

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

周生奇,周维维,孙鹏菊

(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 400044)

摘要: 提出一种基于门极电压响应曲线 Fréchet 距离变化的绝缘栅双极型晶体管(IGBT)模块缺陷诊断方法。在 IGBT 模块的失效过程中,部分门极杂散参数会发生变化,相应地门极电路的电压响应曲线也会发生变化。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,并以此作为参数辨识 IGBT 模块是否存在缺陷。与现有的故障诊断方法相比,其响应时间更充裕。针对典型的缺陷形式进行了实验研究,结果验证了该方法诊断结论的正确性。

关键词: 风电; 并网; 变流器; 绝缘栅双极型晶体管; Fréchet 距离

中图分类号: TM 614; TM 46

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.02.002

0 引言

目前,我国在新能源开发利用方面以发电为主,其中风力发电应用最为广泛^[1],但是与传统火电机组相比,风电机组的输入功率波动剧烈且难以预测,在风电比重大的地区,并网运行的风电场对接入点区域电网的运行产生不利影响^[2-7],成为制约风电系统应用的瓶颈之一,因此提高风电机组运行的可靠性成为促进风电发展的关键举措之一。统计数据显示,风电机组的故障与实现并网的变流器密切相关^[8-9],而并网变流器的可靠性在很大程度上受其关键组成部件 IGBT 模块的影响^[10-11];另外,伴随半导体制造技术的进步,IGBT 的通流能力和耐压水平有了很大的提高(3.6 kA/6.5 kV),其应用领域和层次也得到相应的拓展,开始在舰艇电力推进等对可靠性有很高要求的特殊领域中使用^[12],致使 IGBT 模块的可靠性问题日益突出,成为国内外学者关注的热点。文献报道显示近 20 年来,国内外的学者和研究人员对 IGBT 可靠性进行了大量的研究,基本上明确了其失效机理和主要失效模式^[11-17],并提出了一些评估 IGBT 模块可靠性衰退的方法和相应的寿命预测模型^[18-20],极大地促进了 IGBT 模块可靠性相关的研究,但是由于实际的 IGBT 模块封装的限制,难以获取相关信息,上述方法和模型尚需进一步完善。另外,与此相关的还有电力电子装置的故障诊断^[21-26],目

的是识别装置中发生故障 IGBT 模块,故难以避免因 IGBT 模块的失效对装置造成的损坏。因此,有必要进一步研究辨识 IGBT 模块缺陷的方法,在失效前及时替换,可有效提高运行的可靠性。

在 IGBT 模块的失效过程中,部分门极杂散参数会发生变化^[27],相应地门极电路的电压响应曲线也会发生变化,这为诊断 IGBT 模块的缺陷提供了一种可能,即借助曲线相似性变化,逆向推断是否存在缺陷。基于此,本文提出利用 IGBT 模块的失效过程不同阶段、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,并以此作为参数辨识 IGBT 模块是否存在缺陷的方法。Fréchet 距离考虑了曲线上各点的位置和次序,在描述曲线相似性方面具有良好的比较优势。与现有方法相比,本文所提方法的参数容易获取,且从维护的角度而言,响应时间更充裕,应用到风电并网变流器中可降低风电机组的强迫停运率。

1 IGBT 模块失效过程中门极杂散参数变化

1.1 IGBT 模块门极杂散参数

目前,市场上不同厂家的 IGBT 模块的封装和拓扑可能存在一定程度的差异,但是其基本结构是一致的,仅模块内硅片串、并联的数目和布局存在一定差异,典型的半桥封装 IGBT 模块的内部结构如图 1 所示,本例中模块的上、下 IGBT 器件各由 2 组 IGBT-FWD 芯片对并联构成,除硅片外还包括与封装有关材料,如铝键合线等^[28]。

IGBT 模块的杂散参数与硅片和封装有关,主要由硅片内部的杂散电容、电阻以及封装引入的杂散电感、电阻构成^[28],如图 2 所示。IGBT 通常可看作 MOSFET 和 BJT 构成的达林顿结构,相应的硅片杂散参数也分为 MOSFET 部分和 BJT 部分。图 2 中与

收稿日期:2012-04-25;修回日期:2012-12-13

基金项目:国际科技合作计划资助项目(2010DFA72250);国家自然科学基金资助项目(51077137);国家自然科学基金重点资助项目(51137006)

Project supported by the International Science & Technology Cooperation Program of China(2010DFA72250),the National Natural Science Foundation of China(51077137) and the Key Project of National Natural Science Foundation of China(51137006)

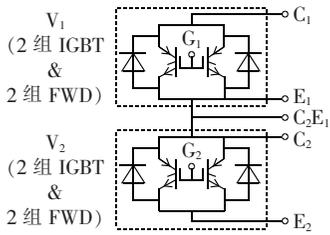


图 1 典型半桥型 IGBT 模块

Fig.1 Typical half-bridge IGBT module

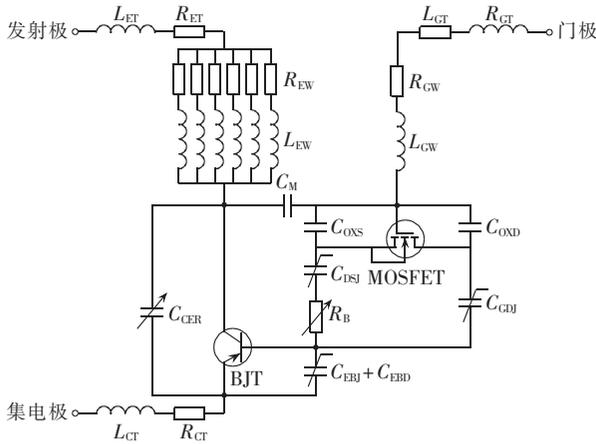


图 2 IGBT 模块的杂散参数

Fig.2 Stray parameters of IGBT module

MOSFET 相关的杂散参数包括: C_M 表示门-源极之间的金属化电容, C_{OXS} 表示门-源极之间的氧化电容, C_{OND} 表示门-漏极之间的交叠氧化电容, C_{GDI} 表示门-漏极之间的交叠耗尽层电容, C_{DSJ} 表示源-漏极之间的交叠耗尽层电容。与 BJT 相关的杂散参数包括: C_{CER} 表示集-射极之间的重分布电容, C_{EBD} 与 C_{EBI} 分别表示基-集电极之间的扩散电容与耗尽电容, R_B 表示基极电导调制电阻。由封装引入的杂散参数有: L_{GT} 、 R_{GX} 分别表示门极端子引线的杂散电感和电阻; L_{GW} 、 R_{GW} 分别表示门极铝键合线的杂散电感和电阻; L_{EW} 、 R_{EW} 分别表示发射极铝键合线的杂散电感和电阻; L_{ET} 、 R_{ET} 分别表示发射极辅助端子引线的杂散电感和电阻; L_{CT} 、 R_{CT} 分别表示集电极端子引线的杂散电感和电阻。其中与门极驱动电路相关的杂散参数主要有: 门极、发射极的杂散电感和电阻, 以及杂散电容 C_M 、 C_{OXS} 、 C_{OND} 、 C_{GDI} 等, 在 IGBT 模块老化过程中, 这些杂散参数会伴随发生相应的变化, 导致门极电压的响应曲线发生一定的偏离。

1.2 IGBT 模块老化对门极杂散参数的影响

由文献[13, 20]可知 IGBT 模块的主要失效模式是: 基板开裂和铝键合线断裂。首先, 基板开裂会导致热阻增大, 结温升高, 激发热载流子损伤 IGBT 硅片中门-射极之间的 SiO_2 层, 从而改变门极等效电容 C_G [29]; 其次铝键合线断裂, 不仅影响模块内部发射极等效杂散电阻 R_E 和电感 L_E , 而且可能会影响等效杂

散电容 C_{GE} 。从图 1 可以看出: 若在运行过程中, 因无法避免的热冲击, 如功率波动、短路等导致上、下某器件中一个芯片发射极的铝键合线全部断裂, 则该硅片失效, 尽管此时模块仍可继续运行, 且模块集射极端口外特性几乎不变, 但门极电路的结构已经发生变化。总之, IGBT 模块老化过程中出现的主要缺陷皆可导致门极回路杂散参数发生一定程度的变化, 而门极回路杂散参数的变化可通过门极电压响应曲线体现出来, 这为诊断 IGBT 模块内部缺陷提供了一种可行方法。

2 曲线相似理论及离散 Fréchet 距离

2.1 曲线相似性定义

曲线的差异可以通过相似性变化来衡量, 从数学上描述, 曲线可以被视为定义在连续区间的映射 $f: [a, b] \rightarrow \mathbf{R}^2$, 其中 $a, b \in \mathbf{R}$, 且 $a < b$ 。对于给定的 2 个函数 $g: [a, b] \rightarrow \mathbf{R}^2$ 和 $l: [a, b] \rightarrow \mathbf{R}^2$, 若二者之间的 L_2 范数 $\|g - l\| \rightarrow 0$, 则定义为函数 g 收敛于函数 l , 且函数 g, l 分别描述的曲线相似。除此之外, 在实际应用中, 如计算机图像、模式识别等, 因具体对象的不同, 所选择的相似性判据也不尽相同[30-33]。

2.2 Fréchet 距离

Fréchet 距离由 M. Fréchet 于 1906 年提出[34], 描述了两质点分别沿着 2 条给定曲线以任意速度单向运动时, 二者之间的最短距离。Fréchet 距离的直观解释是: 给定距离空间的 2 条曲线 A 和 B , 一个人牵着一只狗, 分别沿着曲线 A 和 B 以任意的自由速度从起点移动到终点, 但不得后退, 那么 Fréchet 距离就是人与狗之间最短拴狗绳的长度[35], 与常用的 Hausdorff 距离相比, Fréchet 距离考虑了曲线的形状以及曲线上各点的时序, 在刻画曲线相似程度方面具有一定的比较优势, 在图像识别、计算机视觉等领域获得应用[36-37], 其具体定义如下:

$$\partial_F(g, l) = \inf_{t \in [0, 1]} \max \|g(\alpha(t)) - l(\beta(t))\| \quad (1)$$

$$\alpha: [0, 1] \rightarrow [a, b]$$

$$\beta: [0, 1] \rightarrow [a, b]$$

其中, $\partial_F(g, l)$ 表示 Fréchet 距离, $\|\cdot\|$ 表示 L_2 范数, α 和 β 表示 $[0, 1] \rightarrow [a, b]$ 的任意连续非递减函数。

3 门极电压线性化及其离散 Fréchet 距离

由 1.2 节的分析可知, IGBT 模块门极杂散参数具有时变性, 会伴随老化而变化, 但比较缓慢, 因此在极短的采样过程中 (μs 级) 可视为非时变参数; 此外, 门极杂散参数与偏置电压密切相关[38], 因此为使老化过程中测得的门极电压响应曲线具有可比性, 必须对门极电压进行线性化处理。

3.1 门极电路充电过程分析

由图 2 可知,组成 IGBT 开通时的门极等效电路如图 3 所示,图中 R, L 为 IGBT 模块外部电路的等效电阻和电感, R_G, L_G 为 IGBT 模块内部门极的等效杂散电阻和电感, R_E, L_E 为 IGBT 模块内部发射极的等效杂散电阻和电感, C_{GE} 为门极等效电容, U_1, U_2 为驱动电压, S_1 为控制信号, U_{CE} 为集射极电压。

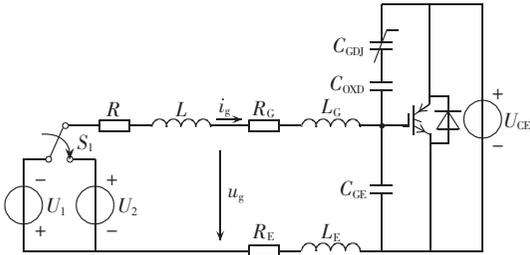


图 3 门极等效电路

Fig.3 Equivalent gate circuit

从图 3 可以看出,IGBT 模块门极电路的杂散参数中,具有非线性特性的是门-漏极之间的交叠耗尽层电容^[38]:

$$C_{GD} = \frac{A_{GD} \epsilon_{Si}}{\sqrt{2 \epsilon_{Si} (U_{CE} - U_{GE(th)})} / (q N_B)} \quad (2)$$

其中, A_{GD} 表示 IGBT 中 MOFSET 部分门-漏极之间的交叠面积, ϵ_{Si} 表示硅的介电常数, q 表示电子电荷量, N_B 表示基区掺杂浓度, $U_{GE(th)}$ 表示 IGBT 门极阈值电压。

在充电过程中,门-集电极等效电容 C_{GC} 会伴随集射极电压 U_{CE} 的变化具有不同的值:

$$C_{GC} = \begin{cases} C_{OXD} & U_{CE} < U_{GE} - U_{GE(th)} \\ \frac{C_{OXD} C_{GD}}{C_{OXD} + C_{GD}} & U_{CE} \geq U_{GE} - U_{GE(th)} \end{cases} \quad (3)$$

因此,IGBT 门极电路的充电过程可分为如下典型阶段,如图 4 所示。

a. $t_0 \sim t_1$ 阶段: $U_{CE} < U_{GE(th)}$, 因此 IGBT 处于关断状态, U_{CE} 保持不变,且 $U_{CE} \gg U_{GE} - U_{GE(th)}$, 由式(2)和式(3)可知 C_{GC} 为常数,门极电压 U_{GE} 的响应曲线表现为定常二阶电路的特性。

b. $t_1 \sim t_3$ 阶段: $U_{CE} > U_{GE(th)}$, 集电极电流 i_c 开始增加,因外电路杂散电感的存在, U_{CE} 开始缓慢下降,直到 t_2 时刻, i_c 达到峰值;此后,续流二极管逐渐恢复

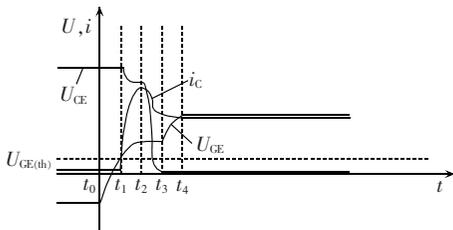


图 4 门极电路充电过程

Fig.4 Charging process of gate circuit

阻断能力, U_{CE} 迅速下降到饱和压降,此过程中门极电路表现出极强的非线性。

c. $t_3 \sim t_4$ 阶段: U_{CE} 降为饱和压降, $C_{GC} = C_{OXD}$ 为常数, U_{GE} 的响应曲线重新表现为定常二阶电路的特性,直到上升到稳态值。

3.2 门极电压线性化

通过前面对 IGBT 模块门极电路充电过程的分析可知,有 2 个时段可被用来对门极电压进行分时线性化: $t_0 \sim t_1$ 和 $t_3 \sim t_4$, 其中 $t_3 \sim t_4$ 时段的起始时刻 t_3 不容易判断,因此本文选择 $t_0 \sim t_1$ 时段的门极电压 U_{GE} 的响应曲线,计算其缺陷前后的 Fréchet 距离,不过到达门极阈值电压 $U_{GE(th)}$ 的时刻 t_1 同样不易获取,为简化应用,本文将 $t_0 \sim t_1$ 时段压缩至 $t_0 \sim t'$ 时段,其中 t' 为门极 U_{GE} 的过零时刻,确保 $U_{CE} < U_{GE(th)}$, 如图 5 所示。

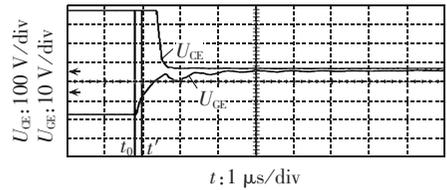


图 5 门极电压线性化

Fig.5 Linearization of gate voltage

3.3 门极电压曲线的离散 Fréchet 距离

由于采样间隔不可能无穷小,实际获得的 $t_0 \sim t_1$ 时段门极电压曲线是由若干离散点构成的折线段组成的多边形曲线,适宜采用离散 Fréchet 距离度量其相似性的变化^[34],具体计算过程如下。

设 $P: [1, p] \rightarrow \mathbf{R}^2$ 表示缺陷前门极电压在 $t_0 \sim t'$ 时段的波形曲线, $\sigma(P) = (u_1, \dots, u_p)$ 表示对应的按时间排序的采样点集合,其中 p 为正整数,表示采样长度。同理,设 $Q: [1, q] \rightarrow \mathbf{R}^2$ 表示缺陷后门极电压在 $t_0 \sim t'$ 时段的波形曲线, $\sigma(Q) = (v_1, \dots, v_q)$ 表示对应的按时间排序的采样点集合,其中 q 为正整数,表示采样长度。 $d(u_i, v_j) = |u_i - v_j|$ 表示集合 $\sigma(P)$ 中元素 u_i 与集合 $\sigma(Q)$ 中元素 v_j 之间的连接距离, $d_{df}(i, j)$ 表示两质点分别运动到曲线 P 的 i 位置和曲线 Q 的 j 位置时对应的离散 Fréchet 距离。

由集合 $\sigma(P)$ 和 $\sigma(Q)$ 求曲线 P 和 Q 的元素连接矩阵 $D_{p \times q}$:

$$D_{p \times q} = \begin{bmatrix} d(1, 1) & \dots & d(1, q) \\ \vdots & & \vdots \\ d(p, 1) & \dots & d(p, q) \end{bmatrix} \quad (4)$$

令 $i=1, j=1$, 则 $d_{df}(1, 1) = d(u_1, v_1)$; 令 $i=2 \rightarrow p, j=1$, 则 $d_{df}(i, j) = \max \{d_{df}(i-1, j), d(u_i, v_j)\}$; 令 $i=1, j=2 \rightarrow q$, 则 $d_{df}(i, j) = \max \{d_{df}(i, j-1), d(u_i, v_j)\}$ 。

从 $i=2, j=2$ 出发,按照式(5)搜索前进,直至 $i=p, j=q$, 则曲线 P 和 Q 的离散 Fréchet 距离 $d_{df}(P, Q) = d_{df}(p, q)$ 。

$$\begin{cases} d_{\text{Fr}}(i, j) = \max \{ d', d(u_i, v_j) \} \\ d' = \min \{ d_{\text{Fr}}(i-1, j), d_{\text{Fr}}(i-1, j-1), d_{\text{Fr}}(i, j-1) \} \end{cases} \quad (5)$$

4 实验研究

为验证所提出的方法,采用富士公司提供的特殊开封模块样品 2MBI150U4H-170,按照图 6 搭建了 IGBT 模块的动态测试电路,通过逐根剪断联结模块下桥臂 IGBT 器件中芯片 1 的 6 根铝键合线,模拟现场运行和功率循环实验中最易出现的铝键合线断裂现象,当然这种逐根剪断铝键合线的方式可能与 IGBT 模块中铝键合线实际的断裂情况不一致,但这里仅用来验证出现铝键合线断裂缺陷后,利用本文提出的门极电压 U_{GE} 在 $t_0 \sim t'$ 时段响应曲线的 Fréchet 距离是否有显著变化,即是否可用作参数诊断 IGBT 模块的缺陷;另外,为避免测量误差,实验中选择多次重复测量取平均值,以尽量消除仪器带来的误差。

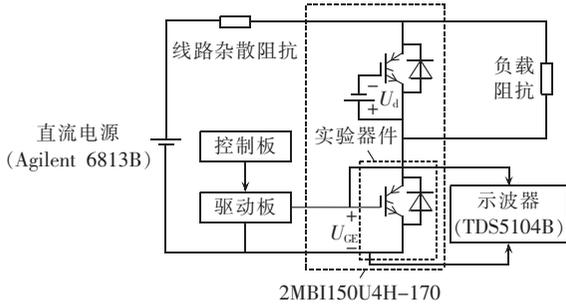
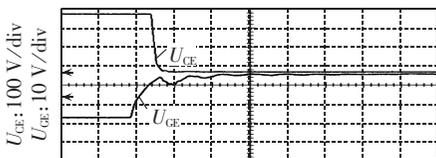


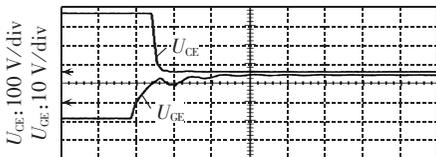
图 6 实验电路示意图
Fig.6 Experimental circuit

实验电路中,输入电压为 300 V DC,负载为 3 mH、1 Ω,开关频率为 10 kHz,示波器 TDS5104B 的采样频率分别为 1.25 GHz 和 125 MHz,后者与目前常用采样芯片 AD9600ABCPZ-125 相当,以验证该方法在当前是否可行。选择铝键合线未断裂、3 根断裂和 6 根断裂时的实验结果进行比对,测得的门极电压波形如图 7 所示。

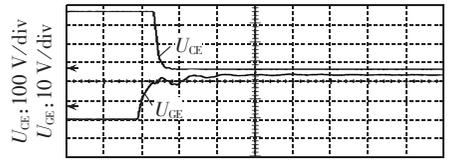
为便于计算,分别取采样频率为 1.25 GHz 时门极电压 U_{GE} 在 $t_0 \sim t'$ 时段的前 100 个数据和采样频率



(a) 铝键合线未断裂时



(b) 铝键合线断裂 3 根时



(c) 铝键合线断裂 6 根时

图 7 门极电压波形

Fig.7 Waveforms of gate voltage

为 125 MHz 时门极电压 U_{GE} 在 $t_0 \sim t'$ 时段的前 10 个数据计算响应曲线的 Fréchet 距离,详细波形比较见图 8 和图 9,对应的 Fréchet 距离见表 1。从表 1 可以看出:首先,当 IGBT 模块内部发生铝键合线断裂缺陷前后,门极电压 U_{GE} 响应曲线的 Fréchet 距离发生变化,但只有缺陷发展到一定程度,即同管两并联硅片有一个失效时,才有显著变化;其次,2 种采样频率下得到的结果差异不大。这说明采用门极电压 U_{GE} 响应曲线的 Fréchet 距离变化的诊断精度达到硅片级,尚不能判断单个铝键合线断裂,但从工程的角度而言,已具备了应用的价值。

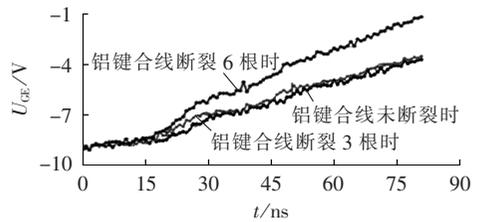


图 8 采样频率 1.25 GHz 时 $t_0 \sim t'$ 时段详细波形
Fig.8 Detailed waveforms during $t_0 \sim t'$ with 1.25 GHz sampling frequency

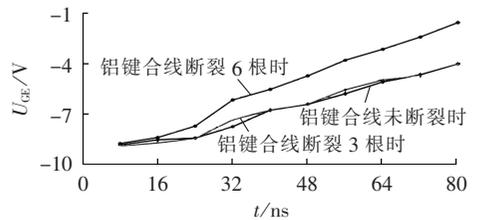


图 9 采样频率 125 MHz 时 $t_0 \sim t'$ 时段详细波形
Fig.9 Detailed waveforms during $t_0 \sim t'$ with 125 MHz sampling frequency

表 1 采样频率 1.25 GHz 和 125 MHz 时门极电压响应曲线的 Fréchet 距离

Tab.1 Fréchet distances of gate voltage for 1.25 GHz and 125 MHz sampling frequencies

断裂根数	Fréchet 距离	
	1.25 GHz	125 MHz
0	0	0
3	0.2	0.21
6	2.5	2.45

5 结论

本文提出一种基于门极电压响应曲线的 Fréchet

距离变化诊断 IGBT 模块缺陷的方法,并通过实验证实了该方法的正确性。该方法能够有效诊断出 IGBT 模块内部硅片的失效,但此时 IGBT 模块仍可运行,集电极外部特性几乎不变,采用传统的故障诊断方法无法检出,因此该方法具有一定的应用价值,可为运行人员赢得宽裕的维护时间,及时替换有缺陷的 IGBT 模块,避免模块故障对装置造成的危害,如应用到风电并网变流器中可有效降低机组的强迫停运率,提高风电运行的可靠性,促进风电的发展和推广。此外,目前商业化的模块采用的结构和布局大致相同,所以,该方法具有普适性。但是,该方法也存在一定的不足:数据采集速度和精度要求比较高,从技术层面上而言不利于在线诊断的实现,这是将来研究的方向。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 发改能源[2007]2174号 可再生能源中长期发展规划[S]. (2007-09-04). http://www.china.com.cn/policy/txt/2007-09/04/content_8800358.htm.
- [2] 黄学良,刘志仁,祝瑞金,等. 大容量变速恒频风电机组接入对电网运行的影响分析[J]. 电工技术学报,2010,25(4):142-149.
HUANG Xueliang,LIU Zhiren,ZHU Ruijin,et al. Impact of power system intetrated with large capacity of variable speed constant frequency wind turbines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2010,25(4):142-149.
- [3] 林今,孙元章,李国杰,等. 采用变速恒频机组的风电场有功功率波动对系统节点频率影响的动态评估模型[J]. 电力自动化设备,2010,30(2):14-18.
LIN Jin,SUN Yuanzhang,LI Guojie,et al. Dynamic evaluation model of node frequency deviation caused by power fluctuation of wind farm with variable speed wind turbine systems[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(2):14-18.
- [4] 迟永宁,刘燕华,王伟胜,等. 风电接入对电力系统的影响[J]. 电网技术,2007,31(3):77-81.
CHI Yongning,LIU Yanhua,WANG Weisheng,et al. Study on impact of wind power integration on power system[J]. Power System Technology,2007,31(3):77-81.
- [5] 迟永宁,王伟胜,刘艳华,等. 大型风电场对电力系统暂态稳定性的影响[J]. 电力系统自动化,2006,30(15):10-14.
CHI Yongning,WANG Weisheng,LIU Yanhua,et al. Impact of large scale wind farm integration on power system transient stability [J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(15):10-14.
- [6] 吴义纯,丁明,李生虎. 风电场对输电系统可靠性影响的评估[J]. 电工技术学报,2004,19(11):72-76.
WU Yichun,DING Ming,LI Shenghu. Reliability assessment of wind farms in generation and transmission systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2004,19(11):72-76.
- [7] 董萍,郑家伟,郭攀. 不同容量风电场对连接处的电网影响及其性能分析[J]. 控制理论与应用,2008,25(2):377-382.
DONG Ping,CHENG Kawaieric,GUO Pan. Performance analysis of different wind farm capacities to power grid[J]. Control Theory & Applications,2008,25(2):377-382.
- [8] ARAI J,IBA K,FUNABASHI T,et al. Power electronics and its applications to renewable energy in Japan[J]. Circuits and Systems Magazine,2008,8(3):52-66.
- [9] ZHU Pengchen,LIU Yunfeng,ROBERT R,et al. Offshore wind converter reliability evaluation[C]//8th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia. Shilla Jeju,Korea:[s.n.],2011:966-971.
- [10] CHEN Z,GUERRERO J M,BLAABJERG F. A review of the state of the art of power electronics for wind turbines[J]. IEEE Trans on Power Electronics,2009,24(8):1859-1875.
- [11] YANG Shaoyong,BRYANT A,MAWBY P,et al. An industry-based survey of reliability in power electronic converters[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics,2011,47(3):1441-1451.
- [12] 马伟明. 电力电子在舰船电力系统中的典型应用[J]. 电工技术学报,2011,26(5):1-7.
MA Weiming. Typical applications of power electronics in naval ship power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2011,26(5):1-7.
- [13] CIAPPA M. Selected failure mechanisms of modern power modules[J]. Microelectronics Reliability,2002(42):653-667.
- [14] SEMT V,FOREST F,HUSELETIN J,et al. Ageing and failure modes of IGBT modules in high-temperature power cycling[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics,2011,58(10):4931-4941.
- [15] YANG Shaoyang, XIANG Dawei, BRYANT A, et al. Condition monitoring for device reliability in power electronic converter: a review[J]. IEEE Trans on Power Electronics,2011,25(11):2734-2752.
- [16] 赵争鸣,张海涛,袁立强,等. 基于IGCT的高压三电平变频器失效机理及保护策略[J]. 电工技术学报,2006,21(5):1-6.
ZHAO Zhengming,ZHANG Haitao,YUAN Liqiang,et al. Failure mechanism and protection strategy of high voltage three-level inverter based on IGCT[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2006,21(5):1-6.
- [17] 赵争鸣,白华,袁立强. 电力电子学中的脉冲功率瞬态过程及其序列[J]. 中国科学(E辑:技术科学),2007,37(1):60-69.
- [18] MUSALLAM M,JOHNSON C M,YIN C Y,et al. In-service life consumption estimation in power modules[C]//13th International Power Electronics and Motion Control Conference. New York,USA:[s.n.],2008:76-83.
- [19] MUSALLAM M,JOHNSON C M. Real-time compact thermal models for health management of power electronics[J]. IEEE Trans on Power Electronics,2010,25(6):1416-1425.
- [20] XIONG Y L,CHENG X,SHEN Z J,et al. Prognostic and warning system for power-electronic modules in electric,hybrid electric,and fuel-cell vehicles [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics,2008,55(6):2268-2276.
- [21] BIN L,SHARMA S K. A literature review of IGBT fault diagnostic and protection methods for power inverters[J]. IEEE Trans on Industry Applications,2009,45(5):1770-1777.
- [22] 马伟明,胡安,王令蓉. 基于电压波形分析的十二相整流装置故障诊断[J]. 电工技术学报,1997,12(6):49-54.
MA Weiming,HU An,WANG Lingrong. Twelve-phase rectifier fault diagnosis based on voltage waveform analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,1997,12(6):49-54.
- [23] 马皓,徐德鸿. 电力电子装置在线检测与故障诊断系统[J]. 电测与仪表,1999,36(4):40-42.
- [24] 张志学,马皓,毛兴云. 基于混杂系统模型和事件辨识的电力电子电路故障诊断[J]. 中国电机工程学报,2005,25(3):49-53.
ZHANG Zhixue,MA Hao,MAO Xingyun. Fault diagnosis for

- power electronic circuits based on hybrid system theory and event identification[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(3):49-53.
- [25] 陈如清. 采用新型粒子群算法的电力电子装置在线故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报,2008,28(24):70-74.
CHEN Ruqing. A novel PSO on-line fault diagnosis approach for power electronic system[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(24):70-74.
- [26] 胡清,王荣杰,詹宜巨. 基于支持向量机的电力电子电路故障诊断技术[J]. 中国电机工程学报,2008,28(12):107-111.
HU Qing,WANG Rongjie,ZHAN Yiju. Fault diagnosis technology based on SVM in power electronic circuit[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(12):107-111.
- [27] PATIL N,CELAYA J,DAS D,et al. Precursor parameter identification for Insulated Gate Bipolar Transistor(IGBT) prognostics[J]. IEEE Trans on Reliability,2009,58(2):271-276.
- [28] SHENG W W,COLINO R P. Power electronic modules:design and manufacture[M]. Boca Raton,USA:CRC Press,2005.
- [29] YU Chuanshao,YUAN J S,YONG Hong. MOSFET linearity performance degradation subject to drain and gate voltage stress [J]. IEEE Trans on Device and Materials Reliability,2004,4(4):681-689.
- [30] 段青,赵建国,罗珂. 基于形状相似的日负荷曲线多重累积分析及其应用[J]. 电气应用,2008,27(20):53-56.
DUAN Qing,ZHAO Jianguo,LUO Ke. Application and electrical load data clustering algorithm using multihierarchy analysis based on time series curve contour similarity[J]. Electrotechnical Application,2008,27(20):53-56.
- [31] 罗滇生,何洪英. 基于形态相似准则的曲线拟合算法及其在超短期负荷预测中的应用[J]. 电网技术,2007,31(21):81-84.
LUO Diansheng,HE Hongying. A shape similarity criterion based curve fitting algorithm and its application in ultra-short-term load forecasting[J]. Power System Technology,2007,31(21):81-84.
- [32] 吕科,耿国华,周明全. 基于哈希方法的空间曲线匹配[J]. 电子学报,2003,31(2):294-296.
LÜ Ke,GENG Guohua,ZHOU Mingquan. Matching of 3D curve based on the Hash method[J]. Acta Electronica Sinica,2003,31(2):294-296.
- [33] SPEER T,KUPPE M,HOSCHEK J. Global reparametrization for curve approximation[J]. Computer Aided Geometric Design,1998,15(9):869-877.
- [34] FRÉCHET M. Sur quelques points du calcul fonctionnel [J]. Rendiconti del Circolo Mathematico di Palermo,1906,22(1):1-72.
- [35] EITER T,MANILA H. Computing discrete Fréchet distance [R]. Vienna,Austria:Christian Doppler Laboratory for Expert Systems,1994.
- [36] ALT H,GODAU M. Computing the Fréchet distance between two polygonal curves[J]. International Journal of Computational Geometry and Application,1995,5(1):75-91.
- [37] FERREIRA A,REICHEL H. Matching polygonal curves with respect to the Fréchet distance[C]//STACS 2001. London,UK:[s.n.],2001:63-74.
- [38] 唐勇,胡安,陈明. IGBT 栅极特性与参数提取[J]. 电工技术学报,2009,24(7):76-80.
TANG Yong,HU An,CHEN Ming. IGBT gate characteristics and parameter extraction methods[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009,24(7):76-80.

作者简介:

周生奇(1979-),男,山东菏泽人,博士研究生,研究方向为新能源发电和功率变流器的可靠性(E-mail:shengqi.z@cqu.edu.cn);

周维维(1954-),男,四川都江堰人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力电子技术、电路理论及应用(E-mail:zluowei@cqu.edu.cn);

孙鹏菊(1982-),女,河南南阳人,博士,研究方向为电力电子变换器控制策略和开关电源数字控制(E-mail:spengju@163.com)。

Defect diagnosis based on discrete Fréchet distance of curves for IGBT module used in grid-connected converter of wind power

ZHOU Shengqi,ZHOU Luowei,SUN Pengju

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

Abstract: A method based on the change of Fréchet distance of IGBT gate voltage curves is proposed to detect the early defects of IGBT modules. During the process of module failure, parts of gate stray parameters may change, which is accordingly reflected by the change of voltage response curves of the gate circuit. The Fréchet distances of gate voltage curves during the switch-on period are used and the deviation of their similarity is detected by comparing the distances among different stages, based on which, the defects of IGBT module are identified. Compared with the existing diagnosis method, it gives much longer time for repair or replacement. Experiments are carried out for typical defects and its validity is verified.

Key words: wind power; grid connection; electric converters; Insulated Gate Bipolar Transistors(IGBT); Fréchet distance