

基于 ICEPAK 的高频逆变器的热设计及分析

黄倩¹, 马亮¹, 陈玉华², 成艳霞¹

(1.北京京仪绿能电力系统工程技术有限公司 北京 102100;2.北京市光伏核心装备工程研究中心 北京 100009)

摘要: 本文以光伏并网高频逆变器为对象采用 ICEPAK 软件对其进行了热设计。首先比较了逆变器中主要发热元件的热损,选取损耗最大的主功能模块 IGBT 作为热设计对象,在此基础上比较分析了自然对流、无散热器的强迫风冷以及带散热器的强迫风冷三种方式的散热效果,最终选择了带散热器的强迫风冷作为该型号逆变器内部发热元件的散热方式,并完成了散热器和风机性能参数选择。结果表明,采用这种散热方式,能够将 IGBT 的结温降至 54℃ 以下,完全满足其可靠工作的温度要求。

关键词: 高频逆变器; IGBT; 热设计; ICEPAK

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 1674-6236(2013)19-0057-04

Thermal design and analysis of high-frequency inverter based on icepak

HUANG Qian¹, MA Liang¹, CHEN Yu-hua², CHENG Yan-xia¹

(1.Beijing Jingyi Renewable Energy Engineering Co.,Beijing 102100,China;

2.Ltd. Beijing City photovoltaic equipment Engineering Research Center,Beijing 100009,China)

Abstract: The cooling of a specific high-frequency photovoltaic grid-connected inverter is designed with ICEPAK. Firstly, the core function module, IGBT, is chosen to be the center of attention during the thermal design process after comparing of the several main heating elements in the inverter. And then, based on the analysis of three cooling method: natural convection, forced convection without heat sink and forced convection with heat sink, the third one is the best choice given the power of the specific IGBT. After these analysis, we finally get the proper heat sink and fan, and the final temperature of the IGBT is below 54 degree, which is acceptable in view of stable working.

Key words: high-frequency inverter; IGBT; thermal design; ICEPAK

随着电子工业技术的迅速发展,电子产品向着高频、高速、大功率密度、高效率的方向发展,以实现轻量化与小型化,这在大幅增加各发热元件发热量的同时,使得元件之间互相影响的程度也随之加深,如果发热元件散发出来的热量不能够及时散发出去,热量积聚势必带来的元件工作温度的升高,而对大多数电子器件而言,其失效率随温度的升高呈指数增长趋势,据相关文献统计,电子设备的失效有 55%^[1]是温度超过规定的值所引起的。如何将设备内部发热元件产生的热量散发出去,从而控制其工作温度在允许温度范围以内,保证系统正常的运行,成为了设计人员进行结构设计时需要重点解决的问题。对电子设备进行热控制主要基于热量传递的三种方式:热传导、热对流、热辐射。在此基础上,发展出了一系列积极主动的热控制手段,以加强发热元件周围的热量控制,主要有强迫对流、热交换器、冷却循环系统等。在这些方法中,散热器是应用最多的,其中肋片式散热器因重量、尺寸较好控制,流阻较小,成为了电子设备中最常用的一种。在大功率电子设备中主要采用的是强制风冷结合肋片散热器的方式,这样不仅可以通过增加换热面处空气流速增加换热系数,还能大大增加换热面积,同时,合理的风道设计

可以在不增加散热器重量和体积的情况下进一步改善散热效果。

随着数值仿真技术和计算机技术的发展,采用数值模拟的方式对电子设备进行热分析已经成为了现在结构设计人员进行热分析的主要方式之一,该技术不仅能较好的模拟温差作用下气流的流动,对主动进行的温度控制中温度场的模拟也达到了相当的精度,这使设计人员能够通过数值实验的方式方便的进行模型的简化和修改,引入必要的散热措施,消除热积聚带来的器件可靠性降低,从而减少设计、生产、实验的循环次数,提高产品的一次成功率,大大减少开发费用。

作为光伏并网逆变器中,发挥着重要作用的主功率模块,IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)热耗是最大的,热量的积聚导致的模块可靠性降低在这里体现得尤为突出。为了在尽量减少开发成本的基础上,得到合适的解决 IGBT 散热问题的机构方案,根据文献[2]对热分析软件比较,决定采用精度较高的 Icepak 进行数值实验。

1 物理模型的简化

根据电气工程师提供的电路图和电器件,考虑到发热元件和其他元件的隔离以及控制空气在逆变器内的流动的需

收稿日期:2013-03-14

稿件编号:201303148

作者简介:黄倩(1986—),女,四川凉山州人,硕士,工程师。研究方向:电气设备结构设计及热分析。

要,发热元件所处位置如图1(a)所示,图1(b)表示的是利用ICEPAK进行热分析时采用的简化模型。由于IGBT各个面的热传导能力是不同的,其背面采用的是导热系数很大的材料,而其他面采用的为近似绝缘的材料,所以其所有的热损可以近似为是通过良导热面向外传递的,在计算采用的简化模型中表现为二维的热源Source-1。同样道理,为了引入二极管的热损对IGBT散热的影响,简化模型中加入了Source-2、Source-3作为二极管的简化。特征参数如表1所示。

表1 发热元件特征参数

Tab. 1 Characteristic parameters of the main heating elements

	尺寸	热损 W
Source-1	90 mm×50 mm	201
Source-2, Source-3	17 mm×11 mm	10.2

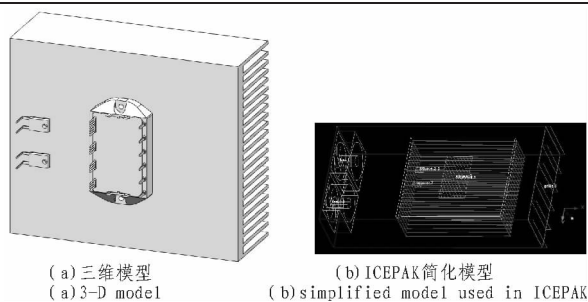


图1 发热元件位置分布
Fig. 1 The position of the heating elements

2 热分析基本理论

不管电子设备结构多复杂,其内部元件之间、元件与冷却空气或冷却液体之间的热量传递方式归根结底都是3种,分别是热传导、热对流与热辐射,现简单介绍如下^[9]。

2.1 热传导

当参与热量交换的两物体之间不发生相对位移,仅依靠分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动产生的热能传递叫做热传导,简称导热,其规律是傅里叶定律,数学模型如式(1)所示:

$$q = \frac{\Phi}{A} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

式中: q 为热流密度, Φ 为热流量, A 为换热面积, λ 为材料的导热系数。

其物理意义是:单位时间内以导热方式通过某微元层 dx 的热流密度与当地的温度变化率及导热层的导热系数成正比。

2.2 热对流

这种传热方式仅发生在流体之中,表现为由于流体宏观运动引起流体各部分之间发生相对位移,冷热流体掺混导致热量在流体内部传递。工程上遇到最多的是流体流经固体表面时温差作用下发生的流体与固体表面之间的热量传递过程,这也是绝大多数换热器经历的物理过程。这种热量交换中包括了热传导和热对流两种换热方式,称之为对流传热,

以区别一般意义的热对流。对流传热分为由密度差导致的热对流和受外力驱动的强迫对流。对流传热可以用牛顿冷却公式(2)来描述:

$$q = h|T_w - T_f| \quad (2)$$

式中: h 为表面传热系数,其大小不仅和流体的物性有关,还和流体的流动状况、换热表面的形状、大小与布置等因素有关。这也是各种不同换热器设计的着眼点。 T_w 、 T_f 分别表示固体表面和流体主流区的温度。

2.3 热辐射

物体因热的原因而发出辐射能的现象即为热辐射。同时,物体还会不断的吸收来自其他物体的辐射能,这种辐射和吸收的过程实现了物体不接触的情况下进行的热量交换。两物体之间的辐射换热量可以用公式(3)计算:

$$\Phi = \varepsilon_1 A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (3)$$

式中: ε_1 、 A_1 、 T_1 分别为物体1的发射率,辐射换热面积以及表明温度, σ 为玻尔兹曼常数,值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

3 热设计

3.1 冷却方式的选择

表2 常用冷却技术特点

Tab. 2 The characteristic of common cooling methods

冷却技术	表面传热系数 W/(m ² ·k)	单位传热面积的最大功耗 W/m ²
空气自然对流	6~16	800
直接气冷(强迫风冷)	25~150	3000
与液体的自由对流	230~580	500*
蒸发冷却	~54000	5×10 ⁷

* 表面和液体之间每度温差散热量

表2列出了部分具有代表性的冷却技术的特点。其中自然对流冷却主要依靠热损导致的高温造成的物体表面附近流体的密度沿垂直于物面方向的梯度产生流体内部的宏观运动来实现冷热流体的掺混,驱动力较小,因此表面换热系数很小,只适合于小功耗的情况。

强迫对流技术,其主要思想是通过增加空气流速,使空气流经物面时具有较薄的速度附面层和温度附面层,提高了空气和换热面之间的表面传热系数,从而达到降低温差的目的。然而,当风机流量,即风速增加到一定程度时,努赛尔数随风速的变化已经趋于平缓,同时,风速增加导致的流阻增加会使得换热系数减小,所以,进一步提高风机流量对减小热阻的作用已然不大。

尽管液体冷却、蒸发冷却具有良好的冷却性能,但是一方面考虑到采用这些冷却方式带来的结构的复杂化,另一方面考虑到逆变器尺寸还受到其他部件的限制,不能太小,在这里采用液体冷却等方式不能充分发挥其优点,却将使实现难度增加。

从公式(2)可以看出,当散热量一定时,除了增强表面换热系数外,还可以通过增加换热面积达到降低温差的目的。

正是基于这种认识,对单纯依靠强迫风冷不能解决的散热问题,往往通过引入散热器,特别是肋片散热器,让换热面积大大增加,使热流密度比没有散热器时减小一个量级,从而大幅降低待冷却物体表面温度。

综上所述,本文最终决定采用强迫风冷结合散热器的方式完成 IGBT 模块的散热。

3.2 散热器和风扇的选择

如前所述采用肋片式换热器可以大大增加换热面积,但是同时也增大了气流流动过程的阻力,使得气流压力降增加,从而影响散热器的换热系数,因此,在进行换热器设计时,需要在这两者之前寻求平衡点,以尽可能的采用最少的花费满足设计要求。

$$L = \frac{P}{\rho C_p \Delta T} \quad (4)$$

其中 L 为所需的冷却风量; P 为设备/器件发热量; ρ 为空气密度, C_p 为空气定压比热; ΔT 为空气出口与进口温差($^{\circ}\text{C}$) (一般为 $10\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$)。

参照文献[4]中介绍的方法,同时考虑散热器的安装对其尺寸的要求,设计得到的散热器参数如表 3 所示。在此基础上,参考文献的选型方法^[5-9],从公式(4)出发进行风机选型,考虑风扇轴向长度受到机柜结构的限制,风扇的风量不能太大,为了保证足够的作用范围,这里采用两个小功率风扇并联代替大风扇的方式,这样一方面满足了结构对轴向长度的要求,另一方面提供了两个较高的速度区,有利于散热。最终得到的风扇如图 2 所示。

表3 散热器参数(mm)

Tab. 3 Technical parameters of the heat sink

基板长	基板宽	基板厚	肋片高	肋片数
164.4	200	9	59	22

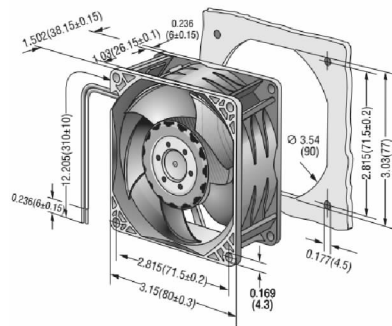


图2 风扇外观及其特性

Fig. 2 The appearance and characteristic of the fan

7 为这种情况下得到的 X-Y 切面速度矢量图。在上面一个风扇出口可以明显的看到一个角区分离涡的存在,经过这个风扇的气流受到该分离涡的作用,有一部分气流出现了减速的现象,在所研究的问题中,这种现象被限制在换热器的一侧,没有对发热元件的散热产生影响。推而广之,如果能够构建一个收缩型的风道,这不仅可以消除分离涡的影响,还可以对气流起到加速作用,这对发热元件表面换热系数的提高是有利的。

4 数值模拟及结果分析

采用图 1b 的模型进行计算,环境温度设置为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$,热源参数按表 1 取值,散热器和风扇的参数如表 3 所示。通过 ICEPAK 自动计算出来的 Reynolds 数和 Peclet 数分别为 27800.9 和 19697.1,因此选择一方程湍流模型。计算结果如下。

首先,从图 3 所示换热器表面温度分布以及图 4 所示热源表面温度可以看出:

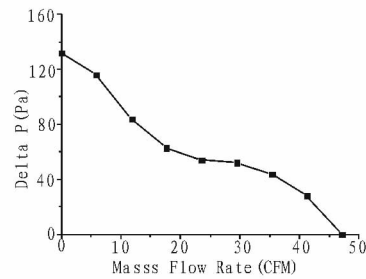
1) 这种散热方式很好的实现了控温目标,发热元件表面温度被控制在 $53\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。

2) 二极管产生的热量对 IGBT 的散热影响不大

3) 二极管的表面温度控制在这种情况下处于次要地位,即,当 IGBT 稳定温度小于许可值时,位于上风向的二极管结温必然处于许可值范围内。因此,进一步优化时可以不可以在建模时考虑二极管。

图 5 为 Z-X 切面的温度云图,从图中可以看出,温度沿流向是逐渐向远离发热元件方向发展的,并且在经过二极管时,这种发展趋势微不可见,直到 IGBT 附近时,才开始迅速发展,这和之前的结论是相互印证的。图 6 为 Z-X 切面的速度矢量图,由于散热器中流阻较大,使得流线向散热器上下两个方向偏折,减少了通过散热器的流量,使得换热器表面传热系数达不到预定值,出现温度偏高的情况。从这里可以看出风道设计的重要性,良好的风道可以起到很好的气流导向作用,使源于风扇的空气能最大限度的发挥作用,尽可能多的带走发热元件散发的热量。

为了分析风扇出口附近角区分离涡对强迫冷却性能的影响,此处采用了元件在 Cabinet 中非对称的布置方式,图 3~



5 结论

文中采用 ICEPAK 软件对光伏并网用高频逆变器进行了热设计^[7]。结果表明:

1) 采用自然对流、无散热器的强迫风冷不能实现所需散热量,采用带散热器的强迫风冷技术可以完成本项目中逆变器内部发热元件的冷却工作,使热损最大的主功能模块 IGBT 结尾在 $54\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,符合许可温度的要求。

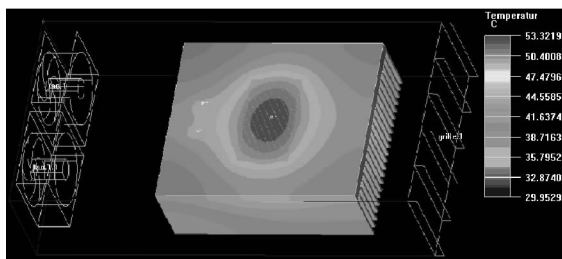


图3 换热器表面温度分布
Fig. 3 Temperature contour on the heat sink surface

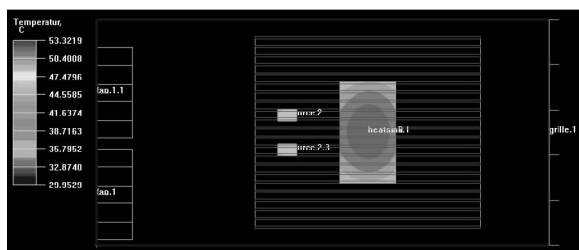


图4 热源表面温度
Fig. 4 Temperature contour on the source surface

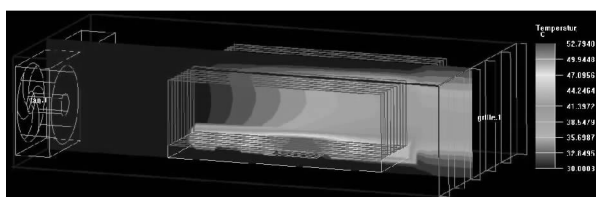


图5 Z-X 切面温度云图
Fig. 5 Temperature contour on a Z-X cutting plane

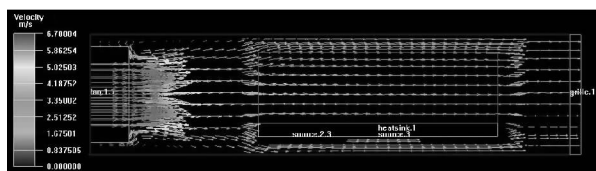


图6 Z-X 切面速度矢量图
Fig. 6 Velocity vectors on a Z-X cutting plane

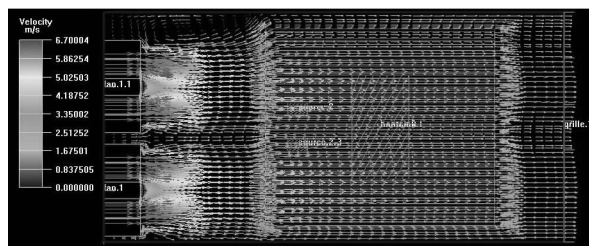


图7 X-Y 切面速度矢量图
Fig. 7 Velocity vectors on a X-Y cutting plane

参考文献:

- [1] 于慈远. 计算机辅助电子设备热分析、热设计及热测量技术的研究[R]. 博士后研究报告. 北京: 国家图书馆, 2000.
- [2] 陈洁茹, 朱敏波, 齐颖. Icepak在电子设备热设计中的应用[J]. 电子机械工程, 2005, 21(1): 14-16.
CHEN Jie-ru, ZHU Min-bo, QI Ying. Application of icepak in the thermal design of an electronic device[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2005, 21(1): 14-16.
- [3] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [4] 纪宝平. 浅谈肋片式散热器设计方法[J]. 科技信息, 2010(15): 103.
JI Bao-ping. Superficial discussion about design of the fin heat sink[J]. Science & Technology Information, 2010(15): 103.
- [5] 张忠海. 电子设备中高功率器件的强迫风冷散热设计[J]. 电子机械工程, 2005, 21(3): 18-21.
ZHANG Zhong-hai. Thermal design of forced air cooling of high-power components in electronic equipments[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2005, 21(3): 18-21.
- [6] 王兆媛. 散热器、中冷器和风扇的选型校核计算[J]. 柴油机设计与制造, 2009, 16(4): 20-31.
WANG Zhao-yuan. Type selection of radiator, intercooler and fan and its checking calculation[J]. Design and Manufacture of Diesel Engine, 2009, 16(4): 20-31.
- [7] 张娅妮, 胡清. 某机载电子设备热设计[J]. 现代电子技术, 2013(3): 151-153, 157.
ZHANG Ya-ni, HU Qing. Design of airborne electronic equipment thermal[J]. Modern Electronics Technique, 2013(3): 151-153, 157.

2) 二极管热损相对 IGBT 很小, 尽管两者距离较近, 其温度场并没有对 IGBT 产生明显的作用, 在进行热分析时可以忽略其影响, 仅针对大热损元件进行。

3) 风道的优化设计可以进一步提高这一方案的散热能力。

(上接第 56 页)

CHEN Jie. The using of LCR meter in the impedance measurement[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2011(3): 51-54.

- [7] 杨素行. 模拟电子技术简明教材[M]. 北京: 高等教育出版

社, 1998.

- [8] 闵安东, 杨薇薇. 高精度电感测量方法[D]. 武汉: 华中理工大学, 1996.