

一种可提高IGBT可靠性的新型结温管控策略

张凯, 高峰

(国网山西省电力有限公司太原供电公司, 山西 太原 030012)

摘要: 变换器在运行过程中频繁和大范围地随机出力变化, 会导致 IGBT 模块内部结温剧烈波动, 使器件持续承受交变的热应力冲击, 严重影响器件的可靠性。提出一种通过调节驱动电压实现功率器件结温平滑跟踪和自适应管控的策略。首先, 基于简化的 IGBT 损耗分析模型, 阐述了驱动电压大小对 IGBT 损耗的影响。然后, 根据结温变化趋势的大小自动调节驱动电压, 在不影响变流器输出性能的同时最大程度抑制结温波动, 改善器件周期热应力, 提高器件运行可靠性和寿命。最后, 通过一种新型应力测试电路的结温跟踪管控实验平台进行实验测试, 证明了该结温跟踪管控策略具有可行性和有效性。

关键词: 可靠性; 结温管控; 驱动电压调节; 热应力测试

中图分类号: TM46 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed19220

A New Junction Temperature Control Strategy Which Improve IGBT Reliability

ZHANG Kai, GAO Feng

(Taiyuan electric power supply company of State Grid, Taiyuan 030012, Shanxi, China)

Abstract: In order to reduce thermal swing and improve the reliability of the IGBTs, a tracking control strategy for IGBTs junction temperature based on gate drive voltage adjustment were presented. Firstly, the influence mechanism of the gate drive voltage on IGBTs power loss was lucubrated with a simplified model of the IGBTs. The proposed strategy could automatically adjust the gate drive voltage according to the trend of junction temperature, which minimized the junction temperature fluctuation without affecting the converter output capability. A test platform of tracking control strategy was designed and implemented to employ a novel circuit for power module performance test. Experimental validation demonstrates the effectiveness and feasibility of the proposed tracking control strategy for IGBTs junction temperature.

Key words: reliability; junction temperature control; driving voltage regulation; thermal stress test

IGBT 功率器件作为变流器系统的核心部件, 对系统的安全可靠运行起着举足轻重的作用^[1-2]。变流器经常运行在功率大范围随机波动的严酷环境, 致使 IGBT 模块内部结温剧烈波动, 加之模块内部各层封装材料的热膨胀系数不一致, 器件持续承受交变的热应力冲击, 引起器件疲劳老化失效等问题, 最终导致器件的可靠性和预期使用寿命大幅降低。研究表明, 功率器件的结温波动幅度每增加 10℃, 其失效率将成倍增加^[3-4], 这是影响 IGBT 器件可靠性的一个十分重要的因素, 因此必须采取有效措施降低和优化器件的结温波动, 改善其热应力冲击, 提高器件的可靠性和运行寿命。

文献[5-6]通过调控开关频率来实现结温调

节, 但仅仅采用变频调温方法, 开关频率需要在较大范围内变化, 影响变流器输出波形。文献[7-8]通过调制方法来控制结温, 这种方法通过驱动信号连续脉宽调制(PWM)和非连续脉宽调制(DPWM)之间的切换策略来实现功率器件能耗控制进而调节结温, 该策略主要问题是会产生较高的输出纹波电压。文献[9-10]通过无功调节的方式, 在结温降低过程中, 通过带电流限幅无功电流注入, 然而, 无功电流主要通过反并联续流二极管传输, 事实上, 二极管过度导通会大大降低功率器件的寿命。

实际研究表明, IGBT 随着栅极驱动电压升高, 开通速度越快, 开通损耗和通态损耗都越低, 反之亦然。因此可根据需要来选择适当的栅极

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51107044, 50607007)

作者简介: 张凯(1967-) 男, 本科, 高级工程师, Email: zkaipower@163.com

驱动电压,进而实现器件损耗控制和结温的自适应调节。目前,尚未有文献基于该思路提出功率器件的结温平滑跟踪控制方法。本文在分析功率器件开关运行轨迹变化规律的基础上,选择在驱动层面上提高系统可靠性,提出了调节驱动开通电压实现损耗调节和结温平滑跟踪管控的策略及实现方案。首先,利用一种简化的 IGBT 损耗分析模型,分析和探讨了不同驱动开通电压对 IGBT 损耗的影响,提出了基于栅极驱动电压调整进而实现损耗及结温控制调节的新思路。所提结温跟踪管控策略的本质是调节器件本身的开关性能,实现对器件损耗实时控制,从而达到了抑制结温波动的效果。最后,通过实验测试对结温跟踪管控策略进行了验证,本文所提结温管控方法较之其他温控策略,不影响变流器输出性能。

1 原理与设计

IGBT 损耗主要由通态损耗、开通损耗和关断损耗组成。IGBT 的通态损耗与栅极开通电压 U_{GG} 呈正比例关系。由于 IGBT 开关速度相对较慢,随着开关频率的提高,开关损耗在整个器件损耗中的占比也变得比较大,应引起我们特别注意。图 1 为综合考虑了二极管的恢复特性和极间寄生电容以及杂散电感 L_s 得到的 IGBT 的开关时刻理想波形图。图 2 为非理想 IGBT 的开关损耗简化示意图。

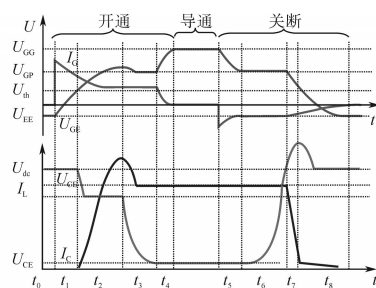


图 1 IGBT 的开关时刻理想波形图

Fig. 1 IGBT switching time ideal waveform

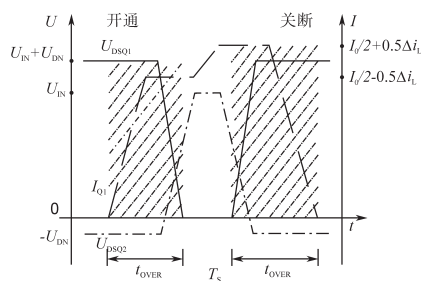


图 2 开关管开通关断损耗

Fig. 2 On and off Losses of switching devices

1.1 开通损耗

由于只需判定开通关断过程损耗随栅极电压的变化趋势,因此可以简化开关损耗的计算过程,将开关暂态近似线性化。忽略电流上升延时和电压拖尾过程中的能量损耗,IGBT 的开通损耗集中在开通时间段 T_2 和 T_3 ,如图 3 中阴影面积所示。

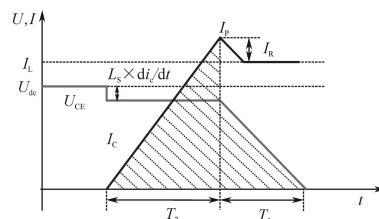


图 3 IGBT 开通过程的能量损耗分析

Fig. 3 Energy loss analysis in the process of IGBT opening

IGBT 模块内部集成了反并联续流二极管,其反向恢复特性是引起 IGBT 开通电流过冲的主要因素。在给定的反向恢复电荷 Q_{rr} 情况下,二极管反向恢复电流峰值 I_R 与前向导通电流变化率有关,即

$$I_R = \sqrt{Q_{rr} \cdot \frac{di_{c-on}}{dt}} \quad (1)$$

式中: i_{c-on} 为前向导通电流。

在 t_2 时间段内,由于换流回路中杂散电感的影响,引起集射极间电压降落,IGBT 的集射极电压 U_{CE} 为

$$U_{CE}(t_2) = U_{dc} - L_s \frac{di_{c-on}}{dt} \quad (2)$$

式中: U_{dc} 为变流器直流母线电压; L_s 为前向导通时寄生电感。

为简化运算分析,忽略 t_3 阶段内反向恢复电流对损耗计算的影响,开通过程的能量损耗 E_{on} 计算如下:

$$E_{on} \cong \int_0^{t_2+t_3} I_C \cdot U_{CE} \cdot dt = \frac{1}{2} (I_L + I_R) (U_{dc} - L_s \frac{di_{c-on}}{dt}) \cdot t_2 + \frac{1}{2} \cdot I_L \cdot U_{dc} \cdot t_3 \quad (3)$$

式中: I_L 为负载电流; I_C 为栅极电容电流。

上升时间 t_2 如下式所示:

$$t_2 = \frac{I_L + I_R}{di_{c-on}/dt} \quad (4)$$

IGBT 的集射极电压 U_{CE} 的下降时间 t_3 可由下式表示:

$$t_3 = \frac{U_{dc}}{|dU_{CE-on}/dt|} \quad (5)$$

结合式(2)~式(5),求得开通损耗为

$$E_{on} \cong \frac{1}{2} (I_L + \sqrt{Q_{rr} \cdot \frac{di_{c-on}}{dt}})^2 \cdot (\frac{U_{dc}}{di_{c-on}/dt} - L_s) + \frac{1}{2} \cdot I_L \cdot \frac{U_{dc}^2}{|dU_{CE-on}/dt|} \quad (6)$$

根据现有文献关于损耗研究的分析,IGBT 开通过程 t_2 时间段内的 di_{c-on}/dt 和 t_3 时间段内的 dU_{CE-on}/dt 可由下式表示:

$$\frac{di_{c-on}}{dt} = \frac{U_{GG} - U_{GE(th)}}{R_G C_{ies}/g_m + L_s} \quad (7)$$

$$\frac{dU_{CE-on}}{dt} = \frac{U_{GG} - (U_{GE(th)} + I_L/g_m)}{R_G C_{GC}} \quad (8)$$

式中: U_{GG} 为栅极驱动开通电压; $U_{GE(th)}$ 为开通阈值电压; R_G 为驱动电阻; g_m 为 IGBT 的跨导; C_{ies} 为输入电容, $C_{ies} = C_{GE} + C_{GC}$ 。

结合式(6)~式(8)可知,开通损耗 E_{on} 与栅极开通电压 U_{GG} 两者呈现正比例关系。

1.2 关断损耗

新一代的 IGBT 大多集成了场中止技术,它能比传统 IGBT 关断更快,基本没有电流拖尾,因此电流拖尾造成的功耗在总关断损耗中仅占有很小的比例。忽略电压上升延时和电流拖尾中的能量损耗,IGBT 的关断损耗集中在关断时间段 t_6 和 t_7 ,如图 4 中阴影面积所示。

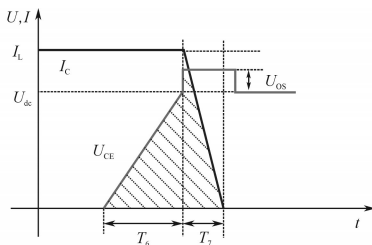


图4 IGBT 关断过程的能量损耗分析

Fig.4 The energy loss analysis of IGBT shutdown process

同理,可求得 IGBT 的关断损耗为:

$$E_{off} \cong \frac{1}{2} \cdot I_L \cdot \frac{U_{dc}^2}{dU_{CE-off}/dt} + \frac{1}{2} \cdot I_L^2 \cdot (\frac{U_{dc}}{di_{c-off}/dt} + L_s) \quad (9)$$

式中: i_{c-off} 为关断时反向恢复电流。

进一步可以看出,关断损耗 E_{off} 与栅极开通电压 U_{GG} 的大小无关。综合开通关断暂态过程的能耗分析与计算,随着栅极开通电压 U_{GG} 的增大,开关损耗和通态损耗均减小,总损耗相应降低,反之亦然。

1.3 暂态测试实验

本文选用 Infineon 的 FF50R12RT4 模块,直流侧电压 200 V,电流 20 A,环境温度 25℃。利用

双脉冲实验测得,在不同栅极开通电压 11~19 V、相同关断电压(-5 V)下,IGBT 的开通和关断波形如图 5 和图 6 所示。可以看出,随着栅极开通电压 U_{GG} 的增大,对应的开通速度越快,开通时间越短;关断过程不受影响。

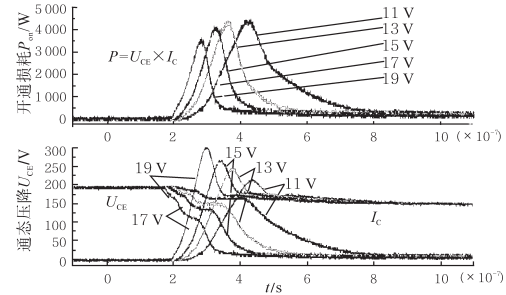


图5 不同栅极开通电压下 U_{GG} 的开通波形

Fig.5 Open waveforms at different gate opening voltages

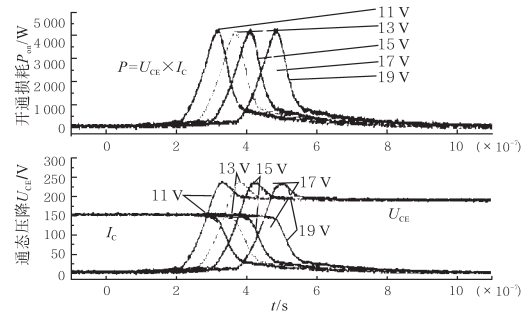


图6 不同栅极开通电压下 U_{GG} 的关断波形

Fig.6 Turn off waveforms at different gate opening voltages

在整个开关过程中,对电流、电压波形乘积的积分可以得到这个开关过程的能量损耗值。开关能量损耗随驱动电压大小的变化趋势与前一部分的分析相吻合,如图 7 所示。详细的开关动态实验测试参数如表 1 所示。图 8 给出了在直流实验中测得的通态压降 $U_{CE(on)}$ 随不同导通电流 I_c 和驱动电压 U_{GG} 的输出特性曲线,可以看出,在一定导通电流下,通态压降随着驱动电压的升高而降低,与前一部分的分析一致。

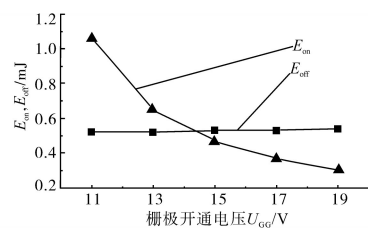


图7 开关损耗

Fig.7 Switching loss

表1 不同驱动开通电压下的开关动态参数

Tab.1 Dynamic parameters of switches under different driving voltages

U_{GG}/V	E_{on}/mJ	E_{off}/mJ
11	1.06	0.53
13	0.65	0.52
15	0.43	0.52
17	0.35	0.53
19	0.30	0.53

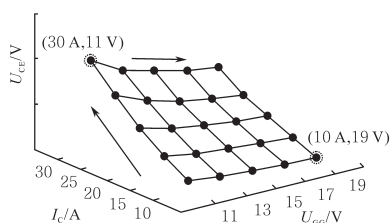


图8 通态压降

Fig.8 Through state pressure drop

2 结温跟踪管控策略

IGBT 结温上升期间,通过增大驱动开通电压来降低损耗从而抑制结温的上升,在结温下降期间,通过减小驱动开通电压来增大损耗从而抑制结温的下降。因此,根据结温的变化趋势,实时动态调节驱动开通电压,既能实现降温,也能适当升温,在一定程度上抑制结温波动,从而减小了器件受到的热应力冲击,实现升降自如的主动热管理。

IGBT 模块是一个密封的结构,在实际应用场景中,无法直接监测结温变化趋势,只能通过一些外部参数或 IGBT 的结构特点来推算结温。由于 IGBT 的结壳热阻抗 RC 的时间常数为 ms 级,因此 IGBT 的结温与其壳温之间存在着良好的映射关系,即借助对 IGBT 壳温的在线监控,可良好地获取模块内部的结温变化信息,从而实现对 IGBT 结温的控制。

图9为结温平滑热管控跟踪策略的基本流程图。其中,动态调节控制环由动态滤波器、采样保持器构成。动态滤波器用于消除测量壳温度信号中的噪声和干扰;采样保持器用来反映结温的变化趋势。线性电压调节器根据温度的变化趋势来实时调节驱动开通电压 U_{GG} 的大小。驱动电路的额定输出开通电压为 15 V,可实现 3 V 上下调节。

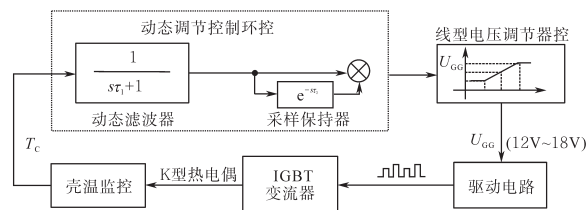


图9 结温跟踪管控策略基本框图

Fig. 9 Basic block diagram of temperature tracking control strategy

4 实验验证

图10给出了一种新型的功率器件应力测试电路,具体的测试参数为:直流电压 $U_{dc}=100V$,开关频率 $f_s=10kHz$,电容 $C=680\mu F$,电感 $L=1.22mH$,电阻 $R=0.4\Omega$ 。测试电路主要是由2个共用直流母线的变流器和1个阻感负载组成。该电路左、右侧变流器采用不同的调制度 m 和移相角度 α ,其中左侧变流器负责控制输出电压幅值,右侧变流器负责控制负载上的电流幅值和相位。以 T_1 管作为被测量和控制对象,通过左、右2个变流器协同控制策略,从而在很小的功率损耗情况下就可以对功率器件施加所需的电压电流应力,因此是模拟研究功率器件实际循环工况下电、热应力的一个理想的测试方式。图11给出了基于新型应力测试电路的部分工况下动态电流幅值变化实验图像。

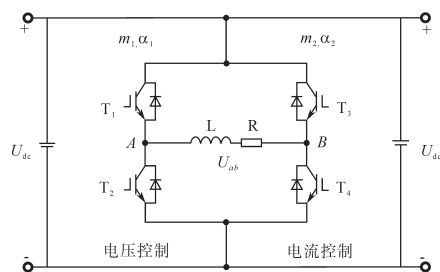


图10 一种新型的功率器件应力测试电路图

Fig.10 A new circuit for stress testing of power devices

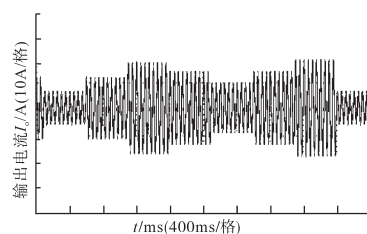


图11 动态电流幅值变化图

Fig.11 Dynamic current amplitude change diagram

基于新型应力测试电路的结温跟踪管控实验平台以数字信号处理器DSP作为核心控制器,IGBT的壳温监测采用一种基于MAX6675的K型热电偶温度传感器。在实验过程中,同时利用温度采集器对开封的模块结温进行观测,验证该温度管控策略的实施效果。图12所示为本文提出的基于损耗模型的在线结温预估结果与结温变化实测结果的对比曲线。控制前后IGBT的结温变化情况如图13所示。可以看出,在相同工况下,添加管控策略前后,IGBT结温波动的幅值从11.5℃降低到7.5℃,最高结温也下降了3℃,抑制结温波动效果明显,减小了器件承受的热应力冲击。

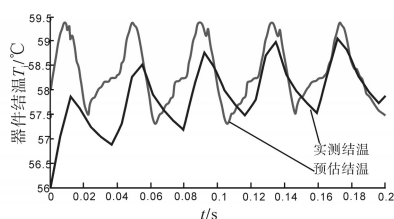


图12 预估结温与实测结果对比

Fig.12 Results comparison of the estimated junction temperature and actual measurement

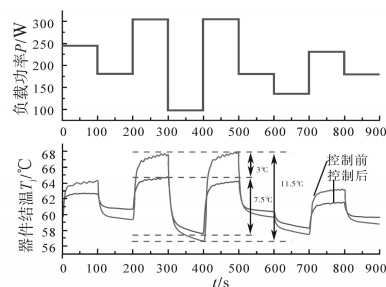


图13 结温跟踪管控实验结果

Fig.13 Experimental results of junction temperature tracking and control

5 结论

提出了一种基于驱动电压调节的IGBT结温平滑跟踪管控策略。首先,利用一种简化的IGBT损耗分析模型,说明了驱动开通电压大小对通态损耗和开关损耗的影响机理,并通过双脉冲实验对开关特性分析进行了验证。在此基础上,基于一种新型的器件应力测试电路,搭建了硬件

实验平台对该管控跟踪策略的可行性和有效性进行了证实。实验表明,该策略抑制结温波动的效果明显,减小了器件承受的热应力冲击。该结温跟踪管控电路在不影响变流器输出性能的同时,适合在实际应用场合中采用。

参考文献

- [1] 郑浩,王学梅,张波. SiC MOSFETs与Si IGBTs的性能对比研究[J]. 电力电子技术,2015,49(12):23-25.
- [2] 马晋,王富珍,王彩琳. IGBT失效机理与特征分析[J]. 电力电子技术,2014,48(3):71-76.
- [3] Lemmens J, Vanassche P, Driesen J. Optimal Control of Traction Motor Drives Under Electro-thermal Constraints[J]. Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(2): 249-263.
- [4] Wang H, Liserre M, Blaabjerg F. Transitioning to Physics of Failure as a Reliability Driver in Power Electronics [J]. Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(1):97-114.
- [5] Lixiang W, McGuire J, Lukaszewski R.A. Analysis of PWM Frequency Control to Improve the Lifetime of PWM Inverter [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(2):922-929.
- [6] Lemmens J, Driesen J, Vanassche P. Thermal Management in Traction Applications as Constraint Optimal Control Problem [C]//IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Seoul, Korea, 2012:36-41.
- [7] Lo Calzo G, Lidozzi A, Solero L. Thermal Regulation as Control Reference in Electric Drives [C]//Power Electronics and Motion Control Conference, Novi Sad, Serbia, 2012:1-7.
- [8] Weckert M, Roth-Stielow J. Chances and Limits of a Thermal Control for a Three-phase Voltage Source Inverter in Traction Applications Using Permanent Magnet Synchronous or Induction Machines [C]//European Conference on Power Electronics and Applications, 2011.
- [9] Ma K, Liserre M, Blaabjerg F. Reactive Power Influence on the Thermal Cycling of Multi-MW Wind Power Inverter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(2): 922-930.
- [10] Ma K, Blaabjerg F. Thermal Optimised Modulation Strategies of Three-level Neutral-point-clamped Inverter for 10 MW Wind Turbines Under Low-voltage Ride Through[J]. IET Power Electronics, 2012, 5(6): 920-927.

收稿日期:2018-06-25

修改稿日期:2018-08-28