

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.12.016

高功率密度电力电子模组热特性研究与试验

殷超¹, 解鹏程¹, 刘彬¹, 于海波¹, 熊杰¹

(南京南瑞继保电气有限公司, 南京 211102)

摘要: 针对150 kW高功率密度电力电子直流变压器功率模组设计中的散热问题,研究高频导线热损耗原理,电磁—热耦合仿真计算温升,从涡流损耗的机理改进导线结构,仿真分析降低热损耗的有效性,导体及模组结构件温升降低至30.5 K以下。对高压侧模组中铝基板散热器翅片参数优化设计,但功率器件仍有局部温升过高问题,再结合蒸汽腔均热技术开发新型高效散热器,从热阻理论分析、温升仿真计算到单板测试验证均热板导热系数达到4 000 W/(m·K),功率器件温升降低至31.9 K。搭建试验平台,对研制的功率模组样机按额定功率运行并实测,模组功率密度达到1.92 kW/L,且重要器件均满足温升目标,电力电子模组紧凑化集成的同时保障了可靠性。

关键词: 高功率密度; 温升控制; 高频载流导线; 蒸汽腔均热; 试验平台

Study and Test on Thermal Characteristics of High-power-density Electronic Module

YIN Chao¹, XIE Pengcheng¹, LIU Bin¹, YU Haibo¹, XIONG Jie¹

(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: In view of heat dissipation in the design of 150 kW high-power-density electronic DC transformer power module, the principle of heat loss of high-frequency conductor is studied. The temperature rise is calculated by electromagnetic thermal coupling simulation. The conductor structure is improved from the mechanism of eddy current loss, the effectiveness of reducing heat loss is analyzed by simulation, and the temperature rise of conductor and module structure is reduced to less than 30.5 K. The parameters of fin of the aluminum base radiator in the module of high voltage side is optimized, but the temperature rise of the IGBT & SiC is still too high. The new and high efficiency radiator is developed in combination with the vapor chamber soaking technology. It is verified from the theoretical analysis of thermal resistance and temperature rise simulation that the thermal conductivity of the vapor chamber reaches 4 000 W/(m·K), and the temperature rise of the power element is reduced to 31.9 K. Finally, the test platform is set up and the temperature rise of the developed power module prototype is operated at rated power. It is measured that the power density of the module reaches 1.92 kW/L and the important elements meet the temperature rise target, thus the reliability of the power electronic modules, at the time of compact integration, is also assured at the same time.

Key words: high power density; temperature rise control; high-frequency-current conductor; vapor chamber; test platform

0 引言

电力电子装备已广泛应用于电力系统,然而中

压电力电子设备的体积和重量都较大,制约了城市负荷中心、海上新能源送电平台、孤岛供电平台等场合的应用,提升中压电力电子装备的功率密度意

收稿日期:2024-06-04; 修回日期:2024-08-05

基金项目:国家电网有限公司科技项目(5500-202040326A-0-0-00)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC(5500-202040326A-0-0-00).

义重大^[1]。随着电力电子设备功耗和集成度的增加,设备在高功率运行时会产生大量的热,热量聚集会造成系统运行不稳定和损坏,不均匀的温度分布会在电子器件内部产生热应力导致热变形,相当比例的电子器件由于散热不足而影响了工作效率。散热问题已成为电力电子设备实现高效化、小型化的瓶颈,高效散热技术是电力电子小型化技术发展的关键^[2-4]。

针对如何降低温度提高工作环境的质量的问题,国外学者在提高散热装置散热性能的同时,更偏重于新技术应用与基础理论的研究。捷克学者 Roman Sprlak 针对模组发热较大,散热量小的问题进行模型的建立,利用电源模块进行模拟实验,通过热场的分析,将结果用于模组的优化设计和安装^[5]。印度学者 M.Chandrasekar 利用无源热调节技术对散热翅片进行研发,并通过光电实验中证明,所研究的这种翅型不仅可以降低温度还增加了发电量^[6]。Traipattanakul 等人则研究了一个简单的利用汽化潜热的水蒸气室,此相变传热技术可在多种应用中强化传热^[7]。在水冷系统的研究中,众多学者从冷却剂的性质、冷却液的流量、冷却液的流动形式以及管道等因素对水冷装置进行较为深入的探讨。

国内学者则对大功率器件倾向于工程化水冷方案的设计与研究。赵国亮等人设计制作的一种平行微通道水冷板,在多种变工况条件下进行了其传热性能的实验研究^[8-9]。丁杰等人建立水冷散热器模型,并经过有限元分析和试验验证,对翅柱式 IGBT 水冷板的换热性能进行研究^[10-11]。此外,在散热器的几何和结构优化及散热系统风道设计等方面的研究也有较多的研究^[12-15],在新能源、通讯、光电等行业领域中,部分工程师对相变散热、热电冷却、热管散热等高效散热技术也进行了应用设计^[16-22]。

但是,上述学者仅针对一般功率密度等级的电力电子设备散热问题进行研究,或是直接采用价格昂贵的液冷却板。然而,高功率密度电力电子装备设计对散热功率提出了更高的要求,一方面既有的散热器和冷却板体积较大,不利于设备紧凑化,间接降低功率密度;另一方面,功率的提升也会带来成本的增加,亟需在常规风冷散热基础上结合高效散热技术提升经济效益。

文中以 150 kW 电力电子直流变压器功率模组作为研究对象,设计功率密度在 1 kW/L 以上,对于模组的热特性分为两部分考虑:一是基于涡流效应与集肤效应高频载流导线热损耗分析;二是高功率器件的风冷高效散热技术研究,以满足高功率密度

模组紧凑化散热需求。

1 电力电子模组结构布局设计

模组的结构包括高压侧子模组,高频变压器,电感和低压侧子模组等,见图 1。为实现功率密度的提升,模组需要进行空间布局紧凑化设计,而高压侧子模组和低压侧子模组有设计优化空间。对于高、低压侧子模组,以高频变压器的宽度和高度作为约束条件,同时紧凑布局高、低压侧子模组在深度方向上的布局,保证绝缘距离为前提压缩深度,则可以达到减小整体模组深度尺寸的目的。

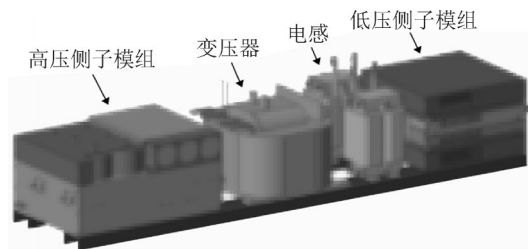
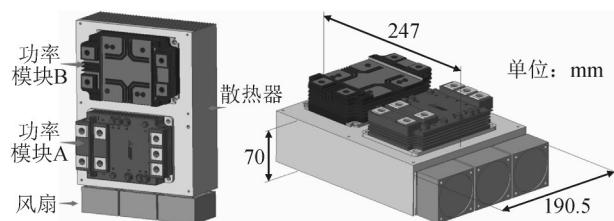


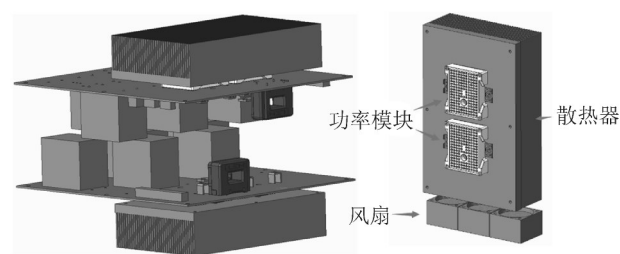
图1 电力电子直流变压器功率模组组成

Fig. 1 Composition of electronic DC transformer module

根据模组整体的结构设计,高压侧子模组内部的功率模块结构设计组成基本见图2。功率器件安装于散热器,一端有风扇的配置,组成风冷散热系统。由于单元模组的高功率密度设计,散热器的尺寸有相应的限制。



(a) 高压侧子模组



(b) 低压侧子模组

图2 模组内部功率模块布局

Fig. 2 Internal IGBT & SiC layout

低压侧子模组内功率模块结构设计为两块功率板,每块功率板板载2个功率器件。为提升低压侧子模组的功率密度,压缩体积,两块功率板的相对位置为镜像相对的错位对扣布置设计。

高、低压侧子模组中的高功率器件由于功耗较高,对安全工作温度上限值也有要求。结合器件的热阻特性,预留安全裕度,经计算设定的最高温升目标见表1。

表1 功率器件特性与温升目标

Table 1 IGBT & SiC characteristics and temperature increment target

参数	高压侧	低压侧
总热功耗/W	1 250	400
温升目标/K	40	42
工作环境温度/℃	0 ~ 50	

由表1可知,相同环境下,高压侧子模组的功率器件热功耗与温升目标条件均比低压侧更严苛,后续研究也证明低压侧子模组只通过常规风冷散热器设计即可满足温升要求,而高压侧则较难实现。因此下文重点针对高压侧功率模块高效散热设计研究进行介绍。

2 高频载流导线热损耗研究与优化

在电力电子装备模组中往往涉及到大电流涡流场产生的热损耗,根据相关经验,导线、箱体材料的选型、边距控制设计对高频载流导线热损有影响。从导线自损和周边器件损耗两个方向理论进行电磁—热耦合仿真研究,优化设计降低损耗功率。

2.1 高频导线热损耗原理

2.1.1 集肤效应

导线在通过高频电流时,由于集肤效应的存在,使电流在导体内不再均匀分布,导线有效通流截面变小,高频电阻显著增加,导致电阻性损耗增大,在一定条件下将使导线过热,严重时甚至发生绝缘材料的老化失效。当交变电流流过导线时,导线周围变化的磁场也要在导线中产生感应电流,从而使沿导线截面的电流分布不均匀。尤其当频率较高时,电流几乎是在导线表面附近的薄层中流动^[23]。

根据 Maxwell 方程组,导体中任一点电场 E 、磁场 H 、电流密度 J 满足的微分方程为

$$\begin{cases} \nabla^2 H = \mu\gamma \frac{\partial H}{\partial t} \\ \nabla^2 E = \mu\gamma \frac{\partial E}{\partial t} \\ \nabla^2 J = \mu\gamma \frac{\partial J}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

对于电流 i 在半无限大导体中的分布,其数学表达式为

$$J_y = J_0 e^{-\alpha x} e^{-j\beta x} \quad (2)$$

式(2)中

$$\alpha + j\beta = k = \sqrt{\frac{\omega\mu\gamma}{2}}(1 + j) \quad (3)$$

电场强度的解为

$$E_y = \frac{J_0}{\gamma} e^{-\alpha x} e^{-j\beta x} = E_0 e^{-\alpha x} e^{-j\beta x} \quad (4)$$

磁场强度的解为

$$H_z = -\frac{jk}{\omega\mu} E_0 e^{-\alpha x} e^{-j\beta x} \quad (5)$$

由式(2)~(5)看出,电流密度、电场强度和磁场强度的振幅沿导体的纵深都按指数规律 $e^{-\alpha x}$ 衰减,而且相位也随之改变。说明当交变电流流过导体时,靠近导体表面处电流密度大,愈深入导体内部,电流密度愈小。当频率很高时,几乎只在导体表面附近薄层中存在,以至于这种场量主要集中在导体表面附近。

工程上常用透入深度 d 表示场量在良导体中的集肤程度。它等于场量振幅衰减到其表面值的 e^{-1} 倍时所经过的距离^[23]。

$$d = \frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\gamma}} \quad (6)$$

其结果表明,频率越高,导电性能越好的导体,集肤效应越显著。如 $f = 50$ Hz 时,铜的集肤深度为 9.4 mm。

2.1.2 涡流效应

高频导线在周围导体上会引起涡流损耗,以受交变电流激励的圆柱形金属导体为例,计算导体中传导电流的麦克斯韦方程式

$$\text{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t} = -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t} \quad (7)$$

$$\text{rot} H_x = -\frac{E_x}{\sigma_0} \quad (8)$$

式(7)、(8)中: $\text{rot} E$ 和 $\text{rot} H$ 表示电场和磁场的旋度,即涡旋电场和涡旋磁场的强度; H_x 、 E_x 为磁场强度和电场强度在 x 方向的分量; μ_0 为导体的相对磁导率。

当导体处于上述的变化磁场时,导体内部的涡流损耗为^[24-26]

$$P = \int_V \frac{J^2}{\sigma_0} dV \quad (9)$$

式(9)中: P 为导体的涡流损耗; J 为涡流密度; σ_0 为导体电导率; V 为导体的体积。

2.2 导线热损耗温升耦合仿真分析

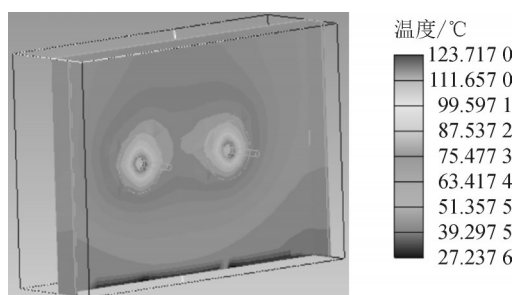
圆形截面高频导线热损耗计算结果见表2。表2是对圆形截面结构形式的高频载流导体及其外壳构造进行高频电流激励下的独立热仿真。其圆形导线构造,在厚度为 2 mm 的 Q235 材料内产生了约 23.4 W 的热损耗。

表2 圆形截面高频导线热损耗计算结果

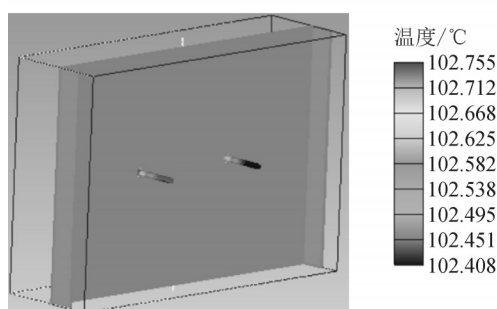
Table 2 Heat loss results of circular high frequency conductor

项目	参数
导线规格/mm	$\phi 5 \times 200$
导线材料	铜
隔板材料/mm	2/Q235
电流载荷	100 A/10 kHz
导线间距/mm	100
导线热功耗/(W·m ⁻¹)	17.2
隔板涡流功耗/W	20

根据上述损耗结果,在 Ansys 平台进行电磁—热耦合仿真,分别求得高频电流出线区域的气流及温度分布。从仿真分析结果可以看出,圆形高频载流导线最高温升 82.8 K,高压模块外壳最高温升 103.7 K。此温升结果意味着导线引起模组整体发热严重,需做改进设计。电磁—热耦合仿真温度分布见图3。



(a) 模组外壳温度分布



(b) 导线温度分布

图3 电磁—热耦合仿真温度分布

Fig. 3 Temperature distribution simulation by electromagnetic thermal coupling

2.3 高频载流导线改进设计

涡流损耗降低传输效率并导致设备过热,必须采取措施加以解决,从涡流损耗的机理及相关仿真验证得出,降低涡流损耗可以从以下几个方面采取措施:

- 1)在满足绝缘水平前提下,减小导线间距,使进出线高频电流产生的磁场相互抵消,减弱涡流效应;
- 2)采用非铁磁性隔板材料,减弱涡流效应的感应电动势,降低涡流损耗;

3)增加导线附近区域的隔板材料的电阻率,采用绝缘板或空气隔离,降低涡流损耗;

4)采用高频电流情况下材料利用率更高的扁平导线。导线改进设计见图4。

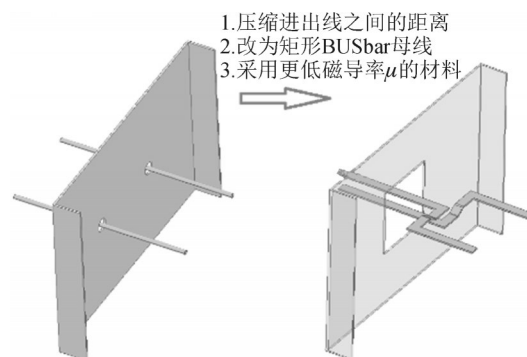


图4 导线改进设计

Fig. 4 Improved design of conductor

高频载流导线及其出线结构的改进路径见图5,其有效降低了因高频电流带来的温升问题。但另一方面,外壳较大的绝缘材料开孔封边在降低涡流效应的同时,也降低了高压端模块的屏蔽性能;在此基础上,提出一种改进形式的出线结构,其通过环氧树脂灌封的设计及工艺,使得进出线之间的距离得以降到最低,最大程度衰减导体自身及在机壳上的涡流效应,减小了进出线的安装尺寸,使各项指标之间取得一种平衡。

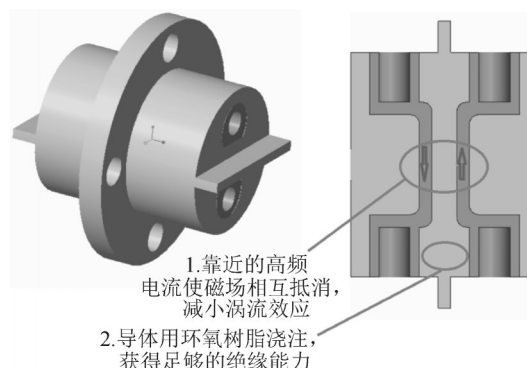
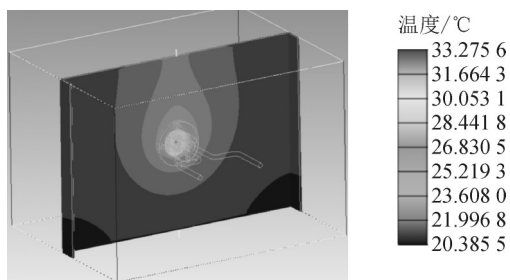


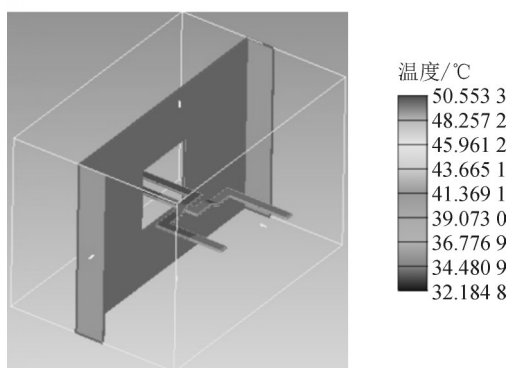
图5 连接端子改进设计

Fig. 5 Improved design of connector

高频端子的磁场主要集中在两导线之间的区域,而导线外围区域磁场很弱,引起的导体涡流效应大幅降低。金属外壳的涡流损耗功率密度大幅降低,仅在端子安装的附近稍有集中,同样规格的外壳热功耗降低至 6 W 以下,端子开窗大幅降低至 30 mm 直径。改进设计后仿真温度分布见图6。从图6可以看出,高频载流导线最高温升由 82.8 K 降低至 30.5 K,高压模块外壳最高温升由 103.7 K 降低至 13.3 K。



(a) 模组外壳温度分布



(b) 导线温度分布

图6 改进设计后仿真温度分布

Fig. 6 Temperature distribution simulation after improved design

所以,针对模组内高频大电流导致导体本身及周围结构件发热严重问题,提出大电流高频连接导体及连接器设计方案,能减小导体及模组结构件高频损耗,大幅降低温升。

3 功率模块高效散热技术研究

在第1节中介绍,高压侧子模组功率模块采用常规风冷散热器难以满足温升目标,需对散热器设计进行更进一步的研究。

3.1 铝基板散热器翅片参数化研究

散热器尺寸见图7,散热器的总体尺寸为(247 mm×190.5 mm×70 mm)作为约束条件,翅片尺寸包括高度 h 、厚度 t 及间隙 b 。通常情况下翅片的高度 h 值越大,散热效果越好。翅片高度 h 为散热器高度减去散热器基板厚度。由于功率器件的螺纹安装紧固需求,此处散热器的基板厚度建议不小于10 mm,因此散热器翅片高度 h 的最大值为60 mm。

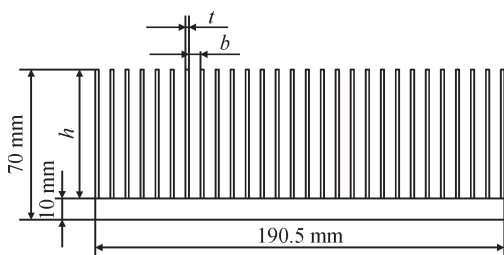


图7 散热器尺寸参数化

Fig. 7 Dimensional parameterization of heatsink

在热仿真软件ICEPACK中建立散热模型,输入两个功率器件的热功耗以及所选型的风扇PQ特性参数,将散热翅片的厚度 t 和翅片间隙 b 作为参数变量,进行参数化建模。结合实际的铲齿工艺,翅片厚度最小能做到1 mm,翅片间隙最小能做到2.2 mm,参数化建模时,翅片厚度 t 取值为1、1.1、1.2 mm,翅片间隙 b 从2.2 mm到3 mm按0.1 mm等差进行取值。仿真计算结果见表3。

表3 翅片参数化温升仿真结果

Table 3 Results of fin parametric temperature increment simulation

翅厚 t /mm	间隙 b /mm	翅数	温升结果/K
1.0	2.2	59	49.23
	2.3	57	49.83
	2.4	55	50.37
	2.5	54	51.07
	2.6	52	52.04
	2.7	51	53.43
	2.8	50	53.83
	2.9	48	55.38
	3.0	47	55.54
	2.2	57	50.17
1.1	2.3	55	50.23
	2.4	54	50.44
	2.5	52	51.11
	2.6	51	51.78
	2.7	50	52.11
	2.8	48	53.2
	2.9	47	54.04
	3.0	46	54.54
	2.2	55	50.6
	2.3	54	50.97
1.2	2.4	52	51.35
	2.5	51	51.91
	2.6	50	52.64
	2.7	48	53.09
	2.8	47	53.86
	2.9	46	54.11
	3.0	45	55.13

散热器温升最低值为翅厚 $t=1$ mm及翅片间隙 $b=2.2$ mm时,散热器能发挥最佳性能,温升值49.23 K。但即使如此,温升仍超过目标值40 K,说明高热流密度条件下常规铝基板散热器局部温升过高,需结合高效均热技术减小扩散热阻。

3.2 VC平板蒸汽腔均热技术研究

蒸汽腔均热板(vapor chamber, VC板)散热技术,其基本结构见图8。VC板是一个内壁具有微结构

的真空腔体,当热量由热源传导至蒸发区时,腔体里面的工质在低真空度的环境中,便会开始产生液相气化的现象,此时工质吸收热能并且体积迅速膨胀,气相的工质会很快充满整个腔体,当气相工质接触到一个比较冷的区域时便会产生凝结现象,借由凝结的现象释放在蒸发时累积的热,凝结后的液相工质会借由微结构的毛细现象再回到蒸发热源处,此运作将在腔体内周而复始进行^[27-28]。

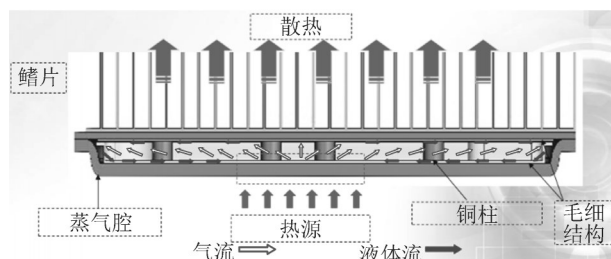


图8 VC板工作原理

Fig. 8 Operating principle of vapor chamber

VC板最大的特点是平面方向的当量导热系数值可达3 000 W/(m·K)以上,是纯铜材料的10倍以上。

3.2.1 VC板热阻分析

在热传导中,通常用热阻来反映阻止热量传递的能力。VC板热阻模型见图9。图9中 t_f 为热源温度; R_v 为铝基板的热阻; R_c 为单个蒸汽腔的热阻; R_{fin} 为整个散热翅片的热阻; t_w 为环境温度。散热翅片在3.1节已做优化且参数定型,因此 R_{fin} 不变,重点分析 R_v 与 R_c 的影响因素。

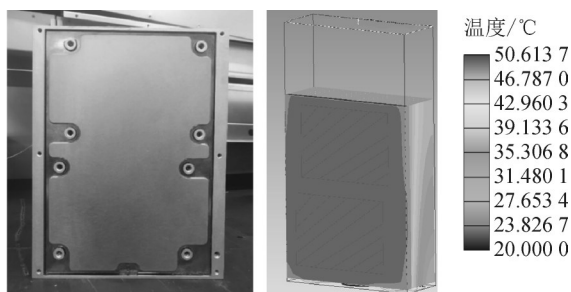


图9 VC板散热器设计与升温仿真

Fig. 9 Design and temperature increment simulation of vapor chamber heatsink

1)铝基板热阻 R_v 。铝基板的传热方式为经典的固体导热方式,传热学中的热流量公式为

$$Q = \lambda A (t_f - t_w) / \delta \quad (10)$$

式(10)中: δ 为铝基板的厚度; A 为铝基板的面积; λ 为导热系数。整理式(10)得

$$Q = \frac{t_f - t_w}{\frac{\delta}{\lambda A}} = \frac{t_f - t_w}{R_v} \quad (11)$$

于是铝基板热阻为

$$R_v = \frac{\delta_v}{\lambda_v A_v} \quad (12)$$

2)蒸汽腔热阻 R_c 。蒸汽腔采用微热管热阻模型,而微热管的传热涉及比较复杂的相变传热原理,这里做一个近似处理,将微热管视为一个具有高效导热系数的导热体,这样就和铝基板的热阻计算类似

$$R_c = \frac{\delta_c}{\lambda_c A_c} \quad (13)$$

式(10)中: δ_c 为蒸汽腔压扁厚度; A_c 为VC板与铝基板接触面积。而VC板并非传统意义上的金属铜, λ_c 远高于普通铜的导热系数。

综上所述,整个蒸汽腔均热板的热阻为基板热阻 R_v 、多个蒸汽腔的热阻 R_c 、整个散热翅片 R_{fin} 的热阻3部分热阻之和,即^[29]

$$R_{new} = R_v + n R_c + R_{fin} = \frac{\delta_v}{\lambda_v A_v} + n \frac{\delta_c}{\lambda_c A_c} R_{fin} \quad (14)$$

对于本散热器采用的VC板为单蒸汽腔即 $n = 1$,且 A_c 与 A_v 接近,式(14)进一步简化为

$$R_{new} = \frac{1}{A} \left(\frac{\delta_v}{\lambda_v} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} \right) + R_{fin} \quad (15)$$

而对于纯铝基板散热器,其没有VC板,总热阻为

$$R_{origin} = \frac{1}{A} \left(\frac{\delta_0}{\lambda_v} \right) + R_{fin} \quad (16)$$

并有

$$\delta_0 = \delta_v + \delta_c \quad (17)$$

将式(15)-(17)联立并做差值比较,有

$$R_{new} - R_{origin} = \frac{\delta_c}{A} \left(\frac{1}{\lambda_c} - \frac{1}{\lambda_v} \right) \quad (18)$$

蒸汽腔导热系数 λ_c 在3 000 W/(m·K)以上,铝基板导热系数 λ_v 一般207 W/(m·K),满足 $\lambda_c \gg \lambda_v$,显然 $R_{new} - R_{origin} < 0$,即理论上证明了含有VC板的散热器热阻显著低于纯铝基板散热器。

3.2.2 VC板散热器设计与仿真

图9为在散热器基板上设计嵌入VC均温板。在ICEPAK模型中建立VC均温板的模型,VC均温板在基板的长和宽方向上的导热率设定为4 000 W/(m·K),在20℃环境下进行仿真计算,散热器上最高点温升为30.6 K,并且整个基板面温度极差小于3℃,体现显著的均温特性,有效改善局部温升过高问题。

3.2.3 VC板散热器平台与测试

为进一步验证VC板散热器均温效果,搭建了散热器测试平台,使用了基于方块电阻设计出的加热源模块,去分别替代两个功率器件,保持总热功耗1 250 W一致。在加热块及散热器表面布置了多个热电偶测点,见图10。

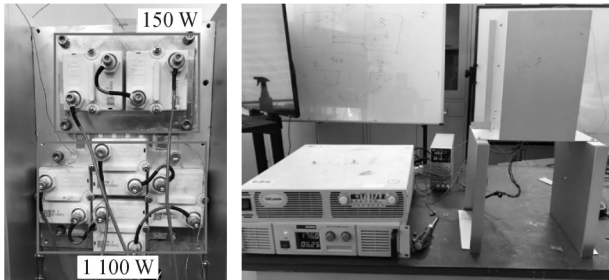


图 10 VC板散热器测试平台与测点分布
Fig. 10 Test platform and distribution of vapor chamber heatsink

将各测点连接至数据记录仪,将系统运行至大于6 h,记录测点温度见表4。从数据结果可计算得出,VC板散热器上最高温升为31.9 K,与仿真结果相近,说明所设计的VC板散热器基板面导热系数接近4 000 W/(m·K)。

表 4 VC板散热器温升测试结果
Table 4 Temperature increment results of vapor chamber heatsink

测点位置	测点温度/℃
环境温度	22.0
散热器表面(上)	32.2
加热块 1 表面	42.0
散热器表面(中)	53.8
加热块 2 表面	49.3
散热器表面(下)	41.2
散热器与功率器件接触面	53.9

4 模组整机温升试验

150 kW 直流变压器模组样机见图 11。经测试功率密度达到1.92 kW/L,最高效率99.3%。将样机在额定电压、额定功率运行,在不同运行时间测量各部位温度,验证在满载运行条件下温升正常。

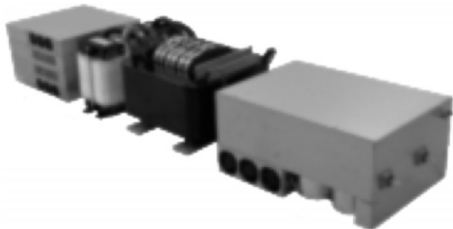


图 11 直流变压器模组样机
Fig. 11 DC transformer module prototype

所搭建的模组试验平台见图 12,其在功率器件、连接端子、导线等表面布置了多个热电偶测点,在 24 ℃环境温度中,样机额定电压输出,额定电流运行 8 h,主要位置温度见表 5,均符合温升限值的要求,且模组测试功率器件、导线温升与仿真值相近,验证了设计结果的一致性。

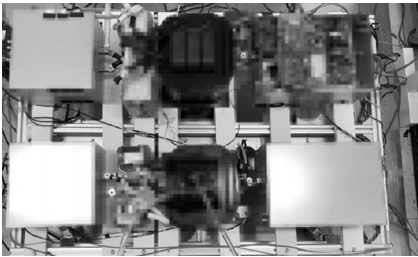


图 12 模组试验平台
Fig. 12 Module experiment platform

表 5 模组整机温升测试结果

Table 5 Temperature increment results of moudle

测试项	功率器件	外部连接端子	绝缘导线
运行 1 h/℃	45.0	43	34.0
运行 2 h/℃	53.0	53	46.0
运行 8 h/℃	60.0	60	50.0
最终温升/K	36.0	36	26.0
温升限值/K	40.0	50	35.0
仿真温升/K	30.6	—	30.5

5 结论

项目中自主设计并研制的150 kW 电力电子直流变压器功率模组,经测试功率密度达到1.92 kW/L。紧凑型高功率密度模组中的高效散热问题成为关键技术之一,为此开展了热特性研究并取得了如下结果:

1)研究高频导线热损耗原理并电磁—热耦合仿真计算温升,从涡流损耗的机理改进导线结构,仿真分析降低热损耗的有效性,高频载流导线温升由82.8 K降低至30.5 K,高压模块外壳温升由103.7 K降低至13.3 K。

2)对高压侧模组中铝基板散热器翅片参数优化设计,但功率器件仍有局部温升过高问题,再结合蒸汽腔均热技术开发新型高效散热器,从热阻理论分析、温升仿真计算到单板测试验证均热板导热系数达到4 000 W/(m·K),功率器件温升降低至31.9 K。

3)基于上述研究结果,搭建模组整机试验平台,对研制的功率模组样机按额定功率运行并实测,重要器件均满足温升目标,且与仿真结果相近,验证模组热特性研究的有效性。

文中还体现,除核心高功率器件外,高频载流导线热损耗对模组温升也有较大的影响,在后续项目研究与产品开发时需加以考虑。高效散热关键技术的研究与应用,为进一步提升电力电子装备功率密度打好可靠性基础,更进一步实现产品紧凑化、集成化的方向发展。

参考文献:

- [1] 马为民,吴方劼,杨一鸣,等. 柔性直流输电技术的现状及应用前景分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2429-2439.
MA Weimin, WU Fangjie, YANG Yiming, et al. Flexible HVDC transmission technology's today and tomorrow[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2429-2439.
- [2] MOHANRAJ C, DINESHKUMAR R, MURUGAN G. Experimental studies on effect of heat transfer with CuO-H₂O nanofluid on flat plate heat pipe[J]. Materials Today: Proceedings, 2017, 4(2):3852-3860.
- [3] 贺德佳,张亚平,姬长发,等. 微平板热管热性能的优化分析[J]. 西安科技大学学报, 2019, 39(3):419-425.
HE Dejia, ZHANG Yaping, JI Changfa, et al. Optimum analysis of thermal performance of micro flat heat pipe[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2019, 39(3):419-425.
- [4] 张磊,王满康,叶婧,等. 兼具求解速度与隐私性的复杂供热管网等值简化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(10):105-117.
ZHANG Lei, WANG Mankang, YE Jing, et al. An equivalent simplified model for a complex heating network with a balance between solution speed and privacy[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(10): 105-117.
- [5] SPRLAK R, CHLEBIS P. Optimization of water cooling for a converter[C]//Recent Advances in Electrical Engineering and Related Sciences(AETA 2013). Ho Chi Minh City: Springer, 2013:125-133.
- [6] CHANDRASEKAR M, SENTHILKUMAR T. Passive thermal regulation of flat PV modules by coupling the mechanisms of evaporative and fin cooling[J]. Heat and Mass Transfer, 2016, 52(7):1381-1391.
- [7] WONG M Y, TRAIPATTANAKUL B, TSO C Y, et al. Experimental and theoretical study of a water - vapor chamber thermal diode[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019(138):173-183.
- [8] 赵国亮,李卫国,乔尔敏,等. IGBT水冷基板瞬态启停及变工况运行特性实验研究[J]. 热科学与技术, 2014, 13(4):352-358.
ZHAO Guoliang, LI Weiguo, QIAO Ermin, et al. Experimental study on transient characteristics of liquid-cooling plate under start/stop and off-design conditions[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2014, 13(4): 352-358.
- [9] 周雅楠,胡毅,何赞泽,等. IGBT开关诱导产生机械应力波的低压试验研究[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(6):116-124.
ZHOU Yanan, HU Yi, HE Yunze, et al. Low voltage experimental studies on mechanical stress wave induced by IGBT switch[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(6):116-124.
- [10] 丁杰,张平. 翅柱式IGBT水冷散热器的热仿真与实验[J]. 电源学报, 2015, 13(4):70-76.
DING Jie, ZHANG Ping. Thermal analysis and test of IGBT water-cooling radiator with pin-fins[J]. Journal of Power Supply, 2015, 13(4):70-76.
- [11] 郭子庆,王学华. 基于神经网络的IGBT模块剩余使用寿命预测模型[J]. 电测与仪表, 2023, 60(1):132-138.
GUO Ziqing, WANG Xuehua. Prediction model of neural network-based IGBT module remaining service life[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(1): 132-138.
- [12] 李广义,张俊洪,高键鑫. 大功率电力电子器件散热研究综述[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(11):8-14.
LI Guangyi, ZHANG Junhong, GAO Jianxin. Review on heat dissipation of high power electronic devices[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(11):8-14.
- [13] 王绿,耿明昕,赵亚林,等. 变压器用翅片式散热结构数值模拟研究[J]. 变压器, 2023, 60(3):23-28.
WANG Lü, GENG Mingxin, ZHAO Yalin, et al. Numerical simulation of finned heat dissipation structure for transformer[J]. Transformer, 2023, 60(3):23-28.
- [14] LI Guangyi, ZHANG Junhong, GAO Jianxin. Thermal analysis and structural optimization of dual IGBT module heat sink under forced air cooling condition[C]//IEEE 3rd Advanced Information Management, Communication, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC). Chongqing, China: IEEE, 2019:1757-1762.
- [15] 王文奇,王飞龙,何雅玲,等. 一种新型树叶形翅片的数值与实验研究[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(11):2469-2475.
WANG Wenqi, WANG Feilong, HE Yaling, et al. Numerical and experimental study of a novel leaf-type fins[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(11): 2469-2475.
- [16] 刘瑞科,王超臣,李森森,等. 高功率半导体激光器散热方法综述[J]. 光电技术应用, 2019, 34(6):1-6.
LIU Ruike, WANG Chaochen, LI Sensen, et al. Review of thermal dissipation methods of high-power semiconductor lasers[J]. Electro-optic Technology Application, 2019, 34(6):1-6.
- [17] 夏川,刘会家,吴刚梁,等. 含防爆盒的三芯电缆中间接头散热性能及载流量研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(9):47-52.
XIA Chuan, LIU Huijia, WU Gangliang, et al. Research on heat dispersion and ampacity of three-core cable joints with explosionproof box[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(9):47-52.

- [18] 王德辉. 应用液态金属的换流阀散热技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
WANG Dehui. Simulation analysis of converter valve radiator with liquid metal[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [19] 刘海洋. 电推进系统的相变储能式散热器性能研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
LIU Haiyang. Research on the performance of phase change energy storage radiator for electric propulsion system[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019.
- [20] 李新海, 陈昱, 刘均裕, 等. 考虑轴向散热的 10 kV 三芯电缆中间接头稳态热路模型分析[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(10): 56-62.
LI Xinhai, CHEN Yu, LIU Junyu, et al. A steady state thermal circuit model analysis of the 10 kV 3-core cable joint considering axial heat dissipation[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(10): 56-62.
- [21] 沈晶晶. 超算集群 CPU 重力热管散热系统研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
SHEN Jingjing. Research on superficial cluster CPU gravity heat pipe cooling system[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [22] 谢佳伟, 应展烽, 李德明. 突发散热故障时的光伏 MPPT 变换器控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(11): 170-178.
XIE Jiawei, YING Zhanfeng, LI Deming. A control method for a photovoltaic MPPT converter with a sudden heat dissipation fault[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(11): 170-178.
- [23] 冯慈璋, 马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
FENG Cizhang, MA Xikui. An introduction to engineering electromagnetic fields[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [24] 高大群, 刘国伟, 刘彬. 基于电磁-热耦合的电气设备涡流温升数值分析与试验[J]. 电工电气, 2019(12): 28-32.
GAO Daqun, LIU Guowei, LIU Bin. Numerical analysis and test of electrical equipment eddy current and temperature rise based on electromagnetic-thermal coupling[J]. Electrotechnics Electric, 2019(12): 28-32.
- [25] 苏湛威, 蔡定国, 连骏, 等. 用于断路器温升试验的大电流发生器研制[J]. 变压器, 2022, 59(11): 6-10.
SU Zhanwei, CAI Dingguo, LIAN Jun, et al. Development of high current generator for temperature rise test of circuit breaker[J]. Transformer, 2022, 59(11): 6-10.
- [26] 赵志刚, 史文军, 王振, 等. 不同频率激励下变压器铜屏蔽中涡流损耗的研究[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(3): 58-64.
ZHAO Zhigang, SHI Wenjun, WANG Zhen, et al. Research of eddy-current loss of copper shielding in transformer under different frequencies[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(3): 58-64.
- [27] SHAERI M R, ATTINGER D, BONNER R. Feasibility study of a vapor chamber with a hydrophobic evaporator substrate in high heat flux applications[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2017(86): 199-205.
- [28] 王宏燕, 郝丽敏, 赵耀华, 等. 平板蒸汽腔与微热管阵列组合式传热装置[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(4): 651-654.
WANG Hongyan, HAO Limin, ZHAO Yaohua, et al. A heat transfer device combined with vapor-chamber and micro flat heat pipe array[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(4): 651-654.
- [29] 揭志伟. 蒸汽腔阵列式铝制均热板的结构设计和传热性能分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
JIE Zhiwei. Study on structural design and heat transfer performance analysis of Aluminum vapor chamber with array chambers[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.

殷超(1993—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电气电力设备研发设计(E-mail: yinc@nrec.com)。