

基于加速老化试验 IGBT 性能退化特征参量的可靠性评估

曾 东, 孙 林, 周 维, 李 小 刚, 孙 鹏 菊

( 输 配 电 装 备 及 系 统 安 全 与 新 技 术 国 家 重 点 实 验 室 , 重 庆 大 学 , 重 庆 400044 )

**摘要:** IGBT 模块广泛应用于功率变流装置中,是变流装置中最为核心的器件之一,也是变流装置中最易失效的器件之一,对 IGBT 模块进行可靠性评估对提高变流装置的可靠性具有重要意义。本文提出一种基于 IGBT 模块性能退化特征参量的可靠性评估方法,该方法利用能够直接反映模块健康状态的特征参量进行可靠性评估,不需要考虑运行条件和运行环境的影响,可以解决在较少失效时间数据或没有失效时间数据时传统可靠性评估方法受限的问题。本文首先介绍了该评估方法的原理和思路;其次,对 IGBT 模块失效机理和特性进行分析,选取饱和压降作为性能退化特征参量;再次,对 IGBT 模块进行加速老化试验快速获取特征参量的变化情况;最后,利用退化数据对 IGBT 模块的可靠性进行评估。

**关键词:** 性能退化特征参量; IGBT 模块; 加速老化试验; 可靠性评估; 饱和压降

**DOI:** 10. 12067/ATEEE1904053      **文章编号:** 1003-3076(2019)07-0020-09      **中图分类号:** TN323+. 4

1 引言

在风力发电系统中,电能必须经过功率变流装置处理后才能并入电网<sup>[1,2]</sup>。功率变流装置作为机组与电网连接之间的桥梁,其可靠性直接关系到整个电网系统的安全运行,变流装置的可靠性评估对整个风电系统的稳定运行和检修维护有着重要的意义<sup>[3-7]</sup>。文献[8]对风电系统的故障进行统计,发现很大一部分故障是由功率变流装置的故障引起的。文献[9]统计了功率变流装置中各部件的失效比重,发现功率器件是变流装置中失效率最高的部件之一。对 IGBT 进行可靠性评估对风电系统的稳定运行具有重要意义。

目前,现有的 IGBT 模块可靠性评估方法多是采用传统可靠性理论进行的,主要以统计 IGBT 模块的失效时间作为可靠性评估的数据。一方面,利用大量时间成本对实际运行过程中变流装置的 IGBT 模块失效时间进行统计,然后根据概率统计判断准则,选取合适的概率统计分布模型对失效数据进行拟合得到 IGBT 模块的可靠性结构模型和寿命分布模型,从而获得模块的可靠性信息。另一方面,

由于 IGBT 模块在实际运行过程中寿命周期较长,通过加速老化试验建立 IGBT 模块寿命与应力之间的关系模型,然后使用外推方法对工作于正常应力下的模块进行可靠性分析。文献[10]利用收集的大量失效时间数据直接进行可靠性评估,得到了较为准确的评估结果。文献[11,12]利用可靠性评估手册对风电变流装置中功率模块进行了可靠性评估,结果表明对于运行于复杂环境下的 IGBT 模块,评估结果存在较大误差。文献[5,13-17]以结温波动作为影响 IGBT 模块寿命的关键应力,通过获取模块正常运行时的结温曲线,采用雨流算法将结温曲线拆分为恒定的结温波动,利用寿命模型或者可靠性评估手册获取结温波动与寿命的对应关系,以此进行可靠性评估。

在我国,风电系统建设起步较晚,机组运行时间有限,可靠性数据积累不够,利用失效时间数据进行可靠性评估方法受限。此外,IGBT 模块实际运行环境复杂多变,多种影响模块寿命的因素相互作用,很难用一种或几种应力准确描述 IGBT 模块实际失效情况,利用应力与寿命的对应关系对实际运行中的 IGBT 模块进行评估误差较大。为此,本文提出一种

**收稿日期:** 2019-04-19  
**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(51137006)、国家自然科学基金面上项目(51577020)  
**作者简介:** 曾 东(1992-),男,四川籍,硕士研究生,研究方向为电力电子器件可靠性;  
孙鹏菊(1982-),女,河南籍,教授,博士,研究方向为电力电子器件可靠性(通讯作者)。

基于 IGBT 模块性能退化特征参量的可靠性评估方法,该方法利用 IGBT 模块退化量的统计模型推断模块的失效模型。由于性能退化特征参量能够直接反映 IGBT 模块的健康状态,不需要考虑外部环境和运行工况对模块寿命的影响,并且该方法利用 IGBT 模块失效前的退化数据进行评估,可以解决失效时间数据缺失导致传统可靠性评估方法使用受限的问题。由于实际过程中 IGBT 模块性能退化数据缺失,本文主要利用加速老化试验数据进行分析。

## 2 基于性能退化特征参量的可靠性评估原理

基于性能退化特征参量的可靠性评估方法的主要思想是利用退化量的统计模型去推断产品的退化失效模型,如图 1 所示。为了对产品的退化规律进行描述,通常假设在退化过程,退化量的统计模型的分布类型保持不变,只是分布参数随时间发生变化。因此,在某一时刻确定了产品的退化量统计模型的分布形式,通过测得的退化数据确定分布中的参数的变化规律,可以得到在任意时刻退化量统计模型的分布形式,结合相应的退化量失效阈值就可以得到产品的失效模型。

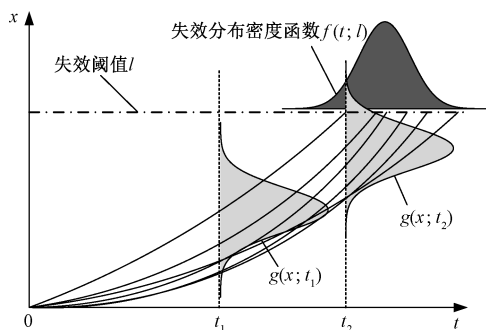


图 1 寿命分布与退化量分布的关系

Fig. 1 Relation between life distribution and degradation distribution

在产品的退化过程中,受结构、材料等诸多随机因素的影响,退化过程通常可以用随机过程来表示。考虑一维随机过程,退化量的一维分布函数可表示为:

$$G(x;t) = P\{x(t) \leq x\} \quad (1)$$

假设其概率密度函数  $g(x;t)$  存在,可表示为

$$g(x;t) = \frac{\partial G(x;t)}{\partial x} \quad (2)$$

记在  $t$  时刻产品的退化量为  $x(t)$ ,根据产品退

化失效定义可知,产品的寿命为退化特征参量首次到达设定失效阈值  $l$  的时间,可以表示为:

$$T(l) = \inf\{t \mid x(t) = l; t \geq 0\} \quad (3)$$

产品的失效模型可进一步表示为:

$$\begin{aligned} F(t;l) &= P\{t \geq T(l)\} = P\{x(t) \geq l\} \\ &= 1 - G(l,t) = 1 - \int_{-\infty}^l g(x,t) dx \end{aligned} \quad (4)$$

这样就利用产品退化量统计模型得到了产品的失效模型,进而可以获得产品的可靠性评估指标。

综合以上分析可知,研究基于退化量的可靠性评估主要分为两个方面的内容:①选取合适的退化模型来描述产品的退化规律,利用获得的退化数据进行统计推断确定产品的退化量统计模型;②将退化量统计模型转换为产品的退化失效模型。其具体的分析步骤如下:

(1)对产品的失效机理和失效特性进行分析,选取合适的性能退化特征参量,并且确定相应的失效标准。

(2)收集产品失效过程中的性能退化数据。

(3)根据收集到的退化数据结合产品的失效机理建立退化量统计模型,从而确定产品的退化失效模型,该统计模型的准确程度直接影响可靠性评估最终结果的准确性。

(4)对退化失效模型的未知参数进行估计,得到产品的可靠性评估结果。

## 3 性能退化特征参量的选取

目前,市面上常见 IGBT 模块的封装形式主要分为普通塑封和压接式封装。普通塑封 IGBT 模块封装工艺简单,成本低,广泛应用于变流装置中,模块结构剖面和内部材料热膨胀系数如图 2 所示,主要由键合线、硅芯片、焊料层、铜板、陶瓷等多层材料构成,模块内部的芯片与芯片和芯片与铜基板之间的电气连接主要依靠铝键合线实现。

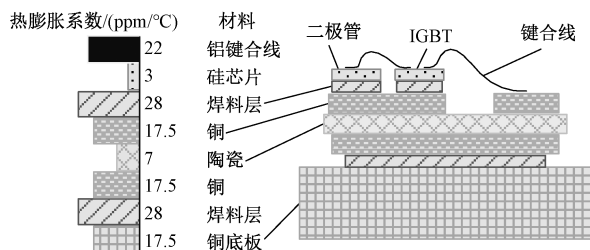


图 2 IGBT 模块内部封装结构以及材料热膨胀系数

Fig. 2 Internal packaging structure of IGBT module and CTEs of materials

IGBT 模块内部的电气连接关系可以用图 3 所示的等效电路来表示。图 3 中,  $R_G$ 、 $L_G$  为门极寄生电阻和电感;  $R_e$ 、 $L_e$  为辅助发射极寄生电阻和电感;  $R_E$ 、 $L_E$  为发射极寄生电阻和电感;  $R_w$  和  $L_w$  为芯片发射极与铜板之间的等效电阻和电感。研究表明, 普通塑封 IGBT 模块的封装疲劳失效可以分为键合线失效、焊料层疲劳和金属化重构等<sup>[18]</sup>, 其表现形式多为模块热阻增加和模块键合线等效电阻的变化所导致的模块端口电气特征参数的偏移, 因此可以通过监测模块热阻和端口电气特征参数的变化情况来反映 IGBT 模块健康状态。

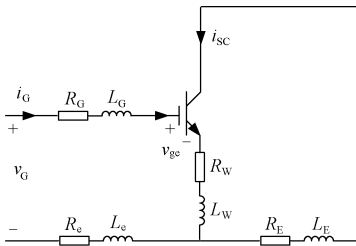


图 3 IGBT 模块等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit of IGBT module

IGBT 模块特征参量众多, 但大多受温度等耦合因素的影响, 难以准确判断 IGBT 模块的健康状态, 现有 IGBT 模块失效的特征参量可以分为以下几类: 稳态热阻; 开通时间和关断时间; 门极信号<sup>[19]</sup>; 短路电流; 集-射极饱和压降。其中, 稳态热阻的测量需要准确获取 IGBT 模块结、壳温度, 而结温的准确测量一直是 IGBT 模块可靠性研究的难题, 并且在实际过程中, 外部环境复杂多变, 模块功率损耗受多种因素的影响, 很难对热阻进行准确测量。IGBT 模块的开通时间、关断时间和门极信号的测量均对测量设备有较高要求, 且受温度等耦合因素影响很大, 在实际过程中很难完成对这些特征参量的提取。文献[20]对短路电流作为特征参量进行了详细分析, 利用 IGBT 模块在不同温度下的传输特性曲线的交点, 排除了温度对短路电流的影响, 能够准确反映 IGBT 模块健康状态。然而, 由于该特征参量的测量需要 IGBT 模块短路运行, 存在安全隐患, 且传输特性曲线交点对应的驱动电压为 9V 左右, 需要专门设计 IGBT 模块的驱动电路, 将该方法运用于实际的变流装置中还需要进一步研究。IGBT 模块在疲劳失效过程中会出现键合线裂纹、脱落及焊料层疲劳的老化情形, 饱和压降的值会随老化程度的不断加深而发生连续的偏移, 以变化 5% 作为其失

效依据, 在 IGBT 模块整个退化过程中有几十~几百毫伏的变化量, 容易监测到饱和压降的变化。此外, 文献[21, 22]对 IGBT 模块的通态特性进行分析, 提出一种采集特定集电极电流下的饱和压降的方法, 可以排除温度的影响, 准确反映模块的健康状态。文献[23]根据 IGBT 模块的去饱和保护电路设计了饱和压降在线测量电路, 为饱和压降作为特征参量监测实际运行中的 IGBT 模块健康状态提供了可能。

综上所述, IGBT 模块集-射极饱和压降具有较好的辨识度, 在特定集电极电流下, 能够排除温度对特征参量的影响, 准确反映出 IGBT 的健康状态。本文选取 IGBT 模块集-射极饱和压降作为可靠性评估的性能退化特征参量。

4 基于加速老化试验的饱和压降采集

准确获取 IGBT 模块退化性能的特征参量是基于性能退化特征参量的可靠性评估方法的首要条件。在变流装置的实际运行过程中, IGBT 模块退化数据缺失导致基于性能退化量的可靠性评估方法难以进行, 本文通过对 IGBT 模块进行加速老化试验来快速获取性能退化特征参量, 用于可靠性评估方法的研究。

4.1 加速老化试验平台设计

综合考虑试验目的及试验成本等因素, 本文搭建一台直流功率循环加速老化试验平台, 平台的主电路及控制部分如图 4 所示。为保证试验效率, 老化平台主电路采用串联形式, 同时对多个 IGBT 模块进行老化试验, 并且为每个被测模块均配置一个旁路模块, 旁路模块在被测模块失效后导通, 保证未失效模块能继续老化。在主电路中, 电感主要用来确保主电路中电流不会发生突变, 从而保证器件的安全。与电感并联的二极管在主电路开关 S 断开时, 与电感构成回路达到消耗电感能量的目的。

老化平台结温控制策略如图 5 所示, 其中  $temp$  表示温度。在加热阶段, 控制模块 S 以脉冲形式导通, 在导通间隙测量老化模块结温, 当老化模块结温上升到设定结温最大值时, 模块 S 停止导通, 平台进入冷却状态, 此时依然对模块结温进行测量, 当结温降低到设定值时, 模块 S 以脉冲形式导通, 平台进入加热状态。该实验将所有被测器件均安装在同一水冷散热器上, 老化期间老化器件的驱动电压不需要额外控制, 只需通过控制开关 S 来控制整个电路的

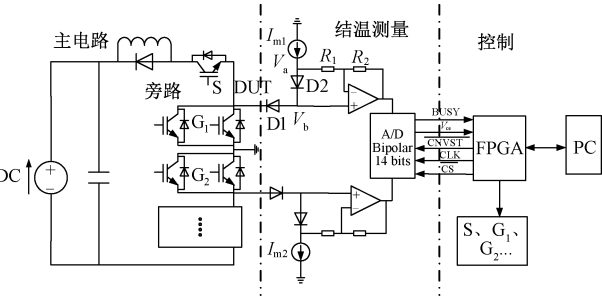


图 4 加速老化平台原理图

Fig. 4 Schematic of accelerated aging platform

电流通状态,使被测器件达到同时升温 and 同时降温的目的。该实验方案控制简单,易于提取老化特征参量,老化速率较高。老化过程中的结温提取采用小电流下的饱和压降法,结温测量电路来源于文献[23]的饱和压降在线提取电路。老化平台的实物如图 6 所示。

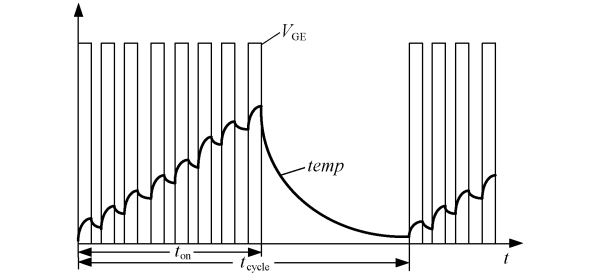


图 5 结温控制策略

Fig. 5 Junction temperature control strategy



图 6 加速老化试验平台

Fig. 6 Accelerated aging test platform

4.2 特定集电极电流测量

IGBT 模块的饱和压降与温度有很强的耦合关系,用饱和压降作为 IGBT 模块健康状态的特征参量需要排除结温的影响。本文利用文献[21,22]中提到的特定集电极电流下 IGBT 模块饱和压降不受温度影响的特性,测量特定电流下的饱和压降作为

可靠性评估的特征参量。因此在老化试验初期需要首先确定 IGBT 模块的特定集电极电流值,为此搭建 IGBT 模块输出特性曲线测量平台,如图 7 所示。测量富士电机公司型号为 2MBI175VA-120-50 的 IGBT 模块在 25℃、60℃、90℃ 和 120℃ 时的输出特性曲线,以此确定模块不同结温下输出特性曲线的交点处电流。试验测量结果如图 8 所示,交点电流汇总结果如表 1 所示。

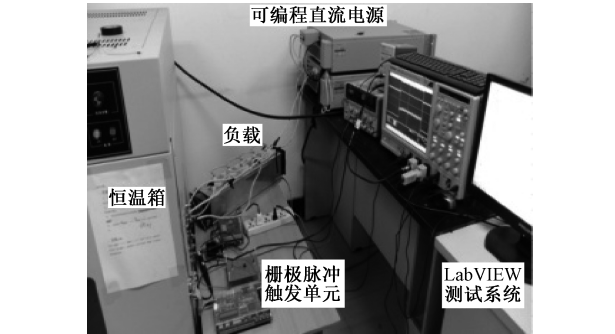


图 7 IGBT 模块输出特性曲线测量平台

Fig. 7 IGBT module output characteristic curve measurement platform

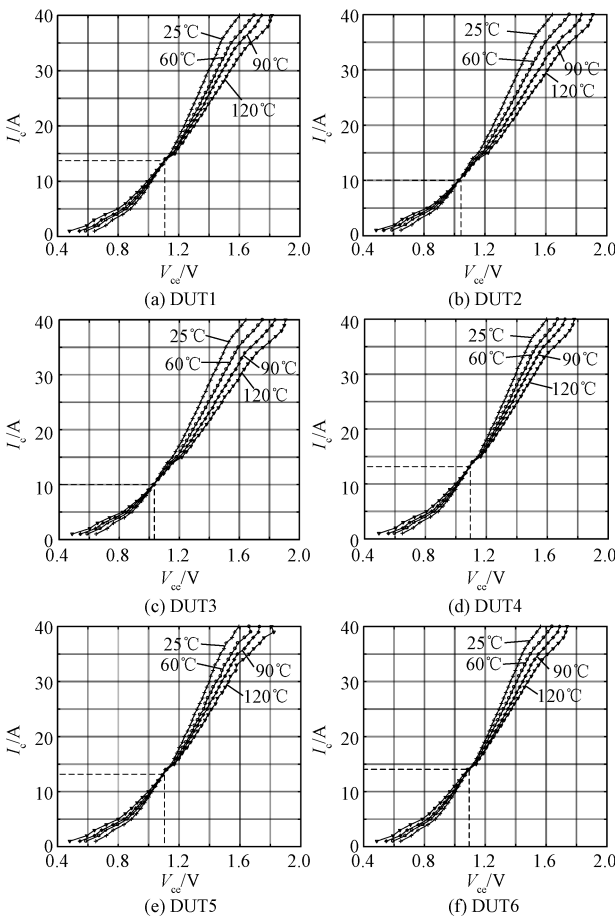


图 8 IGBT 模块的输出特性曲线

Fig. 8 Output characteristic curves of IGBT modules

表 1 IGBT 模块的拐点电流

Tab. 1 Inflexion current of IGBT modules						
IGBT	DUT1	DUT2	DUT3	DUT4	DUT5	DUT6
$I_e/A$	13	10	10	13	13	14
$V_{ce}/V$	1.103	1.032	1.026	1.095	1.082	1.089

4.3 加速老化试验结果

对富士电机公司型号为 2MBI175VA-120-50 的 IGBT 模块进行加速老化试验。在老化过程中,控制最低结温  $T_{jmin}$  为 30℃,最高结温  $T_{jmax}$  为 120℃,加热电流为 68A,循环一个周期的时间约为 25s,其中加热时间约 18s,水冷散热时间约为 7s。特定集电极电流下饱和压降采集时间间隔为 1000 次功率循环,结果如图 9 所示,图 10 为饱和压降的相对变化量曲线,其中  $N_f$  表示功率循环次数。

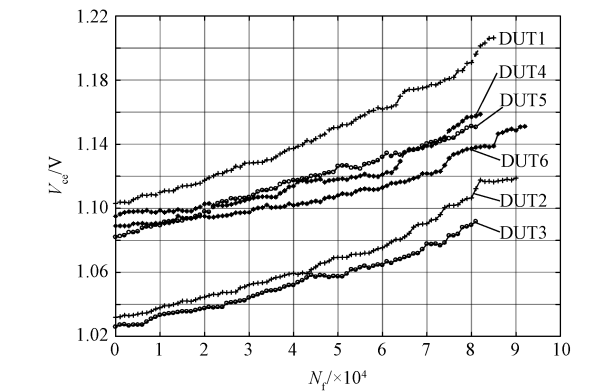


图 9  $V_{ce}$  测量结果

Fig. 9 Measurement result of  $V_{ce}$

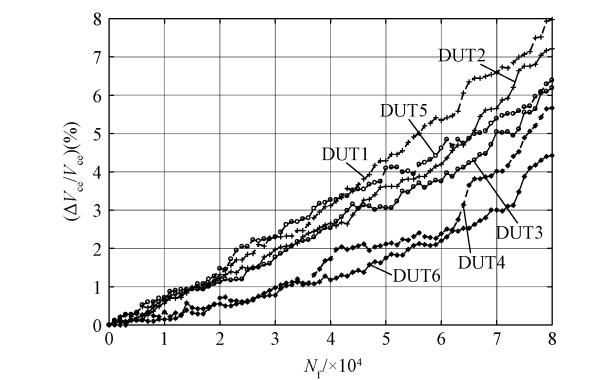


图 10  $V_{ce}$  相对变化量

Fig. 10 Relative change amount of  $V_{ce}$

5 基于 Wiener 过程的 IGBT 可靠性分析

在加速老化试验中,IGBT 模块受外部功率冲击使得内部材料性能和状态发生不可逆的变化,导致 IGBT 模块性能降低。IGBT 老化失效过程可以看作

一个损伤累积过程,在老化试验中的每一次功率冲击导致 IGBT 模块出现微小损伤,损伤的出现通常伴随着器件性能的变化,随着老化试验的进行,损伤逐渐累积,IGBT 模块性能不断退化,当损伤积累到一定程度时,IGBT 模块失效。受 IGBT 模块自身结构、材料和外部冲击应力等诸多随机因素的影响,该过程可以看作是一个随机过程。由第 4 节分析可知,IGBT 模块的健康状态可以用饱和压降的变化量来反映,因此,饱和压降的退化过程可以用随机过程来描述,记为  $\{v(t); t \geq 0\}$ 。IGBT 模块在  $t$  时刻是否失效可以通过判断饱和压降变化量  $v(t)$  与失效阈值  $l$  的关系来确定,IGBT 模块运行到  $t$  时刻失效的概率可以用  $P\{v(t) > l\}$  来表示。根据 IGBT 模块的老化失效定义,IGBT 模块的寿命  $T$  是饱和压降首次到达失效阈值的时间,因此 IGBT 模块的退化失效模型可以通过随机过程  $\{v(t); t \geq 0\}$  首次到达失效阈值  $l$  时的分布给出。在本文中,参考多数文献采用饱和压降变化 5% 作为 IGBT 模块失效标准。

获取退化量的统计模型及其随时间的变化规律是利用该方法进行可靠性评估的基础。Wiener 过程以其良好的分析特性,便于计算等优点,广泛运用于产品性能退化过程的可靠性建模和分析中。将 Wiener 过程的模型参数设为随机变量,能够很好地描述产品因原材料、制作工艺等因素造成的差异性。本文将利用 Wiener 过程描述 IGBT 模块饱和压降的统计模型及其随时间的变化规律,建立基于 Wiener 过程的 IGBT 模块可靠性评估模型。

5.1 Wiener 过程可靠性分析建模

在产品退化过程中,产品受到外部应力冲击导致性能退化,其性能退化特征量会逐渐偏离其初始值,用带漂移的 Wiener 过程来描述产品退化过程,该过程可记为:

$$X(t) = \mu t + \sigma W(t) \tag{5}$$

式中,  $\mu$  为漂移系数;  $\sigma$  为扩散系数。在  $\Delta t$  时间内的增量  $\Delta X(t) \sim N(\mu \Delta t, \sigma^2 \Delta t)$ 。

一般地,对于非线性退化的 Wiener 过程可以通过坐标变换转换为线性的 Wiener 过程来进行分析。记非线性退化的 Wiener 过程为<sup>[24,25]</sup>:

$$v(t) = \Lambda(t) + \sigma W(\Lambda(t)) \tag{6}$$

式中,  $\Lambda(t)$  为产品非线性性能退化量的均值函数;  $\Delta v(t) \sim N(\Lambda(t), \sigma^2 \Lambda(t))$ 。由于产品的性能退化不可逆转且产品最终会退化失效,存在  $t$  的非负单调增函数  $\tau = \Lambda(t)$  使得式(6)可表示为:

$$Y(\tau) = \tau + \sigma W(\tau) \quad (7)$$

式(7)即为式(5)中  $\mu = 1$  时的线性 Wiener 过程。

在 IGBT 模块退化过程中,当性能退化特征参量达到其失效阈值  $l$  即视为 IGBT 模块失效。记  $Z(t) = \sup\{X(i); i \geq 0\}$  为在 Wiener 过程基础上定义的最大过程,则 IGBT 模块在  $t$  时刻不失效的概率可以表示为:

$$P\{t < T\} = P\{Z(t) < l\} = \int_{-\infty}^l g(z, t) dz \quad (8)$$

式中,  $T = \inf\{t | X(t) \geq l, t \geq 0\}$  为 IGBT 饱和压降首次达到阈值的时间;  $g(z, t)$  为  $Z(t)$  的概率密度函数。文献[26]利用 Kolomgorov 前向方程得到了  $g(z, t)$  的解析式:

$$g(z, t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi t}} \left[ e^{-\frac{(z-\mu t)^2}{2\sigma^2 t}} - e^{\frac{2\mu l}{\sigma^2} - \frac{(z-2l-\mu t)^2}{2\sigma^2 t}} \right] \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)中可得:

$$P\{t < T\} = \Phi\left(\frac{l - \mu t}{\sigma\sqrt{t}}\right) - e^{\frac{2\mu l}{\sigma^2}} \Phi\left(\frac{-l - \mu t}{\sigma\sqrt{t}}\right) \quad (10)$$

式中,  $\Phi(x)$  为标准正态分布函数。

IGBT 模块失效寿命  $T$  的概率分布函数和概率密度函数为:

$$F(t) = 1 - P\{T > t\} = \Phi\left(\frac{\mu t - l}{\sigma\sqrt{t}}\right) + e^{\frac{2\mu l}{\sigma^2}} \Phi\left(\frac{-l - \mu t}{\sigma\sqrt{t}}\right) \quad (11)$$

$$f(t) = \frac{d}{dt}F(t) = \frac{l}{\sqrt{2\pi\sigma^2 t^3}} e^{-\frac{(l-\mu t)^2}{2\sigma^2 t}} \quad (12)$$

式中,  $\mu$  和  $\sigma$  为未知参数;  $l$  为设定的失效阈值。

IGBT 模块的可靠度函数  $R(t)$  为:

$$R(t) = P\{T > t\} = \Phi\left(\frac{l - \mu t}{\sigma\sqrt{t}}\right) - e^{\frac{2\mu l}{\sigma^2}} \Phi\left(\frac{-l - \mu t}{\sigma\sqrt{t}}\right) \quad (13)$$

IGBT 模块的期望寿命可表示为:

$$MTBF = E[T] = \int_0^{+\infty} R(t) dt \quad (14)$$

## 5.2 模型未知参数估计方法

记  $V_{ij} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$  表示第  $i$  个 IGBT 模块在第  $j$  次测量时饱和压降退化的百分比值,  $t_j$  表示第  $j$  次测量时间, 则在各测量时刻 IGBT 模块饱和压降变化的均值和方差的估计值可表示为:

$$\hat{\mu}_j = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m V_{ij}, \quad \hat{\sigma}_j^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (V_{ij} - \hat{\mu}_j)^2 \quad (15)$$

Wiener 过程的均值和方差分别为:

$$E[X(t)] = \mu t, \quad Var[X(t)] = \sigma^2 t \quad (16)$$

利用数据  $\{(t_j, \hat{\mu}_j); j=1, 2, \dots, m\}$  和数据  $\{(t_j, \hat{\sigma}_j^2); j=1, 2, \dots, m\}$ , 可以分别求得  $\mu$  和  $\sigma$  的最小二乘估计值  $\hat{\mu}$  和  $\hat{\sigma}^2$  为:

$$\begin{cases} \hat{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^m t_i \hat{\mu}_i - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_i \sum_{i=1}^m \hat{\mu}_i}{\sum_{i=1}^m t_i^2 - \frac{1}{m} \left( \sum_{i=1}^m t_i \right)^2} \\ \hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^m t_i \hat{\sigma}_i^2 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_i \sum_{i=1}^m \hat{\sigma}_i^2}{\sum_{i=1}^m t_i^2 - \frac{1}{m} \left( \sum_{i=1}^m t_i \right)^2} \end{cases} \quad (17)$$

## 5.3 IGBT 可靠性评估结果

利用图 10 中前 40000 次功率循环试验数据来进行评估分析。其中样本数  $m=6$ , 设定失效阈值  $l=5$ , 数据测量时间间隔为 1000 次功率循环。由 IGBT 模块的失效机理可知, IGBT 模块的失效速度会随着老化进程逐渐加快, 文献[25]采取恒定结温波动的控制策略, 通过改变结温摆幅, 进行了多组 IGBT 模块加速老化试验, 结果发现在恒定结温波动的加速老化试验中, IGBT 模块在退化过程中均包括线性退化阶段和指数退化阶段, 且饱和压降的相对变化量在 0~1.3% 区间内线性退化的性质不随应力大小而改变。结合 IGBT 模块的失效机理和本文中加速老化试验控制策略与文献[27]的相似性, 本文利用该退化规律来进行可靠性建模分析, 建立如式(18)所示的退化模型。

$$v(t) = \begin{cases} \mu t + \sigma W(t) & v(t) \leq 1 \\ ae^{bt} + \sigma W(ae^{bt}) & v(t) > 1 \end{cases} \quad (18)$$

式中,  $a, b$  为漂移函数的未知参数;  $\sigma$  为扩散系数。

根据试验数据不难发现, 当功率循环次数为 20000 次时退化量均值  $v(20000) \approx 1$ , 此时模块失效概率极小, 趋近于 0, IGBT 模块进入指数退化规律阶段, 首次到达失效阈值的时间可表示为:

$$T_k = \inf\{t | v(t + 20000) \geq l, v(20000) = 1, t \geq 0\} \quad (19)$$

由 Wiener 过程的独立增量性和齐次马尔可夫性, 式(19)可进一步表示为:

$$\begin{aligned} T_k &= \inf\{t | v(t + 20000) - v(t) \geq l - 1, t \geq 0\} \\ &= \inf\{t | v(t - 20000) \geq l - 1, t \geq 20000\} \end{aligned} \quad (20)$$

令  $\tau = ae^{bt}$ , 不难得到 IGBT 模块的可靠度函数和失效概率密度函数分别为:

$$R(t) = \Phi\left(\frac{(l-1) - ae^{b(t-20000)}}{\sigma\sqrt{ae^{b(t-20000)}}}\right) - e^{\frac{2l}{\sigma^2}}\Phi\left(\frac{-(l-1) - ae^{b(t-20000)}}{\sigma\sqrt{ae^{b(t-20000)}}}\right)$$

$t > 20000$ 

(21)

$$f(t) = \frac{abe^{b(t-20000)}(l-1)}{\sqrt{2\pi\sigma^2}a^3e^{3b(t-20000)}}e^{-\frac{[(l-1)-ae^{b(t-20000)}]^2}{2\sigma^2ae^{b(t-20000)}}}$$

$t > 20000$ 

(22)

式中,  $a$ 、 $b$  和  $\sigma$  为未知参数。

利用最小二乘法对未知参数进行估值, 得到  $\hat{a} = 0.49763$ ,  $\hat{b} = 3.99766 \times 10^{-5}$ ,  $\hat{\sigma}^2 = 0.31007$ , 绘制可靠度函数曲线和概率密度函数图形, 如图 11 和图 12 所示。其中, 可靠度是描述 IGBT 模块在特定运行条件下完成预期功能的概率, 失效概率密度函数描述的是 IGBT 模块在特定时间的失效概率。利用数值积分根据式 (14) 求得 IGBT 模块的期望寿命为 71201 次功率循环。

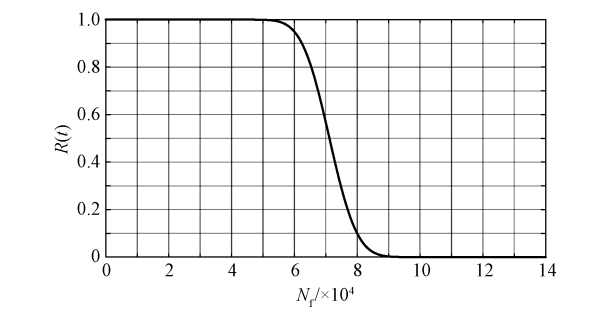


图 11 IGBT 模块可靠度函数曲线

Fig. 11 Reliability function curve of IGBT modules

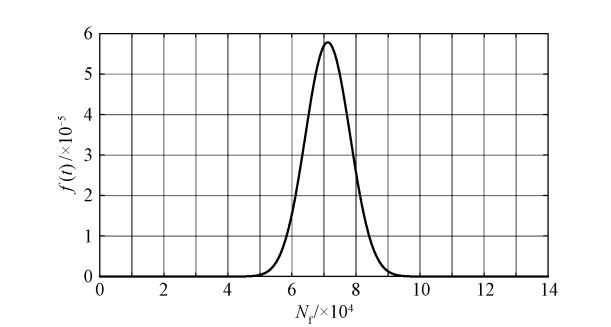


图 12 IGBT 模块失效概率密度曲线

Fig. 12 IGBT module failure probability density curve

5.4 评估结果验证

依据加速老化试验, 可以直接统计出被测 IGBT 模块的失效时间, 如表 2 所示。因此可以采用传统

的可靠性评估方法利用失效数据直接对 IGBT 模块进行可靠性评估。在可靠性工程中, 韦布尔分布被广泛用于描述半导体等机电类产品的疲劳失效, 本文利用韦布尔分布来进行可靠性评估验证。韦布尔分布概率密度函数定义为:

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1}e^{-(t/\alpha)^\beta}$$

(23)

式中,  $\alpha$  为特征失效时间;  $\beta$  为形状参数。

表 2 IGBT 模块累积失效概率

Tab. 2 Cumulative failure probability of IGBT modules

IGBT	DUT1	DUT2	DUT3	DUT4	DUT5	DUT6
循环次数	56000	66000	67000	70000	76000	79000
$F$	0.1039	0.2656	0.4219	0.5781	0.7343	0.8906

韦布尔分布的累积失效分布概率可表示为:

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt = 1 - e^{-(t/\alpha)^\beta}$$

(24)

可靠度函数和期望寿命分别为:

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-(t/\alpha)^\beta}$$

(25)

$$MTBF = \int_0^{+\infty} R(t) dt = \int_0^{+\infty} e^{-(t/\alpha)^\beta} dt$$

(26)

在本文中, 累积失效分布概率  $F$  采用式 (27) 来计算, 得到累积失效分布概率如表 2 所示。

$$F = \frac{i - 0.3}{n + 0.4}$$

(27)

式中,  $i$  为累积失效个数;  $n$  为样本总数。

根据表 2 数据利用最小二乘估值方法可得到  $\alpha$  和  $\beta$  的估计值:  $\hat{\alpha} = 7.2712 \times 10^4$ ,  $\hat{\beta} = 8.5675$ , 代入式 (26) 中可得 IGBT 模块的期望寿命为 68700 次功率循环, 与 Wiener 过程的评估结果大致相同。绘制可靠度函数曲线和概率密度函数曲线并与 Wiener 过程可靠性评估的结果进行对比, 如图 13 所示。可知利用性能退化量的可靠性评估结果与传统的可靠性评估结果大致吻合, 验证了该方法的可行性和准确性。

6 结论

本文针对传统的可靠性评估方法对运行于复杂环境下 IGBT 模块的可靠性评估受限的问题, 提出一种基于性能退化量的可靠性评估方法。该方法利用模块退化过程中的特征参量, 能够在失效时间数据缺失的情况下对 IGBT 模块进行可靠性评估, 并且不需要考虑模块运行条件和运行环境对模块可靠性的影响。本文通过加速老化试验快速获取 IGBT

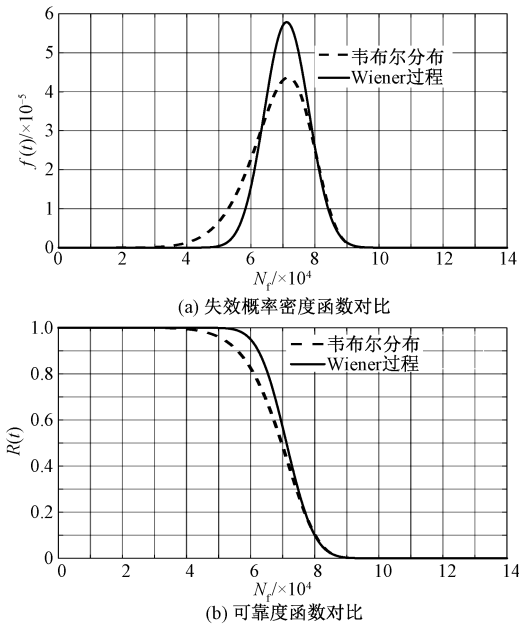


图 13 评估结果对比

Fig. 13 Comparison of assessment results

模块失效数据,并利用该方法进行可靠性评估,将评估结果与传统的基于失效时间数据的可靠评估结果对比,验证了本文所提方法的可行性与准确性。

参考文献 (References) :

[ 1 ] Arai J, Iba K, Funabashi T, et al. Power electronics and its applications to renewable energy in Japan [J]. IEEE Circuits & Systems Magazine, 2008, 8 (3): 52-66.

[ 2 ] Chen Z, Guerrero J M, Blaabjerg F. A review of the state of the art of power electronics for wind turbines [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24 (8): 1859-1875.

[ 3 ] Wei L, Kerkman R J, Lukaszewski R A, et al. Analysis of IGBT power cycling capabilities used in doubly fed induction generator wind power system [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47 (4): 1794-1801.

[ 4 ] Xie K, Jiang Z, Li W. Effect of wind speed on wind turbine power converter reliability [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27 (1): 96-104.

[ 5 ] 杜雄, 李高显, 李腾飞, 等 (Du Xiong, Li Gaoxian, Li Tengfei, et al.). 风电变流器 IGBT 模块的多时间尺度寿命评估 (Multi-time scale lifetime evaluation of IGBT modules in the wind power converter) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2015, 35 (23): 6152-6161.

[ 6 ] Zhou D, Blaabjerg F, Franke T, et al. Comparison of

wind power converter reliability with low-speed and medium-speed permanent-magnet synchronous generators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62 (10): 6575-6584.

[ 7 ] 黄先进, 孙湖 (Huang Xianjin, Sun Hu). 国产高压大功率 IGBT 应用于机车变流器工作特性测试研究 (Home-made high voltage high power IGBT operation characteristics used in traction converter) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (11): 74-81.

[ 8 ] Tavnet P J, Van Bussel G J W, Spinato F. Machine and converter reliabilities in wind turbines [A]. IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives [C]. 2006. 127-130.

[ 9 ] Yang S, Bryant A, Mawby P, et al. An industry-based survey of reliability in power electronic converters [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47 (3): 1441-1451.

[ 10 ] Spinato F, Tavner P J, van Bussel G J W, et al. Reliability of wind turbine subassemblies [J]. IET Renewable Power Generation, 2009, 3 (4): 387-401.

[ 11 ] Chen G, Burgos R, Liang Z, et al. Reliability-oriented design considerations for high-power converter modules [A]. 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference [C]. 2004. 1: 419-425.

[ 12 ] 李辉, 季海婷, 秦星, 等 (Li Hui, Ji Haiting, Qin Xing, et al.). 考虑运行功率变化影响的风电变流器可靠性评估 (Reliability evaluation considering operational active power variation of wind power converter) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2015, 35 (5): 1-8.

[ 13 ] Huang H, Mawby P A. A lifetime estimation technique for voltage source inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28 (8): 4113-4119.

[ 14 ] Fuchs F, Mertens A. Steady state lifetime estimation of the power semiconductors in the rotor side converter of a 2 MW DFIG wind turbine via power cycling capability analysis [A]. European Conference on Power Electronics & Applications [C]. 2011. 1-8.

[ 15 ] Wei L, Kerkman R J, Lukaszewski R A, et al. Analysis of IGBT power cycling capabilities used in doubly fed induction generator wind power system [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47 (4): 1794-1801.

[ 16 ] 王彦刚, Chamund Dinesh, 李世平, 等 (Wang Yangang, Chamund Dinesh, Li Shiping, et al.). 功率 IGBT 模块的寿命预测 (Lifetime prediction of power IGBT module) [J]. 机车电传动 (Electric Drive for Locomo-

- tives), 2013, (2): 13-17, 27.
- [17] 杨珍贵, 杜雄, 孙鹏菊, 等 (Yang Zhengui, Du Xiong, Sun Pengjun, et al.). 风电全功率变流器参数对可靠性的影响分析 (Analysis of effect of the converter parameters on full-rated wind power converters reliability) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2015, 30 (16): 137-145.
- [18] Hua Y, Lin M, Basaran C. Failure modes and FEM analysis of power electronic packaging [J]. Finite Elements in Analysis & Design, 2002, 38 (7): 601-612.
- [19] 孔梅娟, 李志刚, 赵旺旺 (Kong Meijuan, Li Zhigang, Zhao Wangwang). IGBT 键合线脱落故障特征分析 (Analysis of fault characteristics of IGBT bonding wire lift off) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (10): 86-91.
- [20] Sun P, Gong C, Du X, et al. Condition monitoring IGBT module bond wires fatigue using short-circuit current identification [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32 (5): 3777-3786.
- [21] 李亚萍, 周维维, 孙鹏菊, 等 (Li Yaping, Zhou Luo-wei, Sun Pengju, et al.). 基于特定集电极电流下饱和压降的 IGBT 模块老化失效状态监测方法 (Condition monitoring for IGBT module aging failure on  $V_{CE(on)}$  under certain  $I_C$  conditions) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2018, 33 (14): 3202-3212.
- [22] Singh A, Anurag A, Anand S. Evaluation of  $V_{ce}$  at inflection point for monitoring bond wire degradation in discrete packaged IGBTs [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32 (4): 2481-2484.
- [23] Bęczkowski S, Ghimre P, de Vega A R, et al. Online  $V_{ce}$  measurement method for wear-out monitoring of high power IGBT modules [A]. 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE) [C]. 2013. 1-7.
- [24] 金光 (Jin Guang). 基于退化的可靠性技术 (Reliability technology based on degradation) [M]. 北京: 国防工业出版社 (Beijing: National Defence Industry Press), 2014.
- [25] Wang X, Nair V. A class of degradation model based on nonhomogeneous Gaussian process [R]. University of Michigan, 2005.
- [26] Whitmore G A, Schenkelberg F. Modelling accelerated degradation data using Wiener diffusion with a time scale transformation [J]. Lifetime Data Analysis, 1997, 3 (1): 27-45.
- [27] Son-Ha T, Zoubir K, Richard L, et al. Constant  $\Delta T_j$  power cycling strategy in DC-mode for top-metal and bond-wire contacts degradation investigations [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34 (3): 2171-2180.

## Reliability evaluation of IGBT performance degradation characteristic parameters based on accelerated aging test

ZENG Dong, SUN Lin, ZHOU Luo-wei, LI Xiao-gang, SUN Peng-ju

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment and System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** IGBT module is widely used in power converter. It is one of the most core devices in converter and also one of the most vulnerable devices. Reliability assessment of IGBT module is of great significance for the reliable operation of converter. A reliability assessment method based on performance degradation characteristic parameters of IGBT module is proposed in this paper. This method uses the characteristic parameter which can reflect the health status of the module directly to assess, and does not need to consider the influence of operation conditions and the environment, and moreover the reliability can be assessed without time-of-failure data. At first, this paper introduces the principle and idea of the evaluation method. Secondly, the failure mechanism and characteristics of IGBT module are analyzed, and the saturation pressure drop as the characteristic parameter of performance degradation is selected. Thirdly, accelerated aging test is carried out on IGBT module to quickly obtain the change of characteristic parameters. Finally, the reliability of IGBT module is evaluated by degradation data.

**Key words:** performance degradation characteristic parameters; IGBT module; accelerated aging test; reliability assessment; saturation voltage drop