

研
究
开
发

6.5 kV 高压 IGBT 的并联应用研究

李 华, 杨 光, 杨 涛, 欧阳柳

(株洲南车时代电气股份有限公司 技术中心, 湖南 株洲 412001)



作者简介: 李 华 (1978-), 男, 主任设计师, 从事大功率高压 IGBT 的应用研究及配套门极驱动器开发工作。

摘 要: 随着变流器单机容量的不断扩大及中间电压的不断提高, 对 6.5 kV 高压 IGBT 的并联应用需求也越来越多, 为了满足该需求, 特进行了 6.5 kV 高压 IGBT 的并联应用研究, 包括理论分析、研究性试验及工程化设计开发及试验。结果表明: 6.5 kV 高压 IGBT 的并联取得了很好的均流效果, 能够满足变流器批量工程应用要求。

关键词: IGBT; 并联应用; 均流; 脉冲整流器

中图分类号: TM46

文献标识码: A

文章编号: 1000-128X(2011)04-0014-03

Application Research on Parallel-using of 6.5 kV High-voltage IGBT

LI Hua, YANG Guang, YANG Tao, OUYANG Liu

(Technology Center, Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Along with the increasing of the converter power rating and DC-Link voltage, paralleling using of 6.5 kV IGBT modules become urgent. In order to meet this demand, correlative research and design was pursued, including theory analysis, research test, prototype converter design and test etc. Good current-sharing achieved for paralleled 6.5 kV IGBT modules which satisfied the demands of batch converter products.

Key words: IGBT; parallel connection; current-sharing; pulse rectifier

0 引言

IGBT 是一种压控型电力电子器件, 具有驱动功率小、导通压降低、开关损耗小及元件容量大的特点。自 1985 年进入实际应用以来, IGBT 已经成为功率半导体器件的主流^[1]。

IGBT 的并联应用能够提供更高电流密度、更均匀的热分布、更灵活的布局以及更高的性价比, 在机车牵引^[2]、风力发电^[3]及光伏发电^[4]等行业都有广泛的应用。

本文重点研究 6.5 kV 高压 IGBT 的并联应用, 通过理论分析及试验验证, 为 6.5 kV 高压 IGBT 的工程化并联应用打下坚实的基础。

1 6.5 kV 高压 IGBT 并联考虑要素

为了保证并联 IGBT 的均流效果, 同时保证并联 IGBT 的安全可靠工作, 必须在器件选型、门极驱动器设计、主电路设计、散热设计等诸多方面加以考虑, 否

则会导致实际设计的产品达不到需要的均流效果, 甚至导致 IGBT 器件损坏^[5]。

1.1 并联 IGBT 器件的选型

首先, 选择正温度系数的 IGBT 有利于并联 IGBT 的自动均流, 因并联使用正温度系数的 IGBT 在相同的管压降下结温低的承担更大的电流, 相关曲线参见图 1。

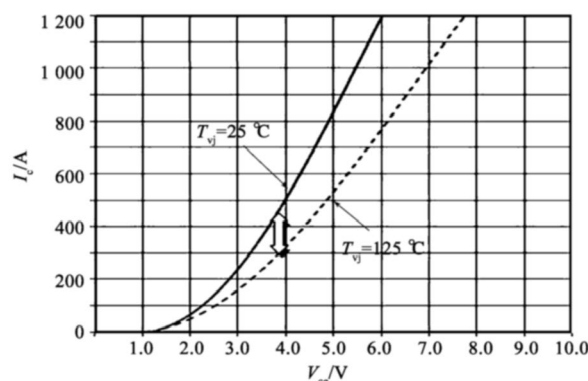


图 1 正温度系数 IGBT 的 V_{ce} 和 I_c 的关系

其次, 选择具有相近动静态参数的 IGBT 进行并联有利于提高均流系数, 主要包括的参数及其影响参见

收稿日期: 2011-04-07

表1。

另外, 并联使用的 IGBT 最好根据动静态参数进行配对使用, 如果可能, 尽量使用同一个批次的 IGBT 进行并联。

表1 动静态参数及影响

影响因数	动态均流	静态均流
饱和电压 V_{CESat}, V_f		√
转移特性 $I_c(V_{GE})$	√	
开启电压 V_{GEth}	√	
开关时间 $t_{don}, t_{doff}, t_r, t_f$	√	
工作结温 T_{vjop}	√	√

1.2 驱动器设计

首先, 并联使用的 IGBT 其驱动信号的延时应尽量小, 各并联 IGBT 之间的驱动信号时间差最好控制在几十纳秒以内。

其次, 驱动电路应有相近的尽量小的电路寄生参数, 以避免过大的寄生参数导致驱动信号的振荡。

另外, 并联使用 IGBT 的驱动器应有合适的输出阻抗, 以优化开关特性, 同时在保证器件安全动作的前提下尽量减小开关损耗。

1.3 主电路设计

主电路的对称性直接关系到各并联支路的均流, 也就是说好的均流设计各并联支路应有基本相同的等效电阻及等效电感。对于各个并联支路, 因各支路的等效阻抗不完全相同, 导致实际加在各并联 IGBT 的压降有几十到几百毫伏的差异。这个看似很小的差异会导致各并联支路电流有明显差异, 实际差异取决于并联 IGBT 的 I_c/V_{ce} 转移特性, 图1曲线也直观地说明了这一点。

图2为两元件并联的 IGBT 相模块等效电路示意图。

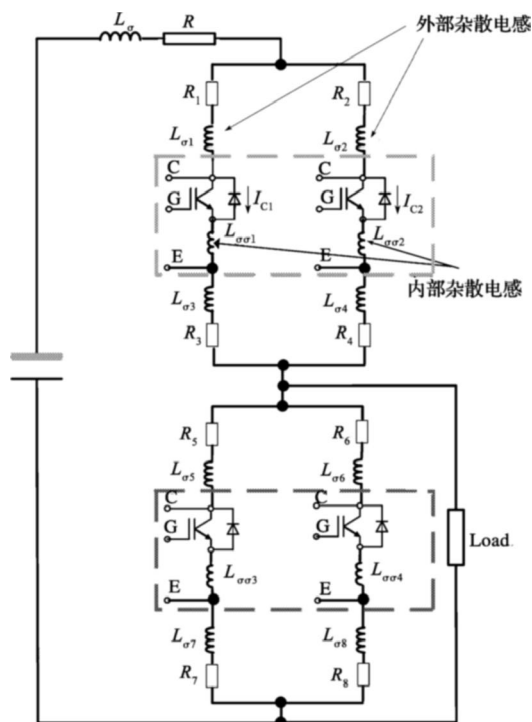


图2 两元件并联 IGBT 相模块等效电路图

由图2可知, 各并联支路的布局、布线、Busbar设计甚至是螺钉的连接都会导致各并联支路阻抗的差异。

图3为并联支路电阻差异导致支路电流差异的示意图, 此时不考虑电感差异的影响。

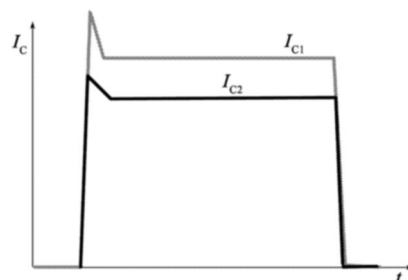


图3 各 IGBT 支路电流示意图 ($R_{c1} < R_{c2}$)

图4为并联支路电感差异导致支路电流差异的示意图, 此时不考虑电阻差异的影响。

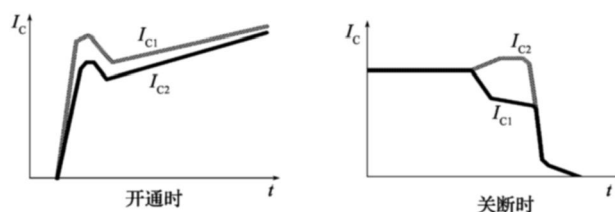


图4 各 IGBT 支路电流示意图 ($L_{c1} < L_{c2}$)

1.4 热设计

为了提高各并联支路的均流性, 好的热设计也是一个必要的条件, 因为即使保证了各并联支路有基本相当的发热 (损耗), 如果散热不一样, 同样会导致各支路 IGBT 结温的差异, 从而影响均流。对于各并联支路来说, 应该有基本相当的散热条件, 即各并联支路应均匀散热。

1.5 其他

以上各并联要素从各个不同角度列出了提高并联均流系数的方法, 但是因体积及成本等因数限制要保证各要素条件基本相当有时也十分困难。为了进一步提高均流系数, 采用各并联支路串接电感以提高均流系数也是一个简单有效的办法, 具体方法参见图5。

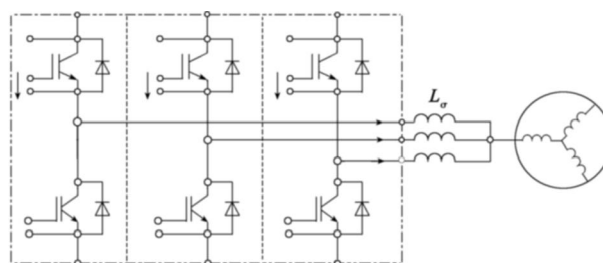


图5 三元件并联方法示意图

2 研究性试验及试验结果

在 6.5 kV 高压 IGBT 的工程化并联应用前, 为了找到最优的布局、布线、门驱、Busbar 设计等方案, 特进行了相关研究性试验, 主要研究了 2 个 6.5 kV/600 A 高压 IGBT 的并联及 3 个 6.5 kV/600 A 高压 IGBT 的并联。

2.1 两元件并联应用研究

图6为2个6.5 kV/600 A高压IGBT的并联应用研究试验电路。

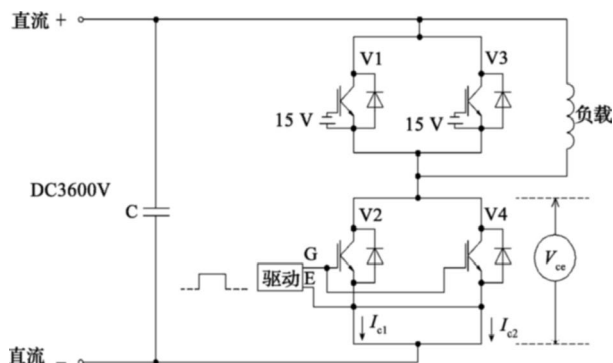


图6 两元件并联研究性试验原理图

对V2、V4这2个并联的IGBT进行测试，试验时2个并联的IGBT共用1个门极驱动器， V_{ce} 为并联IGBT上的电压， I_{c1} 为流过V2上的电流， I_{c2} 为流过V4上的电流，V1、V3 2个元件为续流管。

图7为2个6.5 kV/600 A高压IGBT的并联试验结果。

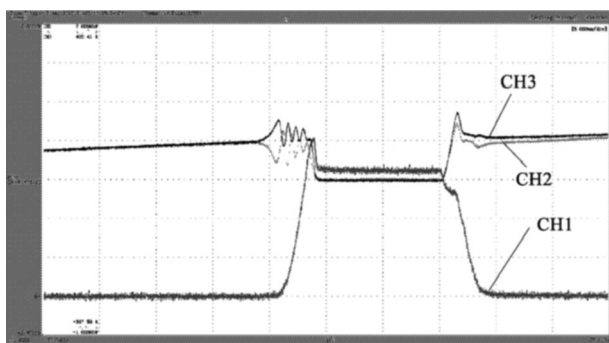


图7 两元件并联试验结果 (CH1:1000V/Div, CH2、CH3:500A/Div)

试验结果表明2个并联的IGBT有很好的静态均流，在IGBT开通及关断瞬间出现些许动态不均流，其主要原因是未进行IGBT的批量筛选配对。

2.2 三元件并联应用研究

图8为3个6.5 kV/600 A高压IGBT的并联应用研究试验电路图。

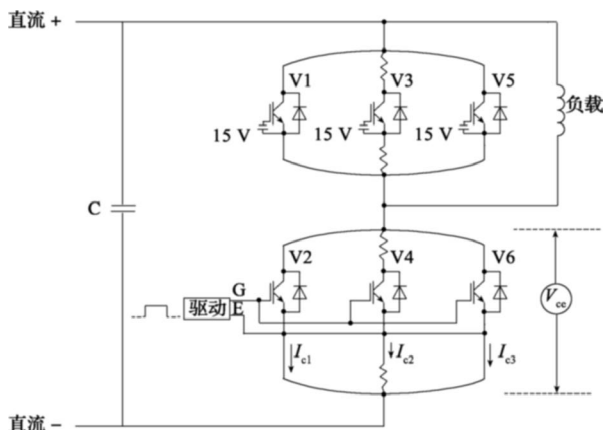


图8 三元件并联研究性试验原理图

试验原理和两元件并联试验基本相同。对V2、V4、

V6 3个并联的IGBT进行测试，试验时3个并联的IGBT共用1个门极驱动器， V_{ce} 为3个并联IGBT上的电压， I_{c1} 为流过V2上的电流， I_{c2} 为流过V4上的电流， I_{c3} 为流过V6上的电流，V1、V3、V5 3个元件为续流管。

图9为3个6.5 kV/600 A高压IGBT的并联试验结果。

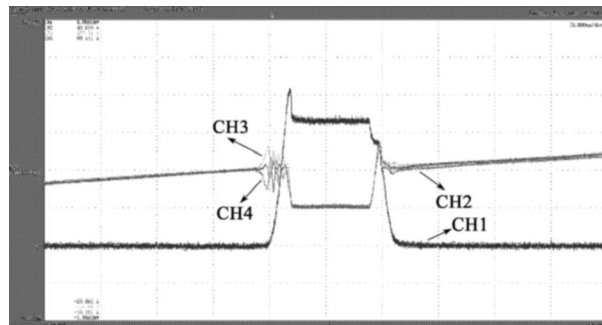


图9 三元件并联试验结果 (CH1:1000V/Div, CH2~CH4:500A/Div)

试验结果表明3个并联的IGBT有很好的静态均流，在IGBT开通及关断瞬间出现些许动态不均流，其主要原因也是未进行IGBT的批量筛选配对。

3 应用于脉冲整流器及试验结果

在完成相关应用研究后，根据应用研究的成果进行了工程化设计开发，设计了1个2.4 MW的单相脉冲整流器，每个相桥臂采用3个6.5 kV/600 A高压IGBT并联，具体电路参见图10。

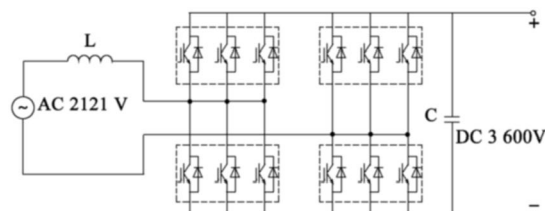


图10 2.4 MW 单相脉冲整流器电路原理图

该脉冲整流器的总输出容量达到了2.4 MW，3个并联IGBT的总电流有效值约为1 200 A，分配到每个并联IGBT上的电流有效值达到了约400 A。

脉冲整流器的试验结果参见图11，CH1、CH3、CH4

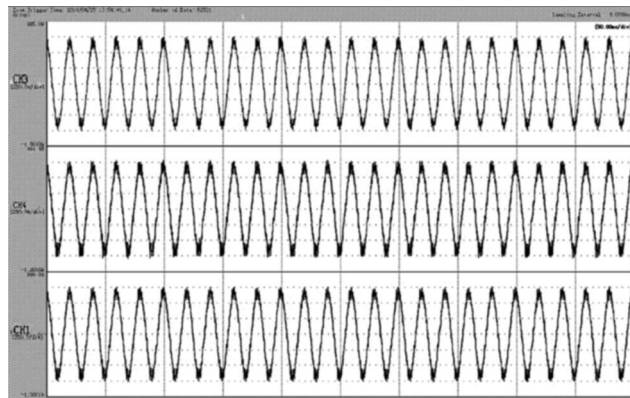


图11 2.4 MW 单相脉冲整流器输入电流波形

(CH1、CH3、CH4:250A/Div) (下转第30页)



图 5 公共入口界面

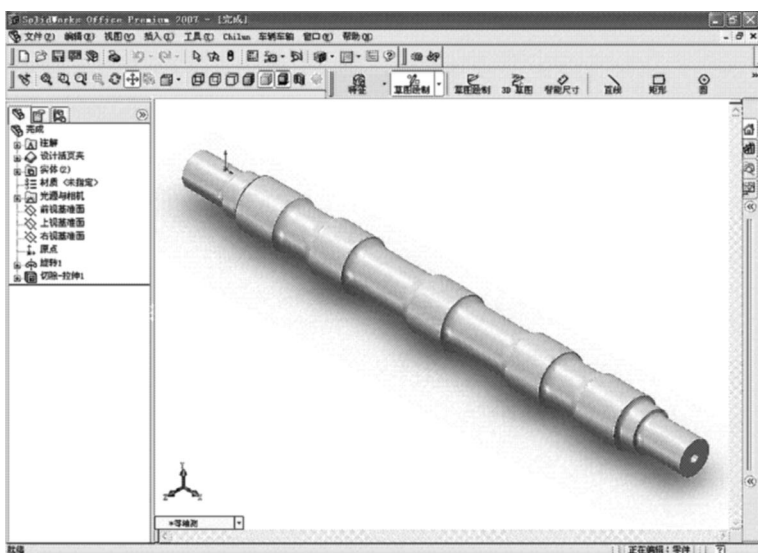


图 6 生成的车轴实体

数据进行驱动,生成所需的轴模型,返回给用户。其基本工作流程为:与SolidWorks建立连接;打开车轴模型文件并激活;修改变量尺寸;有疲劳强度要求时,

进行强度校核;根据新尺寸重建模型。

运行程序,得到车轴的实体图形如图6所示。

5 结论

以SolidWorks二次开发平台为基础,结合铁道机车车辆车轴的结构特征,生成了一套具有车轴参数库模块的参数化建模插件,实现铁道机车车辆三维参数化设计,显著提高了车轴的设计效率。

本文采用关键技术的优点:①以SolidWorks为平台,界面操作简单和较强的开放性;②数据库的引用,实现了后续工作的可扩展性;③采用参数化技术,有效避免了重复劳动。

本文以轴系零件结构参数化设计为例,尝试结构三维参数化设计,为铁道机车车辆承载结构,例如转向架其他零部件——螺旋圆弹簧悬挂系统、螺栓连接件、构架、驱动系统、制动系统和轴承等参数化和结构选型奠定了理论基础。

参考文献:

- [1] Belou I, Holland H, Kuhn M, Sapojniko D, Schröter W, Schwarze M. CAD-gestützte Auslegung von Radsatzwellen für Schienenfahrzeuge[J]. Der Eisenbahningenieur, 2000, 51(5):48-49.
- [2] 陶元芳,安喜平,于万成,潘 鲜.用VC++对SolidWorks进行二次开发[J]. 太原科技大学学报,2006,27(2):102-105.
- [3] 叶炜威. SolidWorks2006实体建模与二次开发教程[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
- [4] 穆群英. 动态链接库(DLL)及其应用[J]. 石油仪器,2001,15(3):49-52.
- [5] 沈 炜,徐 慧. Visual C++数据库编程技术与实例[M]. 北京:人民邮电出版社,2005.
- [6] 米彩盈,李 蓓. 高速动力车车轴强度分析的工程方法[J]. 铁道学报,2002,24(2):26-29.
- [7] 求是科技. Visual C++6.0 程序设计从入门到精通[M]. 北京:人民邮电出版社,2006.
- [8] 严隽堇,傅茂海. 车辆工程[M]. 第三版. 北京:中国铁道出版社,2007.

(上接16页) 分别为流过3个并联IGBT上的电流。

试验结果表明,流过3个并联IGBT的电流相当,在总有效值电流为1 200 A的情况下,各并联支路之间的电流差在30 A以下,达到了很好的均流效果。

4 结论

通过理论分析、研究性试验及工程化设计开发,6.5 kV高压IGBT的并联取得了很好的均流效果,为后续批量工程应用打下了坚实的基础,在机车牵引、中高压变频器等方面应用前景广阔。

参考文献:

- [1] 钱照明,盛 况. 大功率半导体器件的发展与展望[J]. 大功率变流技术,2010(1):1-9.
- [2] Wen Huiqin, Liu Jun, Zhang Xuhui, Wen Xuhui. Design of high power electronic building block based on parallel of IGBTs for electric vehicle[C]. Beijing: Power Electronics and Motion Control Conference, 2008.
- [3] 杨恩星. 低速永磁直驱风力发电变流器若干关键技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2009.
- [4] 王宝归,周 飞,童亦斌. 基于IGBT 并联技术的250 kW光伏并网逆变器[J]. 大功率变流技术,2009(4):26-30.
- [5] 荣智林,忻 力,陈燕平,饶沛南,李 华. TGA6型主辅一体化IGBT变流器[J]. 机车电传动,2010(5):25-28.