

大功率试验台用高压 IGBT 变流器模块研制

刘 峰, 李彦涌, 杨 涛, 朱 武, 杨 林
(中车株洲所电气技术与材料工程研究院, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 高压 IGBT 变流器模块采用电路及元器件一体化设计, 其叠层母排和散热器成为模块设计的难点。文章基于大功率试验台基本电路拓扑结构对高压 IGBT 变流器模块主电路及关键器件选型进行研究, 采用有限元仿真分析了其叠层母排的设计, 并通过试验验证了其水冷散热器的设计满足应用要求。

关键词: 变流器模块; IGBT; 叠层母排; 水冷散热器; 试验台

中图分类号: TN303 文献标识码: A 文章编号: 2095-3631(2017)05-0079-04
doi:10.13889/j.issn.2095-3631.2017.05.014

Design of High Voltage IGBT Converter Module for High Power Test Bed

LIU Feng, LI Yanyong, YANG Tao, ZHU Wu, YANG Lin
(CRRC ZIC Research Institute of Electrical Technology & Material Engineering, Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: High-voltage IGBT converter module applies the integration design including the circuits and components, in which the design of laminated bus-bar and radiator is a challenge. Based on the main circuit of a high-power test-bed, the circuit structure of high-voltage converter module and key component selection were studied in this paper, design of laminated bus-bar was analyzed by finite element simulation, and design of water-cooled radiator was verified through the test, satisfying the application demands.

Keywords: converter module; IGBT; laminated bus-bar; water-cooled radiator; test bed

0 引言

目前, 在电力电子器件的应用过程中, 常按照典型电力电子电路所需要的电路拓扑结构, 将多个相同器件或多个相配合的器件集成为一个变流器模块^[1-3]。通过模块化设计, 可以缩短变流器的开发周期, 降低研制成本, 提高产品的可靠性、互换性和维护性。基于绝缘栅双极晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT) 的变流器模块在风电、光伏、机车^[4]等交流传动系统领域得到了大量的应用, 本文主要针对高压 IGBT 变流器模块在大功率试验台领域的应用进行相关分析, 解决其器件选型、叠层母排设计、散热器设计等核心问题, 以提高变流器模块的性能及可靠性。

1 大功率试验台电路结构及主要技术参数

某型大功率试验台是近期研发的水冷型试验台, 主要用于电机模拟实际工况试验。该试验台电路使用两电

平拓扑结构, 前端 2 个整流支路并联; 后端每 2 个桥臂并联, 形成三相逆变输出和一个斩波支路。大功率试验台工作时, 先将交流电整流成直流, 然后通过逆变转为三相变压变频 (VVVF) 的交流电。其基本电路如图 1 所示, 其中虚线框内为大功率试验台所用的变流器模块 ($M_1 \sim M_4$)。变流器模块所用的器件均为 IGBT 元件, A1、B1、C1 和 A2、B2、C2 为输入端, A、B、C 为输出端。

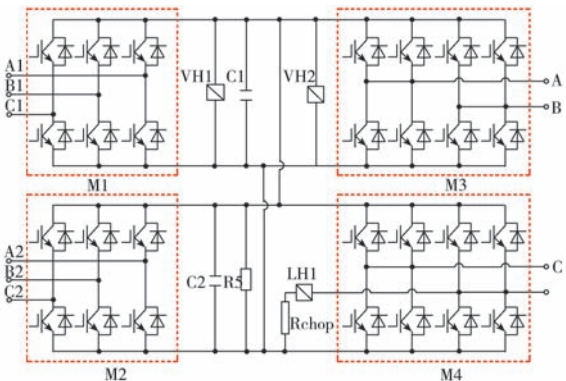


图 1 大功率试验台基本电路
Fig.1 Main circuit of high power test bed

收稿日期: 2017-08-04
作者简介: 刘峰 (1985-), 男, 工程师, 主要从事变流器模块总体设计研究。

该试验台主要技术参数如下:

海拔	$\leq 2\ 500\text{ m}$
运行环境温度	0~40 ℃(高于 40 ℃时,降额使用)
输入电压	AC 2 020 V
输出电压	0~AC 2 800 V
中间直流电压	3 600 V
输出频率	50 Hz
开关频率	1 050 Hz
输出电流	3 × 250 A(有效值)
额定效率	0.97

2 变流器模块

通用化的变流器模块集成了 IGBT 元件、散热器、温度传感器、门极驱动单元、门极驱动电源、脉冲分配单元、支撑电容、低感母排等部件,既可用于四象限变流器,也可用作逆变器,还可作为斩波器来使用。此外根据系统的安装空间和散热条件,变流器模块可选用铝散热器强迫风冷、热管散热器和水冷等多种冷却方式,其基本构件是通用的。

根据图 1 所示大功率试验台基本电路,为了便于变流器模块更加通用及可互换,同时满足试验台输出功率及开关频率的要求,本设计中将变流器模块设计为一个具有 4 个桥臂(第一相至第四相)的变流器模块(图 2)。每一个桥臂包括 2 个单管 IGBT 元件,一个模块包含 8 个 IGBT 器件。整流端空置一路后做三相整流;逆变端的一个模块做输出端的 A 相和 B 相,另一个模块做输出端的 C 相和斩波相。

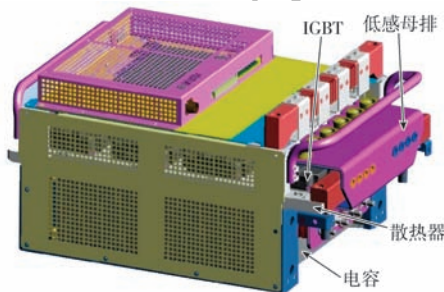


图 2 变流器模块
Fig.2 The converter module

3 关键器件选型

3.1 IGBT 器件选型

在变流器模块中,IGBT 为主型器件,其可靠性影响变流器模块的可靠性,因此 IGBT 选型^[5]非常重要。

(1) 电压定额计算:

$$U_{CE} = (U_{DCmax} \times K_1 + \Delta U) \times K_2 \quad (1)$$

式中: U_{DCmax} ——最高直流电压, V; K_1 ——电压裕度系数; K_2 ——安全系数; ΔU ——开关过电压, V。

(2) 电流定额计算:

$$I_c = I_{ACmax} \times \sqrt{2} \times K_3 \quad (2)$$

式中: I_{ACmax} ——逆变器输出最大电流, A; K_3 ——电流尖峰系数。

根据式(1)、式(2)计算可知,本文所设计的 IGBT 模块额定电压 $U_{CE}=5\ 104\text{ V}$, 额定电流 $I_c=230\text{ A}$ 。

3.2 电容选型

变流器的中间直流环节需要有支撑电容器来维持直流电压的恒定。支撑电容器主要有 3 个作用,即直流滤波、提供瞬时脉冲电流及提供电动机端的无功补偿。

电容器的主要技术指标有:额定电压、电容值、额定电流、最大工作电流、峰值电流、峰值电压、对壳耐电压、端子间试验电压、损耗角、寄生电感值、工作温度范围、周围空气湿度、质量、预期寿命、液体介质、极间固体绝缘介质等。通常首先要对电容器的容值^[6]及额定电流进行相关计算,然后进行选型。支撑电容器的关键参数计算如下:

(1) 额定电流:

$$I > \frac{P}{U} \quad (3)$$

(2) 电容容值:

$$C \geq \frac{10 \times P}{\omega \times U^2} \quad (4)$$

式中: P ——额定输出容量, kVA; U ——额定直流电压, V; f ——输出频率, Hz, $\omega=2\pi f$ 。

根据式(3)、式(4)计算可知,所设计电流器的支撑电容额定电流 $I > 337\text{ A}$, 容值 $C \geq 3\text{ mF}$ 。

4 叠层母排设计

在 IGBT 快速关断过程中,由于电路 di/dt 很大,会产生较高的尖峰电压,所以一般在电路中需设置缓冲电路(吸收电路)以吸收元件关断时的过电压。目前,新型 IGBT 元件内部的分布电感已被控制在很小的范围内,如果电路上的杂散电感很小,省去吸收电路也是可行的。变流器模块 IGBT 元件之间以及 IGBT 与支撑电容器之间的连接使用叠层母排(Busbar),可降低功率器件的过电压冲击。低感母排通过正负极层叠平行分布的结构形式减小线路分布电感,从而降低功率元件两端的峰值电压,进而降低功率器件对电压保护吸收电路的要求,不仅提高了功率器件运行的可靠性和稳定性,同时也提高了电路的集成度,便于后期维修维护。

4.1 叠层母排计算

与传统的配线方式相比,叠层母排具有如表 1 所示优点。

表 1 叠层母排的优点
Tab.1 Advantages of laminated bus-bar

性能	线缆	普通铜排	叠层母排
可安装性	安装复杂，易安装错误	铜排需多次安装，较易出错	一次性安装，不易出错
电感性能	杂散电感很大	杂散电感较大	杂散电感达到纳亨级
导热性能	圆柱结构，散热差	片状结构，散热较好	片状结构，散热良好
可靠性	可靠性较好	铜板裸露，长期可靠性难以保证	包覆结构，可靠性好，寿命达数十年

由于直流环节存在杂散电感 L_{stray} ，在 IGBT 关断时会出现过电压：

$$U_{\text{overshoot}} = L_{\text{stray}} \times \frac{di}{dt} \tag{5}$$

加上直流母排电压可能导致 IGBT 的 C、E 极之间承受的电压大于 IGBT 可承受的最大电压，从而导致 IGBT 损坏。

$$U_{\text{CE}} = U_{\text{overshoot}} + U_{\text{DC-link}} \tag{6}$$

通过直流环节低电感的设计（较小的 L_{stray} ），可使过电压显著减小。在输入端与输出端完全对称且中间无影响电流走向挖孔的情况下，平板类叠层母排^[7]如图 3 所示，其电感值可以用式（7）来计算：

$$L = \frac{\mu_0 a l}{b} \tag{7}$$

式中： $\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$ H/m； a ——母排之间的距离，m；
 b ——母排宽度，m； l ——母排长度，m。

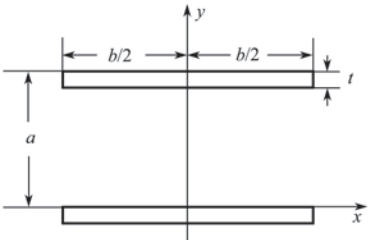


图 3 母排结构侧视图
Fig.3 Side view of the bus-bar

4.2 叠层母排的仿真

由文献 [8] 可知，在输入输出端电流并非对称的情况下，叠层母排杂散电感并不是规则地随元器件与输入输出端之间的距离变化而变化，更多的是与叠层母排上下板电流走向的重合度相关。以下通过 Ansoft 软件和 Ansys 软件对模块四相上下桥臂连接叠层母排的导通情况进行电感性能仿真和电热性能仿真，并通过斩波试验验证叠层母排的低电感性能。图 4 是各相连接时的叠层母排上的电流走向及电流云图。

根据叠层母排的电流走向以及电流分布仿真结果，可优化叠层母排的设计。由于集肤效应的影响，电流分

布在叠层母排的表面，且接线端子、开孔、板边缘、拐角等位置的电流密度较大。

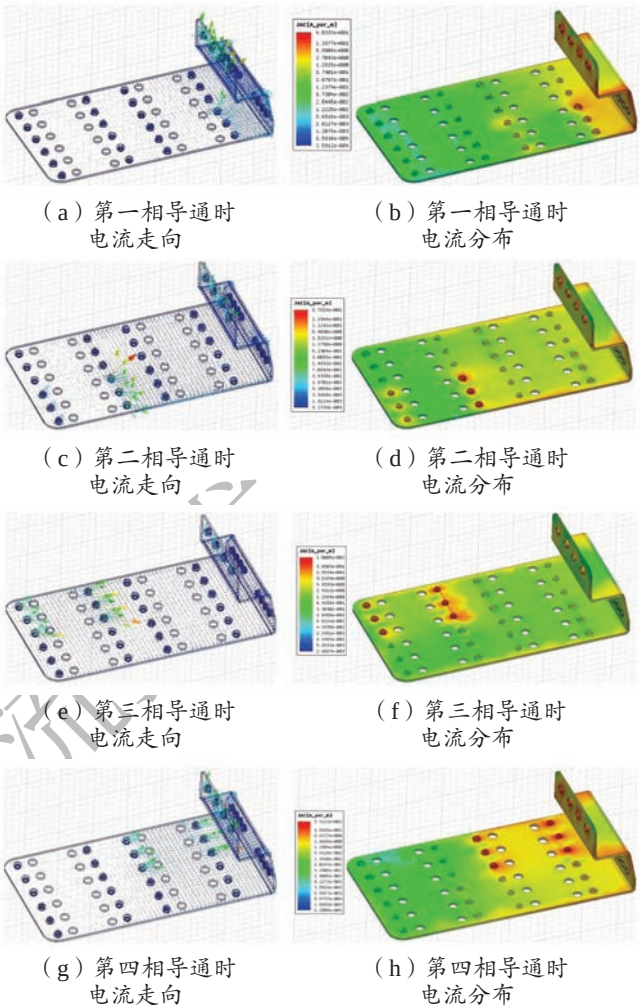


图 4 叠层母排各相电流走向及电流分布云图
Fig.4 Current direction and distribution in the bus-bar of different phases

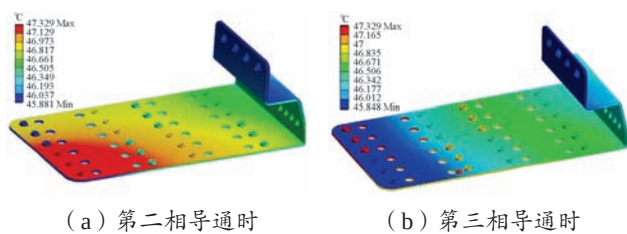
根据上述仿真结果提取的电感值如表 2 所示。

表 2 不同相导通时的杂散电感
Tab.2 Stray inductances as IGBT turning-on under different phases

导通相	第一相	第二相	第三相	第四相
电感值/nH	64.511	71.91	72.29	65.804

根据 FZ750R65KE3 数据手册，可以查出其开通速度要比关断速度快，其开通过程中， di/dt 值为 2.37×10^9 A/s；根据式（5）计算，其由叠层母排引起的过电压不超过 150 V，满足过电压不超过 600 V 的要求。

对于叠层母排的设计，主要遵循正、负极电流走向路径尽量重合的原则。从最终的设计方案可以看出，此时第二相和第三相与输入端距离最远，因此，对此两相进行通电温升仿真即可。本设计中环境温度设置为 45℃，温升云图如图 5 所示。在额定电流输入情况下，其最高温度不超过 48℃，满足温度低于 90℃ 的要求。



(a) 第二相导通时 (b) 第三相导通时

图5 叠层母排通电时温度分布

Fig.5 Temperature distribution on laminated bus-bar

5 散热器设计

散热器是变流器模块的重要组成部分，承担着 IGBT 损耗所产生热量的耗散。由于变流器模块中元器件的高度集中布置，如果 IGBT 热量不能及时散发出去，就会造成 IGBT 模块失效甚至爆炸^[9-10]。因此，为保证变流器模块的可靠运行，必须要有优良的散热设计。

5.1 散热器流量计算

根据试验台主要技术参数，采用英飞凌的 IPOSIM 软件计算可算得，IGBT 损耗 $P_1=938\text{ W}$ ，二极管损耗 $P_2=811\text{ W}$ ，单个 IGBT 模块损耗为 $P=P_1+P_2=1\,749\text{ W}$ 。那么一个模块的总损耗约为 14 kW 。本设计涉及的变流器模块 IGBT 损耗比较大，根据系统可靠性要求，选用水冷散热方式，冷却液为 60%（体积浓度）乙二醇水溶液，其相关物理特性如下：

- 冰点 $-48.3\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 沸点 $110.0\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 密度 $1\,049.48\text{ kg/m}^3\text{ (}80\text{ }^{\circ}\text{C)}$
- 比热 $3\,345\text{ J/(kg}\cdot^{\circ}\text{C)}\text{ (}80\text{ }^{\circ}\text{C)}$

根据文献 [11]，流经水冷散热器的冷却液流量 q 为

$$q \geq \frac{60000Q}{cp\Delta t} \tag{8}$$

式中： q ——冷却液流量，L/min； Q ——总损耗，W； c ——冷却液比热，J/(kg·℃)； ρ ——冷却液密度，kg/m³； Δt ——冷却液温升，℃。

根据式 (8) 计算，冷却液的流量为： $q \geq 24.7\text{ L/min}$ ，留一定裕量，取 30 L/min 。

5.2 散热器试验

根据 IGBT 的实际尺寸与耗散功率制作相应发热模块进行模拟，整个散热器的试验共需 8 个发热模块，元件接触面积为 $140\text{ mm} \times 190\text{ mm}$ ，散热器的冷却介质为 60%（体积浓度）乙二醇水溶液，通过电磁流量计控制流量，用软管与散热器连接。散热器的工况为：流量 30 L/min ，模块发热功率 $8 \times 2\text{ kW}$ 。为模拟散热器在实际应用环境中的温升情况，对散热器进口、出口以及 1~28 点进行温度采集，散热器温度采集点如图 6 所示。

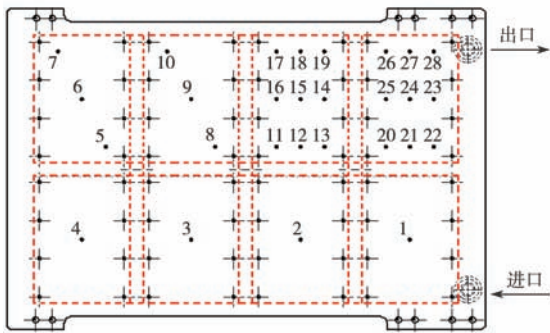


图6 热电偶测点分布图

Fig.6 Measuring point distribution of thermocouples

模块工作发热后，水冷散热器的稳定温度数据如表 3 所示。

表3 测点温度值
Tab.3 Temperature values of the measuring points ℃

位置	数值	位置	数值	位置	数值
进口	10.9	测点 9	29.9	测点 19	29.2
出口	20.15	测点 10	29.5	测点 20	28
测点 1	25.1	测点 11	26.7	测点 21	27.8
测点 2	23.8	测点 12	27.2	测点 22	27.3
测点 3	25.2	测点 13	27.8	测点 23	27.5
测点 4	25.5	测点 14	28.5	测点 24	28
测点 5	27	测点 15	28.4	测点 25	27.4
测点 6	29.9	测点 16	28.2	测点 26	28.7
测点 7	28	测点 17	28.2	测点 27	29.2
测点 8	29.3	测点 18	29	测点 28	29.4

由表 3 中进口温度及测点 6 和测点 9 温度可以看出，功耗为 16 kW 时，散热器台面最高温升为 19 K ；而实际工况损耗只有 14 kW ，因此，散热器设计满足温升小于 30 K 的使用要求。

6 结语

本文根据大功率试验台的电路拓扑结构对变流器模块进行通用化设计，采用计算、仿真、试验的方式对变流器模块的器件选型、低感母排设计、散热器设计以及电容选型进行方案确定。最终，该变流器模块顺利通过换流试验、温升试验。目前，采用该变流器模块的大功率试验台已在现场稳定运行两年多时间。

参考文献：

[1] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.

[2] 倚鹏. 高压大功率变频器技术原理与应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008: 2-22.

[3] 欧阳志红. IGBT 原理及应用 [J]. 科技信息, 2012(33): 109.

[4] 史富强, 王旭波. IGBT 在客车 DC600V 系统逆变器中的应用与保护 [J]. 电子设计工程, 2009(6): 107-109.

SHI F Q, WANG X B. Application and protection of IGBT to reverser in passenger car DC600V feed system[J]. Electronic Design Engineering, 2009(6): 107-109.