

双向三电平直流变换器温升研究和散热设计

曹威 黄先进 张立 伟林飞

(北京交通大学电气工程学院 北京 100044)

摘要: 介绍了电力电子变流装置的散热原理, 提出了散热器设计及优化的问题, 针对 15kW 双向三电平直流变换器, 建立温升模型。通过热仿真软件 FloTHERM, 设计了合适的散热器, 并进行了优化。

关键词: 热设计 散热器 结温 优化

1 引言

随着电力电子技术的快速发展, 电力电子变流装置的功率等级不断提升, 变流器装置向小型化和轻量化发展, 从而导致变流器功率密度提高, 功率半导体器件结温升高。结温过高会影响半导体器件工作性能和使用寿命, 温升过高已经成为了功率半导体器件产生故障的主要原因(图1)^[1]。

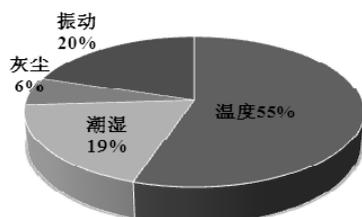


图1 半导体器件损坏的主要原因

作为变流装置中的核心器件, 半导体器件工作状态的好坏决定了系统工作性能的可靠性。为提高系统工作的可靠性, 热设计是变流装置设计过程中必不可少的一个重要环节, 控制器件结温在允许范围内, 优化散热器的结构, 减少系统的重量, 缩小体积, 降低成本^[2]。

2 双向三电平直流变换器

2.1 双向三电平变流技术的应用

辅助变流系统是高速动车组和大功率电力机车电力牵引系统中重要的组成部分。目前辅助变流器系统大致可分为三种类型, 其中DC link斩波降压类型因为具有高性能低成本的特点, 因此最具有发展前景。DC link斩波降压类型通常采用传统的两电平斩波降压, 由于中间直流电压比较高(可高达3000伏), 给电路的设计和控制带来了困难。而三电平斩波降压电路既可

以减小开关脉冲占空比的范围, 有利于提高斩波器的性能, 又可以采用比主电路器件更低电压等级的器件, 以减小辅助系统的成本, 同时使辅助变流系统中充电机的结构更加紧凑、性能更加优越^[3]。

目前, 城市轨道交通开始采用超级电容器储存列车的制动能量, 据报道, 能够达到节约电能30%的效果^[4]。但是超级电容模块的充电电压较低, 需要通过双向变流器才能与直流系统相连接。采用双向三电平变流器拓扑结构, 可以实现超级电容高性能充电和放电, 并且提高供电电能质量^[5]。

2.2 电路结构

双向三电平直流变换器有BUCK和BOOST两种工作模式, 可以实现能量的双向流动, 以实现超级电容高性能充电和放电, 其电路如图2所示, 是一种输入输出共地型的结构。

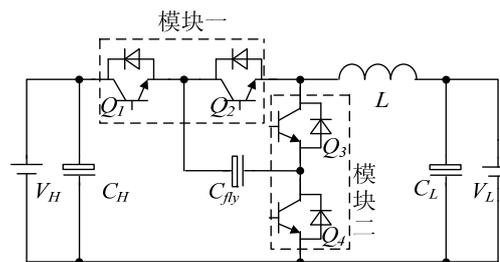


图2 双向三电平变流器电路

变流器共有4个开关 Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 , 采用IGBT模块2MBI150U4H-120, 每个模块包含两个开关, 所以变流器共有2个IGBT模块。变流器额定功率15kW, 其相关参数为: 高端电压 $V_H=750V$, 低端电压 $V_L=300V$, 开关频率 $f=5kHz$ 。

2.3 损耗计算模型

电路中每个开关由IGBT和二极管并联组成, IGBT的损耗 P_B 包含通态损耗 P_{SS} 和开关损耗 P_{SW} , 二极管的损耗 P_D 包含通态损耗 P_{DC} 和反向恢复损耗

$P_{RR}^{[6]}$:

$$P_B = P_{SS} + P_{SW} \quad (1)$$

$$P_D = P_{DC} + P_{RR} \quad (2)$$

总损耗 P 为:

$$P = P_D + P_B \quad (3)$$

变流器工作于直流斩波模式, 可以将 IGBT 或二极管中流过的电流认为是连续的矩形波, IGBT 和二极管的各部分损耗计算公式如下:

$$P_{SS} = D \cdot I_C \cdot V_{CE} \quad (4)$$

$$P_{SW} = f \cdot (E_{on} + E_{off}) \cdot \frac{V_S}{V_N} \quad (5)$$

$$P_{DC} = (1 - D) \cdot I_F \cdot V_F \quad (6)$$

$$P_{RR} = f \cdot E_{rr} \cdot \frac{V_S}{V_N} \quad (7)$$

其中, D 为 IGBT 开通占空比, I_C 为集电极电流, f 为器件开关频率, V_S 为 IGBT 关断时承受的电压, V_N 为 IGBT 模块额定电压, V_{CE} , E_{on} , E_{off} 分别为 I_C 对应的饱和电压, 开通损耗, 关断损耗. V_{CE} , E_{on} , E_{off} 的值可以根据 I_C 从 IGBT 模块的 datasheet 中获得. I_F 为流经二极管的电流, V_F , E_{rr} 分别为 I_F 对应时的通态压降和反向恢复损耗. V_F , E_{rr} 同样可根据 I_F 从 IGBT 模块的 datasheet 中获得.

2.4 额定工况下的损耗计算

在 BUCK 模式下, Q_1 , Q_2 中 IGBT 起开关作用, 二极管不工作; Q_3 , Q_4 中二极管起续流作用, IGBT 不工作. 损耗计算相关参数见表 1:

表 1 BUCK 模式损耗计算相关参数

D	$I_C=I_F /$ A	$f /$ k H z	$V_S /$ V	$V_N /$ V
0.4	50	5	375	600
$V_{CE}/$ V	$E_{on}/$ m J	$E_{off}/$ m J	$V_F/$ V	$E_{rr}/$ m J
1.4	4	5.8	1.2	7

$$P_{Q1} = P_{Q2} = P_{SS} + P_{SW} =$$

$$D \cdot V_{CE} \cdot I_C + f \cdot (E_{on} + E_{off}) \cdot \frac{V_S}{V_N} = 58.6 \text{ W}$$

$$P_{Q3} = P_{Q4} = P_{DC} + P_{RR} =$$

$$(1 - D) \cdot I_F \cdot V_F + f \cdot E_{rr} \cdot \frac{V_S}{V_N} = 57.9 \text{ W}$$

模块 1 和模块 2 的总损耗分别为 117.2W, 115.8W.

在 BOOST 模式下, Q_3 , Q_4 中 IGBT 起开关作用, 二极管不工作; Q_1 , Q_2 中二极管起续流作用, IGBT

不工作. 相关参数见表 2:

表 2 BOOST 模式损耗计算相关参数

D	$I_C=I_F /$ A	$f /$ k H z	$V_S /$ V	$V_N /$ V
0.6	20	5	375	600
$V_{CE}/$ V	$E_{on}/$ m J	$E_{off}/$ m J	$V_F/$ V	$E_{rr}/$ m J
1.15	1.9	2.5	0.9	3.1

$$P_{Q1} = P_{Q2} = P_{DC} + P_{RR} =$$

$$(1 - D) \cdot I_F \cdot V_F + f \cdot E_{rr} \cdot \frac{V_S}{V_N} = 16.9 \text{ W}$$

$$P_{Q3} = P_{Q4} = P_{SS} + P_{SW} =$$

$$D \cdot V_{CE} \cdot I_C + f \cdot (E_{on} + E_{off}) \cdot \frac{V_S}{V_N} = 27.6 \text{ W}$$

模块 1 和模块 2 的总损耗分别为 33.8W, 55.1W.

3 变流器温升模型及相关计算

3.1 热阻等效电路

通过热阻等效电路对功率器件工作时的散热进行分析, 以 IGBT 模块为例, 其温升模型如图 3 所示. IGBT 模块的各部分损耗功率对应电流源, 热阻对应电阻, 温差对应电压, 即可得到对应的热阻等效电路 (图 4) [7].

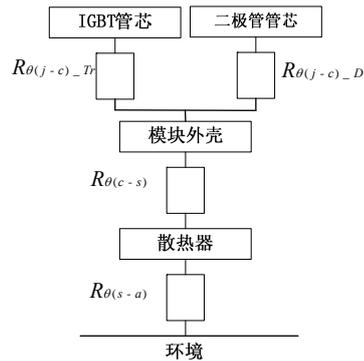


图 3 IGBT 模块的温升模型

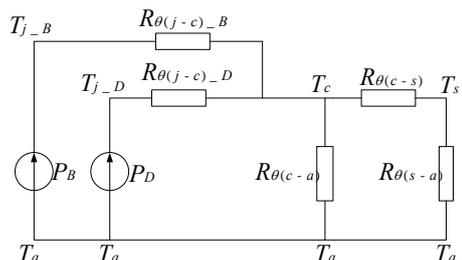


图 4 热阻等效电路

图3和图4中, T_{j_B} , T_{j_D} 分别是IGBT和二极管的结温; T_c 是IGBT模块壳温; T_s 是散热器最高温度; T_a 是环境温度; P_B , P_D 分别是IGBT和二极管产生的损耗; $R_{\theta(j-c)_B}$, $R_{\theta(j-c)_D}$ 分别是IGBT和二极管管芯至模块外壳间的热阻; $R_{\theta(c-a)}$ 是模块外壳至大气间的热阻; $R_{\theta(c-s)}$ 是模块外壳至散热器的接触热阻, $R_{\theta(s-a)}$ 是散热器至大气间的热阻。 $R_{\theta(c-a)}$ 相对于 $R_{\theta(c-s)}$ 和 $R_{\theta(s-a)}$ 数值很大, 因此与 $R_{\theta(c-s)}$ 和 $R_{\theta(s-a)}$ 并联时可忽略。由此等效电路, 可得到各点的温度的计算公式:

$$\begin{cases} T_s = P_{tot} \times R_{\theta(s-a)} + T_a \\ T_c = P_{tot} \times R_{\theta(c-s)} + T_s \\ T_{j_B} = P_B \times R_{\theta(j-c)_B} + T_c \\ T_{j_D} = P_D \times R_{\theta(j-c)_D} + T_c \end{cases} \quad (8)$$

P_{tot} 为系统总损耗。

3.2 散热设计温升计算

对于IGBT模块2MBI150U4H-120, 其最大允许结温 $T_{jmax}=125^\circ\text{C}$, 根据半导体器件III级降额应用标准^[8], 模块最高允许结温 T_{jm} 为 105°C 。采用散热器目的就是控制结温在 105°C 以下。经计算变流器在BUCK模式额定工况下损耗大于BOOST模式额定工况下损耗, 所以针对BUCK模式进行散热设计。在BUCK模式下, $P_{Q1}=P_{Q2}=P_B=58.6\text{W}$, $P_{Q3}=P_{Q4}=P_D=57.9\text{W}$ 。模块1和模块2的总损耗分别为 117.2W , 115.8W , 系统总损耗 $P_{tot}=233\text{W}$ 。IGBT模块相关热阻参数如下表所示:

表3 2MBI150U4H-120 热阻参数

$R_{\theta(j-c)_B}/(^\circ\text{C}/\text{W})$	$R_{\theta(j-c)_D}/(^\circ\text{C}/\text{W})$	$R_{\theta(c-s)}/(^\circ\text{C}/\text{W})$
0.16	0.24	0.025

根据模块1计算

$$T_{s\max} = T_{jm} - P_B \cdot R_{\theta(j-c)_B} - P_{tot} \cdot R_{\theta(c-s)} = 92.7^\circ\text{C}$$

根据模块2计算

$$T_{s\max} = T_{jm} - P_D \cdot R_{\theta(j-c)_D} - P_{tot} \cdot R_{\theta(c-s)} = 88.2^\circ\text{C}$$

所以散热器最高温度应低于 88.2°C

假设环境温度为 40°C 。

散热器最大热阻:

$$R_{\theta(s-a)\max} = \frac{88.2 - 40}{117.2 + 115.8} = 0.21^\circ\text{C}/\text{W}$$

经计算, 要使IGBT模块安全工作须控制散热器最高温度在 88.2°C 以下, 散热器最大热阻为 $0.21^\circ\text{C}/\text{W}$ 。

4 采用 IGBT 并联的电路结构

为了降低开关器件结温的温升, 可以对电路进行改进。如图5所示, 通过IGBT并联的工作方式, 降低了流经每个IGBT的电流, 从而降低了开关模块的损耗

及其温升^[9]。

$$P_{Q1} = P_{Q2} = P_{SS} + P_{SW} =$$

$$D \cdot V_{CE} \cdot \frac{I_C}{2} + f \cdot (E_{on} + E_{off}) \cdot \frac{V_S}{V_N} = 27.8\text{W}$$

$$P_{Q3} = P_{Q4} = P_{DC} + P_{RR} =$$

$$(1 - D) \cdot V_F \cdot \frac{I_F}{2} + f \cdot E_{rr} \cdot \frac{V_S}{V_N} = 30.6\text{W}$$

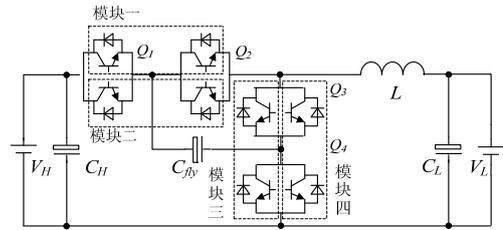


图5 采用 IGBT 并联的电路结构

采用并联IGBT的电路后, 模块1和模块3的总损耗分别为 55.6W , 61.1W 。系统总损耗 $P_{tot}=233.4\text{W}$ 。

散热器温度限值:

$$T_{s\max} = T_{jm} - P_D \cdot R_{\theta(j-c)_D} - P_{tot} \cdot R_{\theta(c-s)} = 91.8^\circ\text{C}$$

散热器最大热阻:

$$R_{\theta(s-a)\max} = \frac{91.8 - 40}{233.4} = 0.22^\circ\text{C}/\text{W}$$

表4 两种电路结构损耗及温升比较

	单模块最高 损耗/W	系统总损 耗/W	散热器最高 允许温度/ $^\circ\text{C}$	散热器最大 热阻/ $^\circ\text{C}/\text{W}$
IGBT 并联	61.1	233.4	91.2	0.22
非并联	117.2	233	88.2	0.21

从上表可以看出, 采用IGBT并联工作的电路结构后, 系统的总损耗基本不变, 但单个模块的损耗下降了一半, 散热器的最高允许温度和最大热阻都有所提高, 所以可以采用IGBT并联的工作方式, 以降低开关管的结温以及缩小散热器体积。

5 热仿真及散热设计

FloTHERM是专门针对电子设备热设计所开发的软件, 其可以对整个系统进行建模, 通过设定各种边界条件, 模拟系统工作时热能的实际流动, 进行温升仿真。可以使用FloTHERM设计和优化散热器^[10]。

针对两个IGBT模块的功率损耗进行散热器的设计, IGBT控制结温在 105°C 以内, 从上面的计算可以看到, 假设环境温度为 40°C 时, 需控制散热器表面最高温度在 88.2°C 以内。设计所采用的散热器为压铸铝制散热器($\lambda=201\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), 根据实际应用散热器为水平摆放, IGBT模块置于散热器正中间, 环境温度为 40

℃,利用仿真软件建立对应的模型如图 6,并绘制网格。

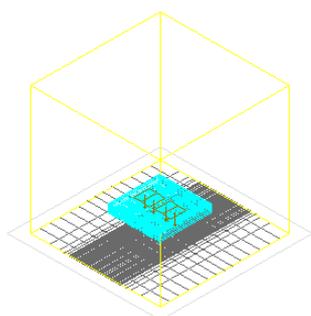


图 6 仿真模型

散热器优化的目的为控制温度在安全范围内的前提下,尽量减小散热器的体积,重量。优化对象为散热器的基板及肋片。下表是不同参数时的温升结果:

表 5 不同结构散热器的仿真结果

散热器基座尺寸/cm	肋片高度/cm	肋片数	散热器最高温度/℃	散热器热阻/(℃/W)
60*50*14	10	20	69.78	0.128
60*40*14	7	20	75.47	0.152
50*40*14	5	20	81.3	0.177
40*40*10	5	20	85.84	0.197
40*40*10	5	25	84.79	0.192
40*40*10	5	31	84.3	0.188
40*40*10	5	29	84.2	0.188

最终确定的散热器尺寸为:散热器基座尺寸 40*40*10cm,肋片数 29,肋高 5cm。散热器的热阻为 0.188℃/W<0.21℃/W,符合要求。仿真的结果如图 7 所示:

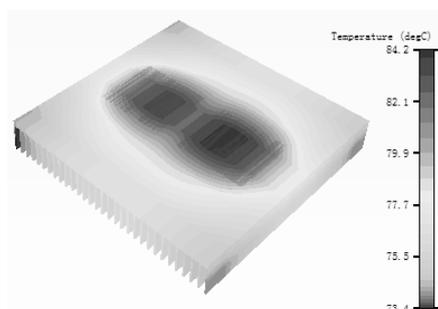


图 7 散热器表面温度仿真结果

开关过程产生大量的损耗以及较高的温升,必须对其结温进行控制,以保障系统的正常工作。本文针对三电平双向 DC-DC 变换器进行散热设计,介绍了变流装置热设计过程,提出采用 IGBT 并联的方式降低功率器件的结温。并且利用热分析软件 FloTHERM 进行散热器设计和优化,在控制温升的前提下,同时减少散热器的体积和重量。

参考文献

- [1] 陈建业,吴文伟. 大功率变流器冷却技术啊及其进展[J]. 大功率变流技术, 2010, (1): 15-24, 30.
- [2] 王丽. 大功率电子设备结构了设计研究[J]. 无线电工程, 2009, 39(1): 61-64.
- [3] 金科,杨孟雄,阮新波. 电机工程学报[J]. 三电平双向变换器, 2007, 26(18): 41-46.
- [4] 曹秉刚,曹建波,李伟军,等. 超级电容在动车中的应用研究[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(11): 1317-1322.
- [5] Minsub Han, Ultra Capacitor with Applications to Electric Vehicle[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008: 1318-1322.
- [6] Xu Dewei, Lu Haiwei . Power loss and junction temperature analysis of power semiconductor devices [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(5): 1426-1431.
- [7] 胡建辉,李锦庚,邹继斌. 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.
- [8] 龙昊,付桂翠,高泽溪. 自然空气冷却情况下功率器件散热器的优化设计[J]. 电子元件与材料, 2003, 22(3): 18-21.
- [9] S Ndao, Y Peles and M.K. Jensen. Multi-objective thermal design optimization and comparative analysis of electronics cooling technologies[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52: 4317-4326.
- [10] Long Hao. The Optimum Thermal Design of Heat Sinks in the Cooled by Natural Convection[J]. Electronic Components & Materials, 2003, 22: 18

6 结论

功率开关器件作为变流装置中的核心器件,在