

周期瞬态工况下 IGBT 交流加速老化方法研究

潘萧臣¹, 孙兆龙¹, 罗全明²

(1. 海军工程大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430000;

2. 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:针对以往直流加速老化方法不能复现周期瞬态工况下 IGBT 工作特性的情况, 提出一种对处于周期瞬态工况下 H 桥级联的 IGBT 模块进行交流加速老化的方法。首先对周期瞬态工况下的 H 桥级联拓扑进行分析, 然后对 PWM 控制下的单相全桥 IGBT 损耗进行建模及分析, 并且将直流加速老化和交流加速老化过程中功率模块的结温波动进行了对比分析, 依据 IGBT 常用的寿命解析模型 Lesit 模型以及仿真结果说明等效全桥电路的合理性。最后设计并搭建了交流加速老化实验平台并与原始 H 桥级联电路仿真结果进行了对比分析。说明该交流加速老化方法可以为研究特殊工况下的 IGBT 可靠性提供一种新思路。

关键词:周期瞬态; 交流加速老化; H 桥级联; 单相全桥; IGBT 模块

中图分类号: TN32 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd20877

Research on IGBT AC Accelerated Aging Method Under Cyclic Transient Conditions

PAN Xiaochen¹, SUN Zhaolong¹, LUO Quanming²

(1. School of Electric Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430000, Hubei, China;

2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology

(Chongqing University), Chongqing 400044, China)

Abstract: Aiming at the fact that the DC accelerated aging method can not reproduce the IGBT operating characteristics under cyclic transient conditions, a method for AC accelerated aging of H-bridge cascading IGBT modules under periodic transient conditions was proposed. Firstly, the H-bridge cascade topology under periodic transient conditions was analyzed, then the single-phase full-bridge IGBT loss under PWM control was modeled and analyzed, And the comparison of the junction temperature fluctuation of the power module during DC accelerated aging and AC accelerated aging was carried out. Temperature fluctuations were compared and analyzed. According to the commonly used life analysis model of the IGBT, the Lesit model and the results in the simulation, the rationality of the equivalent full-bridge circuit was illustrated. Finally, the AC accelerated aging experiment platform was built, the simulation results between the new circuit proposed and the original H bridge cascade circuit were compared and analyzed. This method can provide a new way to study IGBT reliability under special working conditions.

Key words: periodic transient; AC accelerated aging; H-bridge cascade; single phase full bridge; IGBT modules

随着各国科技军事实力的发展, 武器装备也将迎来更新换代, 各国都在加紧研制新一代的电磁能武器^[1], 例如美国陆上实验电磁炮, 炮口动能达到了 30 MJ, 释放如此巨大的能量需要可靠的瞬时电能变换装置, 而 IGBT 是电能变换装置中的核心器件。电磁发射是 IGBT 应用中的一种典型的瞬态工况, 在电磁发射过程中, 电力电子器件需要承受剧烈的脉冲冲击, IGBT 等元器件的可靠性直接关系到装备和人员的安全, 对于工作在

瞬态工况下的 IGBT, 国内外研究相对较少, 因此在这种情况下, 寻找一种合适的拓扑结构对脉冲工况下 IGBT 可靠性研究具有十分重要的意义。

老化实验分为直流加速老化和交流加速老化实验, 目前直流加速老化实验研究较多。文献[2]研制了一种用于门控功率晶体管的加速老化系统, 该系统可以用于探索不同的失效机制, 并且确定器件失效前的特征量。文献[3]提出了一种采用 IGBT 集电极漏电流对模块退化状态进行监

测的健康管理方法,并通过加速老化实验对方法进行了验证。文献[4]通过监测不同温度下集电极电流和集电极饱和压降曲线交点的对应关系,对IGBT模块的老化程度进行预测并通过老化实验验证了理论分析的有效性。文献[5]研究了汽车混合动力牵引中的高功率IGBT模块,并通过直流加速老化实验描述了可能出现的故障模式并获得了结果,评估了功率循环期间硅芯片的热和热机械应力的约束。文献[6]通过加速老化实验来获得间歇寿命数据,开发了一种用于IGBT间歇寿命测试程序的设计优化过程。文献[7]对IGBT模块进行高温下的功率循环实验,利用红外相机拍摄器件表面温度变化过程,得出可靠性降低时电气量的变化。但是以上实验都是直流功率循环老化实验,工况与实际情况有一定差距,老化过程没有开关损耗等动态损耗,也没有母线高压。文献[8]搭建了通过负载相连两个三相整流器实验平台,探究温度波动持续时间对IGBT模块寿命的影响,较好地模拟了实际工况,但是实验拓扑过于复杂。文献[9]搭建了单相全桥逆变器来复现风力发电系统运行工况,但是仅仅探究了利用关断延迟时间来预测结温的可行性,且观察关断延迟时间对测量设备精度要求较高。

本文首先对PWM控制下的IGBT损耗进行建模及分析,将直流加速老化实验和交流加速老化实验中功率模块的结温波动进行了对比分析,依据IGBT常用的寿命解析模型(Lesit模型),将原始电路仿真结果与加速老化实验平台结果进行对比说明等效全桥电路的合理性。最后设计并搭建了交流加速老化实验平台,研究周期瞬态工况下IGBT的可靠性。

1 原始电路的拓扑分析

现如今船舶电力领域、轨道交通和电力系统领域的逆变技术正朝着大功率、智能化、模块化的方向前进。H桥级联多电平逆变器由于损耗小、效率高且易于模块化的特点在大功率逆变领域得到广泛应用。为了满足输出kV等级的电压与10 kA等级的电流的要求,逆变装置可采用图1所示的单相H桥级联主电路的模块化结构^[10]。

脉冲逆变装置中主电路如图1所示,由四个单相半桥的二极管钳位三电平电路组成,每个单相半桥都由四个IGBT与两个反并联二极管组成^[11]。单相半桥的二极管钳位三电平逆变器有三

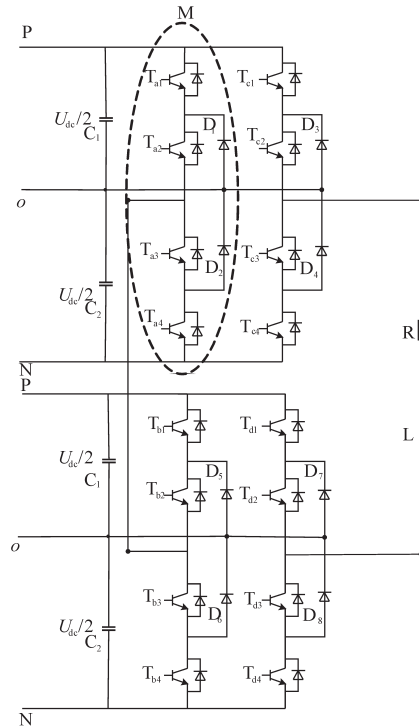


图1 单相H桥级联主电路

Fig.1 Single-phase H-bridge cascade main circuit

种稳定的输出电压为 $U_{dc}/2, 0, -U_{dc}/2$,就M部分分析,IGBT模块 T_{a1} 和 T_{a3} , T_{a2} 和 T_{a4} 工作在互补状态,每个开关承受的正向阻断电压为 $U_{dc}/2$ 。H桥级联电路共有 $\pm 2U_{dc}, \pm 3/2U_{dc}, \pm U_{dc}, \pm 1/2U_{dc}, 0$,九种输出电平。每个全桥具有相同的直流电压源,并且每个单元输出的电压具有相同的基波电压^[12]。级联九电平逆变器是由两个二极管钳位全桥直接串联叠加产生的一种级联多电平结构,多电平波形是通过三角载波移相各个H桥直接串联叠加而成,每个单元所受电热应力相似。因此级联九电平电路可以借助二极管钳位三电平模块来分析,二极管钳位三电平电路如图2所示。为简化实验以及降低实验成本,探究利用单相全桥电路用作实验电路的可行性。

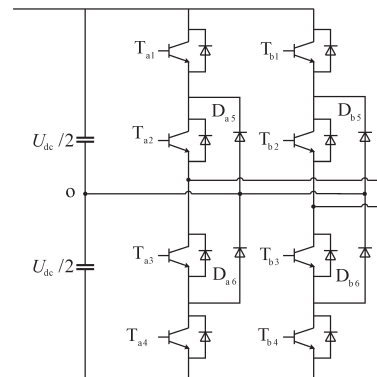


图2 二极管钳位三电平电路

Fig.2 Clamped three-level circuit of the diode

2 交流老化下 IGBT 的状态分析

2.1 IGBT 损耗分析

图3为单相全桥逆变电路,由于H桥结构的对称性,四个IGBT模块特性基本一致,电压、电流也只是相位的差异,因此只需要对一个IGBT损耗进行分析^[13]。

因为IGBT工作在周期瞬态工况下,工作频率随时间不断变化,相比于直流加速老化实验中损耗计算难度增加。

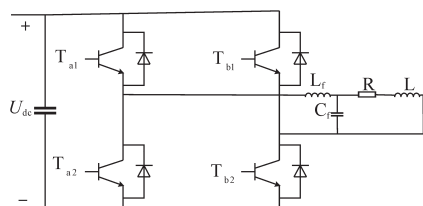


图3 单相全桥逆变电路

Fig.3 Single-phase full-bridge inverter circuit

首先计算IGBT与反并联二极管(FWD)在一个周期内的导通时间,不考虑死区时间的影响,占空比可以用下式表示^[14]:

$$D_T(k) = \frac{1 + m \cdot \sin(\omega t)}{2} \quad (1)$$

$$D_d(k) = \frac{1 - m \cdot \sin(\omega t)}{2} \quad (2)$$

式中: $D_T(k)$ 为IGBT的占空比; $D_d(k)$ 为反并联二极管的占空比; I_m 为电流幅值; m 为调制度。

t 时刻流过器件的电流值可以表示为

$$I = I_m \cdot \sin(\omega t) \quad (3)$$

当忽略电压电流在半个周期内微小的变化时,第 n 个在开关周期电流可用下式表示:

$$I(n) = I_M \cdot \sin(\omega t) = I_M \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N} \cdot n\right) \quad (4)$$

$$N = \frac{\frac{1}{T_c} \cdot f_c}{\frac{1}{T_v} \cdot f_v}$$

其中

式中: I_M 为第 n 个开关周期电流幅值; T_c 为三角周期; T_v 为正弦波周期; N 为载波比; f_c 为载波频率; f_v 为调制波频率。

在每个开关周期内器件的通态能量损耗 $E_{cond}(k)$ 与开关损耗 $E_{sw}(k)$ 可用下式表示:

$$E_{cond}(k) = \int_{D(k) \cdot T} U(k) \cdot I(k) dt \quad (5)$$

$$E_{sw}(k) = f[I_c(k), U_{DC}, T_j] \quad (6)$$

式中: $D(k)$ 为占空比; $U(k)$, $I(k)$ 分别为流过IGBT

或二极管 k 时刻的电压、电流; U_{DC} 为直流母线电压; T_j 为结温。

则IGBT与二极管的损耗在一个开关周期内可以表示为下式:

$$P_T(n) = f_c \cdot [E_{Tcond}(n) + E_{son}(n) + E_{soff}(n)] \quad (7)$$

$$P_D(n) = f_c \cdot [E_{Dcond}(n) + E_{rr}(n)] \quad (8)$$

$$P(n) = 4 \times [P_T(n) + P_D(n)] \quad (9)$$

式中: $P_T(n)$ 为IGBT总损耗; $E_{Tcond}(n)$ 为IGBT通态损耗; $E_{son}(n)$, $E_{soff}(n)$ 分别为IGBT开通和关断损耗; $E_{Dcond}(n)$ 为二极管通态损耗; $E_{rr}(n)$ 为快恢复二极管单脉冲下的关断损耗; $P_D(n)$ 为二极管总损耗; $P(n)$ 为单相全桥电路的总损耗。

当IGBT工作在较低的频率时,通态损耗是芯片发热的主要原因,当IGBT工作在较高的频率时,开关损耗将成为影响芯片发热的主要原因。

2.2 IGBT 结温波动分析

图4为直流加速老化实验的结温波动图,从图4中可以看出直流加速老化实验是持续给定一段时间的恒定幅值的电流,使器件结温上升到规定的温度,然后断开加热的大电流进行冷却降温,当温度下降到初始温度时,继续开始下一个加热循环。

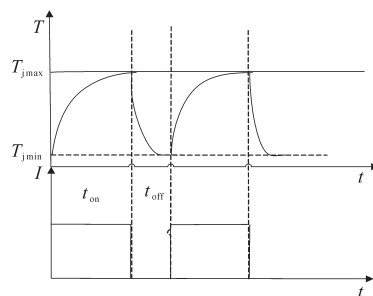


图4 直流加速老化IGBT结温波动

Fig.4 Junction temperature fluctuation of DC accelerated aging IGBT

器件结温 T_j 可用下式表示^[2]:

$$T_j = T_c + I_d U_{ds} R_{\theta jc} \quad (10)$$

式中: T_c 为壳温; U_{ds} 为漏极到源极的电压; I_d 为漏电流; $R_{\theta jc}$ 为结到壳的热阻。

图5为在交流加速老化实验中的结温波动图,当IGBT器件工作在PWM模式下时,在连续的脉冲,器件不停的开断过程中,IGBT结温不可能恢复到初始温度,结温变成累计上升的趋势^[15]。在周期瞬态工况下,结温波动幅度剧烈,因此在实际使用中需要考虑特殊工况下结温剧烈波动给器件带来的影响。

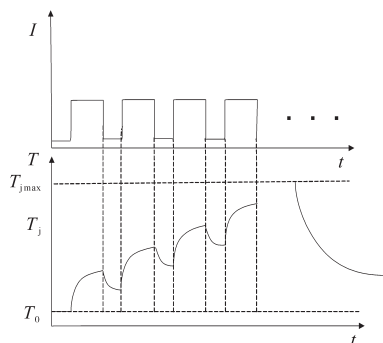


图5 交流加速老化结温波动

Fig.5 AC accelerated aging junction temperature fluctuation

3 仿真分析

为尽可能使老化平台的实际工况更加贴近真实情况,在前期工作中对二极管钳位三电平电路和二电平电路两种实验拓扑的工作特性进行比较,仿真电路如图6所示。

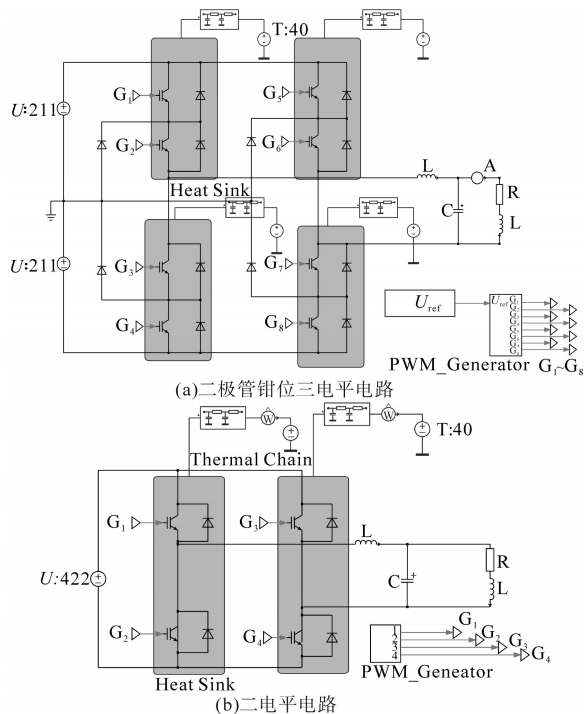


图6 仿真电路

Fig.6 Simulation circuit

根据 IGBT 常用的寿命解析模型 Lesit 模型,得到加速寿命的表达式^[16]:

$$N_f = A \Delta T_j^{-\theta} e^{\frac{Q}{kT_m}} \quad (11)$$

式中: N_f 为失效循环次数; A, θ 为实验数据拟合而得; Q 为激活能,取决于器件平均温度; ΔT_j 为结温波动; k 为玻尔兹曼常数; T_m 为 IGBT 工作过程中温度平均值。

根据上式可知 IGBT 模块寿命主要跟结温波动和平均结温有关,在 PLECS 仿真软件中对两种实验拓扑进行结温和功率损耗进行仿真分析,单相全桥仿真参数如下所示:输入电压 422 V,输出电压最大值 345 V,负载电阻 0.9 Ω ,负载电感 7 mH,散热器热容 255 J/K,散热器热阻 0.4 K/W。

仿真得到的结温与损耗波形,如图7、图8所示。

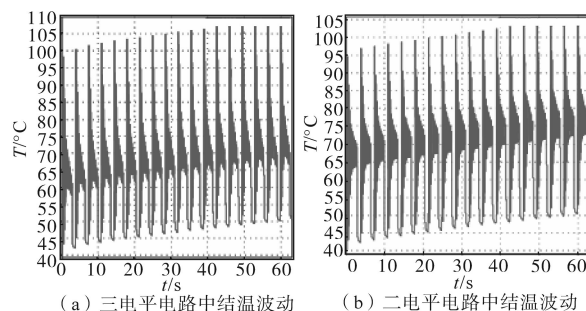


图7 18次工况结温波动对比图

Fig.7 Comparison chart of junction temperature fluctuation under 18 working conditions

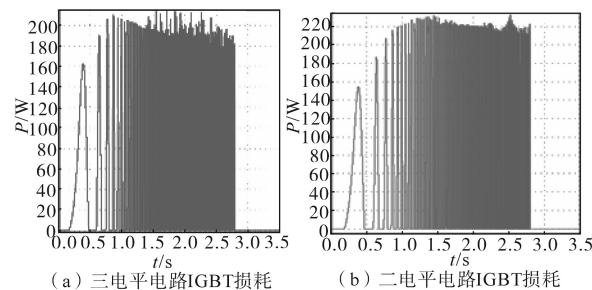


图8 单只 IGBT 单次循环总损耗对比图

Fig.8 Comparison of the total loss of a single IGBT in a single cycle

经过仿真发现,首先三电平电路与二电平电路经过 18 次逆变之后,三电平电路的最高温度接近 106 $^{\circ}\text{C}$,二电平最高结温为 104 $^{\circ}\text{C}$,均未超过器件安全工作结温。对比损耗发现,三电平电路与二电平电路的损耗波形类似,都是低频段对时间的积分值(即能量)较大,对器件结温有一个明显的冲击效应,对结温的影响较大。

4 实验验证

搭建单相全桥交流加速老化实验平台,平台直流侧电源采用型号为 CHroma62150H-450 的可程控直流电源,IGBT 采用 BSMGB60DLC 模块,负载侧为电阻 0.9 Ω ,电感 7 mH,实际老化平台正面图如图9所示。运用雨流算法将单只 IGBT 在两种拓扑下结温仿真数据进行对比。雨流算法是最初开发的用于通过计算材料所经历的完整峰-峰循环的次数,来分析材料疲劳中的随机应力变

化的方法,运用雨流算法可以探索材料功率循环的效果。将PLECS中仿真结果数据导入Matlab中,如图10所示。

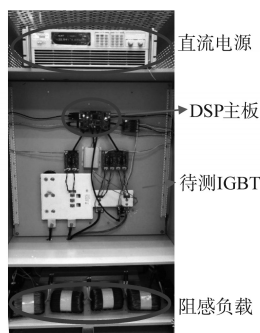
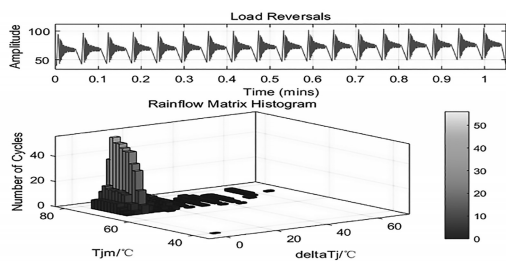
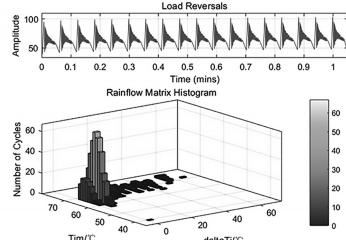


图9 加速老化实验平台结构

Fig.9 Accelerated aging experimental platform structure



(a) 二电平电路中IGBT所受电应力分布



(b) 三电平电路中IGBT所受电应力分布

图10 IGBT结温波动对比

Fig.10 IGBT junction temperature fluctuation comparison

通过雨流算法统计可以看出,老化实验平台循环应力分布与级联九电平相似,一定程度说明了等效的合理性。

5 结论

本文提出了一种将原始工况下九电平电路转换为两电平电路以进行交流加速老化的方法。首先对原始电路进行分析,对比了基本单元二极管钳位三电平逆变电路与二电平逆变电路中IGBT结温波动以及损耗分析情况,最后搭建交流加速老化实验平台。将二电平电路中IGBT结温仿真结果与原始九电平电路中的单个单元仿真结果进行对比,IGBT所受电应力分布相似,证明了在周期瞬态等特殊工况下,IGBT交流加速老化实验

电路拓扑等效转换拓扑的合理性。为IGBT交流加速老化提供一种新思路,具有经济性与可靠性。

参考文献

- [1] 陈明,胡安,唐勇,等. 绝缘栅双极型晶体管脉冲工作时结温特性及温度分布研究[J]. 西安交通大学学报,2012,46(4): 70-76.
- [2] Celaya J R, Wysocki P, Vashchenko V, *et al.* Accelerated aging system for prognostics of power semiconductor devices[C]// 2010 IEEE AUTOTESTCON, IEEE, 2010.
- [3] 刘宾礼,肖飞,罗毅飞,等. 基于集电极漏电流的IGBT健康状态监测方法研究[J]. 电工技术学报,2017,32(16): 183-193.
- [4] 李亚萍,周维维,孙鹏菊,等. 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[J]. 电工技术学报,2018,33(14): 3202-3212.
- [5] Bouarroudj M, Khatir Z, Ousten J P, *et al.* Degradation behavior of 600 V-200 A IGBT modules under power cycling and high temperature environment conditions[J]. Microelectronics Reliability, 2007, 47(9/10/11): 1719-1724.
- [6] Cheng Y, Fu G, Jiang M, *et al.* Investigation on intermittent life testing program for IGBT[J]. Journal of Power Electronics, 2017, 17(3): 811-820.
- [7] 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.
- [8] Choi U M, Blabjerg F, Jorgensen S, *et al.* Power cycling test and failure analysis of molded intelligent power IGBT module under different temperature swing durations[J]. Microelectronics Reliability, 2016, 64: 403-408.
- [9] 祝冲冲,王祥,罗皓泽,等. 基于热敏感电参数法的大容量IGBT模块动态结温在线检测研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(9): 2686-2694.
- [10] 马伟明,肖飞,聂世雄. 电磁发射系统中电力电子技术的应用与发展[J]. 电工技术学报,2016,31(19): 1-10.
- [11] 林城美,王公宝,汪光森,等. 基于脉冲跳变的空间矢量脉冲宽度调制策略[J]. 电机与控制学报,2016,20(1): 43-51.
- [12] 刘凤君. 多电平逆变技术及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [13] 徐铭伟. 绝缘栅双极型晶体管结温仿真模型及其应用研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.
- [14] 胡建辉,李锦庚,邹继斌,等. 变频器中的IGBT模块损耗计算及散热系统设计[J]. 电工技术学报,2009,24(3): 159-163.
- [15] 唐勇,陈明,汪波. 电力电子器件短时脉冲工作的结温特性研究[J]. 电力电子技术,2010,44(3): 88-90.
- [16] Bryant A T, Mawby P A, Palmer P R, *et al.* Exploration of power device reliability using compact device models and fast electro-thermal simulation[C]// Industry Applications Conference, 2006: 1465-1472.

收稿日期:2019-09-17

修改稿日期:2019-10-31