح الشكل (4-22) العلاقة اللاخطية بين السعة المفرغة و تيار التفريغ فكلما زاد تيار التفريغ تنخفض السعة المفرغة. لا يوجد تفسير دقيق لهذه الظاهرة لكن يمكن القول أنه بالإضافة لزيادة ضياعات جول مع زيادة التيار (ضياعات جول تتناسب طردياً مع مربع التيار المار في مقاومة المدخرة) يوجد أسباب كهروكيميائية، منها أن استجابة

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



الشكل (4-22): 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]

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

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

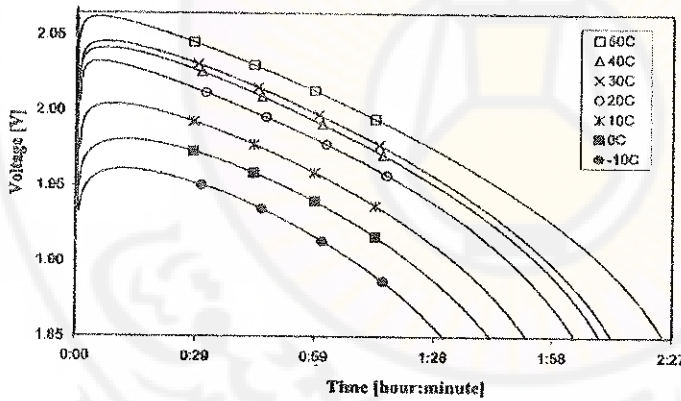
4-9-9- تأثير درجة الحرارة على خصائص المدخرات الكهربائية

Influence of Temperature on Batteries Characteristics

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

4-9-9-1- تأثير درجة الحرارة على خصائص مدخرات الرصاص-حمض

إن خصائص المدخرات الكهربائية (الرصاص-حمض) تتغير مع تغير درجة الحرارة. يوضح الشكل (4-23) منحنى 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 الكهرليت داخل المدخرة بالتجمد مما يعني صعوبة حركة الأيونات ضمنه، مما ينعكس سلباً على التفاعلات الكيميائية الحاصلة [20].

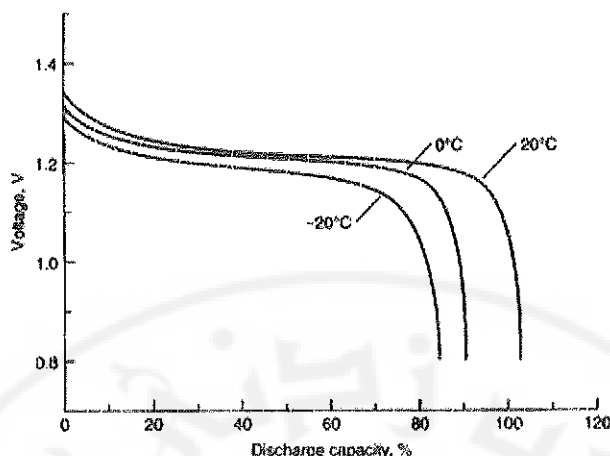


الشكل (4-23): منحنى التفريغ لمدخرة الرصاص - الحامضية في درجات حرارة

مختلفة [20]

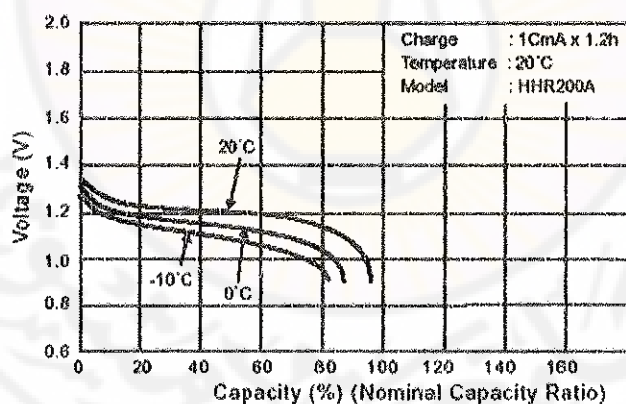
4-9-9-2- تأثير درجة الحرارة على سعة التفريغ لمدخرة نيكل - كادميوم

إن زيادة درجة الحرارة تؤدي إلى زيادة السعة المفرغة، حيث يُلاحظ من الشكل (4-24) أنه عند درجة حرارة مساوية لـ 20°C تكون السعة المفرغة 100% من سعة المدخرة بينما تنخفض إلى حوالي 80% عند درجة حرارة 0°C [20].



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

4-9-3- تأثير درجة الحرارة على سعة التفريغ لمدخرة نيكل - هيدريد المعادن
كما وضحنا في أنواع المدخرات السابقة فإن انخفاض درجة الحرارة يؤدي إلى إزاحة منحنى التوتر للأسفل (زيادة قيمة المقاومة الداخلية) ويتم الوصول إلى توتر القطع بسرعة أكبر كما يُظهر الشكل (4-25) [20].

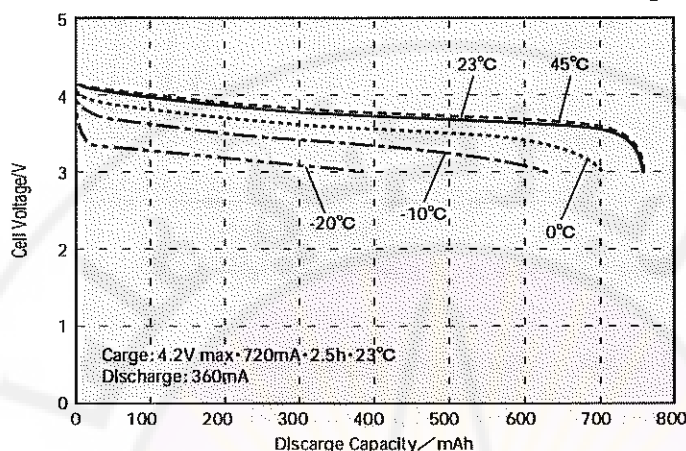


الشكل (4-25): منحنى التفريغ لخلية نيكل-هيدريد المعادن في درجات حرارة مختلفة

[20]

4-9-4- 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 (26-4) [34].



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

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

المطلوب:

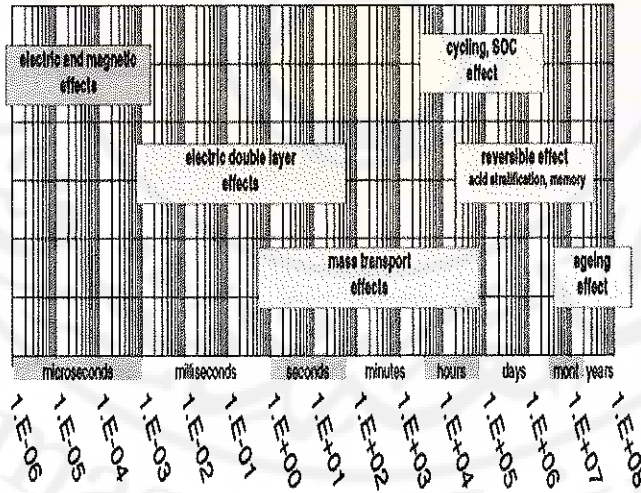
- احسب متوسط كثافة الطاقة للمدخرات الجديدة.
- احسب متوسط كثافة الاستطاعة للمدخرات الجديدة.
- ماهو نوع المدخرات التي تستطيع تلبية هذه المتطلبات.

10-4- الظواهر الأساسية في المدخرات الكهربائية

Fundamental phenomena in batteries

يوجد الكثير من الظواهر المتداخلة 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]:

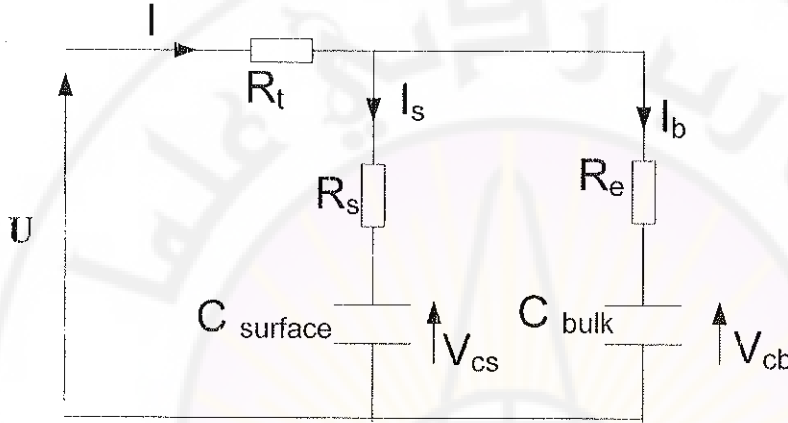
- التأثيرات الكهربائية والمغناطيسية وتقع في مجال زمني يتراوح بين الميكروثانية والميلي ثانية وعادةً ما يهمل تأثيرها لصغره.
- ظاهرة ثنائية (ازدواجية) الطبقة الكهربائية (electric double layer) على الحد الفاصل بين القطب والكهرليت وتظهر في مجال زمني يتراوح بين الميلي ثانية والدقائق.
- ظاهرة انتقال الشحنة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



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

11-4- النمذجة والمحاكاة للمدخرات الكهربائية

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



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

حيث:

R_t : مقاومة الوصلات والأقطاب،

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

R_e : مقاومة منسوبة لتفاعلات الأكسدة والإرجاع (redox)،

C_s : سعة سطح القطب (سعة ثنائي الطبقة الكهربائية)،

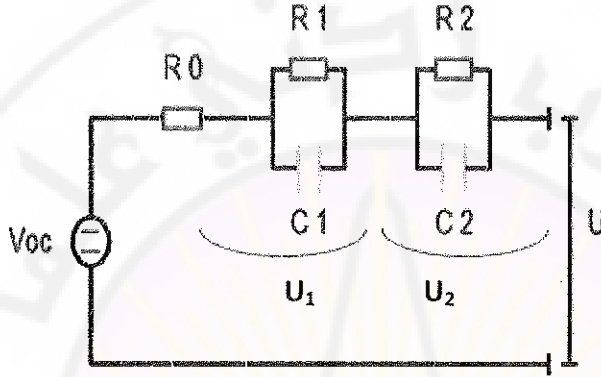
C_{bulk} : السعوية المكافئة للمدخرة (السعة المخزنة بواسطة التفاعلات الأكسدة

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

بالدائرة الكهربائية المبينة في الشكل (4-29)، حيث يعبر الفرع R_1C_1 عن الظواهر قصيرة الأمد (استقطاب التفعيل (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 للمدخرة [36]

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

V_{oc} : توتر الدارة المفتوحة للمدخرة.

R_0 : المقاومة الأومية لكل من مجمعات التيار وأقطاب التوصيل في المدخرة.

R_1 : المقاومة الناتجة عن انتقال الشحنات على الحد الفاصل بين الكهرليت و سطح القطب.

C_1 : السعة الناتجة عن انفصال الشحنات على الحد الفاصل بين الكهرليت و سطح القطب.

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

C_2 : السعة الناتجة عن تخزين الشحنات ضمن الحجم الكلي للمدخرة.

U : التوتر على أطراف المدخرة.

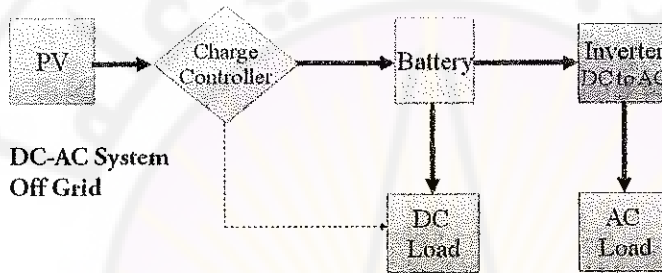
R_1C_1 : ثابت يعبر عن استقطاب التنشيط (activation polarization).

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

4-12- حساب موديولات التخزين بالمدخرات الكهربائية في النظم الكهروضوئية

Battery Module Sizing for Photovoltaic Systems

يمكن استخدام المدخرات الكهربائية بطرائق مختلفة مع النظم الكهروضوئية من هذه الاستخدامات هي تغذية أحمال تيار مستمر وأحمال تيار متناوب كما يظهر الشكل (4-30) ويستخدم هذا المخطط في النظم صغيرة الاستطاعة 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 كمايلي [37]:

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

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

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

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

- حساب القيمة الفعلية للتخزين Actual C:

$$Actual_C = \frac{Total_Load(Wh)}{Module_voltage \cdot DOD} (Ah) \quad (9-4)$$

- حساب عدد المدخرات في الكُـدس (السلسلة الواحدة) N_S :

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

- حساب عدد السلاسل التفرعية للمدخرات N_P :

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

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

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

$$Total_Load = 1725Ah \times 24V = 41400Wh$$

بالتعويض بالعلاقات أعلاه نجد:

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

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

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

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

ومنه فإن عدد المدخرات اللازم هو 48 خلية.

13-4- مدخرات القدرة الكهربائية Power Batteries

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

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

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

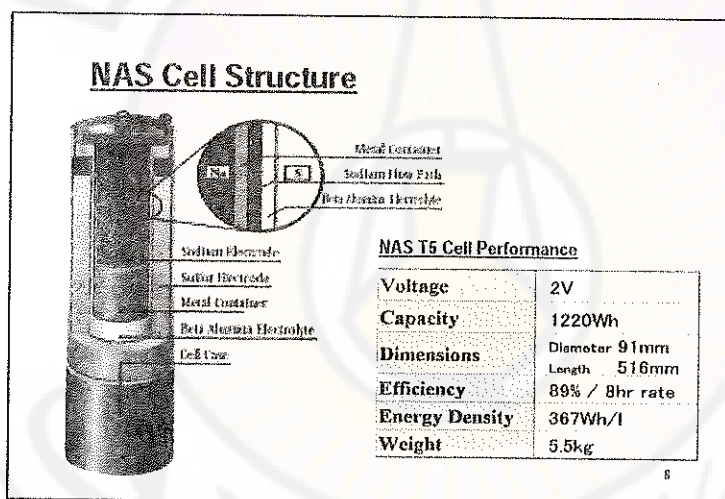
Batteries under developement		Sodium-sulphur	Lithium-sulphide	Zinc-chlorine	Lithium-polymer
Electrolyte		$\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$	KOH	KOH	LiPF_6
Energy efficiency (%)		70	75	65	70
Energy density (Wh/kg)		120	130	120	200
Power densities	Peak (W/kg)	240	200	100	-
	Sustained (W/kg)	120	140	-	-
Cycle life (Cycle)		2000	200	-	>1200
Operating life temperatures (°C)		300 to 400	430 to 500	0	-20 to 60

14-4- مدخرات درجات الحرارة العالية: مدخرات الصوديوم - كبريت Sodium Sulfur (NaS) Batteries

14-4-1- مبدأ وبنية مدخرات الصوديوم-كبريت
مدخرات الصوديوم كبريت هي مدخرات عالية الاستطاعة وتعمل في درجات حرارة عالية والتفاعل الأساسي لها هو [37]:



وهي تتألف من كبريت سائل (منصهر) في القطب الموجب ومن صوديوم سائل في القطب السالب وهما المادتان الفعالتان والمحلول الكهرليتي الخاص بالمدخرة هو ثاني ألومينات السيراميك ($\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$) وهو صلب وناقل جيد لأيونات الصوديوم (انظر الشكل (4-31)).



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

أثناء التفريغ تتدفق الأيونات الموجبة للصوديوم عبر الكهرليت وتتدفق الإلكترونات في الدارة الخارجية للمدخرة منتجة حوالي 2 فولت. وهذه العملية عكوسة فعند الشحن تتفكك كبريتات الصوديوم المنتشرة في القطب السالب معطية الأيونات الموجبة للصوديوم التي تعود عبر المادة الكهرليتي لتتحد مع القطب السالب (الصوديوم).

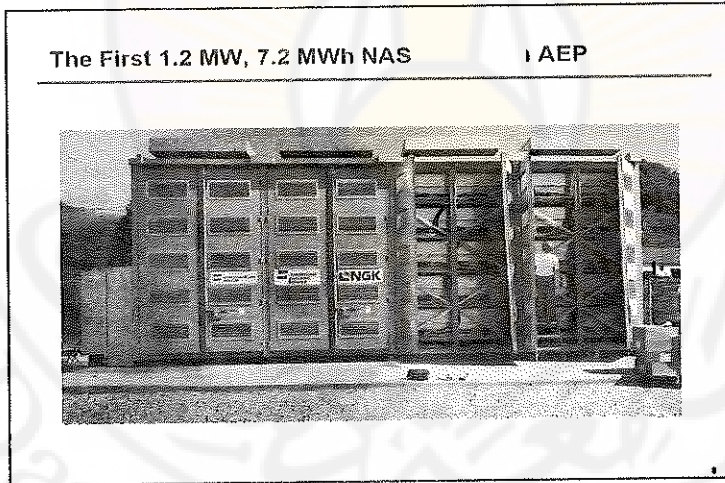
تحفظ هذه المدخرة المغلقة بإحكام عند درجة حرارة حوالي 300°C وتعمل عند شروط معينة حيث يجب أن تبقى المادتان الفعالتان في القطبين بشكل سائل أما المادة الكهرلثية فيجب أن تبقى صلبة عند هذه الدرجة من الحرارة، وبما أن كلاً من المادتين الفعالتين ذات رد فعل سريع ولأن المقاومة الداخلية منخفضة، فإن هذه المدخرة ستعمل بشكل جيد. وبفضل انعكاس عمليتي الشحن والتفريغ فإن المدخرة يمكن استخدامها باستمرار.

4-14-2- ميزات مدخرات صوديوم-كبريت

تمتاز هذه المدخرات بمايلي:

4-14-2-1 ذات سعة كبيرة: بواسطة وصل عدة مدخرات من رتبة الـ MW بسهولة لتشكيل بنية جديدة ويبين الشكل التالي نوع منتج من قبل شركة NGK بالموصفات التالية:

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

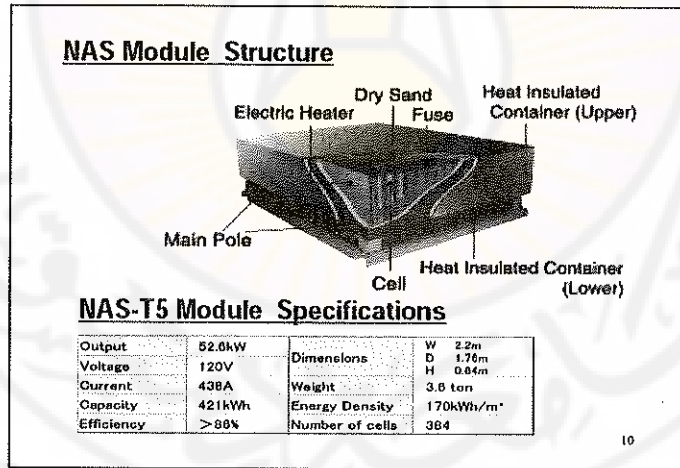


الشكل (4-32): صورة موديول لمدخرات صوديوم-كبريت [37]

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

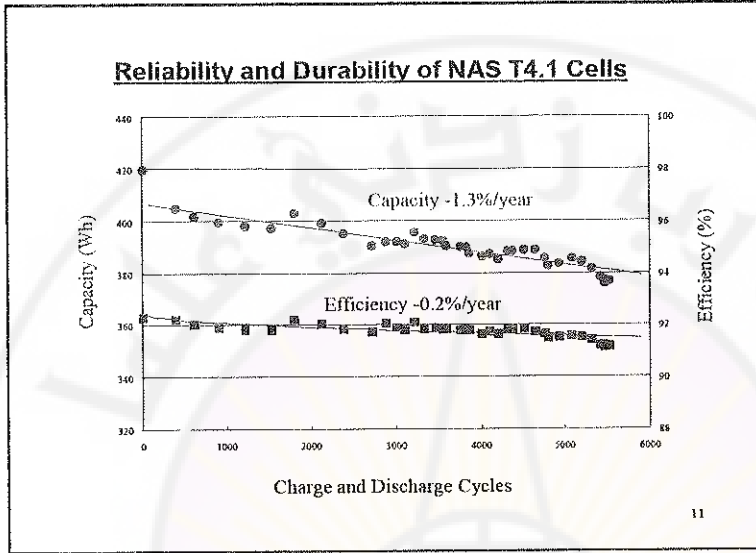
4-14-2-2 ذات حجم صغير: لديها إمكانية إعطاء استطاعة أكبر بست مرات من الاستطاعة الاسمية وذلك لفترة زمنية مقدارها 30 ثانية. وهذه السمة تمكن المدخرة أن تكون ذات استخدام اقتصادي ومناسب للإقلاعات. يمتاز هذا النوع من المدخرات بأن كثافة طاقتها عالية جداً 170kWh/m^3 مقابل 40kWh/m^3 لمدخرات الرصاص-حمض. بالتالي تحتاج إلى مساحة للتركيب تساوي تقريباً ربع المنطقة اللازمة لمدخرات الرصاص-حمض.

يتم تجميع الخلايا بشكل موديولات ضمن حافظة حرارية (thermal enclosure) ويتم تأمين الحرارة الداخلية (300°C) عن طريق سخانات كهربائية ويتم تجميع الخلايا وتثبيتها عن طريق الرمل والذي يقوم أيضاً بحمايتها من حالات الحريق. ويتم توصيل الخلايا داخلياً بحيث نحصل على التوتر المطلوب.



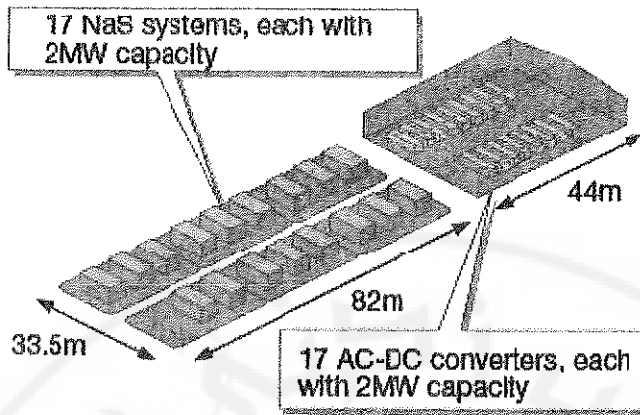
الشكل (4-33): الحافظة لمدخرات صوديوم-كبريت

4-14-2-3 ذات كفاءة عالية: يمكن أن تصل كفاءة خلايا هذه المدخرة إلى 90%.
يبين الشكل التالي كيفية تناقص الكفاءة والسعة مع زيادة عدد مرات الشحن والتفريغ (سنوياً) أي يحدث التآكل لخصائص المدخرة.



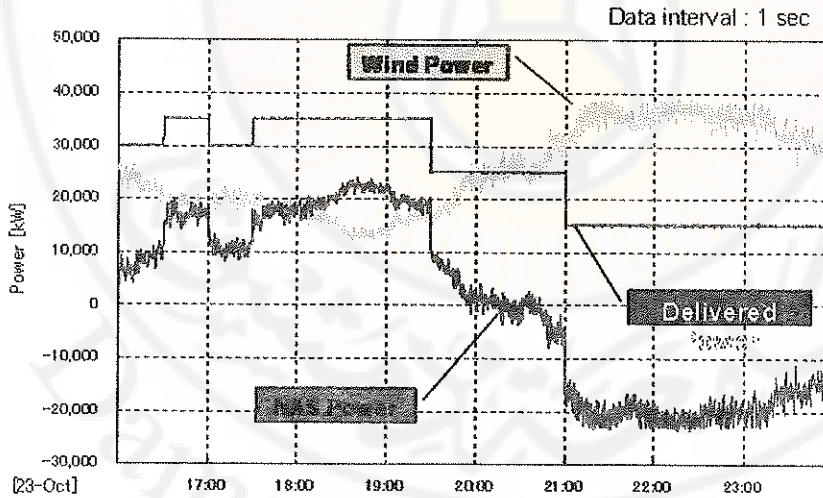
الشكل (4-34): تقادم خصائص مدخرات صوديوم-كبريت [37]

4-14-2-4 ذات عمر طويل الأمد: العمر الافتراضي بحدود 15 سنة بعدد دورات عمل تتجاوز 2500cycle (مقابل 1500cycle لمدخرات الرصاص الحامضية).
لقد تمّ في العام 2008 في طوكيو استخدام هذه المدخرات لتنعيم الاستطاعة الناتجة عن مزرعة ريحية 51MW مستخدمين مودول 34MW (245MWh) حيث يبين الشكل (4-35) مخطط عام لنظام المدخرات المستخدمة.



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

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



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

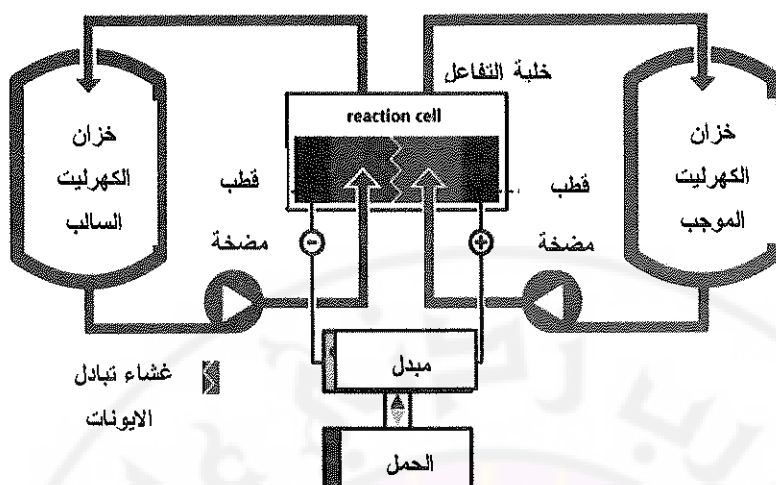
4-15- مدخرات جريان الكهرليت

Redox Flow Batteries

4-15-1- تقنية مدخرات جريان الكهرليت

مدخرات جريان الكهرليت هي نوع من المدخرات القابلة للشحن التي تكون فيها الطاقة مخزنة كيميائياً في خزانات الكهرليت السائل على خلاف المدخرات التقليدية التي تختزن كل موادها التفاعلية ضمن الخلايا. يوجد فيها نوعان من الكهرليت: الأول للتفاعل الإيجابي والثاني للتفاعل السلبي. الكهرليتان الإيجابي والسلبي لا يتم خلطهما سوية في الخلية لكن يفصلان عن بعضهما ضمن الخلية بغشاء 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 الكهربية فيزيائياً وكيميائياً لذا يمكن الحصول على عدد كبير من دورات الشحن والتفريغ دون حدوث أي نقصان في الأقطاب. المواد المتفاعلة تبقى جيدة لعدد أدنى من دورات الشحن يقدر بـ 2000 دورة وما يقارب الـ 10000 دورة [39].

كما يظهر الشكل (4-37) إن مدخرات جريان الكهرليت تحتوي على مضخات وأنابيب وخزانات للكهرليت وأكداًس من الخلايا الكهروكيميائية. خلال عملية الشحن والتفريغ تتدفق المواد المتفاعلة من كلا الطرفين المتعاكسين للخلية ويتم تدوير السائل الكهرليني عبر أكداًس الخلايا حيث يحدث التفاعل الكيميائي. يمكن تخزين الجزيئات المشحونة ضمن الأكداًس وضمن الخزان. في مثل هذه الأنواع من المدخرات تتحدد سعة المدخرة بواسطة كتلة المواد المتفاعلة ولكن يمكن رفع أو خفض السعة بواسطة تغيير حجم الخزان.



الشكل (4-37): مخطط عام لمداخلات جريان الكهرليت

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

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

4-15-2- مادة الفانديوم

الفانديوم Vanadium اكتشف مرتين أول مرة عام 1801 من قبل العالم أندريس مانويل وسمّاه البذرة الحمراء وبعد ذلك وجد شكل آخر للفانوديوم مجرد من معدن الكروم وبعد ذلك تم اكتشافه في عام 1803.

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

الفانديوم عنصر طبيعي في الأرض رمزه الكيميائي V وترتيبه في الجدول الدوري للعناصر 23. الفانديوم مركب يوجد في الطبيعة بلون أبيض ويتحول إلى لون رمادي ويوجد في أغلب الأحيان كبلورات، يندمج عادة مع العناصر الأخرى مثل O_2 أو Na أو S.

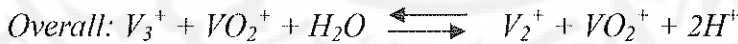
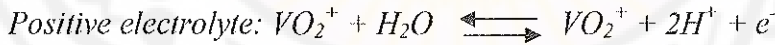
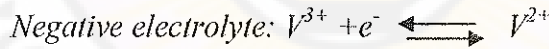
مركبات الفانديوم يمكن أن توجد في قشرة الأرض وفي الصخور وبعض الحديد الخام. يكون الفانديوم على شكل أكاسيد الفانديوم يستعمل في الأنواع الخاصة من الفولاذ، كما يستعمل في صناعة بعض أجزاء السيارات وأغلب الفانديوم يستعمل لصناعة الفولاذ. أكسيد الفانديوم هو مسحوق برتقالي. الفانديوم يخلط أيضاً بالحديد لصناعة أجزاء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

4-15-3- مدخرات جريان الكهرليت الفانديوم

Vanadium Redox Flow Battery

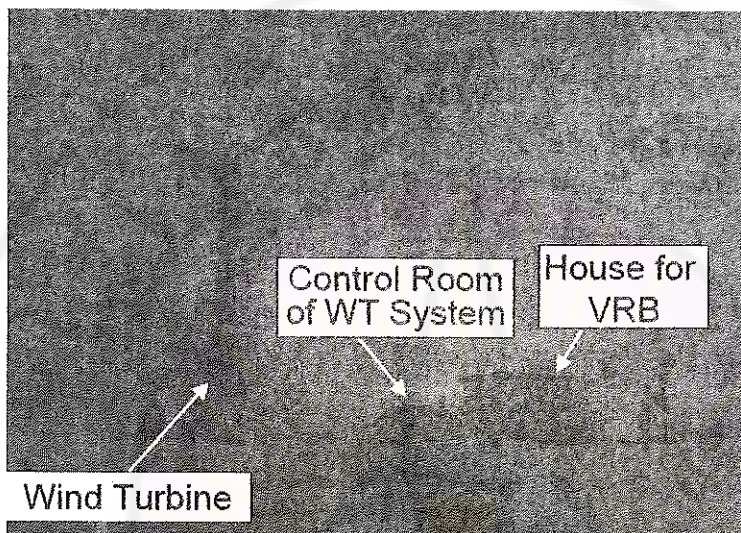
تصنف مدخرات الفانديوم ضمن الأكسدة القليلة في المدخرات التي تحتوي كل المكونات النشطة والتي تذوب في المنحل الكهربائي. مدخرات الفانديوم تستعمل أملاح الفانديوم في الكهرليت. يحتوي الكهرليت حمض الكبريت وهو نفس الحمض الموجود في المدخرات التقليدية.

التفاعلات الكهربائية التي تحدث في هذه المدخرات [39]:



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

وقد تم على سبيل التجربة تركيب نظام مدخرات فائديوم ريدوكس بسعة تخزين 170kW - 6h على طرف مولد ريحي تجريبي باستطاعة 275kW في محطة هوكايدو في اليابان كما يظهر الشكل (4-38) صورة لموقع التخزين بمدخرات الفائديوم.



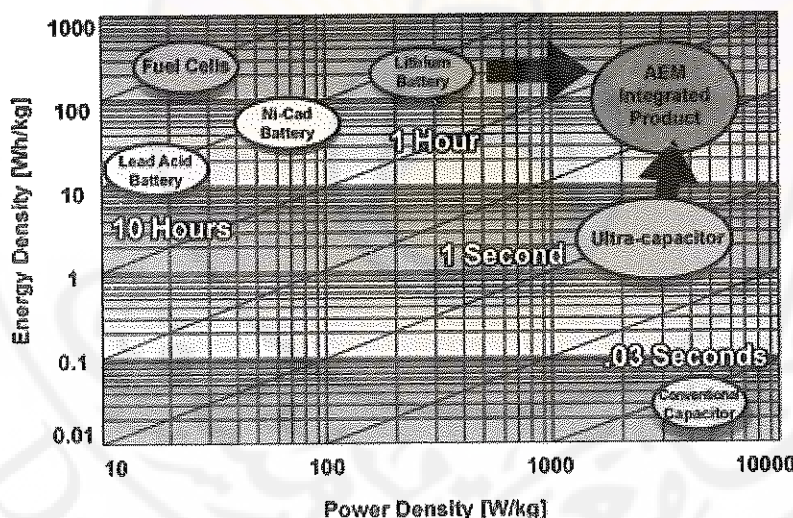
الشكل (4-38): صورة لمدخرات الفائديوم المركبة في محطة هوكايدو [39]

4-16- مكثفات شوارد الليثيوم⁵ Lithium Ion Capacitor

4-16-1- 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 المدخرات [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.

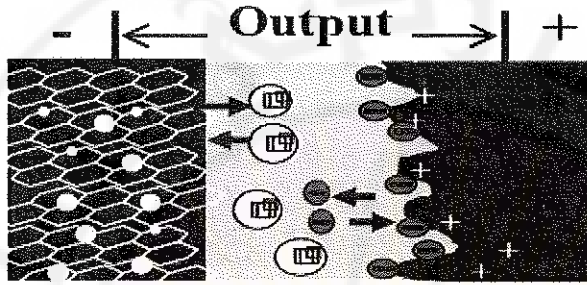


الشكل (4-39): مخطط راكون لمكثفات شوارد الليثيوم الهجينة

⁵ يطلق اسم مكثفات شوارد الليثيوم على هذه العناصر الجديدة و لكنها من حيث البنية هي مزيج بين المكثفات فائقة السعة والمدخرات لذلك يمكن أن يطلق عليها أسماء أخرى.

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 والسالب يستخدم فيه شوارد الليثيوم المشوبة بالكربون كما هو المدخرات شوارد الليثيوم كما يوضح الشكل (4-4).



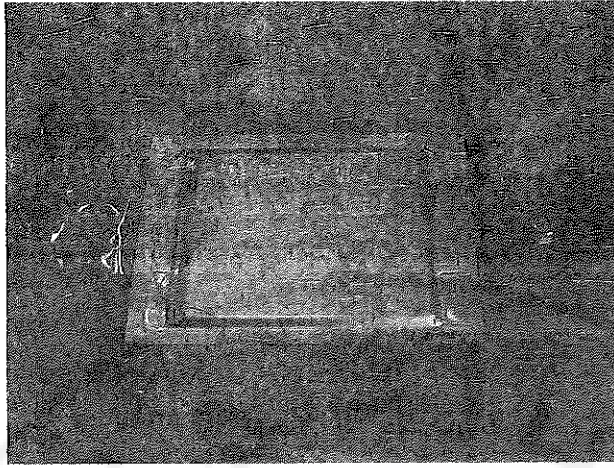
Li-doped Electrolyte Activated Carbon

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

إن السعة المكافئة لهذا العنصر تتشكل من سعة اللبوس الموجب (C_{dl} carbon double layer) على التسلسل مع سعة اللبوس السالب (C_{li} carbon lithium) يمكن أن يعبر عنها بالمعادلة التالية:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_{li}} + \frac{1}{C_{dl}}; C_{li} \gg C_{dl} \Rightarrow C_{eq} \approx C_{dl} \quad (12-4)$$

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



الشكل (4-41): نموذج مخبري لمكثف شوارد الليثيوم

السعة الاسمية 2000F، الحجم 124ml، الوزن 208g، القيمة العظمى للتوتر 3.8V .

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

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

المواصفات	نموذج 2000F	نموذج 1000F
درجة حرارة التشغيل	20°C إلى 70°C	20°C إلى 70°C
التوتر الاسمي	3.8V	3.8V
	2.2V	2.2V
السعة الاسمية عند 25°C	2200F	1100F
السعة عند 20°C -	60%	60%
السعة عند 70°C	100%	100%
المقاومة @ ESR 1KHz	1.4mΩ	2.5 mΩ
كثافة الطاقة الكتلية	14Wh\Kg	12Wh\Kg
كثافة الطاقة الحجمية	24Wh\L	21 Wh\L

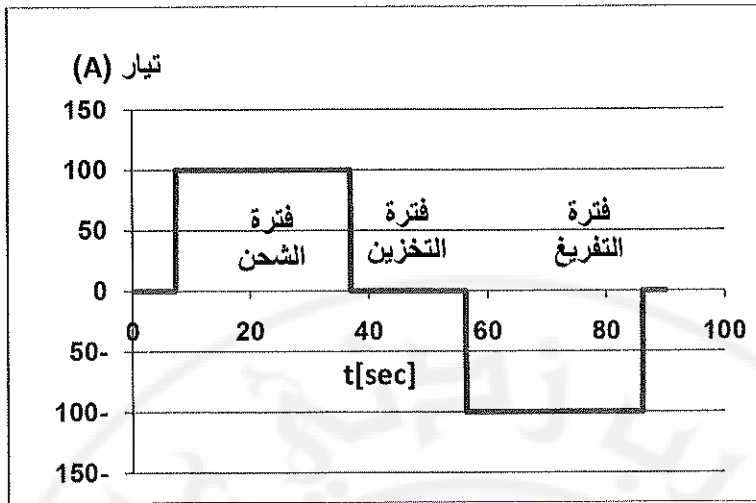
يعمل هذا العنصر كما يبين الجدول (4-9) عند درجة حرارة من 20°C الى 70°C وهو مجال كبير بالمقارنة مع المدخرات الكهربائية التقليدية وهو قريب من المكثفات فائقة السعة. بالنظر إلى الجدول أعلاه نلاحظ انخفاض السعة عند درجات الحرارة السالبة فمثلاً عند درجة حرارة 20°C تنخفض السعة إلى 60% نسبة إلى السعة عند 25°C . ويبين أيضاً أن للعنصر توترين توتر أعظمي 3.8V وتوتر أصغري 2.2V 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
تفريغ ذاتي كبير	تفريغ ذاتي أقل
توتر منخفض نسبياً	توتر أعلى
كثافة طاقة كهربائية منخفضة	كثافة طاقة كهربائية عالية
درجة الحرارة تصل حتى -40 درجة مئوية	درجة حرارة تصل حتى صفر درجة مئوية

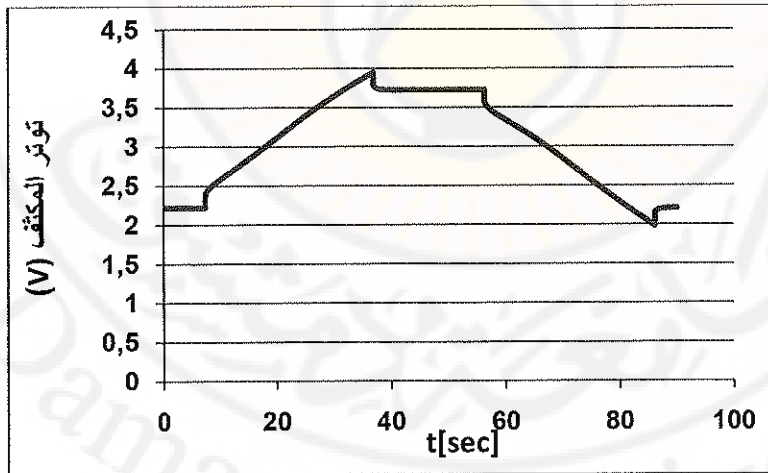
4-16-3- شحن وتفريغ مكثف شوارد الليثيوم

عند شروط ابتدائية درجة الحرارة 25°C وتوتر ابتدائي 2.2V تم شحن وتفريغ المكثف ذي المواصفات المبينة في الشكل (4-41) بواسطة تيار ثابت (100A) كما يظهر الشكل (4-42).



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، والفترة الثانية فترة تخزين يكون فيها التيار المطبق معدوماً، والفترة 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 (4-43) نلاحظ أن التوتر مرّ بثلاث مراحل:

1- فترة الشحن: وفي هذه الفترة يتم شحن المكثف كما هو واضح حتى التوتر $3.8V$ تقريباً وبزمن 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.

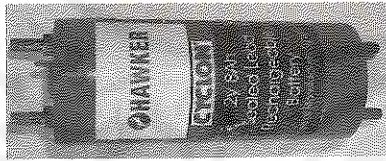
3- فترة التفريغ: وهي الفترة التي يتم فيها تفريغ المكثف حتى توتر $2.2V$ وبزمن لا يتجاوز 30 ثانية أيضاً. نلاحظ أن السلوك الزمني لهذا العنصر هو خليط بين سلوك المكثف فائق السعة مثل زمن الشحن أو التفريغ هو نفسه ولكن التوتر محصور بين قيمتين عظمى وصغرى مثل مدخرات شوارد الليثيوم.

مسألة محلولة (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:

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

احسب المقاومة المكافئة التسلسلية للمدخرة الكهربائية ESR ثم ارسم مخطط نايكويست لها موضعاً عليه مختلف المناطق.



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

الحل:

1- يمكن حساب سعوية المدخرة بالفاراد باستخدام العلاقة التالية:

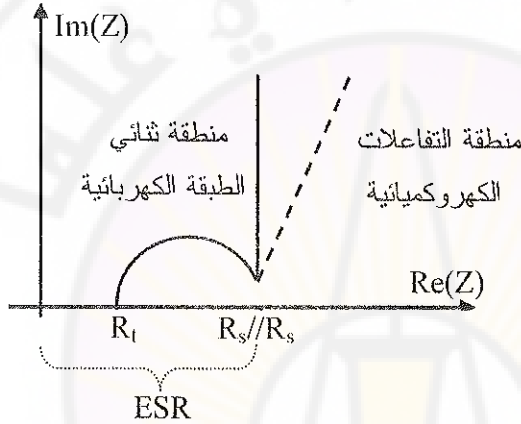
$$C_{bulk} = 2 \times C_{Ah} \cdot U \cdot \frac{3600}{U^2 - U_{min}^2}$$

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

2- يمكن أن نقدر قيمة المقاومة ESR كمايلي:

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

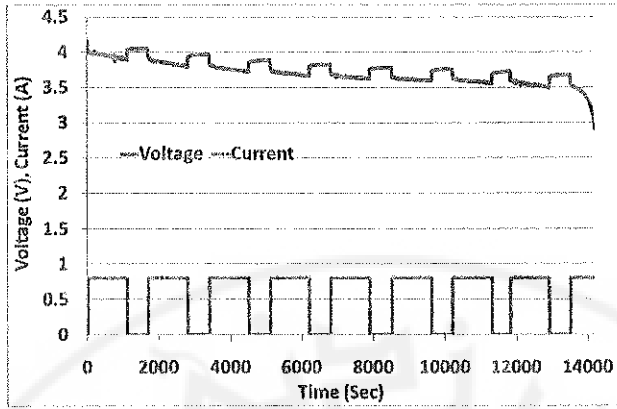
إن مخطط نايكوست لمدخنة رصاص-حمض موضح في الشكل (4-45)



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

مسألة (2):

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



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

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

1- اكتب المعادلة التفاضلية للتوترات على أطراف عناصر الدارة المكافئة (الفرع R_1C_1 ، والفرع R_2C_2) باعتبار أن التيار المار في المدخلة خلال التفريغ هو تيار ثابت وقيمته I (هو تيار نبضي أما I أو صفر).

2- استنتج قيمة التوترات والتيارات لكل عنصر من عناصر الدارة المكافئة والتوتر الكلي على أطراف المدخلة ثم ارسمها بدقة من أجل الشروط الابتدائية أعلاه ولدور كامل $T=1700s$.

مع العلم أن: $V_{oc}=4.2V, I=0.8A, R_0=0.125m\Omega, R_1=0.1m\Omega,$
 $R_2=0.05m\Omega, C_1=200F, C_2=7000F$



الفصل الخامس
تخزين الطاقة بالهيدروجين
Hydrogen Energy Storage



5- تخزين الطاقة بالهيدروجين

Hydrogen Energy Storage

5-1- 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 سنتبثق مع منتصف القرن الحالي - كما يقدر الخبراء - حضارة اقتصادية واجتماعية جديدة هي حضارة الهيدروجين (hydrogen culture) وسوف يشهد العالم انقلاباً اقتصادياً جديداً قوامه الهيدروجين سيحدث تغييراً جذرياً في الأوضاع الاقتصادية والاجتماعية وحتى السياسية، تماماً كما فعل الفحم والبخار في بداية الثورة الصناعية .

إذن نحن على أعتاب نمط جديد من الاقتصاد العالمي هو اقتصاد الهيدروجين (hydrogen economy) ومن الدوافع الرئيسة للتحويل 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 المتجددة لإنتاج الهيدروجين بكميات وفيرة وتكاليف 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 المتوافرة على وجه الأرض [42]، ودرجة حرارة لهب احتراقه عالية جداً (أعلى من 2200°C).

إضافة إلى ماتقدم من مزايا، فالهيدروجين يخدم وسيطاً ممتازاً لتخزين الطاقة الكهربائية وهو موضوع بحثنا في هذا الفصل. وقبل أن نبحت في ذلك يلزم أولاً التعرف على خصائص الهيدروجين الفيزيائية والكيميائية .

5-2- الخصائص الفيزيائية والكيميائية للهيدرجين

الهيدرجين غاز عديم اللون والطعم والرائحة غير سام وهو أخف العناصر الموجودة في الطبيعة كثافته (كتلته الحجمية) في الشروط النظامية $\rho_{H_2}=0.09g/l$ 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 ثلاث نظائر:

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

الثانية وتسمى الديتريوم رمزها النووي H^2 وهي غير متوافرة في الطبيعة 0.015 %،

الثالثة وتسمى التريتيوم رمزها النووي H^3 وهي غير متوافرة في الطبيعة،

القيمة الحرارية الدنيا له : $L.H.V. = 120MJ/kg$ وتقابل $10.8MJ/m^3$ ،

القيمة الحرارية العليا له : $H.H.V = 142MJ/kg$ وتقابل $12.8MJ/m^3$.

لايتواجد الهيدرجين بشكل حر في الطبيعة إنما 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. علماً بأن الهيدرجين يوجد بصورة حرة في الجو الشمسي وفي الغازات البركانية، كما يوجد في الغلاف الجوي الأرضي ولكن بنسبة ضئيلة جداً أقل من واحد بالمليون (1 p.p.m) نسبة حجمية.

5-3- الاستخدامات الحالية للهيدرجين

للهيدرجين استخدامات عديدة ، إضافة لكونه وسيطاً 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 الميثانول وغيرها.
 - 3- في الصناعات الغذائية والدوائية: هدرجة الزيوت ومواد التجميل وغيرها.
 - 4- في الصناعات الالكترونية: إنتاج أنصاف 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 مراحل 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، وسنتطرق 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 الميثانول والباقي (حوالي 5%) للاستخدامات الأخرى المذكورة آنفاً [43].

4-5- إنتاج الهيدروجين Hydrogen Production

هناك ست طرائق معروفة في الوقت الحاضر لإنتاج الهيدروجين وهي :

- (1) الطريقة الحرارية وكيميائية 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 الطرائق الست:

5-4-1- الطريقة الحرارية وكيميائية 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 والنفثا Naphtha، وتسمى عملية التحويل عندئذ بإعادة التشكيل بالبخار (steam reforming)، أو باستخدام الهواء (الأكسجين) للأصناف الثقيلة كالزيت الثقيل (heavy oil) وبقيّة المشتقات الأثقل (petroleum residuals) وتسمى عملية التحويل في هذه الحالة 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 بنسب ضئيلة.

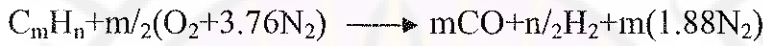
وعند استخدام الميثان تصبح معادلة التحويل بصورة خاصة كمايلي :



وهكذا نرى أنه لإنتاج المتر المكعب الواحد من الهيدرجين يلزمنا في هذه الحالة طاقة لاتقل عن 2.54kWh، ولكن هذا نظرياً فعملياً نحتاج إلى أكثر من 3kWh لإنتاج المتر المكعب الواحد من الهيدرجين [44].

ب - التحويل بالأكسدة الجزئية

في هذه الحالة يمرر الهواء على الوقود الثقيل المسخن إلى ما فوق الـ 1000°C فيجري التفاعل التالي:



حيث يلاحظ أن عدد جزيئات CO الناتجة مرتفع، لذا فإن نسبة CO أكبر من نسبة H₂ في المزيج الغازي الناتج وتتجاوز الـ 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 الجزئية للوقود الثقيل إضافة إلى كونها أبسط من حيث التنفيذ وأقل من حيث التكاليف، لذا فقد تم التوجه إلى استخدام الأصناف الخفيفة 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 الجزئية للمشتقات النفطية الثقيلة بنسبة حوالي 30% وبعدها عملية تغويز الفحم (الأكسدة الجزئية للفحم الحجري) بنسبة لا تزيد عن 16% من إجمالي الإنتاج العالمي للهيدرجين [43].

وبهذا تكون الطريقة الحرارية وكيميائية 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 يُحول إلى هيدرجين في عملية لاحقة، وتسمى عملية تحويل الفحم هذه إلى غاز بستغويز الفحم coal gasification ويجري ذلك بإمرار الهواء على الفحم المسخن حتى 1200°c 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 1250°c لنحصل على التفاعل التالي :



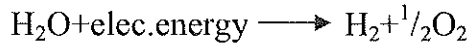
إن غاز CO الناتج عن أي من عمليات التحويل المذكورة أعلاه منتج ملوث غير مرغوب فيه، لذا يلزم معالجته والاستفادة منه بتحويله إلى هيدرجين وذلك باستخدام بخار الماء أيضاً ولكن عند درجة حرارة أقل (300-500 مئوية حسب نوع المحفز) وفق التفاعل التالي:



وتسمى عملية التحويل هذه بالتحويل الإزاحي shift conversion يجري بعدها فصل CO₂ 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 يلجأ إليها إلا في حال عدم توافر الغاز أو النفط بتكاليف معقولة .

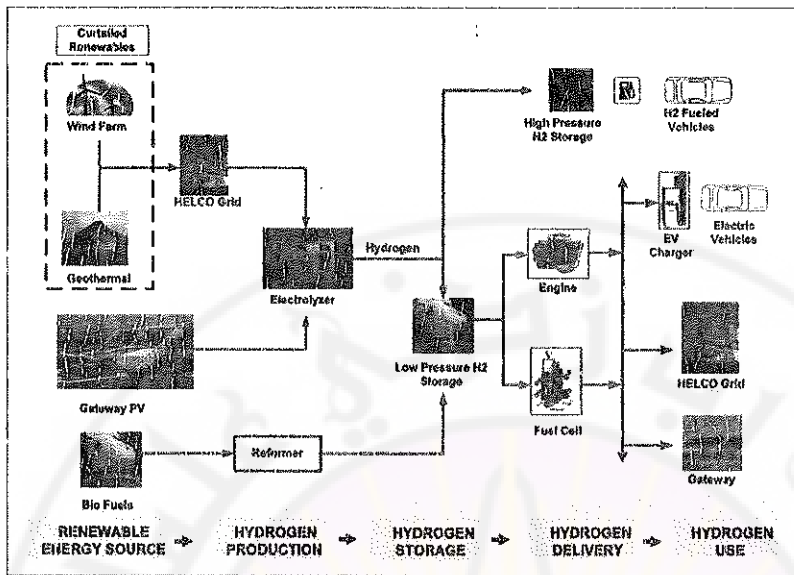
5-4-2 - الطريقة الكهروكيميائية لإنتاج الهيدرجين

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



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

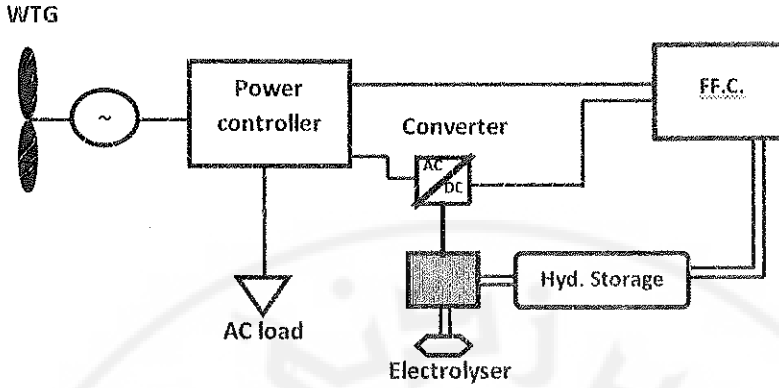
أما عيوب هذه الطريقة فهي أنها تتطلب قدراً كبيراً من الطاقة الكهربائية أكثر من 4.5 كيلو واط ساعي لكل متر مكعب من الهيدروجين [43]، كما أنها تتطلب مصدراً وفيراً من المياه إذ تحتاج إلى حوالي 0.8 لتر من الماء لكل متر مكعب من الهيدروجين، لذا تعد هذه الطريقة مرتفعة التكلفة إذا ما قورنت بالطريقة الحرارية كيميائية، ولهذا السبب فإن استخدامها مازال محدوداً (نسبة الهيدروجين المنتج في الوقت الحاضر بهذه الطريقة لا يتجاوز الـ 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 المثلى لإنتاج الهيدروجين عند توافر إمكانات استغلال مصادر الطاقات المتجددة في توليد الطاقة الكهربائية اللازمة لتحليل الماء، ويبين الشكل (5-1) مصادر الطاقات المتجددة التي يمكن الاستفادة منها في إنتاج الهيدروجين.



الشكل (1-5): إنتاج الهيدروجين باستغلال مصادر الطاقات المتجددة

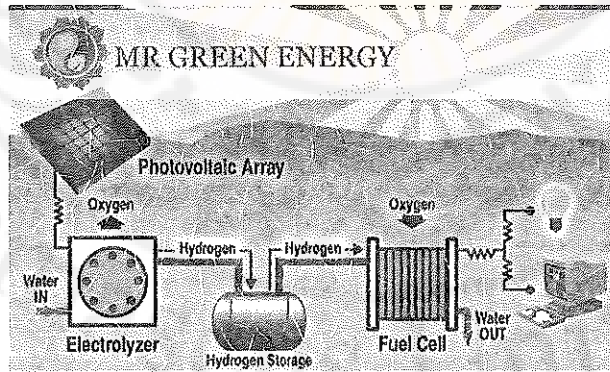
إن أكثر مصادر الطاقات المتجددة استغلالاً في الوقت الحاضر هما طاقة الرياح والطاقة الشمسية وذلك بفضل التقدم الكبير الحاصل في تطوير تقنيات توليد الطاقة الكهربائية من هذين المصدرين.

ففي حال نظم التوليد الريحية ، وبخاصة تلك المنفردة غير المرتبطة بالشبكة العامة (stand-alone) يمكن استغلال الطاقة الكهربائية الفائضة خلال أوقات التوليد الأعظمي في تحليل الماء لإنتاج الهيدروجين وتخزينه ليستخدمه في خلايا الوقود وتوليد الطاقة الكهربائية من جديد. إن ذلك يخدم بديلاً ممتازاً صديقاً للبيئة عن المدخرات أو مجموعات الديزل لتأمين احتياجات الطلب على الطاقة في أوقات السرعات المتدنية للرياح، ويبين الشكل (2-5) مخططاً رمزياً لهذا النظام والذي يسمى "بالنظام الريحي - الهيدروجيني".



الشكل (5-2): مخطط رمزي لنظام ريحي - هيدروجيني

أما في حال النظم الكهروضوئية PV-Systems فتكون 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 عقلائي 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 (5-3)، ويسمى هذا النظام الهجين عندئذ "بالنظام الشمسي - الهيدروجيني"، كما يدعى الهيدروجين المنتج من تحليل الماء باستخدام الطاقة الشمسية "بالهيدروجين الشمسي (solar hydrogen)".



الشكل (5-3): مخطط رمزي لنظام شمسي - هيدروجيني

أنواع محلات الماء Types of Water Electrolyzers

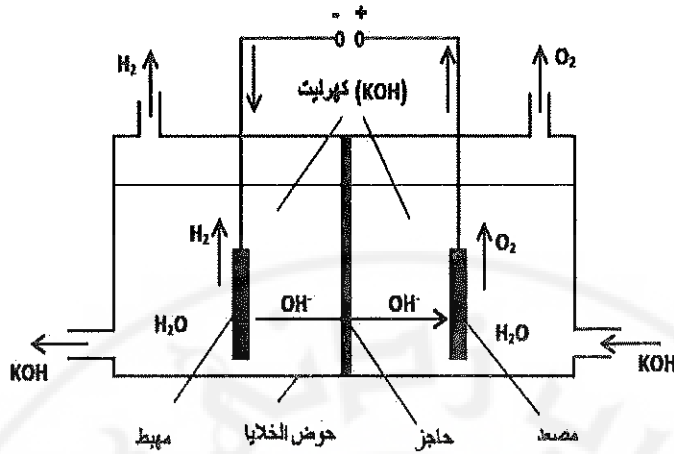
تصنف أجهزة التحليل الكهربائي للماء - أو اختصاراً محلات الماء - عادة حسب نوع الكهرليت، والأنواع التي تم تطويرها حتى الآن هي ثلاثة [43]:

- 1- المحلات ذات المحلول القلوي Alkaline Electrolyzers
- 2- المحلات ذات الغشاء البوليميري Polymer (PEM) Electrolyzers
- 3- المحلات ذات الأكسيد الصلب Solid oxide Electrolyzers

إن النوع الأكثر استخداماً على نطاق تجاري واسع هو النوع الأول ذو المحلول القلوي (ذو الكهرليت القلوي)، حيث أن النوع الثاني البوليميري مازال، على الرغم من تفوقه بتحملة كثافات تيار عالية، محدود الانتشار بسبب حاجته إلى ماء عالي النقاوة وإلى مواد حفازة من المعادن النبيلة noble غالية الثمن كالبلاتين، أما النوع الثالث فمازال قيد البحث والتطوير .

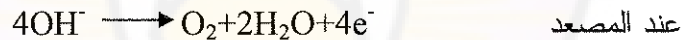
محلات الماء القلوية Alkaline Water Electrolyzers

لا تختلف بنية محلات الماء القلوية عن البنية الأساسية لأي خلية كهروكيميائية، فهي تتكون من قطبين (الكترودين) : مصعد Anode ومهبط Cathode وكهرليت Electrolyte بينهما، يضاف إلى ذلك المادة المحفزة Catalyzer المناسبة. الكهرليت في هذا النوع هو محلول قلوي من هيدروكسيد البوتاسيوم KOH بتركيز 25-35% ويعمل هذا الكهرليت ناقلاً لحاملات الشحنة وهي أيونات (شوارد) الهيدروكسيل (OH⁻) ، 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 المحيط به محرراً الهيدرجين وأيونات الهيدروكسيل OH^- التي ترحل عبر الكهرليت إلى المصعد حيث تتفكك هناك - بفعل المحفز أيضاً - مطلقة الأكسجين ومشكلة الماء ومحررة الالكترونات كما في التفاعلات التالية:



وهكذا نرى أن الهيدرجين ينطلق عند المهبط والأكسجين عند المصعد، لذا يلزم وجود حاجز في وعاء التحليل ليفصل بين المصعد والمهبط فصلاً تاماً كما هو مبين في الشكل (4-5).

إن كمية الطاقة اللازم تطبيقها حتى يحدث هذا التفاعل يجب أن تكون أكبر من تغير الانتالبي ΔH والذي يقدر حسب الجداول الستوكومترية بـ 286KJ/Mole . وتتوقف 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 لتغطية

هبوطات التوتر الناتجة عن مختلف المقاوّمات الداخلية لمكونات المحلّل، ويكون للمحلات العملية عادةً بين 1.75 و 2 فولت.

تصنع أقطاب المحلات القلوية من خلائط أكاسيد النيكل والكوبالت للمصعد، والنيكل أو الفولاذ غير القابل للصدأ للمهبط، أما للمحفزات فلا حاجة لاستخدام معادن نبيلة غالبية الثمن وإنما تكفي الخلائط ذات الأساس النيكلي.

تعمل محلات الماء القلوية عادة عند درجة حرارة من 70°C إلى 90°C ، ويفضل عملها تحت الضغط (حتى 30atm) لتقليل الطاقة المستهلكة في عمليات تخزين الهيدروجين.

هذا وللمحلات 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 محلات الماء ذات التصميم الأول الأحادي القطبية هي السائدة، لكن مع تطور تقانة محلات 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 A/m^2 في حين أن المحلات الأحادية تعمل عادة في المجال $1000-2000 \text{ A/m}^2$ ، لذا فإن حجم المحلات الثنائية يكون أصغر لذات الطاقة الإنتاجية من الهيدروجين [43].

الميزة الثانية للتصميم الثنائي هو إمكانية إنتاج الهيدروجين تحت ضغط أعلى بكثير من الضغط الجوي مما يسهل عملية تخزينه ويقلل من تكاليفها. والسيئة الوحيدة لهذا التصميم الثنائي هي وجوب إيقاف كامل المحلّل عن العمل عند الحاجة لصيانة أو إصلاح أي خلية منه، وذلك بخلاف التصميم الأحادي.

5-4-3- الطريقة الضوئية الكهروكيميائية لإنتاج الهيدروجين

لا تختلف 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 منتجة أصنافاً مفعلة (activated species)، والتي بدورها تعود إلى حالتها الأولى deactivated بتحرير الهيدرجين من الماء، وباختصار إنها عملية تحليل كهربائي للماء بطاقة مستمدة من الشمس.

إن إنتاج الهيدرجين بهذه الطريقة مازال محدوداً، ولكن يتوقع لها انتشاراً أوسع نظراً لمزيتها المهمة وهي اعتمادها على مصادر الطاقات المتجددة وعدم حاجتها إلى حرق وقود أحفوري.

4-4-5 - الطريقة الحرارية لإنتاج الهيدرجين

تعتمد هذه الطريقة في إنتاج الهيدرجين على التفكك الحراري للماء (thermal decomposition of water)، ويتم ذلك بأسلوبين [45]: الأول بتعريض الماء بشكل مباشر إلى حرارة عالية 2500°C وما فوق فيتفكك الماء إلى مركبتيه الهيدرجين والأكسجين، وهذه العملية تبدو غير مرغوبة على الغالب بسبب حاجتها إلى درجات حرارة عالية لضمان الحصول على نسبة مقبولة من الماء المفكك (أعلى من 3000°C) وبالتالي على كمية معقولة من الهيدرجين الناتج، كما أن توفير المواد التي تتحمل هذه الدرجات العالية من الحرارة أمر مكلف وليس بالسهل.

الأسلوب الثاني لتفكك الماء بهدف الحصول على هيدرجين هو باستخدام عملية قوس البلازما (plasma arc process) حيث يسخن الماء إلى حوالي 5000°C بواسطة الحقل الكهربائي فيتفكك إلى النواتج: H_2O , HO_2 , OH , O_2 , O , H_2 , H ويمكن الحصول على نسبة هيدرجين ناتج من هذا المزيج حتى 50% حجماً، إلا أن هذه العملية مكلفة جداً إذا ما قورنت بالطرق الأخرى لإنتاج الهيدرجين، لذا فهي محدودة الانتشار.

5-4-5 - الطريقة الضوئية البيولوجية لإنتاج الهيدرجين

تستخدم هذه الطريقة ضوء الشمس مصدراً للطاقة، فبواسطة عملية التركيب الضوئي (photosynthetic) بعض الكائنات الحية كالطحالب التي تنمو في المياه تمتص ضوء

الشمس وتشكل أنزيمياً (enzyme) خاصاً يعمل على تحفيز عملية التفكيك الضووكيميائي (photochemical decomposition) للماء لتحرير الهيدرجين [45]. هذه الطريقة محدودة الانتشار أيضاً بسبب انخفاض معدل إنتاجها للهيدرجين وحاجتها إلى مساحات واسعة لإنتاج كميات معقولة من الهيدرجين، ولكن تبقى لها ميزتها المهمة وهي أنها صديقة للبيئة لا تتسبب في إصدار أي ملوثات إضافة إلى انخفاض تكاليفها نسبياً.

5-4-6- الطريقة البيوكيميائية لإنتاج الهيدرجين

وتعتمد على تخمير مختلف أنواع المخلفات الحيوية (النفائات البشرية والحيوانية والنباتية) بمعزل عن الهواء anaerobic digestion وبإضافة أنواع معينة من المخمرات تطلق هذه المخلفات بعد زمن معين مزيجاً غازياً غنياً بالهيدرجين [43]. تعد هذه الطريقة غير فعالة لإنتاج الهيدرجين فهي تحتاج إلى أحجام ومساحات كبيرة ولا تنتج الهيدرجين إلا بمعدلات منخفضة وتتطلب وقتاً كبيراً لإنتاج كميات معقولة منه، لذا فقد اقتصر استخدامها على المناطق الزراعية النائية حيث الحاجة إلى الطاقة محدودة.

5-5- تخزين الهيدروجين Hydrogen Storage

بعد الهيدروجين، كما ذكر سابقاً، من أفضل وسائط 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 الهيدروجين في الوقت الحاضر على ثلاثة أشكال:

- على شكل غاز مضغوط compressed gas.

- على شكل سائل مبرد cryogenic form.

- على شكل هيدريدات المعادن metal hydrides.

ولكن قبل أن نتطرق لكل من أشكال التخزين هذه بالتفصيل يلزم أولاً تعرف خصائص التعامل مع الهيدروجين وماينجم عنه من مشكلات وأخطار لأخذها بالحسبان وتجنبها في أثناء إجراء عمليات التخزين والاستعادة [45].

- الهيدروجين عنصر خفيف جداً بل هو أخف العناصر على الإطلاق وأبسطها، وذرته صغيرة جداً مما يجعله يتسرب حتى من أشد الأوعية إحكاماً.

- الهيدروجين غاز شديد الفعالية فهو عندما يلامس سطوح المعادن تتفكك جزيئاته إلى ذرات تخترق المعدن لصغرهما الشديد، وهذا يتسبب في جعل المعادن هشّة.

- الكثافة (الكتلة الحجمية) للهيدروجين وهو في حالته الغازية صغيرة جداً، لذا فكثافة الطاقة التي يمكن تخزينها فيه منخفضة جداً.

- الهيدروجين السائل يتبخر بمعدل عال نسبياً مهما كان عزل الخزان وإحكامه جيداً.

- للهيدروجين 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) الأميركية 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 مكنسة جافة من القش ذات ذراع طويلة.
- إن الهيدرجين السائل يؤدي بسبب حرارته المنخفضة جداً إلى حدوث ما يسمى بالحرق البارد وهو أشد تأثيراً وضرراً من الحرق العادي بالحرارة، لذا يجب تجنب التماس معه وأخذ الحيطه 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 حرقاً 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 (كثافته 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 ليترًا ووزنها حوالي 10 كغ منها فقط نصف كيلو غرام هيدرجين، وبهذا نرى أنه نتيجة لضغط الهيدرجين إلى 140 bar قد أصبحت كثافته تساوي 12.5 gr/lt أي أنها زادت بحوالي 140 مرة مما يرفع كثافة

الطاقة المخزنة بذات النسبة تقريباً (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 تتحمل ضغطاً أكبر كالألومنيوم المقوى بالألياف الزجاجية والمركبات الكربونية، وبذلك يمكن رفع الضغط حتى 350 بار [43].

أما للاستخدامات الكبيرة كمحطات توزيع الهيدروجين 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 الهيدروجين بحدود 10% من الطاقة المخزنة فيه، هذا مع الانتباه إلى أخذ تكاليف الإنشاء لنظام الضغط والتخزين بالحسبان عند إجراء الدراسات الاقتصادية.

5-5-2- تخزين الهيدروجين في الحالة السائلة

لزيادة كثافة الطاقة المخزنة في الهيدروجين بنسب كبيرة جداً يُعتمد إلى تمييعه liquefaction بتبريده إلى -253 درجة مئوية وعندها تصبح كثافته بحدود 70gr/lt أو أكثر قليلاً وترتفع كثافة الطاقة المخزنة إلى 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 الهيدروجين السائل أكبر بحوالي 2.8 مرة منها للبنزين (120MJ/kg للهيدروجين السائل مقابل 43MJ/kg للبنزين)، لذا فالهيدروجين السائل يعد أكثر أنواع الوقود تركيزاً للطاقة بعد الوقود النووي [43].

إن معظم استخدامات الهيدروجين السائل لأبحاث الفضاء والأغراض العسكرية، فالهيدروجين السائل يعد الوقود المثالي لدفع الصواريخ، كما يستخدم وقوداً عالي الكثافة الطاقة لخلايا الوقود التي تمد المركبات الفضائية وكذلك الغواصات البحرية بالطاقة الكهربائية والماء النقي، فعند ناسا (NASA) الأميركية أكبر خزان للهيدروجين السائل سعته 3 ملايين ليتر.

إن العيب الرئيس لتخزين الهيدرجين بهذه الطريقة هو صعوبة تبريده إلى هذه الدرجة المتدنية من الحرارة (قرب الصفر المطلق) والحفاظ عليها، فهي عملية معقدة وتستهلك كمية كبيرة من الطاقة تقدر بأكثر من ثلث الطاقة المخزنة (حوالي 35%) علاوة على تكاليفها الأساسية المرتفعة.

كما أن معدل التبخر العالي للهيدرجين السائل يضيف مشكلة أخرى لهذه الطريقة من التخزين، ويجب اتخاذ كل التدابير لتقليل 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 هيدريدات المعادن metal hydrides، فهناك الكثير من المعادن أو خلطاتها يمكنها أن تمتص الهيدرجين وتتحد معه مشكلة هيدريدات ومطلقة قدرًا معينًا من الطاقة.

ومن أفضل الخلطات لهذا الغرض الخلطات التالية: $Mg - Ni$, $La - Ni$, $Fe - Ti$ يخزن الهيدرجين هنا بحقنه تحت الضغط في الخزان المملوء بالجزيئات الدقيقة (بشكل مسحوق) من هذه الخلطات، وسبب جعل المادة على شكل مسحوق هو تكبير سطحها المعرض لتيار الهيدرجين، فيرتبط الهيدرجين بالخلطة مشكلاً الهيدريد ومطلقاً كمية معينة من الحرارة التي علينا أن نعيدها للهيدريد المنشكل إذا أردنا استعادة الهيدرجين منه، وذلك بتسخينه بواسطة وشيعة كهربائية مثلاً.

إن كثافة الطاقة المخزنة بهذه الطريقة منخفضة نسبياً إذا ما قورنت بالطريقتين السابقتين، ولكن من الممكن الوصول عند ظروف مناسبة من الضغط والحرارة إلى كثافات عالية تضاهي طريقة التخزين بالهيدرجين الغاز المضغوط كما في الطريقة الأولى، ولكن تمتاز عنها بدرجة أمانها العالية.

هذا ويجب الانتباه إلى أن حجم المادة (الخلطة) سيزداد قليلاً بسبب امتصاصها للهيدرجين، كما أن وزنها سيزداد أيضاً.

الميزة الأساسية لهذه الطريقة أنها أكثر طرائق تخزين الهيدرجين أماناً، إذ إنه لا يتسرب أي هيدرجين في الحالات الطارئة وعند الحوادث، كما أن فعالية الهيدرجين تقل كثيراً بعد ارتباطه مما يخفف من مشكلات احتوائه والتعامل معه. أما عيوب هذه الطريقة فهي الوزن الثقيل للمعادن، وهذا يعد مشكلة حقيقية بالنسبة للتطبيقات المتنقلة كالسيارات والمركبات الأخرى. والعييب الثاني هو ارتفاع تكاليفها بسبب ارتفاع ثمن المعادن وخلانطها وتكاليف تحضيرها كالسحق والضغط وغيره.

5-6- الخلايا الوقودية Fuel Cells

الخلايا الوقودية وسيلة فعالة صديقة للبيئة لاستعادة الطاقة المخزنة في الهيدرجين على هيئة طاقة كهربائية. ونظراً لكونها تقنية حديثة للتوليد المباشر للطاقة الكهربائية وبكفاءة عالية فقد تم التركيز عليها في الفقرات 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 خلايا الوقود لتوليد الطاقة الكهربائية مازال الكثيرون يعدونها من المصادر غير التقليدية للطاقة، ويعزو بعضهم ذلك إلى أن أوساط الصناعة التقليدية والجديدة للطاقة لم تألفها بعد، إذ إن جوهر تقانة خلايا الوقود يعتمد على التقانات الكيميائية وعلم المواد، في حين تعتمد المصادر التقليدية لتوليد الطاقة الكهربائية على الظواهر الفيزيائية والهندسية الميكانيكية والكهربائية بصورة عامة.

تمتاز خلايا الوقود، بالمقارنة مع التقنيات الأخرى لتوليد الطاقة الكهربائية، بكونها سليمة نسبياً (غير ضارة) من الناحية البيئية، فهي قليلة الإصدارات 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 خلايا الوقود تأييداً واسعاً في الآونة الأخيرة وبدأت بتأمين الطاقة الكهربائية لمجموعات صغيرة من المتاجر والمشافي والفنادق ومحطات الاتصالات وغيرها من المؤسسات التجارية والخدمية في كل من اليابان والولايات المتحدة الأمريكية. وفي مجال الاستخدامات ذات الاستطاعات الكبيرة دخلت خلايا 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 تعطي 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 أثمان المواد اللازمة لبنائها - اقتصر استخدامها على الأغراض الخاصة كتوليد الطاقة الكهربائية في المركبات والمكايك الفضائية. فمذ الستينيات من القرن الماضي تستخدمها الولايات المتحدة الأمريكية لتزويد المركبتين الفضائيتين جيميني وابولو (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 بحجوم أكبر. فعلى سبيل المثال فإن التقدم في علم المواد قد مكّن من استخدام الأقطاب الكربونية المطلية بكميات ضئيلة من المعادن النادرة لتحل محل الأقطاب المحملة بالبلاتين، وقد أدى ذلك إلى خفض التكاليف بصورة ملحوظة. إن استخدام خلايا الوقود مصدراً مباشراً للطاقة الكهربائية باستطاعات تصل حتى 50kW للمركبات الفضائية وللروافع الشوكية وغيرها من الآليات المتحركة بما فيها السيارات الكهربائية قد أثبت جدارته على مدى سنين طويلة كبديل جيد للمدخرات العادية، كما أن الخلايا القلوية (AFC) مازالت تستخدم منذ الستينيات وعلى نطاق واسع في الغواصات كمصدر للطاقة الكهربائية باستطاعات حتى 200kW.

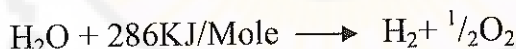
لم يقتصر المستقبل الواعد لخلايا الوقود بالطبع على هذه التطبيقات محدودة الاستطاعة، إذ بلغت الاستطاعات المركبة من وحدات خلايا الوقود حداً يتجاوز ذلك بكثير، وخاصة للمحطات الثابتة (stationary power plants)، فالاهتمام الجاد بخلايا الوقود والتركيز على تطويرها للاستخدامات الثابتة وبخاصة لمحطات التوليد

التجارية قد بدأ في أواخر الستينيات 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 الـ 25 Million دولار سنوياً كان هدفه الأساسي تطوير الطرز الرئيسة لخلايا الوقود وتخفيض تكاليف صنعها بالإضافة إلى اختبار مدى ملاءمتها للاستخدام في مؤسسات الكهرباء (على الشبكات)، أو عند المستهلك مصدراً للتوليد الاحتياطي أو المشارك (cogeneration).

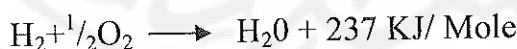
5-6-2- البنية الأساسية لخلية الوقود ومبدأ عملها

الخلية الوقودية هي في جوهرها خلية كهروكيميائية تقوم بتحويل الطاقة الكيميائية للوقود المغذى لها (كالهيدروجين أو الغاز الطبيعي) بشكل مباشر إلى طاقة كهربائية. لا تختلف البنية الأساسية لخلية الوقود عن البنية الأساسية لأي خلية كهروكيميائية أخرى كالمدخرات وأجهزة التحليل الكهربائي للماء، فهي تتكون من قطبين: مصعد ومهبط وكهرليت بينهما بالإضافة إلى المتتمات.

أما مبدأ عملها فهو عكس مبدأ عمل وعاء التحليل الكهربائي للماء، حيث يقوم هذا الأخير بتحليل الماء إلى مركبتيه الهيدروجين والأكسجين ماصاً (مستهلكاً) قدراً معيناً من الطاقة الكهربائية:

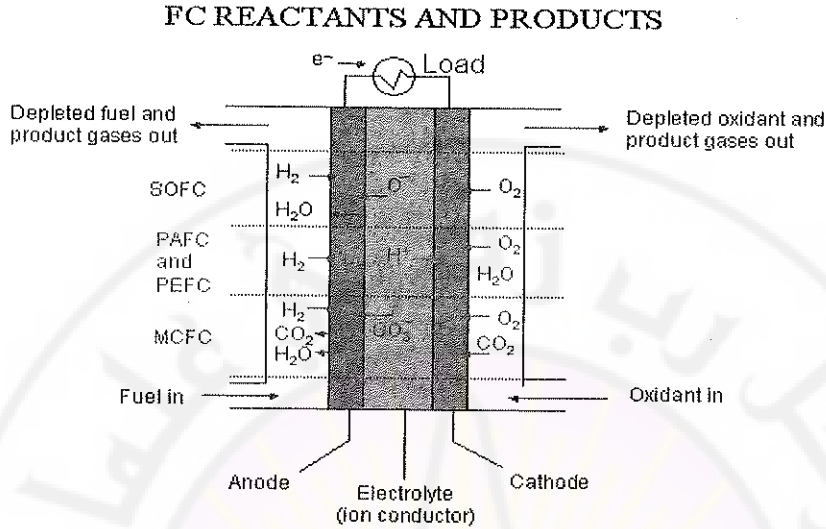


بينما تقوم خلية الوقود بتركيب الماء من الهيدروجين والأكسجين مصدرة قدراً معيناً من الطاقة الكهربائية:



وعليه فإن خلية 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 لاحقاً لدى دراسة الطرز المختلفة لخلايا الوقود. والشكل التالي رقم (5-5) يبين المخطط التمثيلي لبنية خلية الوقود ومبدأ عملها:

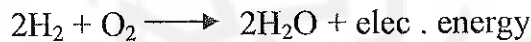
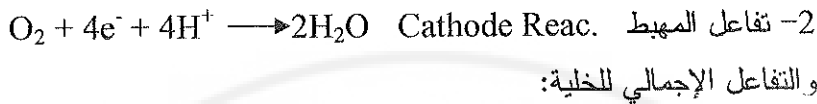
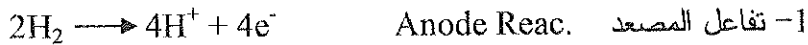


الشكل (5-5): البنية الأساسية لخلية الوقود

تجري تغذية خلية الوقود بالهيدروجين من جهة المصعد (anode) لذا يسمى هذا القطب "بقطب الوقود" (fuel electrode) وعنده تتفصل إلكترونات الهيدروجين عن بروتوناته بفعل المحفز مخلقة أيونات (شوارد) الهيدروجين H^+ ترحل بدورها عبر الكهرليت إلى المهبط، أما الإلكترونات فلا يمررها الكهرليت فتضطر إلى التدفق عبر دائرة خارجية (كالحمل مثلاً) لتهبط على القطب الآخر للخلية وهو المهبط (cathode)، وهذا مايشكل مرور التيار الكهربائي الذي يزودنا بالطاقة الكهربائية.

أما عند القطب الآخر - المهبط - فتغذى الخلية بالهواء لتوفير الأكسجين اللازم لعملها، لذلك يسمى المهبط هنا "بقطب الهواء" (air electrode)، وعند هذا القطب تعود إلكترونات الهيدروجين الآتية عبر الدارة الخارجية لتندمج مع أيونات الهيدروجين الآتية عبر الكهرليت، 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:



الكهروليت Electrolyte كما هو معروف في الخلايا الكهروكيميائية يجب أن يكون ناقلاً للأيونات (الشوارد)، وغير ناقل للإلكترونات.

5-6-3- طرز الخلايا الوقودية F.C.Types

لقد حظيت الخلايا الوقودية في الآونة الأخيرة باهتمام كبير من قبل المؤسسات والهيئات المعنية بصناعة الطاقة الكهربائية وتقنيات توليدها وتخزينها، فقد تم حتى الآن تطوير أكثر من تسعة طرز (types) نذكر منها فيما يلي الطرز الأكثر استخداماً وانتشاراً على المستويين العملي والتجاري :

1- خلايا الوقود القلوية AFC

2- خلايا الوقود ذات الحمض الفوسفوري PAFC

3- خلايا الوقود ذات الكربونات المصهورة MCFC

4- خلايا الوقود ذات ذات الغشاء البوليميري PEMFC

5- خلايا الوقود ذات الأكسيد الصلب SOFC

وهناك عدة طرز مازالت قيد التطوير أو الاختبار لاثبات الذات كالطراز DMFC- خلايا الميثانول المباشر، والطراز ZAFC - خلايا الزنك /الهواء، والطراز RSOFC- خلايا الأكسيد الصلب العكوسة، والطراز SAFC - خلايا الحمض الصلب.

وهكذا نرى أن تسمية الطراز لخلية الوقود تعود في المقام الأول إلى طبيعة كهrlيتها، فالخلايا القلوية كهrlيتها وسط قلوي من هيدروكسيد البوتاسيوم (KOH)، وخلايا الحمض الفوسفوري كهrlيتها حمض الفوسفور المركز، وخلايا الكربونات المصهورة كهrlيتها مزيج من كربونات الليثيوم والبوتاسيوم المصهورة وهكذا ...

كما تصنف الخلايا الوقودية حسب درجة حرارة عملها، فهناك خلايا الوقود ذات درجات الحرارة المنخفضة (حتى 200°C) مثل:

- خلايا الوقود القلوية AFC

- خلايا حمض الفوسفور PAFC

- خلايا الغشاء البوليميري PEMFC

وخلايا درجات الحرارة المرتفعة (أعلى من 600°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 للخلية كافية لبدء التفاعلات وتسريعها.

والميزة الثانية لخلايا درجات الحرارة المرتفعة أنها لا تحتاج إلى معالج خارجي external reformer للوقود، فيفضل درجات الحرارة العالية تصبح نظم الخلايا الوقودية قادرة على معالجة الوقود الهيدروكربوني (الوقود الأحفوري) داخلياً واستخلاص الهيدرجين اللازم لعمل الخلية، وبذلك يكون معالج الوقود في هذه الحالة من النوع (built - in).

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 (كالسيارات والأجهزة المحمولة) فتستخدم خزانات هيدرجين صغيرة مضغوطة محمولة تسمى "بالاسطوانات أو خراطيش الهيدرجين".

إن الجيل الأول من خلايا الوقود وهما الطرازان AFC و PAFC يستخدم كهربيًا سائلًا، ولتحاشي مشكلات الكهربية السائل من تسرب وغيره طُوّر طراز ثالث كهربيته غير سائل وهو الطراز PEMFC تلاه الطراز الرابع MCFC، لذا فإن هذين الطرازين 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 الكهربية الصلب السيراميكية فإنه يمكن رفع درجة حرارة عمل الخلية إلى 1000°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 الميغا 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 الفوسفوري وخلايا الكربونات المصهورة فقد ازدهرت صناعاتها وانتشر استخدامها بشكل واسع ما بين السبعينات والتسعينات من القرن الماضي، ولكن بسبب عيوبها ومشكلاتها الكثيرة تضاعف استخدامها ولم تعد تصنع منذ نهاية القرن الماضي.

وعليه فالخلايا المستخدمة في الوقت الحاضر هي خلايا الغشاء البوليميري PEMFC للتطبيقات الصغيرة والنقالة، وخلايا الأكسيد الصلب SOFC للتطبيقات الكبيرة والثابتة كمحطات التوليد العادية والهجينة، لذا سنأخذ هذين الطرازين بشئ من التفصيل في الفقرات المقبلة.

5-3-1- خلايا الوقود القلوية (AFC) Alkaline F.C.

تعد الخلايا القلوية أول طراز تم تطويره وتطبيقه عملياً، فمنذ ستينات القرن الماضي تستخدمه وكالة الفضاء الأمريكية (ناسا) لتزويد المركبات والمكايك الفضائية بالطاقة

الكهربائية وبالماء النقي، بعد ذلك امتد استخدامه إلى الغواصات والمنشآت البحرية والعسكرية الأخرى.

الكهرليت 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 (OH^-) المحررة عند المهبط بمساعدة المحفز، لتسري عبر الكهرليت إلى المصعد فتتفاعل مع هيدروجينه (هيدرجين التغذية) مشكلة الماء ومطلقة 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 ستتقل بدورها إلى المصعد عبر الكهرليت وهكذا كما في التفاعلات التالية:



والتفاعل الإجمالي للخلية :



المزية الفريدة لهذا الطراز من الخلايا الوقودية أنها يمكن أن تعمل عند درجة حرارة الغرفة (25°C) إذا كان تركيز الكهرليت 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 CO_2 الذي قد يكون موجوداً في الوقود أو الهواء المغذى إليها، فهذا الغاز عند دخوله الخلية سرعان مايتفاعل مع كهرليتها ويسبب تلوثه ومن ثم تلفه الأمر الذي يؤدي إلى انخفاض أداء الخلية بشكل كبير، ولتجنب ذلك يجب أن تغذى هذه الخلية بهيدرجين نقي وأكسجين نقي أيضاً. ومن الملوثات الأخرى التي تخفض من أداء هذه الخلية هو أول أكسيد الكربون CO والميثان 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 المبينة أعلاه - ولارتفاع تكاليف هذا الطراز لم ينتشر استخدام الخلايا القلوية في وسائل النقل ولا في التطبيقات الأرضية الأخرى، وإنما انحصر استخدامها في برامج الفضاء وللأغراض العسكرية الأخرى كما ذكر سابقاً.

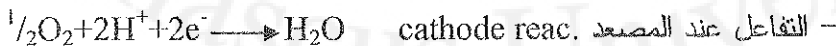
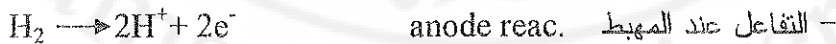
5-6-3-2- خلايا الوقود ذات الحمض الفوسفوري

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 كهربيته هذا الطراز من حمض الفوسفور المركز (H_3PO_4) والذي يصبح ناقلاً جيداً لأيونات 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 الناقلية الأيونية لحمض الفوسفور، وبالتالي ينخفض أداء الخلية.

حاملات الشحنة في خلايا حمض الفوسفور هي أيونات الهيدرجين (H^+) التي تنشأ عند المصعد نتيجة لتفكك ذرات هيدرجين التغذية بفعل المحفز، ومن ثم تسري عبر الكهربيته إلى المهبط، أما الإلكترونات فتندفق عبر الدارة الخارجية (الحمل) مشكلة تياراً كهربائياً مفيداً ومنجهاً إلى المهبط، حيث تعود هذه الإلكترونات وتتحد هناك مع أيونات الهيدرجين (الآتية من المصعد عبر الكهربيته) ومع أكسجين هواء التغذية لتشكل الماء كما في التفاعلات التالية :



تصنع أقطاب هذا الطراز من الغرافيت والمادة الحفازة من البلاتين، أما القلب الذي يحمل الكهرليت فهو من كربيد السيليكون.

مميزات خلايا حمض الفوسفور وعيوبها:

المزبأ

1) خفيفة التأثير بغاز ثاني أكسيد الكربون CO_2 وبمركبات الكبريت التي قد تكون موجودة في الوقود المغذى بها.

(2) بنيتها بسيطة وكهرابيتها عالية الاستقرار بالمقارنة مع الحموض الأخرى.

(3) حرارة تشغيلها منخفضة نسبياً، وبذلك يمكننا استخدام المواد الإنشائية الشائعة من

أجل بناء المتممات في المحطات (POB) Balance of Plant.

(4) حرارة عملها المنخفضة تعطي مرونة كبيرة في تصميم نظام التحكم بالحرارة.

وبذلك يرتفع مردودها الإجمالي وقد يصل إلى 70%.

المسافر

(1) تتطلب استخدام مادة حفازة غالية الثمن (البلاتين).

2) تتطلب معالجة وقود خارجية كاملة (Shifter مع Refomer) لمعالجة غاز CO، وذلك للحصول على أداء جيد.

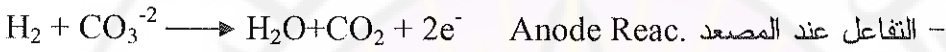
(3) تفرض طبيعة حمض الفوسفور استخدام مواد حاوية غالبية الثمن ذات مقاومة عالية للتآكل.

(4) تتطلب إعادة تزويد المصعد بالمادة الحفازة.

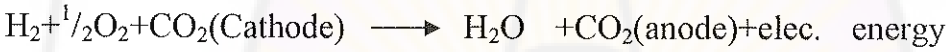
5-6-3-3- خلايا الكربونات المصهورة Molten Carbonate F.C (MCFC)

يستخدم في هذه الخلايا نوع من الكهرليت يستطيع نقل أيون الكربونات (CO_3^{2-}) كأملاح الكربونات القلوية، إذا فكهرييت هذا الطراز عبارة عن مزيج من كربونات الليثيوم مع كربونات البوتاسيوم أو كربونات الليثيوم مع كربونات الصوديوم، وهذا المزيج لا يصبح ناقلاً جيداً لأيون الكربونات إلا عند رفع درجة حرارته إلى ما فوق

600°C، حيث عند هذه الدرجة تتصهر الكربونات لتشكل ملحاً 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 هيدرجين الوقود المغذى إلى الخلية مع أيونات الكربونات الآتية من المهبط مشكلاً الماء وغاز CO₂ ومطلقاً الإلكترونات التي ستندفق عبر الدارة الخارجية محدثة تياراً كهربائياً ومتجهة إلى المهبط (قطب الهواء) حيث تتفاعل هناك مع أكسجين هواء التغذية ومع غاز CO₂ المغذى إلى المهبط أيضاً مشكلاً أيونات الكربونات CO₃²⁻ التي بدورها سترحل عبر الكهرليت إلى المصعد لتتفاعل 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 المصهورة وعيوبها:

المزايا

- (1) لا تحتاج لاستخدام مواد حفازة غالية الثمن .
- (2) لا تحتاج إلى معالج خارجي للوقود (external reformer) فبفضل ارتفاع درجة حرارة التشغيل بإمكان هذه الخلايا معالجة الغاز الطبيعي داخلياً لاستخلاص الهيدرجين اللازم، لذا فيإمكان 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 وعندها يرتفع المردود الإجمالي للنظام حتى 80%.

المساوئ

- 1) تبدد الكربونات مما يستدعي إعادة تزويد الخلية بالكربونات بشكل دائم.
- 2) تتطلب وجود مصدر لـ CO_2 لتزويد المهيبط به، وعادة ما يعاد استخلاصه من عادم المصعد الأمر الذي يتطلب عناصر متممة إضافية، كما يستلزم وجود تحكم مستمر في كمية CO_2 الموجودة في هواء التغذية للخلية.
- 3) ذات إقلاع بطئ 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.

5-6-3-4- خلايا الغشاء البوليميري

Polymer Electrolyte Membrane F.C (PEMFC)

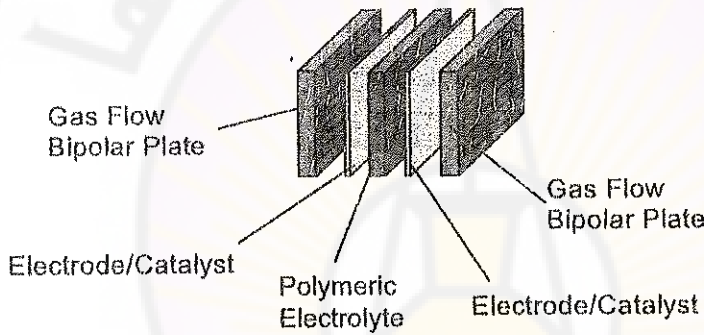
ويسمى هذا الطراز أيضاً بـ "خلايا غشاء التبادل البروتوني F.C (Proton Exchange Membrane) ولعل هذا الطراز هو أنسب طرز الخلايا الوقودية للتطبيقات الصغيرة (حتى 200kW) وبخاصة للاستخدامات المتنقلة وعلى رأسها وسائل النقل، فقد شاع في الآونة الأخيرة استخدام خلايا PEM في السيارات الكهربائية، كما شاع استخدام هذا الطراز في تطبيقات نظم الطاقات المتجددة لاستعادة الطاقة المخزنة على هيئة هيدرجين شمسي (solar hydrogen).

الكهرليت في هذا الطراز هو عبارة عن غشاء بوليميري صلب (غشاء بلاستيكي رقيق) يحتوي على حمض السلفون المغلور الرطب أو المميّه (Hydrated)

Fluorinated Sulfonic Acid Polymer) أو أي بوليمير مشابه يقوم بنقل البروتون (H^+).

إن عملية ترطيب (تميه) هذا الكهرليت ضرورية للحفاظ على ناقلية جيدة للبروتونات، فأداء الخلية يتأثر بشكل كبير بكمية الماء المتواجدة في الغشاء، لذا يجب أن لا يكون معدل تبخر هذا الماء أكبر من معدل تزويده، الأمر الذي يستوجب أن تكون درجة حرارة عمل الخلية أقل من $100^\circ C$ ، والمجال الأفضل لها هو بين 60 و 80 مئوية. تصنع أقطاب هذا الطراز من الغرافيت المضاف إليه البلاستيك كمادة حفازة .

يبين الشكل (5-6) التركيبة الأساسية لخلية وقود مفردة من هذا الطراز ، فالمكونات الأساسية لها هي (من اليسار إلى اليمين):



الشكل (5-6): المكونات الأساسية لخلية PEMFC [44]

1) صفيحة جريان الغاز (gas flow plate) وتكون إما ثنائية التخذيد (bipolar) أي أن مجاري جريان الغاز محفورة على وجهيها إذا كانت الخلية ضمن الكُـس in-stack cell، أو أحادية التخذيد في حال الخلية المفردة single cell أو كانت الخلية في بداية الكدس أو نهايته.

ولهذه الصفيحة عدة وظائف في الخلية:

- توزيع الوقود (الهيدرجين) والهواء الداخل إلى الخلية.
- الفصل بين الخلايا في الكدس الواحد.

- تجميع التيار لتوصيله إلى الدارة الخارجية.

- ترطيب الغازات.

- جريان الماء في الخلية.

- الحفاظ على الخلية مبردة.

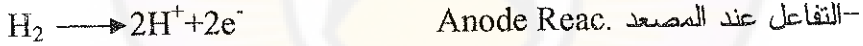
(2) القطب الأول (المصعد) مع المحفز electrode/catalyst.

(3) الكهرليت البوليميري polymeric electrolyte.

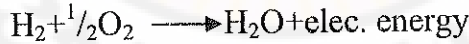
(4) القطب الثاني (المهبط) مع المحفز electrode/catalyst.

وبعد ذلك تأتي صفيحة جريان الغاز ثم الخلية التالية، وهكذا.

أما آلية التفاعل في هذا الطراز فهي كما في خلايا الحمض الفوسفوري، حيث تتفكك ذرات الهيدرجين المغذى إلى المصعد (بفعل المحفز) إلى بروتونات وإلكترونات. تتجه البروتونات والتي هي عبارة عن أيونات الهيدرجين (H^+) عبر الكهرليت إلى المهبط، أما الإلكترونات فتتدفق عبر الدارة الخارجية إلى المهبط محدثة بذلك تياراً كهربائياً مفيداً. وعند المهبط حيث تجري تغذية الخلية بأكسجين الهواء تعود إلكترونات الهيدرجين الآتية من المصعد عبر الدارة الخارجية لتندمج مع أيونات الآتية عبر الكهرليت ومن ثم تتفاعل مع الأكسجين المغذى لتشكل الماء ، ويمكن تلخيص ذلك بالتفاعلات:



- التفاعل الإجمالي للخلية:



مميزات خلايا الغشاء البوليميري وعيوبها:

المزايا

(1) كهرليتها الصلب يجنبنا مشكلات التسرب والتآكل وإعادة التزويد المرتبطة بالكهرليت السائل.

- (2) حرارة عملها المنخفضة تسمح بعملية إقلاع سريعة.
- (3) تنتج كثافة استطاعة مرتفعة نسبياً إذا ماقورنت بالطرز السابقة.
- (4) عمرها الفني طويل نسبياً.

المساوئ

- (1) المجال الضيق لحرارة التشغيل يجعل من عملية التحكم الحراري (thermal managing) صعبة خصوصاً عند الكثافات العالية للاستطاعة .
- (2) تحتاج لآلية تحكم دقيقة بكمية الماء، حيث يلزم تحقيق ترطيب كافٍ للكهرليت البوليميري 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 الهيدرجين، لذا فإنها تحتاج إلى معالج خارجي للوقود (external reformer) في حال الوحدات الكبيرة، أما الوحدات الصغيرة فتتغذى من عبوات الهيدرجين الجاهزة.
- (5) تحتاج لمواد حفازة غالية الثمن مثل البلاتين.

5-3-6-5- خلايا الأكسيد الصلب (SOFC) Solid oxide F.C.

ينتمي هذا الطراز إلى فئة الخلايا ذات الكهرليت الصلب عالية الحرارة، ولعله يعد من أفضل طرز الخلايا المتاحة على المستوى التجاري باستطاعات كبيرة (من رتبة الميغا واط).

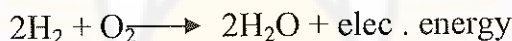
تتميز هذه الخلايا بأنها تعمل بفعالية عالية عند الضغط الجوي ودرجات حرارة عالية تصل إلى 1000°C ، وتتمتع بمقدرة جيدة على معالجة الغاز الطبيعي بإعادة تشكيله (natural gas reforming)، وعلى الاستخدام المباشر لأنواع الوقود الملوثة كغاز CO والغاز المستخلص من الفحم الحجري والمشتقات النفطية الثقيلة. كذلك فإن درجة حرارة الغازات العادمة لهذه الخلايا تتراوح ما بين 600°C و 900°C ، مما يسمح بالاستفادة من هذه الحرارة العادمة في توليد إضافي للطاقة الكهربائية (عن

طريق (FC/GT) أو لأغراض التدفئة والتسخين أو لتوليد البخار للأغراض الصناعية الأمر الذي يؤدي إلى رفع مردودها الإجمالي إلى أكثر من 85%.

يتكون الكهرليت في هذا الطراز من طبقة خزفية (سيراميكية) رقيقة جداً من أكاسيد المعادن، وغالباً ماتكون من أكسيد الزركونيوم المثبت بأكسيد الإيتريوم (Y_2O_3 -Stabilized ZrO_2) وعند درجة حرارة أعلى من $600^\circ C$ تصبح هذه المادة ناقلة لأيونات السالبة مثل أيونة الأكسجين (O^{2-}) ، لذا فإن المجال الأفضل لعمل هذه الخلايا هو ما بين $800^\circ C$ و $1000^\circ C$ مئوية، حيث يصبح كهرليتها هذا ناقلاً جيداً لأيونات الأكسجين التي تنتج عند المهبط بسبب التقاط كل ذرة من ذرات أكسجين التغذية إلكترونين من الإلكترونات الآتية إلى المهبط من المصعد عبر الدارة الخارجية. إن أيونات الأكسجين السالبة هذه الناتجة عند المهبط تتجه عبر الكهرليت الصلب إلى المصعد لتتفاعل عنده مع هيدرجين التغذية مشكلة الماء ومطلقة إلكترونات تتدفق عبر الدارة الخارجية متجهة إلى المهبط كما هو مبين في التفاعلات الآتية:



والتفاعل الإجمالي للخلية:



يُصنع قطب المصعد في هذا الطراز من سبيكة سيراميكية مسامية من النيكل مع أكسيد الزركونيوم ($Ni-ZrO_2$)، أما قطب المهبط فيصنع من مغنيت اللانثانيوم المعجون بالسسترونيتيوم ($Sr\text{-doped } La MnO_3$) وهي مادة مسامية أيضاً.

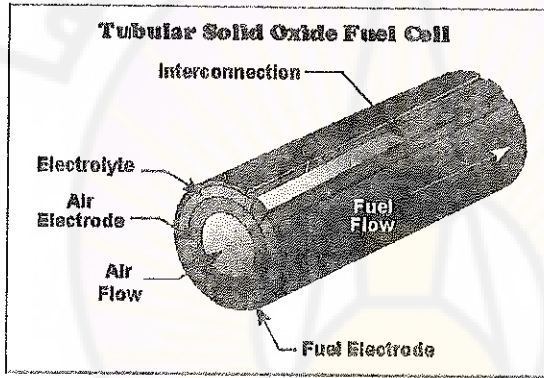
تصمم خلايا الأكسيد الصلب على شكلين:

- 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 الكهرليت.

يُمرر الهواء داخل الأنبوب، في حين أن الوقود يمرر بشكل ملاصق للسطح الخارجي للمصعد. وبهذا التصميم للخلية لن تحتاج لمواد إحكام فهو قادر على الفصل بين الوقود والهواء، لكنه يعاني من مشكلتين أساسيتين: ارتفاع تكاليف التصنيع وانخفاض كثافة الاستطاعة. ويبين الشكل (5-7) المكونات الأساسية لهذا التصميم وهي:



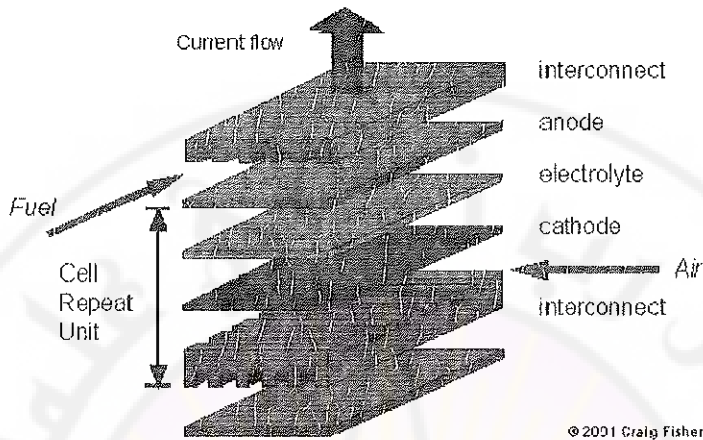
الشكل (5-7): المكونات الأساسية لخلية SOFC بتصميم أنبوبي [46]

- قطب الوقود fuel electrode وهو المصعد،
- الكهرليت electrolyte،
- قطب الهواء air electrode وهو المهبط،
- صفيحة التوصيل البيني interconnection.

ب- التصميم المستوي

يتميز هذا التصميم لخلايا الأكسيد الصلب ببساطة تصنيعه وتركيبه مما يسهل عمليات التكديس والتوصيل بين الأقطاب إضافة إلى تعدد سبل تمرير الغازات (باتجاه واحد أو اتجاهين متعاكسين أو بشكل متصالب)، والمزية الأهم هي انخفاض المقاومة الداخلية

بسبب قصر طريق حاملات الشحنة الأمر الذي يتيح الحصول على كثافة استطاعة أعلى مقارنة بالتصميم الأنبوبي.
ويبين الشكل (5-8) المكونات الأساسية لهذا التصميم وهي:



الشكل (5-8): المكونات الأساسية لخلية SOFC بتصميم مستوي [46]

- المصعد. anode،
- الكهرليت electrolyte،
- المهبط cathode،
- صفيحة التوصيل البيني interconnect.

مزايا الأكسيد الصلب وعيوبها

المزايا:

- (1) البناء السيراميكي الصلب للخلية يلغي مشكلات التسرب والتآكل.
- (2) إن طبيعة الكهرليت السيراميكية 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) لاحتياج إلى مادة حفازة، فدرجة الحرارة العالية للخلية كافية لإقلاع عمليات التفاعل وتسريعها.

(6) ذات مردود عالٍ بالمقارنة مع الطرز الأخرى ويصل إلى 55%.

(7) تصلح للاستخدام في محطات التوليد المركزية الكبيرة وللتوليد الموزع على السواء.

(8) حرارة عادمها المرفعة تسمح بتوليد إضافي للطاقة الكهربائية من خلال النظم الهجينة (FC/GT).

المساوئ:

(1) درجة حرارة التشغيل العالية تفرض اعتبارات معينة على مواد بناء الخلية مما يرفع من تكاليفها.

(2) مقاومة كهربيته الأيونية كبيرة نسبياً مما ينعكس سلباً على أداء الخلية في أثناء تحميلها وبخاصة عند كثافات التيار العالية.

(3) بطيئة الإقلاع بسبب ارتفاع درجة حرارة تشغيلها.

في نهاية هذا العرض الموجز لطرز الخلايا الوقودية نورد جدولاً 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 الايتريوم	الكربونات المصهورة	حمض الفوسفور	هيدروكسيد البوتاسيوم	الكهروليت
H^+	O^{2-}	CO_3^{2-}	H^+	OH^-	حاملات الشحنة
95-60	1000-800	650-600	220-180	100-25	حرارة التشغيل °C

الوقود	H ₂	H ₂	H ₂ ,CO والهيدروكربونات	H ₂ ,CO والهيدروكربونات	H ₂
المادة الخام للقود	H ₂	الغاز الطبيعي ،LPG الميثانول والنفثا	الغاز الطبيعي ،LPG النفط وغاز الفحم	الغاز الطبيعي ،LPG النفط وغاز الفحم	الغاز الطبيعي ،LPG الميثانول والنفثا
مردود التوليد %	45-35	45-35	50-45	55-50	45-35
الاستطاعات	<1KW- 100KW	250KW- 5MW	500KW- 5MW	5KW-3MW	1KW- 250KW

5-6-4- 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 عدة 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 طبيعي NG، غاز مسال LPG، فحم، بروبان، نفثا وغيرها) كما يمكنها العمل على الوقود الحيوي (biofuel).

(2) تمتلك مردوداً عالياً، يصل إلى 55% في الطراز SOFC، نظراً لعدم خضوعها لقيود قوانين الترموديناميك 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 الآهلة 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 مصدراً احتياطياً موثقاً جداً كما أنها تصلح بذلك لتغذية مستهلكي الفئة الأولى.
- (7) عملية إقلاعها سهلة وسريعة فهي تصلح لتغذية أحمال الذروة والأحمال المنقطعة 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 المحلي.
- (10) ذات زمن انشاء منخفض.
- (11) تقدم طاقة كهربائية بنوعية عالية.
- (12) معدل انخفاض التوتر مع الزمن بتأثير التقادم ضئيل.
- (13) مردودها ضعيف التأثير بتغير الحمل فهي مناسبة جداً للمناطق الريفية والنائية حيث الفروقات بين الحمل الأعظمي والأصغري كبيرة.
- (14) حاجتها للصيانة منخفضة جداً.
- (15) تمتاز بإمكانية جيدة لتتبع 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 التوسع بسيطة وسريعة.

19) لها قابلية ممتازة للتكامل مع نظم الطاقات المتجددة لتوليد الهيدروجين وتخزينه.

20) تبقى الميزة الأهم وهي انخفاض تلويثها للبيئة إلى حد كبير، فهي تعد من التقنيات النظيفة والصديقة للبيئة، وذلك نظراً لارتفاع مردودها الذي سينعكس على نسبة الانبعاثات الملوثة الصادرة عنها.

ب- في مجال وسائط النقل

- 1) انخفاض الانبعاثات الضارة وكذلك الضجيج منخفض جداً.
- 2) درجات حرارة عمل منخفضة وضغوط منخفضة أيضاً.
- 3) كثافة استطاعة خرج عالية وبالتالي حجوم صغيرة نسبياً.
- 4) متممات أقل وأبسط بالمقارنة مع المتممات اللازمة لمحركات الاحتراق الداخلي .
- 5) حاجة أقل إلى التهوية والتبريد.
- 6) حاجة أقل إلى الصيانة والإصلاح.
- 7) عمر فني طويل نسبياً.

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 المستخرج منها.

سوف نركز عند دراسة أداء خلايا الوقود على الناحية الطاقية والمحددات الكهربائية دون الغوص في التفاصيل الترموديناميكية لآليات تفاعلاتها الكهروكيميائية، كما سنقتصر في دراسة الأداء هذه على الطرازين الأخيرين - خلايا الغشاء البوليميري PEMFC وخلايا الأكسيد الصلب SOFC كونها الأكثر استخداماً وشيوعاً في الوقت الحاضر كما بينا ذلك سابقاً.

5-6-5-1- 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 ($E_{o.c.}$) تتعلق بظروف عمل الخلية من حرارة وضغط، إذ تعتمد قيمتها بشكل مباشر على مقدار تغير طاقة جيبس الحرة (Gibbs free energy) للتفاعل الكهروكيميائي الحاصل ضمن الخلية، فهي تُحدّد من علاقة توازن الطاقة التالية [47]:

$$\Delta G = - n.F.E_{o.c.}$$

ومنه:

$$E_{o.c.} = - \Delta G/nF \quad (1-5)$$

حيث:

ΔG : تغير طاقة الجيبس الحرة ويقدر بالجول لكل مول (J/Mol).

n : عدد الإلكترونات المشاركة في التفاعل والموجودة في كل مول من الوقود، وقيمتها للهيدروجين تساوي 2.

F : ثابت فاراديه 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 ΔG من تابع الحالة الحرارية التالي [47]:

$$\Delta G = \Delta H - T. \Delta S \quad (2-5)$$

حيث:

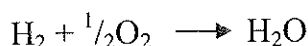
ΔH : تغير الانتالبي وهو يمثل الطاقة الحرارية الكلية المتاحة من التفاعل (J/Mol).

T : درجة حرارة التفاعل (K).

$T. \Delta S$: تمثل الطاقة الحرارية الضائعة والناجمة عن تغير انتروبي الجملة.

ΔS : هي عبارة عن كمية الحرارة المنقولة إلى الوسط المحيط (J/Mol).

إن قيم ΔH و ΔG للتفاعلات الكهروكيميائية في الخلايا الوقودية تتعلق بكل من درجة حرارة وضغط تشغيل الخلية، وتعطى عادة في جداول خاصة، والجدول (2-5) يعطي هذه القيم للتفاعل



وذلك عند الضغط الجوي ودرجات حرارة تشغيل مختلفة [47]:

الجدول (2-5): قيم كل من تغير الانتالبي وتغير طاقة جيبس الحرة عند درجات حرارة

مختلفة وعند ضغط 1atm

G (KJ/Mol)	H (KJ/Mol)	حالة H ₂ 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 ΔH و ΔG ناجمة عن كون تفاعلات الخلايا الوقودية تفاعلات مصدرة للطاقة (exoergic reactions).

Gibbs Potential -1-1-5-6-5 توتر جيبس لخلية الوقود

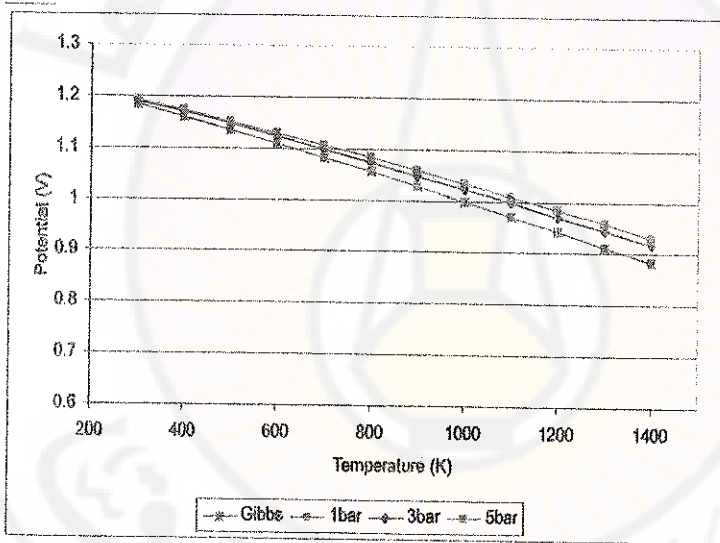
بعد معرفة قيمة G لتفاعل خلايا الوقود الهيدروجيني أصبح بالإمكان حساب قيمة القوة المحركة الكهربائية (أو ما يسمى بالتوتر المثالي للخلية) باستخدام العلاقة (1) بعد تبديل قيمة n للهدرجين:

$$E_{o.c.} = - \Delta G / 2F \quad (3-5)$$

وذلك عند درجة حرارة وضغط تشغيل معينين.
وفي الحالة الخاصة عندما لا يحتسب تأثير ضغط التشغيل تصبح تسميته 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 (9-5): علاقة توتر جيبس وتوتر نيرنست مع درجة الحرارة [49]

5-6-5-2- نوتر 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 الجزئية للغازات ضمن الخلية

ويدعى "حد نيرنست" فتصبح العلاقة العامة للتوتر على أطراف الخلية في حالة الدارة المفتوحة ، والذي يرمز له في هذه الحالة بـ E_N ، كما يلي [48]:

$$E_N = -\frac{\Delta G}{2 \cdot F} + \left(\frac{R \cdot T}{2 \cdot F}\right) \cdot \ln \left(\frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right) \quad (5-5)$$

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 $^\circ\text{K}$.

P_{O_2} : الضغط الجزئي للأكسجين ضمن المادة المؤكسدة (الهواء).

P_{H_2} : الضغط الجزئي للهيدروجين في الوقود.

P_{H_2O} : الضغط الجزئي لبخار الماء الناتج.

وبين الشكل (5-9) المأخوذ من المرجع [49] علاقة كل من توتر نيرنست وتوتر جيبس مع درجة الحرارة وذلك عند ضغوط تشغيل مختلفة، حيث نلاحظ انعدام حد نيرنست عند الضغط 1 bar أي يصبح $E_N = E_G$.

5-6-5-2 أداء خلية الوقود تحت الحمل F.C. Actual Performance

1- منحنى الاستقطاب لخلية الوقود

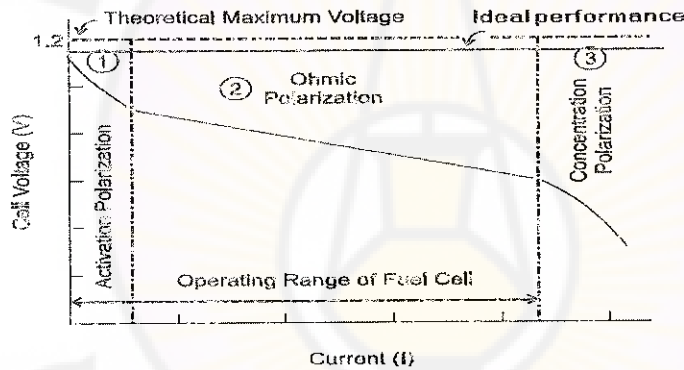
إن خلية الوقود، شأنها شأن أي مولد كهربائي، يؤدي تحميلها إلى هبوطات في التوتر وضياعات في الطاقة، وإن عملية حدوث هبوط في توتر الخلية لدى تحميلها تدعى بظاهرة "استقطاب الخلية" (F.C.Polarization)، وذلك على غرار ظاهرة الاستقطاب في المدخرات الكهربائية، وإن المنحنى الذي يرسم العلاقة بين التوتر على أطراف الخلية والتيار المستخرج منها (I-V curve) يسمى "بمنحنى الاستقطاب".

(polarization curve) للخلية، وهو يعد أهم مميز يصف أداء خلية الوقود تحت الحمل.

إن التوتر على أطراف الخلية في حالة الدارة المفتوحة هو، كما بُين 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 مغاير، وفي الحالة العامة يُعتمد توتر نيرنست:

$$E_{o.c.} = E_N$$

عند تحميل الخلية تبدأ ظاهرة الاستقطاب بالتأثير وينخفض التوتر على أطراف الخلية بشكل يتناسب مع تيار التحميل، والشكل (10-5) يبين الشكل النمطي لمنطوي الاستقطاب لخلايا الوقود.



الشكل (10-5): الشكل النمطي لمنحني استقطاب الخلية الوقودية [47]

وهكذا نرى أن التوتر الفعلي للخلية (actual voltage) والذي سيرمز له لاحقاً بـ V_{cell} يقل عن التوتر المثالي أو ما يسمى 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 الناتج عن التركيز (concentration polarization) ويسمى أيضاً بضياع التركيز (concentration loss).

- ضياع الاستقطاب الناتج عن المقاومة الأومية (ohmic polarization) ويسمى أيضاً بالضياع الأومي (ohmic loss).

هذه الضياعات جميعها ضياعات توتر (هبوط توتر) وتقدر بالفولط أو الملي فولت، لذلك سيرمز لها بـ V_{act} و V_{con} و V_{ohm} على التوالي. وبالتالي يُعطى التوتر الفعلي بالعلاقة التالية:

$$V_{cell} = E_N - V_{act} - V_{con} - V_{ohm} \quad (6-5)$$

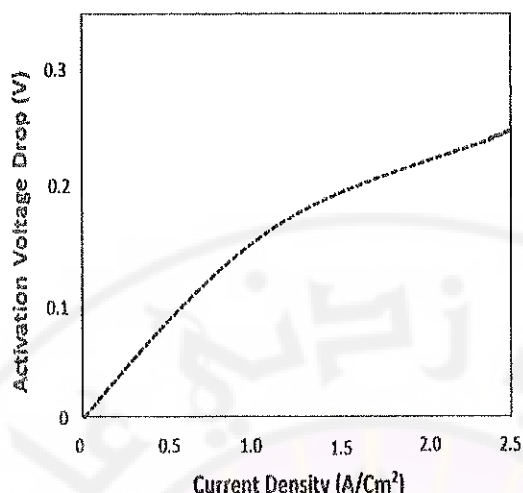
2- هبوط التنفيع Activation Voltage Drop

لكل تفاعل كيميائي عتبة من الطاقة يجب تجاوزها لكي يبدأ التفاعل، تدعى هذه العتبة "طاقة التنفيع" ولا بد 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 التنفيع 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 التنفيع هذا مع زيادة كثافة تيار التحميل بعلاقة لوغاريتمية كما هو مبين في الشكل (5-11)، حيث يكون معدل زيادته في البداية كبيراً يتناقص بعدها بشكل ملحوظ عند القيم العليا لكثافة التيار.



الشكل (5-11): علاقة هبوط التفصيل بكثافة تيار التحميل
عند درجة حرارة تشغيل معينة [50]

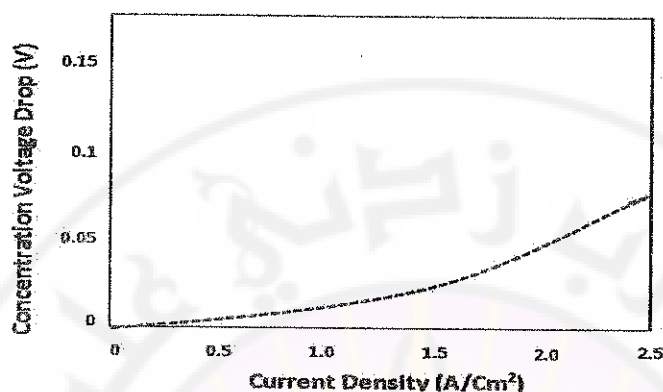
3- هبوط التركيز Concentration or Mass transport Voltage Drop

ينتج هذا الهبوط عن تغير تراكيز 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 لإنتاج تيار بشدة معينة. وتعتمد قيمة هذه المركبة بشكل أساسي على كثافة التيار المستقر، لذا فإن تأثيرها لا يظهر بوضوح إلا عند القيم الكبيرة لكثافة 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 ومحدباً عند كثافات التيار المرتفعة لذلك لا يفضل تحميل الخلية بهذه القيم المرتفعة من كثافات التيار، في حين تنخفض قيمتها في مجال كثافات التيار المنخفضة وحتى المتوسطة (حتى 1.5 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 الكهرليت 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 (Ω) وتتألف من ثلاث 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).

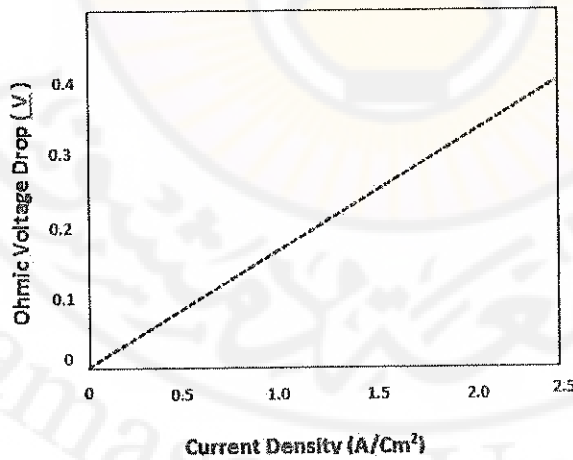
R_{ionic} : المقاومة الأيونية، وهي عبارة عن مقاومة مرور الأيونات عبر طبقة الكهرليت التي تكون عادة ذات مقاومة نوعية عالية (high resistivity).

$R_{intercon}$: مقاومة التوصيل البيني (interconnection).

ويمكن لأي مركبة من هذه المركبات أن تسيطر على قيمة المقاومة الكلية الأومية وذلك تبعاً لنوع الخلية، فمثلاً في خلايا SOFC المستوية ذات الكهرليت المدعم تكون المقاومة الأيونية هي المسيطرة، أما في النوع الاسطواني فإن المقاومة الإلكترونية تكون هي الغالبة.

إن قيمة R_{ohm} تتعلق بأبعاد مكونات الخلية (سماكة الأقطاب والكهرليت) وكذلك بنوع المواد المستخدمة وتقنية التصنيع، وتتعلق أيضاً بدرجة الحرارة، فهي تنخفض بارتفاع درجة الحرارة [50].

أما الهبوط الأومي ΔV_{ohm} فهو يتناسب طردياً مع كثافة التيار المستقر ويمكن اعتبار تناسبه خطياً كما هو ظاهر في الشكل (5-13) أدناه، حيث تكون مقاومة الخلية الأومية ثابتة تقريباً مع تغير كثافة تيار التحميل ، وذلك عند درجة حرارة تشغيل معينة.



الشكل (5-13): علاقة هبوط التفعل بكثافة تيار التحميل عند درجة حرارة تشغيل معينة [50]

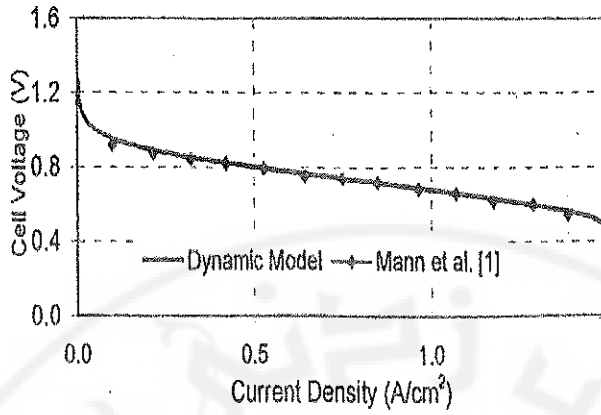
5- الشكل العملي لمنحني الاستقطاب Actual Polarization curve

في التطبيقات العملية لخلايا الوقود يُحاول دوماً تحسين شكل منحني الاستقطاب، الذي هو عبارة عن منحني I-V لها، وذلك من خلال تخفيف أثر هبوطي التفعيل والتركيز إلى أقل حد ممكن بهدف الحصول على خواص I-V محسنة للخلية وبالتالي على أداء أفضل لها.

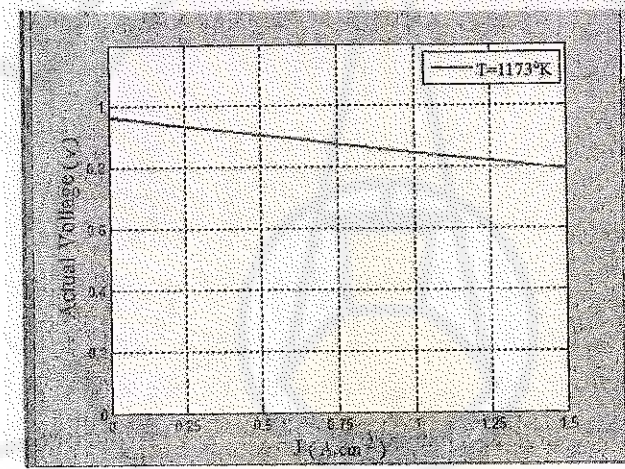
يمكن تقليل قيمة هبوط التفعيل (activation drop) بالاختيار الصحيح لنوع المادة الحفازة وتحسين تصميم الخلية، هذا مع العلم أن ارتفاع درجة حرارة عمل الخلية يحد كثيراً من تأثير هذا الهبوط إلى حد يمكن معه إهماله كما هو الحال في خلايا الأكسيد الصلب SOFC.

أما هبوط التركيز فيكفي لتخفيف أثره التقيد بالحدود المعقولة (المنطقية) لكثافة 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 الأومي) هو الغالب والمسيطر على شكل منحني الاستقطاب ليجعله قريباً جداً من الخط المستقيم، والشكلان (5-14) و (5-15) يبينان شكل منحني الاستقطاب لخلايا من طراز PEMFC وأخرى من طراز SOFC قد تم الحصول عليهما تجريبياً من خلال دراسة عملية لخصائص كل من هذين الطرازين قام بها الباحثون المذكورون في ثبت المراجع.



الشكل (14-5): الشكل العملي لمنحني الاستقطاب لخلية PEMFC [51]



الشكل (15-5): الشكل العملي لمنحني الاستقطاب لخلية SOFC [52]

6- منحني الاستطاعة المقدمة من الخلية F.C. Power curve

تتغير الاستطاعة المقدمة من الخلية بتغير كل من توتر الخلية V_{cell} والتيار المستقر I منها:

$$P = V_{cell} \cdot I \quad (9-5)$$

وحيث أنه يُفضل تقدير الاستطاعة لخلايا الوقود وكذلك التيار المستقر بالكثافة (لواحدة السطح الفعال من الخلية):

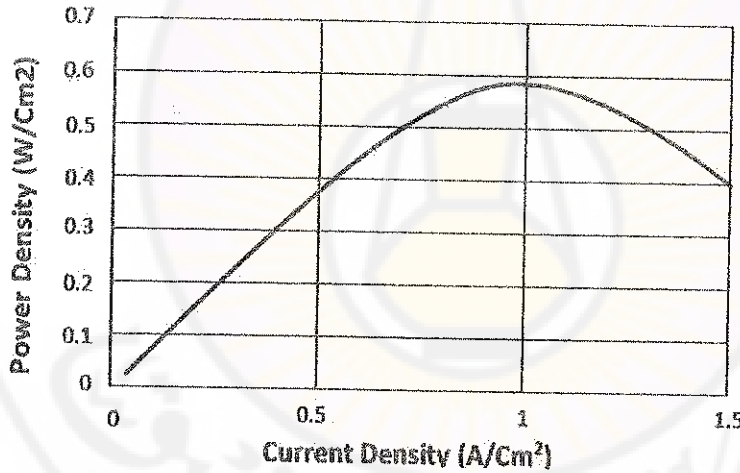
$$P = V_{cell} \cdot J \quad (10-5)$$

حيث:

P: كثافة الاستطاعة المقدمة من الخلية power density (W/cm²).

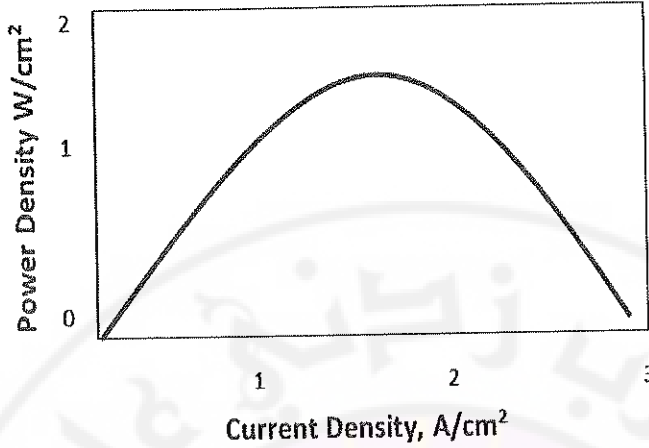
J: كثافة التيار المستجر current density (A/cm²).

إن التوتر على أطراف الخلية V_{cell} يتغير كما بُين سابقاً وفقاً لمنحني استقطاب الخلية فينخفض بزيادة التيار المستجر، وهذا يعني أن هناك نهاية عظمى للاستطاعة التي يمكن استجراؤها 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 (16-5) يبين نموذجاً لمنحني كثافة الاستطاعة المقدمة من خلية وقود طراز PEMFC عند ضغط 1 atm وحرارة 70°C.



الشكل (16-5): منحني كثافة الاستطاعة لخلية من طراز PEMFC [53]

أما الشكل (17-5) فيبين نموذجاً لمنحني كثافة الاستطاعة المقدمة من خلية وقود طراز SOFC عند ضغط 1 atm وحرارة 900°C.



الشكل (5-17) : منحنى كثافة الاستطاعة من طراز SOFC [53]

5-6-3-5-3-المردود المثالي والمردود الفعلي لخلية الوقود

F.C. Ideal and Actual Efficiency

1-المردود المثالي لخلية الوقود : F.C. Ideal Efficiency

إن المردود المثالي - أو ما يسمى في بعض المراجع بالمردود النظري - لخلية الوقود هو المردود الترموديناميكي ، ويدعى أيضاً المردود الحراري ، ويتعلق بخصائص الوقود المستخدم وضغط ودرجة حرارة التشغيل، ويعبر عنه بنسبة الطاقة المفيدة المحصول عليها إلى الطاقة المتاحة لعملية التحويل وهي مقدار التغير في الانتالبي H:

$$\eta_{ideal} = \text{Useful energy} / \Delta H \quad (11-5)$$

تقوم خلايا الوقود بتحويل الطاقة الكيماوية للوقود إلى طاقة كهربائية بشكل مباشر، لذلك فإن التعبير عن الطاقة المفيدة يكون من خلال تغير طاقة حبيس الحرة عند درجة حرارة وضغط تشغيل للخلية ، وعليه يُعبر 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 $P = 1 \text{ atm}$ و $T = 25^\circ \text{C}$ والماء الناتج في الحالة السائلة فإن قيم G و H لتفاعل أكسدة الهيدروجين هي حسب الجدول (5-2):

$$\Delta H = 285.9 \text{ KJ/Mol}$$

$$\Delta G = 237.2 \text{ KJ/Mol}$$

وبالتالي فإن المردود المثالي عند استخدام الهيدروجين والأكسجين في الحالة النقية:

$$\eta_{ideal} = 237.2/285.9 = 0.83\%$$

إن هذه القيمة المثالية (النظرية) للمردود هي قيمة ستوكومترية وهي تمثل الحد الأعلى للمردود الذي لا يمكن تجاوزه لخلايا الهيدروجين - الأكسجين عند ذات الشروط من الحرارة والضغط.

2- المردود الفعلي لخلية الوقود F.C. Actual Efficiency

من الطبيعي عند تحميل الخلية أن ينخفض مردودها الفعلي عن المردود المثالي لها وذلك بسبب نشوء عوامل خافضة للمردود أهمها ضياعات الاستقطاب وعدم تفاعل كامل كمية الوقود (الهيدروجين) المغذى للخلية بالإضافة إلى احتمال كونه غير نقي 100% وكذلك الأكسجين المغذى 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 (5-9).
2. مردود التوتر: إن التوتر الفعلي للخلية، يكون كما بُين 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) كالتآكل وغيرها أو بسبب عدم النقاوة التامة للهيدرجين المغذى .

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% ، علماً 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 نيرنست اللوغاريتمي ، وبخاصة عند العمل بضغط غير عالية ، 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 لوحده لا يكفي لتقييم أداء الخلية بصورة صحيحة (كما تعتمد إلى ذلك بعض المراجع في هذا المجال) وإنه 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) تربينا أنه عند شروط تشغيل معينة للخلية فإن مردودها الفعلي يصبح تابعاً مباشراً لتوتر الخلية V_{cell} ، إذ إن قيم كل من ΔH و ΔG يمكن الحصول عليها من الجداول الخاصة بها كالجداول (5-2)، أما E_G فيمكن تحديدها من العلاقة (5-4).

فعلى سبيل المثال لخلايا الهيدروجين والأكسجين عند الحرارة والضغط النظاميين ($P=1\text{ atm}$ و $T=298\text{ K}$) 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:

$$E_{o.c.} = E_{ideal} = E_N = E_G = 237.2 \times 10^3 / (2 \times 96487) = 1.229 \text{ v}$$

وذلك بفرض أن كلاً من الهيدروجين والأكسجين نقيان تماماً .

وبالتبديل في العلاقة (5-16) تصبح علاقة المردود الفعلي لخلايا الهيدروجين - أكسجين كما يلي :

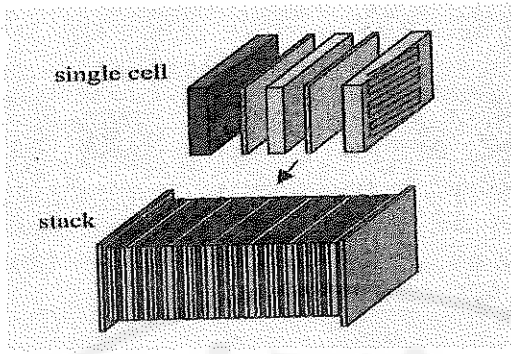
$$\eta_{actual} = \frac{0.83}{1.229} \cdot V_{cell} \cdot U_f \quad (17-5)$$

وباعتبار القيمة النمطية لـ U وهي 0.85 يصبح:

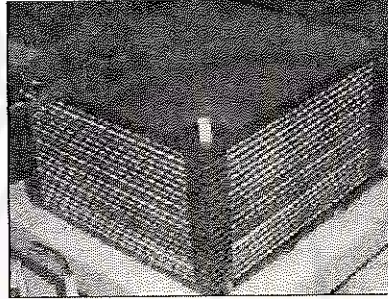
$$\eta_{actual} = 0.574 \cdot V_{cell} \quad (18-5)$$

5-6-6- F.C. Systems منظومات الخلايا الوقودية

إن الخلية الوقودية هي عنصر توليد منخفض التوتر ، توترها الفعلي أقل من 1 فولت، لذا فللحصول على التوتر المناسب يلزم ربط عدد معين من الخلايا على التسلسل لتشكل ما يسمى بالكُـنـس (F.C.Stack) كما هو مبين بالشكلين (5-18) و (5-19):



الشكل (5-18): كُـدس خلايا وقود من طراز PEMFC [48]



الشكل (5-19): كُـدس خلايا وقود من طراز SOFC [47]

وللحصول على التيار اللازم (الاستطاعة اللازمة) يُعتمد إلى ربط الأكداـس على التفرع لتشـكل مايسمى 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 ما تصادف أكداـس الخلايا الوقودية بمفردها إنما تعمل ضمن منظومة متكاملة من التجهيزات المتممة التي لا بد منها للتحكم بمدخلات الكدس ومخرجاته للحصول على أفضل أداء وأعلى مردود. وتعتمد درجة تعقيد هذه المتممات وتعدد وظائفها على طبيعة الطراز المستخدم ودرجة حرارة عمله (منخفض 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 تشترك في التجهيزات الأساسية التالية:

1- وحدات تخزين الوقود كاسطوانات الهيدروجين وغيرها من الخزانات، وذلك لخلايا الحرارة المنخفضة (خلايا PEM)، أما لخلايا الحرارة المرتفعة (SOFC) فيستعاض عنها بمعالج الوقود (fuel reformer).

2- مضخات تغذية الوقود.

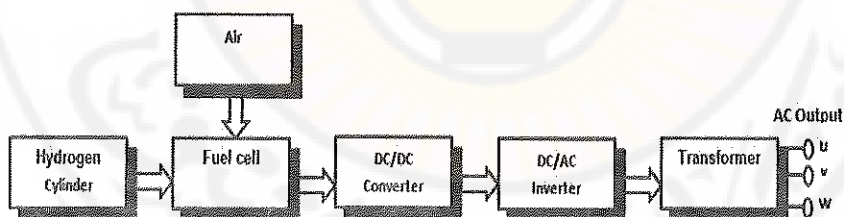
3- مراوح أو ضواغط هواء التغذية.

4- وحدات تكييف الطاقة (power conditioners) كالمبدلات DC- converters DC والممرجات 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 مخططاً صندوقياً لمنظومة خلايا وقودية تتغذى بالهيدروجين الخالص مباشرة من خزان خاص كاسطوانات أو عبوات الهيدروجين، ويصلح هذا النمط من منظومات الخلايا الوقودية لتغذية التطبيقات المتنقلة (mobile application) كالسيارات والرافعات الشوكية وغيرها من الآليات المتحركة، وإن الطراز الأنسب لهذه التطبيقات هو خلايا الغشاء البوليميري (PEMFC).

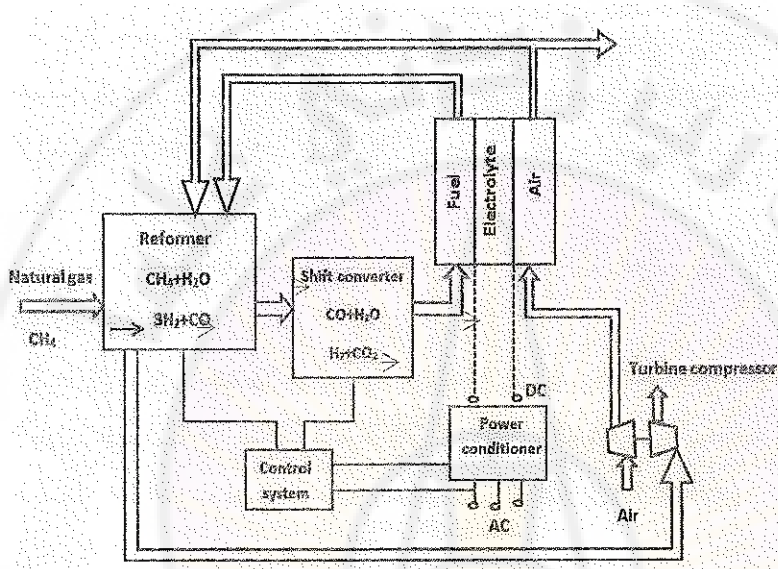


الشكل (5-20): المخطط الصندوقي لمنظومة خلايا وقود منخفضة

الحرارة [47]

أما للتطبيقات الثابتة (stationary application) والتي تكون عادة بمقاييس كبيرة (من رتبة الميغا واط أو أكثر) فالطراز SOFC هو السائد لها، والشكل (5-21) يبين

مخططاً نمطياً (typical scheme) لمنظومة خلايا وقودية عالية الحرارة ، وتدعى هذه المنظومة عادة "محطة التوليد بالخلايا الوقودية" (F.C. power plant)، كما تدعى جميع التجهيزات المتممة (إلى جانب كدس أو موديرل الخلايا الوقودية) بـ"بقية المحطة (balance of plant) والتي يرمز لها عادة بـ"BOP".

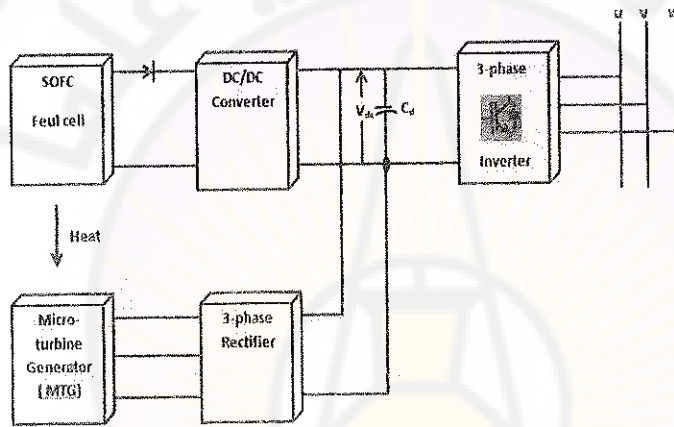


الشكل (5-21): المخطط النمطي لمنظومة توليد بالخلايا الوقودية عالية الحرارة [54]

وبما أن درجة حرارة عادم أكداس خلايا SOFC مرتفعة جداً قد تصل إلى 900°C لذا فإنه من العقلانية والحكمة الاستفادة من هذه الحرارة، ويكون ذلك على وجهين:
أ - في تسخين المياه أو توليد البخار للأغراض الخدمية أو الصناعية .
ب - 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 لإنتاج البخار اللازم للأغراض الصناعية، وفي هذه الحالة تسمى منظومة الخلايا بـ"محطات التوليد المشترك للحرارة والكهرباء" CHP (combined heat

(and power) كما تسمى أيضاً بـ "محطات التوليد المشترك" (cogeneration) 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 برايتون الحرارية (brayton cycle)، وتسمى المنظومة في هذه الحالة بـ "المحطة الهجينة" (Hybrid P.S.) ويرمز لها عادة بـ "FC/GT P.S"، ويبين الشكل (5-22) مخططاً صندوقياً لهذه المنظومة الهجينة.



الشكل (5-22): المخطط الصندوقي لمنظومة توليد هجينة FC/GT [47]

ومن الطبيعي أن يرتفع المردود الاجمالي لهذه المنظومة الهجينة ليصل إلى 70% أو أكثر [55].

5-6-7- 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 مايلزم من مدخلات الخلية ومخرجاتها لدى عملها كوسيلة

لاستعادة الطاقة المخزنة في الهيدرجين، حيث سننطلق من تحديد عدد مولات الهيدرجين اللازمة لتوليد التيار المطلوب استجراره من الخلية كميالي:

$$n_{H_2} = \frac{\text{charge of single ampere}}{\text{charge of single mole of electrons} \times 2} \quad (18-5)$$

$$= \frac{1 \text{ Coul/Sec}}{q \cdot N_A \cdot 2}$$

حيث:

q : شحنة الإلكترون الواحد وتساوي 1.6021×10^{-19} Coulomb/electron

N_A : عدد أفوكادرو ويساوي 6.0223×10^{23} electrons/Mol

وبالتبديل 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 يلزمنا تيار من الهيدرجين تدفقه 18.655 مول من الهيدرجين في الساعة.

وحيث أن كتلة المول الواحد من الهيدرجين = 2.0158 gr/Mol ، وهو ما يسمى بالمول الغرامي للهيدرجين ، نجد أنه لتوليد 1kA يلزمنا:

37.6 gr من الهيدرجين في الساعة

أو 0.418 m³ من الهيدرجين في الساعة

بعد تحديد عدد مولات الهيدرجين اللازمة لتوليد تيار معين، أصبح بالإمكان 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 يلزمنا:

298.5 gr من الأكسجين في الساعة

0.209 m^3 من الأكسجين في الساعة

إن القيم الناتجة أعلاه لتدفق كل من الهيدروجين والأكسجين اللازم لتوليد 1KA هي قيم نظرية تفترض تفاعل كامل كمية الهيدروجين المغذى للخلية وكذلك كامل الأكسجين المغذى 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 الهيدروجين والأكسجين يجب أن تزداد بمقدار $1/U_f$ و $1/U_{ox}$ على التوالي:

- معدل تدفق الهيدروجين اللازم:

$$\text{وزناً: } 37.6/U_f \text{ gr/KA.hr}$$

$$\text{حجماً: } 0.418/U_f \text{ m}^3/\text{KA.hr}$$

- ومعدل تدفق الأكسجين اللازم:

$$\text{وزناً: } 298.5/U_{ox} \text{ gr/KA.hr}$$

$$\text{حجماً: } 0.209/U_{ox} \text{ m}^3/\text{KA.hr}$$

أما معدل تدفق الهواء اللازم لعمل الخلية فيمكن حسابه بسهولة بعد معرفة نسبة الأكسجين في الهواء المحيط.

مسألة محلولة:

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 الأكداس اللازم وصلها على التفرع لهذا الموديول.
2. تقدير تدفق الهيدروجين اللازم لتشغيل هذا الموديول عند قيمة وسطية لعامل استعمال الوقود بمقدار 0.8.

الحل:

1- تحديد عدد الأكاس: لتحديد عدد الأكاس يلزم أولاً تحديد تيار الكدس الواحد وهو نفسه تيار الخلية:

$$I_{cell} = \frac{\text{Cell power}}{\text{Cell Voltage}} = \frac{750}{0.75} = 1kA$$

والتيار الكلي للموديول:

$$I_m = \frac{\text{Module power}}{\text{Module Voltage}} = \frac{1200}{60} = 20kA$$

إذن عدد الأكاس اللازم وصلها على التفرع:

$$n = \frac{20}{1} = \frac{1200}{60} = 20 \text{ stack}$$

2- تقدير تدفق الهيدروجين اللازم يلزم أولاً تحديد حجم الهيدروجين اللازم لكل خلية وعدد خلايا هذا الموديول:
حجم الهيدروجين اللازم للخلية الواحدة:

$$V_{cell} = 0.418 \times 1kA / 0.8 = 0.5225 m^3 / n$$

عدد خلايا الموديول:

$$n_{cell} = \frac{1200}{0.750} = 1600 \text{ Cells}$$

تدفق الهيدروجين اللازم لتشغيل الموديول:

$$V_m = 0.5225 \times 1600 = 836 m^3 / h$$

The background of the page features a large, faint watermark of the Damascus University logo. The logo is circular, with the university's name in Arabic 'جامعة دمشق' at the top and 'Damascus University' at the bottom. In the center is a stylized sun or star symbol with rays.

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 دولاب العطالة (أو الحداثة) وطاقة كامنة في نظم ضخ المياه.

6-1- تخزين الطاقة بدولاب العطالة

Flywheel Energy Storage (FES)

يستخدم دولاب العطالة منذ مئات السنين في التطبيقات الميكانيكية، ولكن في عام 1970 ظهرت لأول مرة فكرة استخدام دولاب العطالة كوسيلة لتخزين الطاقة في المركبات الكهربائية. بعدها أصبح دولاب 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 إلكترونيات القدرة.

6-1-1 مبدأ دولاب العطالة Principle of Flywheel

يمكن من حيث المبدأ تخزين الطاقة على شكل حركة دورانية وذلك في ظل ضياعات احتكاك منخفضة. إن دولاب العطالة كأى 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 ملئ هذا المجال بغازات خاملة [3].

إن كمية الطاقة المخزنة W في جسم دوار ذي توزيع كتلي $\rho(x)$ حول محور ثابت ويدور بسرعة زاوية ω (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 دوائر دولاب العطالة

Rotor of Flywheel Materials

يوجد صنفان أساسيان للمواد التي يصنع منها دوائر دولاب العطالة. الصنف الأول يستخدم خلأنت متقدمة مثل الكربون- فيبر (carbon-fiber) والجرافيت (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 دوائر الدولاب. هذا الصنف موجود في تصاميم دولاب العطالة التقليدية والتي تكون ذات أقطار كبيرة وتدور ببطء وفيها كثافة الطاقة والاستطاعة منخفضة. في دولاب العطالة الحديثة بدأ استخدام الدوائر الكهرومغناطيسية والذي يحقق كثافة استطاعة تخزين عالية قريبة من الصنف الأول مع تكلفة أقل [3].

6-1-3- المساند المغناطيسية Magnetic Bearing

إن العائق الأساسي لاستخدام المساند الميكانيكية في دولاب العطلة 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 المساند الميكانيكية تم مؤخراً استخدام المساند (الحوامل) المغناطيسية حتى وحدات بوزن 200ton وذلك باستخدام مغناط دائمة أو مغناط كهربائية مصنعة من مركبات الكوبالت الخام.

إن الحوامل المغناطيسية ليس لها أي احتكاك مع المحور ولا أية ملحقات دوارة ولا تحتاج أية أدوات للتزييت، وهي تتألف من مغناطيس دائم والذي يزيد من وزن

الجسم الدوار و تساعد أيضاً على تحقيق استقرار دولا ب العطالة ولكنها تحتاج الى دائرة قيادة معقدة نسبياً [3].

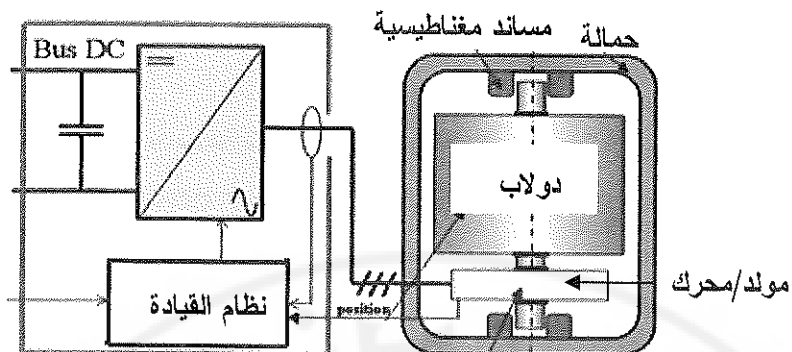
ومن أفضل المساند تلك المصنوعة من الموصلات فائقة الناقلية ذات درجات الحرارة العالية HTS (high-temperature superconducting) وهي من الممكن أن تعمل بشكل تلقائي دون الحاجة لتزويدها بالطاقة الكهربائية [14]. حيث تساعد ظاهرة الطفو floating⁶ في الموصلات فائقة الناقلية ببقاء دولا ب العطالة طافياً (معلقاً) مسافة ما عن سطح المساند مما يعني ضياعات احتكاك معدومة تماماً. لكن هذه النواقل بطبيعة الحال تحتاج إلى تبريد عن طريق التبريد السائل مما يزيد في كلفة نظام التخزين الإجمالية [56].

6-1-4- مكونات وحدة تخزين الطاقة بدولا ب العطالة

Components of FES Unite

يوضح الشكل (6-1) مخطط بنيوي لوحدة تخزين بدولا ب العطالة. يتكون هذا النظام من كتلة عطالة مربوطة إلى آلة (محرك-مولد) (موصول 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 لتدوير دولا ب العطالة فله أشكال وأنواع مختلفة ومن أهمها الآلات ذات المغناطيس الدائم والآلات التحريضية التقليدية [3].

⁶ ينتج من جلاء رفض الموصلات الفائقة للمجالات المغناطيسية وتمغنطها المعاكس 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.

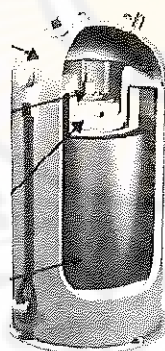


الشكل (6-1): مخطط لوحدة تخزين بدولاب العطالة

6-1-5- مجالات استخدام نظم تخزين الطاقة بدولاب العطالة

لقد انتشر استخدام نظم التخزين بدولاب العطالة في الفضاء (المحطات الفضائية، والأقمار الصناعية) وفي المركبات الكهربائية لتقديم نبضات الاستطاعة كما في الإقلاع.

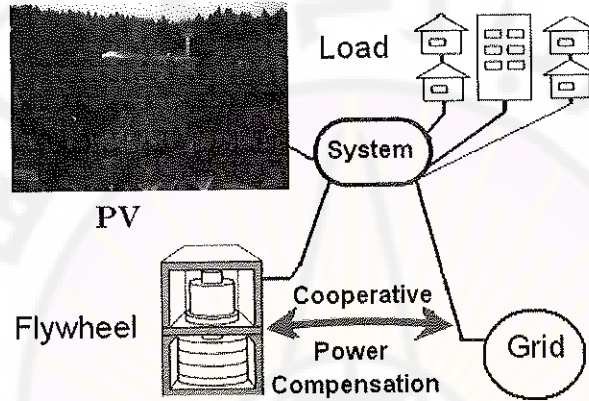
يظهر الشكل (6-2) صورة لدولاب العطالة المستخدم في نظام الاتصالات (Beacon Power Systems) وله المواصفات التالية: $E_{max}=6kWh$ ، $P_{max}=2kW$ وسرعة دوران $2500r.p.m$ ⁷، ودوائر مصنوع من فيبر وارتفاعه $1.2m$ ونصف قطره $68cm$ وكتلته $800kg$ وعمره الافتراضي 20years [57].



الشكل (6-2): صورة لدولاب العطالة

⁷ www.beaconpower.com

لقد جرى تركيب نظام تخزين بدولاب البطالة في إحدى بلدات جنوب ولاية تكساس في الولايات المتحدة الأمريكية. يظهر الشكل (3-6) مخططاً رمزياً للنظام الكهربائي (حمل محلي- شبكة- نظام كهروضوئي- نظام التخزين بدولاب البطالة) في هذه البلدة وفيه يتعاون نظام التخزين والشبكة الكهربائية على تعويض الفرق الحاصل بين منحنى الحمولة المحلية والاستطاعة المولدة من النظام كهروضوئي.



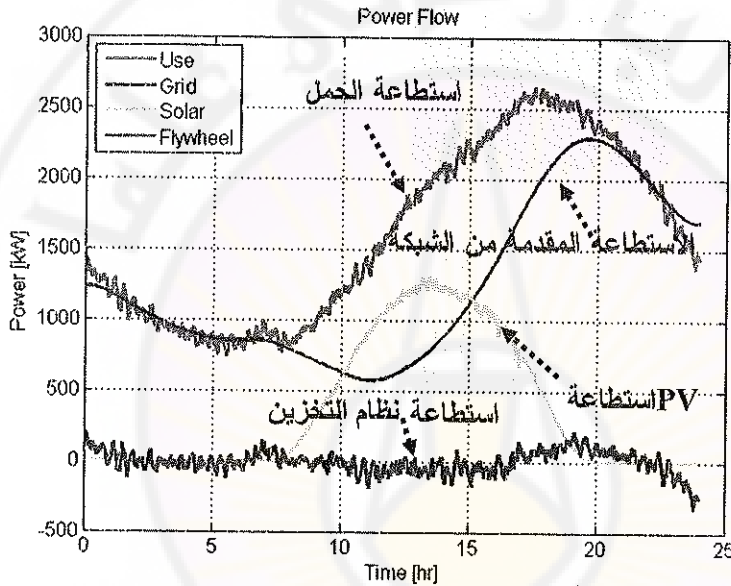
الشكل (3-6): مخطط رمزي للنظام الكهربائي حمل-شبكة- نظام كهروضوئي- نظام دولاب البطالة

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 (1-6) [58].

جدول (1-6): مواصفات الحمل ونظام التخزين بدولاب البطالة المركب [58]

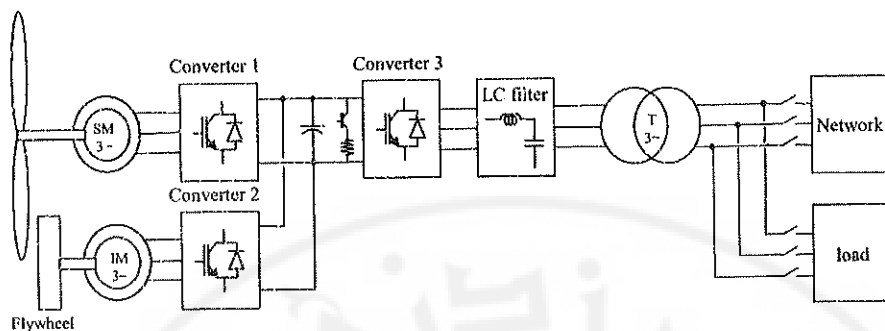
التخزين النهاري المطلوب	استطاعة التنعيم المطلوبة	استطاعة حمل عظمى	
15 kWh / 6 kW	2 kWh / 6.2 kW	5.7 kW (average)	منزل
5.9 MWh / 1200 kW	450 kWh / 300 kW	2500 kW	البلدة (741 منزل)

إن الهدف الذي من أجله جرى تركيب نظام التخزين بدولاب العطالة باستطاعة 300kW هو لتعويض التغيرات السريعة في استطاعة الحمولة. 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 قيمة موجبة أي حقن بالحمل وقيمة سالبة أي شحن.



الشكل (4-6): التغير الزمني لاستطاعات النظام المدروس [58]

من جهة أخرى، يجري استخدام نظم التخزين بدولاب العطالة بكثرة لتتبع خرج العنفات الريحية. وتظهر أهمية هذه النظم من أجل تغيرات في سرعة الرياح من رتبة الثانية حتى ثلاث 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 للمكثفات 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 تذبذبت الاستطاعة الناتجة عن مزرعة ريحية ذات استطاعة اسمية 30 ميغاواط تم تركيب نظام تخزين مكون من ثلاثين وحدة باستطاعة 3 ميغاواط والطاقة 0.75 ميغاوات ساعي [59].

إن قدرة نظم التخزين (دولاب العطالة والمكثفات فائقة السعة والملفات فائقة الناقلية) على تنظيم التوتر على خرج عنفة متغيرة السرعة تجعلها 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 والتفريغ 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 GWh 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.

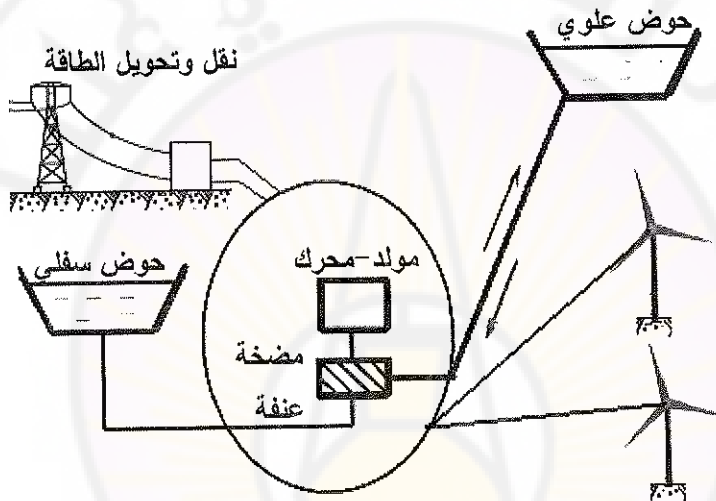
بحسب هذه العلاقة أعلاه يمكن لكتلة 1ton تسقط لمسافة 100m أن تنتج عملاً مقداره فقط 0.272 kWh [57]. وعليه يجب استخدام كتلة ضخمة من الماء من أجل الحصول على استطاعة عالية تعمل فقط لمدة ساعة واحدة، ولا يمكن أن نجد مثل هذه الكتلة الضخمة إلا في السدود الكبيرة (barrages). هذا النوع من السدود يجمع المياه في أحواض 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 العنف المائية والتي تصبح مضخة عند رفع المياه.

إن المبدأ العام لعمل هذا النظام معروف ويعتمد على طلب الطاقة. ففي الأوقات التي يكون فيها الطلب على الطاقة عالياً كأوقات الذروة، تسيل المياه من الحوض العلوي إلى السفلي 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 متجددة.



الشكل (3-6): مخطط نظام تخزين مائي مربوط لمصدر طاقات متجددة

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].

6-2-3- مشاريع عملية

تقوم عدة دول بتخزين كميات كبيرة من الطاقة - مايقارب 22GW في الولايات المتحدة (انظر في الفصل الأول الجدول (1-3))- باستخدام طريقة الضخ المائي. وفي هذا البلد ثمة 38 منشأة للضخ المائي تستطيع تخزين ما يزيد عن 2 بالمئة من استطاعة التوليد الكهربائية العظمى. وتعدّ هذه النسبة صغيرة مقارنة بمثلتها في أوروبا (حيث تقارب النسبة 5 في المئة)، أو في اليابان (نحو 10 في المئة).

في العام 1998 وفي جزيرة أوكيناوا Okinawa (اليابان) تمّ بناء مشروع نظام التخزين بالضخ المائي من النوع المشار إليه بالشكل (6-3) باستطاعة 30MW حيث يجري في هذا المشروع استخدام مياه البحر. يُخزن الماء في حوض بسعة 6000000m^3 وبارتفاع 150m عن سطح البحر، ومعدل كمية المياه الداخلة الى العنفة هو $25\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ [60].

ومن بين أكثر البرامج طموحاً في الولايات المتحدة مشروع إيكل ماونتين لتخزين الطاقة بالضخ المائي (Eagle Mountain Pumped Storage Project) جنوبي كاليفورنيا. ويرمي هذا المشروع إلى تحويل منجم مهجور إلى خزانين بغية تخزين الطاقة المستمّدة من العنفات 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، فينتظر من مشروع غراسلاندز للطاقات المتجدّدة (Grasslands Renewable Energy)، المقترح لتخزين الطاقة بالضخ المائي، أن يخزن طاقة الرياح المستمّدة من السهول العظمى (Great Plains)⁸ في بحيرة صُنّعية ستقام على قمة هضبة منعزلة شديدة الانحدار، يبلغ مسقط انحدارها 400 متر [61].

⁸ Great Plains: سهول مرتفعة تقع في الجزء الغربي من وسط الولايات المتحدة الأمريكية والجزء الغربي من كندا شرقيّ 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 وبالعكس. تعرف هذه النظم بنظم تخزين الطاقة بالهواء المضغوط Compressed Air Energy Storage والتي تعرف اختصاراً بـ CAES.

7-1- اعتبارات عامة في الضغط

لحساب مقدار الطاقة المخزنة في هواء مضغوط سوف نعرض مراجعة مختصرة لحسابات القوانين الأساسية في الترموديناميك. 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 وبالحجم V وبدرجة الحرارة θ ، 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 الحقيقية سلوك الغاز المثالي بل تنحرف قليلاً عنه، ويمكن بشكل عام إهمال هذه الانحراف.

ووفقاً للقانون الأول في الترموديناميك، الذي يعطى بالعلاقة أدناه، فإن أي عمل مبذول (مفيد) يُخزن بشكل طاقة داخلية في الغاز، وجزء منه يتحول إلى حرارة.

$$Q = \partial E + W \quad (2-7)$$

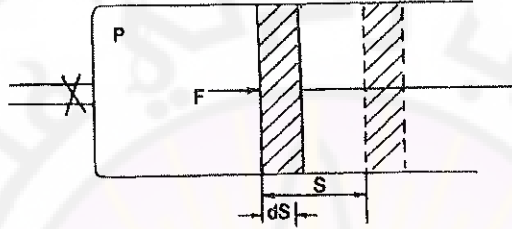
حيث:

Q: كمية الحرارة،

δE : التغير في الطاقة الداخلية،

W: العمل المفيد.

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 عنصرية ds ضاغطةً 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) كمايلي:

$$W = n \cdot R \cdot \theta \cdot \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = n \cdot R \cdot \theta \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (5-7)$$

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 المختزنة 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 و Isothermal 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، ونفترض 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 يتحول إلى طاقة داخلية.

يمكن فهم هذه الفرضية أي إجراء عملية ضغط الغاز عند حرارة متساوية (أو تمدد الهواء لاستعادة الطاقة المختزنة) 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

يفترض 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 تعبر عن الحالة الحقيقية عندما يكون الضاغط معزول حرارياً. ولكن دائماً في الحالة الحقيقية يكون هناك كمية من الحرارة، مهما كانت صغيرة، تنتشر 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:

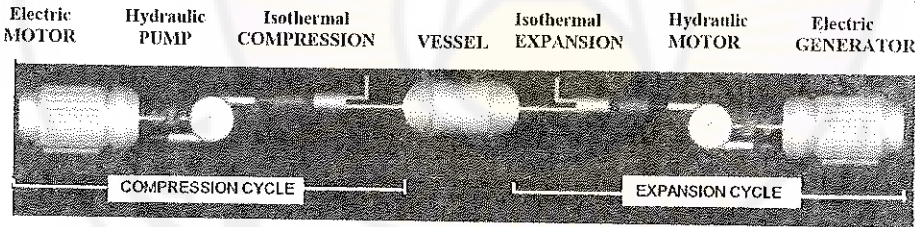
- هواء مضغوط في وعاء ضغط (قنينة) (Compressed Air in Bottle or Vessel)،
- هواء مضغوط في كهوف جوفية (Compressed Air in Cavern).

7-2-1- هواء مضغوط في وعاء ضغط

في هذه الطريقة يكون الهواء مضغوطاً في وعاء ضغط (مع بنية مركبة مصنوعة من فايبر (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 (7-2)). 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 المختزنة في الهواء المضغوط تكون 6Wh/liter. عبوة تحت ضغط 200bars فيها هواء 100kg حجمه 140liter فإن الطاقة المختزنة تكون تقريباً 800Wh أي 8Wh/kg [57]. تستخدم هذه التقنية مع العنفات الريحية على مستوى العنفة الواحدة ومن أجل المزارع الريحية تستخدم تقنية الهواء المضغوط في الكهوف. يوضح الشكل (2-7) 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 هيدروليكية (pump hydraulic)، تضغط الهواء تحت حرارة متساوية (isothermal compression) في وعاء ضغط.
2. دورة تمدد الهواء (expansion cycle) أي استعادة الطاقة المختزنة، يُدير الهواء المضغوط (high pressure gas storage) بمساعدة محرك هيدروليكي مولدة كهربائية (electric generator) تنتج الطاقة الكهربائية.



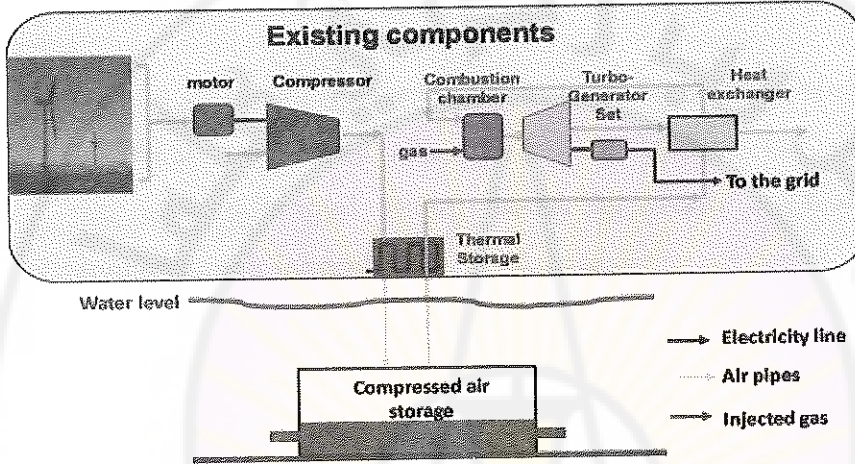
الشكل (2-7): مخطط رمزي لنظام تخزين في وعاء ضغط

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 مؤسسات تجاريتان هما Huntroff 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 تخفيض حجمه الكتلي وتخفيض سعة خزان الهواء. ومع ذلك يبقى الحجم عاملاً مهماً 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]:

- 1- المحرك: مغذى من منبع تيار كهربائي (طاقات متجددة مثلاً) يحرك الضاغط.
- 2- الضاغط compressor: يقوم بضغط الهواء الجوي ونقله بواسطة الأنابيب إلى خزان الهواء.
- 3- المبادل الحراري heat exchanger: بعد ضغط الهواء ترتفع درجة حرارته لذلك يتم تبريده باستخدام مبادل حراري يعتمد على الهواء كوسيط 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 generator -turbo set: يتم توجيه غازات الاحتراق الناتجة من حجرة الاحتراق على عنفة غازية لتدوير مولد كهربائياً.
- 7- خزان هواء gas vessal:

- يجب أن يتحمل الخزان ضغط الهواء العالي (في حال كان الضغط 70bar يكون الخزان بسماكة 10cm من الفولاذ)،
- يمكن أن يكون خزان الهواء أباراً ناضبة أو كهوفاً ملحية،
- يعتبر الخزان العنصر الأكثر تكلفة في النظام لذلك لايفضل استخدام نظم الهواء المضغوط للتخزين طويل الأمد ما لم يتوفر خزان طبيعي.

مجالات استخدام نظم التخزين بالهواء المضغوط:

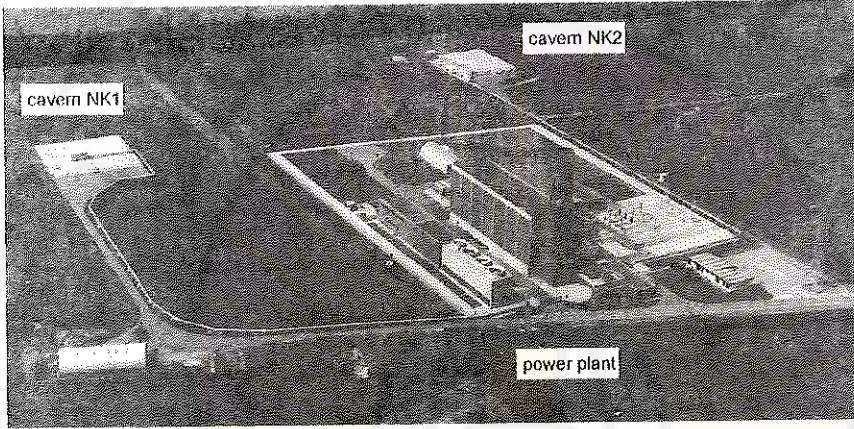
يمكن أن تستخدم نظم التخزين بالهواء المضغوط فيما يلي:

- تلبية الطلب على الذروة في نظام القدرة أو في النظم الشمسية الكهروضوئية للتغذية خلال ساعات الليل. يعرف هذا النوع من التخزين بالتخزين قصير الأمد.
- التحكم بالاستطاعة المقدمة من العنفات الريحية بشكل خاص نظراً لتقلبات الرياح. يمكن أن يكون هذا التخزين متوسط الأمد (أي لأسابيع) وغالباً ماتستخدم النظم ذات الهواء المضغوط في الكهوف لهذا الغرض. أو يمكن أن يكون تخزيناً طويل الأمد وذلك لتغطية تغيرات الرياح الفصلية.

3-7- حالات عملية لنظم التخزين بالهواء المضغوط

1-3-7 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 الذروة [62].



الشكل (4-7): صورة لموقع نظام التخزين في Huntorf

وقد جرى بناؤه استجابة لتزايد الطلب على طاقة الرياح في ألمانيا وتزايد أهمية ما يسمى بـ "احتياطي الدقيقة" الذي يشير إلى الزمن اللازم بالدقائق 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 صمم 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) وبضغوطات منخفضة (انظر الجدول (1-7)). ولمنع خطر

تآكل جدران الغلاف الأخير للكهف بسبب رطوبة الهواء فإنها تُبطن بالفولاذ وبجدران سميكة [62].

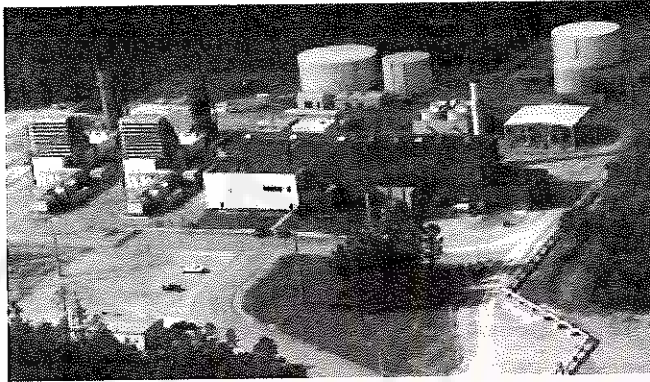
الجدول (7-1): مواصفات نظام Huntorf للتخزين بالهواء المضغوط [62]

- output النظام خرج	
▪ turbine operation	290 MW (< 3 hrs)
▪ compressor operation	60 MW (< 12 hrs)
- air flow rates معدل تدفق الهواء	
▪ turbine operation	417 kg/s
▪ compressor operation	108 kg/s
▪ air mass flow ratio in/out	1/4
- number of air caverns عدد الكهوف	2
- air cavern volumes (single) أحجام الكهوف	~140 000 m ³
total cavern volume	~170 000 m ³
	~310 000 m ³
- cavern location موقع الكهف	
▪ top	~650 m
▪ bottom	~800 m
- maximum diameter القطر	~ 60m
- cavern pressures الضغوط في الكهوف	
▪ minimum permissible	1 bar
▪ minimum operational (exceptional)	20 bar
▪ minimum operational (regular)	43 bar
▪ maximum permissible & operational	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 النظام كهفاً تحت الأرض لتخزين الهواء المضغوط، وقد شُكل كهف التخزين عن طريق ضخ المياه من وإلى الكهف من أجل حلّ 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 (5-7): 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 بـ15 دقيقة بدلاً من 30 دقيقة، ويستخدم 30% إلى 40% فقط من الهواء، و يمكن أن يعمل بطاقته 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.

7-4-4- تطبيقات نظام التخزين بالهواء المضغوط في الطاقات المتجددة

إن الكفاءة العالية التي تتميز 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:

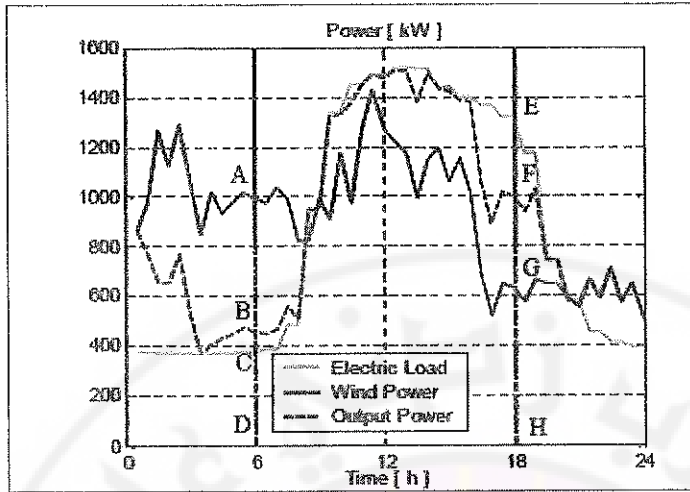
7-4-4-1- نظام التخزين بالهواء المضغوط في ايوا Iowa

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 ميغاواط مع نظام تخزين CAES وبتكلفة 200 مليون دولار مع استطاعة تخزين بالهواء المضغوط 200 ميغاواط، أي ما يكفي ولاية ايوا لعدة أيام [64].

7-4-4-2- 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 2000m^3 للعمل مع عنفة ريحية استطاعتها الاسمية 1.5MW وتغذي هذه العنفة حملاً محلياً استطاعته العظمى تساوي 1.5MW [65].

يظهر الشكل (7-6) الاستطاعات المسجلة خلال أربع وعشرين ساعة وهذه الاستطاعات هي الاستطاعة المستهلكة من الحمل (electric load) والاستطاعة المولدة من العنفة والاستطاعة المسماة (output power) وتعني مجموع الاستطاعات المقدمة للحمل وللشبكة.



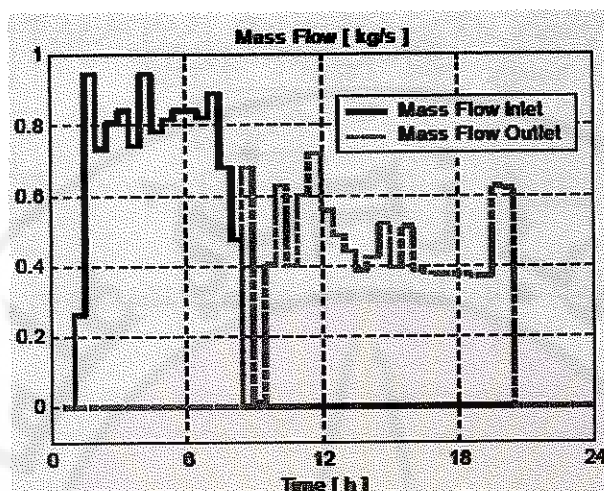
الشكل (7-6): منحنيات الاستطاعة للنظام المدروس [65]

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 تُعطى الاستطاعة التي تحتاجها (C-D) والباقي يعطى للضاغط لتخزينه (A-B) وجزء صغير يباع للشبكة (B-C).
- في الساعة 6 مساءً استطاعة الحمل تزيد عن الاستطاعة المولدة من العنفة (G-H) أي استطاعة العنفة غير كافية، فالطاقة المخزنة 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 يباع 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 المخزنة أي خروج الهواء فيتم

لتعويض الفرق الحاصل بين منحنى الحمولة ومنحنى استطاعة العنفة الريحية ويكون ذلك خلال النهار.

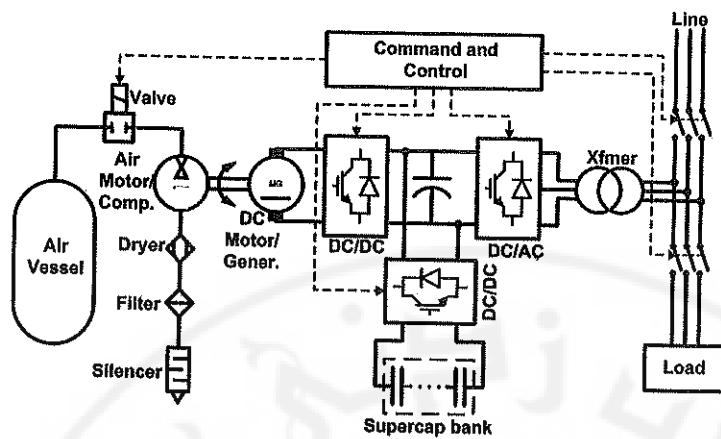


الشكل (7-7): معدل جريان الهواء الداخل أو الخارج من كهف التخزين [65]

7-5- نظام تخزين هجين هواء مضغوط- مكثفات فائقة السعة

إنها التقنية الناضجة بعد الضخ بالمياه والقدرة على تخزين كميات كبيرة من الطاقة الكهربائية.

تقترح 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 التهجين هو التحكم بالاستطاعة والتوتر معاً. وقد تم اختبار هذا النظام تجريبياً مع نظام كهروضوئي وأظهر نتائج مشجعة لإجراء هذا النوع من التهجين [66].



الشكل (7-8): مخطط نظام هجين هواء مضغوط ومكثفات فائقة 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 $0 < T^{\circ}\text{C}$) ولكن لا يمكن استعادة الطاقة المختزنة في هذه الأجسام إلا على شكل حرارة. منذ العصور القديمة يُستخدم كل من الصخور الساخنة وقرميد المواقد كوسائل تخزين حرارة أساسية. وماتزال هذه الطريقة متبعة في الأفران الصناعية وفرن الخبز الكهربائي حيث تستخدم الكهرباء الرخيصة (في بعض الدول تسعيرة 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)، وحلوية لوسيط التخزين (container)، وعازل حراري (insulation) لتقليل الضياعات، ومبادل حراري (heat exchanger)، ومائع التبادل الحراري (fluid)، ومضخات أو دافعات هواء (pumps) وأجهزة مراقبة (controlling).

2-8- التخزين بالحرارة المحسوسة Sensible Heat Storage

تتبدل 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° .

θ_1 : درجة الحرارة الابتدائية C° .

θ_2 : درجة الحرارة النهائية C° .

1-2-8- وسائط 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 كوسائط للتخزين ومواصفاتها.

جدول (1-8): وسائط التخزين السائلة المحسوسة [67]

الناقلية الحرارية W/m.C°	الحرارة النوعية J/Kg.C°	الكثافة عند درجة حرارة الغليان Kg/m^3	كلفة المادة $\$/\text{Kg}$	درجة الحرارة C°		وسط التخزين
				التبخّر	الذوبان	
0.63	420	960	0	100	0	الماء
0.106	2740	750	2	343	27	الثرمينول 66 (Therminol/66)
0.112	2200	867	0.22	260	12	دوثرم A (Dowtherm A)

0.57	1560	1680	0.44	540	142	Hitec هتيك (Hitec) 4NaNO ₃ , 7NaNO ₂ , 53KNO ₃
0.57	1560	1733	0.25	540	220	ملح ذائب Draw salt 46NaNO ₃ , 54KNO ₃
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- وسائط التخزين الصلبة Solid Heat Mediums

تتميز المواد اللاعضوية الصلبة بضغطها المنخفض في درجات الحرارة العالية، وخمولها الكيميائي، ورخص سعرها. ولكن لمعظم هذه المواد حرارة نوعيه وناقلية حرارية منخفضة، ولذا فإنها تتطلب حجوم تخزين كبيرة، ومنظومات تبادل حراري معقدة. يبين الجدول (2-8) أن الصخور ومادة الرمل أفضل المواد المستخدمة وذلك لسعتهما الحرارية المقبولة ورخص سعرهما.

جدول (2-8): الوسائط الصلبة لتخزين الحرارة المحسوسة

وسيط التخزين	الكثافة Kg/m ³	السعة الحرارية J/Kg.C ⁰	درجة الذوبان C ⁰	السعر \$/Kg
الصخور	2640.0	880.0	1200.0	0.01
الرمل	2650.0	910.0	1728.0	0.01
مقاطع حديد الصب Fe	7900.0	837.0	1535.0	0.66
أكسيد المغنيز MgO	3580.0	1130.0	2700.0	0.32
أكسيد الألمنيوم (Al ₂ O ₃)	3970.0	1010.0	2015	0.43

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 وسائط التخزين هي: الموائع كالماء والزيت، الأملاح المذابة ومحاليلها، المواد الصلبة.

ومن الواضح أن الماء هو أفضل وسائط 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 حجوم تخزين كبيرة وخزانات تتحمل ضغطاً عالياً عند تحوله إلى بخار، ولهذا فإن الزيت وبعض المواد الأخرى كالصوديوم والثرمينول هي الأكثر استخداماً في مثل هذه الدرجات. ومن المواد المستخدمة أيضاً خليط من الأملاح اللاعضوية المذابة وتعتبر مادة الهيتك مثلاً 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 المختزنة وفيها يستفاد من الحرارة المختزنة بإنتاج بخار الماء الذي يدور مجموعة عنفة-منوبة.

يوضح الشكل (8-1) مخطط نظام تخزين حراري محسوس قيد الدراسة تصل فيه الطاقة إلى 100GWh وباستطاعة 100MW ومردود مرتفع يمكن أن يصل إلى 60%.

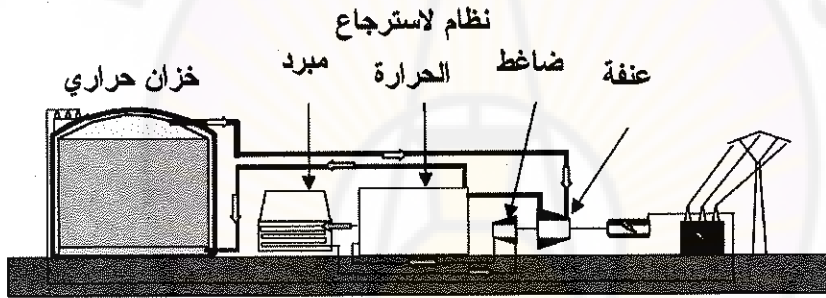
إن تخزين الحرارة في درجة حرارة عالية باستخدام عنفة بخارية تعتبر تقنية جديدة في التخزين تحت حرارة محسوسة ولكنها مازال قيد الدراسة. وتتطلب لتحقيقها مايلي (انظر الشكل (8-1)):

- 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°C والذي يساعد بالحصول على مردود (كهرباء-حرارة) من رتبة 60%. في هذا المستوى من درجة الحرارة تصل كثافة الطاقة الممكن اختزانها في المرجل إلى 500kWh [57].

إن العناصر اللازمة 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 حقيقية والتفريغ الذاتي (تسرب الحرارة) فيه منخفض.



الشكل (8-1): مخطط نظام تخزين حراري محسوس يستخدم عنفة غازية

لا بد من الإشارة هنا إلى أنّ 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

إنَّ 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 وتفريغ الطاقة هي:

أ- التغير من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة وبالعكس، والذي ينتج بدوره حرارة الانصهار والتجمد خلال عمليتي الشحن والتفريغ.

ب- التغير من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية وبالعكس، والذي يمتص أو ينتج بدوره حرارة التبخر والتكثيف خلال عمليتي الشحن والتفريغ.

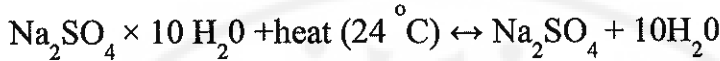
ج- التغير من الحالة الصلبة إلى حالة صلبة أخرى وبالعكس، والذي يمتص أو ينتج بدوره حرارة خلال عمليتي الشحن والتفريغ.

إن المواد التي يتغير طورها من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة، وبالعكس، هي المستخدمة في معظم التطبيقات وذلك لكون التغير من الحالة السائلة أو الغازية يحتاج إلى حجوم كبيرة، وبالتالي ستكون كلفة المنظومة عالية. وكذلك فإن التغير من حالة صلبة إلى حالة صلبة أخرى ينتج 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 صفاته أنه يذوب بانتظام، ولا تبقى فيه كمية من المواد الصلبة عالقة في الأسفل، كما يمكن كبسه في قناني 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 تشكل ملح جلوبير تجري حسب المعادلة التالية [68]:



وتتم 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 لتغيير 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 لاتذوب. وتستخدم أنواع مختلفة من شمع البرافين لأغراض التخزين الحراري حيث تذوب بانتظام ويمكن وضعها في حاويات 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 وموصلتها الحرارية ضعيفة. وأكثر أنواع الشمع استخداماً هو شمع البرافين (Sunco P-116). كما تستخدم أيضاً أنواع عديدة من البوليميرات العضوية التي لها كمية حرارة انصهار عالية وتتصهر بدرجات حرارة تتراوح من 110 إلى 130 درجة مئوية.

8-3-2- التخزين بحرارة التبخر والتكثيف

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 (8-3) 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 (8-3): الخواص الفيزيائية الحرارية لبعض مواد التخزين بالحرارة الكامنة في درجات الحرارة العالية [67]

اسم المادة	درجة حرارة الانصهار °C	حرارة الانصهار (Cal/g)	الحرارة النوعية (سائل) Cal/g.°C
- أملاح فلوريد البوتاسيوم وفلوريد الصوديوم وفلوريد المغنيسيوم	685	138	0.38
- كلوريد الصوديوم وكلوريد الكالسيوم	500	67	0.25
- هيدروكسيد الصوديوم	318	76	0.25
- كربونات الصوديوم	588	64	0.33

			وكلوريد البوتاسيوم
0.44	41	307	- نترات الصوديوم
0.04	5.5	327	- الرصاص (Pb)
0.25	94	658	- الألمنيوم (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 1960م على عدد مركبات البوتاسيوم وكربونات الصوديوم في درجة حرارة عالية 300°C ، وقد بينت أن كربونات الصوديوم سائل جيد للتخزين إلا أنه يسبب التآكل وينسب عالية. إن ملح كربونات الصوديوم ذو درجة حرارة ذوبان مرتفعة وناقلية حرارية عالية واستقرار جيد في درجات الحرارة المرتفعة وضغط تبخر منخفض، له بين درجة حرارة $120^{\circ}\text{C} - 360^{\circ}\text{C}$ سعة تخزين حرارية نوعية (حجمية أو كتلية) تصل إلى 744 MJ/t أو 1332 MJ/m^3 [57].

- [1] Y. Diab, "Using Energy Storage Systems for Improving the Renewable Energies Performance", 1st conference Franco-Syrian on the renewable energies, Damascus, 2010.
- [2] simplorer TM 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, (2011) .
- [13] Mueeen, S. M., Tamura, J., & Murata, T. (2009). Stability augmentation of a grid-connected wind farm. Berlin: Springer.
- [14] 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.nexxon.co.uk/technology/about-li-ion-batteries/> (2013).
- [22] 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 forMobile 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.- Bathaee,M.T.(2007) "A novel combined battery model for state-of-charge estimation in lead-acid batteries based on extended Kalman filter 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 (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] مصعب العقال وأحمد المزي و ممدوح البلخي، مشروع تخرج بعنوان "مكتفات شوارد الليثيوم" بإشراف الدكتور ياسر دياب، قسم هندسة الطاقة الكهربائية، جامعة دمشق، 2010-2009.
- [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 7th ed. U.S. Department of Energy office of fossil energy November 2004.
- [48] S. Srinivasan and P. Costamagna modeling analysis from half cell tro 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 Ghezeli-Ayagh, "Direct Fuel Cell Turbine Power Plant", fuel 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.ooloommagazine.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, ÉCOLE 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

ABBREVIATION	
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 ₂	Hydrogen

ISTEC	International Superconductivity Technology Center
Kw	Kilo Watt
Kwh	Kilo Watt Hour
Pbso4	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

μ_0	ثابت النفاذية المغناطيسية للهواء
B	التحريض المغناطيسي
C	السعة الكهربائية
C_{bulk}	السعوية المكافئة للمدخرة
C_p	سعة بيكرت للمدخرة
d, D	ثخانة العازل
DOD	عمق التفريغ
E	طاقة التخزين
E_{ch}	الطاقة المشحونة
δE_c	المفاقد خلال الشحن
δE_d	المفاقد خلال التفريغ
δE_s	المفاقد خلال التخزين
E_{dch}	الطاقة المفرغة
EDLC	المكثف ذو الطبقة الكهربائية المزدوجة
EDR	مقاومة الكهرايت
E_G	توتر جييس
EMF	القوة المحركة الكهربائية
E_N	توتر نيرنست
$E_{o.c}$	توتر الدارة المفتوحة
ESR	المقاومة التسلسلية المكافئة
δE_s	المفاقد خلال التخزين
e_v	شدة الحقل الكهربائي
δE	ضياعات الطاقة

F	ثابت فاراديه
g	تسارع الجاذبية الأرضية
ΔG	تغير طاقة الجيبس الحرة
ΔH	تغير الانتالبي
I	التيار
J	عزم العطالة
L	المحارضة
m	كتلة الجسم
N_{cycl}	عدد دورات شحن- تفريغ
ϵ_0	ثابت العازلية الكهربائية للهواء
P_{cum}	استطاعة الاستهلاك الفعالة
P_{gen}	استطاعة التوليد الفعالة
P_{max}	الاستطاعة العظمى
P_s	استطاعة التخزين الفعالة
P_s	استطاعة التخزين الفعالة
Q	الشحنة الكهربائية
Q_{cum}	استطاعة الاستهلاك الردية
Q_{gen}	استطاعة التوليد الردية
Q_s	استطاعة التخزين الردية
R	ثابت الغازات العام
R_l	مقاومة التسريب
R_s	مقاومة الوصلات
ϵ_r	ثابت العازلية النسبي للمادة العازلة المستخدمة
S	المساحة الفعالة
SOC	حالة الشحن

T	درجة حرارة التفاعل (K)
V	التوتر
V_{act}	هبوط التفعيل
V_{con}	هبوط التركيز
V_{ohm}	الهبوط الأومي
ϵ	ثابت العازلية
v	سرعة الخطية الجسم
τ	الثابت الزمني للشحن أو تفريغ
ω	سرعة زاوية

اللجنة العلمية:

- الأستاذ الدكتور هاكوب بوغوص.
- الأستاذ الدكتور نديم مخول.
- الأستاذ الدكتور حسان سويدان.

المدقق اللغوي:

الأستاذ الدكتور حسن الأحمد.

حقوق الطبع والترجمة والنشر محفوظة لمديرية الكتب والمطبوعات الجامعية



