

# Review on the Reliability Research of High Power IGBT Devices

Bin Ren, Erping Deng, Yongzhang Huang

State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,  
North China Electric Power University, Beijing  
Email: 1624352537@qq.com, dengerpinghit@163.com, huang\_y\_z@ncepu.edu.cn

Received: Sep. 29<sup>th</sup>, 2019; accepted: Oct. 9<sup>th</sup>, 2019; published: Oct. 16<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

With the development of high-voltage transmission and electric locomotive, the high voltage and high power IGBT device, as the most important power electronic device in those application fields, have been widely concerned by domestic and foreign research institutions on their reliability. To provide more reliability information to reliability designers and end users, this paper reviews the development and research status of high voltage and high power IGBT devices reliability. According to the different research purposes of high voltage and high power IGBT devices, the reliability research is divided into three aspects: fault diagnosis, life prediction and condition monitoring. Then the research methods of fault diagnosis and condition monitoring are analyzed and the life prediction model is classified and summarized and its advantages and disadvantages are compared and analyzed. Finally, based on the current reliability research methods and contents of the high voltage and high power IGBT device, the challenge and developing trend of reliability research in the future are put forward.

## Keywords

High Voltage and High Power IGBT Device, Reliability, Fault Diagnosis, Lifetime Prediction, Condition Monitoring, Developing Trend

---

# 高压大功率IGBT器件可靠性研究综述

任 斌, 邓二平, 黄永章

华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京

Email: 1624352537@qq.com, dengerpinghit@163.com, huang\_y\_z@ncepu.edu.cn

收稿日期: 2019年9月29日; 录用日期: 2019年10月9日; 发布日期: 2019年10月16日

## 摘要

随着高压直流输电和电力机车等领域的不断发展, 高压大功率IGBT器件作为其中重要的电力电子器件, 其可靠性问题得到了国内外研究机构的广泛关注。为给高压大功率领域可靠性设计者以及终端用户提供更多高压大功率IGBT器件的可靠性信息, 文中阐述了高压大功率IGBT器件可靠性的发展与研究现状。根据高压大功率IGBT器件可靠性研究目的的不同, 将可靠性研究分为故障诊断、寿命预测和状态监测三个方面。文中对故障诊断和状态监测的研究方法进行了分析, 对于寿命预测模型进行了分类总结以及优缺点对比分析。最后, 基于目前高压大功率IGBT器件可靠性的研究方法和内容, 提出了可靠性研究未来的挑战和发展趋势。

## 关键词

高压大功率IGBT器件, 可靠性, 故障诊断, 寿命预测, 状态监测, 发展趋势

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

电力电子技术是最为先进的电能变换技术, 其高度灵活性和高效率的特点, 促使其蓬勃发展。电力电子系统是应用电力电子技术的重要载体, 在电能变换的场合广泛应用。电力电子系统在工作过程中存在不同的可靠性问题, 可靠性问题的出现会导致整个电力电子系统的失效[1] [2]。目前高压直流输电、电力机车等应用对高压大功率 IGBT 器件提出了需求, 尤其是可靠性, 要求电力电子器件的寿命达到 30 年及以上。标准 GJB 451A-2005 对可靠性的定义是:“指产品在规定的条件下和规定的时间内, 完成规定功能的能力。”所以可以定义功率半导体器件的可靠性是:“指在一定的条件下, 器件所能执行一定功能的能力。”

高压大功率 IGBT 器件等功率半导体器件的可靠性对于不同的应用场景和运行工况, 比如 HVDC 的换流设备、电力电子变压器、风电变流器、电动车驱动装置等, 功率器件的可靠性分析和评估具有其特殊性, 本文主要对于高压直流输电和电力机车等领域应用的高压大功率 IGBT 器件进行可靠性研究, 其可靠性研究主要包括器件的故障诊断、寿命预测和状态监测这三个方面, 故障诊断是在高压大功率 IGBT 器件损坏之后对器件进行的可靠性评估, 状态监测是在高压大功率 IGBT 器件工作过程中对其进行的可靠性监测, 寿命预测是对高压大功率 IGBT 器件的使用范围进行的可靠性评估。

对于高压大功率 IGBT 器件的可靠性研究方面, 国外研究机构较早开始研究, ABB 较为详细地介绍了功率循环试验的实验条件, 试验结果以及数据处理, 并利用 Weibull 分布和 Coffin-Manson 定理改进了寿命预测模型[3] [4]; 英飞凌提出了与加热时间、键合线等因素有关的 Bayerer 寿命预测模型[5]; 赛米控采用全集成的  $U_{ce}$  监控和负关断栅极电压对短路事故进行很好的状态监测[6]; 奥尔堡大学总结了 IGBT 的失效机理和各种模块寿命模型[7]; 瑞士苏黎世联邦理工学院总结了寿命预测的具体方法和步骤并提出了一种新的用于描述蠕变的寿命预测模型[8]。相比于国外研究机构, 国内研究机构多从 2010 年前后开始研究高压大功率 IGBT 器件的可靠性, 株洲电力机车研究所根据线性疲劳损伤累积理论和寿命模型计算了功率循环寿命并通过功率循环试验发现温升与寿命符合 Coffin-Manson 关系[9] [10]; 重庆大学利用杂散参数的变化, 以门极电压和电流为特征量对 IGBT 进行了状态监测[11], 利用小波理论对 IGBT 键合线脱落故障进行了监测[12], 利用门极电压在开通时段响应曲线的离散 Fréchet 距离度量其相似性的变化, 并

以此作为参数来辨识 IGBT 模块是否存在故障[13]; 海军工程大学通过加速老化试验提出了对数正态分布是一种预测寿命更为准确的方法并提出了一种监测 IGBT 的压降值来在线评估 IGBT 可靠性的方法[14][15]; 天津大学通过红外探测法和热电阻接触测温法对键合线脱落情况下的芯片温度进行了状态监测[16]。

通过对高压大功率 IGBT 器件可靠性主要研究机构的概述, 对于可靠性的研究现状有了一定的了解, 后文将对于可靠性研究的三个方面进行详细地论述。

## 2. IGBT 器件故障诊断

IGBT 器件故障诊断的方法很多, 但针对 IGBT 器件本身故障诊断文献不多, 几乎都是针对特定厂家、型号或者特定工作状态的变流装置中检测 IGBT 封装外部的特性, 所以诊断依据差别很大, 通用性不高。

### 2.1. 利用 IGBT 故障后直接观察进行诊断

实际上 IGBT 器件在故障工程中表现出来的外部特性比较少, 并且不易测量[17]。在其故障失效后对其进行直接观察往往比较容易发现其失效模式。

IGBT 的主要失效模式和机理由于其封装不同而很不一样[18]。利用直接观察进行故障诊断, 多会用到扫描声学显微镜、红外探测仪和 X 光射线仪等装置。

通过红外探测法和热电阻接触测温法, 文献[16]对键合线脱落情况下的芯片温度情况进行了研究, 发现键合线脱落后芯片温度分布不均且中间温度变化率变大, 而且结温与键合线脱落根数近似呈线性。文献[19]研究了 IGBT 高频开关电源的故障诊断, 发现驱动板受潮后驱动不足导致 IGBT 无法导通, 于是产生过电压爆炸, 并发现通过烘干后涂上绝缘漆故障未再发生。利用声学显微镜和外部电压电流的测量, 文献[20]发现栅氧层损坏影响电容-电压的测量, 芯片焊层疲劳影响开通压降和关断时间。

### 2.2. 利用 IGBT 故障诊断测量值直接判断的方法

利用测量值作为特征量直接判断就是测量 IGBT 器件故障前后各个极间电压或者各极的电流变化进行 IGBT 器件是否故障的直接判断[21]。

利用 IGBT 器件故障前后栅极驱动的栅射电压变化, 文献[22]对键合引线脱落故障进行了判定。通过进行试验, 文献[23]发现功率循环温度差  $\Delta T_j$  小于 40 K 时对铝键合引线可靠性没有太大影响。文献[24]提出可以将 IGBT 导通时集射极间电压变化来实现对 IGBT 性能的检测。文献[25]提出使用门极电流的特性变化作为故障特征参数进行提取。通过试验发现门极驱动电压波形随 IGBT 的老化出现米勒平台减小的趋势, 文献[26]利用此原理对 IGBT 的性能状态进行检测。

### 2.3. 利用 IGBT 故障诊断测量值间接判断的方法

利用 IGBT 器件故障测量值间接判断, 即对信号进行采集、变换和分析, 在直接测量出的参数中分辨出故障信号与正常信号的区别, 利用信号中的所包含的信息进行故障诊断[27]。信号既可以简单利用幅值、频率或者均值、标准差等进行判断, 也可以利用沃尔什变换、基函数、傅里叶变换、小波变换以及高阶谱分析等数学方法进行处理, 从而进行故障诊断。

基于电机驱动中三相三桥臂逆变器的 IGBT 器件内部焊料层老化后的故障诊断, 文献[28]提出 IGBT 器件内部结温升高焊料层老化后, 其关断时间延长, 从而影响桥臂的死区时间。因此对逆变器外环的谐波补偿器信号进行诊断, 即可以对 IGBT 器件的故障进行判断。

利用 IGBT 故障后直接观察进行诊断的故障诊断方法对于诊断仪器的依赖性较强, 优点是诊断较为准确; 利用 IGBT 故障诊断测量值直接判断的方法对于测量值的选取较为严格, 优点是对于测量系统的要求不高; 利用 IGBT 故障诊断测量值间接判断的方法对于故障信号的处理提出了很高的要求, 优点是测量系统最为简单。

### 3. IGBT 器件寿命预测

为了评估 IGBT 的可靠性和使用寿命,往往需要通过可靠性试验和寿命预测来确定 IGBT 器件的使用年限。可靠性试验参照 IEC 60747/IEC 60749/IEC 60068 等试验标准。正常情况下半导体器件失效过程周期很长,会达到十几到几十年,所以一般各生产商会进行加速老化试验,使实验条件比正常工作条件更加严苛以加速老化过程,并根据统计数据和失效机理建立相应的模型对器件进行寿命预测。目前对 IGBT 器件进行寿命预测的模型分为解析寿命模型和物理寿命模型。

#### 3.1. 解析寿命模型

解析寿命模型顾名思义即未考虑 IGBT 器件失效具体的物理过程,而是仅利用统计原理进行寿命预测的模型,表 1 总结了目前 IGBT 器件的解析寿命预测模型,并且对于各个模型的优缺点进行了对比。

Table 1. Analytical life prediction model for IGBT devices

表 1. IGBT 器件的解析寿命预测模型

寿命预测模型	优点	缺点
<p>LESIT 模型[29]</p> $N_f = A \cdot \Delta T_j^{-\alpha} \cdot e^{E_a/(kT_m)}$ <p>式中, <math>k_B</math> 为玻尔兹曼常数(<math>1.380 \times 10^{-23}</math> J/K), <math>E_a</math> 为激活能(<math>9.89 \times 10^{-20}</math> J), <math>A</math>、<math>\alpha</math> 为模型参数, <math>\Delta T_j</math> 为 IGBT 结温变化, <math>T_m</math> 为平均温度。</p>	<p>在 Coffin-Manson 定理中加了一个 Arrhenius 因子,该因子有一个与激活能和平均温度有关的指数项,因此可以一定程度上克服 Coffin-Manson 定理的一些缺点;LESIT 模型也跟失效机理有一定关系,因为 <math>\Delta T_j</math> 与塑性形变有关。</p>	<p>只有温度变化差值而没有体现绝对温度高低对器件的影响,因此在不同的试验条件下误差可能较大。</p>
<p>Norris-Landzberg 模型[30]</p> $N_f = A \cdot f^{-n_2} \cdot \Delta T_j^{-n_1} \cdot e^{E_a/(kT_m)}$ <p>式中, <math>k</math> 为玻尔兹曼常数(<math>1.380 \times 10^{-23}</math> J/K), <math>E_a</math> 为激活能(<math>9.89 \times 10^{-20}</math> J), <math>A</math>、<math>n_1</math>、<math>n_2</math> 为模型参数, <math>f</math> 为功率循环周期, <math>\Delta T_j</math> 为 IGBT 结温变化, <math>T_m</math> 为平均温度。</p>	<p>在 LESIT 模型的基础上加入了功率循环周期这一参数,可以有效的反应温度变换周期对于寿命的影响。</p>	<p>主要在于将功率循环的影响只反应在循环周期一个常数上。然而在实际的功率循环中,结温的停留时间、斜坡上升时间以及循环时间都是重要的影响因素。与此同时这种模型也多用于温度循环等被动加热的情况,应用在主动加热的功率循环实验往往也会有较大误差。</p>
<p>改进的 Coffin-Manson 与 LESIT 模型[31]</p> $N_f = n_1 \left( \frac{\Delta T_c}{t_{on}} \right)^{n_2} \Delta T_c^{n_3} I_c^{n_4} e^{\frac{E_a}{kT_m}}$ <p>式中: <math>n_1</math>, <math>n_2</math>, <math>n_3</math>, <math>n_4</math> 为模型参数, <math>k</math>、<math>E_a</math>、<math>T_m</math> 与 LESIT 模型中相同, <math>\Delta T_c</math> 为 IGBT 结温变化, <math>t_{on}</math> 为每个温度循环中 IGBT 器件的导通时间; <math>\Delta T_c/t_{on}</math> 为温度变化速率; <math>I_c</math> 为实验中模块的加热电流。</p>	<p>器件寿命受温度的波动范围和变化速率影响,而在循环温度和试验环境一定的情况下,关断时间为定量,所以模型中加入导通时间和加热电流参量,忽略通断时间,可以更加准确的预测器件的使用寿命。</p>	<p>在实际的功率循环实验中,结温差往往比较难以测量,导致结温变化和温度变化率两个模型参数的准确性受到影响,从而导致预测结果的偏差。</p>
<p>改进加速寿命模型[32] [33]</p> $N_f = A(\Delta T_j)^{\alpha} i^{\beta} (C_T U_{CEmax} + B)^{\gamma} e^{\frac{Q}{kT_m}}$ <p>式中, <math>R</math> 为玻尔兹曼常数(<math>1.380 \times 10^{-23}</math> J/K), <math>Q</math> 为激活能(<math>9.89 \times 10^{-20}</math> J), <math>A</math>、<math>\alpha</math>、<math>\beta</math>、<math>\gamma</math>、<math>C_T</math>、<math>B</math> 为模型参数, <math>\Delta T_j</math> 为 IGBT 结温变化, <math>i</math> 为加速寿命试验中模块的加热电流, <math>U_{CEmax}</math> 为发射极与集电极之间电压最大值, <math>T_m</math> 为平均温度。</p>	<p>实际操作下 IGBT 器件结温测量很困难,操作性差,通过相关实验可知,焊接式 IGBT 键合线脱落后,集电极与发射极间电压 <math>U_{CE}</math> 与 <math>T_j</math> 有一定的线性数学关系,因此,通过引入 <math>U_{CE}</math> 参数改进了寿命预测模型,提高了模型的预测精度。</p>	<p>发射极与集电极之间电压 <math>U_{CE}</math> 与 <math>T_j</math> 的线性数学关系只适用于焊接式 IGBT,对于压接型 IGBT 不适用,模型的适用范围有限。</p>
<p>CIPS08 模型[15]</p> $N_f = K \cdot \Delta T_j^{\beta_1} \cdot e^{\beta_2/T_{low}} \cdot I^{\beta_3} \cdot V^{\beta_4} \cdot D^{\beta_5} \cdot D^{\beta_6}$ <p>式中, <math>K</math>、<math>\beta_1</math>、<math>\beta_2</math>、<math>\beta_3</math>、<math>\beta_4</math>、<math>\beta_5</math>、<math>\beta_6</math> 为模型参数, <math>\Delta T_j</math> 为 IGBT 结温变化, <math>T_{low}</math> 为 IGBT 最低结温, <math>t_{on}</math> 为加热时间, <math>I</math> 为键合线上流过的电流, <math>V</math> 为器件的电压范围(以 0.001 V 为单位), <math>D</math> 为键合线直径。</p>	<p>上述几种模型主要是基于结温差 <math>\Delta T_j</math> 的预测模型,而在功率循环实验中,结温差的测量往往存在误差, CIPS08 模型引入了加热时间、键合线流过电流等参量,可以有效的补偿由于结温差测量不准确带来的预测误差,并且在预测模型中加入了键合线直径等物理参量,提高了模型的预测精度。</p>	<p>CIPS08 模型仅适用于 <math>Al_2O_3</math> 为衬底的焊接式模块;加热时间 <math>t_{on}</math> 也不宜选取过大,最好在十几秒以内,因为加热时间太长的话,失效机理会改变,模型预测不再准确;并且 CIPS08 模型中的各个参数不是相互独立的,不适用于单一改变某个参数而直接进行寿命预测;模型较为复杂,计算量大。</p>



### 3.2. 物理寿命模型

解析模型没有考虑具体的失效模式和失效机理,通过实验数据得到的模型对具有不同设计和工艺的模块预测偏差很大。而物理模型是在事先知道其失效模式以及材料的形变机制情况下,结合有限元仿真所得到的数据,对器件的可靠性进行研究。物理模型反映了器件或者模块本身的一些结构特性和物理特性,将功率循环试验中疲劳损伤机理和寿命过程联系起来,同时将失效机理看作是一个物理或者化学过程[34]。文献[18]介绍了关于 IGBT 器件的失效模式和失效机理,从而引申出来的物理寿命模型有以下几种,如表 2 所示。

**Table 2.** Physical life prediction model for IGBT devices

**表 2.** IGBT 器件的物理寿命预测模型

寿命预测模型	优点	缺点
塑性应变模型[35] $\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c$ 式中, $\Delta \varepsilon$ 是应变范围, $\sigma_f'$ 是疲劳强度系数, $E$ 是弹性模量, $N_f$ 是功率循环周期数, $b$ 是疲劳强度指数, $\varepsilon_f'$ 是疲劳延性系数, $c$ 是疲劳延性指数。	循环周期温度波动较大(高周疲劳)时以塑性应变为主(Coffin-Manson 模型), 循环周期温度波动较小(低周疲劳)时以弹性应变为主(Basquin 模型), 塑性应变模型结合了 Coffin-Manson 模型和 Basquin 模型的特点, 可以全面的描述 IGBT 器件在功率循环过程中的弹塑性应变疲劳过程。	没有考虑功率循环实验中循环频率、温度对于应变的影响, 仅从金属疲劳的方面对于 IGBT 器件进行寿命预测, 模型预测精度不高。
Syed 蠕变模型[36] $N_f = \left[ (0.022D_{gb}) + (0.063D_{mc}) \right]^{-1}$ 式中, $D_{gb}$ 和 $D_{mc}$ 分别指在晶界滑移和点阵蠕变在每个循环过程中积累起来的等效蠕变。	Syed 蠕变模型可以反应在快速的温度上升率、刚性连接和低温变化循环下发生的失效机理的转变: 晶界滑移到点阵蠕变的变化, 增加了金属疲劳预测的准确度。	Syed 模型由于没有考虑塑性应变所以不适用于高温低频循环下的疲劳应变寿命预测, 因为塑性应变只有在在其应变率很低的情况下才可以被忽略。
Pan 能量模型[37] $C = N_f (aE_p + bE_c)$ 式中, $C$ 为应变能在温度循环过程中不断积累达到的一个临界值, $N_f$ 为循环寿命, 常数 $a$ 、 $b$ 是利用有限元分析的结果进行多元线性回归分析而确定的, $E_p$ 和 $E_c$ 分别是有限元分析得到的塑性应变能和蠕变能。	模型是基于塑性应变能和蠕变能对于金属疲劳进行寿命预测的, 无论是对于焊接式 IGBT 器件还是压接型 IGBT 器件均有很好的适用性。	基于能量的模型需要有限元和试验的数据, 并且在复杂的工作环境中失效机理会有很多变化, 所以在准确预测器件寿命方面存在一些问题。
Stolkarts 疲劳损伤模型[38] $N_f = \frac{1 - (1 - d_f)^{k-1}}{(k+1)L}$ 式中, $N_f$ 是失效时的循环周期数。 $d_f$ 代表失效损坏总数, $k$ 为材料常数, $L$ 定义为 $L = \int f dt \approx \text{常数}$ , 其中 $f$ 为在还没有损坏的材料上损坏的初始速率。	基于损伤的 Stolkarts 疲劳模型是利用蠕变和塑性应变的推导, 同时也应用了应力-应变滞后回线, 可以适用于任何停留温度、温度上升率等不同的功率循环曲线。	疲劳损伤模型需要通过有限元方法和实验确定 IGBT 器件的应力-应变滞后曲线, 耗费时间长, 计算难度大。

## 4. IGBT 器件状态监测

IGBT 器件状态监测是指监测系统测量出 IGBT 器件早期的一些故障信号并对其进行评估, 以确定是否满足 IGBT 器件正常工作的状态。状态监测也涉及很多内容, 包括 IGBT 器件的失效机理和失效模式、传感技术、信号采集与处理和评价评估等。目前, 功率半导体的状态监测研究刚刚起步[39]。

状态监测主要是分为三个类型: 基于传感器的状态监测评估法、基于器件表面端部特性的状态监测评估法以及基于模型的状态监测评估法[40]。

#### 4.1. 基于传感器的状态监测评估法

基于传感器的状态监测评估法是直接监测一种或多种故障参数对器件进行健康状态评估,并且进行大量的老化试验,通过实验数据得到故障参数的变化规律,以此对器件的失效标准或界限值进行确定。

利用传感器测量发射极引出引线外接的辅助测量电路,并利用键合线脱落后电路产生的变化,文献[41]通过电路的电阻值改变来进行 IGBT 状态监测。利用传感器,对发射极的引线连接一个电阻,文献[42]通过测量电阻两边的电压变化来对 IGBT 键合线脱落进行状态监测。利用 IGBT 的非理想特性而造成的输出谐波,文献[28]进行了器件工作状态的辨识。

#### 4.2. 基于器件表面端部特性的状态监测评估法

利用功率循环实验,文献[43]研究了 IGBT 的饱和管压降、栅极开启电压和饱和截止状态转换的跨导。实验发现在芯片结温升高焊料层老化后,这三个参数都发生了明显变化,所以可选这三个表征器件表面端部特性参数作为监测 IGBT 状态的参数。

利用测量值与正常工作情况下的电流值查询表进行比较,文献[44]对电动汽车驱动变流器中的 IGBT 的工作状态进行了监测。但是电动汽车中的 IGBT 工况比较复杂,信号变化弱,所以也限制了其实际应用。

通过实验研究了反复过流对 IGBT 使用寿命的影响,文献[45]提出了 IGBT 因反复过流导致的累积损伤原理,并且得到了其变化规律,通过对相关参数的测量可以完成对 IGBT 的状态监测。

基于 IGBT 基本结构和半导体物理学,文献[46]对 IGBT 集电极漏电流进行了研究,发现了其随性能退化应力水平和施加时间的变化规律。之后通过将解析分析与理论描述相结合,建立了针对 IGBT 芯片性能退化的集电极漏电流状态监测方法。

为改善功率变流器的可靠性,文献[47]提出一种基于特定条件下集射极饱和压降  $U_{CE(on)}$  的 IGBT 模块老化失效状态监测方法。特定条件指的是特定的集电极电流,该电流是指不同温度下的多条 IC-UCE 输出特性曲线的交点对应的电流,通过测量该电流对应的  $U_{CE(on)}$ ,根据  $U_{CE(on)}$  的变化可以对 IGBT 模块的健康状态进行评估。通过相关实验可知,特定条件下芯片结温不会影响  $U_{CE(on)}$ , $U_{CE(on)}$  仅取决于模块老化的程度,可以将其作为老化状态监测的特征参数。

#### 4.3. 基于模型的状态监测评估法

基于模型的状态评估方法主要是应用 IGBT 的模型跟踪其工作点的变化,来进行状态监测。

利用壳温升的变化对模块内部焊层疲劳状态进行监测,文献[48]建立了散热器模型,记录了变流器运行过程中的表壳温升信号及工作点,利用散热器模型估算出与各个工作点对应的模块功率损耗。通过对变流器在整个电压、电流及温度运行范围内功率损耗的变化进行分析,进一步估算出模块内部热阻的变化,从而得到焊接层疲劳的程度。

### 5. 结论

高压大功率 IGBT 器件的广泛应用使得其可靠性问题越来越得到关注。本文通过了解国内外研究机构对于可靠性的研究现状,总结了故障诊断、寿命预测和状态监测这三个方向的具体研究内容,并且指出了其未来的发展趋势:

1) 对于高压大功率 IGBT 器件的故障诊断,目前的研究基本都是基于特定的电路或者有限的应用场景进行的,通用性不高。IGBT 器件故障诊断未来的发展应该朝着建立通用型的针对具体 IGBT 器件的诊断方法不断迈进,同时随着超声波扫描等各种成像仪器的不断发展,IGBT 器件的故障诊断可以更多的通

过直接观察的方法进行,这样可以避免故障测量值的误差带来的影响。

2) 对于高压大功率 IGBT 器件的寿命预测,解析寿命预测模型未考虑具体物理过程而是利用数据拟合来进行模型的建立,通用性不高,且大部分适用于焊接式 IGBT 模块,适用范围有限。而物理寿命预测模型虽然考虑了物理过程但模型参数较难获得,并且 IGBT 器件的具体失效模式目前仍在研究过程中,通过目前可能的失效模式来建立物理寿命预测模型势必会对预测结果造成一定影响。IGBT 器件寿命预测未来会向着压接型 IGBT 器件的方向发展,并且对于具体失效模式的研究仍会继续。

3) 对于高压大功率 IGBT 器件的状态监测,基于传感器的状态监测方法对于传感器的灵敏度要求较高,基于表面端部特性的状态监测方法测量较为困难且误差较大,基于模型的状态监测方法对于模型的建立较为困难。因为目前有关 IGBT 器件状态监测的研究很少,所以未来的研究前景很广阔,随着各类传感器装置不断发展,IGBT 器件状态监测将会更加依赖于基于传感器的评估方法。

## 致 谢

感谢导师对论文编写工作的指导。

## 基金项目

中央高校基本科研业务费专项资金资助(2019MS001)。

## 参考文献

- [1] 张经纬. 基于有限元法的压接型 IGBT 器件单芯片子模组疲劳寿命预测[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- [2] 刘爽, 牟龙华, 许旭锋, 郭文明. 电力电子器件故障对微电网运行可靠性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 63-70.
- [3] Kaminski, N. (2004) Load-Cycle Capability of HiPaks. ABB Appl. Note 5SYA, 2043-01.
- [4] Berner, J. (2012) Load-Cycling Capability of HiPak IGBT Modules. ABB Switzerland Ltd. Semicond., Tech. Rep. 5SYA2043-03, Lenzburg.
- [5] Bayerer, R., *et al.* (2008) Model for Power Cycling Lifetime of IGBT Modules—Various Factors Influencing Lifetime. *5th International Conference on Integrated Power Electronics Systems*, Nuremberg, 11-13 March 2008, 1-2.
- [6] Vogler, B., Herzer, R., Buetow, S., Mayya, I. and Becker, S. (2014) Advanced SOI Gate Driver IC with Integrated V CE-Monitoring and Negative Turn-Off Gate Voltage for Medium Power IGBT Modules. *26th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's*, Waikoloa, 15-19 June 2014, 1-3.  
<https://doi.org/10.1109/ISPSD.2014.6856040>
- [7] Busca, C. (2011) Modeling Lifetime of High Power IGBTs in Wind Power Applications—An Overview. *International Symposium on Industrial Electronics*, Gdańsk, 27-30 June 2011, 1408-1413.  
<https://doi.org/10.1109/ISIE.2011.5984366>
- [8] Ciappa, M., Carbognani, F. and Fichtner, W. (2003) Lifetime Prediction and Design of Reliability Tests for High-Power Devices in Automotive Applications. *IEEE Transactions on Device & Materials Reliability*, **3**, 523-528.  
<https://doi.org/10.1109/TDMR.2003.818148>
- [9] 王彦刚, Chamund Dinesh, 李世平, 等. 功率 IGBT 模块的寿命预测[J]. 机车电传动, 2013(2):13-17.
- [10] 李世平, 黄蓉, 奉琴, 等. IGBT 模块功率循环能力与可靠性试验[J]. 机车电传动, 2015(3): 15-18.
- [11] 周维维, 周生奇, 孙鹏菊. 基于杂散参数辨识的 IGBT 模块内部缺陷诊断方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 156-163.
- [12] 沈刚, 周维维, 杜雄, 等. 基于小波奇异熵理论的 IGBT 模块键合线脱落故障特征分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 165-171.
- [13] 周生奇, 周维维, 孙鹏菊. 基于曲线离散 Fréchet 距离的风电并网变流器中 IGBT 模块缺陷诊断方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 8-13.
- [14] 刘宾礼, 刘德志, 唐勇, 等. 基于加速寿命试验的 IGBT 模块寿命预测和失效分析[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2013, 34(5): 556-563.

- [15] 唐勇, 汪波, 陈明, 等. 高温下的 IGBT 可靠性与在线评估[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 17-23.
- [16] 禹鑫, 杜明星, 窦汝振, 等. IGBT 功率模块键合线故障下的温度特性研究[J]. 电力电子技术, 2015, 49(2): 55-57.
- [17] Musallam, M. and Johnson, C.M. (2010) Real-Time Compact Thermal Models for Health Management of Power Electronics. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **25**, 1416-1425. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2040634>
- [18] 邓二平, 张经纬, 李尧圣, 金锐, 赵志斌, 黄永章. 焊接式 IGBT 模块与压接型 IGBT 器件可靠性差异分析[J]. 半导体技术, 2016, 41(11): 801-810+815.
- [19] 吴耀辉, 杨焦赞, 魏仁灿. IGBT 高频开关电源的故障分析及处理[J]. 电力电子技术, 2009, 43(5): 61-62.
- [20] Patil, N., Celaya, J., Das, D., *et al.* (2009) Precursor Parameter Identification for Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) Prognostics. *IEEE Transactions on Reliability*, **58**, 271-276. <https://doi.org/10.1109/TR.2009.2020134>
- [21] 韩丽, 罗朋, 汤家升, 史丽萍, 张晓蕾. 基于 H 桥逆变器的 IGBT 开路故障诊断[J]. 电工技术学报, 2016, 31(16): 163-171.
- [22] Zhou, L. and Zhou, S. (2010) Effects of Wire-Bond Lift-Off on Gate Circuit of IGBT Power Modules. *14th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Ohrid, 6-8 September 2010, T1-45-T1-47. <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2010.5606581>
- [23] Onuki, J., Koizumi, M. and Suwa, M. (2000) Reliability of Thick Al Wire Bonds in IGBT Modules for Traction Motor Drives. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, **35**, 428-433. <https://doi.org/10.1109/6040.826768>
- [24] Xiong, Y., Cheng, X., Shen, Z.J., *et al.* (2008) Prognostic and Warning System for Power-Electronic Modules in Electric, Hybrid Electric, and Fuel-Cell Vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **55**, 2268-2276. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.918399>
- [25] Zhou, S., Zhou, L. and Sun, P. (2013) Monitoring Potential Defects in an IGBT Module Based on Dynamic Changes of the Gate Current. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **28**, 1479-1487. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2210249>
- [26] Rodríguez-Blanco, M., Claudio-Sánchez, T.D., *et al.* (2011) A Failure-Detection Strategy for IGBT Based on Gate-Voltage Behavior Applied to a Motor Drive System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **58**, 1625-1633. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2098355>
- [27] 谢东, 葛兴来. 基于残差变化率的单相级联 H 桥整流器 IGBT 开路故障诊断[J]. 电工技术学报, 2018, 33(16): 3822-3834.
- [28] Xiang, D., Ran, L., Tavner, P., *et al.* (2012) Condition Monitoring Power Module Solder Fatigue Using Inverter Harmonic Identification. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **27**, 235-247. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2011.2160988>
- [29] Held, M., Jacob, P., Nicoletti, G., *et al.* (1997) Fast Power Cycling Test of IGBT Modules in Traction Application. *International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, Vol. 1, 425-430.
- [30] Norris, K.C. and Landzberg, A.H. (1969) Reliability of Controlled Collapse Interconnections. *IBM Journal of Research & Development*, **13**, 266-271. <https://doi.org/10.1147/rd.133.0266>
- [31] 张亚玲, 李志刚. 基于加速老化试验的 IGBT 寿命预测模型研究[J]. 电气传动, 2016, 46(10): 72-75.
- [32] Lu, Z.J., Huang, W., Lach, J., *et al.* (2002) Interconnect Lifetime Prediction under Dynamics Stress for Reliability. *Microelectronics*, **42**, 653-667.
- [33] 赖伟, 陈民铀, 冉立, 王学梅, 徐盛友. 老化实验条件下的 IGBT 寿命预测模型[J]. 电工技术学报, 2016, 31(24): 173-180.
- [34] Snook, I., Marshall, J.M. and Newman, R.M. (2003) Physics of Failure as an Integrated Part of Design for Reliability. *Annual Reliability and Maintainability Symposium*, Tampa, 27-30 January 2003, 46-54.
- [35] Kilinski, T.J., Lesniak, J.R. and Sandor, B.I. (1991) Modern Approaches to Fatigue Life Prediction of SMT Solder Joints. In: Lau, J.H., Ed., *Solder Joint Reliability: Theory and Applications*, Springer, Berlin, Chapter 13, 384-405. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3910-0\\_13](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3910-0_13)
- [36] Lu, H., Bailey, C. and Yin, C. (2009) Design for Reliability of Power Electronics Modules. *Microelectronics Reliability*, **49**, 1250-1255. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2009.07.055>
- [37] Pan, T.Y. (1994) Critical Accumulated Strain Energy (Case) Failure Criterion for Thermal Cycling Fatigue of Solder Joints. *Journal of Electronic Packaging*, **116**, 163-170. <https://doi.org/10.1115/1.2905681>
- [38] Stolkarts, V., Moran, B. and Keer, L.M. (1998) Constitutive and Damage Model for Solders. *Electronic Components & Technology Conference*, Seattle, 25-28 May 1998, 379-385.
- [39] Yang, S., Xiang, D., Bryant, A., *et al.* (2010) Condition Monitoring for Device Reliability in Power Electronic Converters: A Review. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **25**, 2734-2752.



---

<https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2049377>

- [40] 鲁光祝, 向大为. IGBT 功率模块状态监测技术综述[J]. 电力电子, 2011(2): 5-10.
- [41] Lehmann, J., Netzel, M., Herzer, R. and Pawel, S. (2003) Method for Electrical Detection of Bond Wirelift-Off for Power Semiconductor. *IEEE 15th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs*, Cambridge, 14-17 April 2003, 333-336.
- [42] Farokhzad, B. (2000) Method for Early Failure Recognition in Power Semiconductor Modules. US, US 6145107 A.
- [43] Patil, N., Das, D., Goebel, K., *et al.* (2008) Identification of Failure Precursor Parameters for Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs). *International Conference on Prognostics and Health Management*, Denver, 6-9 October 2008, 1-5. <https://doi.org/10.1109/PHM.2008.4711417>
- [44] Xiong, Y., Cheng, X., Shen, Z.J., *et al.* (2006) A Prognostic and Warning System for Power Electronic Modules in Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles. *Industry Applications Conference, IAS Meeting*, 8-12 October 2006, 1578-1584. <https://doi.org/10.1109/IAS.2006.256739>
- [45] 苏玉淋. 功率电源中 IGBT 失效机理及其检测方法的研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2008.
- [46] 刘宾礼, 肖飞, 罗毅飞, 汪波, 熊又星. 基于集电极漏电流的 IGBT 健康状态监测方法研究[J]. 电工技术学报, 2017, 32(16): 183-193.
- [47] 李亚萍, 周维维, 孙鹏菊, 彭英舟, 蔡杰. 基于特定集电极电流下饱和和压降的 IGBT 模块老化失效状态监测方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(14): 3202-3212.
- [48] Xiang, D., Ran, L., Tavner, P., *et al.* (2011) Monitoring Solder Fatigue in a Power Module Using the Rise of Case-above-Ambient Temperature. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **47**, 2578-2591. <https://doi.org/10.1109/TIA.2011.2168556>