

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.01.007

基于CFD模拟的全户内模块化变电站室内通风散热及气流组织优化设计

石 慧¹, 陈 磊¹, 孙应春², 钱宇昊¹, 李雨菲¹, 刘志坚³, 史亚鑫³

(1. 国网扬州供电公司, 江苏 扬州 225001; 2. 扬州浩辰电力设计有限公司, 江苏 扬州 225001; 3. 华北电力大学(保定), 河北 保定 071003)

摘要: 全户内模块化110 kV智能变电站因其室内空间有限、电气设备发热集中,在实际运行中暴露出室内平均温度较高、局部温度过高、温湿度控制难度大等问题,不利于电气设备的高效安全运行。因此,文中通过控制进、出风口参数改善室内通风散热和气流组织效果,首先分析了变电站标准化设计与装配式建设中通风散热现状及电气设备发热情况;然后,基于真实情况建立了变电站整体三维物理模型,对温度场分布、气流组织分布等进行仿真模拟。数值模拟结果显示,室内平均温度为48℃,高于110-A2-6设计方案中室内温度设计要求,其中电容器室平均温度最高,未开启风机时温度为55℃;通过对速度场分析发现,电气设备附近空气流速低于1 m/s,室内气流涡旋与积热高温区域近似重合。最后进行优化方案设计,由于,电容器室开启轴流风机后温度为45℃,针对电容器室特点在保证其通风量不变的情况下,考虑气流组织分布通过改变进、出风口大小和位置分布,提出3种优化方案,对比发现“自然进风+机械排风”通风形式在同侧布置时,通过风管将出风口布置于隔离开关架上方,且增大百叶窗宽高比为0.48时,可以使电容器室内温度降低到37℃。为解决全户内模块化变电站通风散热问题提供案例参考。

关键词: 模块化变电站; 散热通风; 气流组织; 优化设计

Optimization Design of Ventilation, Heat Dissipation and Airflow Organization for Fully Indoor Modular Substations Based on CFD Simulation

SHI Hui¹, CHEN Lei¹, SUN Yingchun², QIAN Yuhao¹, LI Yufei¹, LIU Zhijian³, SHI Yaxin³

(1. State Grid Yangzhou Power Supply Company, Jiangsu Yangzhou 225001, China; 2. Yangzhou Haochen Electric Power Design Co., Ltd., Jiangsu Yangzhou 225001, China; 3. North China Electric Power University (Baoding), Hebei Baoding 071003, China)

Abstract: The fully indoor modular 110 kV smart substation, due to its limited indoor space and concentrated heating of electrical equipment, has exposed such problems as high indoor average temperature, excessive partial temperature and difficult temperature and humidity control, which is not conducive to the efficient and safe operation of electrical equipment. Therefore, in this paper the indoor dissipation and airflow organization effect is improved by controlling the inlet and outlet parameters. First, the current status of ventilation and heat dissipation in standardized design and prefabricated construction of substation as well as the heat generation of electrical equipment are analyzed. Then, overall 3D physical model of the substation is set up based on the real situation and the temperature field distribution as well as air flow distribution of simulation are simulated and modeled. The numerical simulation results show that the average indoor temperature is 48℃, which is higher than the indoor temperature design requirements in 110-A2-6 design scheme, in which the average temperature of the capacitor compartment is the highest, which is 55℃ when the fan is not operated. It is found through the analysis of the velocity field that the air flow rate near the electrical equipment is less than 1 m/s, and the indoor airflow vortex nearly coincides with the high temperature area. Finally, the design of the optimization scheme is performed. Since the temperature of the the

收稿日期:2025-07-02; 修回日期:2025-10-11

基金项目:国网江苏省电力有限公司自主科技项目(J2021223)。

Project Supported by Technology Project Independence of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. (J2021223).

capacitor compartment after switching on the axial fan is 45 °C and as for the characteristics of the capacitor compartment as well as ensuring its constant ventilation volume, three optimization schemes are proposed by changing the size and position distribution with consideration of the air flow organization distribution. It is found by comparison that the ventilation system natural air inlet+ mechanical exhaust is arranged on the same side, the air outlet is arranged above the disconnector frame by the ventilation tube and the shutter width ratio is increased 0.48, the temperature in the capacitor compartment can be reduced to 37 °C, which provides a case reference to solve the problem of ventilation and heat dissipation in fully indoor modular substation.

Key words: modular substation; heat dissipation and ventilation; air-flow organization; optimization design

0 引言

110-A2-6设计方案为现行全户内模块化110 kV智能变电站建设方案,因其具有模块化设计、安全性高、无人值守等特点,以及低碳绿色生态发展的优势,是目前应用广泛的变电站建设方案^[1-2]。该方案指导建设的全户内模块化110 kV智能变电站将电气设备布置在室内,由于室内空间有限、电气设备集中发热以及设备结构不规整造成的空间气流环境复杂,导致实际运行中室内平均温度较高、局部温度过高且温湿度高效控制难度大等问题,严重影响电气设备的安全运行^[3-4]。解决变电站通风散热问题,研究保障变电站安全运行的关键技术,成为当下变电站领域的关注焦点^[5-7]。

秦文慧对110 kV户内变电站进行了研究,得到了电气设备发热、传热机理和室内气流组织优化设计方案^[8];张婉姣对200 kVA箱式变电站主变室进行了通风方案研究,通过研究顶部风机的布置位置、进风口大小和进风口与设备之间的距离,获得了最有利于通风的优化方案^[9];许玲玲对广州市220 kV变电站主变压器室进行研究,通过实际测试和仿真模拟,找到了最大限度利用自然通风的策略^[10];舒力帆等人对室内变电站混合通风模拟进行了研究,通过实际案例分析,得到主变压器室混合通风潜力的设计策略^[11]。莫文雄等人对室内变电站通风散热问题进行了研究,通过对通风量的计算,得到了通风道设计方案^[12]。王剑等人针对户内变电站主变压器室,利用CFD分析提出了增加导流片的散热通风优化方案^[13]。张勇等人基于Fluent对变压器室的置换通风散热效果进行了数值模拟研究,并得到了优化方案^[14]。上述研究多数针对主变压器室,提出相应的优化设计方案,缺少从变电站整体出发对邻室温度耦合影响的考虑;同时在传热机理和气流组织机理仿真模拟过程中,物理模型构建时通常将复杂的电气设备采用矩形块体表示,简化后的模型与实际情况存在偏差。

文中针对江苏省全户内模块化110 kV智能变电站室,分析其通风散热现状及电气设备发热情况,从变电站整体出发,利用BIM-CFD建模及仿真技术应用构建变电站整体模型,通过构建基于实际情况的变电站围护结构、电气设备及通风系统一体化物理模型,对温度场、速度场和流线场进行数值模拟。根据仿真结果定量分析影响散热通风与气流组织的关键因素,在此基础上,针对存在散热问题的电气设备室,探讨通风散热及气流组织优化设计方案。上述研究为解决模块化变电站通风散热问题提供案例参考。

1 全户内模块化110 kV智能变电站概况

文中选取110-A2-6设计方案指导建设的全户内模块化110 kV智能变电站,该变电站位于扬州市,占地面积1 041 m²,为单层建筑主体高度9.65 m,主要房间包括主变压器室(每间75 m²,高度9.65 m)、主变散热器区域(开敞空间)、GIS室(每间157 m²,高度9.65 m)、电容器室(每间29 m²,高度3.9 m)、10 kV配电装置室(每间305 m²,高度3.9 m)、二次设备室(每间83 m²,高度3.9 m)、安全工具室、资料室、卫生间等,全户内模块化110 kV智能变电站一层平面图见图1。

变电站围护结构主要为屋顶、墙体和地基,依据建筑施工图纸设计说明,围护结构热工参数见表1。

根据国家标准《35 kV-110 kV变电站设计规范》(GB 50059—2011)^[15]、《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014)^[16]、《采暖通风与空气调节设计规范》(GB 50019—2003)^[17]和《火力发电厂与变电站设计防火标准》(GB 50229—2019)^[18]对变电站各电气设备室内温度和湿度要求如下:夏季主变压器室最高温度不超过45 °C, GIS室和电容器室不超过40 °C, 配电装置室不超过35 °C, 二次设备室温度在26~28 °C; 冬季配电装置室温度不低于5 °C, 二次设备室温度18~20 °C; 变电站室内全年湿度均不应该超过70%。

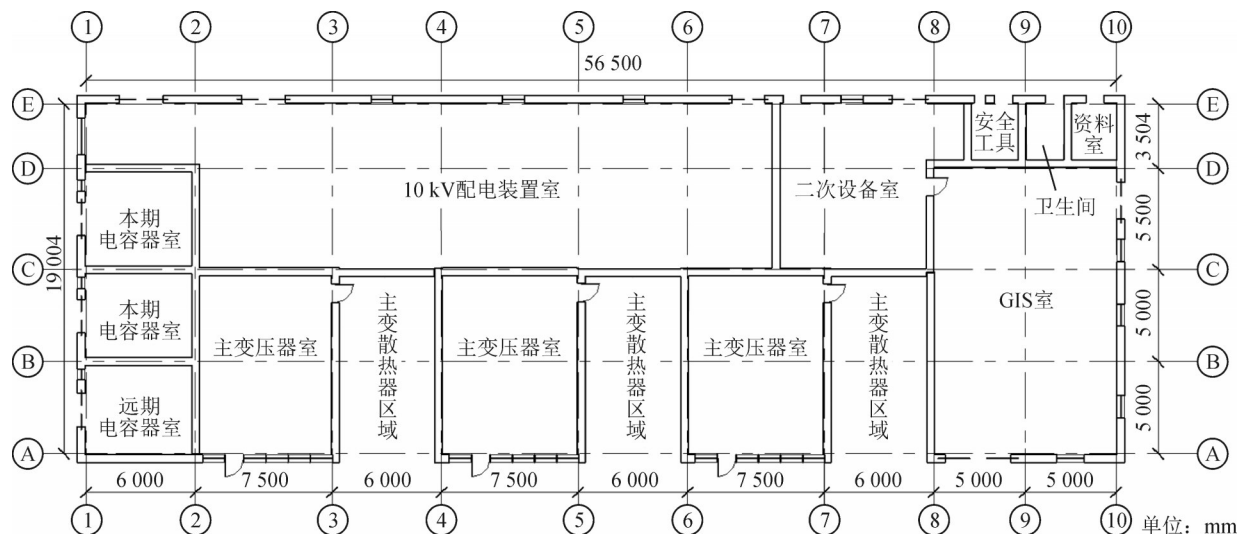


图1 全户内模块化110 kV智能变电站一层平面图

Fig. 1 Plan of the first floor of the whole indoor modular 110 kV intelligent substation

表1 变电站围护结构热工参数

Table 1 Thermal engineering parameters of the substation envelope structure

位置	传热系数/[W·(m ² ·K) ⁻¹]
屋顶	0.172 2
墙体	0.200 3
地基	1.627 0

依据上述规范标准,110-A2-6设计方案中对各电气设备室内通风散热系统布置情况如下:主变压器室采用“自然通风+机械排风”的通风形式,通过百叶窗从下部自然进风,通过轴流风机从上部机械排风;散热器室外布置,采用完全自然通风。GIS室百叶窗从侧墙自然进风,轴流风机从下部机械排风,通风换气次数按4次/h设计;设置上部事故排风机,事故通风的通风换气量满足GIS室换气次数不小于6次/h的事故通风要求。10 kV 配电装置室设换气次数不小于6次/h的排风机,进风采用双层防雨铝合金百叶窗。二次设备室因布置有免维护蓄电池,需设置换气次数不小于6次/h的事故通风,风机和空调机均选用防爆型,事故风机兼作正常排风用,进风采用建筑门窗自然渗透。电容器室采用百叶窗从下部自然进风,轴流风机从上部机械排风的通风方式,正常通风量按保证房间通风换气次数不小于15次/h确定。各房间轴流排风机参数见表2。

2 模型描述

电气设备作为强内热源,其损耗发热与多物理场因素的耦合作用是造成室内温度升高的重要原因,因此,掌握各电气设备的发热量计算方法并准确获得发热量是改善设备室内通风散热效果的前

表2 模块化变电站各室轴流风机参数

Table 2 Parameters of the axial flow fan in each room of the modular substation

位置	风量/(m ³ ·h ⁻¹)	功率/kW
主变压器室	6 300	0.55
本期电容器室	5 000	0.25
远景电容器室	2 150	0.19
GIS室	2 150	0.19
10 kV 配电装置室	5 000	0.25
二次设备室	2 150	0.19

提条件。考虑当地气象参数和负荷变动综合影响,夏季因用电量上升,变电站负荷达到高峰期,且夏季室外温度较高,不利于变电站散热通风。所以选定2020年6月10日14时为典型工况,采用该时刻下相关数据对电气设备损耗发热量进行计算。各电气设备相关型号参数见表3。

2.1 主变压器及主变散热器

主变压器采用分体式三相双绕组有载调压自冷式油浸变压器,布置于室内冷却方式采用ONAN;主变散热器由14组散热片组成,布置于室外采用完全自然通风。

变压器发热量由损耗产生,热量使变压器油温升高,利用油循环,通过变压器壳体和散热器散热,其中,散热器散热占损耗的大部分,一小部分通过壳体散热^[19]。变压器综合功率损耗由有功损耗和无功损耗两部分组成,变压器发热量由式(1)-(3)计算得到。

有功损耗

$$\Delta P = P_0 + K_T \beta^2 P_K \quad (1)$$

无功损耗

$$\Delta Q = Q_0 + K_T \beta^2 Q_K \quad (2)$$

综合功率损耗

$$\Delta P_Z = \Delta P + K_Q \Delta Q \quad (3)$$

表3 各电气设备相关型号参数

Table 3 Related models and parameters of each electrical equipment

设备名称		型式及主要参数
主变压器	型式	分体式三相双绕组有载调压自冷式油浸变压器
	容量	50 MVA
	额定电压	110±8×1.25%/10.5 kV
	接线组别	Yn/d11
	阻抗电压	$U_d=17\%$
	冷却方式	ONAN
GIS	断路器	126 kV, 2 000 A, 40 kA, 40 kA/3 s, 100 kA
	电流互感器	600~1 200/5 A, 5P30/0.2S, 10/10 VA
	电压互感器	(110/√3)/(0.1/√3) kV, 0.5(3P), 10 VA
	避雷器	10 kA, 102/266 kV
电容器		户内框架式, 4 Mvar, 5%
10 kV 开关柜	断路器(真空断路器)	12 kV, 4 000 A, 40 kA, 40 kA/4 s, 100 kA
	接地开关	12 kV, 31.5 kA/4 s, 80 kA
	电流互感器	4 000/5 A, 5P20/5P20/0.2S/0.2S, 20/20/20/20 VA
	电压互感器	(10/√3)/(0.1/√3)/(0.1/√3)/(0.1/√3)/(0.1/3) kV, 0.2/0.5(3P)/3P/6P, 40/30/30/30 VA
	避雷器	17/45

式(1)-(3)中: P_0 为空载损耗 31.21 kW; P_K 为负载损耗 174.59 kW; Q_0 为空载电流损耗 45.0 kvar; Q_K 为无功损耗 84.45 kvar; K_T 为负载波动损耗系数,取 1.05; K_Q 为无功损耗系数,取 0.1 kW/kvar; β 为负载率,取 0.35。

主变压器总发热量的 90%由主变散热器散失,总发热量的 10%由变压器本体散失^[20-21]。所以通过上述计算总发热量为 62.2 kW,变压器主体散热量为 6.22 kW,主变散热器散热量为 55.98 kW。

2.2 电容器

电容器成套装置中包括并联电容器组,串联电抗器组,隔离开关和避雷器等,其中主要的发热设备为并联电容器组和串联电抗器组。

电容器的损耗可通过式(4)计算^[22]

$$P_{CQ} = 2\pi n f C U^2 \tan \delta \quad (4)$$

式(4)中: n 为电容器组中电容器个数,共 12 台; f 为额定频率 50 Hz; C 为额定电容值 26.4 μ F; U 为电容器端电压 11/√3 kV; $\tan \delta$ 为介质损耗角正切值,取 0.000 5。按式(4)计算并联电容器组损耗功率 P_{CQ} 为 1.6 kW。

电抗器额定容量可根据电抗率和电容器组额定容量计算为

$$P_{LQ} = K \varepsilon Q_{CN} \quad (5)$$

式(5)中: Q_{CN} 为成套电容器组三相额定容量; K 为额定电抗率,取 0.05; ε 为损耗值,取值 0.024 kW/kvar。按式(5)计算串联电抗器损耗功率 P_{CQ} 为 4.8 kW。

通过计算设备整体的总损耗为电容器损耗和电抗器损耗之和,故单台电容器成套设备的总损耗为 6.4 kW。

2.3 GIS 设备

GIS 设备发热主要计算母线的损耗,GIS 母线的内部热源主要是指通流情况下,导体产生的焦耳损耗与外壳的涡流损耗^[23]。

GIS 损耗为

$$Q_{WR} = I_W^2 R_W \quad (6)$$

式(6)中: I_W 为 GIS 母线电流,2 000 A; R_W 为 GIS 母线电阻,0.001 2 Ω 。经计算 GIS 设备的总损耗为 4.8 kW。

2.4 二次设备柜与 10 kV 配电装置柜

10 kV 配电装置采用 KYN28A-12 金属铠装移开式开关柜,现实运行中二次设备控制柜和 10 kV 配电柜内存在发热现象,其热量主要来源为电流流过电阻产生的热效应以及交变磁场在周围导磁金属材料中发生的涡流损耗^[24]。因此柜体中电阻热效应损耗计算为

$$P_1 = I_{进}^2 R + 12 I_{出}^2 R \quad (7)$$

式(7)中: $I_{进}$ 为主变进线柜额定电流 4 000 A; $I_{出}$ 为电缆出线柜额定电流 334 A; R 为柜体内全回路电阻 240 $\mu\Omega$ 。按式(7)计算并联电容器组损耗功率 P_1 为 3.84 kW。

在大电流开关柜运行时,柜体涡流损耗很大^[25-26]。涡流损耗为

$$P_2 = \frac{\pi^2 B_p^2 d^2 f^2}{6 k \rho_0 D} \quad (8)$$

式(8)中: B_p 为磁场峰值,T; d 为金属薄壳的厚度,m; f 为磁场改变的频率,Hz; k 为常数,对金属壳等于 1,对电线等于 2; ρ_0 为电阻率, $\Omega \cdot m$; D 为材料密度,kg/m³。结合金属薄壳的涡流损耗与流过母排上电流关系得到 10 kV 配电装置总涡流损耗为

$$P_2 = 6\,845.63 \left(\frac{I_{进}}{5\,656} \right)^2 + 6\,845.63 \left(\frac{I_{出}}{5\,656} \right)^2 \quad (9)$$

按式(9)计算 10 kV 配电装置总涡流损耗 P_2 为 3.45 kW。10 kV 配电装置的总损耗为电阻热效应损耗与涡流损耗之和,故成组 10 kV 配电装置总损耗为 7.29 kW。

2.5 数学模型建立

文中基于 CFD 算法对变电站室内温度场和流速场进行模拟仿真,其通过流体力学基本守恒定律及相关控制方程计算得到各节点上相关物理参

数^[27]。室内空气以稳态湍流形式流动,空气假设为不可压缩流体,忽略室内空气泄露问题,同时室内热源仅为电气设备损耗发热。因此,气流流动满足质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律^[28]。

1) 质量守恒定律

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \mu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

式(10)中: ρ 是气体密度, Kg/m^3 ; t 是时间, s ; μ 、 v 、 ω 分别是速度矢量 $\mathbf{V}$ 在 x 、 y 、 z 轴上的分量, m/s 。

2) 动量守恒定律

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho \mu)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mu \mathbf{V}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{V}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \\ \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \text{div}(\rho \omega \mathbf{V}) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中: ρ 是气体密度, Kg/m^3 ; P 是流体微元体压力, Pa ; F_n 是流体微元体上所受的压, N ; τ_{mn} 是流体微元体上的粘性应力, N/m^2 。

3) 能量守恒定律

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mu T) = \text{div}\left(\frac{k}{C_p} \text{grad} T\right) + S_T \quad (12)$$

式(12)中: C_p 是比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T 是温度, K ; k 是传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; S_T 是粘性耗散项, J 。

3 模拟结果分析

3.1 模拟结果可靠性验证

将温度模拟结果与实测数据进行对比分析与可靠性评价。模块化变电站内监测点共有13处,编号 C_1 ~ C_{13} ,监测点温度传感器采取壁面安装的方式,安装高度1.3 m。针对典型时刻,对同一监测点位前后间隔10 min分别进行2次温度数据采集,计算各监测点位2组温度数据的平均值和标准差。对模拟结果与监测数据平均值进行误差计算分析见图2,13组模拟数据中有11组在实测平均值的标准差允许范围内, C_5 、 C_6 点位模拟结果高于实测数据平均值,且在标准差允许范围之外,但两组模拟结果与监测数据平均值误差小于5%,因此模拟结果与实测数据的误差均在允许范围内,整体仿真结果可靠性高。

3.2 温度、速度场模拟结果

变电站整体水平高度1.5、2.5、3.5、4.5 m处温度场分情况见图3,从整体来看,因电气设备发热导致设备所在房间的温度升高;在水平高度和垂直高度上存在明显的温度梯度分层,高温区域在房间中上部空间。从局部来看,每个房间都存在不同程度的

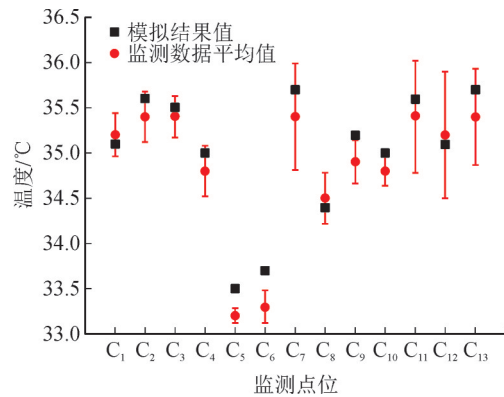


图2 监测点位数据平均值与模拟结果值误差分析图

Fig. 2 Analysis of mean value of monitoring point data and simulation results

局部高温区域。单独来看电容器室平均温度最高,其温度范围在45~65 °C之间,不能满足室内设计温度小于45 °C的要求;其他设备房间相对电容器室温度较低,但各设备室内均有局部区域温度超过45 °C,例如10 kV配电装置室在水平高度1.5 m温度场分布图中,可以看出设备周围区域较高,在与电容器室相邻区域存在局部积热区,温度超过45 °C;随着空间高度上升,高温区域不断扩大,与电容器室相邻区域温度高于与二次设备室相邻区域温度;GIS室由于设备构造复杂导致空间温度梯度变化明显,从水平高度1.5 m和2.5 m温度场分布图中可以清晰的看到,多处局部区域温度较高,随高度上升高温区域不断扩大;主变压器室内中下部靠近内墙侧空间区域中,存在少量局部高温区,随着高度的上升局部高温区增多,且高温区域面积明显扩大,集中在变压器设备正上方及外墙侧空间区域。

变电站整体水平高度1.5、2.5、3.5、4.5 m处速度矢量场分情况见图4,从图4中可以看出各室房间内空气流动速度范围以及空气流动方向,从整体来看各室进风口和排风口处空气流动速度较快,变电站进风采用百叶窗自然通风方式,排风采用轴流风机机械排风的方式,进风口风速在0.2~2.0 m/s范围之间,排风口风速在3.8~4 m/s范围之间,室内平均流速在0.2~0.8 m/s范围之间。通过观察室内空气矢量方向及分布情况,可以看出受室内电气设备的阻挡,空气在室内形成扰动及气流涡旋,与图3不同水平高度上温度场分布情况对比分析,可以发现在速度矢量密集以及形成涡旋的区域内温度较高,由此可以看出气流组织分布是影响温度场分布的重要因素。

3.3 电容器室通风散热及气流组织优化设计方案

电容器室的几何模型见图5,空间几何尺寸为6 000 mm×5 000 mm×3 900 mm。

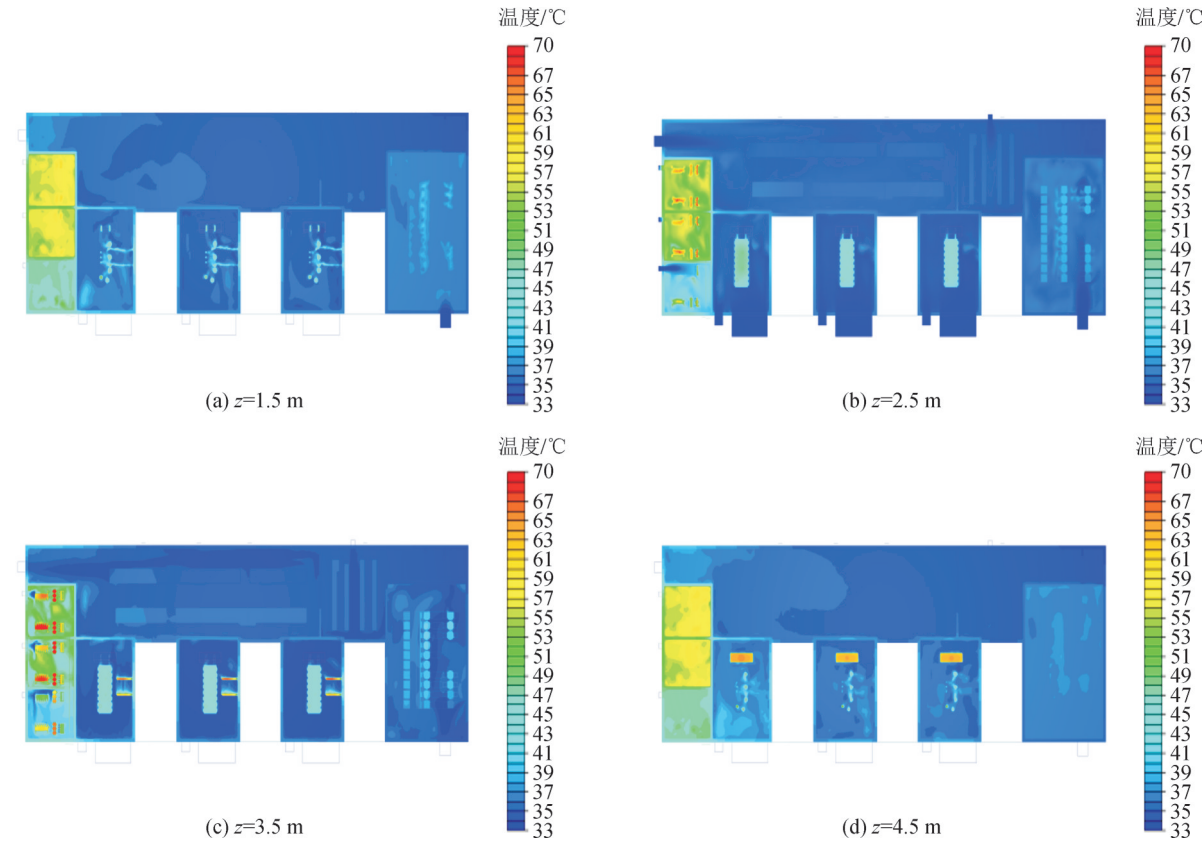


图3 垂直于 z 轴水平高度上的温度场分布

Fig. 3 Temperature field distribution perpendicular to the horizontal height of the z axis

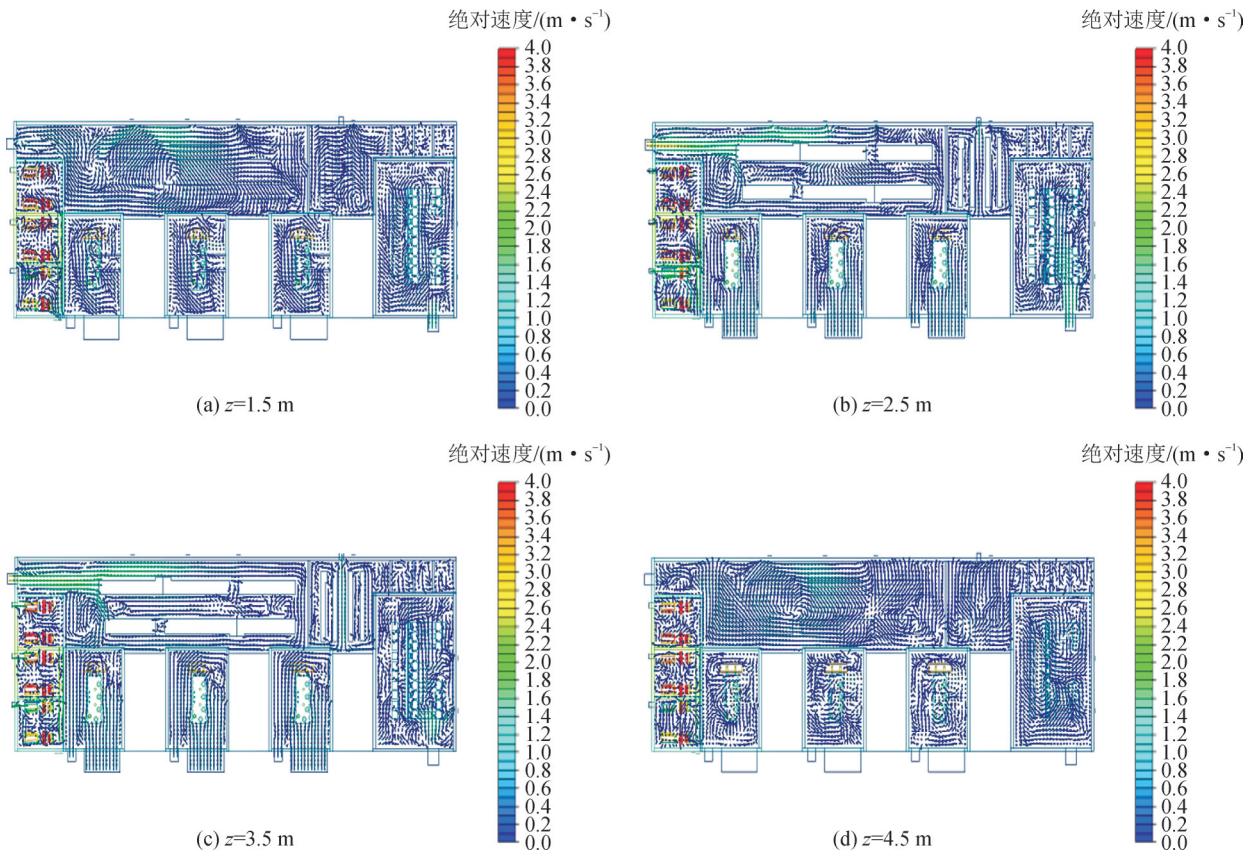


图4 垂直于 z 轴水平高度上的速度矢量图

Fig. 4 Speed vector plot perpendicular to the horizontal height of the z axis

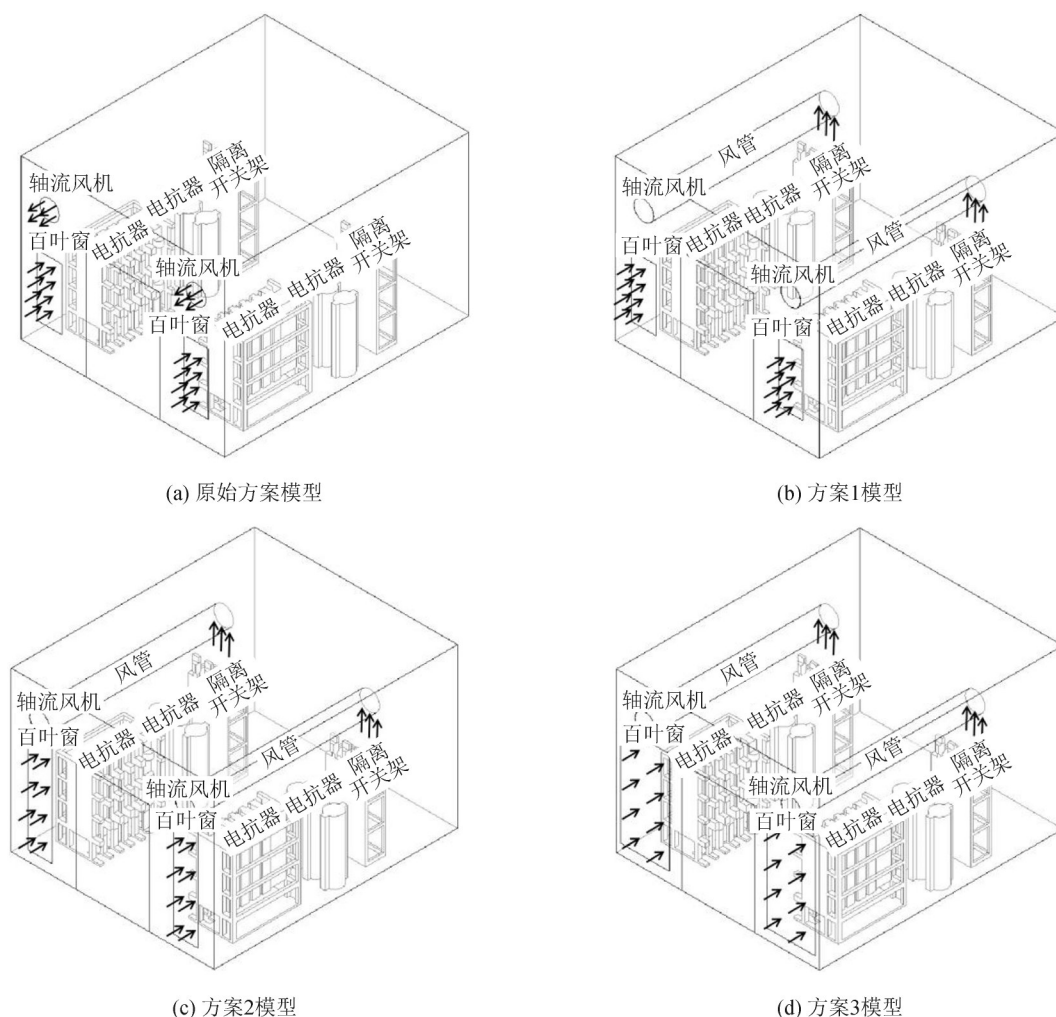


图5 电容器室通风散热及气流组织模型

Fig. 5 Model of ventilation and heat dissipation and airflow organization in the capacitor room

室内对称布置有两组电容器成套设备,每组设备由电容器、电抗器和隔离开关架等主要电气设备组成。原始的电容器室通风散热方式为同侧墙体下方百叶窗进风上方轴流风机排风,百叶窗尺寸为 $600\text{ mm}\times 1\,500\text{ mm}$ 位于电抗器正前方,轴流风机位于百叶窗正上方中心高度为 3.1 m ,与两组电容器成套设备对应呈对称分布。在轴流风机抽吸和电气设备发热室内热压综合作用下,气流由百叶窗流入室内,流经电气设备后由轴流风机风口流出;因此,在保证通风量不变的情况下,通过改变百叶窗进风口尺寸和轴流风机出风口位置来改善电容器室内通风状况。由于百叶窗尺寸影响气流流经设备的效果,出风口位置影响气流在室内的发展情况,所以通过改变百叶窗宽高比和出风口位置,形成3种优化设计方案,具体方案内容见表4。

原始通风散热形式和3种优化方案的室内温度分布图见图6。通过对比分析可知,原始方案开启

表4 电容器室通风散热及气流组织优化方案

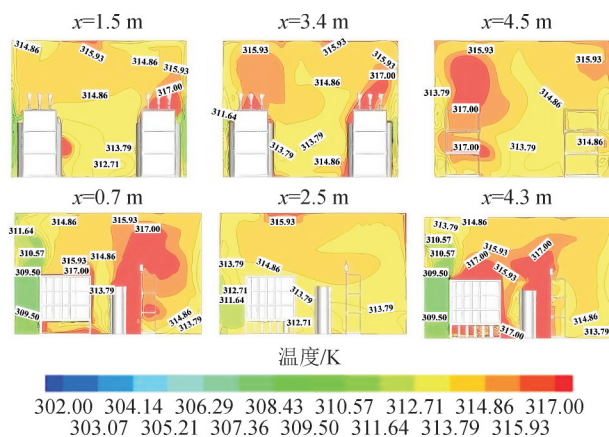
Table 4 Optimization scheme of ventilation and heat dissipation and air flow organization of capacitor room

方案	内容
原始方案	下方百叶窗 $600\text{ mm}\times 1\,500\text{ mm}$ 进风,上方轴流风机排风
方案1	下方百叶窗 $600\text{ mm}\times 1\,500\text{ mm}$ 进风,上方轴流风机风口延伸至开关架上方
方案2	下方百叶窗 $600\text{ mm}\times 2\,500\text{ mm}$ 进风,上方轴流风机风口延伸至开关架上方
方案3	下方百叶窗 $1\,200\text{ mm}\times 2\,500\text{ mm}$ 进风,上方轴流风机风口延伸至开关架上方

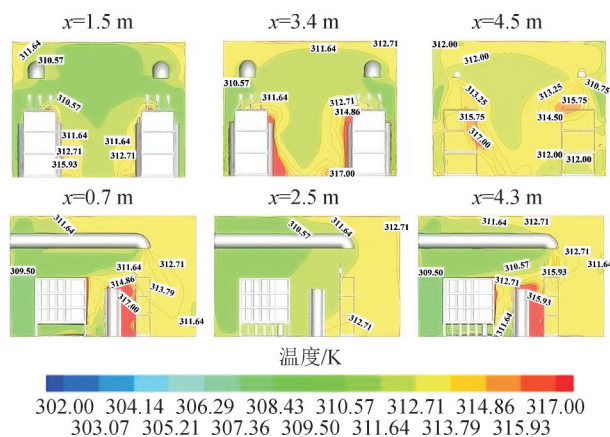
轴流风机后,室内温度由完全自然通风时 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度降低幅度为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右;方案1、2、3分别对应的百叶窗宽高比分别为 0.4 、 0.24 、 0.48 ,方案1室内整体温度为 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,方案2室内整体温度为 $39\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,方案3室内温度为 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,方案3为优化方案中最佳。因此,增大百叶窗宽高比为 0.48 时,随着百叶窗宽度的增加,可以使更多的气流有效流经电气设备进行换热,从而提高通风散热效

果;同时通过风管将出风口布置在隔离开关柜上方时,可以使进入室内的气流在室内充分发展,对比

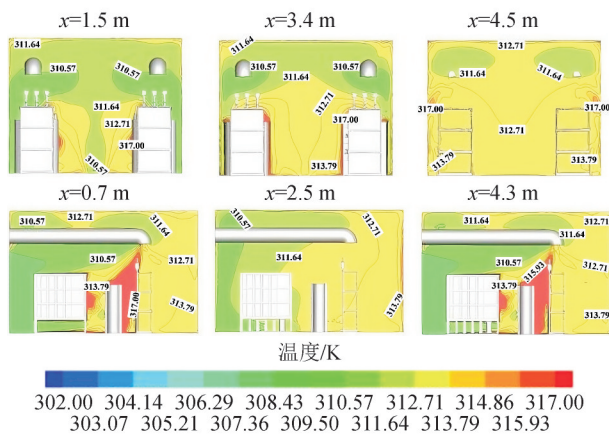
原始方案将出风口布置在隔离开关柜上方的3种优化方案,可以将室内温度再降低6~8℃左右。



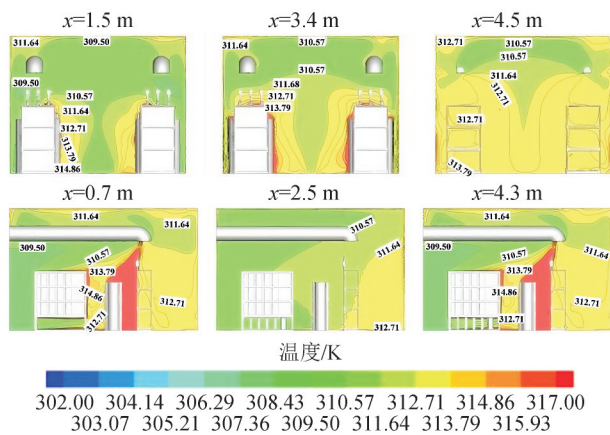
(a) 原始方案模型



(b) 方案1模型



(c) 方案2模型



(d) 方案3模型

图6 电容器室内温度分布图

Fig. 6 Temperature distribution diagram of the capacitor room

电容器室原始通风散热形式和3种优化方案的气流组织分布见图7,图7中截面是以百叶窗中轴线为基准的速度场分布云图,丝带状和颗粒状流线表示空气通过百叶窗进入室内后的流动轨迹。原始方案和方案1百叶窗入口处风速相同为1.07 m/s,但原始方案电抗器周围流速接近0.0 m/s,电抗器后部空间存在无气流区域,进入室内的空气未经充分发展就被排风机快速排出,导致“气流短路”现象而不能给室内带来良好的通风散热效果;而方案1、2、3,通过风管将风口布置于隔离开关上方的情况,可有效改善“气流组织”短路现象,3种优化方案中电抗器周围流速为0.36 m/s。因此,通过风管延伸,将出风口布置于隔离开关上方可以有效改善气流组织分布,使进入室内的空气充分发展,能够快速带走电气设备的发热量,并将热空气有组织的排出,从而营造良好的电气设备运行环境。

4 结论

利用BIM-CFD建模及仿真技术,对全户内模块化110 kV智能变电站整体的室内散热通风与气流组织情况进行了数值模拟,通过对温度场、速度场和流场模拟结果的分析,得到了全户内模块化110 kV智能变电站现有通风形式下各室通风散热现状。并基于变电站整体数值模拟结果,针对存在散热问题的电容器室,在原始通风方案的基础上提出3种优化方案,并根据数值模拟结果对温度场和气流组织进行分析,得到同侧下进上出通风形式,进风口尺寸和出风口位置优化对室内散热和气流组织的改善效果。对合理设计电容器室通风散热系统具有指导意义。主要结论如下:

1)变电站整体平均温度达到45℃,其中电容器室平均温度最高,其温度范围在45~65℃之间,变电站室内温度不能满足设计温度要求;并且各房间

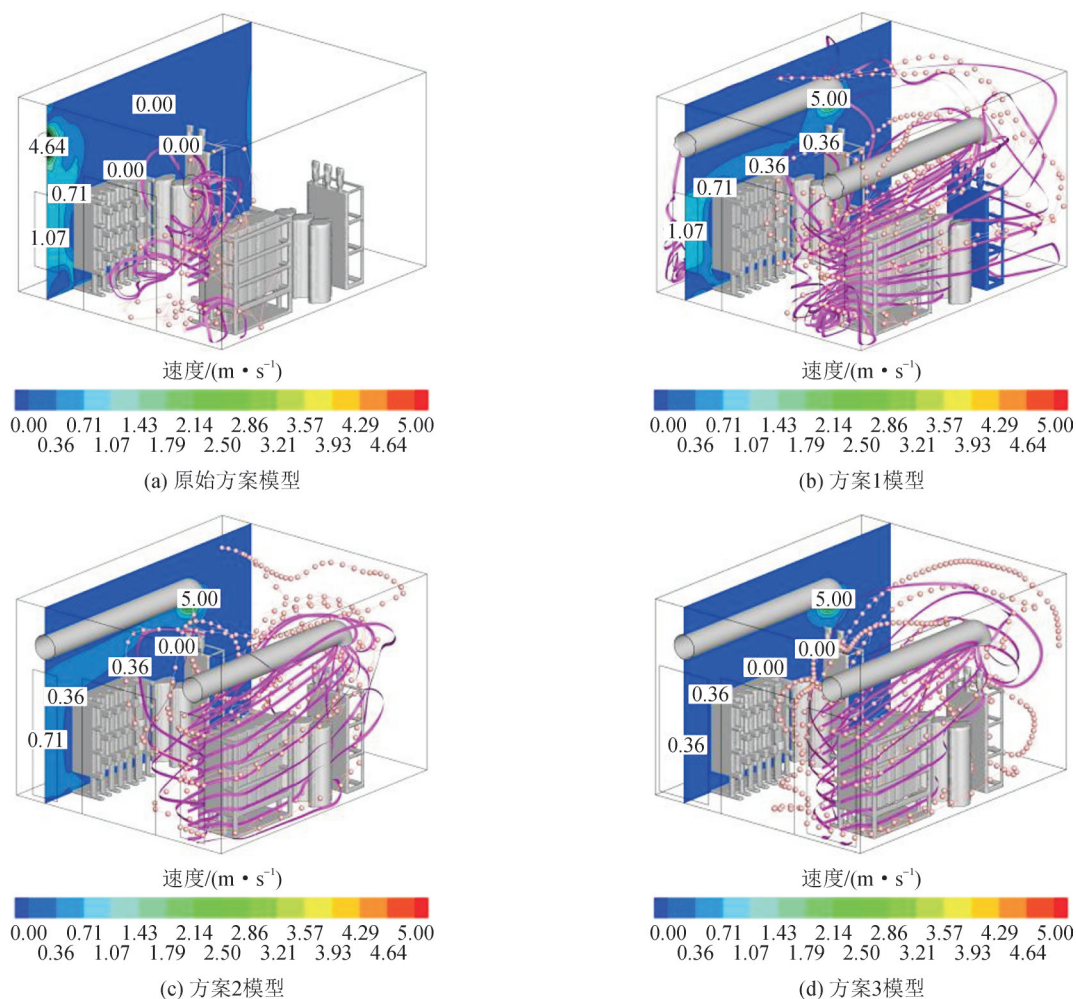


图7 电容器室内气流组织图

Fig. 7 Air flow organization diagram of the capacitor room

内存在不同程度的局部高温区域,通过温度场与速度场对比分析,发现流场涡旋与局部高温区域就有耦合性,由此可以看出气流组织分布是影响温度场分布的重要因素。

2)完全自然通风情况下电容器室内平均温度为 55°C ,开启轴流风机的原始方案,可以使室内温度降至 45°C 左右;然而,原始方案同侧下进上出的通风形式,导致“气流短路”现象,并不能发挥轴流风机机械排风的效果;通过优化出风口位置,利用风管将出风口延伸至隔离开关架上方后,可以使室内温度可降低至 $37\sim 39^{\circ}\text{C}$,从而有效改善气流组织避免“气流短路”现象。

3)进一步优化进风口尺寸,通过控制百叶窗宽高比,对比优化方案中0.24、0.40、0.48三种宽高比带来的改善效果,宽高比越大降温效果越好;由于,当百叶窗高度一定,宽度增加时,有利于增加气流与电气设备设备的接触面积;因此,通风散热系统设计时,考虑增加百叶窗进风口宽高,有利于提高

设备室内通风散热效果。

参考文献:

- [1] 秦建新. 建设环保型变电站是城市电网发展的必然趋势[J]. 华北电力技术, 2005(7): 36-39.
QIN Jianxin. Environmental protection substation-inevitable trend of city power network development[J]. North China Electric Power, 2005(7): 36-39.
- [2] 胡 斌, 郭亚飞, 杨 彬, 等. 智能变电站技术的现状与发展趋势研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(3): 87-90.
HU Bin, GUO Yafei, YANG Bin, et al. Research on status and development trend of smart substation technology[J]. Smart Power, 2018, 46(3): 87-90.
- [3] 郭 盛, 黄 伟, 薛 林, 等. 基于综合环境控制的室内变电站通风方式[J]. 北京交通大学学报, 2013, 37(3): 19-26.
GUO Sheng, HUANG Wei, XUE Lin, et al. Ventilation mode of indoor substation based on integrated environmental control technology[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2013, 37(3): 19-26.
- [4] 李建伟, 王 猛, 陈启萍, 等. 智能预装式变电站的通风散热分析及应用[J]. 变压器, 2025, 62(9): 37-41.
LI Jianwei, WANG Meng, CHEN Qiping, et al. Analysis and

- application of ventilation and heat dissipation in intelligent pre-installed dry-type substation[J]. Transformer, 2025, 62(9):37-41.
- [5] BEIZA M, RAMOS J C, RIVAS A, et al. Zonal thermal model of the ventilation of underground transformer substations: Development and parametric study[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 62(1):215-228.
- [6] 王流火, 孙 帅, 王增彬, 等. 变电站设备箱体温度、湿度场及凝露的数值模拟[J]. 高压电器, 2020, 56(1):24-29.
WANG Lihuo, SUN Shuai, WANG Zengbin, et al. Numerical simulation of temperature/humidity field and condensation in substation equipment cabinet[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1):24-29.
- [7] 赵洪山, 王惠东, 刘婧萱, 等. 考虑局部纹理特征和全局温度分布的电力设备红外图像超分辨率重建方法[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(2):89-99.
ZHAO Hongshan, WANG Huidong, LIU Jingxuan, et al. Super-resolution reconstruction method for infrared images of power equipment considering local texture features and global temperature distribution[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(2):89-99.
- [8] 秦文慧. 110 kV 户内变电站通风散热的数值模拟及优化研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
QIN Wenhui. Numerical simulation and optimization study of ventilation and heat dissipation in 110 kV indoor substation[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [9] 张婉姣. 200 kVA 箱式变电站主变室通风方案模拟设计[D]. 河北工业大学, 2016.
ZHANG Wanjiao. Simulation design of ventilation scheme of main transformer room of 200 kVA box substation[D]. Hebei University of Technology, 2016.
- [10] 许玲玲. 广州市 220 kV 变电站主变压器室自然通风设计策略[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
XU Lingling. Design strategy for natural ventilation of the main transformer room of 220 kV substation in Guangzhou city[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [11] 舒力帆, 胡文斌, 陈明兰, 等. 室内变电站混合通风模式研究及探讨[J]. 建筑科学, 2012, 28(2):84-87.
SHU Lifan, HU Wenbin, CHEN Minglan, et al. Research on hybrid ventilation mode of indoor substation[J]. Building Science, 2012, 28(2):84-87.
- [12] 莫文雄, 曾文斐. 室内变电站主变通风散热问题的分析及对策[J]. 广东输电与变电技术, 2004(5):27-31.
MO Wenxiong, ZENG Wenfei. Analysis on ventilation/dissipation of the main transformer in indoor substation and its countermeasures[J]. Guangdong Power Transmission Technology, 2004(5):27-31.
- [13] 王 剑, 张 峰, 邢海斌, 等. 基于 CFD 的户内变电站通风换热数值模拟及优化设计[J]. 机械设计与制造, 2016(3):45-47.
WANG Jian, ZHANG Feng, XING Haibin, et al. The numerical simulation and optimization design on ventilation and heat transfer in indoor substation based on CFD[J]. Machinery Design & Manufacture, 2016(3):45-47.
- [14] 张 勇, 徐天光, 王永庆, 等. 基于 CFD 的变压器室通风散热数值模拟及优化分析[J]. 建筑节能, 2020, 48(2):107-111.
ZHANG Yong, XU Tianguang, WANG Yongqing, et al. Numerical simulation and optimization analysis of ventilation and heat dissipation in transformer room based on CFD[J]. Building Energy Efficiency, 2020, 48(2):107-111.
- [15] 35 kV~110 kV 变电站设计规范: GB 50059—2011[S], 2011.
Code for design of 35 kV~110 kV substation: GB 50059—2011[S], 2011.
- [16] 建筑设计防火规范: GB 50016—2014[S], 2015.
Code for fire protection design of building: GB 50016—2014[S], 2015.
- [17] 采暖通风与空气调节设计规范: GB 50019—2003[S], 2003.
Code for design of heating ventilation and air conditioning: GB 50019—2003[S], 2003.
- [18] 火力发电厂与变电站设计防火标准: GB 50229—2019[S], 2019.
Standard for design of fire protection for fossil fuel power plants and substations: GB 50229—2019[S], 2019.
- [19] 王 楠, 谢 庆, 王 伟, 等. 片式散热器冷却变压器绕组和油的温升工程计算方法的研究[J]. 高压电器, 2018, 54(10):63-68.
WANG Nan, XIE Qing, WANG Wei, et al. Engineering calculation method for cooling transformer winding and oil temperature rise of chip radiator[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(10):63-68.
- [19] 魏本刚, 黄 华, 戴明秋, 等. 油浸式变压器分体冷却装置模拟试验研究[J]. 高压电器, 2020, 56(1):68-73.
WEI Bengang, HUANG Hua, DAI Mingqiu, et al. Research on simulation test of separated cooling installations for oil-immersed transformers[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1):68-73.
- [21] 吴楠楠. 油浸式分体冷却变压器温度场试验及三维模拟仿真研究[D]. 上海电机学院, 2017.
WU Nannan. Temperature field test and 3D simulation study of oil-immersed split cooling transformer[D]. Shanghai Electric Machinery University, 2017.
- [22] 刘 伟, 张 健. 电力电容器传热模型计算及温度寿命预测研究[J]. 黑龙江电力, 2020, 42(6):491-496.
LIU Wei, ZHANG Jian. Research on heat transfer model calculation and temperature life prediction of power capacitor[J]. Heilongjiang Electric Power, 2020, 42(6):491-496.
- [23] 黄孟丹, 肖 纯, 杨芷宁, 等. GIS 设备发热研究进展[J]. 高压电器, 2020, 56(12):24-33.
HUANG Mengdan, XIAO Chun, YANG Zhining, et al. Research progress of GIS equipment heating[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12):24-33.
- [24] 苏 毅, 谢植楠, 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.
- [25] 全 好, 金 颀, 林 桐, 等. 12 kV 开关柜内部构件的涡流损耗研究[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(3):141-147.
QUAN Yu, JIN Qi, LIN Tong, et al. Study on the eddy current loss of internal components of 12 kV switch cabinet[J]. Journal of

- (10):97-111.
- [24] 律方成,郭云翔,李 鹏. 大功率中频变压器多目标参数优化设计[J]. 高电压技术,2017,43(1):210-217.
LYU Fangcheng, GUO Yunxiang, LI Peng. Optimization design for multiple target parameters of high power medium frequency transformer[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 210-217.
- [25] EL-HAMAMSY S A, CHANG E I. Magnetics modeling for computer-aided design of power electronics circuits[C]//20th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. USA:IEEE, 1989: 635-645.
- [26] JILES D C, THOELKE J B, DEVINE M K. Numerical determination of hysteresis parameters for the modeling of magnetic properties using the theory of ferromagnetic hysteresis[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1992, 28(1): 27-35.
- [27] MOMBELLO E E, ZINI H C. A novel linear equivalent circuit of a transformer winding considering the frequency-dependence of the impedances[J]. Electric Power Systems Research, 2007, 77(8): 885-895.
- [28] 李泓志,崔 翔,卢铁兵,等. 变压器直流偏磁的电路—磁路模型[J]. 中国电机工程学报,2009,29(27):119-125.
LI Hongzhi, CUI Xiang, LU Tiebing, et al. Electric circuit and magnetic circuit combined model of DC biased power transformer [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(27): 119-125.
- 陈 彬(1989—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事电力装备电磁特性模拟与测量技术、新型电工磁性材料综合磁特性模拟与测量技术的研究(通信作者)(E-mail:chenbin@ctgu.edu.cn)。
- ~~~~~
- (上接第59页)
- Electric Power Science and Technology, 2021, 36(3): 141-147.
- [26] 王 睿,王立军,马信友,等. 大电流开关柜温升及其影响因素的建模仿真研究[J]. 高压电器,2022,58(5):31-40.
WANG Rui, WANG Lijun, MA Xinyou, et al. Modeling and simulation study of temperature rise and related influence factors of high current switch cabinet[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(5): 31-40.
- [27] 王 林. 户内变电站降温通风数值模拟研究[D]. 南昌:南昌大学,2014.
WANG Lin. Numerical simulation study of cooling and ventilation in indoor substation[D]. Nanchang: Nanchang University, 2014.
- [28] 邓 科,张守勋,张焕青,等. 基于CFD的机房热环境的数值模拟与优化[J]. 自动化与仪器仪表,2018(7):170-173.
DENG Ke, ZHANG Shouxun, ZHANG Huanqing, et al. Numerical simulation and optimization of thermal environment in computer room based on CFD[J]. Automation & Instrumentation, 2018(7): 170-173.
- 石 慧(1983—),男,本科,高级工程师,主要研究方向为基于IEC 61850的智能变电站二次技术、智能变电站三维数字化设计技术、智能变电站模块化建设技术、变电站装配式钢结构建筑的产品化建设技术、基于人工智能的智能变电站BIM应用技术、输变电工程规划与建设管理、零碳微能网技术。
- 史亚鑫(1997—),男,博士研究生,主要研究方向为变电站室内热湿环境控制、空调柔性负荷参与虚拟电厂调控、建筑与电网友好互动(通信作者)(E-mail:15230251947@163.com)。