

风电变流器 IGBT 瞬态电热特性测试及其应用研究

姚 芳¹, 胡 洋¹, 李 铮², 李志刚¹

(1. 河北工业大学电气工程学院, 天津 300130; 2. 天津电力公司城东供电分公司, 天津 300250)

摘 要: 针对风电变流器中的绝缘栅双极型晶体管(IGBT), 研究 IGBT 模块瞬态电热特性测试试验及其工况应用。分析 IGBT 模块电热耦合效应, 并确定瞬态热、电特性结温计算参数。自行设计并搭建瞬态电热特性测试试验系统。应用所搭建的系统测量 IGBT 瞬态热、电特性参数, 并分别对瞬态热、电特性测试结果进行详细的分析研究。最后得到瞬态热、电特性对应的结温计算模型及工况结温探测方法, 进而对瞬态热、电特性退化及其应用进行分析研究。

关键词: IGBT; 电热特性; 结温; 瞬态; 退化

中图分类号: TM46

文献标识码: A

0 引 言

随着风力发电在国内外的快速发展, 风力机容量不断增大, 其核心部件风电变流器的工作安全性及可靠性得到越来越多的关注^[1]。风电变流器故障概率统计结果表明, 功率半导体器件为主要失效器件, 且因结温造成的失效概率最高^[2]。绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)作为风电变流器中的主要功率半导体器件, 其可靠性对风电机组甚至整个风力发电系统具有重要影响^[3]。风力发电系统工况中, IGBT 模块承载间歇性功率应力引起温度循环, 各层材料往复膨胀收缩导致材料属性退化, 最终使电气参数和温度的关系特性受到影响, 发生退化^[4]。因此, 研究 IGBT 模块的电热特性对提高器件工作性能及风电运行可靠性具有重要意义。

风电变流器中 IGBT 模块工作在开关状态, 在器件热瞬态过程中, 其电功率、各层热应力及温度相互影响, 各层材料不断退化, 结壳温处于变化状态^[5]。由于 IGBT 的电气参数与温度存在明显的耦合关系, 因此在模块热瞬态过程中, 电参数也随之改变^[6]。文献[7]提出了一种基于栅极电压开通密勒平台的结温估计方法, 采用恒流驱动电路增加密

勒平台与结温的线性度; 文献[8]基于半导体物理机理建立了关断条件下 IGBT 电压变化率模型, 进而建立了 IGBT 电压变化率结温预测模型; 文献[9]分析了 IGBT 失效机理及 3 种可靠性分析方法, 提出了一种通过监控压降变化实现 IGBT 可靠性在线评估的方法; 文献[10]建立了 IGBT 模块热电耦合场键合点温度估算模型, 主要研究了键合线故障对 IGBT 性能的影响; 文献[11]对比研究了 3 种常见 IGBT 温敏参数测试法的准确性, 并通过红外成像法进行验证。

综合国内外研究现状发现, 针对 IGBT 模块的研究仍集中在实验室条件下, 对实际工况下功率器件可靠性研究处于发展阶段^[12, 13]。现阶段对 IGBT 模块电热特性的研究中, 集中于对某一种温敏参数进行具体研究, 或针对 IGBT 结温进行寿命预测及可靠性分析, 较少对 IGBT 模块瞬态电热特性进行对比分析和综合研究。本文以研究 IGBT 模块热瞬态过程中的电瞬态变化为思路, 设计并搭建 IGBT 模块开关模式工作的试验电路, 以此营造一个开关工作模式下的热瞬态的过程, 对模块结、壳温相关的热特性变化进行研究, 实时采集热瞬态过程中电参数的动态波形, 并对相关电特性进行分析研究。

收稿日期: 2017-04-14

基金项目: 国家科技支撑计划(2015BAA09B01); 国家自然科学基金(51377044); 河北省自然科学基金重点项目(E2017202284)

通信作者: 姚 芳(1972—), 女, 博士、教授, 主要从事电器可靠性与检测技术方面的研究。yaofang@hebut.edu.cn

1 电热分析与参数选取

1.1 电热耦合特性分析

IGBT 模块以高频开关模式工作时产生的通态损耗和开关损耗,使模块承载温度波动冲击或高温应力,热膨胀冷收缩引起的横向剪切力会使封装层松弛,导致模块瞬态热阻抗增大,结温升高。另一方面,IGBT 模块结温的变化将引起 v_{ce} 等动态电气参数的变化。由文献[14]可知,与 IGBT 芯片温度有关的参数 k_{TV} 和 k_{TR} 影响通态损耗, k_{Ton} 和 k_{Toff} 影响开关损耗。

电力电子设备运行时,功率器件会产生很大的电能损耗,部分被模块热阻消耗,部分被模块热容储存,这些损耗使器件温度升高。电功率损耗越大,电能越多地转换为热能储存于模块,进而引起更高的结壳温及其温差。电热效应互相促进,互相影响,这种关联作用形成了一种电热耦合关系,如图 1 所示。

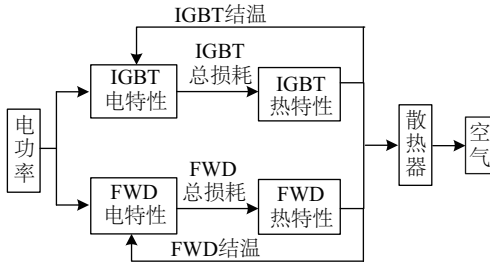


图 1 IGBT 电热耦合关系

Fig. 1 Electrothermal coupling relationship of IGBT

1.2 结温测试参数选取

瞬态热特性测试研究中,选取升温或降温过程中的结温 T_j 和壳温 T_c 作为热参量,可进一步根据功率损耗 P_{loss} 和瞬态热阻抗 $Z_{th(j-c)}$ 进行结温探测。瞬态电特性测试研究中,选取开通及关断过程中的集射极电压 v_{ce} 和集电极电流 i_c 作为电参量,可根据温敏参数法进行结温探测。IGBT 模块关断过程中,电压变化率是逐渐增大的,电压变化率模型^[8]如式(1)所示。

$$\frac{dv_{ce}(t)}{dt} = \frac{I_c - 2qAD_p \cdot \frac{P_o(t)}{W(t)}}{C_{dep}(t) \left(1 + \frac{1}{b}\right) \left(\frac{1}{2} + \frac{P_o(t)}{6N_B}\right)} \quad (1)$$

式中, I_c ——通态电流; q ——电子电荷量; A ——

N 基区面积; $W(t)$ ——准中性基区宽度; $C_{dep}(t)$ ——耗尽层宽度; b ——双极迁移率; N_B ——N 基区掺杂浓度; D_p ——空穴扩散系数; $P_o(t)$ ——发射极 P^+ 与 N 基区载流子浓度; D_p 、 $P_o(t)$ 均为温度敏感的电参数, D_p 随结温的增大而减小, $P_o(t)$ 随结温线性增大。

由式(1)可知, dv_{ce}/dt 与结温关系十分密切。因此,选取电压变化率作为结温计算的温敏参数,并进一步研究其在开通及关断过程中的温度特性。对于 IGBT 模块,使用集电极电流 I_c 进行结温计算的研究较少,电流变化率模型^[15]为:

$$\frac{di_c(t)}{dt} = \left[\frac{1}{1 - \alpha_{PNP}(T_j)} \right] \cdot \left[\mu(T_j) \cdot C_{ox} \cdot \frac{W}{L} (V_G - V_{th}(T_j)) \right] \cdot \frac{dv_{ge}}{dt} \quad (2)$$

式中, $\alpha_{PNP}(T_j)$ ——与 IGBT 中 PNP 部分相关的温度系数; $\mu(T_j)$ ——与 IGBT 中 MOSFET 部分相关的温度系数; C_{ox} ——栅氧化层特征电容; W ——漂移区宽度; L ——沟道长度; V_G ——栅偏压; $V_{th}(T_j)$ ——随结温变化的阈值电压。

由式(2)可知, $\alpha_{PNP}(T_j)$ 、 $\mu(T_j)$ 以及 $V_{th}(T_j)$ 均与结温相关,即当 dv_{ge}/dt 为常数时, di_c/dt 随结温发生变化,这方面的研究较少,拟研究栅极电压为定值时,开通与关断条件下集电极电流变化率与结温之间的关系。

2 瞬态电热特性测试

2.1 瞬态电热特性测试系统

2.1.1 瞬态热特性测试系统

IGBT 瞬态热特性测试系统如图 2 所示。系统可设置环境温度(即恒温箱温度)、开关频率、占空比和集电极电流,在不同功率损耗下测试 IGBT 模块的结温 T_j 及壳温 T_c 的瞬态热特性曲线。选用热电偶温度传感器测试铜底板最高温度作为壳温,选用光纤温度传感器埋入法或温敏参数法均可测试结温。

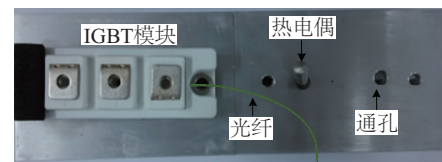


图 2 瞬态热特性测试示意

Fig. 2 The test of transient electric characteristics

2.1.2 瞬态电特性测试系统

IGBT 瞬态电特性测试系统如图 3 所示,包括驱动部分、负载部分及被测试品。被测试品置于调温调湿箱中,驱动和负载部分置于调温调湿箱外,驱动部分电路用来产生稳定的开关频率和占空比可调的驱动电压。试验选用埋入光纤温度传感器的 IGBT 模块,可实时监测结温,系统中 IGBT 工作在开关状态,可测试并记录不同结温和功率应力下集射极电压 v_{ce} 和集电极电流 i_c 的开通、关断变化曲线。

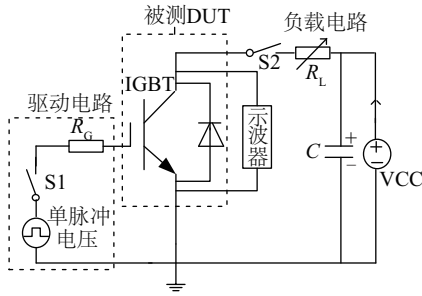


图3 瞬态电特性测试系统

Fig. 3 The test of transient electric characteristics

2.2 瞬态电热特性测试

2.2.1 瞬态热特性测试

利用 IGBT 瞬态热特性测试系统进行一系列试验,设置 IGBT 工作环境温度为 20 ℃,导通占空比为 50%,开关频率 f_{sw} 为 0.5、5.0、10.0、15.0 kHz,集电极电流 i_c 为 5、10、20、30 A,共进行 16 组试验。

试验记录 IGBT 模块从开始工作至结壳温度平衡状态时的变化曲线。另外需记录升温过程中的集射极电压 v_{ce} 的值,用以计算功率损耗,其中开关频率为 10 kHz,集电极电流为 5 A 的结壳温变化曲线如图 4 所示。

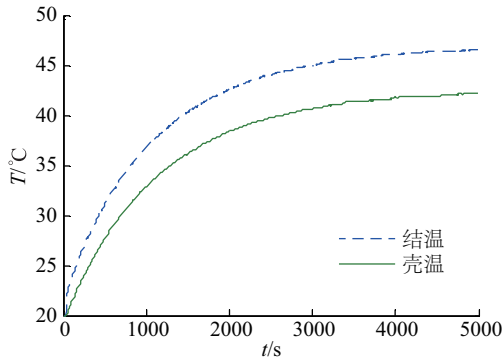


图4 结壳温度曲线

Fig. 4 The curves of junction-case temperature

由图 4 可知,结温始终高于壳温,且结壳温均逐渐增加直至稳定。由这 16 组数据可知, f_{sw} 一定时,随着 i_c 的增大,结温升高的速度变快且结温稳定值增大; i_c 一定时,随着 f_{sw} 的增大,结温升高的速度变快且结温稳定值增大。

2.2.2 瞬态电特性测试

利用 IGBT 瞬态电特性测试系统进行一系列试验,设置恒压源为 100 V,负载电阻为 4 Ω,结温为 30、50、70、90、110 ℃,共 5 组试验。试验记录 IGBT 模块开通和关断时刻集射极电压 v_{ce} 及集电极电流 i_c 的动态波形。其中结温为 30 ℃时 v_{ce} 及 i_c 在开通及关断过程中随时间变化的波形如图 5 所示。

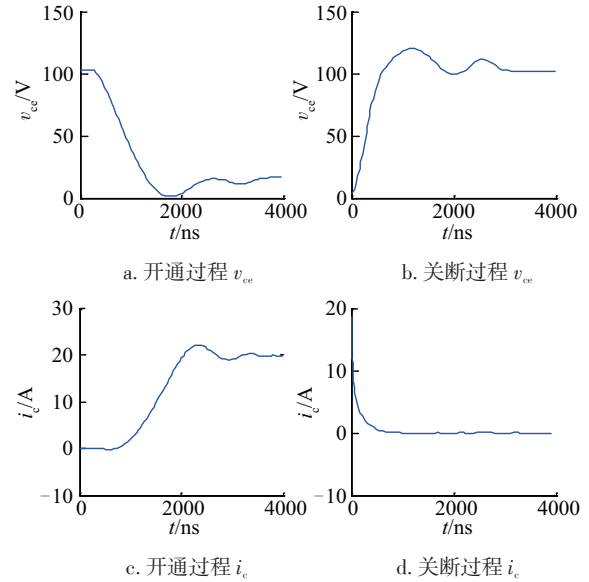


图5 集射极电压 v_{ce} 及集电极电流 i_c 波形图

Fig. 5 The oscillograph of v_{ce} and i_c

由图 5 可知,开通过程中 v_{ce} 很快降至 0 V 产生波谷并趋于稳定,同时 i_c 上升产生尖峰并趋于稳定;关断过程中 v_{ce} 上升产生尖峰并趋于稳定,同时 i_c 逐渐降至 0 A 并稳定。

3 瞬态电热特性研究

3.1 瞬态热特性研究

对图 4 中壳温、结温上升曲线进行曲线拟合,要求拟合精度在 0.995 以上,一阶指数曲线已满足精度要求,得到拟合函数 $T_c(t)$ 、 $T_j(t)$ 分别为:

$$T_c(t) = -22.87e^{-8.71 \times 10^{-4}t} + 42.37 \quad (3)$$

$$T_j(t) = -25.23e^{-9.319 \times 10^{-4}t} + 46.61 \quad (4)$$

t 为零时,壳温、结温计算值分别为 19.50、21.38 °C,此时与恒温箱环境温度几乎相同;随着时间的延长,结温比壳温上升更快,最终壳温、结温值稳定在 42.37、46.61 °C。

观察式(3)和式(4)可发现,结温 T_j 和壳温 T_c 的时间常数值略有不同,而实际情况中由于结壳温所处环境一致,其时间常数应相同。其原因是当 IGBT 模块通入电流后将产生功率损耗使芯片生热,由于 IGBT 的分层结构,热量由 IGBT 芯片向芯片焊料层、DCB 上铜层、DCB 陶瓷层、DCB 下铜层、DCB 焊料层传导,最后到达铜底板,而壳温即为铜底板底部的探测温度,故相对于结温,壳温的升温略有延迟,重新对壳温数据进行拟合,得到壳温 $T_c(t)$ 拟合函数为:

$$T_c(t) = -23.09e^{-9.319 \times 10^{-4}(t-0.2574)} + 42.10 \quad (5)$$

由式(5)可知,当 t 约为 0.2574 s 时,热量传导到壳,壳温开始由环境温度上升,其初始温度约为 19.01 °C,最终达热平衡后壳温稳定值为 42.10 °C,称 0.2574 s 为壳温延迟时间。应指出,此处 t 值为拟合值,精确度取小数点后 4 位,实际测试中可使用高精度时间测试装置。表 1 为 16 组试验的壳温延迟时间。

表 1 壳温延迟时间(s)

Table 1 The delay time of case temperature(s)

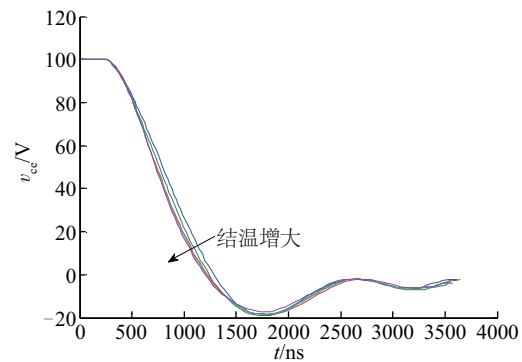
频率/kHz	电流/A			
	5	10	20	30
0.5	0.2542	0.2480	0.2834	0.2573
5.0	0.2560	0.2865	0.2998	0.2773
10.0	0.2574	0.2826	0.2851	0.2389
15.0	0.2843	0.2926	0.2939	0.2844

对 16 组试验的结、壳温均进行一阶指数拟合,其曲线度相关度均达到 0.995 以上。但因延迟时间很小,故壳温延迟时间的精确度取决于试验测试精度和数据拟合精度。另外需指出的是,随着 IGBT 模块的不断老化,其各层材料将产生退化,故与式(5)中对应的壳温延迟时间的数值将不断增大,因此根据该值也可对 IGBT 焊料层的老化状态进行分析与计算。

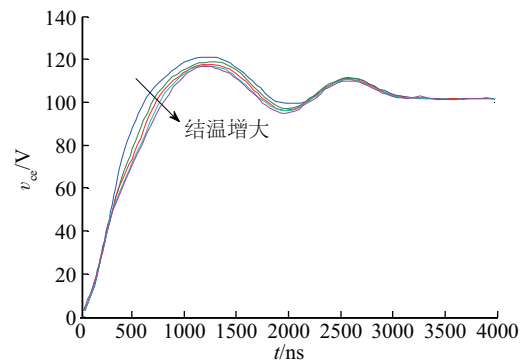
3.2 瞬态电特性研究

3.2.1 瞬态集射极电压温度特性研究

IGBT 模块热稳态的电瞬态过程中,分别在结温 30、50、70、90、110 °C 时通过示波器采集开通和关断过程 v_{ce} 的动态波形,并将各温度下的波形进行拟合处理得到其变化曲线。图 6 为各温度下开通和关断过程 v_{ce} 动态波形的对比曲线。如图 7 为提取到的开通时刻和关断时刻集射极电压最大变化率绝对值 $|(dv_{ce}/dt)_{\max}|$ 的变化曲线。



a. 开通过程



b. 关断过程

图 6 不同结温下开通、关断过程 v_{ce} 波形

Fig. 6 v_{ce} waveforms of the turn-on and turn-off process under different junction temperature

由图 6a 和图 7a 可知,开通时刻 v_{ce} 的下降速率随结温的升高而增大,这是由于注入漂移区的载流子浓度和迁移率均随温度的升高而增大,漂移区电导调制效应速率加快,导致开通过程中 v_{ce} 下降速率加快。由图 6b 和图 7b 可知,关断时刻 v_{ce} 的上升速率随结温的升高明显减小。其原因是:一方面随温度的升高,内部过剩载流子寿命延长,电流下降时间的延长使 v_{ce} 的上升速率变小;另一方面 v_{ce} 的恢复截止电压时间随温度的升高而延长,导致 v_{ce} 的上升速率变小。

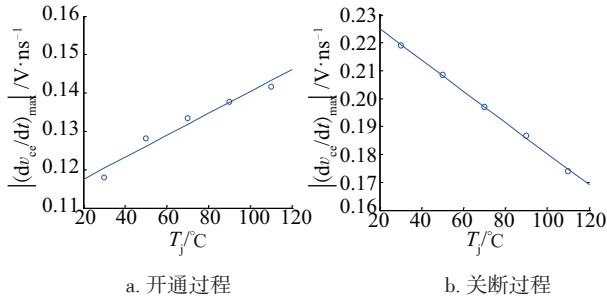
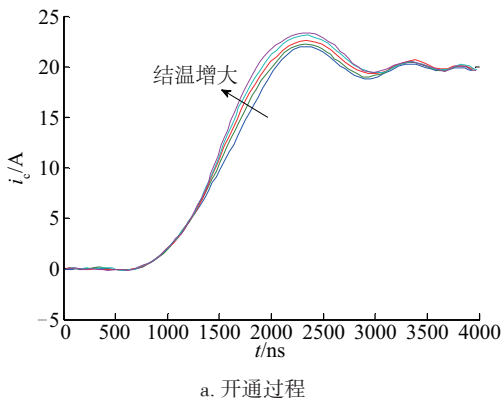


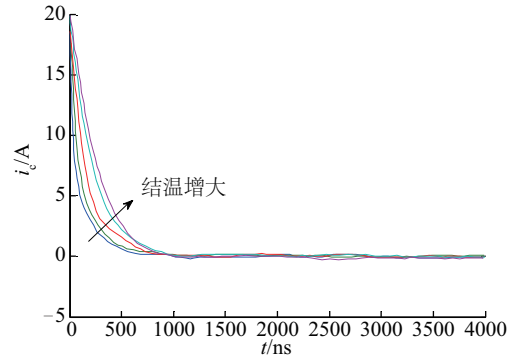
图7 $|dv_{ce}/dt|_{\max}$ 与结温的关系
Fig. 7 $|dv_{ce}/dt|_{\max}$ and junction temperature

3.2.2 瞬态集电极电流温度特性研究

IGBT 模块从开始工作到热稳态的热瞬态过程中,分别在结温 30、50、70、90、110 °C 时采集开通和关断过程 i_c 的动态波形,并对每个波形进行拟合处理得到其变化曲线。图 8 为开通和关断过程 i_c 动态波形的对比曲线。如图 9 为提取到的开通时刻和关断时刻集射极电流最大变化率绝对值 $|di_c/dt|_{\max}$ 的变化曲线。由图 8a 和图 9a 可知,随着结温的升高,开通时刻 i_c 的上升速率略变大,这与 v_{ce} 开通时刻波形下降速率随结温的升高而增大的原因相似。由图 8b 和图 9b 可看出,随着结温的升高,关断时刻 i_c 的下降速率明显变小,拖尾时间越来越长。这主要有两个方面的原因:一是 IGBT 等效电路中 PNP 晶体管的电流增益随结温的升高而增大,使 i_c 的衰减起点升高,导致关断时间延长;二是耗尽层载流子的寿命随着温度的升高而增长,导致其复合速率变慢,要移除注入基区的载流子需要更长的时间,从而造成拖尾电流衰减变缓,拖尾时间变长。集电极电流拖尾时间的增长也增大了 IGBT 模块的功耗,造成结温进一步升高,使电流的拖尾时间与模块结温形成正反馈,若散热条件不好,极易使 IGBT 模块结温超过极限值,造成模块失效。



a. 开通过程



b. 关断过程

图8 不同结温下开通、关断过程 i_c 波形

Fig. 8 i_c waveforms of the turn-on and turn-off process under different junction temperature

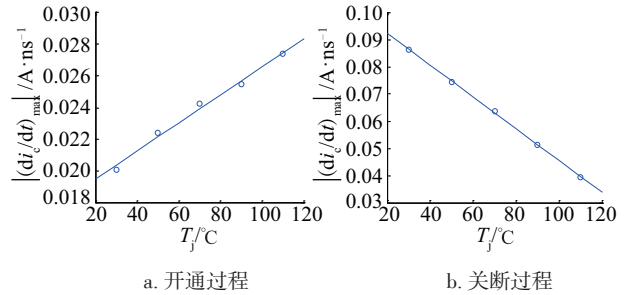


图9 $|di_c/dt|_{\max}$ 与结温的关系

Fig. 9 $|di_c/dt|_{\max}$ and junction temperature

4 瞬态电热特性应用研究

4.1 基于瞬态电热特性的结温探测研究

4.1.1 基于瞬态热特性的结温探测

根据损耗的数据手册计算方法,可计算得到其功率损耗值,进而计算其瞬态热阻抗曲线,所得 $Z_{th(j-c)}$ 实测值曲线如图 10 所示。

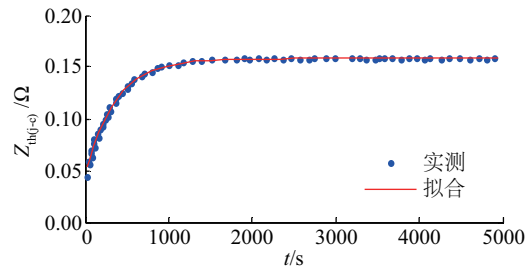


图10 瞬态热阻抗 $Z_{th(j-c)}$ 曲线

Fig. 10 The waveform of $Z_{th(j-c)}$

根据电热比拟理论,瞬态热阻抗曲线可用 Foster 模型表示,具体公式为:

$$Z_{th(j-e)} = \sum_{i=1}^n r_i (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}) \quad (6)$$

式中, r_i ——第 i 层热阻; τ_i ——第 i 层热时间常数。

选取 5 阶 Foster 模型对所得到的瞬态热阻抗曲线进行拟合(如图 10 所示),其精度满足拟合要求,相关参数如表 2 所示。

表 2 Foster 模型各阶参数

Table 2 The parameters of Foster module

参数	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶
r_i/Ω	0.0104	0.0098	0.1125	0.0102	0.0154
$(1/\tau_i)/s$	0.8143	0.9293	0.0028	0.6160	0.5852

针对某型号的 IGBT 模块,使用以上方法可确定不同老化程度下对应的瞬态热阻抗曲线以及对应的 Foster 模型参数,而实际工况中 IGBT 模块的功率损耗为实时监测参数,且其壳温易于监测,因此提取出一种结温实时监测的计算模型,用公式可表示为:

$$T_j(t) = T_c(t) + P_{loss}(t) \cdot Z_{th(j-e)} \quad (7)$$

4.1.2 基于瞬态电特性的结温计算

根据图 7 和图 9 的相关拟合情况可知,不同温度下 $|(dv_{ce}/dt)_{max}|$ 和 $|(di_c/dt)_{max}|$ 开通过程的变化幅度及线性度均低于关断过程,故选取关断过程参数进行结温计算模型建模,如图 7b 及图 9b 所示。

根据图 7b 及图 9b 及其拟合情况可知,结温 T_j 随 $|(dv_{ce}/dt)_{max}|$ 和 $|(di_c/dt)_{max}|$ 增大而减小,其拟合相关系数均在 0.999 以上,说明 $|(dv_{ce}/dt)_{max}|$ 和 $|(di_c/dt)_{max}|$ 温度敏感性较好,可用于结温计算。

以关断过程中 $|(dv_{ce}/dt)_{max}|$ 和 $|(di_c/dt)_{max}|$ 作为温敏参数,得到结温计算模型的表达式为:

$$T_j = A \times |(dv_{ce}/dt)_{max}| + B \quad (8)$$

$$T_j = C \times |(di_c/dt)_{max}| + D \quad (9)$$

式中, A 、 B 、 C 和 D ——瞬态电特性相关系数。

针对本文所研究型号的 IGBT 模块,其对应值为:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1787 & 422.3 \\ -1710 & 177.9 \end{bmatrix} \quad (10)$$

实验室下基于瞬态热特性的结温计算优点是测量简单,缺点是精度一般;基于瞬态电特性的结温计算优点是精度高,缺点是成本较高。

4.2 瞬态电热特性退化及其应用研究

4.2.1 瞬态热特性退化及其应用

由式(7)可知,瞬态热阻抗 $Z_{th(j-e)}$ 是定量描述瞬

态热特性的特征量,瞬态热特性与 $Z_{th(j-e)}$ 的变化反映模块的退化情况。工况实时获取 $Z_{th(j-e)}$ 即可探测结温并进行退化分析。风电工况下依据 IGBT 瞬态热特性进行结温监测及可靠性评估流程如图 11 所示。

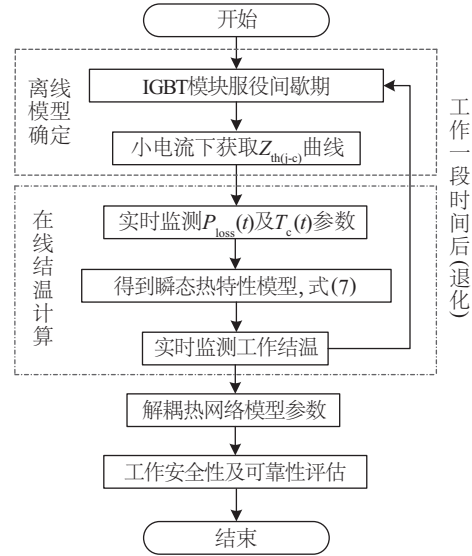


图 11 工况 IGBT 可靠性评估流程图

Fig. 11 The flow chart of reliability assessment of IGBT under operating condition

实际风电工况中,若利用瞬态热特性进行结温探测,功率损耗为实时监测参数,壳温测量易于实现,难点在于 $Z_{th(j-e)}$ 的获取。因 IGBT 退化较为缓慢,可认为相邻运行期 $Z_{th(j-e)}$ 不变。因此在工况停运期可附加电路测试,根据小电流(100 mA)下集射极电压 v_{ce} 与壳温 T_c 的线性关系获取 $Z_{th(j-e)}$ 曲线,解耦出热网络模型参数,或进而进行结温计算。热网络模型参数及结温分别反映模块电热属性状态及工作温度安全性。由多个停运期下获取的 $Z_{th(j-e)}$ 曲线,可获得热网络模型参数及工作温度安全余量的退化趋势。

4.2.2 瞬态电特性退化及其应用

由式(8)和式(9)可知,瞬态电特性相关系数 A 、 C 和 B 、 D 与结温存在线性关系,模块退化越严重,结温稳定值越高,因此在模块工作过程中,监测相关系数 A 等的变化规律,将反映 IGBT 的退化情况。风电工况下依据 IGBT 瞬态电特性进行结温监测及可靠性评估流程与图 11 类似。

实际风电工况中,若利用瞬态电特性进行结温计算,由式(10)中 A 和 C 参数可看出,其温度灵敏

度较低(ns级),故需加装较高采样速率的测量装置;在停运期可连接测试负载电路,在接近环境温度的2个不同温度点,利用双脉冲法测量并计算变化率值,即可获得如图7或图9所示的比例关系。工况下将变化率最大值带入比例关系,即可得到对应的结温。但由于测试温度2点较接近,将影响测试精度,因此可进行多点测量以提高准确性。现有市场已有预埋温度传感器的IGBT模块,如功率集成模块(PIM)及六单元(EconoPACK)FS系列等。该类模块更易实现瞬态热、电特性的实时监测与退化情况监测。基于瞬态热或电特性均可计算工况下的结温值,并且结温计算过程中的特征参量可反映IGBT的退化情况,可用于退化研究,进而对IGBT的健康状态和工作可靠性进行评估。

5 结 论

针对风电变流器中功率器件IGBT模块,分析IGBT中存在的电热耦合情况,并确定结温计算参数;设计并搭建IGBT瞬态热特性试验电路;根据测试结果对瞬态电热特性进行详细分析,提取结温计算方法,最后分析退化并推广到工况应用。主要结论如下:

1)根据瞬态热特性分析知,通过退化过程中壳温延迟时间的变化可判断IGBT焊料层的退化情况。

2)根据瞬态电特性分析知,影响开通及关断过程中电压电流变化率随温度变化趋势的原因十分复杂,载流子浓度和寿命、截止电压时间以及电流增益等多种因素均对变化率产生影响。由此对结温计算产生的精度影响需进一步研究。

3)工况下由瞬态热特性提取的结温计算方法,测试中需制造高精度小电流并对 v_{ce} 进行测试,但精度较好;由瞬态电特性提取的结温计算方法精度一般,但模型简单。

4)瞬态热或电特性中的特征参数均可用于IGBT模块的退化研究,进而评估其健康状态及可靠性。

〔参考文献〕

[1] Li Hui, Liao Xinglin, Zeng Zheng, et al. Thermal coupling analysis in a multichip paralleled IGBT module for a DFIG wind turbine power converter[J]. IEEE

Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(1): 80—90.

[2] Choi Ui-Min, Blaabjerg F, Lee Kyo-Beum. Study and handling methods of power IGBT module failures in power electronic converter systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5): 2517—2533.

[3] 盛振国, 王树军, 付德义, 等. 风电机组测量载荷工况对比研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(2): 303—309.

[3] Sheng Zhenguo, Wang Shujun, Fu Deyi, et al. Comparative study on measurement load cases of wind turbine generator systems[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2016, 37(2): 303—309.

[4] 陈明. 高温功率循环下绝缘栅双极型晶体管失效特征及机理分析[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(4): 119—126.

[4] Chen Ming. Failure characteristics and mechanism analysis of IGBT modules under high-temperature power cycling[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(4): 119—126.

[5] 阙春兰, 傅晓锦, 杨恩星, 等. 基于智能PEBB的风电变流器模组设计[J]. 太阳能学报, 2016, 37(3): 617—621.

[5] Que Chunlan, Fu Xiaojin, Yang Enxing, et al. The design of wind power converter based on intelligent FEBB[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2016, 37(3): 617—621.

[6] Luo Haoze, Chen Yuxiang, Sun Pengfei, et al. Junction temperature extraction approach with turn-off delay time for high-voltage high-power IGBT modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7): 5122—5132.

[7] 彭英舟, 周维维, 孙鹏菊, 等. 基于开通米勒平台电压的IGBT模块结温估计研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3254—3262, 3381.

[7] Peng Yingzhou, Zhou Luowei, Sun Pengju, et al. Study of IGBT junction temperature estimation based on turn-on miller platform voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3254—3262, 3381.

[8] Bryant Angus, Yang Shaoyong, Philip M, et al. Investigation into IGBT dV/dt during turn-off and its temperature dependence[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(10): 3019—3031.

[9] 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.

[9] Tang Yong, Wang Bo, Chen Ming, et al. Reliability

- and on-line evaluation of IGBT modules under high temperature[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 17—23.
- [10] 王春雷, 郑利兵, 方化潮, 等. 键合线失效对于 IGBT 模块性能的影响分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(增1): 184—191.
- [10] Wang Chunlei, Zheng Libing, Fang Huachao, et al. Analysis of the performance effect with bonding wires lift-off in IGBT modules[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(Sup1): 184—191.
- [11] Laurent D, Yvan A, Pierre-Olivier J. Comparison of junction temperature evaluations in a power IGBT module using an IR camera and three thermosensitive electrical parameters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(4): 1599—1608.
- [12] Chen Yuxiang, Luo Haoze, Li Wuhua, et al. Analytical and experimental investigation on a dynamic thermosensitive electrical parameter with maximum dI_c/dt during turn-off for high power trench gate/field-stop IGBT modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(8): 6394—6404.
- [13] 杨珍贵, 周维维, 杜 雄, 等. 风速记录差异对评估风电变流器可靠性的影响[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2566—2572.
- [13] Yang Zhengui, Zhou Luowei, Du Xiong, et al. Effect of different records of wind speed on reliability evaluation of wind power converters[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2566—2572.
- [14] Tu Pengfei, Wang Peng, Hu Xiaolei, et al. Analytical evaluation of IGBT turn-on loss with double pulse testing [A]. 2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA) [C], Hefei, China, 2016, 963—968.
- [15] Barlini D, Ciappa M, Castellazzi A, et al. New technique for the measurement of the static and of the transient junction temperature in IGBT devices under operating conditions [J]. Microelectronics Reliability, 2006, 46(11): 1772—1777.

TRANSIENT ELECTROTHERMAL CHARACTERISTIC TEST AND APPLICATION RESEARCH OF IGBT IN WIND POWER CONVERTER

Yao Fang¹, Hu Yang¹, Li Zheng², Li Zhigang¹

(1. School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. State Grid Tianjin Electric Power Company Chengdong Subsidiary, Tianjin 300250, China)

Abstract: Aiming at the Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) in wind power converters, the test method for transient electrothermal characteristics and application under working condition of IGBT module were studied. The electrothermal coupling effect of IGBT was analyzed, and the transient thermal, electrical characteristics of junction temperature calculation parameters were determined. The test system of electrothermal characteristic was designed and constructed. The transient thermal and electrical characteristics of IGBT were measured using the test system. The test results of transient thermal and electrical characteristics were analyzed in detail. Finally, the calculation model and the detection method of junction temperature under working condition were obtained. Then the degradation and its application of transient thermal and electrical characteristics were analyzed.

Keywords: insulated gate bipolar transistor (IGBT); electrothermal characteristic; junction temperature; transient; degeneration