

نموذج موسع لمدخرات شوارد الليثيوم

د.م. ياسر دياب*

الملخص

إن الهدف من هذا البحث هو فهم الظواهر الأساسية ونمذجتها في المدخرات الكهريائية من نوع شوارد الليثيوم (مثل ثنائي الطبقة الكهريائية وانتقال الشحنة)، وأيضاً دراسة تغير الخصائص الكهريائية للمدخرة في ظروف تشغيل مختلفة. بغرض تمثيل هذه الظواهر حاسوبياً، استُعيِنَ بنموذج الدارة الكهريائية المكافئة ذي الثوابت الزمنية قصيرة وطويلة الأمد. استُخدمت طريقة التفريغ النبضي لتعيين بارامترات (محددات) نموذج المدخرة تجريبياً، وأيضاً لتحديد تغيرات سعة المدخرة بدلالة معدل التفريغ. جرى التعبير عن العلاقة اللاخطية بين بارامترات النموذج الرياضي للمدخرة وحالة الشحن بمعادلات رياضية استُخلصت من النتائج التجريبية بواسطة تقنية الملاءمة (fitting). من أجل الأخذ بالحسبان تأثير درجة الحرارة وتأثير التقادم في خصائص المدخرات، استُعيِنَ بنتائج بحوث سابقة. بناءً على ما سبق، وُبيِّنَ نموذج حاسوبي موسع لمدخرة شوارد الليثيوم في بيئة Matlab، وحُلَّتْ وُفُورِنَتِ النتائج التجريبية ونتائج المحاكاة في حالات التشغيل المختلفة.

الكلمات المفتاحية: مدخرات شوارد الليثيوم، ثنائي الطبقة الكهريائية، انتقال الشحنة، الدارة الكهريائية المكافئة، حالة الشحن، تيار التفريغ، درجة الحرارة، التقادم، طريقة التفريغ النبضية، الملاءمة.

* مدرس - قسم هندسة الطاقة الكهريائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهريائية-جامعة دمشق.

1. المقدمة:

عرفت مدخرات شوارد الليثيوم (Lithium-ion) في المدة الأخيرة تطوراً واسعاً واستُخدمت في كثير من التطبيقات منها الأجهزة الإلكترونية المحمولة (portable electronics) ووسائل النقل ونظم عدم انقطاع القدرة (uninterruptible power supply)، وذلك بفضل خصائصها الكهربائية المميزة مثل كثافة الطاقة العالية (energy density)، وانخفاض التفريغ الذاتي (self-discharge) في أثناء التخزين وعدد دورات الشحن والتفريغ الكبير. تعدُّ المدخرات الكهربائية نظاماً معقداً وصعب النمذجة بسبب تداخل الظواهر الكيميائية والكيميائية، ووجود كثير من العوامل المؤثرة في سلوك المدخرة مثل حالة الشحن (SOC state of charge)، ومعدل التفريغ، ودرجة الحرارة، والتقدم (aging).

نحتاج في دراسة التطبيقات المتطورة مثل السيارة الكهربائية إلى نموذج ديناميكي متطور لمدخرات شوارد الليثيوم قادر على تمثيل سلوكها في ظروف تشغيل مختلفة ولاسيما خلال التفريغ. يوجد حالياً كثير من النماذج المستخدمة لتمثيل سلوك المدخرات، ولكنها نماذج صعبة البناء إذ تعتمد على المعادلات الترموديناميكية وتحتاج إلى تقنيات كيميائية وفيزيائية خاصة لتحديد بارامتراتهما. لذا إقترح في هذا البحث بناء نموذج موسع للمدخرات الكهربائية يأخذ بالحسبان أهم الظواهر والعوامل المؤثرة في خصائص المدخرات وسلوكها، ويكون قابلاً للتحديد تجريبياً باستخدام أدوات مخبرية بسيطة.

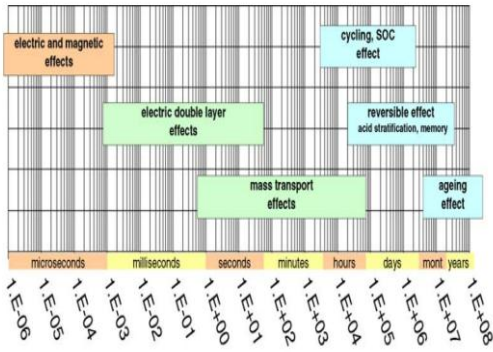
2. الظواهر الأساسية في المدخرات الكهربائية

Fondamental phenomena in batteries:

يوجد كثير من الظواهر المتداخلة في المدخرات الكهربائية، وهذه الظواهر تحدد سلوك المدخرات وتمتد زمنياً من أجزاء الثانية وتصل حتى السنوات. يوضح الشكل (1) مخططاً

زمنياً لهذه الظواهر بحسب ترتيبها الزمني وهي [1]:

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



الشكل (1): مخطط زمني لتسلسل الظواهر الأساسية في المدخرات

الكهربائية [1]

3. النموذج الديناميكي للمدخرة

Dynamical model of battery

إن الظاهرتين الأساسيتين المسيطرتين على عمل المدخرات الكهربائية هما: ظاهرة ثنائي الطبقة الكهربائية وظاهرة انتقال الشحنة. للأخذ بالحسبان السلوك الزمني للمدخرات الناتج عن ظاهرة ثنائي الطبقة (يطلق عليها أيضاً اسم الظاهرة قصيرة الأمد)، وعن ظاهرة انتقال الشحنة (يطلق عليها أيضاً اسم الظاهرة طويلة الأمد) استُخدم النموذج المبين في الشكل (2). إذ يعبر الفرع عن R_1C_1 الظواهر قصيرة الأمد الناتجة عن التأثير

الكهروساكن، في حين يمثل الفرع $R_2 C_2$ الظواهر طويلة الأمد الناتجة عن تفاعلات الأكسدة والإرجاع، كما تمثل المقاومة R_0 المقاومة الأومية.

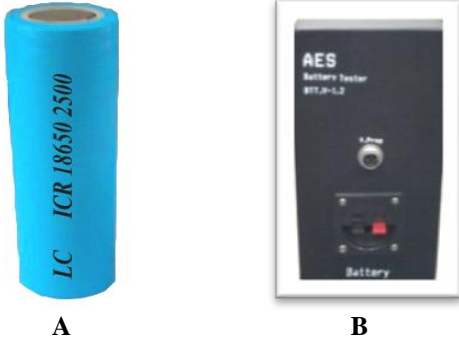
المقاومة R_0 المقاومة الأومية. Z_{eq} : الممانعة الداخلية المكافئة للمدخرة كتابع لحالة الشحن (انظر الملحق (1)).

$\Delta E(\theta)$: عامل تصحيح درجة الحرارة وتأثيره في توتر وسعة المدخرة، إذ يُعَيَّنُ تجريبياً أو بالرجوع إلى مواصفات المدخرة المعطاة من المصنع.

4. المدخرة المدروسة وجهاز التجربة

Studied battery and experimental device

يظهر الشكل (A-3) صورة لمدخرة شوارد الليثيوم المدروسة $(3.7V, 2.5Ah)$. نجد في الملحق (2) جدولاً بالمواصفات الاسمية للمدخرة المدروسة [3].



الشكل (3): مدخرة شوارد الليثيوم المدروسة مع جهاز الاختبار

من أجل شحن المدخرة وتفريغها أُثْبِتَتْ وحدة اختبار من منتجات شركة National Instrument، وُزِمَتْ باستخدام البرنامج LabView (الشكل (B-3)).

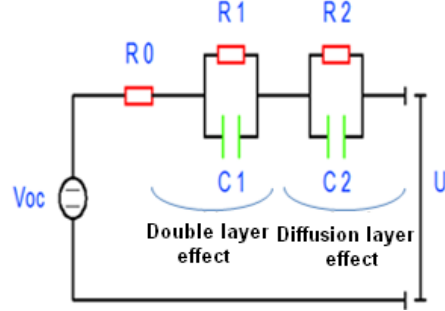
من أهم الطرائق المستخدمة وأسهلها لتحديد قيمة حالة الشحن الآتية SOC للمدخرة هي طريقة تراكم الشحنة، والعلاقة الآتية توضح حساب حالة الشحن وفق هذه الطريقة [4]:

$$SOC(t) = SOC_{init} - \int \frac{i_{bat}}{C} \cdot dt \quad (2)$$

إذ:

$SOC(t)$: حالة الشحن في اللحظة الزمنية t .

الكهروساكن، في حين يمثل الفرع $R_2 C_2$ الظواهر طويلة الأمد الناتجة عن تفاعلات الأكسدة والإرجاع، كما تمثل المقاومة R_0 المقاومة الأومية.



الشكل (2): النموذج الديناميكي للمدخرة [2]

فيما يأتي نوضح عناصر النموذج أعلاه:

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 الكهروليت وسطح القطب، وتسمى أيضاً $R_{Transient-S}$.

C_1 : السعة الناتجة عن انفصال الشحنات على الحد الفاصل بين الكهروليت وسطح القطب، وتسمى أيضاً $C_{Transient-S}$.

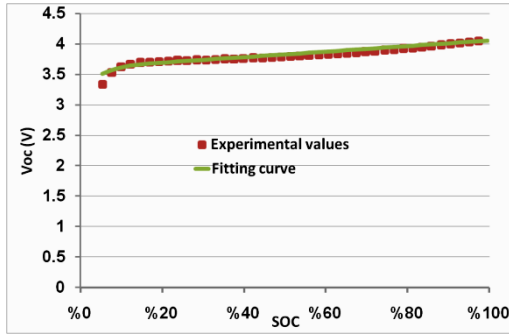
R_2 : المقاومة الناتجة عن انتقال الشحنات بين قطبي المدخرة عبر الكهروليت، وتسمى أيضاً $R_{Transient-L}$.

C_2 : السعة الناتجة عن تخزين الشحنات ضمن الحجم الكلي للمدخرة، وتسمى أيضاً $C_{Transient-L}$.

U : التوتر على أطراف المدخرة، ويمكن أن يحسب من العلاقة الآتية بحسب الحالة شحن أو تفريغ.

$$U(SOC) = V_{OC}(SOC) \pm i_{bat} \cdot Z_{eq}(SOC) \pm \Delta E(\theta) \quad (1)$$

إذ:



الشكل (5): منحنى توتر الدارة المفتوحة بدلالة حالة الشحن

حتى يسهل استخدام النتائج التجريبية المبينة في الشكل (5) ضمن النموذج الحاسوبي للمدخرة، أُجريت عملية ملائمة 2 fitting. فكانت معادلة المنحنى الناتجة عن عملية الملائمة (مع نسبة خطأ قرابة 1.2%) هي عبارة عن جداء تابعين أسيين من الشكل الآتي:

$$V_{OC}(SOC) = 3.61 \cdot e^{(0.117 \cdot SOC)} - 0.524 \cdot e^{(-26.3 \cdot SOC)} \quad (3)$$

6. تحديد بارامترات نموذج المدخرة كتابع لحالة الشحن

Determining battery model parameters as a function of state of charge

بعد تفريغ المدخرة بتيار نبضي عند درجة حرارة وسط محيط ثابتة (25°C) دُرِسَتْ نبضات موجة التوتر الناتجة، إذ في كل نبضة من نبضات موجة التوتر نميز قسمين كما يوضح الشكل (6):

- قسم أول، وهو خطي يعبر عن هبوط التوتر ΔV على المقاومة الأومية R_0 ، وبمعرفة قيمة تيار التفريغ I_{dch} يمكن حساب قيمة المقاومة الأومية R_0 كما يأتي:

$$R_0 = \frac{\Delta V}{I_{dch}} \quad (4)$$

- قسم ثانٍ، وهو منحنى يمثل هبوط التوتر على كل

SOC_{init} : حالة الشحن الابتدائية.

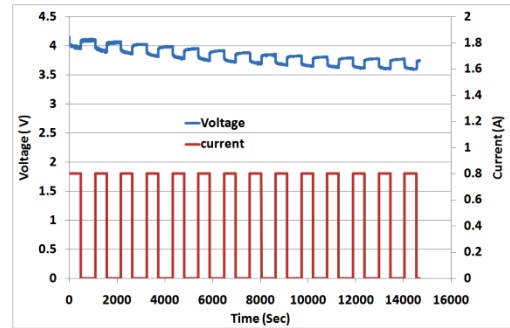
i_{bat} : تيار المدخرة.

C: سعة المدخرة.

5. تحديد توتر الدارة المفتوحة بدلالة حالة الشحن

Determining the open-circuit voltage as a function of state of charge

إن توتر الدارة المفتوحة V_{oc} هو فرق الكمون بين طرفي المدخرة عند حالة اللاحمل، تتعلق قيمة هذا التوتر بحالة الشحن للمدخرة [4]، ولإيجاد العلاقة بينهما أُجريت تجربة التفريغ النبضي على المدخرة المدروسة. قبل البدء في هذه الاختبارات على المدخرة لابد من شحنها بالتوتر الأعظمي مدة لا تقل عن 24h باستخدام الطريقة العائمة floating¹. يُظهر الشكل (4) التغير الزمني لكل من تيار التفريغ والتوتر الناتج على أطراف المدخرة، إذ جرى تفريغ المدخرة من التوتر الأعظمي إلى التوتر (3.6V) بتيار 0.8A وعند درجة حرارة 25°C (باستخدام غرفة مكيفة).



الشكل (4): التغير الزمني لتيار التفريغ وللتوتر على أطراف المدخرة خلال التفريغ النبضي

لتقدير قيمة توتر الدارة المفتوحة V_{oc} المقابلة لكل حالة شحن تجريبياً، نُعدُّ أن كل نبضة تفريغ تقابل تغيراً في حالة الشحن يقارب 10%. بعد ذلك رُسم توتر الدارة المفتوحة كتابع لحالة الشحن، كما يظهر الشكل (5).

² تقنية تبحث عن أقرب منحنى لمجموعة نقاط بحيث يكون الخطأ أصغرياً، وهي موجودة ضمن بيئة Matlab.

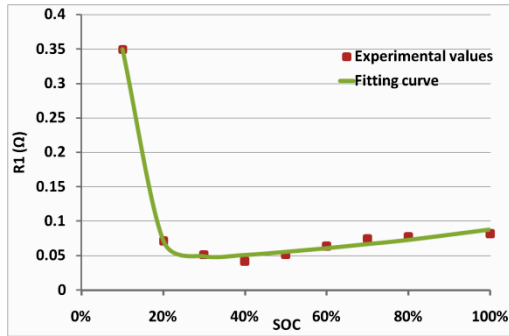
¹ يجري شحن المدخرة بأية طريقة حتى الوصول إلى توتر قريب من توتر الشحن، ثم تترك المدخرة تحت توتر ثابت.

والناتجة عن تفاعلات Redox يمكن أن يحسب بالطريقة نفسها، كما توضح العلاقة الآتية:

$$C_2 = \frac{\tau_2}{R_2} \quad (6)$$

قمنا بتكرار الخطوات السابقة في تحديد عناصر النموذج (R_1, R_2, C_1, C_2) لكل نبضة في موجة التوتر. وجدنا خلال التجارب أن قيمة المقاومة الأومية R_0 لا تتغير مع تغير حالة الشحن.

يظهر الشكل (7) منحنى قيم المقاومة R_1 (R_2) ومنحنى الملاءمة، إذ يلاحظ من الشكل أن قيمة المقاومة تكون كبيرة نسبياً عند حالة شحن أقل من 20%، ثم تتخفص انخفاضاً كبيراً لزيادة فيما بعد تدريجياً.



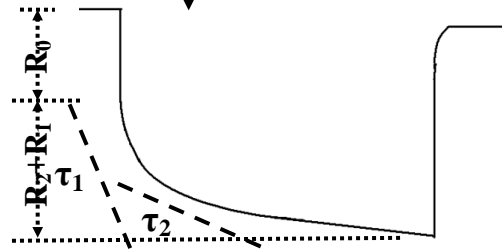
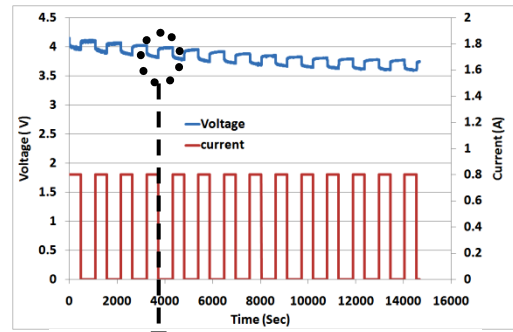
الشكل (7): القيم الحقيقية والقيم الناتجة عن عملية الملاءمة للمقاومات (R_1 و R_2) بدلالة حالة الشحن

إن معادلة منحنى الملاءمة للمقاومة R_1 (بنسبة خطأ أقل من 1%) هي عبارة عن مجموع تابعين أسيين من الشكل الآتي:

$$R_1 = 3.33 \cdot e^{(-23.69 \cdot SOC)} + 0.035 \cdot e^{(0.913 \cdot SOC)} \quad (7)$$

يبين الشكل (8) القيم المحددة تجريبياً لتغير السعة C_1 بدلالة حالة الشحن والقيم الناتجة عن عملية الملاءمة للسعة.

من الفرع R_1C_1 والفرع R_2C_2 (انظر الشكل (2)). عملياً لا يوجد فرق كبير بين المقاومتين R_1 و R_2 [5]، وللتبسيط يمكننا أن نفترض أن $R_2 = R_1$ ³، مع العلم بأن هذه الفرضية لن تؤثر كثيراً في قيم السعات نظراً إلى أن $C_2 \gg C_1$. كما يوضح الشكل (6) إن المسافة الشاقولية المتبقية من المنحنى هي $R_1 + R_2$ ، أي تساوي $2R_1$ باعتبار فرضية التبسيط المذكورة.



الشكل (6): توضع قيم عناصر الدارة المكافئة على منحنى التفريغ النبضي

انطلاقاً مما سبق يمكن استنتاج سعة كل من المكثف C_1 والمكثف C_2 بعد تحديد قيم الثوابت الزمنية τ_1 و τ_2 بالطرائق التقليدية. إن سعة المكثف C_1 الذي يعبر عن ظاهرة ثنائي الطبقة الكهربائية لأقطاب المدخرة يمكن أن يحسب من علاقة الثابت الزمني كما يأتي:

$$C_1 = \frac{\tau_1}{R_1} \quad (5)$$

المكثف C_2 الذي يعبر عن القدرة المختزنة في المدخرة

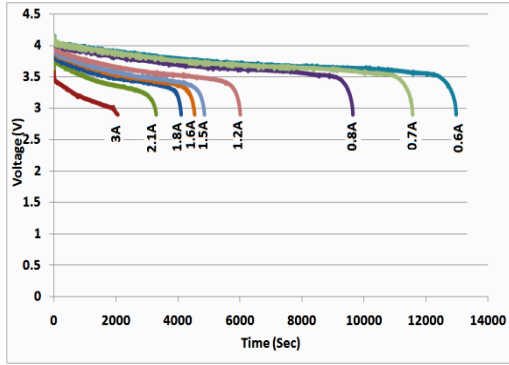
³ هي فرضية تقريبية تصلح فقط في التشغيل الديناميكي لمدخرات شوارد الليثيوم.

وكانت نسبة الخطأ في عملية الملاءمة بحدود 4.6%.
نلاحظ مما سبق أن السعات في نموذج المدخرة تتغير بطريقة لاختبية [5].

7. تحديد سعة المدخرة بدلالة معدل التفريغ

Determining the battery capacity as a function of the discharge rate

من أهم العلاقات للاختبية التي تتميز بها المدخرات، هي العلاقة بين معدل التفريغ (تيار التفريغ) والسعة المفرغة، لشرح هذا التأثير وتضمينه ضمن النموذج الحاسوبي قمنا بتفريغ المدخرة بتيار ثابت ضمن المجال A [0.6÷3]، فكانت النتائج المبينة في الشكل (10).

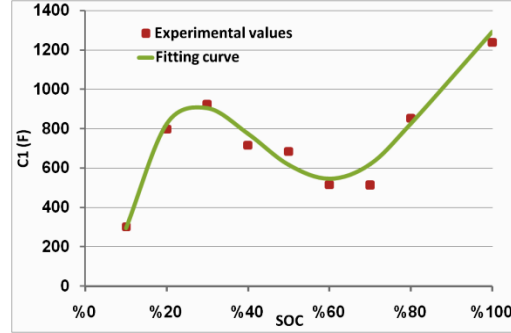


الشكل (10): منحنيات تفريغ المدخرة المدروسة (توتر-زمن) عند عدة تيارات تفريغ

يلاحظ من الشكل أعلاه أنه مع زيادة تيار التفريغ:

- يزداد هبوط التوتر على المقاومة الداخلية للمدخرة (بحسب قانون أوم فإنه مع ازدياد التيار يزداد هبوط التوتر على المقاومة).
- ينخفض زمن التفريغ ومن ثمَّ تنخفض السعة المفرغة (بسبب ازدياد ضياعات جول التي تتناسب مع مربع التيار).

الشكل (11) يوضح العلاقة بين السعة المفرغة مقدرة بـ Ah وتيار التفريغ، أُخِذَتْ هذه التغيرات بالحسبان ضمن البرنامج الحاسوبي المقترح.

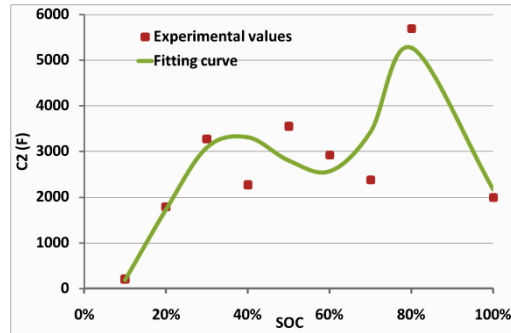


الشكل (8): القيم الحقيقية والقيم الناتجة عن عملية الملاءمة للسعة C_1 بدلالة حالة الشحن.

إن المعادلة (8) الناتجة عن عملية الملاءمة هي عبارة عن معادلة من الدرجة الرابعة، وكانت نسبة الخطأ في عملية الملاءمة قرابة 4%.

$$C_1 = -2.63 \cdot 10^4 \cdot SOC^4 + 6.69 \cdot 10^4 \cdot SOC^3 - 5.62 \cdot 10^4 \cdot SOC^2 + 1.79 \cdot 10^4 \cdot SOC - 997 \quad (8)$$

يوضح الشكل (9) تغيير السعة C_2 بدلالة حالة الشحن ومنحنى الملاءمة.



الشكل (9): القيم الحقيقية والقيم الناتجة عن عملية الملاءمة للسعة C_2 بدلالة حالة الشحن.

إن المعادلة الناتجة عن عملية الملاءمة للسعة C_2 كانت من الشكل الآتي:

$$C_2 = -6.384 \cdot 10^5 \cdot SOC^5 + 1.524 \cdot 10^6 \cdot SOC^4 - 1.268 \cdot 10^6 \cdot SOC^3 + 4.282 \cdot 10^5 \cdot SOC^2 - 4.518 \cdot 10^4 \cdot SOC + 1545 \quad (9)$$

يمكن التعبير عن تغير السعة بدلالة درجة الحرارة باستخدام تقنية الملاءمة (مع خطأ نسبي مؤوي 0.6%) بتابع أسي من الشكل الآتي:

$$C(\theta)\% = 1.066 - 0.1716 \cdot \exp(-0.0363 \cdot \theta) \quad (10)$$

نلاحظ من الشكل (12) أنه مع زيادة درجة الحرارة تزداد السعة المفرغة (يزداد نشاط تفاعلات الأكسدة والإرجاع مع ازدياد درجة الحرارة). عادةً ما يرافق زيادة درجة الحرارة انخفاض المقاومة الداخلية للمدخرة [3]، وذلك بسبب تغير لزوجة السائل الكهرليتي في المدخرة.

ثانياً، تأثير التقادم:

من الملاحظ تجريبياً أن سعة المدخرة تتخفف مع التقادم (مع مرور الزمن أو مع زيادة عدد دورات الشحن والتفريغ).

نميز نوعين من التقادم:

▪ تقادم مع التشغيل، يمكن وصف انخفاض السعة مع التشغيل المتكرر أي مع عمليات الشحن والتفريغ بالعلاقة الآتية [7]:

$$\text{Cycle Losses \%} = \frac{dSOC}{DN} = K_1 N + K_2 \quad (11)$$

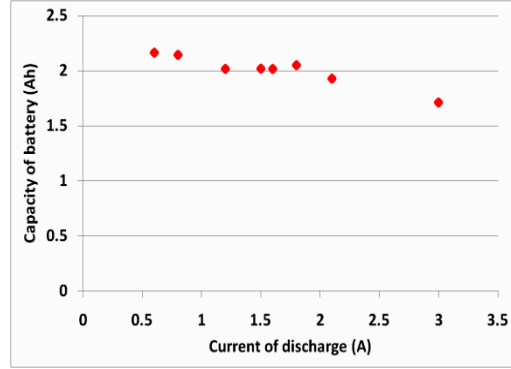
إذ:

Cycle Losses: قيمة تعبر عن الضياعات الناتجة عن التشغيل المتكرر.

$\frac{dSOC}{DN}$: معدل تغير حالة الشحن منسوباً إلى معدل دورات الشحن والتفريغ.

K_1 : ثابت يعبر عن تغير السعة مع ظروف التشغيل، إذ يأخذ بالحسبان شروط التشغيل الحدية من نسب تيار تفريغ ودرجة حرارة.

K_2 : ثابت يعبر عن ضياعات السعة عند ظروف التشغيل الطبيعية. تُحدّد قيمة كل من K_1, K_2 تجريبياً عند درجة حرارة محددة [7].



الشكل (11): تغير السعة المفرغة بدلالة تيار التفريغ

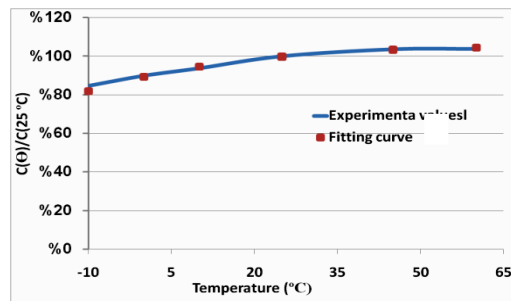
من الملاحظ كما يوضح الشكل (11) تغير سعة المدخرة المدروسة مع تغير تيار التفريغ (معدل التفريغ)، ولكن هذا التغير يعد محدوداً مقارنة بالمدخرات الأخرى مثل رصاص-حمض؛ وذلك لأن تفاعلات الأكسدة والإرجاع Redox في مدخرات شوارد الليثيوم سريعة [6].

8. تحديد تأثير درجة الحرارة والتقادم في خصائص المدخرة

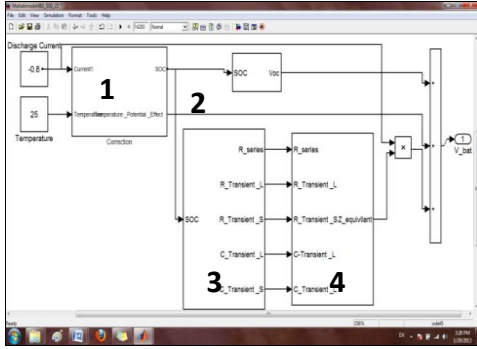
Determining the effect of temperature and aging on the battery characterisation

أولاً، تأثير درجة الحرارة:

من المنحنيات المعطاة من قبل المصنع [3] يمكن تحديد مقدار التغير الحاصل في خصائص المدخرة المدروسة مع تغير درجة الحرارة. يظهر الشكل (12) التغير النسبي المؤوي لسعة المدخرة المدروسة المستخلص من معطيات المصنع من أجل درجات الحرارة الآتية: [-10, 0, 10, 25, 45, 60] °C



الشكل (12): منحني التغير النسبي لسعة المدخرة مع درجة الحرارة



الشكل (13): النموذج الحاسوبي الذي بُني في بيئة Matlab

يتألف هذا النموذج من عدة نظم فرعية subsystems (انظر الملحق (3)):

- النظام الفرعي 1: يقوم بحساب حالة الشحن، وتأثير تغير تيار التفريغ، وتأثير التقادم ودرجة الحرارة.
- النظام الفرعي 2: يُحسَبُ ضمن هذا الجزء توتر الدارة المفتوحة تبعاً لحالة الشحن.
- النظام الفرعي 3: يقوم بتحديد قيم عناصر الدارة المكافئة وفق حالة الشحن اعتماداً على المعادلات التجريبية.
- النظام الفرعي 4: يقوم بحساب قيمة الممانعة للدارة المكافئة للمدخرة.

10. مقارنة نتائج المحاكاة بنتائج الإجراء التجريبي

Comparison of simulation and experimental results

لمقارنة نتائج الاختبار العملي بنتائج النمذجة والمحاكاة، أُجريت عدة تجارب تفريغ بتيار نبضي وبتيار ثابت، وكانت النتائج كما يأتي:

- تفريغ نبضي بتيار 0.7A:

يبين الشكل (14) المنحنى الناتج عن عملية المحاكاة، ومنحنى الإجراء التجريبي، إذ كان الخطأ النسبي المئوي (بين القيم الناتجة عن النمذجة وبين القيم الناتجة عن الإجراء التجريبي) منخفضاً 0.5% حتى وصول التوتر إلى القيمة (3.6V) إذ ارتفع الخطأ إلى 3% في نهاية عملية التفريغ.

N: عدد دورات الشحن والتفريغ.

- تقادم ناتج عن التخزين، ينتج عن مدة تخزين المدخرة، وهو يتعلق بكل من مدة التخزين ودرجة حرارة الوسط المحيط. ويعطى بالعلاقة الآتية [8,9]:

$$Storage\ Losses\ \% = 1.544 \cdot 10^7 \cdot e^{\frac{-404988}{8.3143 \cdot \theta} \cdot T} \quad (12)$$

إذ:

Storage Losses: قيمة تعبر عن الضياعات الناتجة عن مدة تخزين المدخرة.

e: درجة الحرارة مقيسةً بـKelvin.

T: زمن التخزين مقيساً بـMonth.

سنقوم باستعمال كل من ضياعات الاستخدام والتخزين كعامل لتصحيح السعة وفق المعادلة الآتية:

$$CCF = 1 - (Cycle\ Losses + Storage\ Losses) \quad (13)$$

إذ:

CCF: عامل تصحيح السعة وهو يأخذ بالحسبان تأثير التقادم.

فتكون السعة الفعلية بعد التصحيح:

$$C_{usable} = C_{initial} \cdot CCF \quad (14)$$

إذ:

C_{usable} : السعة بعد التصحيح الناتج عن التقادم (القابلة للاستخدام).

$C_{initial}$: السعة الابتدائية للمدخرة.

9. النموذج الحاسوبي المقترح لمدخرة شوارد الليثيوم

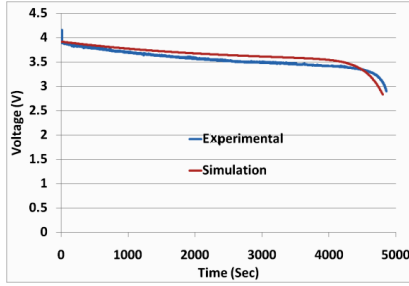
Proposed Model of Li-ion battery

يبين الشكل (13) مخطط النموذج الحاسوبي الذي قمنا ببنائه في بيئة Matlab، إذ اعتمدنا على المعادلات التي قمنا باستنتاجها تجريبياً كما ورد أعلاه (وُضِعَ في الملحق (2) شكل أكثر وضوحاً).

الشكل (16): منحنى التفريغ التجريبي، ومنحنى المحاكاة
لأجل تيار تفريغ ثابت $0.8A$ ⁶

• تفريغ بتيار ثابت $1.5A$:

يوضح الشكل (17) المنحنى الناتج عن عملية النمذجة، فضلاً عن المنحنى الناتج عن الإجراء التجريبي، إذ كان الخطأ النسبي المئوي بين القيم الناتجة عن النمذجة وبين القيم الناتجة عن الإجراء التجريبي يراوح بين $1\% \div 3.5\%$.

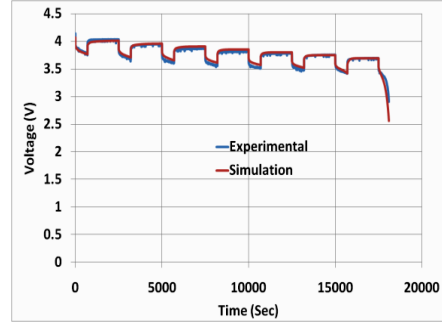


الشكل (17): منحنى التفريغ التجريبي، ومنحنى المحاكاة
لأجل تيار تفريغ ثابت $1.5A$ ⁷

نجد مما سبق أنّ الفرق بين المنحنيين (المحاكاة والتجريبي) صغير، وأنّ النموذج المقترح قادر على تمثيل سلوك المدخرة تمثيلاً جيداً، ولكن الفرق الحاصل في نهاية عملية التفريغ عائد إلى ظواهر كهروكيميائية تحصل على قطب المدخرة، ومن الناحية العملية لايفضل تفريغ المدخرة إلى توترات منخفضة، لأن ذلك يؤدي إلى تآكل سريع في أقطاب المدخرة.

• تأثير التقادم في خصائص المدخرة:

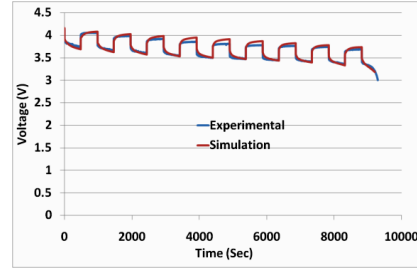
قمنا خلال النمذجة الحاسوبية بتشغيل المدخرة عند عدة دورات شحن وتفريغ لتوضيح عملية التقادم للمدخرة، إذ كما يُلاحظ من الشكل (18) أنّ بزيادة عدد دورات الشحن والتفريغ ينخفض زمن التفريغ للمدخرة أي تنخفض السعة.



الشكل (14): منحنى التفريغ التجريبي ومنحنى المحاكاة
لأجل تيار تفريغ نبضي $0.7A$ ⁴

• تفريغ نبضي بتيار $1.5A$:

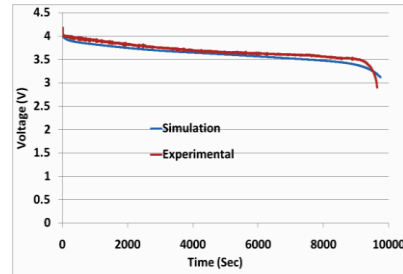
يبين الشكل (15) منحنى المحاكاة ومنحنى الإجراء التجريبي، إذ كان الخطأ النسبي المئوي بين المنحنيين أكبر بقليل من القيم المبينة أعلاه (1.5%).



الشكل (15): منحنى التفريغ التجريبي ومنحنى المحاكاة
لأجل تيار تفريغ نبضي $1.5A$ ⁵

• تفريغ بتيار ثابت $0.8A$:

يبين الشكل (16) المنحنى الناتج عن عملية النمذجة، فضلاً عن المنحنى الناتج عن الإجراء التجريبي، إذ كان الخطأ النسبي المئوي يراوح بين $1\% \div 3\%$.



⁶ منحنى الإجراء التجريبي في الأعلى، ومنحنى النمذجة في الأسفل.

⁷ منحنى النمذجة في الأعلى ومنحنى الإجراء التجريبي في الأسفل.

⁴ منحنى النمذجة في الأعلى ومنحنى الإجراء التجريبي في الأسفل.

⁵ منحنى النمذجة في الأعلى، ومنحنى الإجراء التجريبي في الأسفل.

في بيئة Matlab مقارنة بالنماذج الأخرى للمدخرات مثل النماذج الترموديناميكية، إلا أنه قادر على وصف السلوك الديناميكي للمدخرات بدقة جيدة، وفي مختلف حالات التشغيل. عُرِضَتْ في هذا العمل طريقة سهلة ومهمة في تحديد بارامترات المدخرات الكهربائية التي تساعد على تحديد بارامترات المدخرة تبعاً لحالة الشحن، ولكنها تعدُّ نسبياً أقل دقة من الطريقة الترددية المستخدمة في المرجع [10] التي هي محدودة الاستخدام لغلاء ثمن التجهيزات التي تتطلبها. إنَّ إجراء عملية الملاعبة (fitting) للمنحنيات التجريبية والحصول على منحنيات ذات معادلات رياضية ساعد في عملية إدخال تغيرات خصائص المدخرات في النموذج الحاسوبي.

إنَّ بناء نموذج حاسوبي متطور لمدخرات شوارد الليثيوم يسمح بدراسة معمقة لهذه المدخرات عند استخدامها في السيارات الكهربائية بأنواعها وصولاً إلى الاستخدام الأمثل. إن النموذج المقترح لا يأخذ بالحسبان حالات التشغيل الممتدة إلى أيام حيث يظهر أثر التفريغ الذاتي، لذا نتطلع إلى تطوير هذا النموذج ليمثل التفريغ الذاتي في المدخرات. إنَّ عُنُودَ في هذا البحث على المراجع [3,7,8,9] لتحديد تغيرات خصائص المدخرة المدروسة بدلالة درجة الحرارة والتقدم، ولكن نتطلع إلى تحديدها تجريبياً.

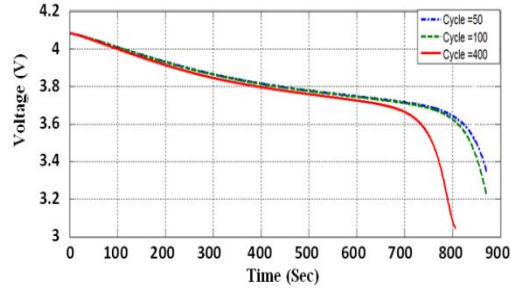
12. الملحق:

• ملحق (1)

بحسب الشكل (2) إنَّ التيار المار في المقاومة الأومية R_0 هو التيار الكلي i_{bat} ، وهذا التيار يتفرع إلى فرعين تيار يمر في المقاومة R_1 (أو في R_2) وتيار سعوي يمر في المكثف C_1 (أو في C_2)، ومن ثمَّ يمكن أن نكتب المعادلة الآتية:

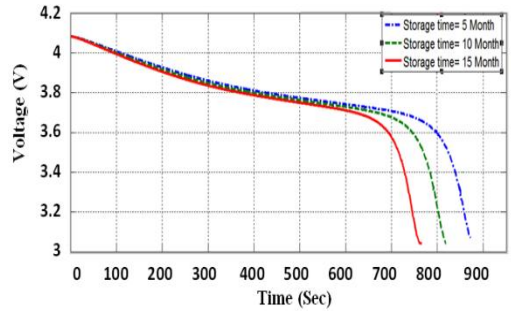
$$i_{bat} = i_{R1} + i_{C1} = \frac{u_{R1}}{R_1} + C_1 \cdot \frac{du_{C1}}{dt}$$

بضرب طرفي المعادلة بـ R_1 وملاحظة أن التوتر $u_{R1} = u_{C1}$ نجد ما يأتي:



الشكل (18): منحنى التفريغ عند دورات شحن وتفريغ مختلفة

من ناحية أخرى، تركنا المدخرة تعمل مدداً زمنية طويلة، فوجدنا وكما يظهر الشكل (19) انخفاض زمن التفريغ، ومن ثمَّ السعة.

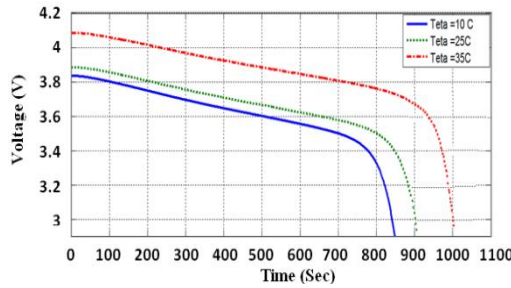


الشكل (19): منحنيات التفريغ عند دورات شحن وتفريغ

مختلفة من أجل مدد تخزين مختلفة

• تأثير درجة الحرارة في خصائص المدخرة:

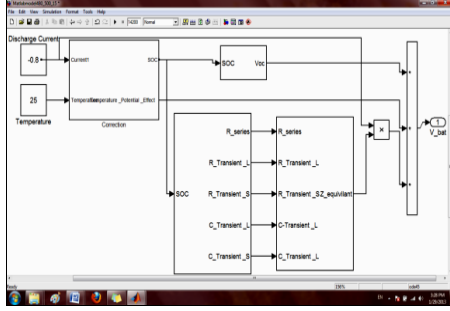
كما يبيِّن الشكل (20) تغير درجة الحرارة وتأثير هذا التغير في كل من التوتر الطرفي والسعة المفرغة، إذ كما شرحنا أعلاه أنَّ بازياد درجة الحرارة يزداد كل من التوتر الطرفي والسعة المفرغة.



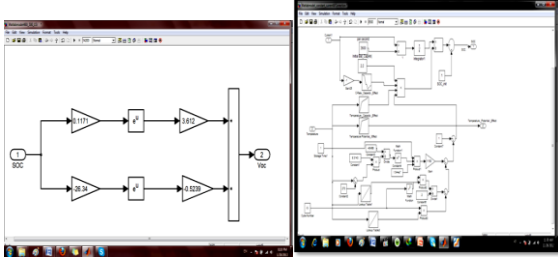
الشكل (20): منحنى التفريغ في درجات حرارة مختلفة

11. استنتاجات:

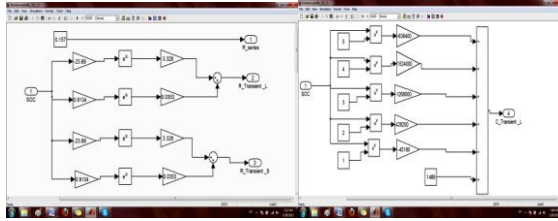
مع السهولة النسبية في بناء النموذج المقترح للمدخرة وبرمجته



Subsystem(2) Subsystem (1)



Subsystem (3)



Subsystem (4)

$$R_1 \cdot i_{bat} = u_{c1} + R_1 \cdot C_1 \cdot \frac{du_{c1}}{dt}$$

وهي معادلة تفاضلية من الدرجة الأولى بطرف ثانٍ مع العلم أنّ التيار المار في المدخلة i_{bat} هو تيار نبضي وقيمته تساوي إما ثابتاً أو صفراً.

وبالأسلوب نفسه يمكن أن نكتب المعادلة التفاضلية على للفرع R_2C_2 وهي:

$$R_2 \cdot i_{bat} = u_{c2} + R_2 \cdot C_2 \cdot \frac{du_{c2}}{dt}$$

إن حلول هذه المعادلات هي من الشكل الآتي:

$$u_{c1} = i_{bat} \cdot R_1 \cdot (1 - \exp(-\frac{t}{C_1 \cdot R_1})) \Rightarrow Z_1 = \frac{u_{c1}}{i_{bat}} = R_1 \cdot (1 - \exp(-\frac{t}{C_1 \cdot R_1}))$$

$$u_{c2} = i_{bat} \cdot R_2 \cdot (1 - \exp(-\frac{t}{C_2 \cdot R_2})) \Rightarrow Z_2 = \frac{u_{c2}}{i_{bat}} = R_2 \cdot (1 - \exp(-\frac{t}{C_2 \cdot R_2}))$$

ومنه نجد قيمة الممانعة المكافئة للمدخلة من تيار تفريغ نبضي هي:

$$Z_{eq} = R_0 + Z_1 + Z_2 = R_0 + R_1 \cdot (1 - \exp(-\frac{t}{C_1 \cdot R_1})) + R_2 \cdot (1 - \exp(-\frac{t}{C_2 \cdot R_2}))$$

• ملحق (2) مواصفات الخلية المدروسة:

Nominal voltage V	3.7
Weight gr	45
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 mΩ @1Khz	150

• ملحق (3) : مكونات النموذج الحاسوبي للمدخلة
Subsystems

13. المراجع*

- [1] Jossen, A., “Fundamentals of Battery Dynamics“, Journal of Power Sources, 2006, 154, pp. 530–538.
- [2] Chen, M. Gabriel, A., “Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I–V Performance“, IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, VOL. 21, NO. 2.
- [3] Panasonic Data Sheet, “<http://www.panasonic.com/industrial/battery>“, (2012).
- [4] Piller, S. Perrin, M.-Jossen, A., “Methods for state-of-charge determination and their applications“, Elsevier, Journal of Power Sources, 2001, Vol. 96. pp. 113-120.
- [5] Einhorn, M., Conte, V., Kral, C., and Fleing, J., “Comparison of electrical battery models using a numerically optimized parameterization method“. In Proceedings of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2011 IEEE.
- [6] V. Pop, H.J. Bergveld, P.H.L. Notten, P.P.L. Regtien, Meas”, State-of-the-art of battery state-of-charge determination”, Institute of Physics Publishing, 2005, 16, R93–R110.
- [7] Ramadass, P. Haran, B. White, R., “Mathematical modeling of the capacity fade of Li-ion cells“, Journal of Power Sources, 2003, 123, 230–240.
- [8] Spotnitz, R., “Simulation of capacity fade in lithium-ion batteries“, Journal of Power Sources, 2003, vol. 113, pp. 72-80.
- [9] Erdinc, O., B. Vural, M. Uzunoglu. “A dynamic lithium-ion battery model considering the effects of temperature and capacity fading“. Clean Electrical Power, 2009 International Conference on. IEEE, 2009.
- [10] Andre, D., Meiler, M., Steiner, K. Sauer, D.U., “Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy“. Journal of Power Sources, 2011. Volume 196, Issue 12, Pages 5349–5356.