

تقييم أداء نظام التخزين بالمكثفات فائقة السعة وموثوقية: تطبيق في الحافلات الكهربائية

د.م. ياسر دياب*

الملخص

إن الهدف من هذا البحث هو دراسة موديول مكثفات فائقة السعة وتصميمه لاستعادة قدرة الكبح في الحافلات الكهربائية. وقد سُحِنَ موديول المكثفات فائقة السعة بواسطة مقطّع إلكتروني رافع-خافض للتوتر عكوس بالتيار. صُمِّمَتِ القيادة وعناصر التنعيم في المقطّع آخذين بالحسبان الطبيعة اللاخطية للمكثفات فائقة السعة. من أجل استعادة قدرة الكبح بسرعة يُشْحَنُ موديول المكثفات فائقة السعة بتيار ثابت، وأما التفريغ فيكون بتوتر ثابت على قضبان التيار المستمر في الحافلة. جرى نمذجة موديول المكثفات فائقة السعة بمختلف مراحل عمله (إقلاع، وتغذية الأجهزة المساعدة، وكبح) في بيئة برنامج SIMPLORER. واستنتجنا، من نتائج النمذجة، قيم التشغيل للعوامل (مثل التوتر والتيار ودرجة الحرارة) ولعناصر الموديول المدروس جميعها (ديودات، وترانزستورات IGBT، ومكثفات تقليدية، ومكثفات فائقة السعة). أخيراً، قُدِّرَتِ قيمة معدل العطل والموثوقية لعناصر الموديول بالاعتماد على قيم عوامل التشغيل المختلفة. كما حُلَّتْ أيضاً أعطال الموديول.

الكلمات المفتاحية: موديول مكثفات فائقة السعة، استعادة قدرة الكبح، مقطّع إلكتروني، تيار ثابت، توتر ثابت، معدل العطل، موثوقية، تحليل الأعطال.

* مدرس-قسم هندسة الطاقة الكهربائية- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة دمشق

1. المقدمة:

شهدت المكثفات فائقة السعة super capacitors في المدة الأخيرة تطوراً واسعاً بوصفها عناصر تخزين الطاقة الكهربائية في مجال التطبيق، وذلك بفضل خصائصها الكهربائية electrical characterisations المميزة من حيث عدد دورات شحنها وتفريغها الكبير جداً charge/discharge cycling واستطاعة التفريغ discharging power المرتفعة مقارنة بالمدخرات الكهربائية. إذ إنَّ سعاتها capacitance يمكن أن تصل إلى عشرات الآلاف من الفاراد ومقاومتها التسلسلية المكافئة ESR (equivalent series resistance) منخفضة جداً من رتبة الميكروأوم [1].

هذه العناصر مصممة خصيصاً لتخزين الطاقة الكهربائية ذات الاستطاعة العالية، وبإمكان هذه العناصر أن تكون مكملة للمدخرات الكهربائية أو لحايات الوقود fuel cells في نظم التغذية. إن إضافة المكثفات فائقة السعة إلى نظم التيار المستمر (خلايا وقود ومدخرات) يعزز من قدرتها على الاستجابة اللحظية لطلب الاستطاعة. وبناءً عليه تُطوَّرُ حالياً نظم تخزين من هذه العناصر للعمل في معظم المركبات الكهربائية electrical vehicles (سيارات، وقطارات، وحافلات trolleybuses، الخ). لهذه النظم وظائف متعددة في التطبيقات المذكورة، من أهمها امتصاص القدرة الكهربائية خلال مدة الكبح ليعاد استخدام هذه القدرة في تغذية عدة تجهيزات، وهذا يمكن أن يحسن من كفاءة النظام الكهربائي في المركبة. سيُدرَسُ ويصمَّمُ في هذا البحث مودول مكثفات فائقة السعة لاستعادة قدرة الكبح في الحافلات الكهربائية، إذ تُعدُّ الحافلات الكهربائية من وسائل النقل العامة المنتشرة في كثير من دول العالم.

الهدف من البحث: تحليل عمل نظام التخزين بالمكثفات

فائقة السعة ضمن ظروف التشغيل المختلفة، وحساب احتمال تعرض عناصره لمختلف الأعطال بدلالة عوامل التشغيل، ودراسة أثر الأعطال الناتجة في عمل نظام التخزين.

مراحل تحقيق العمل:

• **تصميم نظام التخزين¹:** سيبحثُ في عدد الخلايا المُتلى من المكثفات فائقة السعة الواجب ربطها على التسلسل والتفرع لتأمين التيار والتوتر اللازمين لاستعادة قدرة الكبح في الحافلة الكهربائية وتشكيل ما يسمى بنظام تخزين الطاقة. كما ستُدرَسُ طريقة ربط المكثفات فائقة السعة باستخدام المبدلات الالكترونية إلى النظام الكهربائي المحيط، وتختارُ قيادة خاصة ومستقرة لهذه المبدلات، ويوضَّحُ مدى تأثير لاختية المكثفات فائقة السعة في حساب عناصر التعيم في المبدلات الالكترونية المستخدمة.

نمذجة عوامل التشغيل وتقديرها: لا بدَّ دوماً أن يسبق حساب الموثوقية تحديد مختلف عوامل (بارامترات) التشغيل. لذلك سيجري نمذجة نظام التخزين بالمكثفات فائقة السعة وتحليله باستخدام برنامج متخصص في الدارات الكهربائية المكافئة SIMPLORER، ثم ستُستنتجُ عوامل التشغيل المختلفة.

تقييم الموثوقية وتحليل الأعطال: وهي مرحلة مهمة إذ تُعدُّ الموثوقية من أهم خصائص الأنظمة الكهربائية ومقياساً لأدائها مع الزمن. ستُقدَّرُ، أول مرة، قيمة الموثوقية لمختلف مكونات نظام التخزين بدلالة عوامل التشغيل من توتر وتيار ودرجة حرارة في الحافلة ثم سيبحثُ في الأعطال المحتملة في نظام التخزين وأثرها في عمله.

¹ سنطلق على مجموع المكثفات فائقة السعة والمقطع الالكتروني اسم نظام التخزين.

فاصل مسامي separator من رتبة النانومتر. يظهر الشكل (2) مختلف مكونات المكثف فائق السعة المصنع من قبل شركة EPCOS.



الشكل (2): بنية مكثف فائق السعة [3]

عند شحن المكثفات تتوزع الشحنات تحت تأثير الحقل الكهربائي المطبق. يخلق وجود لبوس صلب ناقل وكهرليت طبقتين ناقلتين إحداهما مكونة من شحنات موجبة داخل اللبوس والأخرى سالبة داخل الكهرليت، وعلى الجهة الأخرى من المكثف أي على اللبوس السالب نجد مقابله الشحنات الموجبة كما هو موضح في الشكل (2) [3]. إن المسافة الفاصلة بين اللبوس والكهرليت صغيرة جداً من رتبة النانومتر وهذا ما يسمى الطبقة الكهرليتية المزدوجة electric double layer. لذلك يسمى أحياناً هذا النوع من المكثفات بالمكثفات ذات الطبقة الكهرليتية المضاعفة (double layer capacitors)، في حين يطلق بعض المصنعين (مثل شركة ماكسويل) على هذه العناصر اسم ultracapacitors.

3. تعريف بالحافلة الكهربائية وشبكتها

Definition of trolleybus and its network

أصبح استخدام الحافلة الكهربائية ضرورة بيئية في معظم بلدان العالم للحفاظ على بيئة نظيفة خاصة داخل المدن الكبيرة. تغذى الحافلة الكهربائية في المدن من خطوط هوائية موزعة على طول مسارها بواسطة قضبان موجودة على سطحها (الشكل (3)).

2. المبدأ الفيزيائي للمكثفات فائقة السعة وبنيتها

Physical principle of supercapacitors and its structure

في المكثف التقليدي² تحسب قيمة السعة C من العلاقة أنه، والطاقة المخزنة E ترتبط بالسعة والتوتر U بالعلاقة (1):

$$C = \epsilon \cdot \frac{S}{D} \quad (1)$$

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

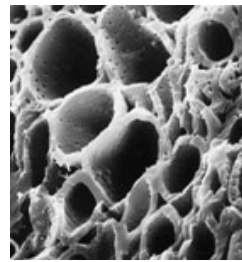
إذ،

S: المساحة الفعالة (المشتركة) بين اللبوسين،

D: ثخانة العازل الفاصل بين اللبوسين،

ε: ثابت العازلية.

ومن العلاقة أعلاه نرى أن لزيادة السعة لابداً من زيادة قيمة ثابت العازلية أو زيادة النسبة S/D. يكمن المبدأ الأساسي للمكثفات فائقة السعة في زيادة النسبة S/D. في المكثفات فائقة السعة تتوضع الشحنات الكهرليتية (السالبة والموجبة) على مساحة كبيرة في اللبوسين [1]. اللبوسان هما من نوع اللبوسات المسامية porous electrode وكما يظهر الشكل (1) صورة ميكروسكوبية في سطح أحد اللبوسات.



الشكل (1): البنية المسامية للبوس مكثف فائق السعة [2]

من حيث البنية، إن المكثفات فائقة السعة مكونة من لبوسين لهما بنية مسامية ومن كهرليت electrolyte

² نطلق اسم مكثفات تقليدية على الأنواع العادية من المكثفات لتمييزها عن نوع المكثفات فائقة السعة.

الطائرة.

إنّ خصائص عملية الكبح متغيرة وخاصة الاستطاعة والقدرة. فالاستطاعة تعتمد على وزن المركبة وشدة الكبح. من المهم معرفته عند التصميم هو أن الاستطاعة العظمى الناتجة عن عملية الكبح لا يمكن أن تزيد على مجموع الاستطاعات العظمى المولدة من المحركات التحريضية في الحافلة.

يبدأ شحن نظام التخزين بتحسس مرحلة الكبح وذلك من خلال ارتفاع التوتر بشكل واضح على قضبان التيار المستمر للمحرك مدة كافية (من رتبة الثانية)³. بعد انتهاء عملية الكبح يجب استهلاك القدرة المخزنة في النظام في أسرع وقت ممكن؛ وذلك حتى يتسنى الكبح باستعادة القدرة من جديد في أية لحظة. من حيث المبدأ وبحسب الدراسة المرجعية [5] يمكن استخدام نظام الكبح باستعادة القدرة الكهربائية لتخفيض استهلاك الحافلة بما رتبته 20%-30%.

من جانب آخر، إن القدرة المستعادة من الكبح يمكن أن تكون غير كافية لتحقيق الأهداف جميعها التي وضع من أجلها نظام التخزين، على سبيل المثال استهلاك دائم من بعض التجهيزات المساعدة مثل التكييف. لذلك يمكن أن يُشحن نظام التخزين من شبكة التغذية الهوائية مباشرة في محطة التوقف أو عندما تكون الإشارة حمراء إذ يكون الاستهلاك ضعيفاً في هذه الحالة.

إن توتر الشبكة الكهربائية العامة هو 20 kV لذا تربط محولة كهربائية لتخفيض التوتر. على خرج المحولة يربط جسر تقويم غير مقاد للحصول على التوتر المستمر اللازم للحافلات الذي يراوح بين 600 V و 750 V. يبين الشكل (5) صورة للشبكة الهوائية المغذية للحافلات الكهربائية في مدينة مونتريال في كندا.

³ سوف نعرض بمقالتنا اللاحقة نمذجة كامل النظام الكهربائي موضحين مقدار الارتفاع على توتر بأسبار المحرك ومدته.



الشكل (3): حافلة كهربائية مغذاة من خط هوائي بواسطة

قضيبين [4]

تُقسم الشبكة الكهربائية المغذية للحافلات إلى أجزاء لأسباب مختلفة من أهمها تخفيض هبوطات التوتر، تنتقل الحافلة من جزء إلى آخر عبر عازل، يوضّح الشكل الآتي صورة لأحد العوازل.



الشكل (4) صورة للعازل في شبكة حافلة كهربائية [5]

إن الهدف الأول لاستخدام نظام تخزين الطاقة في هذا النوع من الحافلات هو استعادة القدرة الكهربائية. وحتى يكون الاستخدام مناسباً لأبداً من أن يحقق نظام التخزين شرطين أساسيين [5]:

- شرط تصميمي، وهو أن تكون سعة نظام التخزين من حيث الاستطاعة والقدرة أكبر من الاستطاعة المنتجة من عملية الكبح،
- شرط إدارة الطاقة، وهو أن تكون حالة الشحن (state of charge) لنظام التخزين ضعيفة في لحظة الكبح حتى يمكن استعادة أكبر قدر من قدرة الكبح.

فضلاً عن الكبح باستعادة القدرة يستخدم نظام الكبح الديناميكي المؤلف من مقاومات لتبديد القدرة وعناصر الكترونية (ترانزستور وديودات)، ليستخدم في الحالات

أن القدرة الحركية هي $W=625 \text{ W.h}$ ، والقدرة المحسوبة، من أجل زمن تفريغ 15 s، تكافئ استطاعة عظمى تقارب $625 \times 3600 / 15 = 150 \text{ kW}$ وهذا منطقي إذ إنَّ الاستطاعة الكلية لمجموع المحركات هي 160 kW. من الناحية الفنية لأجل استطاعة كبيرة من رتبة 150 kW (انظر الملحق (2))، يفضل تجزئة استطاعة الكبح إلى ثلاثة موديولات استطاعة كل منها 50 kW ($625/3=208 \text{ W.h}$). توجد أنواع متعددة من الحافلات الكهربائية وبعض منها يحوي أربعة محركات تحريضية ($4 \times 80 \text{ kW}$)، ومن ثمَّ يمكن أن تُستَعَادَ قدرة كهربائية أكبر خلال الكبح وبذلك يمكن أن تستخدم عدة موديولات من المكثفات فائقة السعة.

4. حساب موديولات المكثفات فائقة السعة للحافلة الكهربائية

Sizing of trolleybus supercapacitors modules

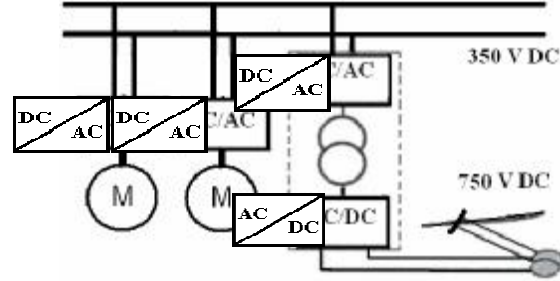
إنَّ تخزين الطاقة الكهربائية في المركبات الكهربائية ينجز على نحو أفضل باستخدام المكثفات فائقة السعة. تمثل المكثفات فائقة السعة أحدث الابتكارات في مجال تخزين الطاقة الكهربائية. إنَّ مردود الشحن والتفريغ لهذه المكثفات أكبر من مردود المدخرة إذ يمكن أن يصل إلى 98%، لأن المقاومة ESR فيها من رتبة $400 \mu\Omega$ وهي أصغر بعشرات المرات من المقاومة في مدخرات شوارد الليثيوم ($10 \text{ m}\Omega$). أضف إلى ذلك أنه لأجل الوزن نفسه تكون الاستطاعة في المكثفات فائقة السعة أكبر بكثير من مدخرات شوارد الليثيوم التي تعدُّ الفضلى في هذا المجال [6].

يُرْبَطُ نظام تخزين الطاقة بالمكثفات فائقة السعة إلى القضبان الداخلية للحافلة وعلى توتر مستمر قدره 350 V كما يوضِّح الشكل (7).



الشكل (5): شبكة التغذية للحافلات الكهربائية في مدينة مونتريال، كندا [4]

إن التوتر المستمر على الخطوط الهوائية فوق الحافلة يجري تعريضه ومن ثم تقويمه والتحكم به للوصول إلى توتر مستمر 50 V على القضبان الداخلية للحافلة الكهربائية كما يبيِّن الشكل (6). يربط إلى هذه القضبان محركان تحريضان ($2 \times 80 \text{ kW}$) (بحسب نوع الحافلة)؛ وذلك عبر معرجات تساعد على التحكم بالمحركات خلال الإقلاع وتنظيم السرعة والعزم [5].



الشكل (6): مخطط ربط المحركات داخل الحافلة الكهربائية

إن القدرة الحركية W (kinetic energy) لحافلة تسير بسرعة ما تعطى بالعلاقة الآتية:

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

إذ،

M : كتلة الحافلة مع الركاب مقدرة بـ Kg،

v : سرعة الحافلة وتقدر بـ m.s^{-1} .

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

بناءً عليه وباستخدام العنصر MC2600 (2600 F, 2.7 V) (الشكل (8)) المنتجة حديثاً من قبل شركة-MAXWELL technology (في الملحق (1) نضع جدولاً بالموصفات الاسمية للمكثف فائق السعة المذكور)، نجد أن عدد العناصر الكلي المطلوب هو:

$$n = \frac{C_{(cell)}}{C_{eq}} = \frac{2600}{22} \approx 120 \text{ cells} \quad (5)$$



الشكل (8): صورة لمكثف فائق السعة [6] MC2600

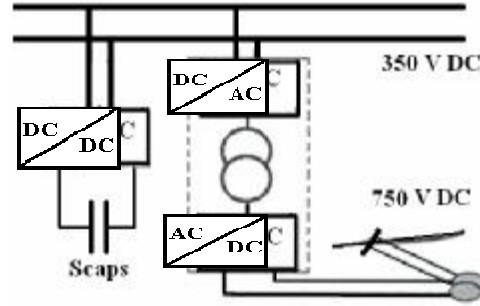
من أهم مساوئ هذه العناصر هي أن توتراتها الاسمية ضعيفة وهي من رتبة 2.7 V، لذلك نحتاج إلى وصل عدد كبير منها على التسلسل للوصول إلى التوتر المطلوب. يمكن حساب عدد الخلايا من المكثفات فائقة السعة اللازمة لتتحمل التوتر المطلوب (300 V) كما يأتي:

$$n = \frac{U_{scn}(module)}{U_n(cell)} = 111 \text{ cells} \quad (6)$$

نجد بحسب العلاقة (7) أنه يلزم 111 خلية تسلسلية من المكثفات فائقة السعة. إن هذا العدد أصغر من العدد المحسوب في العلاقة (6)، ومنه 120 خلية تسلسلية كافٍ. بمعنى أن كُدس واحد من المكثفات فائقة السعة كافٍ لتأمين القدرة المطلوبة.

من أجل نظام التخزين المدروس ذي الاستطاعة العظمى 50 kW ومن علاقة الاستطاعة والقدرة بدلالة

⁴ الكدس stack يستخدم ليند على مجموعة الخلايا الموصلة على التسلسل.



الشكل (7): مخطط ربط نظام تخزين مكثفات فائقة السعة في الحافلة الكهربائية

يمكن حساب القدرة المفرغة بين توترين من العلاقة (1) كما يأتي:

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

إذ،

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

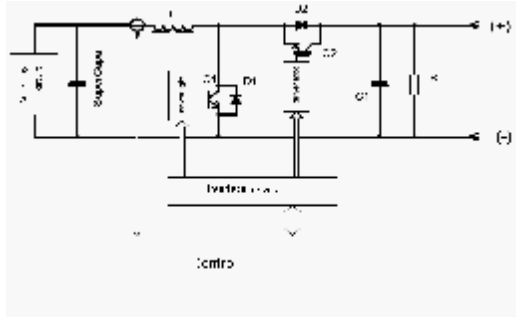
$U_{sc_{min}}$: القيمة الصغرى للتوتر على أطراف نظام تخزين مكثفات فائقة السعة،

C_{eq} : السعة المكافئة لنظام تخزين مكثفات فائقة السعة. يُصمَّم عادةً موديول المكثفات فائقة السعة ليعمل من حيث الشحن والتفريغ بين التوتر الاسمي للموديول $U_{sc_{max}}=U_{sc_n}$ ونصف التوتر الاسمي له $U_{sc_{min}}=U_{sc_n}/2$ ، ومنه تصيح العلاقة (3) على الشكل الآتي:

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

بافتراض أن التوتر الاسمي لمجموع المكثفات فائقة السعة الموصولة على التسلسل هو 300 V نجد أن قيمة السعة المكافئة C_{eq} هي:

$$C_{eq} = \frac{E}{0.75 \cdot 0.5 \cdot U_{sc_n}^2} = \frac{208 \times 3600}{0.75 \times 0.5 \times 300^2} \approx 22 \text{ F} \quad (4)$$



الشكل (10): مخطط لبنية نظام التخزين المدروس

يمكن تقسيم عمل المقطع إلى مرحلتين:

- **مرحلة الشحن⁶:** يستخدم مقطع Buck لتخفيض توتر الباسبار إلى توتر يتناسب مع توتر كُدس المكثفات فائقة السعة (الشكل (10)).
- تحسب قيمة عامل الدور (duty cycle) α_2 للترانزستور Q_2 من العلاقة الآتية:

$$\alpha_2 = \frac{U_{sc}}{U_{bus}} \quad (7)$$

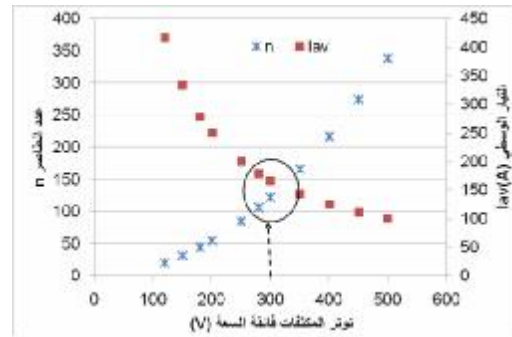
إذ،

U_{sc} : التوتر على أطراف كُدس المكثفات فائقة السعة،

U_{bus} : التوتر على قضبان التيار المستمر.

قيمة عامل الدور α_2 متغيرة بحسب توتر المكثفات فائقة السعة كما سنرى لاحقاً. من المعروف أن توتر المكثفات فائقة السعة يمكن أن يتغير مع الزمن من قيمة الصفر إلى القيمة الاسمية. وهذا ما يجعل من حساب قيمة السعة C_1 والمحارضة L أكثر صعوبة إذ يلزم لكل قيمة ل α_2 قيمة للسعة وللتحريض. يمكن في المقطع الالكتروني حساب سعة التنعيم C_1 بالعلاقة الآتية [12]:

التوتر والتيار والسعة، نرسم على الشكل (9) تأثير التوتر المقترح لنظام التخزين في عدد العناصر n وفي التيار الوسطي المار في نظام التخزين I_{av} . نجد من أجل التوتر 300 V أن التيار الوسطي الأمثل المار في المكثفات فائقة السعة هو 160 A وعدد العناصر الأمثل هو 122، وهو أكبر بقليل من الرقم المحسوب أعلاه. وهذا العدد الأخير هو الذي سيكون معتمداً في هذه الدراسة وكذلك التيار.



الشكل(9): التيار وعدد العناصر الأمثل لنظام التخزين المقترح

5. حساب عناصر التنعيم في المقطع

Sizing smoothing elements in chopper

من خلال دراستنا المرجعية [7]، [8]، [9] عن استخدام أنظمة التخزين في الآليات الكهربائية مثل الترامويه (tramway) والحافلات الكهربائية وجدنا أنه يستخدم مقطع خافض-رافع buck-boost لشحن نظام التخزين بالمكثفات فائقة السعة وتفريغه.

في الحافلة الكهربائية يربط كُدس المكثفات فائقة السعة إلى باسبار 350 V [5] عن طريق مبدل الكتروني Buck-Boost يسمح بمرور الاستطاعة بالاتجاهين كما يظهر الشكل (10) (بحسب النورمة⁵ IEC 61373 [10], [11]).

⁶ المقاومة R (15 k Ω) تسمى بمقاومة تفريغ نظام التخزين التي تقوم بتفريغ المكثفات فائقة السعة ببطء لضمان أمان الأشخاص اللذين يقومون بالصيانة [5].

⁵ نورمة عالمية تحدد مختلف التجهيزات في المركبات الكهربائية.

$$\alpha_1 = \frac{U_{bus} - U_{sc}}{U_{bus}} \quad (10)$$

$$C_1 = I \cdot \frac{(1 - \alpha)}{f \cdot \Delta U} \quad (8)$$

إذ،
f: تردد التشغيل،
 $\alpha = t_{on}/T$: عامل الدور وهو يمثل نسبة مدة توصيل القاطع الإلكتروني إلى الدور،
I: القيمة الوسطية للتيار المار في خرج المقطع،
 ΔU : التغير في التوتر على أطراف خرج المقطع.
وبالطريقة نفسها يمكن حساب قيمة تحريض الملف L اللازمة وفق العلاقة الآتية [13]:

$$L = U \cdot \frac{\alpha \cdot (1 - \alpha)}{2 \cdot f \cdot \Delta I_1} \quad (9)$$

U: توتر دخل المقطع،

ΔI_1 : مقدار تموج ripple التيار في الملف.

الجدول (1) يبين قيمة السعة والتحريض من أجل توتر خرج متغير.

الجدول (1): قيم السعة C_1 والملف L خلال الشحن

توتر الدخل (V)	350	350	350	350
توتر الخرج (V)	150	200	250	300
α_2	0.429	0.571	0.714	0.857
(A) I	160	160	160	160
(A) I_{max}	300	300	300	300
(A) ΔI	25	25	25	25
(kHz) f	10	10	10	10
(H) L	1.7E-4	1.7E-4	1.4E-4	8.6E-5
(F) C	9.1E-4	6.9E-4	4.6E-4	2.3E-4

• **مرحلة التفريغ:** خلال عملية التفريغ يربط الكدس ذو التوتر 300 V إلى الباسبار 350 V بواسطة مقطع رافع (انظر الشكل (10)).

يقوم هذا المقطع برفع قيمة التوتر بحسب قيمة عامل الدور α_1 التي تحسب من العلاقة الآتية:

الجدول (2): قيم السعة C_1 والملف L خلال التفريغ

توتر الدخل (V)	150	200	250	300
توتر الخرج (V)	350	350	350	350
α_1	0.57	0.43	0.29	0.14
(A) ΔI	25	25	25	25
(kHz) f	10	10	10	10
(A) I	160	160	160	160
(A) I_{max}	300	300	300	300
(H) L	7.4E-5	9.8E-5	1.0E-4	7.4E-5
(F) C	6.9E-4	9.1E-4	1.1E-3	1.4E-3

لما كان تيار الشحن والتفريغ متساويين من الناحية النظرية وجدنا من خلال المقارنة بين الجدولين (حيث نختار القيم الكبرى [13]) أن قيم كل من المكثف والملف هي:

$L=0.17$ mH، $C_1=1.4$ mF. يمكن تحقيق قيمة سعة المكثف C_1 بوصل ثلاثة مكثفات على التفرع من نوع (electrolytic Aluminum) ذي المواصفات (470 μ F)، 282 m Ω ، 450 V، $T_{max}=105$ °C. وبحسب متطلبات نظام التخزين من تيار وتوتر يمكن أن يستخدم الثنائي ديود-ترانزستور المشار إليه بالرقم FS225R12KE3. يظهر الجدول أدناه مواصفات الثنائي ديود-ترانزستور المختار.

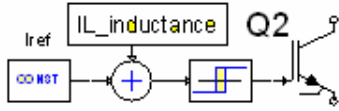
الجدول (3): المواصفات الاسمية للثنائي ديود-ترانزستور

IGBT	Diode	Module FS225R12KE3
1200	1200	توتر (V)
325	225	تيار (A)
450	450	تيار أعظمي (A)
1150	1150	استطاعة (W)

$$F_1(s) = \frac{I_L}{\alpha_2} = \frac{U_{bus} \cdot (C_1 \cdot s + I/R)}{C_1 \cdot L \cdot s^2 + \frac{L}{R} \cdot s + I} \quad (12)$$

من المعادلة أعلاه نلاحظ أن التحكم المباشر يخرج المقطع الخافض كتابع لعامل الدور غير ممكن دون التحكم بتيار الملف.

ونتيجة لما سبق نجد أن هذه النظم غير خطية non-linear ومعقدة، لذلك وخلال عملية الشحن نقترح استخدام حلقة hysteresis لتنظيم التيار المار في الملف كما يوضح الشكل (12). التيار المار في الملف I_L يقاس بواسطة حساس ويقارن مع hysteresis (قيم عظمى وصغرى للتيار) ومنه إلى الترانزستور Q_2 .



الشكل (12): مخطط لقيادة الترانزستور Q_2 في بيئة Simplerer

خلال التفريغ: يكون تابع التحويل في المقطع الرفع Boost من الشكل الآتي [13]:

$$F_2(s) = \frac{U_{bus}}{U_{sc}} = \frac{1 - \alpha_1}{C_1 \cdot L \cdot s^2 + \frac{L}{R} \cdot s + (1 - \alpha_1)^2} \quad (13)$$

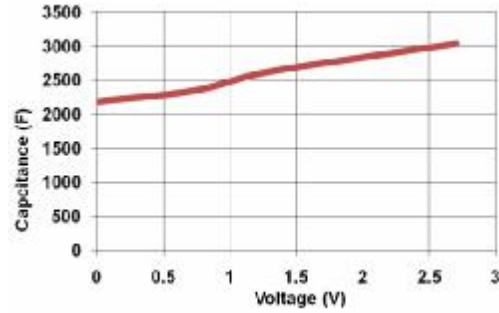
وهذا يعني بشكل عام أنه يمكن تنظيم التوتر على خرج المقطع الرفع مباشرة عن طريق عامل الدور. إلا أن تغيير قيمة توتر الدخل (المكثفات فائقة السعة) يجعل من المقطع نظماً لاخطية لايمكن التحكم بخرجها عن طريق PWM التقليدية.

يجري التفريغ في عدة حالات منها لتغذية الحافلة عند حدوث انقطاع ناتج عن خروجها عن المسار وخاصة عند المنعطفات، أو لتعويض هبوط التوتر خلال التسارع، أو لتغذية بعض الأحمال المساعدة مثل التكييف ويجري ذلك بواسطة معرج محلي خاص بهذه الأحمال. سواء كانت القدرة المختزنة مستخدمة لتغذية محركات الجر أو

6. قيادة المقطع الخافض-الرفع

Control of Buck-Boost chopper

إن من أهم مشكلات ربط المكثفات فائقة السعة إلى حمل أو منبع ما هي تغيير توترها بشكل كبير، كما تتغير السعة مع تغيير التوتر. يبين الشكل (11) قيمة سعة المكثف فائق السعة MC2600 بدلالة التوتر المحددة تجريبياً باستخدام تقنية (impedance spectroscopy) IS. نلاحظ أن هذه السعة لاخطية وتزداد بشكل ملحوظ مع ازدياد التوتر المطبق على أطراف المكثف فائق السعة. هذه الظاهرة ناتجة عن أثر التوتر في توزيع الشحنات الكهربائية داخل مسامات المكثفات فائقة السعة [1].



الشكل(11): منحني سعة المكثف بدلالة التوتر

يعبر عن لاخطية المكثفات فائقة السعة بشكل تقريبي بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$C(t) = C_0 + k \cdot u_c(t) \quad (11)$$

إذ،

C : سعة المكثف فائق السعة وتقدر بFarad،

C_0 : ثابت سعوي ويقدر بFarad،

k : ثابت سعوي ويقدر بFarad/V،

$u_c(t)$: التوتر اللحظي على أطراف المكثف فائق السعة.

خلال الشحن: في المقطع الخافض Buck ومن أجل حمولة أومية مقدارها R يمكن كتابة تابع التحويل للتيار المار في ملف التحريض I_L كما يأتي [14]:

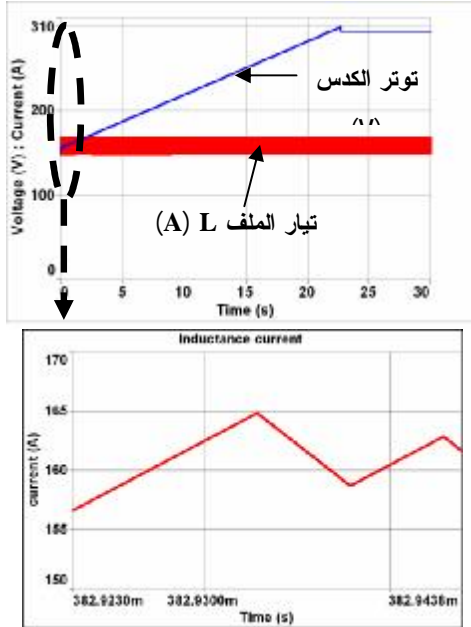
الجدول (4): مواصفات الديودات والترانزستورات

IGBT	Diode	بارامتر
$R_c=7^*$	$R_D=9$	مقاومة أومية (mΩ)
$U_{C0}=0.7^*$	$U_{D0}=1.65$	توتر العتبة (V)
0.11	0.19	مقاومة حرارية ($^{\circ}C/W$) (Junction to case)
0.047	0.082	مقاومة حرارية ($^{\circ}C/W$) (Case to heatsink)
3.1	1.8	سعة حرارية ($J/^{\circ}C$) C_{th}

* استنتجت هذه القيم بطريقة Interpolated curve.

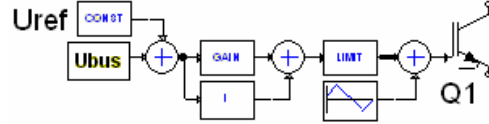
بإدخال معطيات نظام التخزين المدروس في بيئة برنامج SIMPLORER جميعها (انظر الملحق (3)) نجد النتائج الآتية:

- خلال الشحن: من أجل تيار شحن ثابت في الملف L، يرتفع توتر كُدس المكثفات فائقة السعة بسرعة من قيمته الابتدائية 150 V إلى التوتر النهائي 300 V (full charge) كما يظهر الشكل (15). التيار المار في الملف L متغير وينزلق حول قيمته الوسطية 160 A. وهكذا نجد أن القيادة المقترحة بالتيار الثابت أظهرت فعالية في شحن كُدس المكثفات فائقة السعة إلى التوتر المطلوب وبزمن من رتبة مدة كبح الحافلة الكهربائية.



الشكل (15): منحني التوتر على أطراف كُدس المكثفات فائقة السعة والتيار في ملف التحريض L

لأغراض أخرى فإنه يجب أن يكون التوتر على خرج المقطع ثابتاً وقيمه هي 350 V. وللحصول على توتر ثابت على الباسبار خلال التقريغ نستخدم PI controller [14] في حلقة قيادة الترانزستور Q_1 وفق المخطط الآتي:



الشكل (13): حلقة PI controller لقيادة الترانزستور Q_1 في بيئة Simplerer

7. نمذجة نظام تخزين الطاقة

Modeling of energy storage system

إن أبسط نموذج للمكثفات فائقة السعة مؤلف من مكثف لآحطي C ومقاومة ESR كما في الشكل (14)، إذ $R_s = ESR$ (مقاومة الوصلات والقطب) + $R_{el}/3$ (مقاومة الكهرليت).



الشكل (14): نموذج مبسط للمكثفات فائقة السعة

لنمذجة كُدس المكثفات فائقة السعة نأخذ النموذج السابق وتصبح السعة المكافئة للكُدس هي:

$$C_{eq} = \frac{C}{n} = \frac{C_0}{n} + \frac{k}{n} \cdot u_c(t) \quad (14)$$

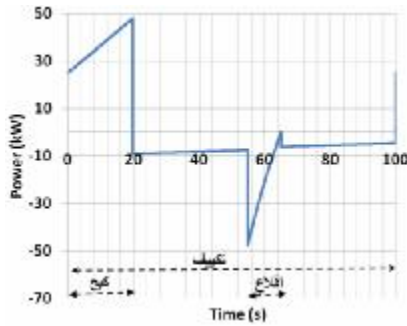
$$ESR_{eq} = ESR \cdot n$$

إذ،

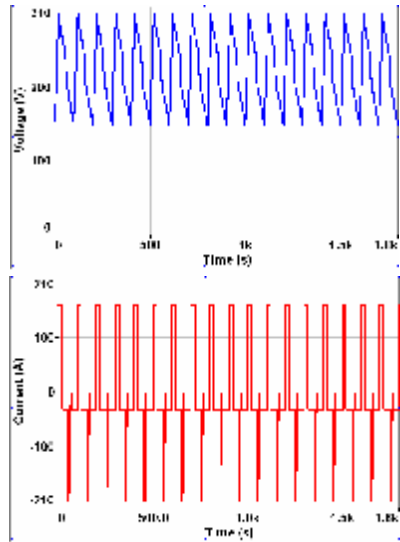
ESR_{eq} : مقاومة كُدس المكثفات فائقة السعة.

باعتبار نماذج ساكنة للعناصر الإلكترونية (ديودات، ترانزستورات IGBT)، فالديودات والترانزستورات يمكن نمذجتها بالخط المكافئ Equivalent Line الذي يتطلب من مواصفات العناصر المعطيات الآتية:

الكهربائية خلال دورة عمله من نقطة الانطلاق إلى آخر الخط بمراحل من أهمها: كبح باستعادة القدرة في كل محطة توقف، مساعدة في الإقلاع بعد كل محطة، تغذية أجهزة التكيف. يبين الشكل (18) مخطط الاستطاعة المحسوب في بيئة SIMPLORER لكُـس المكثفات فائقة السعة خلال دور تشغيل كامل ولمختلف مراحل العمل المذكورة، إذ قمنا باختصار الزمن اللازم للوصول بين محطات التوقف لتبسيط عملية النمذجة علماً أن هذا لن يؤثر في نتائج النمذجة.

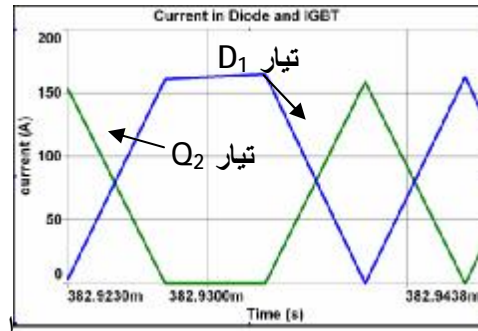


الشكل (18): منحني الاستطاعة لكُـس المكثفات خلال دور عمل من أجل عشرات أدوار عمل كُـس المكثفات فائقة السعة أي مدة تمتد إلى أكثر من ثلاثين دقيقة نحصل على التوتر والتيار كما يظهر الشكل (19).



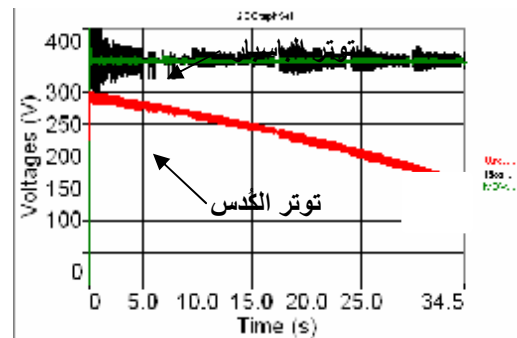
الشكل (19): منحني التوتر والتيار لكُـس المكثفات خلال عشرات أدوار عمل

يبين الشكل (16) التيار المار في الترانزستور Q_2 وفي الديود D_1 ، ويبين هذا الشكل كيف أن الترانزستور يمرر التيار في المرحلة الأولى (مرحلة صعود التيار)، ثم يمرر التيار بمرحلة التتابع ليمر بعدها التيار في الديود (مرحلة هبوط التيار).



الشكل (16): التيارات المارة في العناصر الالكترونية للمقطع Buck

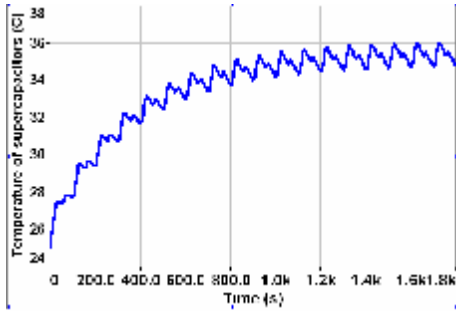
خلال التفريغ: يبين الشكل (17) تغيرات التوتر على أطراف كُـس المكثفات فائقة السعة وعلى قضبان التيار المستمر. من الملاحظ أن القيادة المبيّنة في الشكل (13) تؤدي إلى استقرار التوتر على باسبار الحمل على الرغم من الانخفاض السريع على توتر كُـس المكثفات فائقة السعة.



الشكل (17): منحني التوتر على أطراف كُـس المكثفات فائقة السعة وعلى باسبار 350 V

• خلال دور تشغيل: يمر نظام التخزين في الحافلة

بحسب الدراسة الحرارية على المكثف فائق السعة وجد أن المقاومة الحرارية R_{th} تساوي $3.5\text{ }^\circ\text{C/W}$ والسعة الحرارية C_{th} تساوي $450\text{ J/}^\circ\text{C}$ [1]. باستخدام النموذج الحراري المبين في الشكل (20) لتقدير التطور الديناميكي لدرجة الحرارة في المكثف فائق السعة المدروس ومن أجل التيار والتوتر المبيينين في الشكل أعلاه، نجد كما يوضح الشكل (21) أن درجة الحرارة ترتفع من درجة حرارة الوسط المحيط ($25\text{ }^\circ\text{C}$) لتستقر حول درجة حرارة $35\text{ }^\circ\text{C}$. وهي درجة حرارة تقع ضمن المجال الحراري المحدد من المصنع (انظر الملحق (1)).



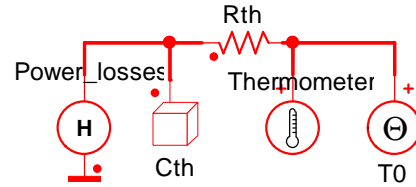
الشكل (21): تطور درجة الحرارة على سطح المكثف فائق السعة

تساوي الضياعات في الديود والترانزستور مجموع ضياعات التوصيل وضياعات التبديل ($E_{on}+E_{off}$)، وعادةً ما تهمل ضياعات الاستعادة العكسية reverse recovery في الديود. يمكن تقدير قيمة الاستطاعة الضائعة في العناصر الالكترونية في المقطع Buck-Boost من العلاقة (16) [15].

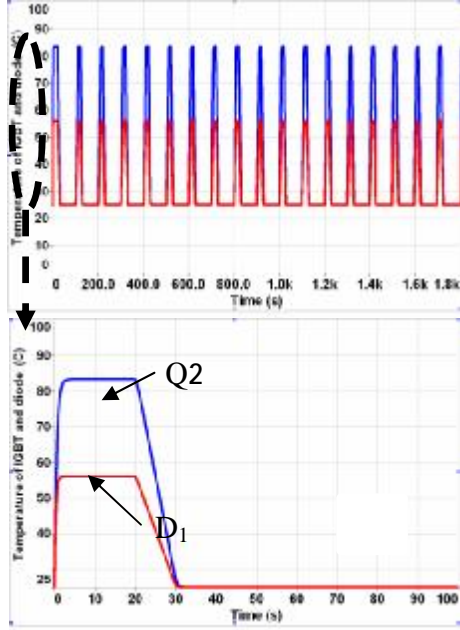
نلاحظ أن التوتر يبقى محصوراً ضمن مجاله من $U_{sc_{min}} = 150\text{ V}$ إلى $U_{sc_{max}} = 300\text{ V}$. حيث تجري مراقبة التوتر على كُدى المكثفات فائقة السعة بشكل دائم من خلال الدارات الالكترونية المسماة (balancing circuits)، وأيضاً التيار المار فيها من خلال التيار في الملف (انظر الشكل (10)).

نمذجة حرارية لنظام تخزين الطاقة: من الضروري دوماً عند تصميم نظام تخزين الطاقة الكهربائية إجراء دراسة حرارية للتيار المار في المكثفات فائقة السعة لتوضيح هل كان هذا التيار مقبولاً حرارياً أم يجب تعديله؟ أضف إلى ذلك أنه يلزم حساب درجة حرارة مختلف عناصر نظام التخزين لتقدير الموثوقية.

يوجد نوعان أساسيان لنقل الحرارة وتبادلها بين العنصر الكهربائي والوسط المحيط، وهما نقل الحرارة بالتوصيل (conduction) وبالحمل (convection). وبوصفه حملاً طبيعياً أي لا يستخدم أي نظام تبريد خارجي، تجري نمذجة حرارية ديناميكية مبسطة لمختلف العناصر في نظام التخزين. يتألف النموذج الحراري المبسط كما يوضح الشكل (20) من العناصر: مقاومة حرارية R_{th} وسعة حرارية C_{th} ومنبع حراري يعبر عن مجموع الضياعات داخل العنصر (توصيل ونقل) ومنبع درجة حرارة ثابت يساوي درجة حرارة الوسط المحيط [1] $T_0 = 25\text{ }^\circ\text{C}$.



الشكل (20): نموذج حراري في بيئة Simplerer



الشكل (22): تغير درجة الحرارة للعناصر الالكترونية

8. حساب الموثوقية الهندسية

Calculating engineering reliability

توجد بارامترات كثيرة تعبر عن الموثوقية من أهمها [16]:

- الزمن الوسطي للعطل MTTF(t)

، (Mean Time To Failure)

- الزمن الوسطي بين عطلين متتالين MTBF(t)

، (Mean Time Between Failures)

- معدل العطل $\lambda(t)$ (Failure Rate)

- كثافة العطل $f(t)$ (Failure Density)

- اللاموثوقية $F(t)$ (Unreliability).

من أهم بارامترات الموثوقية هو معدل العطل ويرمز له بـ λ ويقدر بـ fault/hr (عطل في الساعة). توجد طرائق كثيرة لحساب قيمة λ منها: توزع ويلبول Weillbul distribution، وتوزع جاما gamma distribution، والتوزع الأسي exponential distribution. وهذا الأخير هو الأبسط وهو لا يحتاج إلى معطيات كثيرة، لهذا سوف

$$\begin{aligned}
 P_{IGBT} &= U_{co} \cdot I_{cav} + R_c \cdot I_{crms}^2 + \\
 &\quad (E_{IGBTon} + E_{IGBTof}) \cdot f \\
 &= 0.7 \times 114 + 7 \times 10^{-3} \times 135^2 + \\
 &\quad (9.8 + 19.5) \times 10^{-3} \times 10 \times 10^3 = 500 \text{ W} \quad (16) \\
 P_D &= U_{Do} \cdot I_{Dav} + R_D \cdot I_{Drms}^2 + (E_{Don}) \cdot f \\
 &= 1.65 \times 48 + 9 \times 10^{-3} \times 87.5^2 + \\
 &\quad (15.2) \times 10^{-3} \times 10 \times 10^3 = 300 \text{ W}
 \end{aligned}$$

إذ،

I_c : التيار المار في ترانزستور إذ I_{cav} القيمة الوسطية و I_{crms} القيمة الفعالة،
 I_D : التيار المار في الديود إذ I_{Dav} القيمة الوسطية و I_{Drms} القيمة الفعالة،

وأما بالنسبة إلى بقية البارامترات فانظر الجدول (4).

بالاعتماد على النموذج الحراري الموضح في الشكل (20) والمعطيات الحرارية للعناصر الالكترونية المبينة في الجدول (4) يمكن تقدير تغير درجة الحرارة الناتجة عن التسخين الذاتي للعناصر Q_2 و D_1 . الشكل (22) يظهر منحنى درجة الحرارة للعناصر المذكورة خلال كامل دور التشغيل. من الملاحظ أن العناصر الالكترونية تتعرض لدورات حرارية من تسخين وتبريد، إذ ترتفع درجة الحرارة من 25°C إلى 85°C ل Q_2 وإلى 56°C ل D_1 خلال الشحن ثم تنخفض تدريجياً إلى 25°C .

• **الجزء الأول:** هو الجزء الحسابي ويأخذ على عاتقه القيام بمختلف الحسابات المعقدة لظروف العمل الكهربائية بوجود درجة حرارة الوسط المحيط ambient temperature. تعدُّ بقية ظروف العمل الأخرى مرجعية reference conditions لذلك يطلق على القيم المحسوبة بالقيم المرجعية. يعطى معدل العطل لنظام ما، في هذا المرحلة، بالمعادلة الآتية:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n (\lambda_{ref})_i \quad (16)$$

إذ،

λ_{ref} : معدل العطل ضمن الظروف المرجعية،
i: رقم العنصر.

• **الجزء الثاني:** مادامت أن العناصر لا تعمل ضمن ظروف مرجعية من حرارة وغيرها فإن العلاقة المفترضة لحساب معدل العطل وفق النورمة المذكورة تصبح على الشكل الآتي:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_{ref,i} \cdot \pi_s \cdot \pi_T \cdot \pi_E \cdot \pi_Q \cdot \pi_A \quad (17)$$

إذ،

π_s هو عامل الإجهاد stress factor،

π_T هو عامل الحرارة temperature factor،

π_E هو عامل البيئة environment factor،

π_Q هو عامل النوعية quality factor،

π_A هو عامل التعديل (تصحيح) adjustment factor.

9. تقدير موثوقية نظام تخزين الطاقة

Estimating energy storage system reliability

بعد تصميم نظام التخزين في الحافلة الكهربائية كما شرحنا يمكن حساب الموثوقية لعناصره بإدخال القيم الاسمية وقيم التشغيل في بيئة برنامج RELEX. ومنه نجد ما يأتي:

• إن معدل العطل للترانزستورات بحسب النورمة MIL-HDBK-217 من أجل قيم العمل المستتجة من

نستعين به لحساب الموثوقية في هذا العمل. في التوزع الأسي نستبعد الأعطال المبكرة جميعها، ويصبح معدل العطل ثابتاً خلال كامل عمر العنصر. بناءً عليه يمكن استنتاج بارامترات الموثوقية كما يأتي [16]:

$$\begin{aligned} \lambda &= \lambda_0 \\ R(t) &= \exp(-\lambda_0 \cdot t) \\ F(t) &= 1 - \exp(-\lambda_0 \cdot t) \\ f(t) &= \lambda_0 \cdot \exp(-\lambda_0 \cdot t) \\ MTTF &= \int_0^{\infty} t \cdot \lambda_0 \cdot \exp(-\lambda_0 \cdot t) \end{aligned} \quad (15)$$

باستخدام برنامج واسع الانتشار ومتخصص في تقدير الموثوقية RELEX نحسب معدل العطل لنظام التخزين المدروس. يقدم هذا البرنامج طرائق مختلفة لحساب بارامترات الموثوقية وبحسب النورمة Standard. النورمات المقترحة في هذا البرنامج هي الآتية [17]:

MIL-HDBK-217 (FN1, FN2) §
Telcordia-Becllore §
Prism: RAC model §
NSWC-98/LE1: §
HRD5: British telecomm model §
CNET 93: French telecomm §
.299B: Chinese standard+ §

النورمة المستخدمة في دراستنا هي النورمة MIL-HDBK-217، وهي تستخدم بشكل واسع في التطبيقات العسكرية نظراً إلى أن لها المميزات الآتية [18]:

- تأخذ بالحسبان الإجهادات جميعها التي يتعرض لها العنصر،
- تأخذ بالحسبان سويات مختلفة من الجودة (سوية عسكرية، وسوية تجارية 1، 2، 3، 4، الخ).
- تأخذ بالحسبان العوامل (البارامترات) الكهربائية المؤثرة في العنصر جميعها (توتر، وتيار، واستطاعة، الخ).
- تتألف طريقة التنبؤ بحسب النورمة MIL-HDBK-217 من جزأين رئيسيين:

إن معدل العطل للمكثف فائق السعة بحسب النورمة من أجل قيم العمل الآتية: توتر 2.7 V ودرجة حرارة 35 °C وتيار وسطي 160 A هو:

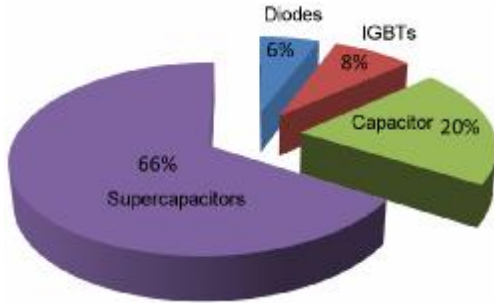
$$\lambda_{C1} = 4 \times 10^{-6} \text{ fault /hr} \quad (19)$$

$$MTTF_{C1} = 2.5 \times 10^5 \text{ hr}$$

ومنه احتمال تعطل المكثف فائق السعة في نهاية العشر سنوات هو:

$$F_{sc} = 0.3 \quad (20)$$

لتوضيح هذه القيم نقوم برسمها كنسبة مئوية كما في الشكل (23).



الشكل (23): معدل العطل لعناصر نظام التخزين المدروس كنسبة مئوية

نلاحظ أن المكثف التقليدي C_1 له معدل عطل كبير مقارنة بالعناصر الالكترونية ديودات وترانزستورات، وأن كُدس المكثفات فائقة السعة له معدل العطل الأعلى. وهذا يتوافق مع النتائج السابقة التي تؤكد أن المكثفات التقليدية هي العنصر الأكثر تعطلاً في المبدلات الكترونية [19].

لنحسب الموثوقية $R(t)$ لكل عنصر خلال مدة مقدارها عشر سنوات (أي العنصر في نظام التخزين يعمل 24 ساعة مدة 10 سنوات) ووفق التوزيع الأسّي. يظهر

النمذجة الآتية: تيار وسطي 114 A وتوتر 300 V ودرجة حرارة الوصلة 85 °C واستطاعة ضائعة (نقل+تبديل) 500 W هو:

$$\lambda_{IGBT} = 2.30 \times 10^{-7} \text{ fault /hr} \quad (19)$$

$$MTTF_{IGBT} = 4.35 \times 10^6 \text{ hr}$$

ومنه احتمال تعطل الترانزستور في نهاية العشر سنوات هو:

$$F_{IGBT} = 0.02 \quad (20)$$

• إن معدل العطل للديودات بحسب النورمة المختارة من أجل قيم العمل الآتية: تيار وسطي 48 A وتوتر 300 V ودرجة حرارة الوصلة 56 °C واستطاعة ضائعة (نقل وتبديل) 300 W هو:

$$\lambda_{Diode} = 1.7 \times 10^{-7} \text{ fault/hr} \quad (18)$$

$$MTTF_{Diode} = 5.9 \times 10^6 \text{ hr}$$

ومنه احتمال تعطل الديودات في نهاية العشر سنوات هو:

$$F_{Diode} = 0.015 \quad (22)$$

إن معدل العطل للمكثف C_1 بحسب النورمة من أجل قيم العمل الآتية: توتر 350 V ودرجة حرارة 30 °C هو:

$$\lambda_{C1} = 1.2 \times 10^{-6} \text{ fault /hr} \quad (23)$$

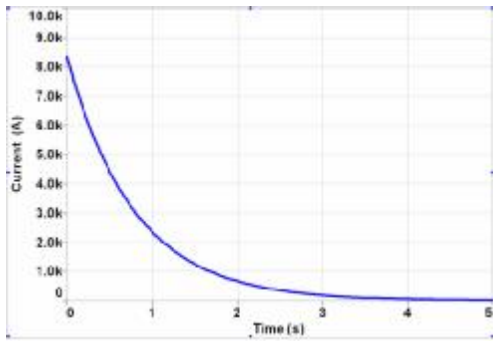
$$MTTF_{C1} = 8.3 \times 10^5 \text{ hr}$$

ومنه احتمال تعطل المكثف التقليدي في نهاية العشر سنوات هو:

$$F_{C1} = 0.1 \quad (24)$$

شكل دائرة قصر بنهاية العشر سنوات وبحسب العلاقة (23) هو 1.2%. حتى يكون هناك عطل على الفرع Q_1 - D_1 أو الفرع Q_2 - D_2 على شكل دائرة قصر يجب أن يكون إماً الترانزستور أو الديود معطلاً بشكل دائرة قصر أي يزداد احتمال العطل على شكل دائرة القصر ليصبح 2.9%. وجدنا في العلاقة (27) أن احتمال تعطل المكثف فائق السعة في نهاية العشر سنوات هو 30% ولا يُعرف حتى الآن نسبة توزع الأعطال في المكثف فائق السعة لذلك نفترض الحالة الأسوأ وهي 50% أعطال على شكل دائرة قصر و 50% على شكل دائرة مفتوحة. يصبح احتمال تعطل المكثف فائق السعة على شكل دائرة قصر هو 15%.

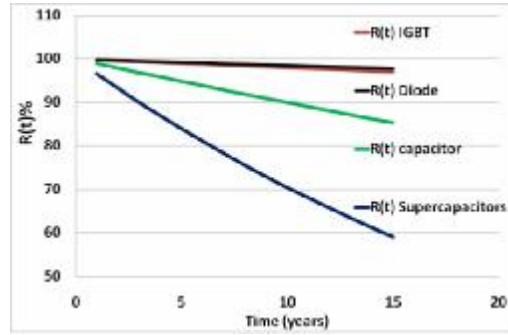
جرى نمذجة نظام التخزين بالمكثفات فائقة السعة في حالة الأعطال المختلفة لمكونات النظام (انظر المعلق (3)). وجدنا أن أهم عطل يمكن أن يصيب نظام التخزين هو تيار القصر على كُدس المكثفات فائقة السعة. يظهر الشكل (25) منحنى تيار القصر في نظام التخزين بالمكثفات فائقة السعة الذي يبدأ بقيمة عظمى 8.5 kA ثم ينخفض تدريجاً لينعدم خلال مدة زمنية مقدارها 5 s.



الشكل (25): تيار القصر في نظام التخزين

تبيّن من خلال الدراسة الحرارية باستخدام النموذج المبين في الشكل (20) أنه لا يمكن نمذجة درجة حرارة المكثفات فائقة السعة بدقة في حالة القصر على الكُدس

الشكل (24) التغيير الزمني لموثوقية عناصر نظام التخزين. نستطيع الاستنتاج بشكل عام بأن الموثوقية تتخفض مع مرور الزمن أي إنّ احتمال تعطل العنصر يزداد، وهذا طبيعي لأنّ العنصر يستهلك، للعناصر الالكترونية ديودات (D_2, D_1) وترانزستورات (Q_2, Q_1)، ينخفض ليصل إلى 98% و 97% على الترتيب بعد عشر سنوات من الاستخدام. في حين ينخفض للمكثف C_1 ، إلى ما دون 90%، وبالنسبة إلى كُدس المكثفات فائقة السعة بعد عشر سنوات يصل إلى 72%.



الشكل (24): التغيير الزمني لموثوقية عناصر نظام التخزين

10. أعطال نظام تخزين الطاقة

Faults of energy storage system

عند تحليل النتائج علينا التذكير أنه لا يعني أن العنصر ذا الموثوقية العالية لا يتعرض للعطل أبداً ولكن احتمال تعطله ضمن ظروف التشغيل المفترضة يكون قليلاً.

إن النورمة 93 CNET تحدد نسبة توزع الأعطال في ترانزستور IGBT كما يأتي [17]: 85% أعطال على شكل دائرة قصر و 15% أعطال على شكل دائرة مفتوحة. ومنه يصبح احتمال تعطل الترانزستور على شكل دائرة قصر بنهاية العشر سنوات وبحسب العلاقة (21) هو 1.7%. أمّا بالنسبة إلى الديود فإن نسبة توزع الأعطال هي 80% أعطال على شكل دائرة قصر و 20% أعطال على شكل دائرة مفتوحة. ومنه يصبح احتمال تعطل الديود على

الحافلة. أنتجت آلية تصميم نظام التخزين على الرغم من صعوبتها نظاماً قادراً على تلبية متطلبات القدرة في الحافلة الكهربائية كمرحلة أولية. تقع درجة حرارة مختلف مكونات نظام التخزين خلال تشغيله في الحافلة ضمن الحدود المعطاة من قبل المصنع، ولكن يفضل تركيب أجهزة تبريد للحد من تأثيرها في العمر الافتراضي.

2. نلاحظ أن طرائق القيادة بالتيار خلال الشحن وبالتوتر خلال التفريغ تناسب نظام تخزين الطاقة بالمكثفات فائقة السعة في الحافلة الكهربائية إلا أنه توجد طريقة أكثر تقدماً وتعرف بالقيادة المنزلة. سنوضح خصائص هذه الطريقة في العمل اللاحق عند تطبيق نمذجة كامل النظام الكهربائي في الحافلة.

3. أهم خصائص العناصر الكهربائية هي موثوقيتها؛ ولذلك يلزم حسابها قبل دمج هذه العناصر في الأنظمة الكهربائية المعقدة. يتطلب تقدير الموثوقية كثيراً من المعطيات الكهربائية والحرارية وغيرها، وبعض هذه القيم تقديري مما يجعل النتائج أقل دقة. كما أن نتائج الموثوقية صحيحة نسبياً وتختلف القيم بشكل محدود بحسب النورمة والبرامج المستخدمة. لذا فإننا نتطلع لاستخدام برامج (Lambda predict) للتحقق من النتائج واستكمال دراسة الأعطال وتحليلها في أنظمة تخزين الطاقة.

لأن الظواهر الحرارية العابرة تحتاج إلى نموذج حراري أكثر تقدماً.

يجب عند تصميم نظام التخزين بالمكثفات فائقة السعة التنبؤ بالسيناريوهات المحتملة جميعها للأعطال وآثارها في النظام مما يسمح بتشخيص الأعطال diagnostic بشكل مبكر، وعلى هذا الأساس يكون نظام المراقبة supervisor قادراً على اتخاذ القرار المناسب للحد من الأخطار الممكن أن تنتج عن الأعطال.

في الجدول أدناه نلخص أهم النتائج التي حصلنا عليها من عملية تحليل الأعطال في نظام التخزين المدروس.

الجدول (5): أعطال عناصر نظام التخزين وآثارها

العنصر	نوع العطل	النتائج
Q_1	دائرة مفتوحة	لا يمكن تفريغ الكُوس
Q_2	دائرة مفتوحة	لا يمكن شحن الكُوس
D_1	دائرة مفتوحة	امتداد العطل إلى Q_2
D_2	دائرة مفتوحة	امتداد العطل إلى Q_1
Q_1 أو D_1	دائرة قصر	ارتفاع درجة حرارة الكُوس
كُوس التخزين	دائرة قصر	ارتفاع درجة حرارة الكُوس
Q_2 أو D_2	دائرة قصر	شحن مستمر للكُوس وتشغيل دارات توازن التوتر للحد منه
C_1	دائرة قصر	بحسب وضع Q_1

استنتاجات وتوصيات:

في هذا العمل صُممَ ودرِسَ ونُمدَجَ نظام تخزين بالمكثفات فائقة السعة يعمل في الحافلة الكهربائية وقُيِّمَت موثوقية نظام التخزين والأعطال الناتجة وبناءً عليه:

1. نستنتج أن المكثفات فائقة السعة تشكل تقنية جيدة لامتصاص استطاعة الكبح الكهربائي إذ تستخدم هذه النظم بشكل رئيس لاستعادة قدرة الكبح الكهربائي، ويمكن الاستفادة من القدرة المسترجعة في تغذية محرك الحافلة عند خروجها عن المسار أو تغذية بعض التجهيزات المساعدة في الحافلة. هذا الاستخدام يحسن كفاءة أنظمة التغذية في

- [12] O. Gindre, D. Risaletto, "Etude et Simulation d'une alimentation à découpage de type Flyback", projet fin d'étude, Matrise EEA, université Claude Bernard, Lyon, 2001-2003.
- [13] J. Leuchter, P. Bauer, P. Bojda, V. Rerucha, "Bidirectional DC-DC converters for supercapacitor based energy buffer for electrical gen-sets". Power Electronics and Applications, 2007 European Conference. 2–5 Sept, 2007. pp. 1–10.
- [14] H. Maker, H. Gualous, R. Outbib, Monica E. Romero, "Control of Bidirectional DC-DC Converter for Supercapacitor Automotive Application", January 22, 2008.
- [15] D. Graovac, M. Purschel, "IGBT power losses calculation using the data-sheet parameters," Application Note, Vol. 1.1, January, 2009.
- [16] E. A. Elsayed, "Fundamentals of Reliability Engineering and Applications", Systems Engineering Department, University of Petroleum and Minerals, KFUPM, Dhahran, Saudi Arabia, April 20, 2009.
- [17] RELEX, doc. internet www.relexsoftware.it, (2012).
- [18] MIL-HDBK-217F, "Reliability Prediction of Electronic Equipment", 1991. Notice 1 (1992) and Notice 2 (1995).
- [19] F. PERISSE, "Etude et analyse des modes de défaillance des condensateurs électrolytiques à aluminium et des thyristors, appliqués au systèmes de protection du large hadron collider", Université Claude Bernard, Lyon, Thèse de doctorat 2003.
- *المراجع
- [1] Y. Diab, "Etude et modélisation des supercondensateurs : Applications aux systèmes de puissance", Université Claude Bernard, Lyon, Thèse de doctorat 2009.
- [2] X. Andrieu, L. Moreau, B. Pichon, "Etude comparative d'électrodes de carbone pour supercapacités à électrolyte organique", Journées d'Etudes sur les Supercondensateurs, Paris/France, 1998.
- [3] Epcos, "UltraCap™ Double Layer Capacitors, A New Energy Storage Device for Peak Power Applications", Product Profile EPCOS, 2002.
- [4] E. Wolfgang, "Energy Storage on board of Trolleybuses", Proceedings of the 2nd European Symposium on Super Capacitors & Application (ESSCAP'2006), Lausanne, Switzerland, 2006.
- [5] P. Kreczank, "Etude de la fiabilité et du vieillissement d'un système de stockage par supercondensateurs pour l'alimentation partielle et ponctuelle d'un trolleybus grâce à la récupération de l'énergie de freinage. Approche du composant au système de stockage", Université Claude Bernard, Lyon, Thèse de doctorat 2011.
- [6] Maxwell Technologies, "Ultracapacitor product guide", doc. internet www.maxwell.com, (2011).
- [7] J.W. Dixon, M.E. Ortuzar, "Ultracapacitors + dc-dc converters in regenerative braking system", IEEE Aerospace Electron. Syst. Magazine 17 (8) (2002) 16–21.
- [8] Sayed M. D. Dehnavi, Gokhan Sen, Ole C. Thomsen, Michael A. E. Andersen, and Lars Møller, "Isolated Bidirectional DC-DC Converter for SuperCapacitor Applications", International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Las Palmas de Gran Canaria (Spain), 13th to 15th April, 2010.
- [9] M. Gasiewski, P. Gizinski, Z. Gizinski, M. Zulawnik, K. Tomczuk, "Traction energy storage system with supercapacitors for trolleybuses in Lublin and Kaunas", Proceedings of the 3rd European Symposium on Super Capacitors & Application (ESSCAP'08), Roma, Italy, 2008.
- [10] M. Steiner, J. Scholten, M. Klohr, "Energy Storage on Board of Railway Vehicles", EPE 2005, Dresden, 2005.
- [11] S. Gargies, H. Wu, C. Mi "Isolated Bidirectional DC-DC Converter for Hybrid Electric Vehicle Applications", University of Michigan, Dearborn, June, 2006.