

تقييم أداء وكفاءة مدخرات التخزين لأنظمة الطاقة الكهروشمسية

الدكتور علي خضور*

الدكتور حسن وسوف**

عيسى حمود***

(تاريخ الإيداع 22 / 4 / 2013. قَبِلَ للنشر في 18 / 6 / 2013)

▽ ملخص ▽

- المدخرات عبارة عن أجهزة تستخدم لتخزين الطاقة وبشكل خاص لإمداد الأجهزة الكهربائية الصغيرة والمحمولة مثل أجهزة الخليوي والكمبيوتر المحمول والأجهزة الترفيهية في المركبات التي تسير على الأرض أو في الهواء أو الماء، وتأتي أهمية المدخرات في نظم الطاقة الكهروشمسية بإمدادها الأحمال بالطاقة الكهربائية اللازمة في أثناء الليل وفي فترات الإشعاع الشمسي القليل مما يؤمن استمرارية التغذية الكهربائية من جهة ورفع وثوقية النظام من جهة أخرى.
- تقدم هذه المقالة تجارب عملية مفيدة وذلك وفقاً للمواصفات القياسية العالمية منها IEEE Std 250™-2002، IEEE Std 1188™-2005 لاختيار المدخرة المناسبة من بين ثلاثة أنواع من المدخرات المتوفرة في السوق المحلية لاستخدامها في نظم الطاقة الكهروشمسية أو في بعض التطبيقات التي تستخدم القابلات (inverters) المستقلة مع المدخرات لإمداد بعض الأحمال الكهربائية المستقلة. و في هذا البحث تم ما يلي:
 - إجراء اختبار القبول للمدخرات المتوفرة في السوق المحلية للتأكد من قيم السعات في المواصفات المصنعية لهذه المدخرات.
 - إجراء اختبار التفريغ على تلك المدخرات لمعرفة سلوكها في أثناء حالة التفريغ.
 - إجراء اختبار كفاءة التفريغ الفعلية للمدخرات لمعرفة أداء المدخرة بعد دورتي شحن وتفريغ متتاليين.
 - إجراء اختبار تأثير درجة الحرارة على المدخرات وذلك لمعرفة سلوكها عند درجات حرارة مختلفة للوسط المحيط.
 - تدوين نتائج الاختبارات على شكل منحنيات بيانية .
 - انتقاء النوع الأفضل من بين عدة أنواع مدخرات متوفرة في السوق المحلية.

الكلمات المفتاحية: نظم الطاقة الكهروشمسية، المدخرات، التفريغ، الشحن، درجة الحرارة، السعة ، الكفاءة.

* أستاذ مساعد - قسم هندسة تقانات الطاقات المتجددة- كلية الهندسة التقنية - فرع جامعة تشرين - طرطوس- سورية.

** مدرس - قسم المكننة الزراعية- كلية الهندسة التقنية، فرع جامعة تشرين - طرطوس- سورية.

*** طالب دراسات عليا (ماجستير) - قسم المعدات والآليات- كلية الهندسة التقنية، فرع جامعة تشرين - طرطوس- سورية.

Performance and Efficiency Evaluation of Storage Batteries for Solar Electric Power Systems

Dr. Ali Khaddour*
Dr. Hassan Wasouf**
Issa Hammoud***

(Received 22 / 4 / 2013. Accepted 18 / 6 / 2013)

▽ ABSTRACT ▽

Batteries are energy storage devices that are particularly useful for powering small portable devices like phones, laptops and entertainment devices as well as mobility devices that travel over the earth's surface, through water and air. During the night, or during a period of low solar irradiation, energy is supplied to the load from the battery in solar electrical Power Systems, and that provides Continuity of power supply, and on the other hand boosts the Reliability of the system.

- This article presents useful practical tests based on international standards (IEEE Std 250™ -2002 ,IEEE Std 1188™-2005) to choose the suitable battery among three types of available batteries in the local market to use in PV power systems, or in some applications which use stand-alone inverters with batteries to power some stand-alone electric loads.
- We made Acceptance Test on the available batteries in local market to make sure that capacity values meet the manufacturers rating.
- We made Discharge Test on the batteries to know and predict their performance in the Discharge state.
- We made the Actual Discharge Efficiency test on the batteries to know their Performance and Efficiency after two successive charge and discharge cycles.
- We made the Temperature's Impact Test on the batteries to know their Performance at several different ambient temperatures.
- Record the tests' results as graphic curves.
- This article helps to select the best type of batteries between available local ones.

Key words: Solar Electric Power Systems, Batteries, Discharging, Charging, Temperature, Capacity, Efficiency.

* Associate Professor, Department of Technologies Renewable Power Engineering, Faculty of technical Engineering, Tishreen University, Tartous branch, Syria.

** Assistant Professor, Department of Agricultural Mechanization Engineering, Faculty of technical Engineering, Tishreen University, Tartous branch-Syria.

*** Postgraduate Student, Department of Equipment & Mechanisms, Faculty of technical Engineering, Tishreen University, Tartous branch, Syria.

مقدمة:

تنتج المصانع أنواعاً عديدة و مختلفة من المدخرات التي يمكن أن تصنف حسب تصميماتها الأساسية, و يُحدّد تصميم المدخرات كمية الكهرباء المولّدة و فترة عملها, حيث المدخرات الأولية (primary battery) تتوقف عن العمل و ينتهي مفعولها, و يجب التخلص منها بعد استهلاك إحدى المواد الكيميائية المكونة لها, و يمكن إعادة استعمال أنواع أخرى من البطاريات بعد نفاذ طاقتها و ذلك بإعادة شحنها, و يسمى مثل هذا النوع المدخرات الثانوية (secondary Battery) أو مدخرات التخزين -القابلة للشحن- (Rechargeable Battery). يمكن أيضاً تصنيف المدخرات حسب محتوياتها الإلكترونية و هي المادة الموصلة للتيار الكهربائي داخل الخلية, و العديد من المدخرات الأولية يكون الإلكترونيات على هيئة مواد جيلاتينية, أو على هيئة مواد تشبه المعجون. و تُعرف مثل هذه المدخرات التي تحتوي على مكونات غير قابلة للانسياب بالمدخرات الجافة.

تُصنع المدخرات بأحجام متعددة. فمثلاً, المدخرات متناهية الصغر المستعملة في ساعات اليد الكهربائية تزن حوالي (1.4 g/mm^2) فقط. أما المدخرات الضخمة التي تغذي الغواصات بالطاقة فتزن ما يصل إلى (0.91 T/m^2). وعلى كل, فإن المنتجين يصنعون أغلب المدخرات بأحجام قياسية محددة. و على ذلك, يمكن استعمال المدخرات المنتجة من مصانع مختلفة في نفس الجهاز, و الجدول (1) يبين أنواع المدخرات بقدراتها الكامنة.

الجدول (1) أنواع المدخرات بشكل عام و قدراتها الكامنة [1].

نوع المدخرة	القدرة الكامنة [Wh]	مجال الاستخدام
المدخرات المينياتورية	100 mWh – 2Wh	الأجهزة الطبية, ساعة يدوية, آلة حاسبة
المدخرات الجافة	(2 – 100)Wh	مصباح يدوي, جهاز الخليوي
مدخرات التشغيل والإثارة	(100 – 600)Wh	السيارات و الشاحنات
مدخرات آلات الجر والسيارات الكهربائية	(20 – 630)kWh	القاطرات و سيارات حمل الحليب
المدخرات الساكنة	3MWh	الغواصات
	250kWh – 5MWh	اختزان الطاقة الكهربائية, جهاز تأمين الطاقة الكهربائية الاضطرارية للمنشآت الهامة
مدخرات الذروة و تعديل الأحمال	(5 – 100) MWh	تعديل الأحمال و حقن الاستطاعة عند الذروة

تختلف المدخرات أيضاً حسب الجهد المتولد, فالخلية الأولية المستعملة في كاشفات الضوء اليدوية يصل جهدها إلى 1.5 V, في حين تعتبر أغلب المدخرات الثانوية, المستعملة في السيارات, مدخرات جهدها 12 V, و تتكون من ست خلايا كل خلية منها تنتج 2 V و متصلة مع بعضها على التوالي و يوجد توترات مختلفة للخلايا منها: (1.1 – 1.2 – 1.4 – 1.8 – 2.1 – 2.2 – 2.4)V.

أهمية البحث وأهدافه:

تختلف أسعار المدخرات وكلفة استثمارها حسب مواصفاتها من سعة و عمق تفريغ و عمر استثماري وعدد مرات الشحن والتفريغ الممكنة وغيرها... إنَّ عمر هذه المدخرات يتحدد بالإضافة إلى نوعية هذه المدخرات بظروف استثمارها أيضاً مما يؤثر بشكل واضح على أداء هذه المدخرات. لذا قمنا في هذه المقالة باستعراض نتائج بعض

الاختبارات الكهربائية التي قمنا بها على المدخرات والتي تعكس أثر ظروف الاستثمار المختلفة على أدائها وبالتالي على العمر الاستثماري لها، كما أعطينا فكرة عن بعض المدخرات الموجودة في أسواقنا المحلية و قمنا بدراساتها للتأكد من مستوى أدائها وجودتها والتعرف أكثر على مواصفاتها و تشبيتها ومعرفة متطلبات المدخرات الأكثر ملاءمة للنظام الكهروضوئي المصمم.

طرائق البحث ومواده:

تم إجراء بعض الاختبارات العملية وفق المعايير العالمية IEC, JIS, IEEE على مدخرات متوفرة في السوق المحلية والتي تساعد في تقييم أداء المدخرات وذلك بتأمين بيئة مناسبة لإجراء تلك الاختبارات بالاستعانة بالمقاييس والأجهزة اللازمة والمناسبة من دارة لشحن المدخرات وأخرى لتفريغها بأحمال إنارة متوهجة DC، ثم إظهار النتائج على شكل منحنيات بيانية، حيث تمت هذه الاختبارات في مخبر الطاقة الشمسية والطاقات المتجددة- كلية الهندسة التقنية.

مفاهيم أساسية [2],[3]:

صُممت المدخرات لتلائم احتياجات النظم والتطبيقات الكهربائية المصممة من أجلها وفق بعض المفاهيم الموضحة أدناه:

الخلية السائلة Flooded Cell:

هي خلية تسمح لنواتج المحلول الكهروليتي وبخار الماء بالخروج إلى الجو عند تكونها، و تدعى هذه المدخرات بالمدخرات المنفوسة Vented Batteries.

دورة التشغيل (العمل) Duty Cycle:

هي الفترة الزمنية المحددة التي يُتوقع أن تغذي فيها المدخرة أحمالاً محددة، مع الإبقاء على جهد أصغري محدد.

جهد (شحنة) التعادل Equalizing Voltage:

هو جهد أعلى من الجهد العائم مطبق على مدخرة لتصحيح عدم التوازن ضمن خلايا المدخرة (جهد أو كثافة نوعية).

الجهد العائم Float Voltage:

هو الجهد المطبق على المدخرة لإبقائها في حالة شحن كامل في أثناء العمل الطبيعي.

عدد الخلايا / جهد المدخرة Number Of Cells:

إن مفهوم مدخرة يشير إلى نظام بخلية واحدة أو أكثر. تمثل الخلية تركيباً كيميائياً خاصاً يؤمن جهداً وتياراً، وتعطي خلايا بتركيبات كيميائية مختلفة جهوداً مختلفة، ودمج الخلايا على التسلسل يزداد جهد المدخرة بضرب عدد الخلايا في جهد الخلية الواحدة.

تركيب المدخرة الكيميائي Battery Chemistry:

تُخزن الطاقة في المدخرة عبر التغير في مكوناتها الكيميائية الداخلية، عندما تفرغ المدخرة عبر حمل ما مثل دارة كهربائية أو محرك، فإن التركيب الكيميائي الداخلي للمدخرة يتغير، وعند شحن المدخرة فإن التغير الكيميائي ينعكس، ويتم تخزين الطاقة في المدخرة، فالطاقة التي يمكن أن تخزن في المدخرة هي التي تعطي التركيب الكيميائي للمدخرة، مكونات المدخرة، وحجم المدخرة ووزنها.

وتتنوع المكونات الداخلية بين: أكسيد الرصاص، نيكل- كادميوم، نيكل - هيدريدات المعدن، شوارد الليثيوم العضوية و شوارد الليثيوم.

سعة المدخرة Battery Capacity:

تحدد سعة المدخرة من قبل المصنع كمعدل تفريغ اسمي عند ظروف تفريغ معطاة ومحددة. وتتضمن هذه الظروف قيمة معدل التفريغ، درجة الحرارة، كثافة سائل كهروليتي، جهد الخلية الأصغري (جهد نهاية تفريغ).

الواط - ساعة Watt- Hours:

إن الأمر الأهم عند المقارنة في الطاقة المتاحة بين أنواع المدخرات هي الطاقة الإجمالية المخزنة watt-hours وليست السعة بـ Ah و هذه الطاقة هي عبارة عن جداء جهد المدخرة في السعة ويُعبّر عنها بـ :

$$\text{Watt- Hours} = \text{battery voltage} \times \text{Ah} \quad (1)$$

كثافة الطاقة (كثافة الكتلة) Energy Density:

عادة يشير هذا المصطلح إلى الطاقة watt-hours في وحدة الكتلة من المدخرة و واحدتها: [Wh/Kg]، وتُحسب من المواصفات الاسمية المصنعية من العلاقة:

$$\text{Energy Density} = \text{energy} / \text{mass} \quad (2)$$

• صُممت المدخرات الثانوية بطريقة يمكن بها عكس التفاعلات الكيميائية بالاتجاه المضاد و تُمكن هذه الميزة من إعادة شحن المدخرة بعد نفاذ الطاقة الكهربائية منها، و أكثر أنواع المدخرات الثانوية شيوعاً هما:

(a) مدخرات التخزين القلوية (Alkaline Batteries).

(b) مدخرات التخزين الرصاص الحمضية (Lead Acid Batteries).

و بما أن مدخرات حمض الرصاص تمتاز بالكثير من المواصفات عن غيرها من المدخرات فهي الأكثر استخداماً في النظم الكهروشمسية وبالتالي أستخدمت هذه المدخرات في اختبارات هذا البحث.

خصائص المدخرات العملية Functional batteries characteristics [4]:

تُحدّد خصائص المدخرات العملية ببعض المفاهيم لما لهذه الخصائص من أهمية في دعم الاختبارات المراد إجراؤها بالمعلومات المفيدة:

• سعتها الاسمية.

• ثباتها في دورات العمل (الشحن والتفريغ).

• الاحتفاظ بالشحنة.

• ثباتها في دورات العمل في أثناء وجودها في النظام الكهروشمسي.

أسس اختيار نوع المدخرات Batteries Type Selection Principles [4],[9] :

إن اختيار نوع المدخرات يعتمد على عدد من الأسس و المعايير الهامة التي يجب الاستقصاء عنها عندما نريد

تحديد نوع المدخرة للنظام المقترح :

• الأبعاد الهندسية (لمكان توضع المدخرات).

• الكلفة الابتدائية.

• الصيانة.

• الكلفة الكلية للمستثمر.

• عدد دورات الشحن والتفريغ.

• الوثوقية.

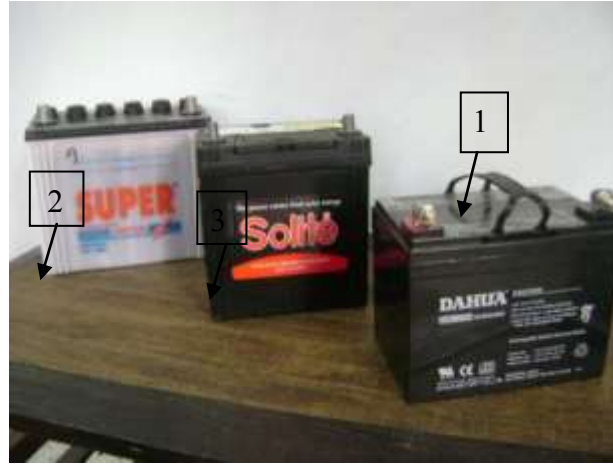
• العمر التصميمي.

• الوسط المحيط (مثل درجة حرارة الوسط المحيط).

الاختبارات المراد تطبيقها على المدخرات [5],[6],[7],[8]:

تُجرى اختبارات المدخرات لتقييم أدائها والحفاظ عليها من العطب السريع أو المفاجئ وجعلها دائماً تعمل عند مواصفاتها الاسمية طول فترة عمرها الاسمية المحددة وفي النهاية الحفاظ على بارمترات العمل الاسمية للحمل الموصول إلى هذه المدخرات وتجرى هذه الاختبارات على المدخرات المفردة أو تطبق على صفوف المدخرات/ الخلايا وفق معايير IEC, JIS العالمية بوسائل وطرائق محددة.

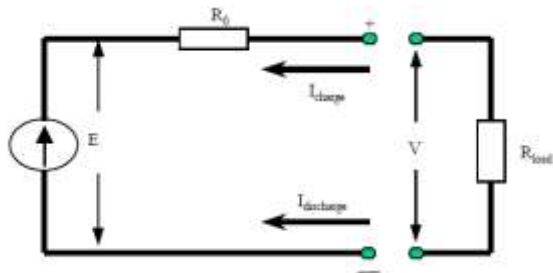
تم إجراء الاختبارات على عدة أنواع من المدخرات المتوفرة في السوق المحلية الموضحة في الشكل (1) والتي يمكن استخدامها بعضها لبناء نظام طاقة كهروضوئية وذلك بالاستعانة بمنحنيات الاختبارات التي أجريت عليها لتقييم أدائها وأخيراً الجزم فيما إذا كان بإمكاننا استخدام هذه المدخرات أم لا:



الشكل (1): الأنواع المختلفة للمدخرات المختبرة.

1. مدخرة جافة سعة 36Ah.
2. مدخرة سائلة ذات أغطية مفتوحة سعة 40Ah.
3. مدخرة سائلة ذات أغطية مغلقة سعة 40Ah.

الدائرة المكافئة للمدخرة (Battery Equivalent)



الشكل (2) الدائرة المكافئة للمدخرة

:(Circuit

تُعطى الدائرة المكافئة للمدخرة بشكل عام وفق الشكل (2) الموضح جانباً، وهذه الدائرة تنطبق على كل أنواع المدخرات إلا في قيمة المقاومة الداخلية والتي تتعلق بكثير من العوامل ويقوم المصنع بتحديد قيمتها وتدوينها ضمن المواصفات الاسمية للمدخرة. يُعطى الجهد الطرفي للمدخرة V بالعلاقة التالية:

$$V = E - I R_0 \quad (3)$$

حيثُ:

/: تيار المدخرة [A].

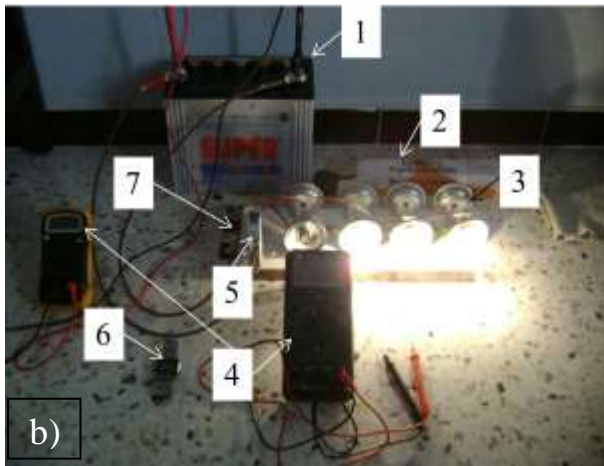
R_0 : المقاومة الداخلية للمدخرة [Ω].

E : جهد اللاحمل [V] ويعطى بمعادلة Nernst .

دارتاً شحن وتفريغ المدخرة:

• تم شحن المدخرات عن طريق شاحن كهربائي مزود بمحوّل استطاعته 240 W الشكل (3-a)، وأيضاً يمكن شحن هذه المدخرات بشاحن كهروضمسي يمكن تغذيته من الكهرباء بشكل مباشر أو عن طريق الألواح الكهروضمسية ويعطيان نفس النتيجة، ولكن لثبات الطاقة المأخوذة من الشبكة الكهربائية ولسهولة إعادة التجربة بسرعة وتلافي أي خطأ ممكن اعتمدنا على الشاحن الكهربائي.

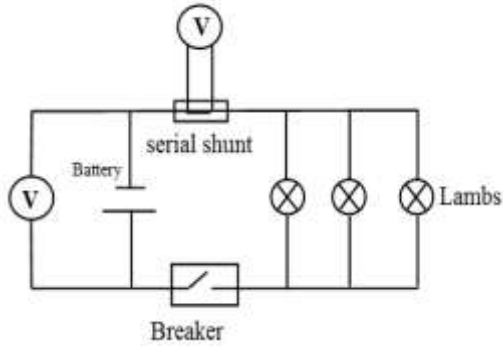
• إن الاختبارات التي ستجرى هي اختبارات لمدخرة مفردة لذلك لتفريغ المدخرة تم تطبيق دائرة خاصة موضحة في الشكل (3-b) وتتألف من:



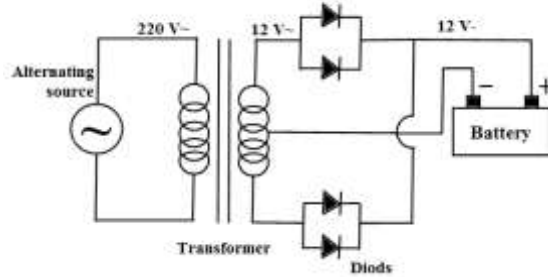
الشكل (3): (a) الشاحن المستخدم لشحن المدخرات. (b): الدارة والتجهيزات المستخدمة في الاختبارات.

1. المدخرة المختبرة.
2. مقياس كثافة السائل الكهروليتي المدخرات (هيدرومتر) Hydrometer .
3. لمبات DC متوهجة و باستطاعتين مختلفتين (5W,21 W).
4. مقياس فولط عدد 2.
5. قاطع حماية من تيارات القصر متوافق مع تيارات الدارة الأعظمية لحماية المدخرة بالدرجة الأولى والأحمال بالدرجة الثانية.
6. عداد زمني رقمي.
7. مقياس لقياس التيار المستمر أو يمكن إجراء القياس عن طريق مفرعة تسلسلية ذات مقاومة معلومة توضع على السلك (الناقل) السالب في دائرة الأحمال أو في دائرة الشحن.

الدارة المكافئة للشحن والتفريغ:



الشكل (b) الدارة المكافئة للتفريغ



الشكل (4): (a) الدارة المكافئة للشحن

تبين الدارة الموضحة في الشكل (4-a) الدارة المكافئة لشاحن المدخرة المستخدم حيث تتألف من محول ذي نقطة مشتركة وأربعة ديودات على التوازي لزيادة تيار الشحن. أما دارة التفريغ في الشكل (4-b) فهي تتألف من قاعدة لمبات تنتسح حتى ثمان لمبات إنارة متوهجة DC ومفرعة تسلسلية وقاطع ومقاييس فولط.

(a) اختبار القبول (قياس السعة والتأكد منها):

الهدف من الاختبار : التأكد من المواصفات الاسمية المصنعية الموجودة على المدخرة.

طريقة العمل:

1. تحديد السعة الاسمية المصنعية للمدخرة.
2. تدوين الجهد الأولي على أقطاب المدخرة ودرجة الحرارة والكثافة النوعية.
3. شحن المدخرة حسب مواصفات الشاحن.
4. تدوين جهد المدخرة بالقرب من نهاية شحن المدخرة.
5. يجب أن ندع المدخرة ترتاح فترة من 1h حتى 72h، وإذا كانت درجة حرارة المدخرة أعلى من درجة حرارة الوسط المحيط بـ 10°C هنا يجب أن ندعها ترتاح لفترة زمنية حتى 72h.
6. قياس درجة حرارة الكهروليت للمدخرة ذات الأغشية المفتوحة.
7. تفريغ المدخرة ومن هذه اللحظة نبدأ بالعد.
8. تدوين الجهد بالقرب من الجهد 2 V/cell (أي بالقرب من الجهد 12 V لمدخرتنا). إذا كانت أقل من 1.75 V/cell وبالتالي يجب إلغاء التفريغ وتدوين السعة بـ Ah.
9. إذا لم يكن الجهد 1.75 V/cell (10.5V) فيجب علينا تدوين الجهد بالقرب من القيمة 1.90V/cell أي (11.4V) .
10. التوقف عن التفريغ إذا كان جهد المدخرة أدنى من جهد نهاية التفريغ النظامي ($11.4\text{V} \rightarrow 10.5\text{V}$).
11. إعادة شحن المدخرة .
12. مراجعة النتائج وحساب السعة حسب القانون في هذه الحالة:

$$\text{Capacity\%} = \frac{t_A}{t_s \times K_T} \times 100 \quad (4)$$

t_A : الزمن الحقيقي للتجربة.

t_s : الزمن الاسمي حسب المواصفات الاسمية للمصنع.

K_T : عامل تصحيح درجة الحرارة ويؤخذ من جداول خاصة (الملحق 1).

(b) اختبارا الشحن والتفريغ:

الهدف من الاختبار: معرفة خصائص وشكل منحنيات التفريغ عند أحمال مختلفة ومعرفة سلوك المدخرة فيها.

و الطريقة هي كالتالي:

1. تدوين جهد ودرجة حرارة الكهروليت (للمدخرة ذات الأغشية المفتوحة) في بداية الشحن.
2. شحن المدخرة وفق تيار شحن متوافق مع سعة المدخرة التي لدينا وتيار جهاز الشحن المتوفر.
3. تدوين الجهد والتيار ودرجة حرارة الكهروليت من بداية الشحن وعلى فترات زمنية محددة (مثلاً كل 20 min).
4. مراقبة الوصول إلى جهد نهاية الشحن حسب تيار الشحن وسعة المدخرة والذي يكون بين (14.4V→15.3V).
5. التأكد من الوصول إلى جهد نهاية الشحن بثبات الجهد، والتأكد من ذلك بإعادة القياس كل 10 دقائق (مرتين على الأقل).

6. تفريغ المدخرة بتيار تفريغ محدد حسب سعة المدخرة ثم يتم حساب السعة.

7. شحن المدخرة وإعادة تفريغها بتيار آخر (حمل جديد غير الحمل السابق) وتُدوّن السعة الجديدة.

8. إعادة شحن المدخرة وتفريغها بتيار آخر غير التيارين السابقين وتُدوّن السعة الجديدة.

مع الأخذ بعين الاعتبار أن:

جهد شحن المدخرة الجافة V/Cell (2,3 -2,4) أو V (13,8 - 14,4).

جهد شحن المدخرة السائلة V/Cell (2,4 -2,5) أو V (14,4 - 15,3).

تيار الشحن: $I_{ch} = (0.2 - 0.25) C_n$ ، حيث C_n : السعة الاسمية للمدخرة.

(c) اختبار كفاءة التفريغ الفعلية للمدخرة:

الهدف من الاختبار: معرفة أداء وقدرة المدخرة بعد عمليتي شحن و تفريغ متتاليتين. و الطريقة هي كالتالي:

1. شحن المدخرة والتأكد من الوصول إلى جهد الشحن الكامل وتسجيل الجهد في كل فترة من بداية الشحن.
2. تسجيل الجهد ودرجة الحرارة والتيار عند نهاية الشحن ويجب أن يكون الجهد ما بين:
 - V/Cell (2,3 -2,4) أو V (13,8 - 14,4) للمدخرة الجافة.
 - V/Cell (2,4 -2,5) أو V (14,4 - 15,3) للمدخرة السائلة.
3. تفريغ المدخرة عند تيار تفريغ مثلاً I_3 أو I_2 ، و سجل الجهد في بداية التفريغ.
4. مراقبة التيار والجهد ودرجة الحرارة ويتم تسجيلهم كل فترة زمنية (مثلاً كل 20 min).
5. الاستمرار في التفريغ حتى جهد نهاية التفريغ ويُسجل الجهد كل فترة وتحسب السعة C .
6. إعادة شحن المدخرة حتى تستعيد سعتها السابقة C ويُسجل الجهد والتيار كل فترة زمنية حتى نهاية الشحن.

7. إعادة تفريغ المدخرة بنفس التيار السابق ويسجل الجهد ودرجة الحرارة والتيار كل فترة زمنية.

8. تسجيل وحساب السعة الجديدة C'.

9. حساب كفاءة التفريغ الفعلية من العلاقة:

$$\mu \% = \left(\frac{C'}{C} \right) \times 100 \quad (5)$$

حيث:

C: سعة التفريغ الأولى [Ah].

C': سعة التفريغ الثانية [Ah].

(d) اختبار درجة الحرارة:

الهدف من الاختبار: معرفة سلوك المدخرة في درجات الحرارة المختلفة مثلاً (0°C, 20°C). و الطريقة

كالتالي:

1. تسجيل درجة حرارة الوسط المحيط.
2. شحن المدخرة وتسجيل درجة حرارة الكهروليت (السائل الكهروليتي) وجهد المدخرة والتيار شحنها (مرة في بداية الشحن وأخرى في نهايته).
3. تفريغ المدخرة بعد الوصول إلى مرحلة الشحن الكامل وتسجيل درجة حرارة الكهروليت والجهد في كل فترة زمنية حتى الوصول إلى جهد نهاية التفريغ وتسجيل السعة.
4. إعادة الاختبار السابق ولكن بدرجة حرارة مختلفة للوسط المحيط.
5. تسجيل الجهد بدلالة الزمن حتى نهاية التفريغ وتحسب السعة الجديدة.
6. حساب الساعات ورسم المنحنيات.

النتائج والمناقشة:

تم التوصل إلى النتائج التالية بعد القيام بالإجراءات والخطوات السابقة:

A. قياس السعة والتأكد منها:

تم حساب السعة وفق العلاقة (4):

$$\text{Capacity\%} = \frac{t_A}{t_s \times K_T} \times 100$$

مع أخذ الزمن t_A من المنحنيات البيانية وفق اختبار التفريغ بالزمن الأطول و بتيار التفريغ الأصغر وهو حوالي 1A من الأشكال (6)،(8)،(10)، والزمن t_s من المواصفات الاسمية للمدخرة وكانت النتائج على الشكل التالي:

1. للمدخرة الجافة:

$$\text{Capacity\%} = \frac{1494}{1320 \times 0.942} \times 100 = 120 \%$$

2. للمدخرة السائلة ذات الأغشية المفتوحة:

$$\text{Capacity\%} = 69 \% = \frac{780}{1200 \times 0.942} \times 100$$

3. للمدخرة السائلة ذات الأغشية المغلقة:

$$\text{Capacity\%} = 54.8\% = \frac{620}{1200 \times 0.942} \times 100$$

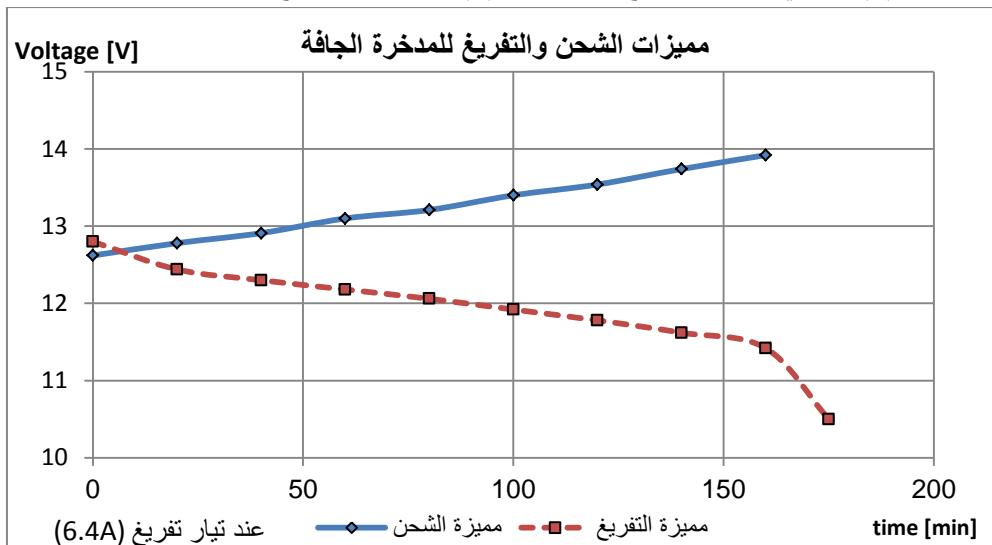
B. اختبارا الشحن والتفريغ:

$$I_{ch} = 0.2C_n \quad \text{تم شحن المدخرة بتيار شحن قدره}$$

تم إجراء التفريغ بأربعة تيارات تفريغ A (1,1)، (4,7)، (6,4)، (7,7) الموافقة لأربع استطاعات مختلفة للمبات وهي على التوالي (3×5W)، (3×21W)، (4×21W)، (5×21W) و النتائج ، موضحة بالأشكال من الشكل (5) حتى الشكل (10):

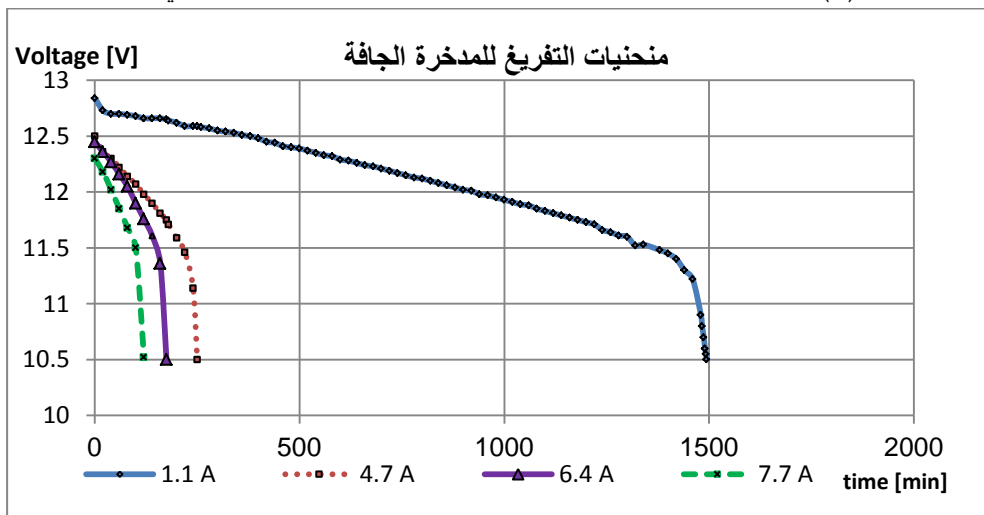
1. للمدخرة الجافة:

يبين الشكل (5) مميزات الشحن والتفريغ، أما الشكل (6) فيبين حالة التفريغ وفق عدة تيارات للمدخرة الجافة.



الشكل (5): مميزات الشحن و التفريغ للمدخرة الجافة.

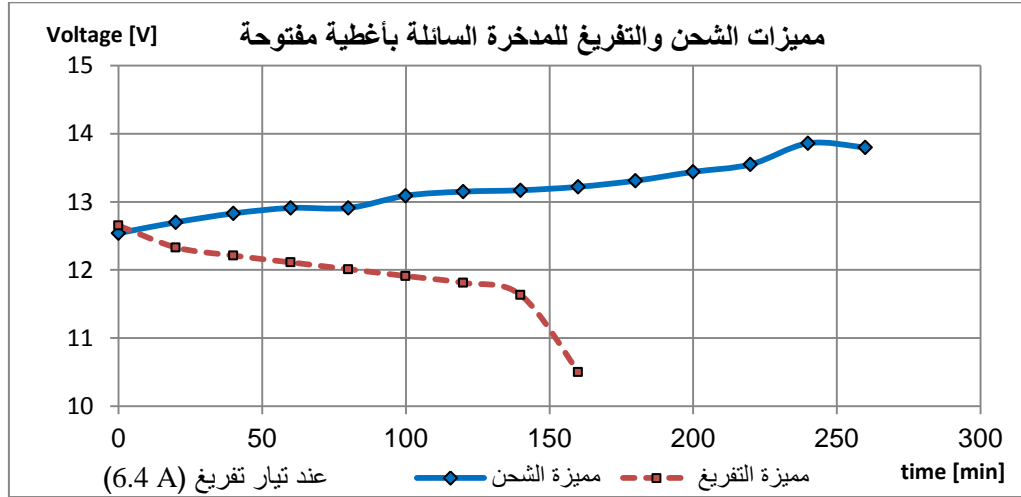
نجد من الشكل (5) أن زمن شحن المدخرة الجافة حتى الشحن الكامل تقريباً هو حوالي 160 دقيقة.



الشكل (6): منحنيات التفريغ للمدخرة الجافة.

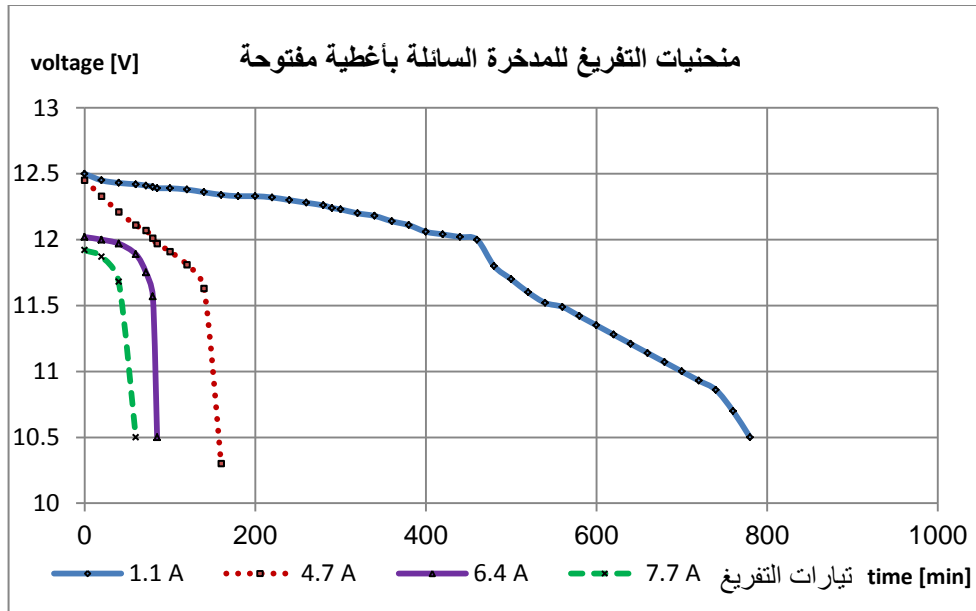
2. للمدخرة السائلة ذات الأغشية المفتوحة:

يبين الشكل (7) مميزتي الشحن والتفريغ، أما الشكل (8) فيبين حالة التفريغ وفق عدة تيارات للمدخرة السائلة ذات الأغشية المفتوحة.



الشكل (7): مميزتا الشحن والتفريغ للمدخرة ذات الأغشية المفتوحة.

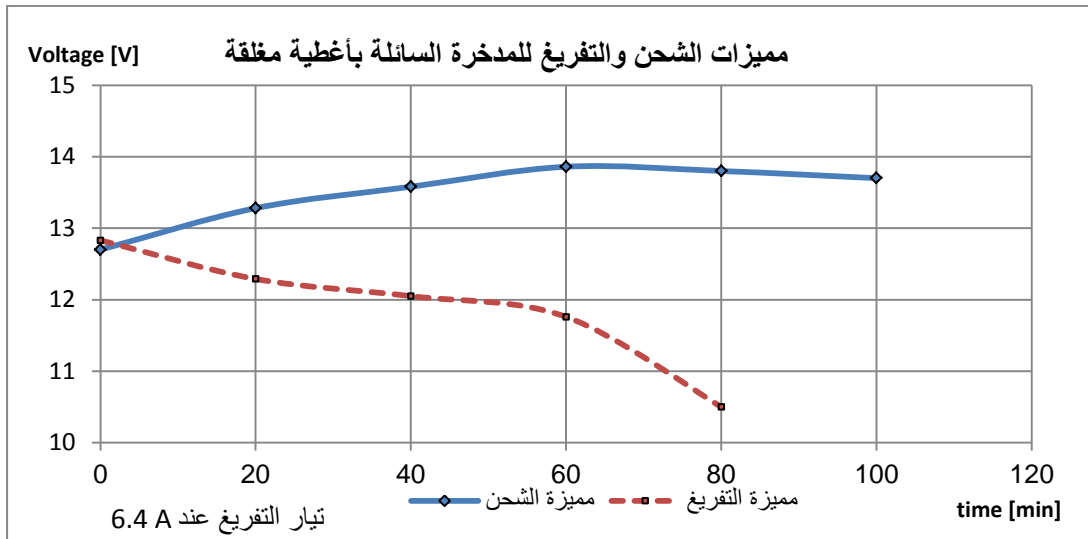
نجد من الشكل (7) أن زمن شحن المدخرة السائلة ذات الأغشية المفتوحة حتى الشحن الكامل تقريباً هو حوالي 240 دقيقة.



الشكل (8): منحنيات التفريغ للمدخرة السائلة ذات الأغشية المفتوحة.

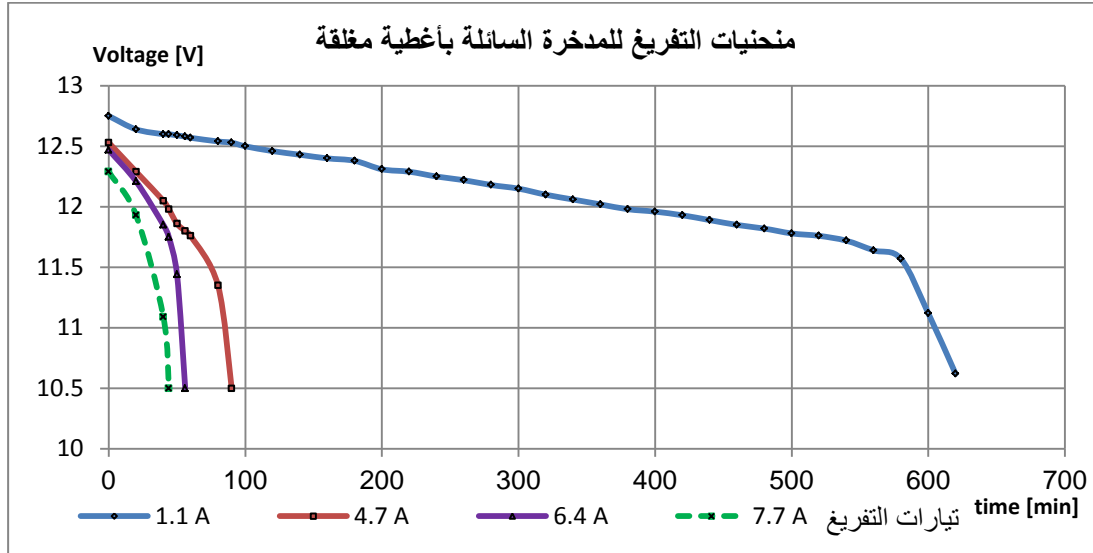
3. للمدخرة السائلة ذات الأغشية المغلقة:

يبين الشكل (9) مميزتي الشحن والتفريغ، أما الشكل (10) فيبين حالة التفريغ وفق عدة تيارات للمدخرة ذات الأغشية المغلقة.



الشكل (9): مميزات الشحن والتفريغ للمدخرة السائلة ذات الأغشية المغلقة.

نجد من الشكل (9) أن زمن شحن المدخرة السائلة ذات الأغشية المغلقة حتى الشحن الكامل تقريباً هو حوالي 100 دقيقة. وتجدر الإشارة إلى أن هناك اختلاف بين قيمتي جهد نهاية الشحن وبداية التفريغ، وذلك بسبب أن المقاومة الداخلية للمدخرة في حالة الشحن هي مقاومة حمل أما في أثناء التفريغ فتكون مقاومة المدخرة هي مقاومة داخلية للمولد باعتبار المدخرة في هذه الحالة هي التي تعطي التيار فيكون انخفاض الجهد عائداً لهبوط الجهد على المقاومة الداخلية لهذه المدخرة، وذلك في المدخرات الثلاث.



الشكل (10): منحنيات التفريغ للمدخرة السائلة ذات الأغشية المغلقة.

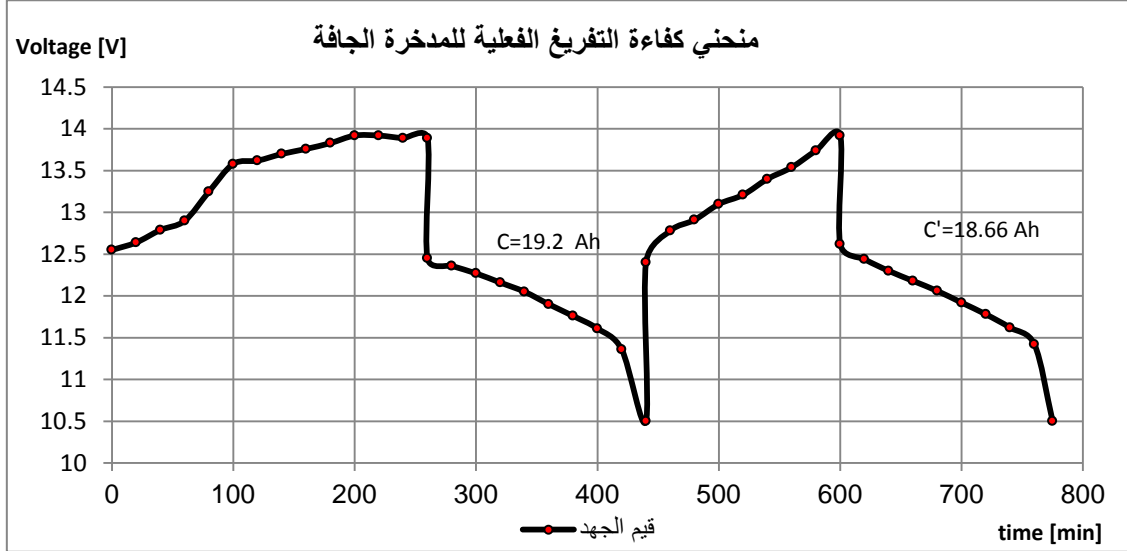
C. اختبار كفاءة التفريغ الفعلية للمدخرة:

تم شحن المدخرة بالكامل ثم فرغت بتيار محدد، ثم أجريت عملية الشحن بحيث استعادت المدخرة سعة التفريغ C وبعدها فرغت المدخرة بنفس التيار السابق وقيست السعة الجديدة C' وحسبت الكفاءة وفق العلاقة (5):

$$\mu \% = \left(\frac{C'}{C} \right) \times 100$$

1. للمدخرة الجافة:

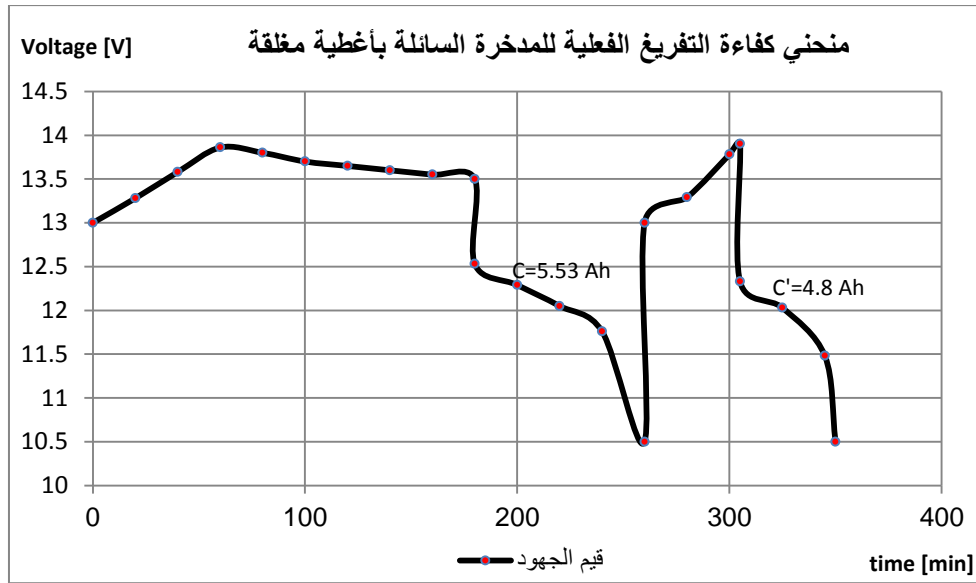
تُظهر الأشكال (11)،(12)،(13) وعلى الترتيب، منحنيات كفاءة التفريغ الفعلية للمدخرة الجافة، السائلة بأغطية مفتوحة، السائلة بأغطية مغلقة على التوالي.



2. للمدخرة السائلة ذات الأغطية المفتوحة:



3. للمدخرة السائلة ذات الأغشية المغلقة:

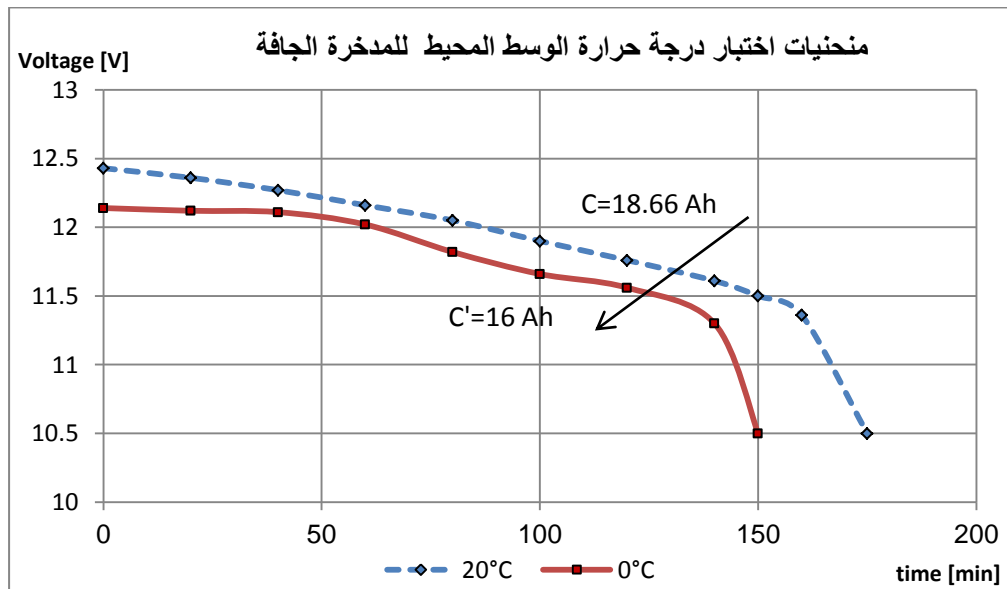


الشكل (13): منحنى كفاءة التفريغ الفعلية للمدخرة السائلة بأغشية مغلقة.

D. اختبار درجة الحرارة:

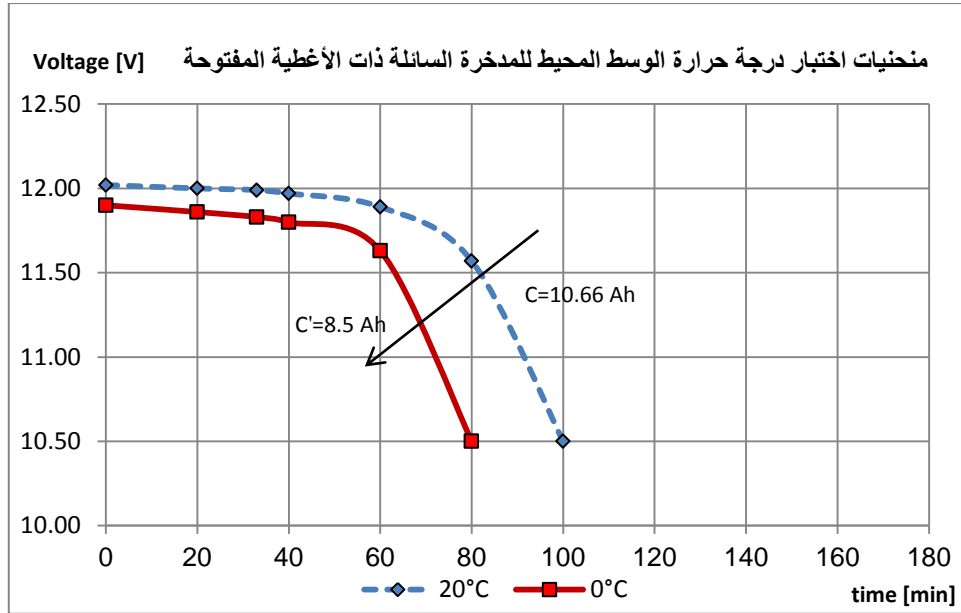
أجريت التجارب السابقة في درجة حرارة 20°C وبالتالي قمنا بإعادة اختبارات التفريغ على المدخرات الثلاث بحمل ثابت (4×21W) أي بتيار تفريغ 6.4 A عند درجة حرارة للوسط المحيط 0°C وأظهرت النتائج بالأشكال (14)،(15)،(16):

1. للمدخرة الجافة:



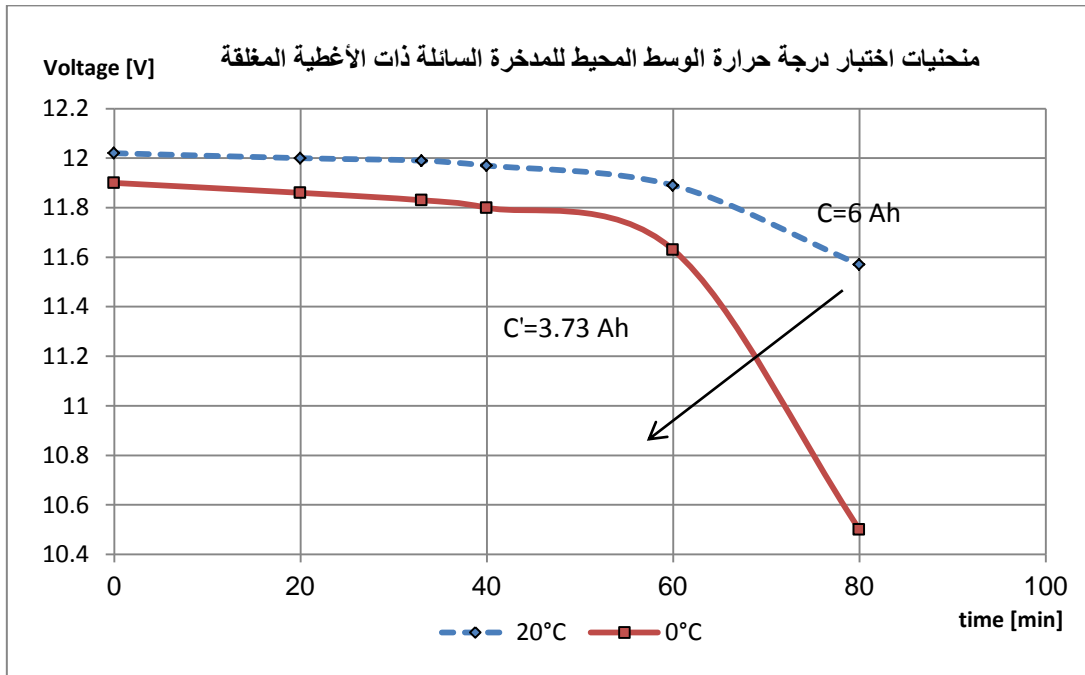
الشكل (14): منحنى اختبار درجة حرارة الوسط المحيط للمدخرة الجافة.

2. للمدخرة السائلة ذات الأغشية المفتوحة:



الشكل (15): منحنى اختبار درجة الحرارة للمدخرة السائلة ذات الأغشية المفتوحة.

3. للمدخرة السائلة ذات الأغشية المغلقة:



الشكل (16): منحنى اختبار درجة حرارة الوسط المحيط للمدخرة السائلة ذات الأغشية المغلقة.

مناقشة النتائج:

بعد الحصول على النتائج وتدوينها وإيضاحها على شكل منحنيات تمت مناقشة هذه النتائج التي تم التوصل إليها لمعرفة ما الذي تم التوصل إليه وما الذي قدمته هذه المقالة، فكانت النتائج وفق الآتي:

A. اختبار القبول وفقاً للمعيار (IEEE-450-2002):

وفقاً للمعيار (IEEE-450-2002) فإن قيمة Capacity% للعلاقة (4) يجب أن تتراوح بين (100-150%) حتى تعتبر المدخرة معطية سعتها الاسمية وتطابق مواصفاتها المصنعية المنشورة.

1. المدخرة الجافة: Capacity%=120% و تعتبر قيمة جيدة جداً، أي أن سعة المدخرة موافقة لمواصفاتها الاسمية المصنعية المدونة.

2. المدخرة السائلة ذات الأغذية المفتوحة: Capacity%= 69% , و تعتبر قيمة سيئة، أي أن سعة المدخرة لا تتوافق مع مواصفاتها الاسمية المصنعية المدونة.

3. المدخرة السائلة ذات الأغذية المغلقة: Capacity%= 54.8%, و تعتبر قيمة سيئة، و سعة المدخرة لا تتوافق مع المواصفات الاسمية المصنعية المدونة.

B. اختبارات التفريغ :

ندرج أهم مواصفات المدخرات المختبرة في الجدول (2) والتي تم استنتاجها من التجارب المنفذة وفق الأشكال من (5) إلى الشكل (10)، وتجدر الإشارة إلى أن السعة في هذا الجدول هي السعة الفعلية المتاحة التي تعطيها المدخرة فعلياً في دارة تفريغ معينة، وبظروف محددة.

الجدول (2) مواصفات التفريغ للمدخرات المختبرة.

سائلة بأغذية مغلقة	سائلة بأغذية مفتوحة	جافة	نوع المدخرة	
			الحمل	الزمن [min]
360	460	920	[min] الزمن	[W] 3×5
11,36	14,3	27,4	[Ah] C	
28.4%	35.75%	76.1%	[Ah] C*%	
44	72	120	[min] الزمن	[W] 3×21
7	12,5	19,6	[Ah] C	
17.5%	31.25%	54.4%	[Ah] C*%	
33	40	85	[min] الزمن	[W] 4×21
6	9	18,6	[Ah] C	
15%	22.5%	51.66%	[Ah] C*%	
-	-	40	[min] الزمن	[W] 5×21
5,6	7,7	15,4	[Ah] C	
14%	19.25%	42.77%	[Ah] C*%	
14%	21.5%	48.6%	عمق التفريغ عند حمل [W] 4×21	

حيث:

C: هي السعة الفعلية للمدخرة.

C*%: هي السعة الفعلية المئوية المتاحة من السعة الاسمية.

مثال: عند تفريغ المدخرة الجافة بتيار تفريغ اسمي حوالي 7A (باستطاعة 3×21), بقيت المدخرة تعمل في

منطقة العمل الاسمية (أي عند جهد أعلى من 12V) لحوالي 120 دقيقة وأعطت سعة فعلية 19,6 Ah.

C. اختبار كفاءة التفريغ الفعلية للمدخرة:

1. المدخرة الجافة: من العلاقة (5):

$$\mu \% = \left(\frac{C'}{C} \right) \times 100$$

$$\mu \% = \frac{18.66}{19.2} \times 100$$

$$\Rightarrow \mu \% = 97.2\%$$

$$\mu \% = \left(\frac{C'}{C} \right) \times 100$$

$$\mu \% = \frac{15.5}{17.1} \times 100$$

$$\Rightarrow \mu \% = 90.6\%$$

2. المدخرة السائلة ذات الأغشية المفتوحة

$$\mu \% = \left(\frac{C'}{C} \right) \times 100$$

$$\mu \% = \frac{4.8}{5.53} \times 100$$

$$\Rightarrow \mu \% = 86.8\%$$

3. المدخرة السائلة ذات الأغشية المغلقة:

D. اختبار درجة الحرارة:

1. المدخرة الجافة:

- عند درجة الحرارة T=20° C : C=18.66 Ah

- عند درجة الحرارة T=0 °C : C'=16 Ah

2. المدخرة السائلة ذات الأغشية المفتوحة:

- عند درجة الحرارة T=20° C : C=10.66 Ah

- عند درجة الحرارة T=0° C : C'=8.5 Ah

3. المدخرة السائلة ذات الأغشية المغلقة:

- عند درجة الحرارة T=20° C : C=6 Ah

- عند درجة الحرارة T=0° C : C'=3.73 Ah

نتيجة: انخفضت السعة للمدخرات الثلاث عند انخفاض درجة حرارة الوسط المحيط ونلاحظ بأن انخفاض السعة الأكبر في المدخرة السائلة ذات الأغشية المغلقة، و يقلّ في المدخرة السائلة ذات الأغشية المفتوحة، و يقل أكثر في المدخرة الجافة. ويفسر ذلك علمياً بأنّ المحلول الكهروليتي هو عبارة عن مادة نصف ناقلة وبالتالي لها مقاومة ذات معامل حراري سالب (Negative Temperature Coefficient (NTC)، حيث بانخفاض درجة الحرارة تزداد المقاومة (المقاومة الداخلية للمدخرة) والعكس صحيح وبالتالي ينعكس ذلك على كفاءة وسعة المدخرة تبعاً لدرجة الحرارة.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

• لجهة اختبار القبول:

- 1- المدخرة الجافة قادرة على إعطاء سعتها الاسمية، أما المدخرتان السائلتان فلا يمكنهما ذلك.
 - 2- المدخرة السائلة ذات الأغشية المفتوحة تعطي سعة أعلى من المدخرة السائلة ذات الأغشية المغلقة.
- #### • لجهة اختبائي الشحن والتفريغ:
- 1- منحني شحن المدخرة الجافة صاعد بانحدار ثابت مما يدل على ثبات المقاومة الداخلية في أثناء الشحن.
 - 2- تعطي منحنيات التفريغ للمدخرة الجافة انخفاضاً بالجهد بزيادة تيار التفريغ، والجهد لا ينخفض تحت 12V بالنسبة للأحمال المختبرة.
 - 3- منحني شحن المدخرة السائلة ذات الأغشية المفتوحة ثابت تقريباً مما يدل على ثبات مقاومة الداخلية تقريباً في أثناء الشحن.
 - 4- تعطي منحنيات التفريغ للمدخرة السائلة بأغشية مفتوحة انخفاضاً بالجهد بزيادة تيار التفريغ أكثر مما تظهره المدخرة الجافة حتى أنه ينخفض أكثر من 12V بزيادة تيار التفريغ لنفس الأحمال المختبرة.
 - 5- منحني الشحن للمدخرة السائلة ذات الأغشية المغلقة ثابت تقريباً مما يدل على ثبات مقاومة الداخلية تقريباً في أثناء الشحن.
 - 6- تعطي منحنيات التفريغ للمدخرة السائلة ذات الأغشية المغلقة انخفاضاً بالجهد بزيادة تيار التفريغ ولكن الجهد لا ينخفض أكثر من 12V.

• لجهة جدول مواصفات التفريغ للمدخرات:

- 1- نجد بأن المدخرة الجافة تعمل عند الجهد الاسمي لزمان أطول من باقي المدخرات يليها السائلة ذات الأغشية المفتوحة يليها السائلة ذات الأغشية المغلقة.
 - 2- المدخرة الجافة تعطي سعة أكبر عند نفس أحمال التفريغ مقارنة مع المدخرات الأخرى.
- #### • لجهة منحنيات كفاءة التفريغ الفعلية للمدخرة:
- المدخرة الجافة لها الكفاءة الأعلى يليها السائلة ذات الأغشية المفتوحة يليها السائلة ذات الأغشية المغلقة
- #### • لجهة منحنيات اختبار درجة حرارة للوسط المحيط:
- انخفاض السعة بتأثير درجة الحرارة في كل المدخرات.

التوصيات:

أعطت نتائج الاختبارات السابقة فكرة واضحة وعملية حول استثمار المدخرات بالشكل الأمثل للباحثين والمستثمرين.

و بناءً على ما تقدم نوصي بما يلي:

- ✓ نوصي باستخدام المدخرة الجافة لأدائها المتميز ومواصفاتها الجيدة لتخزين الطاقة في الأنظمة الكهروشمسية وهي من المدخرات المتوفرة في السوق المحلية وتدعى بمدخرات وحدات عدم انقطاع التغذية الكهربائية (UPS).

✓ لا نوصي باستخدام مدخرات إقلاع السيارات بسبب انخفاض كفاءة تفريغها الفعلية ومميزات تفريغها السيئة وتأثرها الكبير بانخفاض درجات الحرارة وعدم إعطائها أعماق تفريغ كبيرة، وبالتالي لا تصلح لتخزين الطاقة في النظم الكهروضوئية.

✓ لا نوصي تفريغ المدخرات بتيار تفريغ كبير لمدة زمنية كبيرة وبعدها مرات كبير لأن ذلك يخفض كفاءتها و عمرها الزمني المتوقع بشكل كبير.

المراجع:

- [1] Vincent ,Colin Angus. *Modern Battery*,2002.
- [2] IEEE std 450. *IEEE Recommended Practice for Maintenance, Testing, and Replacement of Vented Lead-Acid Batteries for Stationary Applications* .2002
- [3] Gears Educational Systems. *Battery Basics*.2009
- [4] Pierre Lenain, Enersys, France. *Secondary cells and batteries for photovoltaic energy systems* .2005.
- [5] sean a.blaylock. *lead acid battery technology for utility applications*. 2009.
- [6] IEEE Std 1188. *IEEE Recommended Practice for Maintenance, Testing, and Replacement of Valve-Regulated Lead- Acid (VRLA) Batteries for Stationary Applications*.2005.
- [7] IEEE Std 1189. *IEEE Guide for Selection of Valve-Regulated Lead-Acid (VRLA) Batteries for Stationary Applications*.2007.

مواقع الانترنت:

- [8] www.dahua-battery.com.
- [9] www.exide.com.

الملحقات:

الملحق (1): عامل تصحيح الزمن K_T الموصى به لدرجة الحرارة عند درجة مغايرة للدرجة 25°C .

Initial temperature (°C)	Temperature correction factor K_T	Initial temperature (°C)	Temperature correction factor K_T	Initial temperature (°C)	Temperature correction factor K_T
5	0.684	22	0.966	30	1.045
10	0.790	23	0.977	31	1.054
15	0.873	24	0.986	32	1.063
16	0.888	25	1.000	33	1.072
17	0.902	26	1.006	34	1.081
18	0.916	27	1.015	35	1.090
19	0.929	28	1.025	40	1.134
20	0.942	29	1.036	45	1.177
21	0.954				