

文章编号: 1005—7277(2011)01—0042—05

逆变器中 IGBT 模块的损耗计算及其散热系统设计

杜毅, 廖美英

(西南交通大学, 四川 成都 610031)

摘要: 介绍了一种在工程上比较适用的 IGBT 模块损耗的理论计算方法, 并将其计算结果与厂家给出的仿真结果相比较, 精度满足设计要求。在计算出 IGBT 模块损耗后, 利用散热系统热阻等效电路, 求出散热器热阻, 进而设计出符合逆变器的强迫风冷散热系统。最后, 通过 ICEPAK 软件对散热器进行仿真, 由仿真结果表明散热器达到要求。

关键词: 逆变器; 功率损耗; 散热系统; 仿真

中图分类号: TM924

文献标识码: A

Losses calculation of IGBT module and heat dissipation system design of inverters

DU Yi, LIAO Mei-ying

(Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: A loss calculation method about IGBT module in engineering is introduced, and the results are compared with the other which the manufacturer calculate by IPOSIM. The precision meets the design requirements. After calculated the losses of IGBT module, it can get the thermal resistance by the thermal resistance equivalent circuit of the heat dissipation system. And the system for the inverter using forced-air-cool is designed. Finally, the design of the heatsink is simulated by software ICEPAK. The simulation results show the heatsink is up to the demands.

Key words: inverter; power losses; heat dissipation system; simulation

1 引言

大功率电力电子器件的快速发展, 使得逆变器的容量以及器件开关频率在迅速提高, 开关管的损耗也在不断上升。在开关频率较低的时候, 逆变器中 IGBT 的通态损耗还占总损耗的主要部分, 当开关频率迅速提高, 开关损耗占总损耗比例快速上升。IGBT 损耗的上升, 若没有很好的散热措施, 则管芯的温度将可能达到或超过结温, 器件将受到损坏。因此, 逆变器散热系统设计的好坏是其能否安全可靠工作的主要条件。

本文主要对使用 IGBT 模块的逆变器, 提出一种在工程上比较实用的计算方法, 此方法通过器件已给参数, 可大概计算出 IGBT 功率损耗, 精度满足要求; 此外, 还利用热阻等效电路, 计算出散热系统各点的温度, 设计出一套强迫风冷散热系统, 并通过 ICEPAK 建模进行仿真分析, 将仿真结果与设计结果相比较, 系统满足散热要求。

2 逆变器功率模块的损耗计算

逆变器的损耗计算对散热系统的设计及散热器的选择非常重要。逆变器中功率模块工作时产生损耗会极大地影响设备的工作状况, 其损耗主要是由 IGBT 和并联 Diode 两个部分产生, 包括通态损耗和开关损耗。

目前对于 IGBT 损耗精确的计算比较困难, 工程上一般采用厂家给定的相关参数, 采取线性近似的方法来计算 PWM 逆变器中 IGBT 的损耗, 计算方便、准确, 适合工程应用。

在理论计算 IGBT 模块损耗计算前, 先假设电路工作在如下条件: ①逆变器拓扑结构为三相桥式; ②输出电流为正弦 $i_p = I_p \sin \omega t$; ③调制方式为 SPWM 双极性调制。

由此可得损耗计算公式如下^[1]:

IGBT 的通态损耗:

$$P_{\text{cond_IGBT}} = \left(\frac{1}{s} + \frac{M}{3\pi} \right) r_{ce} I_p^2 + \left(\frac{1}{2\pi} + \frac{M}{s} \cos \theta \right) V_{CE0} I_p \quad (1)$$

Diode 的通态损耗:

$$P_{\text{cond_Diode}} = \left(\frac{1}{s} - \frac{M}{3\pi} \right) r_d I_p^2 + \left(\frac{1}{2\pi} - \frac{M}{s} \cos\theta \right) V_{FO} I_p \quad (2)$$

IGBT 的开关损耗:

$$P_{\text{SW_IGBT}} = \frac{1}{\pi} f_{\text{SW}} (E_{\text{on}} + E_{\text{off}}) \frac{I_p}{I_{\text{CN}}} \frac{V_{\text{dc}}}{V_{\text{CEN}}} \quad (3)$$

Diode 的开关损耗:

$$P_{\text{SW_Diode}} = \frac{1}{\pi} f_{\text{SW}} E_{\text{rec}} \left(0.45 \frac{I_p}{I_{\text{CN}}} + 0.55 \right) \frac{V_{\text{dc}}}{V_{\text{CEN}}} \quad (4)$$

$P_{\text{cond_IGBT}}$ 为 IGBT 的通态损耗; $P_{\text{cond_Diode}}$ 为 Diode 的通态损耗; $P_{\text{SW_IGBT}}$ 为 IGBT 的开关损耗; $P_{\text{SW_Diode}}$ 为 Diode 的开关损耗; M 为幅值调制比; f_{SW} 为器件开关频率; I_p 为逆变器正弦波输出电流峰值; V_{CEO} 为 IGBT 通态压降; r_{ce} 为 IGBT 通态等效电阻; V_{FO} 为二极管门槛电压; r_d 二极管通态等效电阻; E_{on} 、 E_{off} 分别为 IGBT 额定条件下的导通、关断损耗; E_{rec} 为 Diode 额定条件下的关断损耗; V_{ref} 、 I_{ref} 分别为 IGBT 模块参考电压、参考电流; V_{dc} 为桥臂电压。

3 理论计算与实验对比

通过查阅 FF200R12KT3 模块技术文档, 可得相关参数结果如表 1 所示。

表 1 FF200R12KT3 主要参数

M	$\cos\theta$	f_{sw}/kHz	V_d/V	I_{CN}/A
0.8	1	3.6	700	200
I_p/A	V_{ref}/V	I_{ref}/V	V_{CEO}/V	r_{ce}/Ω
$100\sqrt{2}$	600	200	0.8	0.005
V_{FO}/V	r_d/Ω	E_{on}/mJ	E_{off}/mJ	E_{rec}/mJ
1	0.0032	16	25	17.5

需要验证损耗理论计算的正确性, 本文以 FF200R12KT3 型 IGBT 为例, 进行理论计算并与该厂家提供的 IPOSIM6 软件计算结果(如表 2 所示)相比较。计算与实验结果比较如表 3 所示。

单个 IGBT 模块的损耗为 150W, 由于逆变器拓扑结构为三相桥式。一共有三桥臂, 6 个 IGBT 模块, 故系统总损耗为 900W。

表 2 IPOSIM6 软件结算结果

输出电流为正弦时的平均损耗	
请在绿色区域内输入变频	应用参数:
直流母线电压 Vdc[V]	700
输出电流有效值 Irms[A]	100
输出频率 f0[Hz]	50
开关频率 fs[Hz]	3600
最高结温 Tj[°C]	125
壳温 Tc[°C]	80
调制比 m	0.80
负载功率因素 cosφ	1.00
IGBT 通态损耗[W]	52
IGBT 开关损耗[W]	38
二极管通态损耗[W]	11
二极管开关损耗[W]	20

表 3 计算与实验结果比较

单位[W]	$P_{\text{cond_I}}$	$P_{\text{sw_I}}$	$P_{\text{cond_D}}$	$P_{\text{sw_D}}$	P_{Σ}
理论计算	54.0	38.8	11.0	20.3	124.1
IPOSIM	52	38	11	20	121
相对误差	3.8%	2.1%	0	1.5%	2.6%
一定裕量	64.5	47.1	13.6	24.8	150

公式的计算结果与厂家所给软件结算结果相比较, 可知误差在 5% 以内。按照计算的 IGBT 损耗, 可为后面 IGBT 模块的散热设计提供依据。为保证设备运行的可靠性, 对损耗功率取一定裕量, 使得散热系统可靠性加强。

4 逆变器散热系统设计

4.1 散热系统等效电路

采用热阻等效电路形式分析散热器, 将损耗功率等效为电流源, 各点温度等效为节点电压, 热阻等效为电阻^[2]。如图 1 所示为散热系统热阻上的等效电路。

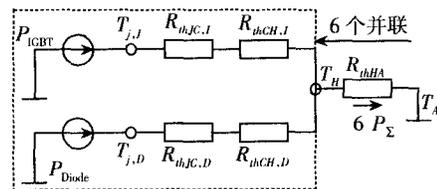


图 1 散热系统热阻上的等效电路

由散热器等效电路可推导出系统各点温度:

$$T_H = 6P_{\Sigma} R_{thHA} + T_A \quad (5)$$

$$T_{j,I} = P_{IGBT} (R_{thJC,I} + R_{thCH,I}) + 6P_{\Sigma} R_{thHA} + T_A \quad (6)$$

$$T_{j,D} = P_{Diode} (R_{thJC,D} + R_{thCH,D}) + 6P_{\Sigma} R_{thHA} + T_A \quad (7)$$

查阅 FF200R12KT3 相关文献, 可知其最大结温 $T_j = 125^{\circ}\text{C}$, 取环境温度为 $T_A = 35^{\circ}\text{C}$ 。表 4 所示为 FF200R12KT3 模块热阻。

由等效电路建立两个不等式:

$$T_A + 6P_{\Sigma} R_{thHA} + P_{IGBT} (R_{thJC,I} + R_{thCH,I}) \leq 0.8T_j \quad (8)$$

$$T_A + 6P_{\Sigma} R_{thHA} + P_D (R_{thJC,D} + R_{thCH,D}) \leq 0.8T_j \quad (9)$$

表 4 FF200R12KT3 模块热阻

Thermal resistance, junction to case	Per IGBT	R_{thJC}	0.12	K/W
Thermal resistance, case to heatsink	Per IGBT $\lambda_{paste} = 1\text{W}/(\text{m.K})$	R_{thCH}	0.03	K/W
Thermal resistance, junction to case	Per Diode	R_{thJC}	0.20	K/W
Thermal resistance, case to heatsink	Per Diode $\lambda_{paste} = 1\text{W}/(\text{m.K})$	R_{thCH}	0.06	K/W

由已知参数联立不等式方程组求解, 即可得 $R_{thHA} \leq 0.054\text{K/W}$, 故所选散热器最大热阻必须小于 0.054K/W 才能满足散热要求。

根据热阻选择散热器为^[3], 表 5 所示的散热器结构参数。

表 5 散热器结构参数

基板长	肋片长	宽	基板厚	齿高	齿数
60cm	50cm	30cm	1cm	9cm	30

4.2 散热系统设计

假设 IGBT 模块均匀分布在基板上, 并不考虑 IGBT 模块内 IGBT 和 Diode 各自的发热情况。在风

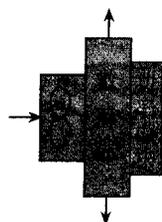


图 2 散热系统方案

道的选择上, 本文采用如图 2 所示的方案^[4]。

采用此方案, 空气流直接冲击散热器表面, 给流场中造成很大的扰动, 在散热器表面形成广泛的紊流区域; 另外, 将散热器垂直放置, 可以利用相对较轻的气流形成烟囱效应。因此采用此种方案设计出来的热阻最小, 散热效果最好。

4.3 散热器的热阻计算

当散热器采用如上强迫风冷散热时, 散热器热片的热阻可以被估算^[5]:

$$R_{\theta HA} = (\sqrt{10/Kd} + 650/A) C_1 C_2 C_3 \quad (10)$$

K 为散热器热导率; 表面发黑的铝制散热器 $2.08\text{W}/(\text{cm.K})$ 。散热器表面黑处理, 热阻比光亮的散热器热阻可减少 10%~15%;

d 为散热器基板厚度;

A 为散热器有效散热面积;

C_1 为安装状态系数, 散热器垂直安装取 $C_1 = 0.5$;

C_2 为强迫风冷散热条件下, 散热器相对热阻系数, 冷却风扇采用风速为 4m/s , 取 $C_2 = 0.4$;

C_3 为空气换热系数, 空气流场层流为主, $C_3 = 0.15$; 空气流场紊流为主, $C_3 = 0.1$ 。

可得:

$$R_{\theta HA} = (\sqrt{10/Kd} + 650/A) C_1 C_2 C_3 \approx 0.044\text{K/W} \quad (11)$$

由此可计算出设计的散热系统各点温度, 如表 6 所示。

表 6 散热系统各点最高温度

$T_H/^{\circ}\text{C}$	$T_c/^{\circ}\text{C}$	$T_{j,I}/^{\circ}\text{C}$	$T_{j,D}/^{\circ}\text{C}$
74.6	77.96	91.4	84.5

由表 6 可知, 所选散热器能够满足 IGBT 模块正常工作条件, 散热满足要求。

5 散热系统仿真

本文采用 ICEPAK 软件对散热器进行仿真分析。该软件能够对电子产品的传热, 流动进行模拟, 从而提高产品的质量, 大量缩短产品的上市时间。它采用的是 FLUENT 计算流体力学 (CFD) 求解器。该求解器能够完成灵活的网格划分, 能够利用非结构化网格求解复杂几何问题。

5.1 散热系统仿真建模

本文只针对散热器进行建模, 这是为了验证使用此规格的散热器是否能够满足散热要求。建模方法是直接将功率源贴在散热器基板上^[6], 只要观察散热器切面温度云图, 即可知散热是否满足要求。如表 7 所示为散热器建模参数。

表 7 散热器建模参数

基板长	肋片长	宽	基板厚(d)	齿高	齿数
60cm	50cm	30cm	1cm	9cm	30

IGBT 建模: 本文只对 IGBT 贴面建模, 将 IGBT 等效为一功率源, 直接贴在散热器基板上。如图 3 所示为散热系统仿真结构。表 8 所示为风扇相关参数。

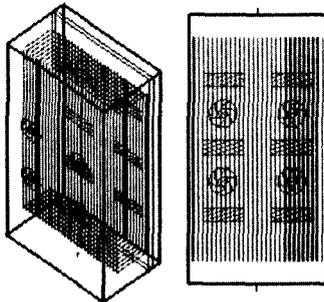


图 3 散热系统仿真结构

表 8 风扇相关参数

风速	外径	内径	流量
4m/s	3cm	1cm	0.01m ³ /s

大的区域为风扇周围速度约为 4m/s, 这与给定的一致。其他区域则风速较低。

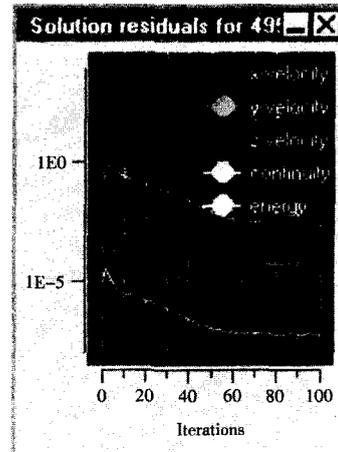


图 4 残差曲线

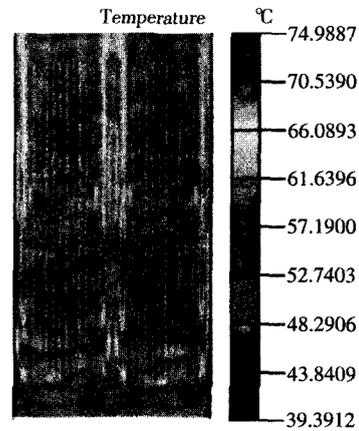


图 5 肋片切面温度

5.2 仿真分析

如图 4 所示为残差曲线, 由图可知残差曲线收敛, 说明系统的散热稳定, 可知在任意时间功率模块产生的热量都可以迅速地传递到系统外。

图 5 所示为肋片切面温度, 可以看出, 散热器肋片最高温度大约为 75°C, 这与所设计的 74.6°C 相一致。另外, 在风扇正下方可知气温明显偏低, 这是由于气流直接吹在散热器上, 形成较大的紊流。

如图 6 所示为散热器基板温度云图。由基板温度分布可知, 最高温度出现在 IGBT 与散热器接触表面。中心处的 IGBT 模块温度较高, 靠近开孔两侧的模块温度较低, 这是因为开孔处能够进行很好的散热。由于烟囱效应最上面的模块比最下面模块温度稍微高。

如图 7 所示为气流分布图。可知, 气流分布最

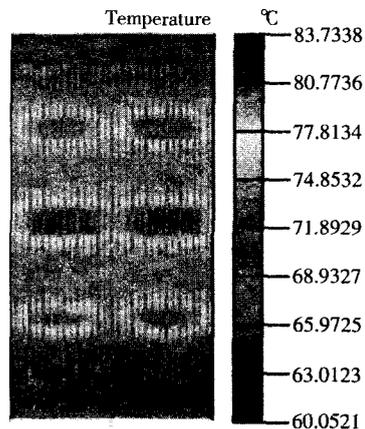


图 6 散热器基板温度云图

如图 8 所示为散热器切面压力云图, 结合散热器气流分布图可以看出在风扇正下方, 风速最高,

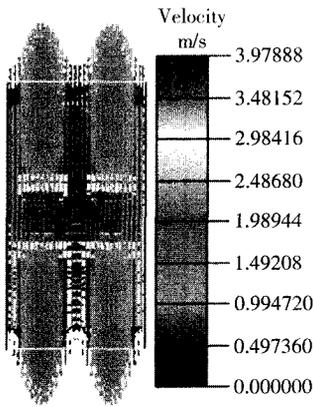


图7 肋片气流切面分布

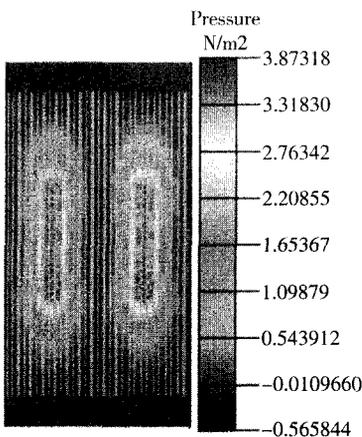


图8 压力云图

风压直接垂在施加在散热器上,形成最大压力。

6 结论

本文给出了 SPWM 下 IGBT 模块的损耗计算,

收稿日期:2010-04-25

(上接第 41 页)

放的位能反馈给电源;

(4)采用变频调速可使调速质量明显提高,调速精度可达到 1%,且调速平稳。

5 结束语

优化后的抓斗桥式起重机控制系统,解决了传统桥式起重机控制系统存在的问题。变频调速技术改造起重机电力拖动控制系统,不但使控制性能稳定,运行可靠,而且操作简单,具有良好的工业应用前景。因此,该控制系统的研究与应用在抓斗改造中具有较强的推广价值。

参考文献:

[1]张应力,周玉华.桥式起重机安全技术[M].北京:中国

将其与制造商给定的损耗计算软件相比较,验证了理论计算的精确性。此外,还对逆变器的散热系统进行了设计,并通过仿真对散热系统进行了分析,由仿真结果可知,散热器肋片切面最高温度为约 75℃。这与理论计算时散热器温度 74.6℃相接近。由此可知,散热系统满足设计要求。

ICEPAK 作为市场上的主流散热分析软件,对系统散热只能做定性分析,结果一般用做散热系统的设计参考。在确定一个散热系统是否可靠运行,还应该进行相关实验。

参考文献:

[1]F. Casanellas, CEng, MIEE. Losses in PWM inverters using IGBTs[J]. IEE Proc.-Electr. Power Appl. 1994,(5):237-238.

[2]丁杰. 机车变流装置中电力电子器件散热器的热设计[J]. 变流技术与电力牵引,2007(3):26-27.

[3]胡建辉,李锦庚,邹继斌等. 变频器中的 IGBT 模块损耗计算及其散热系统设计[J]. 电工技术学报,2009, 24(3): 161-162.

[4]杨旭,马静,张新武等. 电力电子装置强制风冷散热方式的研究[J]. 电力电子技术,2000,4(8):36-38.

[5]张舟云,徐国卿,沈祥林. 牵引逆变器散热系统的分析与设计[J]. 同济大学学报(自然科学版),2004,32(6):776-777.

[6]刘玉芬,程洪亮. 变频器的热耗计算及散热分析[J]. 电气制造,2008(3):60-62.

作者简介:

杜毅(1986-),男,四川南充人,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力传动。

廖美英(1986-),女,四川宜宾人,硕士研究生,研究方向为电机与电器。

石化出版社,2007.

[2]戴欣平. 基于变频调速的抓斗吊车控制系统设计[J]. 工矿自动化,2008.

[3]夏捷. 桥式抓斗起重机电气控制系统改造[J]. 水泥, 2010.

[4]潘金华. 变频器与 PLC 在桥式抓斗起重机改造中的应用[J]. 电气传动自动化,2008.

[5]潘金华. 变频器与 PLC 在桥式抓斗控制中的应用[J]. 电气传动自动化,2007.

作者简介:

薄关锋(1982-),男,河南巩义,任教于许昌职业技术学院机电工程系。

收稿日期:2010-05-08