基于小波奇异熵理论的 IGBT 模块键合线 脱落故障特征分析

沈 刚 周維维 杜 雄 杨 旭 徐铭伟 (重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室 重庆 400030)

摘要 针对目前 IGBT 功率模块内部键合线故障需要通过复杂辅助电路才能实现识别、监测的难题,本文提出一种根据 IGBT 模块实时开关波形对键合线故障甚至是并联 IGBT 芯片故障进行评估分析的新方法。从 IGBT 模块结构特性入手,分析得出键合线及并联 IGBT 芯片的故障特性将在模块栅极关断电压的变化上得到体现,然后对未塑封的 IGBT 模块进行了人为的键合线挑断试验得到了预期的分析处理数据。考虑到 IGBT 模块从投运至失效过程中的数据信息量极为巨大,需要对大量数据进行有效压缩并挖掘出其中的有用信息。本文采用小波奇异熵理论对栅极电压信号进行了故障特征提取,并比较了不同故障类型对特征量变化的影响。研究成果为实现 IGBT模块的健康状态评估提供了重要依据。

关键词: IGBT 模块 键合线 栅极电压 小波奇异熵 故障特征量

中图分类号: TN386

Characteristics Analysis of IGBT Module with Bond Wire Lift-off Based on Wavelet Singular Entropy Theory

Shen Gang Zhou Luowei Du Xiong Yang Xu Xu Mingwei (Chongqing University Chongqing 400030 China)

Abstract To deal with the problem that the implementation of recognition and monitoring of bond wire failure inside IGBT module needs complex auxiliary circuit. A new assessment method of bond wire and paralleled IGBT chip failure by use of the real-time switching waveforms of IGBT module is presented in this paper. The work starts from the structural characteristics of IGBT module, and draws the conclusion that both bond wire failure and paralleled IGBT chip failure would change the gate turn-off voltage waveform of IGBT module. The expected data for analyzing and processing are derived through the test of cutting the bond wires of an open sample manually on purpose. Taking into account the data quantity of IGBT module from putting into operation to failure is very large, and it is need to compress the data and excavate the useful information contained in it. Fault feature of gate voltage signal is extracted by use of the wavelet singular entropy theory, and the fault characters of different fault types are compared. The research results provide an important basis for realizing the health assessment of IGBT module.

Keywords: IGBT module, bond wire, gate voltage, wavelet singular entropy, fault characters

1 引言

绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor,IGBT)作为一种复合型器件,具有功率 MOSFET 开关速度快、驱动功率小的特性以及 GTR 高耐压、大电流、低导通压降的特点,是一种适用于大中功率应用的电力电子器件。据国外最新的一项关于电力电子变换器在工业领域中的可靠性调查研究显示[1],功率半导体器件以 31%的故障率成为电力电子变换器中最为脆弱的组成部分,而 IGBT 也已成为在众多功率半导体器件中应用得最为广泛的一种。目前,就如何有效提高功率半导体器件IGBT 的可靠性水平已成为国际上公认的难题。

近年来,国内外学者在 IGBT 模块的故障机理、 可靠性评估及状态监测方面已进行了大量地研究工 作,并取得了丰富的成果[2]。在 IGBT 模块可靠性 研究方面, 键合线故障与焊料层疲劳被认作为其 主要的两种疲劳形式,并制定了相应的失效评估 标准[3,4]。其中在模块键合线部分的研究上,对其故 障机理已研究得比较充分[5],但在故障监测、可靠 性评估方面仍存在不足之处。文献[5]提出在 IGBT 通过小集电极电流的前提下,若其饱和压降升高值 达到初始值的 5%, 即认为键合线连接部位已发生 故障。但实际操作中,一方面, IGBT 开关前后电 压的剧烈变化使得饱和压降的准确测量不易实现, 需通过辅助电路将高压部分进行隔离^[6];另一方面, 该故障判据过于笼统,容易导致误判。文献[7]巧妙 的利用 IGBT 模块外接端子存在两个发射极(主发 射极和辅助发射极),通过模块外接电路实现了对键 合线电阻值的测量。提出将键合线阻值的变化作为 器件可靠性评估的一个指标。但由于键合线的阻值 较小,该方法要求测量电路必须具备足够高的灵敏 度。此外, 近年来随着模块制造工艺的改进, 主、 辅助发射极也并不一定从键合线两端引出, 使得该 方法在通用性方面受到很大的限制。文献[8]通过改 变 IGBT 模块的 DBC 布局,在模块中每个 IGBT 芯 片的辅助射极引出了一条由单根键合线与一个大电 阻串联构成的辅助支路。通过测量该辅助支路另一 端与主射极之间电阻值的变化来判断键合线的故障 情况,一旦电阻值增大就意味着键合线发生了脱落。 此外,文献[9]提出了一种键合线脱落故障的在线监 测方法。通过在发射极处键合线两端并联一个监测 电阻,并建立起键合线的故障程度与该电阻上压降 的函数关系。一旦电阻压降超过规定阈值,监测电 路立即发出警报。文献[8,9]的方法虽然可应用于在 线监测领域,但都需要将监测电路集成到 IGBT 模 块内部,这在技术、成本及可靠性方面都提出了巨 大的挑战。

由于离线式监测手段缺乏实际工程意义,本文针对目前现有的键合线故障监测技术所存在的以上不足点,提出一种简易的监测、评估方法。事实上,伴随着 IGBT 模块的疲劳失效过程,其由键合线的脱落或由并联 IGBT 芯片的故障而导致的模块内部电路结构的变化将引起模块外部动态波形的变化。鉴于此,本文首先对 IGBT 模块的结构特性进行了介绍,并对模块键合线故障及并联 IGBT 芯片故障对栅极电压的影响进行了分析。通过在实验室中将未塑封的 IGBT 模块进行人为的键合线挑断试验,对栅极电压的变化影响进行了实际测试。最后借助小波奇异熵理论通过对栅极电压信号的分解,提取出了不同状态类型时的特征信息,为对键合线脱落故障及模块内部并联 IGBT 芯片故障的识别提供了评估依据。

2 IGBT 模块结构特性

实际应用中为满足大电流的需求,常在 IGBT 模块内部将同一型号的 IGBT 进行并联连接。数个功率半导体芯片(IGBT 芯片与二极管芯片)被集成到同一块底板上。芯片的底面被焊接在同一块绝缘基片(即 DBC 层)的金属化表面上。该绝缘基片主要起到实现芯片与模块底板之间的电气绝缘,同时保证良好的导热性能的作用。芯片的上表面被金属化,其电气连接通过高纯度的铝制键合线实现。当考虑键合线以及实现端子引出的导电铜条时的模块连接结构,如图 1 所示。

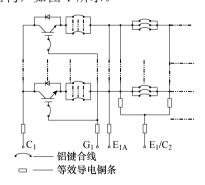


图 1 IGBT 模块内部连接结构图

Fig.1 Internal connection structure of IGBT module 由于 IGBT 工作在高频开关状态下,持续的通态损耗和开关损耗将导致 IGBT 经受巨大的热冲

击,芯片结温的剧烈波动将对 IGBT 的可靠性产生 重大影响。在铝键合线与芯片的交接处,由于温度 的剧烈波动及各自材料本身热膨胀系数(CTE)的 不同将产生大小与温度相关的应力应变。伴随 IGBT 老化过程的进行, 在两者交接处的边缘部分将首先 产生裂纹并逐步向中心部分延伸, 最终导致键合线 的完全脱落^[10,11]。此外,由于 IGBT 模块各层材料 间 CTE 的差异, 也将引起焊料层的疲劳, 导致模块内 部热阻增加,对芯片的散热产生不利影响[12]。IGBT 模块常用封装形式的结构组成及各层材料的 CTE 值如图 2 所示。而图中的键合线连接部分,在 IGBT 模块内部采用的是由数根高纯度铝制细线并联的形 式来实现的。在实际运行中, 当某根键合线由于上 述原因出现脱落故障后,会导致流过余下每根键合 线的平均电流值增大,从而会加速剩余键合线故障 的发生, 最终导致与该处键合线连接的 IGBT 芯片 脱离工作。

线性热膨胀系数 (CTE)

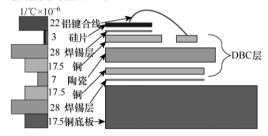


图 2 IGBT 模块封装结构及材料 CTE

Fig.2 Packaging structure and material CTE of IGBT module

3 IGBT 模块键合线故障影响分析

理论上,可将 IGBT 理解为由 MOSFET 驱动的 厚基区 GTR。此外,考虑到 MOSFET 极间寄生电容以及栅极回路键合线电阻存在的影响,其栅极等效电路可表示为图 3 的形式^[13]。

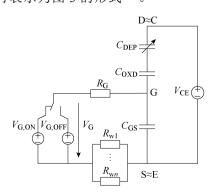


图 3 IGBT 栅极等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of IGBT gate

图中, $V_{\rm G}$ 为栅极驱动电源电压,高电平时即为 $V_{\rm G,ON}$ 、低电平时即为 $-V_{\rm G,OFF}$; $R_{\rm G}$ 为栅极回路除键合线电阻外的等效电阻; $R_{\rm wi}(i=1,\ 2,\ \cdots,\ n)$ 为单根键合线等效电阻,并记总并联等效电阻为 $R_{\rm w}$; $V_{\rm CE}$ 为 $I_{\rm GBT}$ 集-射极电压; $C_{\rm OXD}$ 为栅-漏极交叠氧化电容, $C_{\rm DEP}$ 为 $I_{\rm GBT}$ 册-漏极间电容 $I_{\rm GBT}$ 册-源极间电容。 在 $I_{\rm GBT}$ 册-漏极间电容中, $I_{\rm GS}$ 为册-源极间电容。 在 $I_{\rm GBT}$ 的极间电容中, $I_{\rm GS}$ 为一次因为固定值。 而根据 $I_{\rm GR}$ 和 $I_{\rm GBT}$ 的理模型 $I_{\rm GEP}$ 将随耗尽层宽度以及外加母线电压的大小而变化,而 $I_{\rm GBT}$ 则存在以下近似关系式:

$$C_{\text{GD}} = \begin{cases} C_{\text{OXD}} & V_{\text{CE}} \leq V_{\text{GE}} \\ \\ C_{\text{OXD}} C_{\text{DEP}} (C_{\text{OXD}} + C_{\text{DEP}})^{-1} & V_{\text{CE}} > V_{\text{GE}} \end{cases}$$

$$C_{\text{DEP}} & V_{\text{CE}} \square V_{\text{GE}}$$

IGBT 在导通和关断时,其栅极电压的变化将是两个类似的相反过程,同时考虑到后续研究的需要,下面仅以 IGBT 关断阶段为例进行分析。在带阻感负载的 Buck 电路且在负载两端并联二极管以续流时,开关器件 IGBT 典型的关断阶段特性如图4 所示。

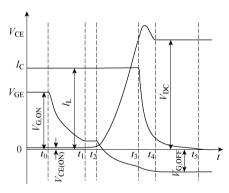


图 4 IGBT 关断波形

Fig.4 Turn-off waveform of IGBT

图 4 中,在 t_0 时刻以前 IGBT 处于导通状态,从 t_0 时刻起对其施加低电平进行关断。IGBT 在关断过程中,其栅极电压各阶段特性分析如下:

阶段 1 $(t_0 \sim t_1)$: 在 t_0 时刻,IGBT 栅极开始通过回路等效电阻 R_T 放电, R_T 由 R_G 与 R_w 串联构成。由式(1)可得,该阶段 $C_{GD} = C_{OXD}$ 。栅-射极电压满足^[15]

$$V_{\text{GE}} = V_{\text{G,off}} + (V_{\text{G,on}} - V_{\text{G,off}}) e^{-(t-t_0)\tau_0^{-1}}$$
 (2)

式中, $\tau_0 = R_T(C_{OXD} + C_{GS})$ 。

阶段 $2(t_1 \sim t_2)$: 在 t_1 时刻,栅-漏极耗尽层开始形成。该阶段会出现所谓的密勒效应^[16]: $C_{\rm GD}$ 将吸收所有的栅极电流, $C_{\rm GS}$ 将不会有电流流过。因此, $V_{\rm GE}$ 的变化量几乎为零。

阶段 3 $(t_2 \sim t_3)$: 由于该阶段 C_{GD} 将随 V_{CE} 的不断增大而时刻发生变化, V_{GE} 将以不固定的指数规律下降。

阶段 4 $(t_3 \sim t_4)$: 该阶段由于线路寄生电感的存在, V_{CE} 将出现短暂的超调电压。栅-射极电压存在以下关系式:

$$V_{\text{GE}}(t) = V_{\text{G,off}} + [V_{\text{GE}}(t_3) - V_{\text{G,off}}] e^{-(t - t_3)\tau_3^{-1}}$$
 (3)

式中, $\tau_3=R_T(C_{DEP}+C_{GS})$ 。 由于此时 C_{DEP} 远小于 C_{GS} ,所以 $\tau_3\approx R_TC_{GS}$ 。

阶段 5 ($t_4 \sim t_5$): 在 t_4 时刻, V_{CE} 和 V_{GE} 都已达到稳态值,而集电极电流 I_C 将出现一段拖尾电流。栅-射极电压将继续按式(3)规律变化。

由于 IGBT 栅极电压开关特性不同于集电极电流与集-射极电压,并不会受到负载变化的影响,具有相对独立稳定的特点。从而使得通过对栅极电压的监测来实现 IGBT 的故障识别具备了较好的先决条件。由前面部分的分析可见,伴随者 IGBT 极间电容的放电过程,其栅极电压变化将呈现出不同的阶段特性。模块键合线故障及并联 IGBT 芯片故障均会在此阶段特性的变化上得到体现。

(1)在 IGBT 模块内部当出现键合线故障时所引起的 R_w 的增大,将导致栅极回路等效电阻 R_T 的增大。同时,由于栅极回路等效电容的最大值部分将出现在关断过程中的 $t_0 \sim t_1$ 阶段。根据式(2)可推得,由键合线故障所引发的变化影响将在该阶段表现得最为显著,且较未发生故障时相比栅极电压的下降速度将减缓,即波形向右上角方向发生偏移。而在关断过程的其他时间段,由于耗散电容 C_{DEP} 的变化影响,栅极回路等效电容值在数值上远小于 $t_0 \sim t_1$ 阶段的,因而键合线故障所引发的变化影响并不明显。

(2)当 IGBT 模块内部采用多 IGBT 芯片并联运行的连接方式时,此时模块的栅极回路等效电容由其各并联 IGBT 栅极回路等效电容并联构成,因而当 IGBT 模块由于超出安全工作区(SOA)运行、过热以及老化等因素而造成部分并联芯片故障时,其栅极回路等效电容将出现减小的变化趋势,进而必然会对模块关断时的栅极电压阶段特性产生影响。又由于 IGBT 芯片栅极回路等效电容与其射极

键合线电阻在数量级上的差异:一方面,将使得模块栅极关断电压在整个下降阶段表现出明显的加速下降趋势,且与各并联 IGBT 均运行时的情形相比变化显著,即波形向左下角方向发生明显的偏移;另一方面,当发生某个并联 IGBT 芯片脱离运行时也将使得此后键合线故障对栅极电压变化的影响不再明显。

4 实验测试

实验中通过对未塑封(即未灌注硅胶及封盖)的 IGBT 模块进行人为的键合线挑断以模拟 IGBT 模块因恶劣工况或正常老化而导致的键合线脱落故障;通过对 IGBT 芯片发射极处键合线的全部挑断而导致的芯片脱离运行以模拟各种原因导致的芯片故障。

针对富士型号为 2MBI150U4H-170 的两单元 IGBT 功率模块进行了研究,并搭建了如图 5 的开关特性测试电路。图中,直流电压源 $U_{\rm dc}$ =300V, $V_{\rm GI}$ =-5V;驱动电压 $V_{\rm G2}$ 的高电平为 14.5V,低电平为-8V,频率为 10kHz,占空比 D=30%;负载电阻 R=50 Ω ,电感 L=3mH;外加栅极电阻 $R_{\rm g}$ =10 Ω 。

试验用 IGBT 模块 2MBI150U4H-170 的内部结构如图 6 所示,其等效电路由对应图 5 中单元 S_1 与单元 S_2 两部分串联构成,而在模块内部单元 S_1 与单元 S_2 双分别由两块并联的 IGBT 芯片构成。实验中将单元 S_1 的反并联二极管用作负载续流,对单元 S_2 做键合线挑断处理以模拟键合线的脱落故障。构成单元 S_2 的两个 IGBT 芯片的发射极处分别连接有 6 根铝制键合线,实验首先对其中一块芯片的键合线依次进行挑断,然后再对另一块芯片进行类似的处理,直至单芯片与 4 根键合线运行的情形为止。由于 IGBT 栅极电压高、低电平转换时间为微秒级,为有效获取其关断波形信号,示波器选用泰克 TDS

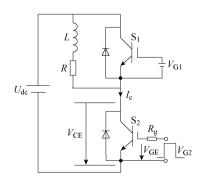


图 5 IGBT 模块开关特性测试电路

Fig.5 IGBT switching characteristic measurement circuit

5104B (带宽为 1GHz、最高采样率为 5GS/s、存储容量为 16MB)。实验时数据采集采用单次、下降沿触发方式,采样率设置为 1.25 GS/s,采样窗长为 10μ s。分别记录下单元 S_2 关断时的栅极电压波形,其中下降阶段部分如图 7 所示。



图 6 2MBI150U4H-170 内部结构图

Fig.6 Internal structure of 2MBI150U4H-170

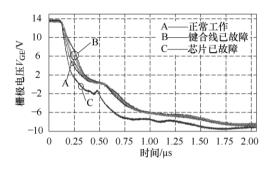


图 7 单元 S₂ 关断时栅极电压波形

Fig.7 Turn-off gate voltage waveforms of unit S₂

图 7 中,A 组对应未发生键合线断裂的正常工作情况。B 组对应键合线挑断 1~5 根的情况,此时两块 IGBT 芯片仍同时运行,较未发生故障时的 A 组相比其栅极电压波形在下降的第一阶段向右上角发生了偏移,即下降速度减缓。C 组对应键合线挑断 6~8 根的情况,此时两块并联 IGBT 芯片中的一块因其射极处 6 根键合线的完全挑断已不再有电流通过,即该芯片已不再工作,此时较未发生故障时的 A 组相比其栅极电压波形向左下角发生偏移,即下降速度加快,且相互之间差异并不明显。

值得注意的是,实际中出于安全考虑,在 IGBT 模块内部一旦出现键合线的断裂就应当对其进行及时的更换。所以键合线断裂的具体根数而引起对栅极电压不同的变化影响并不是重点。事实上,由于栅极回路各种寄生参数的存在,图 7 中的 B 组波形随着键合线断裂根数的增加也并不存在单一的变化规律。

最后为实现 IGBT 模块键合线故障及并联芯片故障的在线监测,需要对各种故障类型进行有效地分类识别。而 IGBT 模块工作在高频开关状态下,开关周期一般从几十到上百微秒不等。当 IGBT 模

块在长时间连续运行时,由于对故障出现时刻的不可预测性,使得若对产生的大量数据仅采取人工识别的方式将显得极为不现实。因此,如何对大量的栅极电压信号进行有效的故障特征提取,将直接关系到故障识别的准确性和可靠性。下面将采用小波理论与熵理论相结合而成的信息处理技术——小波奇异熵理论对栅极电压进行特征信息的提取分析。

5 基于小波奇异熵的故障信号分析

5.1 小波奇异熵(WSE)原理介绍

小波变换是一种局部化时频分析方法,适用于 突变信号和非平稳信号的分析与检测。十几年来, 在机械振动、电力、通信等领域的故障信号研究方 面得到了广泛的应用与发展^[17,18]。

设任意时域信号 $f(t) \in L^2(R)$,则它的连续小波变换为

$$W_f(a,b) = \langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \qquad (4)$$

式中,符号*表示取共轭。

由基本小波 $\psi(t)$ 伸缩、平移后所得函数系

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left(\frac{t - b}{a} \right) \tag{5}$$

式中,a为伸缩因子,a>0; $b\in \mathbb{R}$ 为平移因子。

通过对 a、b 的变化,利用小波窗沿时间轴的移动,实现在不同尺度上对整个时间轴上的函数信号进行分析。在实际应用中,为方便使用计算机进行分析处理,信号 f(t)都要处理为离散时间序列。a、b也必须进行离散化处理,使之转换为离散小波变换。

在奇异值分解理论(SVD)中,对任何 $m \times n$ 阶矩阵 M (假定 m > n),其秩为 $r(r \le n)$ 。则矩阵 M 存在以下的分解关系式:

$$\mathbf{M} = \mathbf{U} \Lambda \mathbf{V}^{\mathrm{T}} = \sum_{i=1}^{r} \lambda_{i} \mathbf{A}_{i}$$
 (6)

式中,U和V分别为 $m \times m$ 阶和 $n \times n$ 阶正交矩阵; $\mathbf{\Lambda} = \begin{pmatrix} \Sigma & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad \sum = \operatorname{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \cdots, \lambda_r)$ 为对角矩阵,其对角元素 λ_i $(i=1,2,\cdots,r)$ 非负且按降序排列,称为

由式 (6) 最后一项可见,SVD 可将任意秩为 r 的 $m \times n$ 阶矩阵 M 分解为 r 个秩为 1 的同阶矩阵之和,即把矩阵 M 分解成多个相互正交的子空间,从而将矩阵包含的信息分解到不同的子矩阵中。

矩阵 M 的奇异值; A_i 为 $m \times n$ 阶矩阵。

信息熵理论是关于系统不确定性及不规则程度的描述。将奇异值特征量经信息熵处理过后,分析

数据在分布趋势上的特征得到了定量表示,实现了 对故障信息特征的进一步挖掘。

定义 n 阶小波奇异熵为

$$WSE(n) = \sum_{i=1}^{n} \Delta p_i \tag{7}$$

式中, Δp_i 为第 i个非零奇异值 λ_i 的增量小波奇异熵,并定义

$$\Delta p_{i} = -\left(\lambda_{i} / \sum_{j=1}^{n} \lambda_{j}\right) \ln\left(\lambda_{i} / \sum_{j=1}^{n} \lambda_{j}\right)$$
 (8)

5.2 数据分析结果

通过第 4 节的实验测试共采集到 IGBT 模块的 1组正常信号和8组故障信号,每组信号均由12500 个数据点构成。针对9组原始信号的变化特点,经 反复对比分析发现, 当选择具有紧支性的 Daubechies 小波系中消失矩为 4 的 db4 小波基时, 正常信号同故障信号的差异性得到了很好的体现。 在不超出采集信号最大允许分解层数的前提下[19], 对原始信号进行6个尺度的离散小波分解后发现, 各类信号在尺度 1~尺度 3 上的细节部分差异并不 明显,该部分主要由高频噪声构成。而在尺度 6 的低 频部分和尺度 4~尺度 6 的高频部分, 各组信号的差 异更为显著, 故可利用此四个频带上的信号分量构 成奇异值分解矩阵 M。但考虑到算法的简化、方法 的通用性以及小波熵理论分析本身就具有很好的抗 噪性能[18],这里将前述七个频带的信号分量直接构 成矩阵 M,然后再对其进行奇异值分解,进而通过 信息熵理论对奇异值特征向量的统计性分析,实现 了对系统信息的不确定性及复杂度的有效描述。最 终经小波奇异熵处理后的数据结果及变化率分析, 见下表。

表 栅极电压信号经 WSE 分析结果

Tab. Results analysis of the gate voltage WSE

状态类型	键合线断裂根数	经 WSE 分解提取特征值	
		WSE	相对 A 变化率
A	0	0.1485	_
В	1	0.1304	-12.2
В	2	0.1283	-13.6
В	3	0.1302	-12.3
В	4	0.1331	-10.4
В	5	0.1223	-17.6
C	6	0.1709	+15.1
C	7	0.1717	+15.6
C	8	0.1740	+17.2

从表可见, 当单元 S2 中两并联芯片出现键合线 故障且均导通工作时, 其栅极电压的奇异熵值将出 现负的变化率。而当其中一块并联芯片因其射极 6 根键合线的完全断裂而脱离工作时, 其栅极电压的 奇异熵值将出现正的变化率。因此,经小波奇异熵 分解后不仅将原始信号进行了最大限度的数据量压 缩,而且根据其小波奇异熵值的相对变化率,实现 了对 IGBT 模块键合线及并联芯片故障的特征信息 提取。值得注意的是由本文第 3 节的分析可见, IGBT 栅极电压的关断特性将直接受到其集-射极两 端电压的影响。从而当 IGBT 的工作条件发生变化 时,其对数据处理结果同样将产生一定的影响。因 此,用于表征正常 IGBT 模块的参考值 WSE 需随工 作条件做出相应调整。更深入地研究关于工作条件 的变化,对数据处理结果的影响程度及变化趋势分 析将在后续工作中进行。实际应用中,在 IGBT 模 块运行的各寿命阶段,可根据器件具体工作状况并 综合考虑相关因素影响,设置合理的阈值以对器件 的运行状况进行评估。

6 结论

- (1)建立了 IGBT 模块键合线故障以及并联 IGBT 芯片故障的分析模型,并通过人为的键合线 挑断测试验证了模型的正确性,这为评估实际工况下 IGBT 模块的运行健康状况提供了重要的线索。
- (2)运用基于小波理论的现代信息处理技术,对故障信号进行了有效地特征信息量提取。在伴随 IGBT 模块键合线故障根数的增加直至发生并联 IGBT 芯片脱离运行的过程中,故障特征值表现出了不同的变化规律。
- (3)利用 IGBT 模块外部工作波形可实现对模块内部是否已发生键合线故障的监测。意义更为重要的是,针对并联 IGBT 芯片脱离工作这类严重的故障类型也达到了同样的目的。对于伴随键合线断裂根数的增加所带来的不同变化趋势的分析以及各并联芯片均发生部分键合线故障的情形,有待进一步深入研究。

致谢:本文中实验所用 IGBT 模块由富士电机 (香港)有限公司提供,在此表示衷心感谢!

参考文献

[1] Yang Shaoyang, 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.
- [2] Yang Shaoyang, Xiang Dawei, Bryant A, et al. Condition monitoring for device reliability in power electronic converters-a review[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(11): 2734-2752.
- [3] Wuchen Wu, Held M, Jacob p, et al. Investigation on the long term reliability of power IGBT modules[C]. Proceedings of IEEE the 7th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs, 1995: 443-448.
- [4] Smet V, Forest F, Huselstein J, et al. Ageing and failure modes of IGBT modules in high temperature power cycling[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011.
- [5] Held M, Jacob P, Nicoletti G, et al. Fast power cycling test for IGBT modules in traction application[C]. International Conference on IEEE Power Electronics and Drive Systems, 1997: 425-430.
- [6] Yali Xiong, Xu Cheng, Z. John Shen, et al. Prognostic and warning system for power-electronic modules in electric, hybrid, and fuel-cell vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(6): 2268-2276.
- [7] Farokhzad B, Turkes P, Wolfgang E, et al. Reliability indicators for lift-off of bond wire in IGBT power-modules[C]. Proceedings of IEEE the 7th European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis. Enschede, Netherlands, 1996: 1863-1866.
- [8] Lehmann J, Netzel M, Herzer R, et al. Method for electrical detection of bond wire lift-off for power semiconductors[C]. 15th International Symposium on IEEE Power Semiconductor Devices and ICs, 2003: 333-336.
- [9] Farokhzad B, Leinfelden. Method for early failure recognition in power semiconductor modules[P]. USA, 6, 145, 107. Nov. 2000-11-07.
- [10] Onuki J, Koizumi M, Suwa M. Reliability of thick Al wire bonds in IGBT modules for traction motor drives[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2000, 23(1): 108-112.
- [11] Hua Lu, Bailey C. Lifetime prediction of an IGBT power electronics module under cyclic temperature loading conditions[C]. International Conference on

- IEEE Electronic Packaging Technology & High Density Packaging, 2009: 274-279.
- [12] Morozumi A, Yamada K, Miyasaka T, et al.

 Reliability of power cycling for IGBT power semiconductor modules[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(3): 665-671.
- [13] Rodriguez M A, Claudio A, Theilliol D, et al. A new fault detection technique for IGBT based on gate voltage monitoring[C]. 38th IEEE Power Electronics Specialists Conference, Orlando, 2007: 1001-1005.
- [14] Hefner A R. Modeling buffer layer IGBTs for circuit simulation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1995, 10(2): 111-123.
- [15] Stefan Linder. 功率半导体——器件与应用[M]. 肖曦, 李虹, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [16] Muhammad H Rashid. 电力电子技术手册[M]. 陈建业,杨德刚,于歆杰,等译. 北京: 机械工业出版社,2004.
- [17] 孙来军. 振动信号小波包特征熵的时变与频变特性分析[J]. 高电压技术, 2007, 33(8): 146-150. Sun Laijun. Time-variation and frequency-variation analysis of wavelet packet characteristic entropy for vibration signals[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(8): 146-150.
- [18] 何正友, 蔡玉梅, 钱清泉. 小波熵理论及其在电力系统故障检测中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 38-43.

 He Zhengyou, Cai Yumei, Qian Qingquan. A study of wavelet entropy theory and its application in electric power system fault detection[J]. Proceedings of the

CSEE, 2005, 25(5): 38-43.

[19] 樊计昌, 刘明军, 王夫运, 等. 浅析小波最大分解层[J]. 科技导报, 2008, 26(10): 40-42.
Fan Jichang, Liu Mingjun, Wang Fuyun, et al. Analysis on maximun wavelet decomposition levl from theory and application[J]. Science and Techonology Review, 2008, 26(10): 40-42.

作者简介

沈 刚 男,1984年生,硕士研究生,研究方向为风力发电中功率器件的故障机理、在线监测。

周維维 男,1954年生,教授,博士生导师,研究方向为电力电子技术、电路理论及应用、新能源发电可靠性等。