



## محاكاة اعتمادية الترانزستور IGBT في منظومة الطاقة الشمسية

سالم صالح أبوبكر<sup>1</sup> و أحمد بوسيف عبد الرحمن<sup>2</sup> و حامد عبد الحق سعيد<sup>2</sup>

<sup>1</sup>كلية العلوم، جامعة سبها، ليبيا

<sup>2</sup>كلية الهندسة، جامعة سبها، ليبيا

### الكلمات المفتاحية:

الاشعاع الشمسي  
الاعتمادية  
الطاقة الشمسية  
ترانزستور IGBT  
ماتلاب

### الملخص

اكتسبت أنظمة القدرة الالكترونية تدريجياً مكانة مهمة في مجموعة واسعة من التطبيقات الصناعية، ووفقاً لذلك تبدل الأبحاث الحديثة جهوداً لتحسين اعتمادية أنظمة القدرة الالكترونية للامتثال لقيود أكثر صرامة علي السلامة والتكلفة والاعتمادية. تتكون أنظمة القدرة الالكترونية من مكونات مختلفة ومن بينها أجهزة اشباه موصلات الطاقة وهي واحدة من أكثر مكونات الدوائر الالكترونية عرضة للأعطال، وتلعب دوراً رئيسياً في مخرجات واعتمادية أنظمة القدرة الالكترونية الشاملة. احدى هذه العناصر هو ترانزستور ثنائي القطب معزول البوابة IGBT، كما ان اجهاد درجة الحرارة هو عامل ضغط رئيسي يؤدي الي فشل وحدات IGBT. في هذه الورقة تم دراسة اليات الفشل واعتمادية ترانزستور IGBT في تطبيقات الطاقة الشمسية، واجراء المحاكاة لتقييم سلوك الترانزستور في ظل ظروف التشغيل المختلفة، مثل درجات الحرارة المتفاوتة باختلاف الاشعاع الشمسي على مدار اليوم، ومستويات الجهد.

## Certified simulation of IGBT transistor in solar model

Salem Salah<sup>1</sup>, Ahmed Bousafe Abdurhman<sup>2</sup>, Mohammed Hamid Abdullhaq<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Science, University of Sabha, Libya

<sup>2</sup> Faculty of Engineering, Sebha University, Libya

### Keyword:

Solar Radiation  
Solar Energy  
IGBT Transistor  
Reliability  
Matlab.

### ABSTRACT

Power electronics systems have gradually gained an important place in a wide range of industrial applications, and recent research has led to an effort to improve the reliability of electronic power systems to comply with more stringent constraints on safety, cost, and reliability. Electronic power systems consist of various components, including power semiconductor devices, which are one of the most fault-prone components of electronic circuits, and play a major role in the output and reliability of overall electronic power systems. One of these elements is an insulated-gate bipolar transistor (IGBT), and temperature stress is a major stress factor that leads to failure of IGBT modules. In this paper, the failure mechanisms and reliability of the IGBT transistor in solar energy applications were studied, and simulations were conducted to evaluate the behavior of the transistor under different operating conditions, such as varying temperatures depending on solar radiation throughout the day, and voltage levels.

### 1. المقدمة.

اعتمادية أنظمة إلكترونيات القدرة من خلال حلول فعالة من حيث التكلفة والاعتمادية [1]، وللمكانة المهمة لهذه الأنظمة فإن الأبحاث الحديثة تسعى إلى تحسين اعتمادية أنظمة القدرة الإلكترونية لتتوافق مع قيود أكثر صرامة بشأن التكلفة والسلامة والتوافر في مختلف التطبيقات [2][3]. في الآونة الأخيرة، تم تعريف أبحاث الاعتمادية في إلكترونيات الطاقة من قبل

نظراً لأن أنظمة القدرة الإلكترونية لا تزال تلعب دوراً أكثر أهمية في مجموعة واسعة من التطبيقات مثل توليد الطاقة المتجددة والسيارات ومحركات السيارات والفضاء والنقل بالسكك الحديدية، لهذا فرضت قيود اعتمادية صارمة بشكل متزايد على أنظمة القدرة الإلكترونية. بالإضافة إلى ذلك، تتبع المجالات الصناعية الأخرى أيضاً نفس الاتجاه الذي يعمل على تحسين

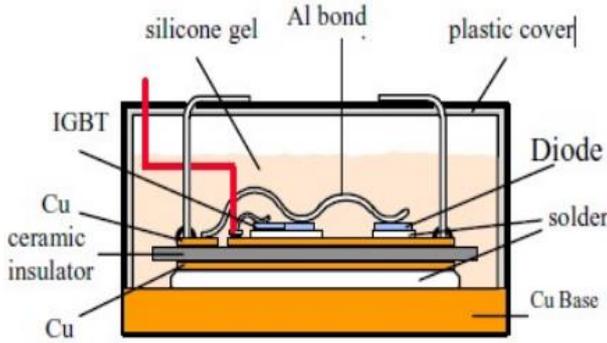
\*Corresponding author:

E-mail addresses: [Sale.abdallah@sebhau.edu.ly](mailto:Sale.abdallah@sebhau.edu.ly), (A. B. Abdurhman) [Ahm.ishteewi@sebhau.edu.ly](mailto:Ahm.ishteewi@sebhau.edu.ly), (M. H. bdullhaq) [ha.imhemmad@sebhau.edu.ly](mailto:ha.imhemmad@sebhau.edu.ly)

Article History : Received 23 February 2024 - Received in revised form 12 May 2024 - Accepted 25 May 2024

الموصلات، والذي يستخدم على نطاق واسع في أجهزة إلكترونيات الطاقة لنحويل الطاقة. وبالتالي فهو يستخدم على نطاق واسع في تطبيقات الطاقة العالية أو التيار العالي، مثل مصدر الطاقة غير المنقطعة (UPS)، والعاكس والمحول في مجموعة نقل الحركة المكهربة. يمكن تصميمه على شكل ترانزستور تأثير المجال لأشباه الموصلات من أكسيد المعدن (MOSFET) متصل بقناة N ومتصل بترانزستور الوصلة ثنائي القطب (BJT) (PNP). إنه يستفيد من BJT، الذي لديه خسائر توصيل منخفضة. كما أن لديها سرعة تحويل عالية ومقاومة عالية للبوابة مثل MOSFET.

ان الوحدات متعددة الرقائق لأجهزة IGBT عالية الطاقة عبارة عن هيكل معقدة متعددة الطبقات تتكون من مواد مختلفة، والتي يجب أن توفر استقرارًا ميكانيكيًا جيدًا، وخصائص عزل كهربائي جيدة، وقدرة توصيل حراري جيدة. يتم لحام شرائح IGBT والصمام الثنائي على ركائز AlN أو Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> الخزفية (تقنيات الربط النحاسي المباشر أو تقنيات النحاس المعدني النشط)، والتي توفر عزلًا عالي الجهد. يتم بعد ذلك لحام الركائز بلوحة قاعدة نحاسية أو AlSiC، لتكون بمثابة دعم ميكانيكي وتوفر واجهة حرارية للمبرد كما هو موضح بالشكل (3). يتم تغليف الوحدات في أغلفة بلاستيكية ومليئة بهلام السيليكون. المقطع العرضي كما هو مبين في الشكل التالي [9][10]



الشكل 3: تركيب ترانزستور IGBT

يتم لحام الركيزة المرتبطة بالنحاس المباشر (DCB) بلوحة القاعدة. يوفر DCB العزل الكهربائي بين مكونات الطاقة وأنظمة التبريد. علاوة على ذلك، فهو يقوم بتوصيل التيار عبر المسار النحاسي ويوفر أيضًا اتصالًا حراريًا جيدًا لأنظمة التبريد. في نطاق الطاقة المنخفض، يتم استخدام وحدات IGBT بدون اللوحة الأساسية بشكل متكرر، بينما في نطاق الطاقة المتوسطة والعالية، تحتوي جميع وحدات IGBT تقريبًا على لوحة أساسية. توفر اللوحة الأساسية سعة حرارية وتساعد على الانتشار الحراري عن طريق زيادة منطقة التلامس إلى المشتت الحراري. يتم لحام رقائق IGBT والصمام الثنائي بـ DCB. تُستخدم أسلاك الربط بشكل شائع لتوصيل باعث رقائق السيليكون بالركيزة ومن أجل توصيل الركيزة بالمحطات الطرفية.

وأخيرًا، يتم تغطيته بمادة السيليكون للعزل. اعتمادًا على أنواع التغليف.

### 1.3. آلية فشل وحدة IGBT

آليات الفشل هي عمليات فيزيائية أو كيميائية أو عمليات أخرى تؤدي إلى الفشل. ولأغراض عملية يمكن تقسيمها إلى فئتين. الأولى تشمل الآليات التي تنتج عن عمليات التصنيع سيئة التحكم أو سيئة التصميم. تشمل الفئة الثانية تلك الأعطال التي تحدث أثناء التشغيل العادي للجهاز. [11] [12] إن فهم آلية الفشل ليس بالأمر الهين لحماية جهاز أشباه الموصلات. بالنسبة للعاكس، تتكون آليات الفشل بشكل أساسي من نوعين من الفشل: الفشل

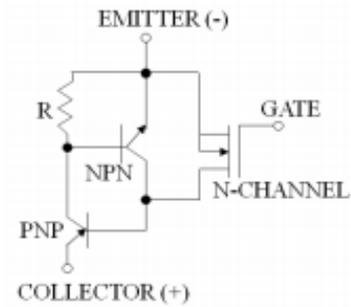
مركز إلكترونيات الطاقة الموثوقة (CORPE) وهو مركز أبحاث استراتيجي بين الصناعة والجامعات، بقيادة جامعة ألبرج، الدنمارك.

هناك ثلاثة جوانب رئيسية يمكن الاهتمام بها

- النموذج التحليلي المبني على فيزياء الفشل من أجل فهم السبب الجذري للفشل وآلية فشل منتجات القدرة الإلكترونية.
- التصميم من أجل الاعتمادية (DFR) وعملية التحقق من المتانة من أجل تلبية العمر المتوقع ومعدل الفشل للمنتجات.
- التحكم الذكي ومراقبة الحالة في العمليات الميدانية لتحسين اعتمادية المنتجات وتوافرها.

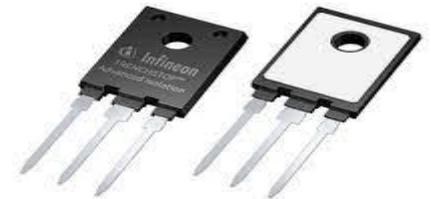
في الوقت الحاضر، تم إجراء الكثير من الأبحاث حول الاعتمادية في مجال إلكترونيات القدرة مع الأخذ في الاعتبار الجوانب المذكورة أعلاه مثل اختبارات الاعتمادية وفيزياء تحليل الفشل وآليات الفشل، والنمذجة والتنبؤ بمدى الحياة، والتحكم الحراري، ومراقبة الحالة، واستراتيجيات تحمل الأخطاء.

يعد الترانزستور ثنائي القطب ذو البوابة المعزولة (IGBT) الشكل (2) أحد أكثر أنواع الترانزستور استخدامًا على نطاق واسع في العديد من التطبيقات في مجال الطاقة من عدة مئات من واط إلى عدة ميغاوات. في التطبيقات العملية، يتم استخدام أجهزة الطاقة في شكل حزمة مثل الأجهزة والوحدات المنفصلة. هناك نوعان من وحدات IGBT، وحدات IGBT المضغوطة والسلكية [4].



الشكل 1: الرمز الإلكتروني لترانزستور IGBT

تعمل تقنية التغليف بالضغط على تحسين اتصال الرقائق عن طريق الاتصال المباشر بالعبوة المضغوطة كما هو موضح بالشكل (2). تتميز وحدة IGBT لحزمة الضغط باعتمادية محسنة وكثافة طاقة أعلى وقدرة تبريد أفضل. ومع ذلك، فإن تكلفة هذه التكنولوجيا أعلى مقارنة بوحدة IGBT التقليدية المرتبطة بالأسلاك. ولذلك، لا تزال وحدات IGBT السلكية تستخدم على نطاق واسع في أنظمة الطاقة الإلكترونية المختلفة [5][6].



الشكل 2: وحدة IGBT المضغوطة

أصبح الترانزستور ثنائي القطب ذو البوابة المعزولة (IGBT) جهازًا إلكترونيًا للطاقة أكثر أهمية في المجالات الصناعية المختلفة بسبب ميزة وقت التبديل الأقصر وفقدان الطاقة المنخفض [7][8].

### 1.2. ترانزستور IGBT.

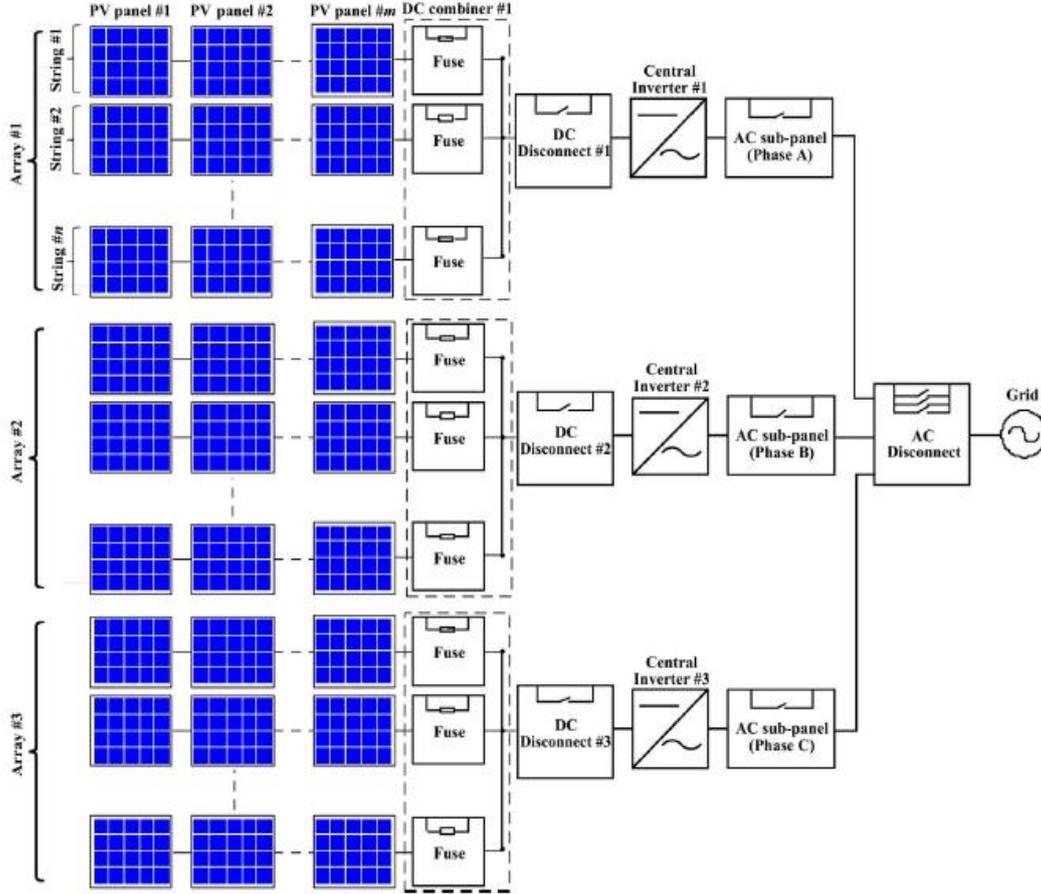
الترانزستور ثنائي القطب ذو البوابة المعزولة (IGBT) هو جهاز أشباه

هناك أنواع مختلفة من آليات الفشل في معامل القدرة اعتماداً على ظروف الحالة العابرة والمستقرة [14].

- فشل صدع الكعب (Heel crack failure)
- فشل الأسلاك بالقرب من الإطار (Wire failure near frame)
- فشل السندات بالقرب من الإطار (Bond failure near frame)
- فصل الأسلاك (Wire lift off)

المتعلق بأشباه الموصلات والفشل المتعلق بالحزمة [13] [12].

يناقش العديد من آليات الفشل بسبب الاجهاد الميكانيكي الحراري: إجهاد الأسلاك المربوطة (بما في ذلك رفع سلك السندات وتشقق الكعب)، وإعادة بناء الألومنيوم، واجهاد اللحام وفرغات اللحام. يلخص ملف داخلي من آليات التعب المرتبطة بالحرارة.

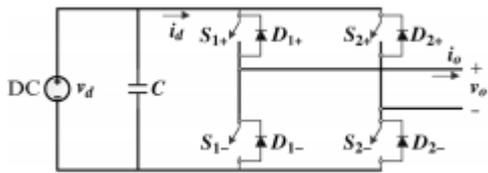


الشكل 4: رسم تخطيطي لنظام الطاقة الكهروضوئي المتصل بالعاكسات المركزي

النموذج الحراري ل IGBT والصمام الثنائي: يتكون العاكس أحادي الطور النموذجي من اتصال IGBTs والثنائيات، كما هو مبين في الشكل (2). وقد تم اقتراح سلسلة من الصيغ التجريبية لتقدير خسائر الطاقة في IGBTs والثنائيات، والتي يتم تلخيصها بإيجاز على النحو التالي. نظراً لفقد الطاقة، يمكن حساب ارتفاع درجة الحرارة في IGBT والصمام الثنائي من خلال معادلات نقل الحرارة الخطية التالية

$$\Delta T_{IGBT} = \theta_{11} P_{IGBT-loss} + \theta_{12} P_{Diode-loss} \quad (1)$$

$$\Delta T_{Diode} = \theta_{21} P_{IGBT-loss} + \theta_{22} P_{Diode-loss} \quad (2)$$



الشكل 5: عاكس احادي الطور

حيث  $P_{Diode-loss}$  و  $P_{IGBT-loss}$  عبارة عن تبديدات للطاقة في IGBT والصمام الثنائي، على التوالي. المعاملات  $\theta_{11}$  و  $\theta_{22}$  هي المقاومة الحرارية ل IGBT والصمام الثنائي، على التوالي، في حين أن  $\theta_{12}$  و  $\theta_{21}$

## 2.المواد وطرق العمل.

تم إجراء تحليلات الاعتمادية باستخدام نظام كهروضوئي المتصل عاكس مركزي. يُظهر الشكل (4) رسماً تخطيطياً لنظام الطاقة الكهروضوئية ثلاثي الطور بقدرة 20 كيلووات تم حسابه بمناخ مدينة سهيا الليبية. يتكون النظام الكهروضوئي من إجمالي 18 سلسلة في ثلاث مراحل، مع 96 وحدة كهروضوئية متسلسلة في كل سلسلة. يتمتع العاكس المركزي الموضح في الشكل (5) في كل مرحلة بقدرة قصوى تبلغ 7 كيلووات وجهد تيار متردد اسمي يبلغ 208 فولت. تعد العاكسات من بين المكونات الضعيفة في أنظمة الطاقة الكهروضوئية. قد يتعامل العاكس الكهروضوئي مع مستوى عالٍ من تدفق الطاقة ويعمل في ظل بيئة ذات درجة حرارة عالية، مما يؤدي إلى فقدان طاقة أعلى في مفاتيح أشباه الموصلات والمكثفات. يؤدي فقدان الطاقة المرتفع حتماً إلى زيادة درجة الحرارة الأساسية لأجهزة التبديل، مما يقلل من اعتمادية العاكس ويزيد من خطر الفشل وتفاقم المكونات. حيث أن اعتمادية العاكس الكهروضوئي تعتمد بشكل كبير على الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة المحيطة ومستويات طاقة الإدخال.

يقترح الأسلوب التحليلي لتحديد معدلات الفشل المتعلقة بمدخلات الطاقة لمكونات العاكس على النحو التالي.

$$\pi_{El} = 0.056 \quad \text{if} \quad \frac{V_{applied}}{V_{rated}} \leq 0.3$$

(8)

حيث  $\pi_{Mech}$  و  $\pi_{RH}$  و  $\pi_{TCySolderjoints}$  و  $\pi_{TCyCase}$  و  $\pi_{Thermal}$  هي عوامل التسارع المتعلقة بالضغط الفيزيائية ذات الأصل الكهربائي والحراري والميكانيكي. يمثل  $\pi_{Induced}$  مساهمة الضغوط الزائدة الناجمة عن عوامل أخرى، ويمثل  $\pi_{PM}$  جودة الأجزاء المصنعة، ويمثل  $\pi_{Process}$  الجودة والرقابة الفنية على الموثوقية في دورة حياة المنتج تم اعتماد نموذج الاعتمادية القياسي للديود لتقدير معدل فشل الصمام الثنائي في العواكس، على النحو التالي

$$\lambda_{Diode} = \lambda_b \pi_T \pi_S \pi_C \pi_Q \pi_E \quad (9)$$

حيث  $\lambda_b$  هو معدل الفشل الأساسي للصمام الثنائي، و  $\pi_T$  هو عامل درجة الحرارة، و  $\pi_S$  هو عامل الإجهاد الكهربائي، و  $\pi_C$  هو عامل البناء، و  $\pi_Q$  هو عامل الجودة، و  $\pi_E$  عامل البيئة.

بالنظر إلى درجة حرارة الوصلة  $T_j$ ، يتم حساب عامل درجة الحرارة بواسطة

$$\pi_T = e^{-3091 \left( \frac{1}{(T_j+273)} - \frac{1}{298} \right)} \quad (10)$$

يمكن حساب عامل الإجهاد الكهربائي بواسطة

$$\pi_{El} = \left( \frac{V_{applied}}{V_{r,Diode}} \right)^{2.45} \quad \text{if} \quad \frac{V_{applied}}{V_{r,Diode}} < 1$$

$$\pi_{El} = 0.054 \quad \text{if} \quad \frac{V_{applied}}{V_{r,Diode}} \leq 0.3$$

(11)

حيث  $V_{applied}$  هو الجهد المطبق عبر الصمام الثنائي،  $V_{r,Diode}$  هو الجهد العكسي المقدر للصمام الثنائي اعتمادية العاكس: بشكل عام، لا يحتوي العاكس الكهروضوئي على تكرار متوازي، مما يعني أن الفشل في أي مكون واحد سيؤدي إلى انقطاع العاكس بأكمله. لذلك، يمكن نمذجة اعتمادية العاكس الكهروضوئي كشبكة متسلسلة. يتم التعبير عن معدل الفشل ووقت الإصلاح وتوافر العاكس الكهروضوئي بواسطة

$$\lambda_I(P, V, T) = \sum_i (\lambda_{Di} + \lambda_{Si}) \quad (12)$$

$$r_I(P, V, T) = \frac{1}{\lambda_I} \left[ \sum_i (\lambda_{Di} r_{Di} + \lambda_{Si} r_{Si}) \right] \quad (13)$$

$$A_I(P, V, T) = \frac{1/r_I}{\lambda_I + 1/r_I} \quad (14)$$

حيث  $\lambda$  هو معدل الفشل، و  $r_I$  هو وقت الإصلاح، و  $A_I$  هو التوفر، والمشتركان S يمثل IGBT، و D يمثل الصمام الثنائي. جميع المؤشرات الثلاثة هي وظائف تدفق الطاقة من خلال العاكس الكهروضوئي، وجهد الإدخال، ودرجة الحرارة الفقد في الطاقة

هما معاملات الاقتران الحراري بين IGBT والصمام الثنائي.

$$T_j = T_c + \Delta T \quad (3)$$

$$T_j = T_a + \theta_a (P_{IGBT-loss} + P_{Diode-loss} + P_{add}) + \Delta T \quad (4)$$

حيث  $T_a$  هي درجة حرارة المحيط  $T_c$  درجة حرارة العلب،  $\theta_a$  هي المقاومة الحرارية من البيئة المحيطة إلى العلب بما في ذلك الحوض،  $P_{add}$  هي الطاقة التي تبدها الأجهزة المثبتة الأخرى بالإضافة إلى IGBT والصمام الثنائي [15]. تم أخذ البيانات المستخدمة لبناء نماذج التنبؤ FIDES من قواعد بيانات تحليل الفشل الحديثة من أنظمة الأسلحة ومجالات الطيران المدني وتم توفيرها أيضًا من قبل الشركات المصنعة للمكونات والتجميعات الفرعية. يقترح نموذج التقييم FIDES تنبؤًا بالاعتمادية بمعدلات فشل ثابتة. ولذلك، فإن احتمال الفشل لا يعتمد على عدد ساعات تشغيل المكون. وهذا يعني أنه يتم فقط أخذ حالات الفشل التي تحدث بشكل عشوائي خلال فترة حياة أحد المكونات في الاعتبار، ولا يتم تضمين حالات الفشل المبكرة وحالات التآكل. تتكون هذه المنهجية لتقييم الموثوقية في الإلكترونيات من جزأين:

- دليل التنبؤ باعتمادية المكونات،

- دليل التحكم في عملية الاعتمادية والتدقيق [16].

تنبؤات الاعتمادية التي تقدمها منهجية FIDES هي معدلات فشل يُشار إليها بـ  $\lambda$ :

$$\lambda = \lambda_{Physical} \times \pi_{Part-manufacturing} \times \pi_{Process} \quad (5)$$

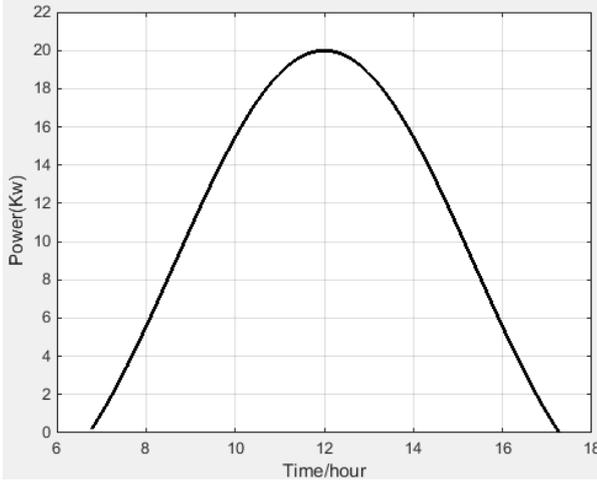
حيث تمثل  $\lambda_{Physical}$  المساهمة المادية،  $\pi_{Part-manufacturing}$  تمثل الجودة والرقابة الفنية على تصنيع العنصر.  $\pi_{Process}$  يمثل الجودة والرقابة الفنية على عملية التطوير والتصنيع والاستخدام للمنتج الذي يحتوي على العنصر يتم التعبير  $\lambda$  عن نموذج FIDES العام بالمعادلة التي يتم التعبير عنها بوحدات FIT (الفشل في الوقت المناسب)، أي الفشل في  $10^9$  ساعة. وتطبيق المعادلة الموصي بها من قبل دليل FIDES 2009 لتقدير معدلات الفشل ل IGBT على النحو التالي:

$$\lambda_{IGBT} = (\lambda_{0TH} \times \pi_{Thermal} + \lambda_{0TCyCase} \times \pi_{TCyCase} + \lambda_{0TCySolderjoints} \times \pi_{TCySolderjoints} + \lambda_{0RH} \times \pi_{RH} + \lambda_{0Mech} \times \pi_{Mech}) \times \pi_{Induced} \times \pi_{PM} \times \pi_{Process} \quad (6)$$

حيث  $\lambda_{0TH}$  هو معدل الفشل الأساسي ل IGBT بسبب الإجهاد الحراري الزائد،  $\lambda_{0TCyCase}$  لتأثير التدوير الحراري على العلب،  $\lambda_{0TCySolderjoints}$  لتأثير التدوير الحراري على وصلة اللحام،  $\lambda_{0RH}$  للرطوبة والإجهاد الميكانيكي الزائد.

$$\pi_{Thermal} = \pi_{El} \times e^{11604 \times 0.7 \times \left[ \frac{1}{293} - \frac{1}{(T_j - component + 273)} \right]} \quad (7)$$

$$\pi_{El} = \left( \frac{V_{applied}}{V_r} \right)^{2.4} \quad \text{if} \quad \frac{V_{applied}}{V_{rated}} > 0.3$$

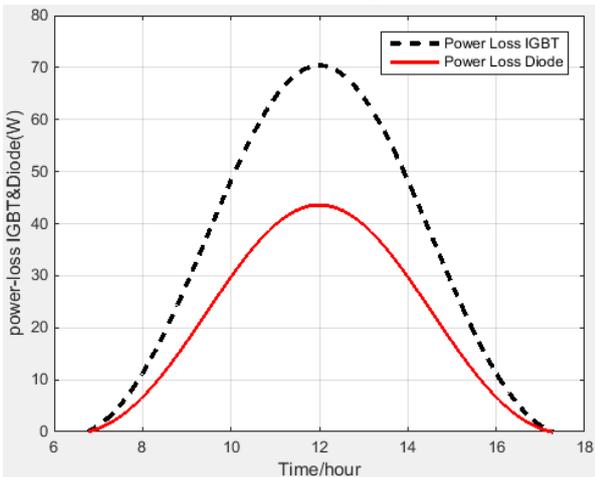


الشكل 6: العلاقة بين الزمن والقدرة الكلية

يُظهر الشكل (6) إجمالي إنتاج الطاقة للوحة الشمسية مع مرور الوقت. في بداية اليوم، عندما تشرق الشمس، يكون خرج طاقة اللوحة الشمسية منخفضاً أو حتى صفراً، حيث أن ضوء الشمس يسقط على اللوحة قليلاً أو معدوماً. مع ارتفاع الشمس في السماء، تزداد شدة ضوء الشمس، مما يؤدي إلى زيادة في إنتاج الطاقة من اللوحة الشمسية.

يصل خرج الطاقة إلى ذروته عندما تتلقى اللوحة الشمسية الحد الأقصى من ضوء الشمس، عادةً في منتصف النهار عندما تكون الشمس في أعلى نقطة لها في السماء. عند هذه النقطة، تعمل اللوحة الشمسية بأقصى قدر لها، وتحول كمية كبيرة من ضوء الشمس إلى طاقة كهربائية.

بعد الوصول إلى الذروة، ينخفض خرج الطاقة من اللوحة الشمسية تدريجياً مع بدء غروب الشمس. تقل شدة ضوء الشمس، مما يؤدي إلى انخفاض توليد الطاقة بواسطة الألواح الشمسية. وفي نهاية المطاف، عندما تغرب الشمس تحت الأفق، ينخفض إنتاج طاقة اللوحة الشمسية إلى الصفر.



الشكل 7: العلاقة بين الفقد في الطاقة ل IGBT والصمام الثنائي والزمن. يوضح الشكل (7) ان العلاقة بين الفقد في الطاقة ل IGBT والصمام الثنائي علاقة طردية حيث أن الفقد في الطاقة يزداد بزيادة الإشعاع الشمسي. وبوصول الإشعاع الشمسي الي ذروته كانت اعلي قيمة فقد ل IGBT وهي 70 وات. اما في الصمام الثنائي كانت قيمة الفقد فيه عند ذات الوقت 45 وات. واتضح أيضا من خلال الرسم ان الترانزستور أكثر تبديد للطاقة من الصمام الثنائي.

مع زيادة الإشعاع الشمسي، يزداد إنتاج الطاقة من الألواح الشمسية، مما

الفقد في الطاقة ل IGBT والصمام الثنائي هي مجموع فقود التوصيل وفقود التبديل.

(1) فقد التوصيل:

$$P_{IGBT-Cond} = \frac{1}{2} I_M V_{1o} \left( \frac{1}{\pi} + \frac{\mu}{4} \cos \varphi \right) + \frac{a_1}{4\sqrt{\pi}} I_M^{(b_1+1)} \times \left[ \frac{\Gamma\left(\frac{b_1+2}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{b_1+3}{2}\right)} + \frac{\Gamma\left(\frac{b_1+3}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{b_1+2}{2}+1\right)} \mu \cos \varphi \right] \quad (15)$$

$$P_{Diode-Cond} = \frac{1}{2} I_M V_{2o} \left( \frac{1}{\pi} - \frac{\mu}{4} \cos \varphi \right) + \frac{a_2}{4\sqrt{\pi}} I_M^{(b_2+1)} \times \left[ \frac{\Gamma\left(\frac{b_2+2}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{b_2+3}{2}\right)} + \frac{\Gamma\left(\frac{b_2+3}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{b_2+2}{2}+1\right)} \mu \cos \varphi \right] \quad (16)$$

حيث  $\Gamma$  هي دالة جاما،  $a_1, V_{1o}, b_1, a_2, V_{2o}, b_2$  هي معاملات نموذجية لحساب انخفاض الجهد عبر IGBT والصمام الثنائي،  $I_M$  هو الحجم الحالي و  $\Phi$  عامل الطاقة عند خرج العاكس الواجهة، ويمثل  $\mu$  مؤشر التعديل.

(2) فقد التبديل:

الخسائر في الجهاز النشط باستخدام الصمام الثنائي المثالي دون النظر في الاسترداد العكسي

$$P_{on} = fh I_M^k \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \frac{\Gamma\left(\frac{k+1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{k}{2}+1\right)} k_{gon} \frac{V_{applied}}{V_t} \quad (17)$$

$$P_{off} = fz I_M^r \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \frac{\Gamma\left(\frac{r+1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{r}{2}+1\right)} k_{goff} \frac{V_{applied}}{V_t} \quad (18)$$

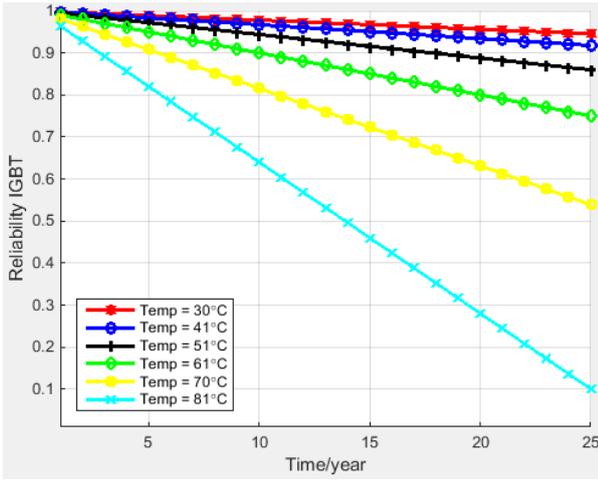
حيث  $f$  هو تردد التشغيل ل IGBT، الرموز  $h$  و  $z$  و  $r$  هي معاملات النموذج لحساب فقدان طاقة التبديل. تتوافق  $k_{gon}$  و  $k_{goff}$  مع مقاومة محرك البوابة في حالات التشغيل وإيقاف التشغيل، على التوالي، و  $V_t$  هو جهد الاختبار ويرتبط بالجهد المطبق  $V_{applied}$  [16].

3. مناقشة النتائج.

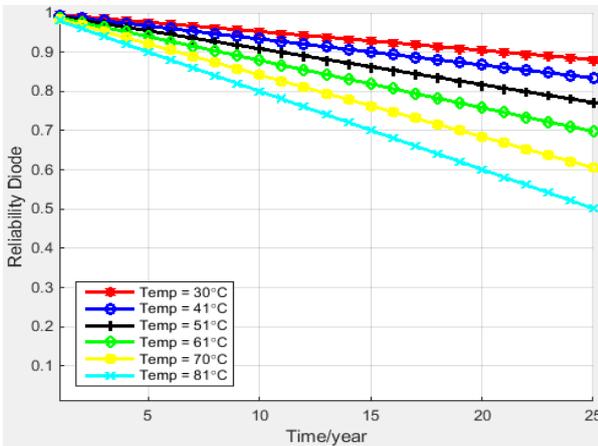
تم دراسة كل المعادلات والمنحنيات باستخدام برنامج الماتلاب، عندما تتعرض اللوحة الشمسية لأشعة الشمس، يتبع ذلك إنتاج الطاقة ونمطاً يمكن التنبؤ به على مدار اليوم.

- يرجع إلى عدة عوامل.
- أولاً، تؤدي الزيادة في درجة حرارة الوصلة إلى انخفاض في حركة الموجة الحاملة، مما يؤثر على انخفاض الجهد وفقدان التوصيل.
  - ثانيًا، تؤثر درجة حرارة الوصلة المرتفعة على كفاءة الهياكل الداخلية لـ IGBT، مثل أكسيد البوابة، مما قد يزيد من الفقد عند التبديل. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن يؤدي ارتفاع درجات الحرارة أيضًا إلى زيادة تيارات التسرب، مما يساهم في فقدان الطاقة.

من المهم ملاحظة أن العلاقة بين فقدان الطاقة ودرجة حرارة الوصلة طردية. مع ارتفاع درجة حرارة تقاطع IGBT، يزداد فقدان الطاقة، مما يؤدي بدوره إلى زيادة معدلات الفشل وانخفاض اعتماديّة IGBT والمنظومة بشكل عام.



الشكل 9: العلاقة بين الاعتمادية لـ IGBT والزمن.



الشكل 10: العلاقة بين الاعتمادية للوصام الثنائي والزمن.

في إطار درجة الحرارة، يمكن أن تتأثر العلاقة بين الاعتمادية والوقت بعدة عوامل، بما في ذلك درجة الحرارة التي يعمل عندها النظام أو الجهاز. يمكن أن تؤدي درجات الحرارة المرتفعة إلى تسريع بعض آليات الفشل، مما قد يؤدي إلى تقليل الاعتمادية بمرور الوقت.

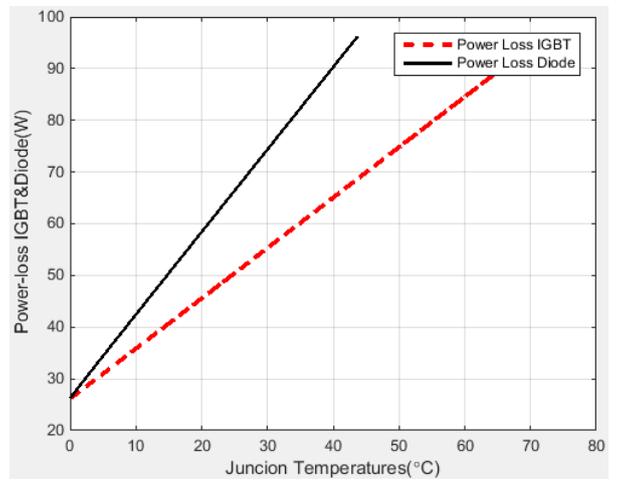
عندما يتعلق الأمر بالأجهزة الإلكترونية، مثل العواكس الدوائر المتكاملة أو المكونات الإلكترونية، فإن ارتفاع درجات الحرارة يمكن أن يؤدي إلى زيادة المقاومة الكهربائية، وزيادة تيارات التسرب، وكلها يمكن أن تساهم في فشل الجهاز. وبمرور الوقت، يمكن أن تتراكم هذه التأثيرات، مما يؤدي إلى انخفاض الاعتمادية.

من المهم ملاحظة أن العلاقة بين درجة الحرارة والاعتمادية ليست خطية ويمكن أن تعتمد على عوامل أخرى مختلفة، بما في ذلك المواد المحددة

يؤدي إلى تدفق تيار أعلى عبر ترانزستور IGBT. ونتيجة لذلك، يزداد الفقد في الطاقة

جدول 1: معاملات تحليل الاعتمادية

IGBT & Diode				
$T_d(^{\circ}C)$	$\mu$	$\cos\phi$	$V_f(V)$	$f(kHz)$
25	0.8	0.95	480	20
$P_{out}(W)$	$\theta_{o}(^{\circ}C/W)$	$V_{1o}(V)$	$a_1$	$b_1$
11	0.11	0.9654	0.1642	0.6468
$k$	$z$	$h$	$r$	$V_{r,IGBT}(V)$
1.6783	0.0181	0.0040	1.3444	480
$\theta_{11}(^{\circ}C/W)$	$\theta_{12}(^{\circ}C/W)$	$\theta_{21}(^{\circ}C/W)$	$\theta_{22}(^{\circ}C/W)$	$r_{Di}(days)$
0.640	0.250	0.300	0.830	20
$\lambda_{aTH}$	$\Pi_{Induced}$	$\Pi_{PM}$	$\Pi_{Process}$	$r_{Si}(days)$
0.3021	2.0	1.7	4.0	20
$k_{goff}$	$k_{gon}$	$V_{r,diode}(V)$	$t_d(ns)$	$t_b(ns)$
1.0	1.5	600	25.9	54.1
$V_{2o}(V)$	$a_2$	$b_2$	$I_r(A)$	
0.711	0.136	0.395	10	
$\lambda_b$	$\pi_E$	$\pi_C$	$\pi_Q$	
0.005	6.0	1.0	2.4	



الشكل 8: العلاقة بين درجة حرارة الوصلة ( $T_j$ ) والفقد في الطاقة.

باستخدام المعاملات المدونة بالجدول 1 تم تحليل المعادلات ببرنامج ماتلاب و توصلنا الي نتائج. يوضح الشكل (8) انه بزيادة درجة حرارة الوصلة، تقل قدرة فقدان الطاقة لـ IGBT عن قدرة فقدان الطاقة للوصام الثنائي. تعد درجة حرارة الوصلة عامل مهم يؤثر على الأداء العام والاعتمادية لـ IGBT. حيث تُستخدم IGBTs على نطاق واسع في تطبيقات الطاقة الإلكترونية، حيث تقوم بتبديل الفولتية العالية والتيارات. أثناء التشغيل، يتعرض IGBT لفقدان الطاقة بسبب آليات مختلفة، مثل الفقد في التوصيل والفقد عند التبديل.

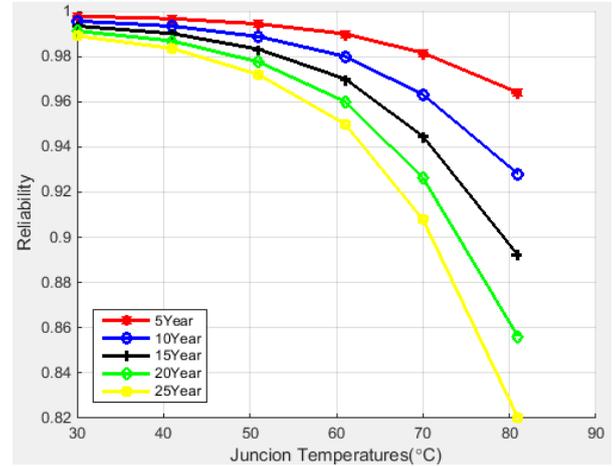
يحدث الفقد التوصيل عندما يكون IGBT في حالة التشغيل ويتدفق التيار من خلاله. يتم تحديد هذا الفقد في المقام الأول من خلال انخفاض الجهد الأمامي عبر IGBT والتيار الذي يمر عبره. يتأثر انخفاض الجهد الأمامي بدرجة حرارة الوصلة، حيث تؤدي الزيادة في درجة حرارة الوصلة إلى زيادة انخفاض الجهد لـ IGBT. لذلك، يميل الفقد في التوصيل إلى الزيادة مع زيادة درجة حرارة الوصلة.

يحدث الفقد عند التبديل أثناء الانتقال بين حالة IGBT وخارجها. ينشأ هذا الفقد من شحن وتفريغ السعات الداخلية للعواكس وتعتمد بشدة على سرعة التبديل وظروف التحميل. يزداد الفقد عند التبديل أيضًا مع زيادة درجة حرارة الوصلة.

يمكن القول ان الزيادة في فقدان الطاقة بسبب ارتفاع درجة حرارة الوصلة

- [1]- H. Wang, M. Liserre, and F. Blaabjerg, "Toward reliable power electronics: challenges, design tools, and opportunities," IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 7, no. 2, pp. 17-26, Jun. 2013
- [2]- H. Wang, M. Liserre, F. Blaabjerg P. de Place Rimmen, J. B. Jacobsen, T. Kvisgaard, and J. Landkildehus, "Transitioning to Physics-of-Failure as a Reliability Driver in Power Electronics," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 2, no. 1, pp. 97-114. Mar. 2014.
- [3]- R. Burgos, C. Gang, F. Wang, D. Boroyevich, W. G. Odendaal, J. D. van Wyk, "Reliability-Oriented Design of Three-Phase Power Converters for Aircraft Applications," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 48, no. 2, pp. 1249-1263, Apr. 2012.
- [4]- A. Volke and M. Hornkamp, IGBT Modules Technologies, Driver and Application. Neubiberg, Germany: Infineon Technol. AG, 2011.
- [5]- K. Ma and F. Blaabjerg, "The impact of power switching devices on the thermal performance of a 10 MW wind power NPC converter," Energies, vol. 5, no. 7, pp. 2559–2577, Jul. 2012.
- [6]- C. Buscaet al., "An overview of the reliability prediction related aspects of high power IGBTs in wind power applications," Microelectron. Rel., vol. 51, nos. 9–11, pp. 1903–1907, Sep.–Nov. 2011
- [7]- V. K. Khanna, Insulated Gate Bipolar Transistor IGBT Theory and Design, 1 ed.: Willey-IEEE Press, 2003.
- [8]- Ned Mohan, et al., Power Electronics: Converters, Applications, and Design: Wiley, 2002
- [9]- U. Scheuermann and R. Schmidt, A New Lifetime Model for Advanced Power Modules with Sintered Chips and Optimized Al Wire Bonds," in Conf. Rec. PCIM Europe 2013, May 2013
- [10]-A. Q. Huang, "Insulated Gate Bipolar Transistors," in The Power Electronics Handbook: Industrial Electronics Series, chapter 1.9, T.L. Skvarenina, Ed., CRC Press, pp. 1-77 - 1-81, 2002
- [11]-X. Perpiñà, Alberto Castellazzi, Michel Piton, Michel Mermet, "Failure-relevant abnormal events in power inverters considering measured IGBT module temperature inhomogeneities," Microelectronics Reliability, vol. 47, pp. 1784-1789, Sep. 2007.
- [12]-M. Ciappa, "Selected failure mechanisms of modern power modules," Microelectronics Reliability, vol. 42, pp. 653-667, Apr. 2002
- [13]-Nick Baker. "An electrical method for junction temperature measurement of power semiconductor switches". In: Diss., Aalborg University, Denmark 2016 .
- [14]-Meyyappan, K. N., "Failure Prediction of Wire Bonds Due to the Flexure" -Marryland, 2004
- [15]-Peng Zhang, Yang Wang, Weidong Xiao, Wenyuan Li, "Reliability Evaluation of Grid-Connected Photovoltaic Power Systems" IEEE Transactions on Sustainable Energy, VOL. 3, NO. 3, JULY 2012
- [16]-Marcel Helda, Klaus Fritz "Comparison and evaluation of newest failure rate prediction models::FIDES and RIAC 217Plus" Elsevier, pp. 967–971, 2009

المستخدمة، وتصميم النظام، وظروف التشغيل، والجهد يوضح الشكل (9) والشكل (10) ان الاعتمادية تكون اعلى ما يكون عند السنوات الاولى وايضا تكون الاعتمادية عالية عند تشغيل الترانزستور والصمام الثنائي في درجات حراره مثاليه ومنخفضه فعند رفع درجة الحرارة في كل مره فان الاعتمادية تقل عندما تكون درجة حراره الوصلة اقل من 50 درجة مئوية فان الاعتمادية تكون نوعا ما جيده وايضا اما بزيادة درجة حراره الوصلة فان الاعتمادية تقل بشكل ملحوظ ، فعند درجة حراره 94 فان الاعتمادية تكون اقل ما يكون بالنسبة للديود والترانزستور .



الشكل 11: العلاقة بين الاعتمادية ودرجة حرارة الوصلة [7].

يوضح الشكل (11) انه في درجات حرارة الوصلة المنخفضة، تكون الاعتمادية عالية بشكل عام. ومع ذلك، ومع ارتفاع درجة الحرارة الوصلة، تميل الاعتمادية إلى الانخفاض تدريجياً. وذلك لأن درجات الحرارة المرتفعة يمكن أن تؤثر سلباً على أداء وسلامة الترانزستور والصمام الثنائي. مدة التعرض لدرجات الحرارة المرتفعة تلعب أيضاً دوراً أساسياً. قد يكون للتعرض قصير المدى لدرجات الحرارة المرتفعة تأثيره محدود على الاعتمادية، في حين أن التعرض لفترة طويلة يمكن أن يؤدي إلى تدهور وفشل أكبر.

#### 4.4 الاستنتاج.

لضمان التشغيل المعتمد للعكس ومنع المشكلات الحرارية، يجب استخدام تقنيات الإدارة الحرارية المناسبة. وتشمل هذه التقنيات استخدام المشتتات الحرارية المناسبة، وطرق التبريد (مثل المراوح أو التبريد السائل)، ومراقبة درجة حرارة الوصلة لمنعها من تجاوز الحدود المحددة.

باختصار، يتأثر فقدان الطاقة لترانزستور IGBT بدرجة حرارة الوصلة. تؤدي درجات الحرارة المرتفعة إلى زيادة خسائر التوصيل والتحويل، مما يؤدي إلى زيادة إجمالية في تبديد الطاقة. تعد الإدارة الحرارية المناسبة أمراً بالغ الأهمية للحفاظ على IGBT ضمن درجات حرارة التشغيل الآمنة وضمان أدائها المعتمد.

تجدر الإشارة إلى أن العلاقة بين معدل الفشل والوقت ودرجة حرارة الوصلة قد تتأثر بعوامل أخرى أيضاً، مثل تقنية الجهاز المحددة وجودة التصنيع وضغوط الجهد والتيار وظروف التشغيل والتصميم العام للنظام. لذلك، من الضروري استشارة أوراق بيانات الجهاز، وإرشادات الشركة المصنعة، ودراسات الاعتمادية الخاصة بترانزستور IGBT المعني والصمام الثنائي للحصول على معلومات دقيقة فيما يتعلق بمعدلات الفشل وتأثيرات درجة حرارة الوصلة.

#### 5.المراجع.