

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.03.017

外置式散热模块对配电变压器热点温升的影响

唐智健¹, 邱志斌¹, 廖才波¹, 周银彪², 蔡木良³, 郝钰³

(1. 南昌大学能源与电气工程系, 南昌 330031; 2. 国网江西省电力有限公司, 南昌 330096; 3. 国网江西省电力有限公司
电力科学研究院, 南昌 330096)

摘要: 对于电网季节性过载引起的配电变压器温升过高情况, 文中提出在油浸式配电变压器的散热片上安装外置式散热模块强化变压器散热能力, 以降低热点温升。为验证该方法的可行性, 以一台S13-M-200/10型配电变压器为研究对象建立三维模型, 在变压器模型的散热片上建立外置式散热模块。改变散热模块建立的位置与数量从而形成4个不同计算模型。通过有限体积法计算4个模型在不同负载状态下的热点温升。对部分仿真结果使用短路法温升试验验证, 仿真与计算误差小于3 K。试验与仿真结果表明合理的安装外置式散热模块可以使油浸式配电变压器的热点温升降低10 K左右, 为配电变压器的温升降低提供一种新的思路。

关键词: 配电变压器; 散热模块; 热点温升; 有限体积法; 温度场

Influence of External Cooling Modules on Hot-spot Temperature Rise of Distribution Transformer

TANG Zhijian¹, QIU Zhibin¹, LIAO Caibo¹, ZHOU Yinbiao², CAI Muliang³, HAO Yu³

(1. Department of Energy and Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330096, China; 3. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330096, China)

Abstract: In view of excessive temperature rise of distribution transformer due to seasonal overload of power grid, it is proposed in this paper to install external cooling modules on the heat sink of oil-immersed distribution transformer to strengthen the heat dissipation ability of the transformer and reduce the hot spot temperature rise. For verifying the feasibility of this method, a set of type S13-M-200/10 distribution transformer is taken as the research object to set up a three-dimensional model. The external cooling module is set up on the heat sink of the transformer model. Four different calculation models are formed by changing the installation position and number of cooling modules. The finite volume method is used to calculate the hot spot temperature rise of each model under different load conditions. Some of the simulation results are verified by short circuit temperature rise test, and the error between simulation and calculation is less than 3 K. The test and simulation results show that reasonable arrangement of external cooling modules can reduce the hot spot temperature rise of the oil immersed distribution transformer by approximately 10 K, which provides a new idea for reducing the temperature rise of the distribution transformer.

Key words: distribution transformer; external cooling module; hot-spot temperature rise; finite volume method; temperature field

0 引言

配电变压器作为电力系统的终端设备, 分布范

围广、数量大, 其运行状态影响着供电质量^[1-4]。在农村电网中, 配电变压器季节性短时过载问题突出。在占全年多数时间的用电淡季, 配电变压器都

处于低负载的状态;而在春节与暑期等用电高峰期,变压器的负载率出现短时激增,严重时超过额定值,内部温度迅速上升,可能引起变压器烧毁,威胁供电安全与可靠性^[5-7]。目前主要通过3种方法解决这一问题,包括更换大容量变压器、使用耐高温材料制作的高过载变压器^[8-9]以及使用有载调容型变压器^[10-13],但都需对现有变压器进行更换,成本较高。

油浸式变压器常通过风冷和强迫油循环来提升其散热能力。近些年,国内对变压器结构、变压器油种类等因素对散热的影响有大量研究,蒸发冷却技术也被运用于变压器的散热领域,从简单的在变压器外部配置水冷器喷水降温,到在变压器的绕组和铁心处以喷淋、浸渍等方法注入低沸点液态制冷剂加强散热^[14-17]。文中从提升配电变压器自身散热性能的角度出发,提出安装外置式散热模块变相增加变压器的散热面积,从而提高变压器散热能力。散热模块安装相对简单,制作成本较低,与风冷和强迫油循环方法相比不需要为冷却系统提供独立电源,噪声小,稳定性高。在不更换原变压器的前提下,适用于容量相对较小的配电变压器。

文中以一台10 kV油浸式配电变压器为对象,通过有限体积法^[18-33]分析外置式散热模块在降低配电变压器热点温升、提升过载能力方面的效果,并开展温升试验验证仿真结果^[34-35]。

1 配电变压器温度场仿真计算

1.1 加装外置式散热模块的变压器模型

根据强化散热的原理,在配电变压器散热片上加装图1(a)所示的散热模块,材料为铝板,长度为600 mm、宽80 mm、厚3 mm,铝板的上下表面都有6道高15 mm、长415 mm的翅片,用来增大其散热面积。将散热模块下端平坦部分贴着变压器散热片表面安装,采用夹件将其固定,并在两者接触处涂抹导热硅脂以减小热阻,安装效果见图1(b)。

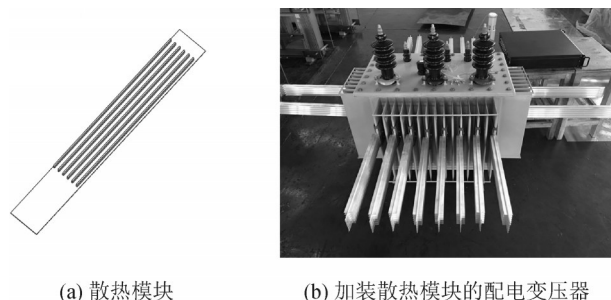


图1 外置式散热模块及其安装效果

Fig. 1 Diagram of external cooling module and its installation effect

以一台S13-M-200/10型油浸式配电变压器为例,根据实际大小建立三维模型,同时考虑3种安装方式下的散热模块,见图2。其中图2(a)模型为不安装散热模块的变压器模型,变压器前、后各有15片散热片,侧面各有8片散热片,总共46片散热片;图2(b)模型在变压器前、后散热片的上端各安装7片散热模块,每两片散热片上水平安装一片散热模块,变压器侧面则各安装2片散热模块;图2(c)模型在变压器每片散热片的上端都安装一片散热模块,安装的高度与图2(b)相同;图2(d)模型则在变压器每片散热片的底端安装一片散热模块。

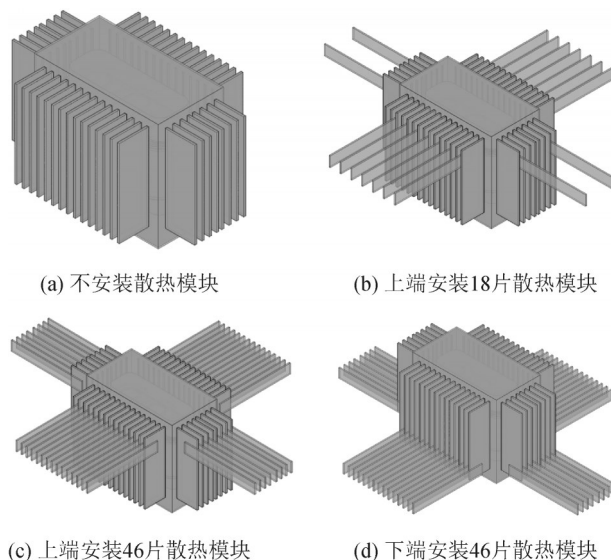


图2 配电变压器三维仿真模型

Fig. 2 Three dimensional simulation model of the distribution transformer

分别计算这4个模型在额定负载和1.3倍过载时的温度场分布,通过对前3个模型温度场的对比可以初步分析散热模块数量、间隔对变压器散热能力的影响。而通过图2(c)和图2(d)两个模型则可以比较散热模块安装高度或位置的影响。

油浸式配变自身的外部电场强度较大区域一般出现在变压器上端,如高压套管附近;而在模型中散热模块沿着变压器本身散热片水平安装,其对变压器自身绝缘的影响几乎可以忽略。若散热模块的安装没有减小配电变压器与高压线间的间距,其对空气绝缘距离影响也不大。

1.2 温度场仿真计算

基于电磁学、传热学与流体力学相关理论,采用流体—温度场耦合计算方法对配电变压器内部温度分布进行仿真分析,通过有限体积法模拟变压器中的能量产生与传递过程,得到内部温度场分布。

1.2.1 热源

配电变压器热源主要来自其自身损耗,包括铜

耗和铁耗。其中,铁耗主要是磁滞损耗和涡流损耗,磁滞损耗受硅钢片材料、磁通密度最大值和频率的影响,而涡流损耗大小取决于硅钢片厚度、磁通密度最大值以及频率。

变压器中的基本铜耗来自绕组中的电流损耗,附加铜耗是由邻近效应与集肤效应引起的额外损耗。铜耗受变压器负载的影响,其计算式为

$$P_{cu} = 3(\beta I_{1N})^2 \cdot R_1 + 3(\beta I_{2N})^2 \cdot R_2 + P_s \quad (1)$$

式(1)中: β 为变压器负载系数; I_{1N} 、 I_{2N} 分别为一、二次侧额定电流,A; R_1 、 R_2 分别为一、二次侧75℃时的线电阻, Ω ; P_s 为附加铜耗,W。分别将计算得到的高、低压绕组上的铜耗作为热源。

仿真时将空载损耗作为热源加载在变压器铁心上,用以模拟铁耗。根据变压器高、低压侧的额定电流、电阻和负载率计算出不同负载下高、低压侧的损耗作为绕组上的热源,见表1。

表1 仿真热源

Table 1 The heat source of simulation

电流	低压绕组/W	高压绕组/W	铁心/W
I_n	1 280	1 435	237
$1.3I_n$	2 163	2 425	237

1.2.2 传热计算

配电变压器中的传热有热传导、热对流和热辐射3种方式^[36-37]。其中,绕组、铁心、油箱和各种构件等固体内部主要为热传导,计算时认为其导热系数为定值。变压器油中同时存在热传导与热对流,热对流发生在变压器油内部以及绕组、铁心、油箱、各种构件与变压器油的边界面处,还有变压器油箱、散热片与外部空气的边界面处。热辐射的影响相对较小,文中计算时忽略其影响。

热传导过程的基本方程为

$$\frac{q_x}{S} = -\lambda \frac{d\theta}{dx} \quad (2)$$

式(2)中: q_x 为 x 方向上的传热速率,W; S 为垂直于热流方向的导热面积, m^2 ; $d\theta/dx$ 为 x 方向上的温度梯度,K/m; λ 为导热系数,W/(m·K)。

对流传热方程为

$$q = S \cdot h \cdot (\theta_w - \theta_f) \quad (3)$$

式(3)中: h 为对流传热系数,W/($m^2 \cdot K$); q 为对流传热速率,W; θ_w 为表面温度, θ_f 为流体的温度,K。

采用有限体积法进行流体—温度场耦合计算,计算过程见图3。将计算区域划分网格,让每个网格点附近存在不重叠的控制体积;将待解控制方程对每个控制体积积分,得到一组离散方程,方程的未知数为网格点上的因变量,即速度、温度等。

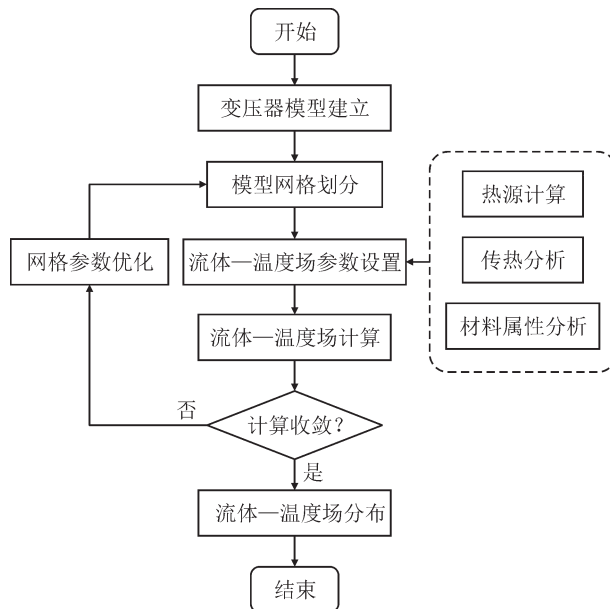


图3 变压器流体—温度场计算流程

Fig. 3 Flow diagram of transformer fluid-temperature field calculation

1.2.3 网格划分

仿真时主要考虑变压器的铁心、绕组、绕组绝缘、变压器油、变压器外壳和散热模块。绕组部分结构相对复杂,见图4,建模时将高、低压绕组层间、匝间的固体绝缘与绕组简化为一体。最里层为低压绕组,绕制成两个部分,之间用撑条和绝缘纸等隔开形成绕组间油道;同理,高压绕组也绕制了两个部分,中间存在绕组间油道;高、低压绕组之间为主油道,绕组的上下两端都为绝缘端圈。由于绕组间油道十分狭窄,且整体绕组区域结构标准,适合采用六面体网格进行剖分,其切面剖分效果见图5。

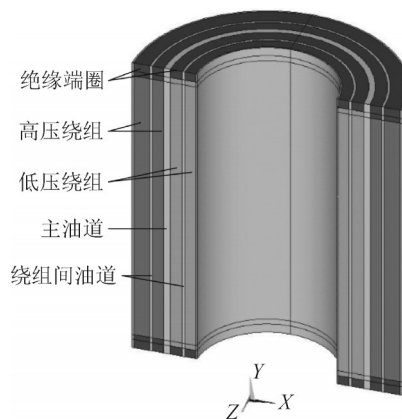


图4 变压器绕组结构

Fig. 4 Diagram of transformer winding structure

为了方便网格剖分并提高计算准确性,将变压器中的油分为3个区域,分别为绕组中的油、变压器散热片中的油与油箱中的油,散热片中的绝缘油可使用六面体网格划分。对于固体域,将变压器的油

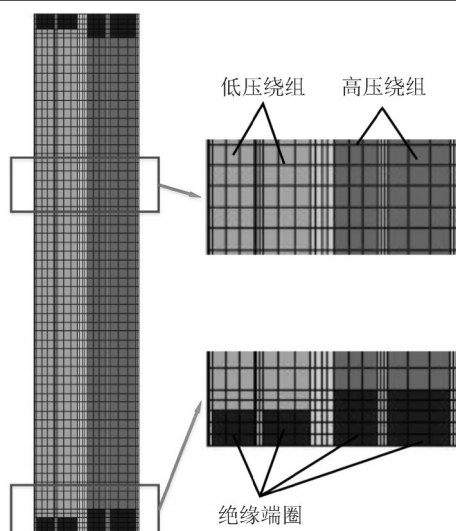


图5 变压器绕组区域网格剖分

Fig. 5 Mesh generation on transformer winding

箱、散热片还有散热模块分开建模。除绕组与变压器油外,模型中其他区域均使用自由网格划分。剖分效果见图6,包括绕组、铁心与整体剖分图。

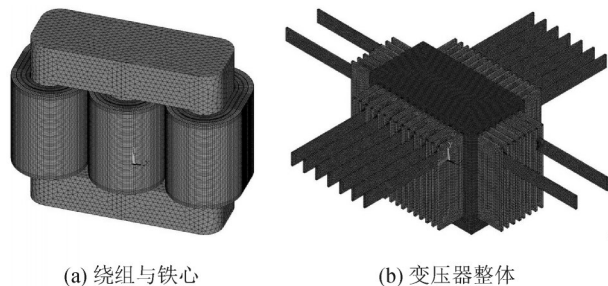


图6 变压器网格剖分效果图

Fig. 6 Mesh generation of the transformer winding

1.2.4 仿真参数设置

高、低压绕组区域轴向和径向的导热系数为

$$\lambda_{\text{all}} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\lambda_i}} \quad (4)$$

式(4)中: λ_{all} 是绕组轴向或径向的导热系数; λ_i 是铜导线与各种绝缘材料的导热系数; l_i 是铜导线与各种绝缘材料在轴向或径向的厚度; n 表示材料种类数。

固体域中用到的材料参数见表2,对于变压器油,比热容为1 868.8 J/(kg·K),导热系数为0.105 W/(m·s),体膨胀系数为0.000 72 K⁻¹。由于变压器油的密度与黏度受温度影响较大,采用式(5)、(6)获得它们的数值:

$$\mu_{\text{oil}} = \theta^{-9.55} \cdot \exp(50.24) \quad (5)$$

$$D_{\text{oil}} = 1\,098.72 - 0.712\theta \quad (6)$$

式(5)、(6)中: μ_{oil} 为变压器油黏度,kg/(m·s);

D_{oil} 为油的密度,kg/m³; θ 为油的温度,K。

表2 配电变压器材料参数

Table 2 Material parameters of the distribution transformer

材料	密度/(kg·m ⁻³)	比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	导热系数/(W·m ⁻¹ ·s ⁻¹)
铜	8 933	385	401.00
铁	7 854	434	60.50
铝	2 702	903	237.00
绝缘	930	1 340	0.19

变压器外表面对流换热系数 h 对仿真计算结果的准确性具有重要影响,由于变压器的散热方式为ONAN,工业上常使用式(7)计算 h 的值^[38]

$$\begin{cases} Nu = hl/\lambda \\ Gr = g\beta l^3 \rho^2 \Delta\theta/\mu^2 \\ Pr = \mu C_p/\lambda \\ Ra = Gr \cdot Pr \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中: Nu 为努塞尔数; Gr 为格拉晓夫数; Pr 为普朗特数; Ra 为瑞利数,计算时可用来判断传热体表面流体湍流模型的类型; l 为特征尺寸,m; g 为重力加速度,m/s²; ρ 为流体密度,kg/m³; β 为流体的体膨胀系数,1/K; λ 为流体的导热系数,W/(m·K); C_p 为流体的定压比热容,J/(kg·K); μ 为动力粘度,kg/(m·s); $\Delta\theta$ 为对流对象之间的温差。

由于 Nu 随物体表面几何形状的改变而变化,因此油箱侧面和散热片的 Nu 值采用式(8)确定,油箱顶部和底部的 Nu 值采用式(9)计算:

$$Nu = 0.68 + \frac{0.670 Ra^{1/4}}{\left[1 + (0.492/Pr)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad (8)$$

$$Nu = 0.27 Ra^{1/4} \quad (9)$$

1.2.5 仿真结果与分析

采用有限体积法对图2中所有模型的流体—温度场进行计算,环境温度均设为25℃,分别得到额定负载与1.3倍额定负载时的温度场分布。额定负载下不加散热模块时配电变压器的绕组温度分布见图7,从图7可见热点出现在低压绕组上,温度为99.8℃。

变压器中间绕组主油道两端高、低压绕组上的轴向温度分布曲线见图8。绕组温度随着高度的上升而增大,到接近最上端时出现略微降低;在高度相同的位置,低压绕组的温度均高于高压绕组。变压器侧面中部区域截面的流速分布见图9,变压器油在绕组上端接近铁心的区域流速最大,在油箱与散热片最上端的交汇处流速也相对较大。

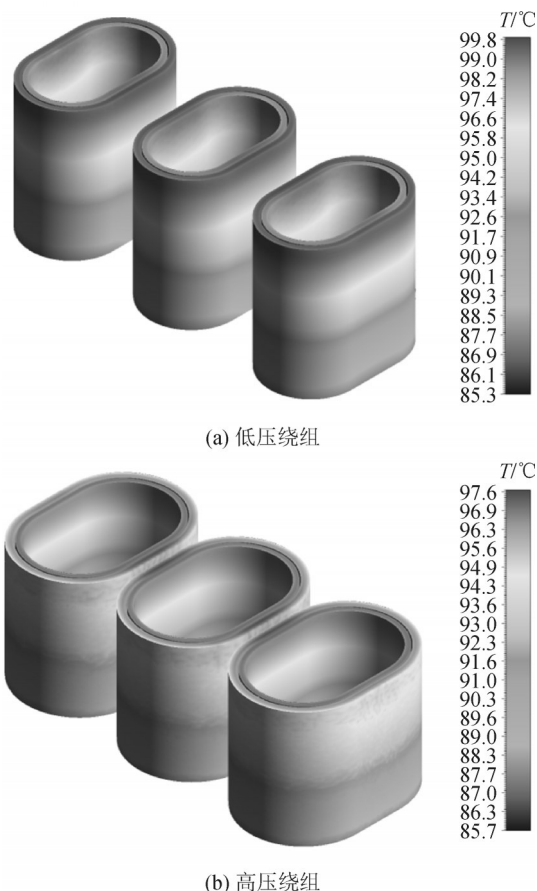


图7 额定负载时配电变压器的绕组温度分布

Fig. 7 Temperature distribution of transformer winding at rated load

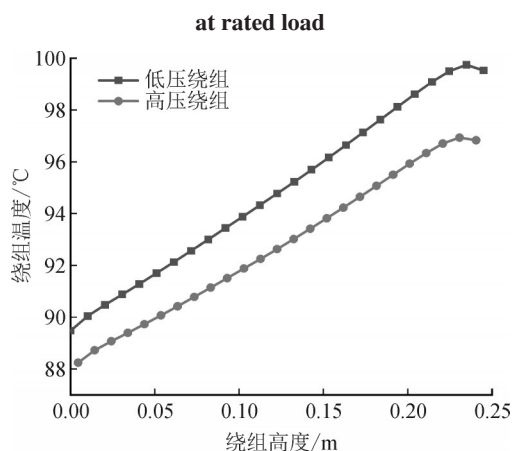


图8 额定负载时绕组轴向温度曲线

Fig. 8 Axial temperature curve of winding at rated load

所有模型在额定负载时外表面的温度分布云图见图10。不加散热模块的配电变压器外部温度最高,外表面温度最高区域分布在变压器散热片的上端,温度高的区域油的流速度也相对较快。

在图10(a)-(c)中,在同样的高度安装散热模块,随着安装数量的增加,变压器外表面的温度逐渐的降低;在图10(b)中,安装过散热模块的散热片与相邻未安装的散热片表面温度对比见图11;从图11可

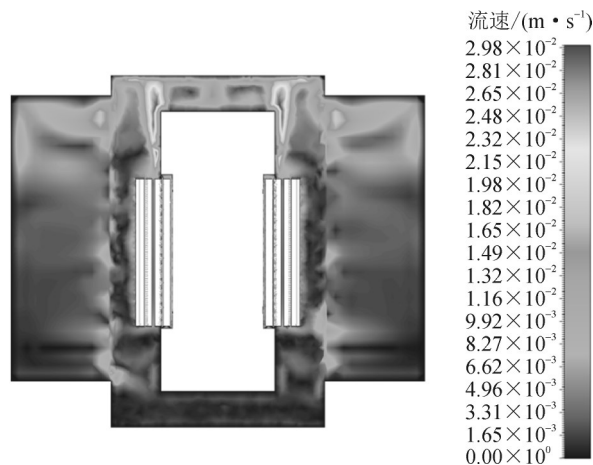


图9 额定负载时配变侧面油流速分布

Fig. 9 Internal flow rate of distribution transformer at rated load

以看出散热模块的安装对于变压器外表面散热效果有明显的增强;在每片散热片上端安装散热模块时,变压器外部的最高温度较无散热模块的情况降低了约10 K。通过图10(c)、(d)可以看出,散热模块安装在散热片上端的效果优于安装在散热片底端。总体上看,在表面温度高且附近变压器油流速快的区域安装散热模块有更好的散热效果。

额定负载时所有模型主油道旁低压绕组的轴向温度曲线见图12。从图12可见,在变压器散热片上端安装46片散热模块的降温效果最好;而在下端安装46片散热模块的降温效果与在上端安装时有明显差距,其对热点温度的降低仅与在上端安装18片散热模块相当。

8次仿真中配电变压器热点温度的计算结果见表3。从表3仿真结果看,将散热模块安装在变压器散热片上端有较好的散热效果,且安装数量越多效果越好。若在每个散热片上端都安装散热模块,可使热点温度降低约10 K,在1.3倍负载率时能使热点温度降低超过14 K。

2 温升试验验证

为了验证仿真结果的准确性,参照GB 1094.2—2013^[34]对配电变压器进行了5次温升试验,试验时散热模块均安装在变压器散热片的上端。在额定负载下开展无散热模块、安装18片与46片散热模块3种情况下的温升试验;而在1.3倍负载时开展无散热模块和安装46片散热模块两种情况下的温升试验。试验现场布置见图13,测量得到的热点温升见表4。

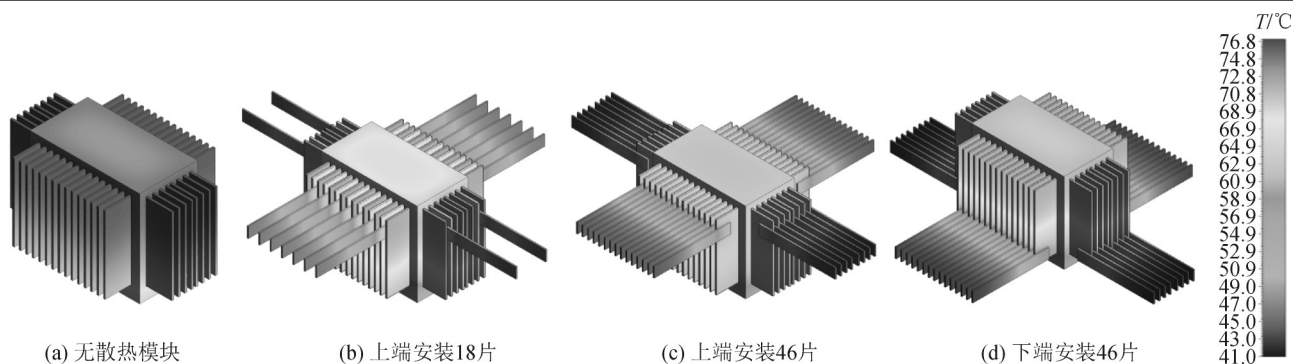


图10 额定负载时不同模型的外部温度分布云图

Fig. 10 Temperature distribution outside the model at rated load

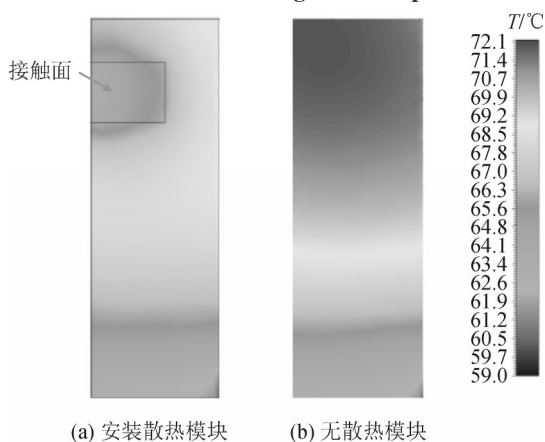


图11 散热片表面温度分布

Fig. 11 Temperature distribution of heat sink surface

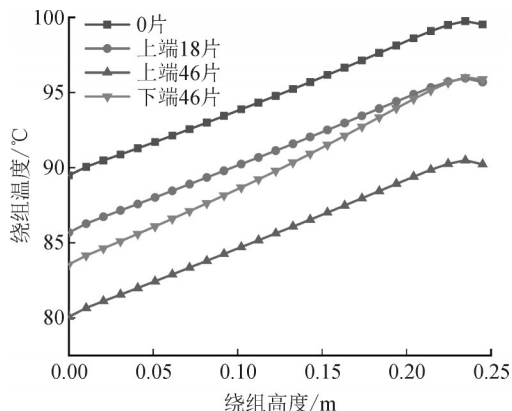


图12 低压绕组轴向温度曲线

Fig. 12 Axial temperature curve of low-voltage winding

表3 变压器热点温升仿真结果

Table 3 Simulation results of transformer hot spot Temperature rise

负载率	散热模块数量	散热模块位置	热点温升/K
1.0	0	未安装	74.8
	18	散热片上端	71.1
	46	散热片上端	66.2
	46	散热片下端	71.3
1.3	0	未安装	106.4
	18	散热片上端	99.4
	46	散热片上端	92.1
	46	散热片下端	100.8

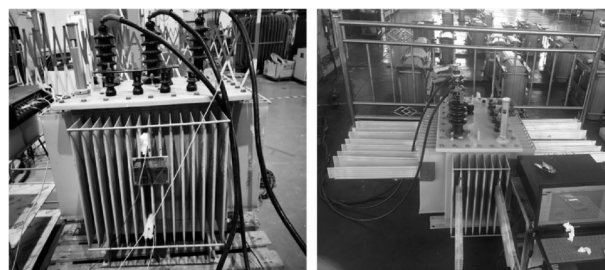


图13 温升试验现场布置

Fig. 13 Site layout of temperature rise test

表4 温升试验测量所得热点温升

Table 4 Hot-spot temperature rise in the test

负载率	散热模块数量	热点温升/K
1.0	0	73.4
	18	69.2
	46	65.1
1.3	0	105.2
	46	89.7

配电变压器热点温升仿真计算结果与试验测量结果的对比见图14。

由图14可以看出仿真与试验值基本吻合,最大温差不超过3 K,验证了外置式散热模块在降低配电变压器内部热点温升方面的效果。

3 结语

文中提出了在油浸式配电变压器的散热片上安装外置式散热模块来降低热点温升的方法,以一台10 kV配电变压器为例,通过有限体积法仿真分析了散热模块在不同数量、不同安装位置下对变压器热点温升的影响。通过开展部分仿真模型对应的温升试验,测量热点温升值,验证了温度场仿真结果的有效性,误差不超过3 K。仿真与试验结果表明,在每一片散热片的上端安装外置式散热模块可以使10 kV配电变压器在额定负载时的热点温升降低约10 K,在1.3倍负载率时降低约14 K。研究结果可为提升配电变压器的过载能力提供参考。

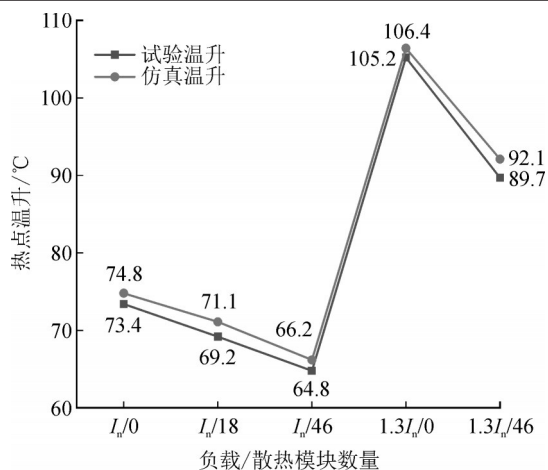


图 14 仿真与试验结果对比

Fig. 14 Temperature rise comparison of simulation and test

参考文献:

- [1] 王丰华, 周翔, 高沛, 等. 基于绕组热分布的改进油浸式变压器绕组热点温度计算模型[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 895-901.
WANG Fenghua, ZHOU Xiang, GAO Pei, et al. Improved thermal circuit model of hot spot temperature in oil-immersed transformers based on heat distribution of winding [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 895-901.
- [2] 高浩, 潘明, 顾小虎, 等. 基于温度场仿真的 10 kV 油浸式变压器波纹油箱结构优化分析[J]. 变压器, 2022, 59(9): 30-35.
GAO Hao, PAN Ming, GU Xiaohu, et al. Structural optimization analysis of corrugated oil tank of 10 kV oil immersed transformer based on thermal-fluid field simulation [J]. Transformer, 2022, 59(9): 30-35.
- [3] 周利军, 唐浩龙, 王路伽, 等. 基于多面体网格剖分的油浸式变压器三维温度场及油流场仿真[J]. 高电压技术, 2018, 44(11): 3524-3531.
ZHOU Lijun, TANG Haolong, WANG Lujia, et al. Simulation on three-dimensional temperature field and oil flow field of oil-immersed transformer based on polyhedral mesh [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3524-3531.
- [4] 罗亮, 邱勇令, 李金忠, 等. 油浸式变压器新型压力释放阀动力学分析[J]. 变压器, 2022, 59(9): 20-29.
LUO Liang, QIU Yongling, LI Jinzhong, et al. Dynamic analysis of a new pressure relief valve for oil-immersed transformer [J]. Transformer, 2022, 59(9): 20-29.
- [5] 农网高过载能力配电变压器技术导则: Q/GDW 11190—2014[S]. 2014.
Technical guidelines for distribution transformers with high overload capacity in rural power grid: Q/GDW 11190—2014[S]. 2014.
- [6] 蔡木良, 石华林, 余霜鸿, 等. 基于相变辅助散热单元的配电变压器强化散热研究[J]. 变压器, 2020, 57(11): 10-14.

- CAI Muliang, SHI Hualin, YU Shuanghong, et al. Research on heat dissipation intensification of distribution transformer based on phase change auxiliary cooling unit [J]. Transformer, 2020, 57(11): 10-14.
- [7] 郭成, 孙科. 一种变流器结合变压器的单相—三相电源变换方案研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(3): 112-118.
GUO Cheng, SUN Ke. Research on single-phase to three-phase power conversion scheme based on converter combined with transformer [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(3): 112-118.
- [8] 廖瑞金, 张爽, 杨丽君, 等. 天然酯—纸绝缘与矿物油—纸绝缘的热老化及工频击穿特性对比[J]. 高电压技术, 2012, 38(4): 769-775.
LIAO Ruijin, ZHANG Shuang, YANG Lijun, et al. Comparative analyses of thermal aging and power frequency breakdown characteristics between natural ester-paper insulation and mineral oil-paper insulation [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(4): 769-775.
- [9] 赵莉华, 王释颖, 王鹏, 等. 基于 Nomex 混合绝缘系统的长寿命油浸式变压器[J]. 高电压技术, 2016, 42(6): 1754-1759.
ZHAO Lihua, WANG Shiyong, WANG Peng, et al. Long-life oil-immersed transformers based on hybrid insulation systems of Nomex [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(6): 1754-1759.
- [10] 宋开胜, 王华芳, 马宏忠, 等. 10 kV 配电变压器自动调压的研究以及试验分析[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(4): 30-35.
SONG Kaisheng, WANG Huafang, MA Hongzhong, et al. Research and experimental analysis on automatic voltage regulation of 10 kV distribution transformer [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 30-35.
- [11] 蒋凌峰, 杨鑫, 吴文锋, 等. 10 kV 架空线路和配电变压器绝缘水平差异的调节方法[J]. 电瓷避雷器, 2022(2): 20-30.
JIANG Lingfeng, YANG Xin, WU Wenfeng, et al. Adjustment method for the difference of insulation level between 10 kV overhead line and distribution transformer [J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(2): 20-30.
- [12] 甘团杰, 郑建涵, 张艳, 等. 基于领域自适应的变压器状态识别[J]. 智慧电力, 2022, 50(2): 82-88.
GAN Tuanjie, ZHENG Jianhan, ZHANG Yan, et al. Transformer condition identification based on domain adaptation [J]. Smart Power, 2022, 50(2): 82-88.
- [13] 周念成, 苏宇, 王强钢, 等. 基于 IGBT 的配电变压器有载调压开关参数设计及分析[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 35-42.
ZHOU Niancheng, SU Yu, WANG Qianggang, et al. Parameter design and analysis of IGBT-based on-load tap

- changers for distribution transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 35-42.
- [14] 陈琳. 基于单片机的变压器冷却系统自动控制设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
CHEN Lin. Automatic control design of transformer cooling system based on microcomputer[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [15] 岳国良. 基于单片机的变压器冷却系统自动控制设计[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
YUE Guoliang. Study on load capacity online assessment and cooling control strategy of oil-immersed power transformer[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [16] 熊斌, 程自然, 赵玉峰. 高速动车组蒸发冷却牵引变压器关键技术探讨[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(9): 1-5.
XIONG Bin, CHENG Ziran, ZHAO Yufeng. Research on key technologies of evaporative cooling traction transformer of vehicle[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(9): 1-5.
- [17] 王新程, 李永光, 王治源, 等. 变压器冷却方式的研究进展[J]. 上海电力学院学报, 2019, 35(3): 221-225.
WANG Xincheng, LI Yongguang, WANG Zhiyuan, et al. Research progress of transformer cooling methods[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2019, 35(3): 221-225.
- [18] 廖才波, 阮江军, 刘超, 等. 油浸式变压器三维电磁—流体—温度场耦合分析方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9): 150-155.
LIAO Caibo, RUAN Jiangjun, LIU Chao, et al. Comprehensive analysis of 3-D electromagnetic-fluid-thermal fields of oil-immersed transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(9): 150-155.
- [19] 蒋惠中, 魏本刚, 文杰, 等. 分体式油浸自冷变压器三维温度场和流场仿真与分析[J]. 高压电器, 2021, 57(2): 63-69.
JIANG Huizhong, WEI Bengang, WEN Jie, et al. Numerical simulation of 3D temperature and flow fields in separated oil-immersed cooling transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(2): 63-69.
- [20] 王伟, 魏菊芳, 王楠, 等. 冷却器运行对电力变压器绕组热点温度影响的仿真研究[J]. 高压电器, 2019, 55(3): 84-90.
WANG Wei, WEI Jufang, WANG Nan, et al. Simulation research of the influence of cooler operation on the hot spot temperature of power transformer winding[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(3): 84-90.
- [21] 苏毅, 谢植飏, 李路, 等. 基于多物理场耦合的空气型开关柜发热故障温升仿真分析[J]. 高压电器, 2020, 56(11): 1-7.
SU Yi, XIE Zhibiao, LI Lu, et al. Temperature rise simulation analysis of air switchgear heating fault based on coupling of multi-physical field[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11): 1-7.
- [22] 董凯达, 钱建国, 马伟. 基于自主芯片的接地变压器接地故障检测方法研究[J]. 供用电, 2022, 39(11): 40-46.
DONG Kaida, QIAN Jianguo, MA Wei. Research on detection method of grounding fault for grounding transformer based on domestic independent chips[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(11): 40-46.
- [23] 咸日常, 范慧芳, 李飞, 等. 基于改进GSA-SVM模型的电力变压器故障诊断[J]. 智慧电力, 2022, 50(6): 50-56.
XIAN Richang, FAN Huifang, LI Fei, et al. Power transformer fault diagnosis based on improved GSA-SVM model[J]. Smart Power, 2022, 50(6): 50-56.
- [24] 行武, 郭晓, 王哲, 等. 适用于新能源并网变压器匝间故障识别的新判据[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 219-226.
XING Wu, GUO Xiao, WANG Zhe, et al. A new criterion for inter-turn short-circuit fault recognition for new energy grid-connected transformer[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 219-226.
- [25] 吴钢, 王振兴, 焦阳, 等. 基于云边协同运算的配电变压器故障快速检测算法研究[J]. 电子设计工程, 2022, 30(21): 113-117.
WU Gang, WANG Zhenxing, JIAO Yang, et al. Research on fast detection algorithm of distribution transformer fault based on cloud-edge collaborative computing[J]. Electronic Design Engineering, 2022, 30(21): 113-117.
- [26] 夏梦, 王慧, 庄汝学, 等. 基于故障概率指标的电力变压器故障诊断及决策分析[J]. 电器与能效管理技术, 2022(11): 59-62.
XIA Meng, WANG Hui, ZHUANG Ruxue, et al. Power transformer fault diagnosis and decision analysis based on fault probability index[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(11): 59-62.
- [27] 韩中杰, 李传才, 周刚, 等. 变压器内部过热缺陷故障自适应诊断系统设计[J]. 电子设计工程, 2022, 30(12): 133-137.
HAN Zhongjie, LI Chuancai, ZHOU Gang, et al. Design of transformer internal overheating fault adaptive diagnosis system[J]. Electronic Design Engineering, 2022, 30(12): 133-137.
- [28] LI Longnv, LIU Wei, CHEN Hai, et al. Prediction of oil flow and temperature distribution of transformer winding based on multi-field coupled approach[J]. The Journal of Engineering, 2019(16): 2007-2012.
- [29] 骆小满, 阮江军, 邓永清, 等. 基于多物理场计算和模糊神经网络算法的变压器热点温度反演[J]. 高电压技术, 2020, 46(3): 860-866.
LUO Xiaoman, RUAN Jiangjun, DENG Yongqing, et al.

- Transformer hot-spot temperature inversion based on multi-physics calculation and fuzzy neural network algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 860-866.
- [30] 李远松, 丁津津, 李圆智, 等. 基于瞬态油流量测量的电力变压器故障油流涌动特性[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(1): 211-216.
- LI Yuansong, DING Jinjin, LI Yuanzhi, et al. Research on fault oil flow in power transformer based on transient oil flow measurement[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(1): 211-216.
- [31] 刘 刚, 靳艳娇, 马永强, 等. 基于非平均热源的油浸式变压器 2 维温度场分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(10): 3361-3370.
- LIU Gang, JIN Yanjiao, MA Yongqiang, et al. Two - dimensional temperature field analysis of oil - immersed transformer based on non - uniformly heat source[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10): 3361-3370.
- [32] 谢裕清, 李 琳, 宋雅吾, 等. 油浸式电力变压器绕组温升的多物理场耦合计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5957-5965.
- XIE Yuqing, LI Lin, SONG Yawu, et al. Multi - physical field coupled method for temperature rise of winding in oil-immersed power transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5957-5965.
- [33] 马向南, 杨 涛, 王云龙, 等. 基于轻量化神经网络及模型压缩的变压器油色谱故障诊断方法[J]. 供用电, 2023, 40(5): 84-91.
- MA Xiangnan, YANG Tao, WANG Yunlong, et al. Transformer dissolved gas fault diagnosis method based on lightweight neural network and model quantization[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(5): 84-91.
- [34] 电力变压器—第 2 部分: 液浸式变压器的温升: GB 1094.2—2013[S]. 2013.
- Power transformers - Part 2: Temperature rise for liquid - immersed transformers: GB 1094.2—2013[S]. 2013.
- [35] 电力变压器-第 7 部分: 油浸式电力变压器负载导则. 北京, GB/T 1094.7—2008[S]. 2009.
- Power transformers-Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformer: GB/T 1094.7—2008[S]. 2009.
- [36] 刘弘景, 张丹丹, 李 伟, 等. 大型油浸式变压器绕组温度场的有限元分析[J]. 高压电器, 2019, 55(12): 83-89.
- LIU Hongjing, ZHANG Dandan, LI Wei, et al. Finite element analysis for temperature field of winding in large oil - immersed transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(12): 83-89.
- [37] 滕 黎, 陈伟根, 孙才新. 油浸式电力变压器动态热路改进模型[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 236-241.
- TENG Li, CHEN Weigen, SUN Caixin. An improved dynamic thermal circuit model of oil - immersed power transformer[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 236-241.
- [38] RUAN Jiangjun, DENG Yongqing, HUANG Daochun, et al. HST calculation of a 10 kV oil-immersed transformer with 3D coupled-field method[J]. IET Electric Power Applications, 2020, 14(5): 921-928.
- 唐智健(1996—), 男, 硕士, 主要从事输变电设备运维等工作(E-mail: 457476574@qq.com)。