

DOI: 10.7667/PSPC180220

基于多物理场耦合的高压电抗器温度场仿真与分析

吴书煜¹, 马宏忠¹, 姜宁², 田涛², 陈轩², 谭风雷²

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 国网江苏省电力有限公司检修分公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 为研究干式空心电抗器整体及包封内部各层绕组温度分布特性, 根据电磁热流多物理场耦合方法, 建立了干式空心电抗器电磁-流体-温度三维温升计算模型。首先, 基于场-路耦合的电磁学理论, 采用有限元法求取电抗器各层电流, 计算各层绕组损耗。然后, 基于流体-温度耦合的传热理论, 以各层绕组损耗为热源, 采用有限体积法求解电抗器温度分布。最后, 采用稳态热学分析法验证了结果的准确性。研究表明: 电抗器温度分布呈现上区域大于下区域、中间包封大于两侧包封的变化趋势, 各层绕组温升热点位于电抗器轴向高度约85%到90%。研究结果为电抗器结构优化、温度的在线监测提供了理论依据。

关键词: 干式空心电抗器; 损耗计算; 多物理场耦合; 温度场

Simulation and analysis of temperature field of high voltage reactor based on multi physical field coupling

WU Shuyu¹, MA Hongzhong¹, JIANG Ning², TIAN Tao², CHEN Xuan², TAN Fenglei²

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Maintenance Branch Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: In order to study the temperature distribution characteristics of the whole and inner layer winding of dry-type air-core reactor, a three dimensional temperature rise calculation model of electromagnetic-fluid-temperature of dry-type air-core reactor is established based on the multi physical field coupling method of electromagnetic heat flux. First of all, based on the electromagnetism theory of field-circuit coupling, current of each layer of the reactor was calculated by finite element method and the winding loss of each layer is calculated. Then, based on the heat transfer theory of fluid-temperature coupling, taking the winding loss of each layer as the heat source, the finite volume method is used to solve the reactor temperature distribution. Finally, the accuracy of the results is verified by the steady-state thermal analysis method. The results show that the temperature distribution of the reactor shows the trend that the upper region is larger than the lower one and the middle enclosure is larger than the two sides. The hot spot temperature rise of each layer is about 85%~90% of the reactor axial height. The research results provide a theoretical basis for the optimization of the reactor structure and the on-line monitoring of the temperature.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577050) and Key Science and Technology Projects of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. in 2018 (No. J2018014).

Key words: dry-type air-core reactor; loss calculation; multi physical field coupling; temperature field

0 引言

干式空心电抗器(以下简称电抗器)与油浸式铁心电抗器相比, 因其维护方便、结构简单、造价成本低等特点^[1-3], 广泛应用于35 kV以下的电网中, 并起着稳压、滤波、限流和无功补偿等作用^[4-7]。

但近些年来, 由于种种原因造成电抗器局部温度过高引发的起火事故时有发生^[8-10], 不仅使电抗器停止运行以致报废, 而且对电网的安全稳定性造成极大威胁。温升已是评估电抗器性能的重要指标^[11], 因此, 分析与研究电抗器的温度分布特性对电抗器性能的提升和温度的在线监测具有重要意义。

目前, 国内外学者对电抗器温度场的研究方法主要集中于平均温升法^[12]、试验法^[13]、有限元稳态热学分析法^[14]、流体-温度耦合算法^[15-17]。文献[12]

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51577050); 国网江苏省电力有限公司2018年重点科技项目资助(J2018014)

采用平均温升法计算了电抗器绕组的平均温升,但需电阻值的测量,准确度不高;文献[13]应用试验的方法测量了电抗器温度,过程繁琐,适用度不高;文献[14]利用有限元法,以稳态温度场为例,分析了电抗器温度场分布与热点温升;流体-温度耦合算法综合考虑多物理场和多方面因素,与实际运行状态相似,现已广泛应用于分析电抗器温度场。文献[15-17]基于流体温度场的耦合计算方法,研究了电抗器三维模型本体温度场的分布特性,但上述文献仅仅分析了电抗器整体温度分布,忽略了包封内部各层绕组之间温度的差异,没有反映内部温度分布状态。为详细具体分析电抗器整体及包封内部各层绕组间的温差,建立了以层为单位的三维模型,具体分析电抗器温度分布特性。

本文以一台 BKGKL-2000/35 型号的干式空心并联电抗器为温升研究对象,采用基于场-路耦合的有限元法计算了各层绕组损耗,以各层绕组损耗为热源,采用基于流体-温度的有限体积法迭代求解了电抗器各层绕组温度分布特性。首先,在 SolidWorks 中建立真实比例的电抗器三维仿真模型;然后,导入 Maxwell 中,通过参数设置,求解各层绕组电流,计算绕组损耗,并作为热源加载到流体-温度场;最后,基于 Fluent 计算电抗器整体与各层绕组温度分布特性,分析了电抗器径向与轴向温度的变化规律,用稳态热学分析法验证了结果的准确性。

1 理论分析

1.1 电抗器等效电路模型

电抗器是由多层铝导线螺旋绕制而成的多个包封组成,其结构多为筒状。设电抗器包封数为 X 个,每个包封并联 Y_i 层绕组,共有 $W=Y_1+Y_2+\dots+Y_{X-1}+Y_X$ 层,因此,电抗器在结构上可以看作作为 W 层并绕的绕组,在电路上可以看作作为 W 个电感和电阻并联的支路,电抗器等效电路图如图 1 所示。图 1 中,电抗器有 W 个并联支路, I_1, \dots, I_W 为各层绕组电流, R_1, \dots, R_W 为各层绕组电阻, L_1, \dots, L_W 为各层绕组自感, $M_{1,2}, \dots, M_{W-1,W}$ 为各层绕组之间互感。电抗器满足的支路电压方程为

$$\dot{U} = \mathbf{M} \cdot \dot{I} \quad (1)$$

式中:

$$\dot{U} = [\dot{U}_1 \quad \dot{U}_2 \quad \dots \quad \dot{U}_{W-1} \quad \dot{U}_W]^T$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} R_1 + j\omega L_1 & j\omega M_{1,2} & \dots & j\omega M_{1,W-1} & j\omega M_{1,W} \\ j\omega M_{2,1} & R_2 + j\omega L_2 & \dots & j\omega M_{2,W-1} & j\omega M_{2,W} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ j\omega M_{W-1,1} & j\omega M_{W-1,2} & \dots & R_{W-1} + j\omega L_{W-1} & j\omega M_{W-1,W} \\ j\omega M_{W,1} & j\omega M_{W,2} & \dots & j\omega M_{W,W-1} & R_W + j\omega L_W \end{bmatrix}$$

$\dot{I} = [\dot{I}_1 \quad \dot{I}_2 \quad \dots \quad \dot{I}_{W-1} \quad \dot{I}_W]^T$
 $U_1 = U_2 = \dots = U_{W-1} = U_W = U_N$, U_N 为额定相电压, \mathbf{M} 为电感矩阵。通过求解出电感矩阵 \mathbf{M} , 根据式(1), 即可求得各层绕组电流。

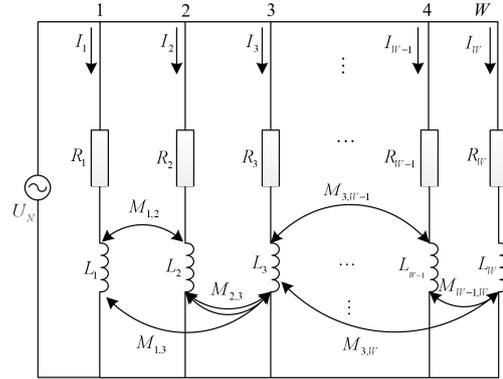


图 1 电抗器等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of the reactor

1.2 磁场-电路耦合计算

电抗器各层绕组两侧通有交流电压,场-路耦合的分析方法遵循麦克斯韦方程,求解域内外磁场还满足泊松方程^[18-19],如式(2)所示。

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 A_\theta}{\partial r^2} + \frac{\partial A_\theta}{r \partial r} - \frac{A_\theta}{r^2} + \frac{\partial A_\theta}{\partial z^2} = -\mu J \\ \frac{\partial^2 A_\theta}{\partial r^2} + \frac{\partial A_\theta}{r \partial r} - \frac{A_\theta}{r^2} + \frac{\partial A_\theta}{\partial z^2} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: A_θ 为矢量磁位 A 的周向分量; θ 、 z 、 r 分别为柱坐标系下的角度、轴向坐标与半径; μ 为铝导线磁导率; J 为流经各层绕组的电流密度。

第 i 层绕组满足的电路方程为

$$U_i = I_i R_i + \frac{d\Psi_i}{dt} \quad (3)$$

$$\Psi_i = n_i \int_{S_i} \nabla \times A_i \cdot dS = n_i \oint_{l_i} A_i \cdot dl \quad (4)$$

式中, Ψ_i 、 A_i 分别为各层绕组的磁链、磁位。

1.3 热源计算

电抗器的热源主要来源于各层绕组的电阻损耗 $P_R(i)$ 和涡流损耗 $P_E(i)$, 铝导线截面为圆形, 第 i 层绕组的损耗计算方法^[20]为

$$P_i = P_R(i) + P_E(i) \quad (5)$$

$$P_R(i) = I_i^2 R_i = \frac{n_i D_i \pi^2 J_i^2 d_i^2}{4\gamma} \quad (6)$$

$$P_E(i) = \frac{n_i \gamma D_i \pi^2 \omega^2 d_i^4}{64} (B_r^2(i) + B_n^2(i)) \quad (7)$$

式中: P_i 为各层绕组损耗; I_i 为各层绕组电流; R_i

为各层绕组电阻; γ 为铝导线电导率; n_i 为各层绕组匝数; D_i 为各层绕组铝导线缠绕直径; J_i 为流经各层绕组的电流密度; d_i 为各层绕组铝导线自身线径; ω 为电流激励角频率; $B_r(i)$ 、 $B_z(i)$ 为铝导线中心处磁感应强度的径向分量和轴向分量。

计算电阻损耗 $P_R(i)$ 和涡流损耗 $P_E(i)$, 得到各层绕组的单位体积热密度为

$$Q_i = \frac{P_i}{V_i} \quad (8)$$

式中: P_i 为各层绕组损耗; V_i 为各层绕组体积。

1.4 流体-温度耦合计算

电抗器通过自然对流、辐射和热传导 3 种形式与外界空气进行热量交换^[21], 计算流体-温度耦合的过程中, 除满足基本的热传导方程, 还遵循流体控制方程, 即质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程^[11]。

以各层绕组损耗为内部热源的电抗器三维稳态热传导方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + f \quad (9)$$

式中: $\alpha = \frac{k}{c\rho}$; $f = \frac{F}{c\rho}$; T 为各层绕组表面温度;

k 为热传导系数; c 为比热容; ρ 为材料密度; F 为热源强度。

将空气视为非压缩性流体, 其在流动过程中遵循质量守恒定律^[22], 如式(10)所示。

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (10)$$

式中: ρ 为空气密度; u , v , w 分别为流体速度场矢量在 x , y , z 坐标轴上的分量。

动量守恒方程为

$$\begin{aligned} \rho \frac{du}{dt} &= \rho F_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \\ \rho \frac{dv}{dt} &= \rho F_y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \\ \rho \frac{dw}{dt} &= \rho F_z + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: F 为彻体力; σ 为正应力; τ 为切应力。

能量守恒定律是自然界遵循的普遍规律, 电抗器内部能量以热能的形式传播, 以热力学三大定律为基础, 其表达式为

$$\rho \cdot \nabla(\mathbf{u}T) = \frac{\lambda}{c} + \nabla^2 T_f + S \quad (12)$$

式中: \mathbf{u} 为流体速度矢量; T_f 为流体温度; λ 为空气导热系数; S 为空气粘性耗散项。

2 三维模型的建立及条件假设

2.1 电抗器结构及参数

本文研究对象为 BKGKL-2000/35 型号的干式空心并联电抗器, 其额定电压为 35 kV, 额定电流为 99 A, 内径为 2 012.4 mm, 外径为 2 342.7 mm, 电抗器整体高度为 1 800 mm, 具体参数如表 1。该电抗器本体由 5 包封 20 层导线绕制而成, 每股导线包绕着聚酯薄膜作为层间与匝间短路绝缘, 各包封由浸渍环氧树脂胶的玻璃纤维包裹, 包封之间采用引拔棒作为支撑, 并形成良好的散热通道, 每层导线首尾焊接星型架上, 用来压实固定包封。本文以干式空心电抗器四分之一模型为仿真对象。整体结构如图 2 所示。

表 1 干式空心并联电抗器主要参数

Table 1 Main parameters of dry-type air-core shunt reactor

参数名称	参数值	参数名称	参数值
容量/kVar	2 000	额定电压/kV	35
电流/A	99	频率/Hz	50
内径/mm	2 012.4	外径/mm	2 342.7
高度/mm	1 800	绝缘等级	F
包封数	5	层数	20

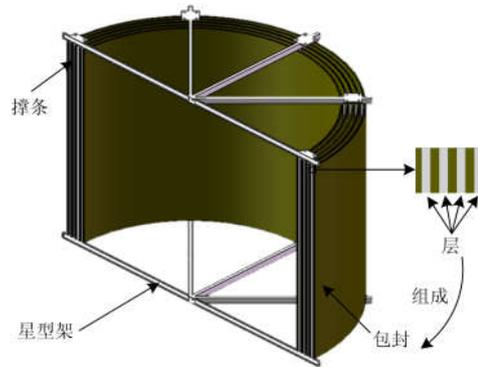


图 2 电抗器结构图

Fig. 2 Structure diagram of the reactor

2.2 模型假设与边界条件设定

在建立电抗器三维磁场-电路耦合计算模型过程中, 对物理模型做如下假设:

- 1) 电磁仿真以各层绕组为单位, 忽略撑条、包封以及星型架等其他因素对电磁场的影响。
- 2) 电流为映射激励, 并假设电流在绕组内均匀分布。

在建立电抗器三维流体-温度耦合计算模型过程中, 对物理模型及边界条件做如下设定:

- 1) 电抗器最内层绕组的雷诺数定义为 $Re=2Vr/\nu$, 其中, 取空气流动平均速度 $V=0.87$ m/s,

绕组最小缠绕半径 $r=1.0062\text{ m}$, ν 为空气的运动黏度, $\nu=16.96\times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$, 因此, $Re>2320$, 选取湍流流动模型。

2) 电抗器热源为各层绕组电阻损耗与涡流损耗, 单位体积热密度作为温度场的热源施加参数。

3) 根据实际情况, 设环境温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$, 即为 298.15 K 。

4) 电抗器底部流体域为入口边界, 设定轴向空气流速 $V=0.87\text{ m/s}$, 径向流速为零; 顶部流体域为压力出口边界, 相对压力为零, 其他边界相对压力也为零。

2.3 多物理场耦合计算方法

干式空心电抗器温度场仿真采用多物理场耦合的方法, 其计算过程如下。

1) 在 SolidWorks 中建立 1:1 等效电抗器三维仿真模型^[23]。

2) 模型导入 Ansoft Maxwell 中^[24], 在静态磁场求解器中, 增加 Matrix, 设置各层绕组匝数, 求解电抗器电感矩阵 M , 根据式(1), 计算各层绕组电流。

3) 在瞬态磁场求解器中, 设置参数, 添加步骤 2) 计算得到的各层绕组电流为激励, 求解计算涡流损耗以及解析法求解电阻损耗, 进而计算电抗器单位体积热密度, 如表 2 所示。

4) 在 Fluent 中, 实现流体-温度耦合, 将计算得到的单位体积热密度作为热源加入流体温度场, 设置边界条件, 迭代求解, 后处理得到电抗器的温度分布。

表 2 电抗器单位体积热密度

Table 2 Unit volume heat density of the reactor

层序号	层电 流/A	热源密度/ (W/m ³)	层序号	层电 流/A	热源密度/ (W/m ³)
1	3.97	31 252.16	11	5.37	42 387.49
2	3.99	31 432.52	12	5.31	44 291.73
3	3.99	30 875.87	13	5.47	43 834.94
4	3.99	29 207.16	14	5.46	40 339.41
5	4.52	35 266.58	15	5.44	41 985.82
6	4.52	34 748.93	16	5.44	39 841.38
7	4.52	35 941.09	17	5.43	42 863.98
8	4.54	36 948.34	18	5.44	38 810.86
9	5.36	41 843.98	19	5.42	39 089.13
10	5.30	40 324.23	20	5.40	37 775.91

3 温升计算结果分析

3.1 磁场-电路耦合结果分析

在建立电抗器三维模型和求解出各层绕组电流的基础上, 通过模型载入、求解器设定、激励添加、网格划分后完成电磁场计算。图 3 为电抗器磁感应

强度云图与矢量图, 图 4 为电抗器磁感应强度径向与轴向分布情况。

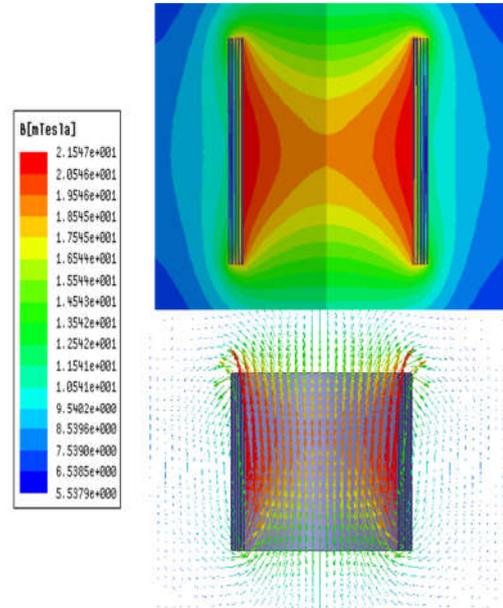
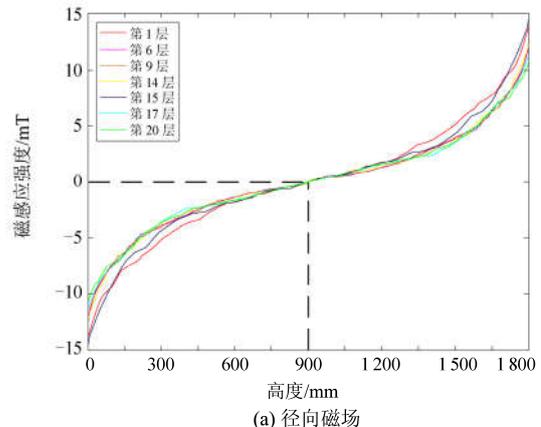


图 3 电抗器磁感应强度云图与矢量图

Fig. 3 Magnetic induction intensity nephogram and vector diagram of the reactor

由图 3 可知, 电抗器磁场以中心高度位置对称, 最大磁感应强度位于第一包封中心高度位置, 整个磁场的方向符合安培定则和叠加定理。由图 4 可知, 磁感应强度在径向上差别不大, 数值近似, 方向一致, 呈现两端向中心高度位置减小的变化趋势, 在中心高度位置处接近等于零; 磁感应强度在轴向上呈现先增大后减小的变化趋势, 在数值上有明显差异, 从第 1 层到第 14 层顺序减小, 从第 15 层到第 20 层反向增大, 即从第 15 层开始, 磁场轴向分量有 180° 的反转, 磁感应强度是各层绕组电流在空间各处产生磁场叠加的结果^[25], 当半径大于某一距离时, 磁场方向发生改变。



(a) 径向磁场

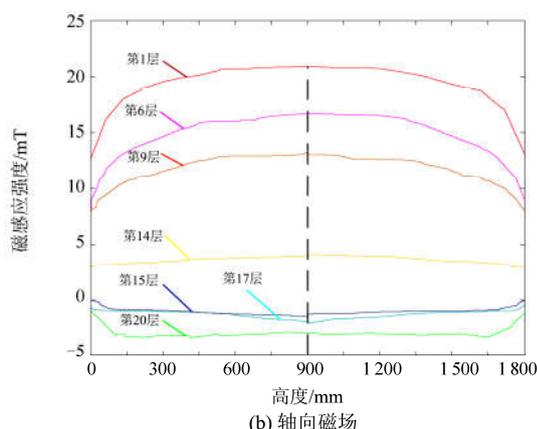


图4 电抗器磁感应强度径向与轴向分布

Fig. 4 Radial and axial distribution of magnetic induction intensity of the reactor

3.2 流体-温度耦合结果分析

在 Fluent 中, 将计算得到的各层绕组单位体积热密度作为热源激励施加于电抗器, 通过材料选择、属性设置、边界条件施加及求解器设定等, 迭代完成计算, 结果后处理得到电抗器温度分布, 如图 5。

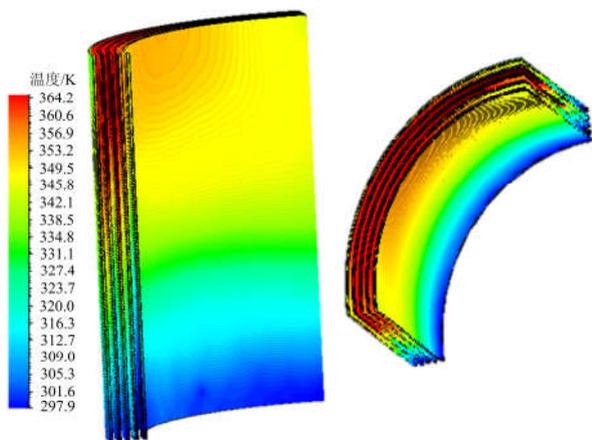


图5 电抗器温度分布

Fig. 5 Temperature distribution of the reactor

由图 5 可知, 以层为单位和以包封为单位的电抗器整体温度分布变化规律相似^[16], 都呈现上区域温度高于下区域、中间包封温度高于两侧包封的趋势, 以层为单位更能反映包封内部的变化规律。热点的主要集中区域为第3包封到第4包封的上区域, 其中, 最高温度为 364.2 K, 位于第3包封的第11层绕组, 由于第11层位于电抗器包封中间, 与外界热量交换困难, 对流效果差, 大多热量集中于本层周围难以散失, 转化自身温度升高; 两侧包封直接与外界进行热量交换, 对流及传导热量充分, 温度较中间包封低。

为清楚反映电抗器温度分布规律, 将电抗器进行径向与轴向温度分析, 图 6 为电抗器径向最热点温度分布, 图 7 为电抗器轴向温度分布。

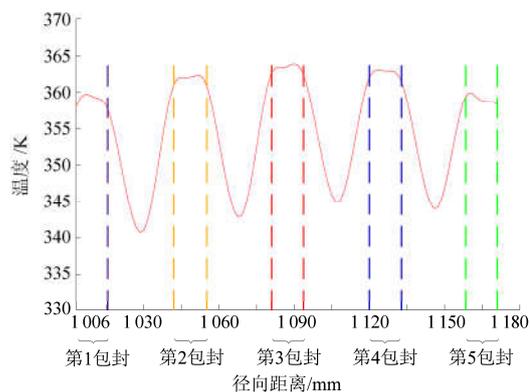
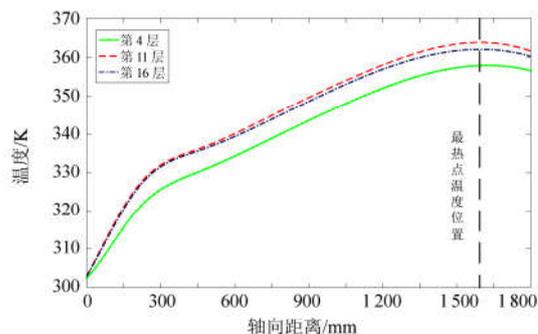
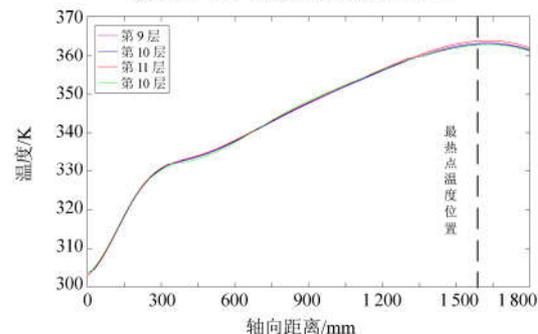


图6 电抗器径向最热点温度分布

Fig. 6 Radial hottest spot temperature distribution of the reactor



(a) 第4、11、16层绕组轴向温度分布



(b) 第3包封9、10、11、12层绕组轴向温度分布

图7 电抗器轴向温度分布

Fig. 7 Axial temperature distribution of the reactor

由图 6 可知, 电抗器径向温度类似正弦分布, 存在波峰与波谷现象, 波峰为各包封内不同层的温度值, 波谷为包封间气道的温度值, 包封内各层绕组损耗为热源造成温度高, 气道为散热通道温度较低。不同包封间的温度稍有差别, 中间包封温度高于两侧包封, 同一包封内各层温度相近, 且同一包

封的中间层较两边层温度略高，因为无论处于电抗器中间的包封还是处于同一包封的中间层，其与周围散热相对较差，造成温度升高。

由图 7 可知，不同包封各层温度不同，但变化规律一致，都是从底部到顶部逐渐增大，底部为空气入口，湍流发展不充分，热量聚集，对流换热效果较差，造成底部区域温度上升较快；之后温度平稳上升，在电抗器约 85%到 90%的轴向高度处，温度达到最大值；顶部为空气出口，直接与外界环境接触，温度相对降低；同一包封各层温度几乎一致。

通过计算结果可以看出，电抗器在运行过程中，通过气道进行散热，以保持温度在允许范围内，但电抗器上区域是温升的主要集中部分，容易造成局部温度过高，如不及及时发现并采取有效措施，电抗器在高温的状态下长期运行，将发生起火事故以致烧坏停止运行。

3.3 电抗器温度结果验证

为验证电抗器电磁-流体-温度多物理场耦合模型和计算结果的准确性，采用稳态热学分析法进行比较验证。将电抗器各层绕组电阻损耗与涡流损耗的单位体积热密度作为热源，环境温度设定为 25 ℃，电抗器底面设置为对流面，求解计算，计算结果如图 8 所示，表 3 为两种方法的最热点温度对比。

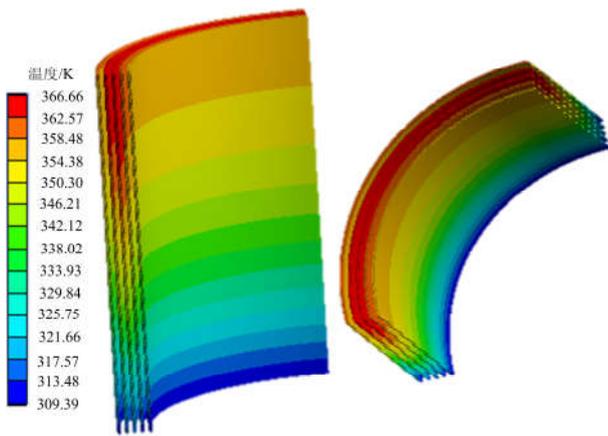


图 8 稳态热学分析法温度分布

Fig. 8 Temperature distribution of steady-state thermal analysis method

由图 5 和图 8 可知，基于多物理场耦合仿真法计算的温度场与稳态热学分析法计算的温度场具有相同的分布规律。由表 3 可知，基于多物理场耦合仿真法计算的最热点温度与稳态热学分析法计算的最热点温度符合度极高，验证了电抗器电磁-流体-温度多物理场耦合模型和计算结果的准确性，而基于电磁-流体-温度多物理场耦合的温度分布更趋于

平缓，符合实际运行状况，因此采用多物理场仿真法是准确有效的。

表 3 多物理场耦合仿真法和稳态热学分析法计算结果对比

Table 3 Comparison of the results between multi physical field coupling simulation and steady-state thermal analysis

层序号	多物理场耦合仿真法	稳态热学分析法	层序号	多物理场耦合仿真法	稳态热学分析法
	最热点温度/K			最热点温度/K	
1	358.5	360.5	11	364.0	366.3
2	359.7	360.5	12	363.1	366.3
3	359.2	360.5	13	362.1	364.1
4	358.8	360.5	14	363.0	364.1
5	361.1	363.2	15	362.9	364.1
6	362.0	363.2	16	362.1	364.1
7	362.2	363.2	17	359.8	361.8
8	361.8	363.2	18	359.2	361.8
9	363.6	366.3	19	358.7	361.8
10	363.3	366.3	20	358.4	361.8

4 结论

本文建立了干式空心电抗器电磁-流体-温度多物理场耦合的三维仿真计算模型，以电抗器各层损耗为热源，获得温度场分布特性，得到以下结论：

1) 电抗器整体温度分布呈现上区域高于下区域、中间包封高于两侧包封的变化趋势，最高热点温度位于电抗器中部包封的上区域。

2) 总结与分析了电抗器径向与轴向温度分布规律。径向上，温度中间高两边低，存在波峰波谷现象；轴向上，温度从底部到顶部逐渐升高，各层最高热点位于电抗器轴向高度的 85%到 90%。

3) 以层为单位与以包封为单位比较，更能体现因层间热源与所处位置的不同而带来的差异，反映包封内部的温度情况，为电抗器温度的在线监测提供了理论依据。

参考文献

[1] 张成芬, 赵彦真, 邹建龙, 等. 多样性引导的改进量子粒子群优化算法及其在干式空心电抗器优化设计中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(18): 108-115.
ZHANG Chengfen, ZHAO Yanzhen, ZOU Jianlong, et al. A diversity-guided modified QPSO algorithm and its application in the optimization design of dry-type air-core reactors[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(18): 108-115.

[2] 徐基泰. 电抗器品种及其发展[J]. 变压器, 2000, 37(1): 17-21.
XU Jitai. Variety and development of reactor[J].

- Transformer, 2000, 37(1): 17-21.
- [3] 陈庆国, 邱毓昌, 魏新劳. 用脉冲电压谐振法检测空心电抗器匝间绝缘缺陷[J]. 电工技术学报, 1999, 14(6): 55-58.
CHEN Qingguo, QIU Yuchang, WEI Xinlao. Pulse voltage resonance method for detecting turn-to-turn insulation defects in air-core reactor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1999, 14(6): 55-58.
- [4] 张静伟. 500 kV 并联电抗器中性点小电抗极性测试方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 241-243.
ZHANG Jingwei. A new method to check the polarity of neutral reactor for 500 kV shunt-reactor[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 241-243.
- [5] 杜建华, 范玉辉. 干式空芯电抗器在铁路供电系统中的应用[J]. 电力自动化设备, 1999, 19(1): 49-49.
DU Jianhua, FAN Yuhui. Application of dry-type air-core reactor in railway power supply system[J]. Electric Power Automation Equipment, 1999, 19(1): 49-49.
- [6] 徐基泰. 40 年来电抗器技术的发展[J]. 变压器, 2004, 41(3): 45-50.
XU Jitai. Development of reactor technology in recent 40 years[J]. Transformer, 2004, 41(3): 45-50.
- [7] 周明, 曹炜, 陈文涛, 等. 串联电抗器对电力系统短路电流特性影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 147-153.
ZHOU Ming, CAO Wei, CHEN Wentao, et al. Study on influence of series reactor on power system short-circuit current characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 147-153.
- [8] 刘海莹, 魏宾. 干式空心电抗器的运行分析及故障处理[J]. 高压电器, 2004, 40(3): 239-240.
LIU Haiying, WEI Bin. Operation and maintenance of dry air-core reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(3): 239-240.
- [9] 夏长根. 一起 35 kV 干式并联空心电抗器故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2009, 30(5): 43-45.
XIA Changgen. Analysis of fault of a 35 kV dry-type air-core shunt reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2009, 30(5): 43-45.
- [10] 林瑞聪, 缪希仁, 郭谋发, 等. 电抗器潜伏性故障特征及其耦合量分析综述[J]. 高压电器, 2015, 51(1): 150-155.
LIN Ruicong, MIAO Xiren, GUO Moufa, et al. Analysis and review on reactor latent fault characteristics and its coupling parameter[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1): 150-155.
- [11] 姜志鹏, 文习山, 王羽, 等. 特高压干式空心平波电抗器温度场耦合计算与试验[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 5344-5350.
JIANG Zhipeng, WEN Xishan, WANG Yu, et al. Test and coupling calculation of temperature field for UHV dry-type air-core smoothing reactor[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5344-5350.
- [12] 赵海翔. 干式空心电抗器平均温升的拟合算法[J]. 变压器, 1999, 36(12): 7-9.
ZHAO Haixiang. Fitting algorithm of mean temperature rise of dry-type air-core reactor[J]. Transformer, 1999, 36(12): 7-9.
- [13] 叶占刚. 干式空心电抗器的温升试验与绕组温升的计算[J]. 变压器, 1999, 36(9): 6-12.
YE Zhangang. Temperature rise test of dry-type air-core reactor and calculation of its winding temperature rise[J]. Transformer, 1999, 36(9): 6-12.
- [14] 安利强, 王璋奇, 唐贵基. 干式电抗器三维温度场有限元分析与温升实验[J]. 华北电力大学学报, 2002, 29(3): 75-78.
AN Liqiang, WANG Zhangqi, TANG Guiji. 3D-temperature field prediction by FEM and temperature-rise test for dry-type reactor[J]. Journal of North China Electric Power University, 2002, 29(3): 75-78.
- [15] 姜志鹏, 周辉, 宋俊燕, 等. 干式空心电抗器温度场计算与试验分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(3): 218-224.
JIANG Zhipeng, ZHOU Hui, SONG Junyan, et al. Temperature field calculation and experimental analysis of dry-type air-core reactor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 218-224.
- [16] 陈嵘, 杨松伟, 程泳, 等. 干式空心并联电抗器电磁-流体-温度场耦合计算与分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(9): 3021-3028.
CHEN Rong, YANG Songwei, CHENG Yong, et al. Electromagnetic-fluid-temperature coupling calculation and analysis of dry-type air-core shunt reactor[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(9): 3021-3028.
- [17] 有晓宇, 穆海宝, 董勤晓, 等. 基于 Fluent 的 35 kV 干式空心电抗器温度场仿真分析[J]. 高压电器, 2017, 53(8): 147-152.
YOU Xiaoyu, MU Haibao, DONG Qinxiao, et al. Simulation analysis on temperature field of 35 kV dry-type air-core reactor based on fluent[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(8): 147-152.
- [18] 刘志刚, 王建华, 耿英三, 等. 基于耦合方法的干式空心阻尼电抗器温度场计算[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(6): 622-625.
LIU Zhigang, WANG Jianhua, GENG Yingsan, et al. Calculation of temperature field of dry-type air-core damping reactor based on coupled method[J]. Journal of

- Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(6): 622-625.
- [19] 杜华珠, 文习山, 鲁海亮, 等. 35 kV 三相空心电抗器组的磁场分布[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 2858-2862.
DU Huazhu, WEN Xishan, LU Hailiang, et al. Magnetic field distribution around 35 kV three-phase air-core reactors[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 2858-2862.
- [20] PREIS K, STOGNER H, RICHTER K. Calculation of eddy current losses in air coils by finite element method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1982, 18(6): 1064-1066.
- [21] 刘志刚, 耿英三, 王建华, 等. 基于流场-温度场耦合计算的新型空心电抗器设计与分析[J]. 电工技术学报, 2003, 18(6): 59-63.
LIU Zhigang, GENG Yingsan, WANG Jianhua, et al. Design and analysis of new type air-core reactor based on coupled fluid thermal field calculation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(6): 59-63.
- [22] DENG Qiu, LI Zhenbiao, YIN Xiaogen, et al. Steady thermal field simulation of forced air-cooled column-type air-core reactor[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(4): 839-844.
- [23] 温才权, 赵世林, 周凯, 等. 大型空心电抗器对直流系统影响的测试与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 52-57.
WEN Caiquan, ZHAO Shilin, ZHOU Kai, et al. Measurement and simulation for the impact on DC system in large-scale air-core reactors[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 52-57.
- [24] 刘仁, 赵国生, 王欢, 等. 三相磁阀式可控电抗器的特性仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 110-114.
LIU Ren, ZHAO Guosheng, WANG Huan, et al. Characteristic simulation analysis of three-phase magnetic valve type controlled reactor[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 110-114.
- [25] WU Yahui, DONG Xinzhou, MIRSAEIDI S. Modeling and simulation of air-gapped current transformer based on Preisach Theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 111-121. DOI: 10.1186/s41601-017-0046-0.

收稿日期: 2018-03-04; 修回日期: 2018-04-18

作者简介:

吴书煜(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力设备状态监测与故障诊断; E-mail: wusy010101@163.com

马宏忠(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力设备状态监测与故障诊断、磁悬浮承重技术、电力系统谐波分析等。E-mail: hhumhz@163.com

(编辑 周金梅)