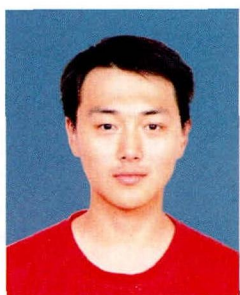


直流升压斩波模块液冷散热系统的研究

针对直流升压斩波电路中功率模块的散热问题,提出一种在工程设计上简单实用的绝缘栅双极型晶体管(IGBT)功率损耗的计算方法,该方法包含基于相似理论的液冷散热系统的热路等效热阻求解公式,以及一种直流升压斩波模块液冷散热系统的一、二次冷却结构参数设计方法,解决了IGBT冷却系统参数难设计的问题。实验以DYNEX的DIM800ECM33-F000型IGBT液冷散热系统设计为例,依此方法得到理论结果,按照此结果设计的散热系统在现场运行情况良好,证明此设计方法切实有效。

张 卓 王钦若 杨其宇/广东工业大学自动化学院



张 卓/博士生

关键词/Keywords

IGBT ·
功率损耗 ·
热阻 ·
液冷 ·

IGBT在高频状态下工作时,它的温度,特别是结温,会对其可靠性、工作特性及器件寿命等造成很大影响^[1]。对于功率器件的散热,强制风冷实现相对容易,因此常常被应用于中小功率(数百瓦到数百千瓦)的电力电子装置的散热上^[2]。但在设备功率达到兆瓦级时,强制风冷在很多方面由于自身硬性条件的限制,不能满足设备的散热要求。

液冷散热有较高的散热能力(是强制风冷的15~30倍),因此更适合应用在大功率设备的散热系统中^[3]。在IGBT损耗计算——散热系统设计上,文献[4]提出了一种利用负载电流、平均电压以及开关时间对高频或高频率转换状态下(≥ 5 kHz) IGBT以及FWD的损耗进行估计的方法,并考虑了控制滞后的情况。文献[5]提出了一种IGBT基本损耗的计算公式,并依此设计了一套强迫风冷散热系统,但并未分析不同电压、电流及门极电阻等对IGBT损耗的影响。文献[6]考虑了多个参量对IGBT的影响并给出了相关损耗与温升的计算方法,设计

了一套液冷散热系统,但并未考虑模块间平均散热以及冷却液温度对系统设计的影响。文献[7]提出了一种混合固体材料冷却板与液冷板的IGBT冷却系统,并以大量实验为基础对比证明了方法换热的高效性,但是没有二次冷却端的论述以及相关的理论推导。文献[8]利用CFD方法提出了一种十分高效的IGBT液冷模型,但是被扩大的IGBT模型在多个模块串并联时会间接增加回路的杂散电感。

本文首先对典型直流升压斩波模块中的功率器件(IGBT)的功率损耗进行了分析,得到了IGBT功率损耗的计算公式;然后建立了系统的等效热路模型,得到了系统一次热阻与二次热阻的计算公式,从而得到散热冷板、连接水管和换能器散热肋片等液冷系统的工程设计参数;最后以DYNEX的DIM800ECM33-F000型IGBT散热为例进行实际计算,由理论计算结果以及工程实际情况可以证明,液冷散热系统的散热性能和安全性能达到了系统的要求。

IGBT功率损耗分析

多路并联直流升压斩波电路拓扑如图1所示。

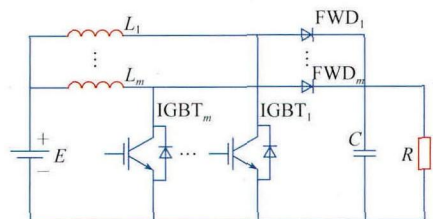


图1 直流升压斩波电路

IGBT一个周期内的能量损耗等于IGBT周期内两端电压和电流的乘积在时间上的积分, 表达式为 $Q_{\text{tot}} = \int_{t_0}^{t_0+t_s} V_{\text{CE}} I_{\text{C}} d\tau$ 。对于IGBT一类的全控型器件, 尚未有其十分准确的模型, 而且多数情况下, 在现场实时取得IGBT的电流电压也是非常困难的。工程上, 其功率损耗一般根据IGBT厂商提供的产品特性曲线来近似计算。IGBT在单个工作周期内存在开通损耗、通态损耗、关断损耗和断态损耗四个过程损耗。

对于单个IGBT的通态损耗 $P_{\text{state_on}}$, 其线性化公式^[9]为

$$P_{\text{state_on}} = (V_{\text{CEO}} + R_{\text{CE}} I_{\text{C}}) I_{\text{C}} \quad (1)$$

式中, V_{CEO} 为IGBT的门槛电压, V; R_{CE} 为IGBT的通态电阻, Ω ; I_{C} 为通态时流过IGBT的电流有效值, A。

V_{CEO} 与 R_{CE} 的估算公式为

$$V_{\text{CEO}} = [V_{\text{CE}_{125}} + \varepsilon_{\text{j_V}} (T_{\text{j}} - 125)] \left(\frac{I_{\text{C}}}{I_{\text{rated}}} \right)^{\varepsilon_{\text{IV}}} \quad (2)$$

$$R_{\text{CE}} = [R_{\text{CE}_{25}} + \varepsilon_{\text{j_R}} (T_{\text{j}} - 25)] \left(\frac{I_{\text{C}}}{I_{\text{rated}}} \right)^{\varepsilon_{\text{IR}}} \quad (3)$$

式中, $\varepsilon_{\text{j_V}}$ 、 ε_{IV} 、 $\varepsilon_{\text{j_R}}$ 和 ε_{IR} 为修正系数, 分别表示IGBT结温对 V_{CEO} 的影响、 I_{C} 对 V_{CEO} 的影响程度、IGBT结温对 R_{CE} 的影响和 I_{C} 对 R_{CE} 的影响程度; T_{j} 为IGBT结点温度, $^{\circ}\text{C}$; $V_{\text{CE}_{125}}$ 为IGBT在结温 125°C 时的额定通态压降, V; $R_{\text{CE}_{25}}$ 为IGBT在结温 25°C 时的额定通态电阻, Ω ; I_{rated} 为参考电流, A。

因为IGBT的物理参数会依照器件当前状态量的改变而发生改变, 所以修正系数的存在是必要的, 将其量化是一个非常烦琐的过程, 而对于曲线单调的修正系数, 在工程设计上一般按设计裕量原则向扩大裕量的方向取极限以简化计算。

将式(2)、式(3)代入式(1), 可以得到IGBT的通态损耗

$$P_{\text{state_on}} = [V_{\text{CE}_{125}} + \varepsilon_{\text{j_V}} (T_{\text{j}} - 125)] \left(\frac{I_{\text{C}}}{I_{\text{rated}}} \right)^{\varepsilon_{\text{IV}}} I_{\text{C}} + [R_{\text{CE}_{25}} + \varepsilon_{\text{j_R}} (T_{\text{j}} - 25)] \left(\frac{I_{\text{C}}}{I_{\text{rated}}} \right)^{\varepsilon_{\text{IR}}} I_{\text{C}}^2 \quad (4)$$

将IGBT在实际工作点处近似线性化, 并将修正后的结果乘以开关频率近似得到其开关损耗。IGBT在开关频率很高的情况下, 其开关损耗是整

个器件损耗的主要部分。

开通损耗

$$P_{\text{sw_on}} = E_{\text{on}_{125}} [1 + \varepsilon_{\text{j_on}} (T_{\text{j}} - 125)] \cdot \left(\frac{I_{\text{C}}}{I_{\text{rated}}} \right)^{\varepsilon_{\text{IEon}}} \left(\frac{V_{\text{CE}}}{V_{\text{rated}}} \right)^{\varepsilon_{\text{VEon}}} \left(\frac{R_{\text{G}}}{R_{\text{rated}}} \right)^{\varepsilon_{\text{REon}}} f_{\text{sw}} \quad (5)$$

关断损耗

$$P_{\text{sw_off}} = E_{\text{off}_{125}} [1 + \varepsilon_{\text{j_off}} (T_{\text{j}} - 125)] \cdot \left(\frac{I_{\text{C}}}{I_{\text{rated}}} \right)^{\varepsilon_{\text{IEoff}}} \left(\frac{V_{\text{CE}}}{V_{\text{rated}}} \right)^{\varepsilon_{\text{VEoff}}} \left(\frac{R_{\text{G}}}{R_{\text{rated}}} \right)^{\varepsilon_{\text{REoff}}} f_{\text{sw}} \quad (6)$$

式中, $E_{\text{on}_{125}}$ 和 $E_{\text{off}_{125}}$ 分别为IGBT结温 125°C 时, 在参考电压和参考电流下的开通和关断能量损耗, J; $\varepsilon_{\text{IEon}}$ 和 $\varepsilon_{\text{IEoff}}$ 分别为IGBT电流 I_{C} 对开通和关断损耗的影响程度; $\varepsilon_{\text{VEon}}$ 和 $\varepsilon_{\text{VEoff}}$ 分别为IGBT两端电压 V_{CE} 对开通和关断损耗的影响程度; $\varepsilon_{\text{REon}}$ 和 $\varepsilon_{\text{REoff}}$ 分别为门极电阻 R_{G} 对开通和关断损耗的影响程度; f_{sw} 为开关频率。

IGBT断态损耗 $P_{\text{state_off}} \approx 0$ 。

在直流升压斩波回路中(见图1), 为了降低回路杂散电感所产生的尖峰电压对器件所造成的冲击, 最大程度地减少回路杂散电感, 目前许多型号的IGBT模块都被设计为与续流二极管FWD集成在一个模块当中。在计算模块损耗时, 也要考虑到FWD的功率损耗。其损耗的主要部分为其处于反向恢复时刻的损耗 E_{rec} 。

$$P_{\text{FWD}} = E_{\text{rec}_{125}} [1 + \varepsilon_{\text{j_rec}} (T_{\text{j}} - 125)] \cdot \left(\frac{I_{\text{C}}}{I_{\text{rated}}} \right)^{\varepsilon_{\text{IErec}}} \left(\frac{V_{\text{CE}}}{V_{\text{rated}}} \right)^{\varepsilon_{\text{VErec}}} \left(\frac{R_{\text{G}}}{R_{\text{rated}}} \right)^{\varepsilon_{\text{RErec}}} f_{\text{sw}} \quad (7)$$

单个IGBT模块的总损耗为IGBT在整个周期中所有过程的损耗总和, 即

$$P_{\text{IGBT}} = P_{\text{state_on}} + P_{\text{state_off}} + P_{\text{sw_on}} + P_{\text{sw_off}} + P_{\text{FWD}} \quad (8)$$

系统总的损耗即为全部IGBT的损耗之和。由于安装位置的不同以及各元器件设备散热能力不均等原因, 实际的IGBT总损耗应是各个IGBT损耗的累加, 即 $P_{\text{tot_IGBT}} = \sum_{m=1}^n P_{\text{IGBT}_m}$ 。但是在实际散热系统

的设计中, 为了保证系统的安全性以及持续运行时的可靠性, 需要为系统预留散热裕量, 即计算的IGBT功率损耗最高值估计应当小于或等于散热系统耗散功率的最低估计值。设计IGBT的总损耗

应估计为

$$P_{\text{tot_IGBT}} = nP_{\text{IGBT_max}} \quad (9)$$

散热系统等效热路分析

1. 液冷散热系统原理

直流升压斩波IGBT液冷系统拓扑框图如图2所示。

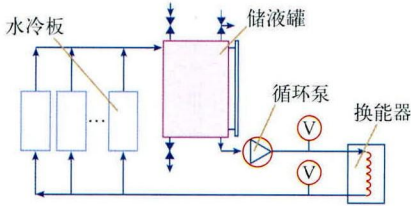


图2 液冷系统拓扑框图

循环管路内的冷却介质由循环泵提供动力，进入散热冷板，将安装在冷板上的IGBT损耗带出，后流经换能器与外界环境进行热交换后回流储液箱，再到循环泵如此往复循环，通过两次冷却以达到给IGBT散热的目的。

2. 等效热路分析与热阻计算

对一套液冷系统进行准确的热力学建模是系统设计的前提。但是由于对流换热过程的复杂性，繁复而冗杂的理论模型并不适用于实际散热系统设计。对液冷散热系统的换热过程以及换热面形状简化后来估算其热阻，是切实有效的工程方法。

从系统启动瞬间到系统持续运行，其温度会经历温度上升（暂态）然后逐渐稳定（稳态）的一个过程。当系统达到稳态时，假设IGBT的损耗全部转换为热量释放，即与散热系统的耗散功率相等，有 $P'_{\text{tot}} = P_{\text{tot}}$ 。

利用等效热路分析，将各点平均温度等效为节点电压、热阻等效为电阻^[10]，有散热系统（空散置于柜内）结构的稳态等效热路如图3所示。

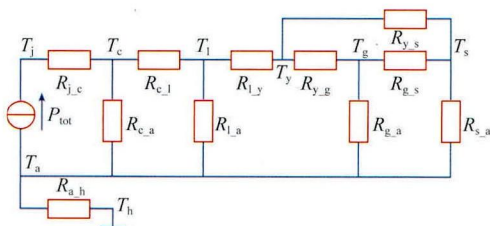


图3 液冷散热系统的等效热路图

图中， T_c 为IGBT外壳温度； T_l 为冷板表面温度； T_y 为冷却介质一次换热后的温度； T_g 为管路管壳温度； T_s 为散热肋片的温度； T_a 为柜内环境温度； T_h 为外部环境温度； R_{j_c} 为IGBT内热阻； R_{c_l} 为IGBT外壳到散热冷板的间隙热阻； R_{l_y} 为冷板到冷却介质的热阻； R_{y_g} 为冷却介质到管路的热阻； R_{y_s} 为冷却介质到换能器散热肋片的热阻； R_{g_s} 为管路到换能器散热肋片的热阻； R_{s_a} 为换能器肋片到外部环境的热阻； R_{c_a} 为IGBT外壳到柜内环境的热阻； R_{l_a} 为散热冷板到柜内环境的热阻； R_{g_a} 为管路到柜内环境的热阻； R_{a_h} 为柜内环境到外部环境的热阻。

由热欧姆定律可以得到系统的热量传递关系

$$T_j - T_a = P_{\text{tot}} R_{\text{th}} \quad (10)$$

式中， P_{tot} 为系统的总损耗，W； R_{th} 为从IGBT到柜内环境的总热阻， $^{\circ}\text{C}/\text{kW}$ ，由图3可以得到

$$R_{\text{th}} = \left\{ \left[\left(R_{s_a} \parallel \frac{R_{y_g} R_{g_a} + R_{g_a} R_{g_s} + R_{g_s} R_{y_g}}{R_{y_g}} + \frac{R_{y_g} R_{g_a} + R_{g_a} R_{g_s} + R_{g_s} R_{y_g}}{R_{g_a}} \parallel R_{y_s} \right) \parallel \frac{R_{y_g} R_{g_a} + R_{g_a} R_{g_s} + R_{g_s} R_{y_g}}{R_{g_s}} \right] + R_{l_y} \right\} \parallel R_{l_a} + R_{c_l} \parallel R_{c_a} + R_{j_c} \quad (11)$$

假设IGBT外壳与散热冷板之间的接触良好，导热脂导热性良好（无接触热阻）。由于 R_{c_a} 、 R_{l_a} 、 R_{g_a} 和 R_{g_s} 阻值很大，在热路中可以视为断路， R_{c_l} 、 R_{y_s} 的阻值很小，可以视为短路。又因为 R_{j_c} 是由IGBT器件本身决定的，且在工程中， T_j 不宜直接获取。最终得到

$$T_c - T_a = P_{\text{tot}} (R_{l_y} + R_{s_a}) \quad (12)$$

由式(12)可以看出， $(R_{l_y} + R_{s_a})$ 越小，系统的散热性能越高。

根据散热系统设计中预留散热裕量的原则，忽略系统有利于散热的次要影响，将冷板内管路视为长柱形管道。对于一次换热，根据相似准则理论，冷却介质（水）换热系数为

$$\alpha_y = Nu_y \frac{\lambda_y}{d_L} \varepsilon_1 \quad (13)$$

努谢尔特数

$$Nu_y = 0.021 Re_y^{0.8} Pr_y^{0.43} \left(\frac{Pr_y}{Pr_G} \right)^{0.25} \quad (14)$$

$$(Re_y = 1 \times 10^4 \sim 5 \times 10^6, Pr_y = 0.6 \sim 700)$$

雷诺数

$$Re_y = \frac{\rho_y w_y d_L}{\eta_y} = \frac{w_y d_L}{\mu_y} \quad (15)$$

式(13)~式(15)中, λ_y 为冷却介质的导热系数, $W/(^{\circ}C \cdot m)$; ε_1 为校正系数 ($0 \leq \varepsilon_1 \leq 1$), 表示管长对换热系数的影响, 当管长 $l_L > 50d_L$ 时, $\varepsilon_1 = 1$; Pr_y 为普朗特数; $(Pr_y/Pr_G)^{0.25}$ 为校正系数, 表示管内层流底层对管内流体热流方向的影响; w_y 为水在管内的平均流速, m/s ; d_L 为管路特征长度, m ; μ_y 为冷却介质的运动粘滞系数, m^2/s 。

由热阻计算公式 $R_{Ly} = \frac{1}{\alpha_y F_L}$ (F_L 为换热面积, m^2 , $F_L = \pi d_L l_L$), 可得

$$R_{Ly} = \frac{1}{0.021 \left(\frac{w_y d_L}{\mu_y} \right)^{0.8} Pr_y^{0.43} \left(\frac{Pr_y}{Pr_G} \right)^{0.25} \lambda_y \pi l_L} \quad (16)$$

二次换热与一次换热类似, 考虑到散热裕量的预留, 将换能器散热肋片视为多片平行安装的长条形薄壁来计算。

$$R_{sa} = \frac{1}{0.032 m_s \left(\frac{w_a d_s}{\mu_a} \right)^{0.8} \lambda_a l_s} (Re_y > 1 \times 10^5) \quad (17)$$

式中, λ_a 为空气的导热系数; w_a 为空气流速; d_s 为散热肋片特征长度; μ_a 为空气运动粘滞系数; m_s 为散热肋片的片数; F_s 为换热面积, $F_s = d_s l_s$, l_s 为散热肋片宽度, m 。

工程应用与实验结果分析

以DIM800ECM33-F000型IGBT为例, 六路并联斩波模块, 液冷设计参数 ΔT 不大于 $20^{\circ}C$ 。斩波回路最大直流电压1 780 V, 最大直流电流977 A, 驱动电阻 $R_{G(on)} = 5.3 \Omega$, $R_{G(off)} = 8.2 \Omega$ (IGBT相关参数见DYNEX产品技术手册)。

由式(9)可以得到系统的极限损耗 $P_{tot} = 16 \text{ kW}$, 由式(12), $(R_{Ly} + R_{sa}) \leq (T_c - T_a)/P_{tot} = 1.25^{\circ}C/kW$, 结合本文设计方法所设计的液冷散热

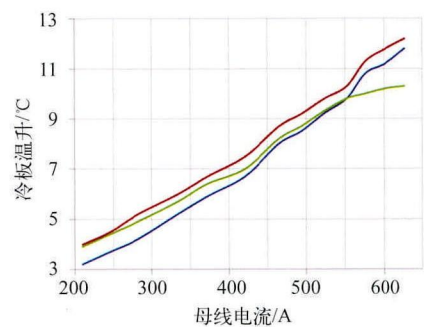
系统参数如下表所示。

表 液冷散热系统设计参数

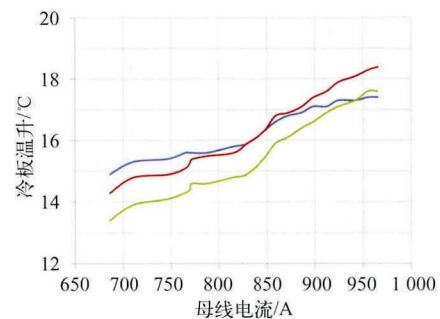
	特征长度/ m	介质流量/ (m/s)	等效管长/ m	空散热片数
一次冷却	16.5×10^{-3}	1	1.8	
二次冷却	20×10^{-3}	1	2.4	400

依照表中的参数, 由式(16)、式(17)有 $R_{Ly} = 0.34^{\circ}C/kW$, $R_{sa} = 0.81^{\circ}C/kW$, 满足工程要求。

实验现场环境温度 $T_b = 22.1^{\circ}C$ 。在电动机空载调速和负载调速时, 冷板的温升随斩波母线电流的变化曲线分别如图4a、b所示。



(a) 冷板温升随空载电流的变化曲线



(b) 冷板温升随负载电流的变化曲线

图4 冷板温升随斩波母线电流的变化曲线

由图4a、b可以看到, 当系统在极限条件下 $\Delta T < 18.5^{\circ}C$ 时, 完全满足系统散热要求。不同冷板在实际系统运行中存在 $0.5 \sim 1.5^{\circ}C$ 的温差, 为了方便现场安装, 冷板与换能器之间采用不锈钢软管连接, 软管的折弯造成不同水路的水阻不同, 影响管内冷却液流速不均, 从而导致了冷板间的温升不一致。

若采用传统强迫风冷的办法散热, 以文献[5]或文献[10]中设计的风冷散热器为例, 在采用4个风速 4 m/s 的冷却风扇作用下, 由于基板板厚限制了热阻的最小值, 导致利用经验公式计算热阻

时,当散热基板厚度 $d < 2.26$ m时无解(且此时忽略了散热片的热阻,认为散热面积为无穷大)。这显然是不合理的,但若增大板体表面积、流动风量或设置空调机降低环境温度,则装备在成本、便于装配以及噪声要求等方面无疑也不能满足要求。实际工程运行也证实了风冷系统不能很好地满足大功率转子变频调速的散热要求。在外部环境温度稍高或柜内风道因故不畅时,斩波模块IGBT工作温度会不断升高,致使系统报警停机或IGBT烧毁。

结束语

针对大功率直流升压斩波IGBT模块的功率损耗进行计算。本文建立了液冷散热系统的热路数学模型,并通过相似准则理论得出了一次冷却过程和二次冷却过程的热阻公式。阐述了设计过程中应当注意的对系统热阻有影响的物理量,并依此设计了一套液冷散热系统。工程实验证明,该系统具有散热效率高、无须外置空散、体积小、噪声小以及运行稳定等优点。现此系统已配套大功率IGBT直流斩波器在全国多地投入使用,运行情况良好。

液冷散热系统目前成本较高,需要注意IGBT散热不均、水路电路隔离、换液、管路防锈、防管体以及接口处溅水、滴水 and 渗水等问题。在 T_a 很低时还要考虑管路、冷板冷凝的问题。解决这些问题是下一步所要进行的工作内容。

参考文献

- [1] 陈明,胡安,唐勇,等.绝缘栅双极型晶体管脉冲工作时结温特性及温度分布研究[J].西安交通大学学报,2012,46(3):70-76.
- [2] 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(5):775-778.
- [3] Sprlak R, Oplustil J, Kalvar D, et al. Design of experimental liquid heat sink for high power electronic [C]. Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2014 14th International Conference on, 2014: 392-396.
- [4] Bazzi A M, Krein P T, Kimball J W, et al. IGBT and diode loss estimation under hysteresis switching [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(2): 1044-1048.
- [5] 胡建辉,李锦庚,邹继斌,等.变频器中的IGBT模块损耗计算及散热系统的设计[J].电工技术学报,2009,24(2):159-163.
- [6] 白保东,陈德志,王鑫博.逆变器IGBT损耗计算及冷却装置设计[J].电工技术学报,2013,28(8):97-106.
- [7] Peng W, McCluskey P, Bar-Cohen A. Hybrid solid- and liquid-cooling solution for isothermalization of insulated gate bipolar transistor power electronic devices [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2013, 3(3): 601-611.
- [8] Lee T Y T. Design optimization of an integrated liquid-cooled IGBT power module using CFD technique [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2000, 23(1): 55-60.
- [9] Mestha L K, Evans P D. Analysis of on-state losses in PWM inverters [C]. IEE Proceedings B (Electric Power Applications), IET, 1989: 189-195.
- [10] 杜毅,廖美英.逆变器中IGBT模块的损耗计算及其散热系统设计[J].电气传动自动化,2011,33(1):42-46.

(收稿日期:2014-12-15) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告