

IGBT 模块检测试验台的设计和制造探究

袁昊

(株洲长河电力机车科技有限公司 湖南 株洲 412000)

摘要: 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 在当前储能系统中具有非常重大的应用价值, 应用场景集中在风力发电装置、直流电力运输等大功率变流系统等。深入研究 IGBT 模块对整个变流系统具有重要的意义, 尤其是在 IGBT 模块检测试验台设计和制造过程中, 有利于整个 IGBT 的容量和可靠性的提升。本文首先分析当前 IGBT 模块的研究现状, 然后分析 IGBT 模块检测试验台的硬件设计, 继而对测试平台进行控制策略分析, 最后对 IGBT 模块在动态结温下的研究进行分析, 以供同行交流。

关键词: IGBT 模块; 检测试验台; 设计分析; 制造探索

0 引言

我国各项先进储能系统、交通运输系统和航空航天领域的发展迅速, 促进了大功率的变流系统的发展, 使其具有非常广阔的运用前景。从风力发电系统进行分析, 在新能源发电技术中风力发电是非常成熟的技术, 且已经具备规模化开发的条件。风力发电系统的成熟离不开大功率器件的设计和研究^[1]。大容量 IGBT 模块在大功率器件中起到了心脏的作用, 但从数据手册来看, 许多数据表现出较大的局限性。因此, 非常有必要对检测试验台展开深入的研究和分析, 从而提升 IGBT 模块的可靠性和有效应用。

1 IGBT 模块的研究现状分析

1.1 从基础测试内容分析

从 IGBT 模块的基础测试内容来分析, 其主要包括四个部分: 静态测试、动态测试、强度测试和短路测试。静态测试的研究包括栅极、集电极和发射极三方面内容。下面从实际的运行过程加以分析。

静态测试中各项参数是由器件本身内部的结构和温度来进行调控的, 其中各项参数对 IGBT 模块运行时的影响非常小, 实际研究中静态参数获取较难, 且对实际工况影响小, 故研究较少。

动态测试是对模块在连接或断开连接的过程中的动态参数进行分析, 以各项时间、损耗和峰值等为主。动态参数当中, IGBT 功率损耗对 IGBT 的结温影响较大, 其中开关的损耗和导通的损耗过程表现出较大的影响, 前者比后者大 2 倍左右。各项动态参数也会因为各项电压和电阻等的变化而出现变化。所以在实际工况研究过程中, IGBT 动态参数实际应用价值更大, 且容易在工况中获得。

强度测试是测试雪崩耐量和断开过程的安全工作区, 确保额定电压以内不会出现击穿。短路测试包括电流的时间、最大值和过程中的各项特性。强度测试和短路测试是极限量测试, 在常规工况中影响因素也较小。所以对 IGBT 模块进行各项研究, 主要集中在对动态测试的研究和分析上。

1.2 从动态测试方法分析

从 IGBT 模块的动态测试方法上进行分析, 主要包括三种测试手段: 离线测试、准在线测试和在线测试。

离线测试就是将部分实验条件固定之后, 对 IGBT 承受的各项参数进行调整, 将电压、电流或温度等应力值和实际工况中需要承受的应力设置为一致, 然后对其开关的特性进行测试, 并获得一定的数据。这项测试类似于空白实验, 具有很好的参考价值。值得肯定的是, 离线测试手段非常简单, 容易实现, 且成本低。其不足之处表现在, 每次的测试只是对特定的某个电压和电流等参数进行测试, 不能够将实际变流器的运行进行结合。测试过程中, 双脉冲测试应用非常丰富。

准在线测试即理想化的工作状态测试, 就是将变流器进行简化, 在不消耗功率的情况下进行 IGBT 工况测试。这是一种工况复现测试手段, 成本高、方法复杂, 但测试过程中变流器能够和实际工况运行紧密结合, 对器件的应用具有很好的参考价值。一般选择基于 H 桥的工况复现作为应用手段。

在线测试即实际过程中可以获得各项参数, 这种测试结果非常准确^[2]。但受限于 IGBT 的研究不够深入, 极限条件实验的测试过程中, 变流器的正常工作可能受损, 存在财产损失的问题。加上变流器本身安装地点偏远, 想要多次展开测量的难度大, 这无形之间也增加了测试的难度。

基于这些客观分析, 动态测试方法中, 准在线测试

是非常值得肯定的,这种研究是基于实验室和现场工况之间的一个过程,能够获得较好的动态特性。

2 IGBT 模块检测试验台的设计和制造

以系统结构到检测试验台的详细设计过程展开论述。首先是系统结构,具体见图1。在进行IGBT模块的工况复现检测试验台研究时,可将其分为四个部分:测试平台、示波器的数据采集、数字控制器和上机位监控。四个部分分别对应三个层次:指令层(上机位监控)、交换层(数字控制器和数据采集)和运行层(硬件测试平台)。长时间尺度和短时间尺度对应的各项数据在采集之后能够储存,以供后续使用。

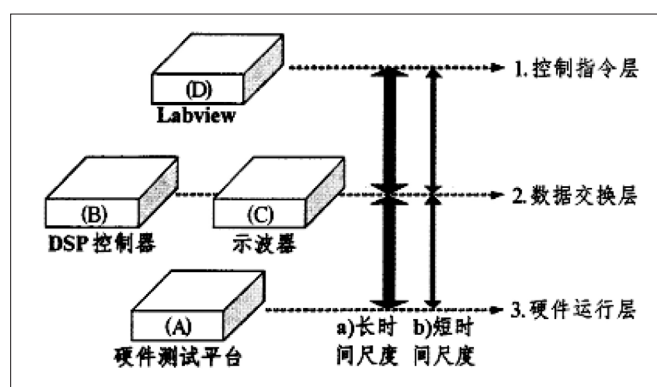


图1 IGBT模块系统结构

这个检测试验台包括工况复现测试和双脉冲测试两种功能,测试过程中能够获得大量的与动态特性相关的信息,采集短时间内的尺度数据,对IGBT进行动态特性研究。

(1) 在工况复现测试时,采集长时间的尺度数据,可以对实际工况的相关情况进行研究。丰富的数据对比研究能够获得最佳的实际运行工况结果。这样的检测试验台是根据电脑设置完成,各项测试的电压和电流均可设置,自动完成测试,自动保存。工况复现测试的目的有两个:第一是在运行过程中,可获得关键器件的静态和瞬态的应力值和热电耦合能力,这能够为大容量IGBT在变流器中的实际运用提供理论的指导和方法的指示;第二是在研究实际变流器的关键器件中,可获得不同环境温度下,电气应力的变化情况和分布规律,这为优化大容量功率模组奠定较好的基础^[3]。

(2) 双脉冲测试的目标是对IGBT模块运行承受的应力和实际工况应力一致时,进行大容量IGBT模块的连接和断开。其主要目的有两个:第一是获得各项动态特性,包括连接和断开后的电压尖峰、电流下降率、损耗、延时时间等,这些对工况复现测试有非常重要的帮助;第二是对工况复现测试进行校正,将动态参数和实际工况之间的关系分析出来。

以H桥拓扑作为测试原理,如图2所示。在工况复

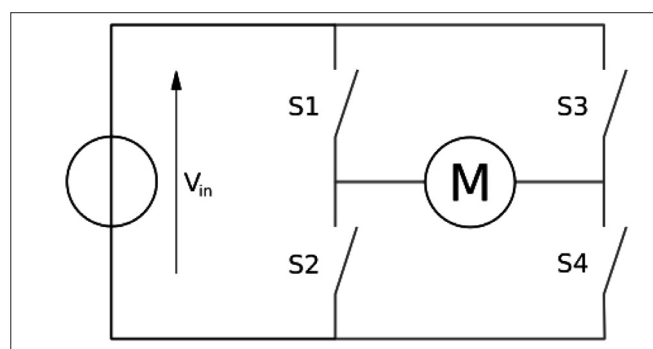


图2 H桥拓扑工况复现测试图

现测试过程中,为了更好地减少功率损耗,DUT和AUX两个桥臂用电感 L 进行连接,IGBT的开关状态的变化能够指导负载电感 L 中的电流大小,使得整个模拟工作得到进行。工况复现测试平台在实际工作的过程中,设备采集到的各项参数,包括电压、电流等,能够对实际的工况运行进行指导。

在此基础上,结合风力发电的电网系统,对工况复现平台进行简单分析和模拟。两电平三相的风电并网逆变器的拓扑如图3所示。其中,单 L 滤波是滤波器,逆变器中桥臂中值连接着电网。 V_a 代表逆变器的桥臂电压, e_g 则是电网电压。单 L 滤波器在整个过程中的等效电路图如图4所示。设置时,并网逆变器滤波发出后,三相升压变压器作为中间传输进行电压传递,高压电网是最终传输。对两个图进行分析发现,H桥中DUT连接模拟并网器的A相,AUX侧桥臂连接 V_g ,模拟等效电路图和图4基本一致。整个工况复现测试主要是使得DUT侧桥臂相关的开关电器和电流与实际工况中一致。工况复现测试在研究时,DUT侧桥臂中相关参数和A相桥臂中的各项参数非常接近,这样可以很好地达到模拟的目的。工况复现检测试验台中,各项IGBT的动态特性也能够帮助实现准在线测试的目的。实际风力发电的并网逆变器在工作时,母线电压是一个范围,在几百伏到上千伏之间^[4]。从实际条件出发,设置母线电压为1050V,逆变器则是选择升压变压器,连接电网之后,输出线的电压等级相对丰富,可获得480~800V的等级。经过筛选,以540V最为合适。在整个研究过程中,测试电路部分主要是将IGBT模块的工作状态呈现出来,在逆变器的运行中,各项电压和电流参数可很好地提取,整改IGBT模块在实际工况中的各项动态特性得以很好地呈现出来,结温变化的情况也能够展现出来。这样的研究对提升大容量IGBT模块在实际工作中的可靠性具有很好的帮助。

3 测试平台进行控制策略

测试平台的控制策略包括两种方法:H桥拓扑闭环控制、死区效应和补偿。

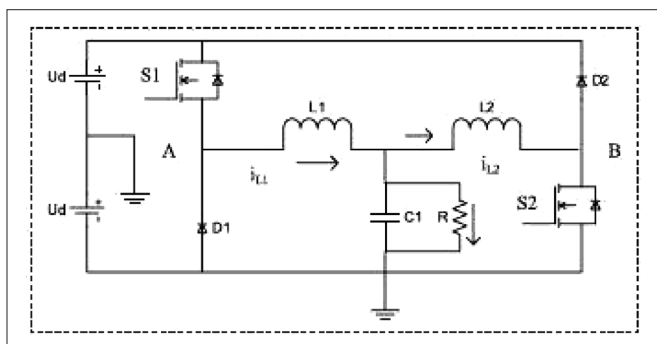


图 3 两电平三项的并网逆变器

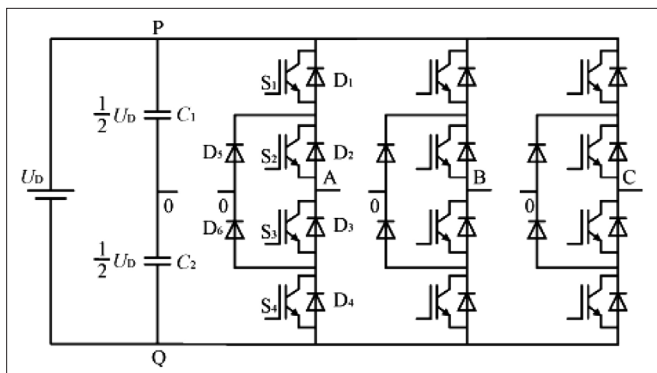


图 4 两电平三相并网逆变器的等效电路图

3.1 H 桥拓扑闭环控制

H 桥拓扑闭环控制中，建模、电流闭环控制和功率传输影响是关键内容。IGBT 模块在工况复现平台中以 H 桥拓扑为主要手段，两个侧桥臂以双极性 SPWM 进行控制。电流闭环控制中，AUX 侧桥臂作为辅助桥臂，选择开环控制更合适；DUT 侧桥臂的闭环控制是为了确保在实际风电并网变流器中能够将工况模拟出来^[5]。SPWM 调制过程中，为了减少电感的影响，两个桥臂使用相同的载波。功率传输过程中，因各项电阻、电感等均会出现影响，AUX 桥臂电压进行调整可模拟实际变流器并网电压，电感进行调整可模拟传输时的功率。但因负载之后，AUX 侧桥臂的电压的改变会对功率进行改变，可对其进行调整，获得在有功功率下和无功功率下的范围变化曲线，进而确定最佳的电流，确定传输范围。

3.2 死区效应和补偿

死区时间能够很好地避免母线短路造成的器件损坏。死区时间的引入，相当于在电感的两端中放入具有叠加功能的次谐波，其在进行分解后，基波电压和电感电流二者的相位相反，死区时间引入之后造成的次谐波形成了死区效应^[6]。在三相并网变流器中进行死区补偿具有很大的必要性，这样能够很好地减小死区带来的谐波的影响，对模拟过程中实际工况的呈现具有非常正面的帮助。在进行 IGBT 模块的检测试验过程中必须进行死区补偿，补偿之后可获得很好的效果，电感和电流均更加符合实际风电并网过程中的要求。

4 IGBT 模块在动态结温下的研究

在动态结温下造成的 IGBT 模块失效主要有两种，分别是长期疲劳磨损造成的失效和短期的热击穿造成的失效。

(1) IGBT 模块材料组成中，芯片、焊接层、铜层和铝线等都容易出现失效。长期失效中，因铝键合线与焊料层出现老化而表现出失效比较常见。IGBT 模块内各项材料的膨胀系数各有差异，长期的疲劳损伤会使得各层时间出现空洞，逐渐形成脱层，最终造成了功率器件的永久失效。

(2) 短期热击穿的失效中，过流、短路、电流不均等都会使得芯片出现瞬态过温，造成失效。在 IGBT 模块的研究过程中，芯片结温检测是非常基础的，需要对极限运行、寿命和快速过温保护等进行研究。对芯片结温进行在线数据分析，指导完成实时过热保护，能帮助 IGBT 模块实现更好地运用，也能够帮助 IGBT 模块实现更大的应用潜能。热敏感电气参数能够将当前模块内的内部结温信息呈现出来，这种测试过程不用对模块进行封装或是破坏，也不会使变流器终端在准在线的条件下完成各项测试，这也是当前功率器件结温检测的热点内容^[7,8]。IGBT 断开过程中的电压是较为重要的参数。通过对电压进行测量能够获得在断开过程中的信息。获得该项参数后，对其进行提取，并结合温度进行校正。不同型号的 IGBT 对应的开关特性有差异，在前面获得的数据中，延迟时间和电压均已经获得，校正之后就能很好地完善数据手册，进一步确定断开的延时时间、IGBT 结温情况和电流之间的信息。在工况复现平台过程中，电极电流和时间能够反向推导 IGBT 模块的结温情况，获得准确的数值。测量过程中一般选择热敏电阻方法完成^[9,10]，但该方法反应时间短暂，使得结温表现出滞后性。这部分的研究还表现出一定的空白，需要更深入的研究。在一个负载周期当中，IGBT 模块的损耗和结温会随着电流的增加而增加；IGBT 模块的损耗和结温会随着负载的增加而降低。这是已经证实的。

5 结语

检测试验台虽然能够对 IGBT 模块进行多元化地测量，也能够模拟许多实际运行的工况，但实际运行本身是更加复杂的，模拟过程也是准在线测试，实际影响因素更多，因此需要在多方面进行完善和深入研究。在搭建大容量的 IGBT 工况复现测试过程中，本次研究仅从双桥臂电压和电流上进行简单地研究，这个过程中如何考虑结温的影响或实际的变流器的影响，还需要进一步地深入探索。在动态特性的研究中，功率损耗和结温影

(下转第 8 页)



图 8 现车流砑调整板紧固结构



图 9 标准 K13NK 车流砑调整板紧固结构



图 10 样车检修改进验收后

目前,用户反馈该批车使用情况很好,通过具体的检修改进,很好地对检修、改进设计方案进行了验证,表明了该批车的检修、改进设计方案完全合理,且经济可行。

参考文献:

- [1] 中国铁路总公司. 铁路货车厂修规程 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.
- [2] 中华人民共和国铁道部. 铁路货车制动装置检修规则 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.
- [3] 铁道部标准计量研究所. 铁道车辆强度设计及试验鉴定规范: TB/T 1335-1996 [S]. 北京: 中华人民共和国铁道部, 1996.

作者简介: 张靓 (1972.08-), 男, 汉族, 山西大同人, 本科, 工程师, 研究方向: 铁路货车检修、制造技术。

(上接第 4 页)

响的研究是围绕可靠性展开的,在实际工况中,可靠运行是最基本的,IGBT 模块的极限寿命也是需要深入分析的,这样才有助于更好地预测器件的年限,从而减少损失。

参考文献:

- [1] 郭远欣,王学梅,张波.一种改进的 IGBT 模块结温提取算法及实验研究 [J]. 电源学报, 2021,19(01):205-214.
- [2] 陶海敏,何湘宁. IR2110 在驱动大中功率 IGBT 模块中的应用 [J]. 电气应用, 2002 (09):44-46.
- [3] 任斌,黄永章. 压接型 IGBT 器件单芯片子模组可靠性寿命仿真研究 [J]. 华北电力大学学报 (自然科学版), 2020,47(3):53-61.
- [4] 邓二平,赵志斌,张朋,等. 压接型 IGBT 器件与焊接式 IGBT 模块热阻测试方法对比研究 [J]. 智能电网, 2016,4(07):631-638.
- [5] 胡亚辉,张卫东,张雷,等. UPFC 换流阀 IGBT 模块近场电磁骚扰分布特性研究 [J]. 电气技术, 2015(09):1-6.

- [6] N. 沃马罗, M. 奥苏基, Y. 霍希, 等. 1200V 和 1700V 新型 IGBT 模块沟槽及电场截止型 IGBT 低注入续流二极管 [J]. 电力电子, 2004(04):44-47.
- [7] 王鹏,王松楠. IGBT 模块中温度传感器 (NTC) 的使用方法 [J]. 科技资讯, 2006(36):11.
- [8] 周维维,周生奇,孙鹏菊. 基于杂散参数辨识的 IGBT 模块内部缺陷诊断方法 [J]. 电工技术学报, 2012,27(05):156-163.
- [9] 何智鹏,李岩,侯婷,等. 基于等效电导率的压接型 IGBT 器件温度场仿真 [J]. 南方电网技术, 2021,15(01):19-24.
- [10] 周生奇,周维维,孙鹏菊. 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 [J]. 电力自动化设备, 2013,33(02):8-13.

作者简介: 袁昊 (1988.07-), 男, 汉族, 湖南株洲人, 本科, 工程师, 研究方向: IGBT 测试设备。