

配电室温度场与湿度场的建模与仿真分析

范 强¹, 吕黔苏¹, 邱继艳², 王 旭³, 戴 宇⁴, 胡桢喆⁵

(1. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵州 贵阳 550002;

2 贵州电网有限责任公司都匀供电局, 贵州 都匀 558000;

3. 贵州创星电力科学研究院有限责任公司, 贵州 贵阳 550002;

4 贵州电网有限责任公司, 贵州 贵阳 550001;

5. 广州穗华能源科技有限公司, 广东 广州 510530)

摘 要:考虑到变电站配电室内配电设备对环境温度和湿度有较严苛要求,因此有必要研究配电室内温度和湿度分布规律,有助于提高配电设备可靠性。按照与温度计算有关的能量传递方程和与湿度计算有关的气体扩散方程,由理论计算公式分析可知直接计算涉及多变量的耦合,求解难度大。本文采用有限元分析软件 ANSYS 对配电室的温度场和湿度场进行仿真计算,首先根据实际的典型配电室建立仿真计算模型,并高精度划分有限元网格。其次根据现场运行情况整定计算仿真需要的计算参数,利用仿真计算模型得到了室内温度场和湿度场的水平面分布情况。通过改变风机流量,分析了风机流量变化对配电柜内部温度的影响效果,总结了配电室内温度场与湿度场的分布规律。

关键词:配电室;温度场;湿度场;有限元分析;

文章编号:2096-4633(2019)01-0049-06 **中图分类号:**TM743 **文献标志码:**B

随着社会经济的快速发展,对电力需求日益增长,变电站的运行是否正常直接关系到区域供电质量的高低。同时,无人值守变电站及智能变电站建设、投运数量的逐渐增多,对电气设备的运行可靠性也提出了更高要求^[1]。变电站内配电室、电容器室等重要区域安装有众多电气设备,高压配电室内电气设备的良好运行环境又直接为电力供电可靠性提供保证。室内配电设备包括断路器、隔离开关、电流互感器、电压互感器等,它们对温度与湿度这两个环境参数的要求较高。最为重要的是温度,在运行中这些设备自身会发出较大热量,而设备所在的开关柜又是一个相对密封的空间,因此,开关柜内部的温度较环境温度高许多,过高的温度会缩短电气设备的使用寿命,严重时甚至会导致设备直接烧毁^[2]。其次是湿度,在室内相对湿度接近 100% 的情况下,空气中的水分会析出,并在设备上形成凝露^[3]。凝露加上电气设备的积灰,改变了绝缘表面电场的分布,常常导致绝缘表面发生放电,极大破坏了绝缘强度^[4]。综上所述,配电室内温度与湿度对于电气设备影响巨大,因而其分布规律有待深入研究。

随着以有限元为代表的数值仿真计算的发展,国内外对于电气设备的温升计算越来越多地采用数值计算方法^[5]。ANSYS 是由美国著名软件公司开

发针对温度、电磁场等进行有限元分析的软件^[6]。

ANSYS 一般用于高压开关柜^[7-8]、变压器^[9-10]、电容电抗器^[11-13]等的温度场建模与分析工作,以指导环境监测控制系统能进行有效的温度监测与控制工作,但鲜见用于变电站配电室的研究工作。文献[14]采用 Solidworks 软件建立开关柜精细 3D 有限元模型,基于 Icepak 软件进行温度场和流体场的数值计算和分析。考虑空气对流散热和风扇强迫风冷的因,实现了复杂模型温度分布的准确求解。文献[15]先建立了 NXAIR 型开关柜电缆室的温度场和空气流场模型,再利用 Comsol 软件进行了仿真求解,发现电缆接头处温度偏高,认为该处应成为监测重点,最后根据仿真结果构建了一套专门对开关柜电缆室进行监测的系统。

本文将参考上述文献,以贵州某变电站的典型配电室为研究对象,从仿真数学模型和仿真计算两个方面对该配电室内温度场和湿度场作详细的研究。

1 配电室的温湿度数学模型

1.1 配电室热源分析

配电室内温度除了受到环境温度、气流影响外,还会受到室内发热体传热的影响。

配电室内的热源一般是开关柜,室内电容电抗

器只有在投入时会产生大量的热。开关柜的发热情况与热源影响和传热影响有极大关系。其主要影响因素^[16]如下表 1 所示。

表 1 开关柜发热影响的因素

Tab. 1 Influence factors of switch cabinet heating

影响发热的因素	内 容
热 源	载流导体和电接触的焦耳损耗
	磁导体内的涡流和磁滞损耗
	电绝缘材料中的介质损耗
	柜外的设备及自然环境中产生的热能
传 热	与热体接触的导体、架构和支持件的传导
	高压开关柜内部辐射
	开关柜内部空气流动造成的对流
	与开关柜外部接触的面和基础螺钉的传导
	开关柜外表面的辐射
	开关柜周围空气的对流
	强制换气的强迫对流
	室内装置的风扇、空调的影响
	外部电力变压器、电力变换装置等其他设备产生的热的影响
	室外开关柜的日照风吹等影响

1.2 热传递方程

配电室内温度除了受到环境温度、气流影响外,还会受到室内发热体传热的影响。热传递主要分为三种形式,即热传导、热对流和热辐射。热传导是固体传热的主要形式,在液体中常常伴随对流同时发生,如电气设备内部热量从高温部分向低温部分流动。热对流是指流体内部质点发生相对位移的热量传递过程,只会在流体中发生,是流体热传递的主要形式,同时也会伴随热传导的发生。热辐射指物体由于具有温度而向外辐射电磁波的现象,温度越高,辐射出的总能量越大。它们的数学模型可分别由下列三个方程式表示:

$$Q_1 = - \lambda A \frac{\partial t}{\partial x} \tag{1}$$

$$Q_2 = h_c A (t_w - t_f) \tag{2}$$

$$Q_3 = \delta_0 A \varepsilon_{st} (T_1^4 - T_2^4) \tag{3}$$

式中: Q_1 、 Q_2 、 Q_3 分别为热传导热量、热对流热量和热辐射换热量; A 为换热面积; λ 为导热系数; h_c 为对流换热系数; t_w 为固体表面温度; t_f 为周围空气温度; δ_0 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数,其值为 $5.669 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{k}^4)$; ε_{st} 为系统发射率; T_1 为物体表面热力学温度; T_2 为环境温度的热力学温度。

1.3 湿度场方程

由于配电室内没有明显的水分蒸发源,所以室内的湿度主要由室外湿空气的扩散引起绝对湿度的变化。两种气体的相互扩散遵循菲克定律,对于各项同性的三维扩散体系,菲克定律的方程如式(4)。而凝露现象主要和相对湿度有关,相对湿度和绝对湿度之间的转换公式如式(5)。

$$\frac{\partial H}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial q_d}{\partial t} \tag{4}$$

$$d = 622 \frac{\varphi P_s}{P - \varphi P_s} \tag{5}$$

式中: H 为空气的绝对湿度; D 为干空气和水蒸气之间的扩散系数; t 为时间; q_d 为空气内部自降低项; d 为湿含量(g/kg); φ 是相对湿度; P_s 为水蒸气分压力(Pa); P 为空气压力(Pa)。

由上述公式(1) - (5)可知,直接计算一个大的流体空间的温度场和湿度场是不现实的,涉及多变量耦合的复杂问题。因此,采用有限元分析软件 ANSYS 对室内温度场和湿度场进行仿真计算,是一切可行的途径。

2 仿真模型建立和参数设定

2.1 配电室仿真模型建立

ANSYS 软件是集流体、电场、磁场、声场等分析为一体的大型通用有限元分析软件。在电力系统中,常用于电力设备的温度场、磁场、电场等分布场的计算分析。该软件的理论基础是有限单元法,即把连续的求解域分割为有限数量的单元,相邻的单元通过节点连接,在各个单元内建立离散的单元特性方程,将各个单元的特性方程进行组集求解。因此该软件适合求解以多元、非线性为特征的复杂工程物理的场问题。

在 ANSYS 的 DesignMolder 模块中建立配电室的模型,根据现场测量数值,配电室外墙是一个长 17 m,宽 9 m,高 3.5 m 的长方体,墙上每边有 4 个进气口和排气口。进气口为长方形,长 1 m,宽 0.5 m,几何中心离地面 0.55 m。排气口为圆形,半径 0.3 m,圆心距离地面 2.5m。内部有两排平行的配电柜,单个配电柜宽 1m,高 2 m,深 1 m,每排 12 个。模型建立完成后,需要进行网格划分,为了使仿真结果更精确,网格划分要细致。最终网格个数达到 64 万个,如图 1 所示。

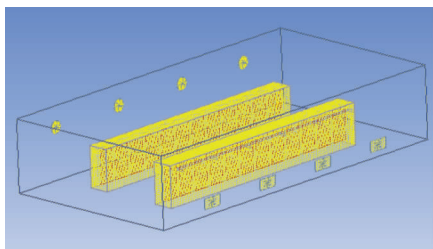


图 1 配电室模型网格划分图

Fig. 1 Grid division diagram of distribution room model

2.2 仿真参数的设定

在仿真计算之前,需要进行计算初始化并且对一些仿真参数进行设定。软件可以自动计算模型的雷诺数,该模型的雷诺系数为 133944,根据数值选择湍流模型进行计算。为了计算温度场和湿度场,开启能量方程和组分运输方程。仿真参数的设定对于仿真计算的准确度有很大的影响,设置不恰当将会导致计算无法收敛。通过收集实际监测数据,每台配电柜散热功率约为 0.5 kW,一排 12 个柜总散热功率为 6 kW。

对变电站所在地区的温湿度进行了调研,选择环境比较恶劣(温湿度较高)的情况,设定大气温度为 25℃,湿度为 85%。根据 GB 50059 35 – 110 kV 变电站设计规范和 GB 3906 3.6 kV – 40.5 kV 交流金属封闭开关设备和控制设备,配电室内环境温度应低于 40℃,湿度应低于 80%,又设定进风口风量为 1 m³/s。考虑到机柜的散热,在机柜上设置通风格栅,通风格栅孔隙率为 0.5。根据上述进行条件,得到仿真参数汇总如表 1。

表 1 配电室环境仿真参数

仿真参数	数值
风机流量/m ³ /s	1
机柜外窗阻力系数	0.5
热源数量	24
热源功率/kW	0.5
壁面温度/℃	25
室外温度/℃	25
室外相对湿度/%	85

3 温度场仿真结果及分析

3.1 温度场仿真计算结果

上述准备步骤完成后,进行仿真计算,结果可在后处理器中查看,可得配电室内最低温度 25℃,最高温度 74.41℃。主要关注两排机柜内的温度场分

布情况,为方便后文叙述,令靠近进风口处配电柜为机柜 A,靠近排风口处配电柜为机柜 B。机柜 A 内平均温度为 56.2℃,最低温度为 31.1℃,最高温度为 71.5℃。机柜 B 内平均温度为 59.4℃,最低温度为 31.4℃,最高温度为 74.4℃。

为了解配电室温度的立体分布情况,选择水平高度 1.5 m、2 m、2.5 m 处查看具体温度场云图。水平高度 1.5 m 处温度云图如图 2 所示,在该水平面处,室内平均温度为 32.9℃。机柜 A 内平均温度为 59.2℃,最低温度为 32℃,最高温度为 69.5℃。机柜 B 内平均温度为 63.1℃,最低温度为 34.5℃,最高温度为 72.2℃。

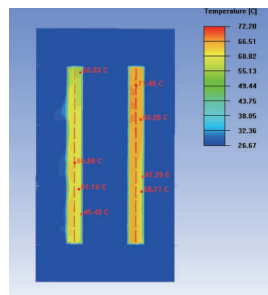


图 2 配电室内水平高度 1.5 m 处温度云图

Fig. 2 Temperature nephogram of 1.5 m level in distribution room

水平高度 2 m 处温度云图如图 3 所示,在该水平面处,室内平均温度为 30.2℃,温度较均匀。机柜 A 内平均温度为 40.5℃,最低温度为 31.1℃,最高温度为 56.1℃。机柜 B 内平均温度为 44.1℃,最低温度为 34.1℃,最高温度为 56.7℃。水平高度 2 m 处为机柜顶部,适合在该高度布置温度传感器监测实时温度情况,图 3 中红点标记了机柜顶部温度较高的点,可作为温度传感器安装的参考位置。

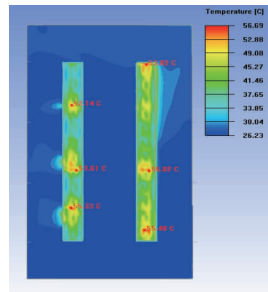


图 3 配电室内水平高度 2 m 处温度云图

Fig. 3 Temperature nephogram of 2 m level in distribution room

水平高度 2.5 m 处温度云图如图 4 所示,在该水平面处,气流形状明显,室内平均温度为 27.4℃,最低温度为 25℃,最高温度为 33.5℃。

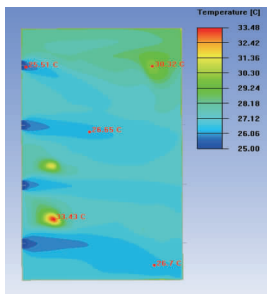


图 4 配电室内水平高度 2.5 m 处温度云图
Fig. 4 Temperature nephogram of 2.5 m level in distribution room

3.2 通风流量对温度场的影响

当配电室进行机械通风降温时,风量大小可以通过控制每个风机的流量实现。仿真时通过改变风机流量这一参数,可得风机流量对室内温度场分布的影响。风机流量不同时,机柜内部温度变化曲线如图 5 所示。

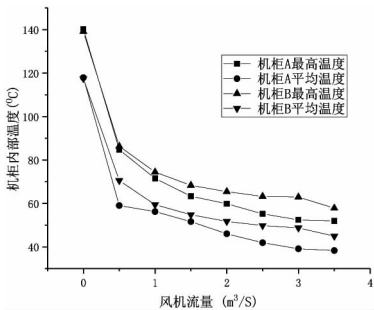


图 5 机柜内部温度与风机流量曲线图
Fig. 5 Curve diagram of cabinet internal temperature and fan flow

从该图中可以看出,机柜 A 内部温度低于机柜 B,两机柜平均温度差在 5℃ 左右。随着风机流量的提高,两排机柜内部温度降低,但随着风机流量增大,温度下降速度趋缓。

3.3 温度场仿真结果分析

通过对配电室内温度场的仿真计算,对比分析水平高度 1.5 m、2 m、2.5 m 的温度云图,可以得到在给定通风方案下室内温度场的分布规律:两机柜内部平均温度比室内环境平均温度高约 10℃,且机柜 B 内部温度略高于机柜 A 内部温度,甚至机柜 B 的最高温度比环境平均温度高达 35℃;风机与配电柜的散热格栅间形成了风道,大量热空气会从这里通过,从而使配电柜顶部靠近风道区域温度明显上升,若需要在配电柜外壳安装温度传感器,这些区域可作为传感器安装的参考位置;提高风机流量可以降低配电柜内温度,但随着流量的增大, $\partial Q/\partial T$ 的值会减小(Q 代表风机流量, T 代表温度),即风机流

量增大时柜内温度下降减缓。

4 湿度场仿真结果及分析

针对配电室内湿度场仿真计算,结果显示相对湿度最高处为 84.96%,最低处为 7.28%。选择配电室内水平高度 1.5 m、2 m、2.5 m 处,对比分析湿度场在不同水平面的分布。水平高度 1.5 m 处相对湿度云图如图 6 所示,该平面内相对湿度最高为 76.95%,最低为 7.86%。水平高度 2 m 处相对湿度云图如图 7 所示,该平面内相对湿度最高为 78.97%,最低为 18.95%。水平高度 2.5 m 处相对湿度云图如图 8 所示,该平面内相对湿度最高为 84.96%,最低为 52.08%。

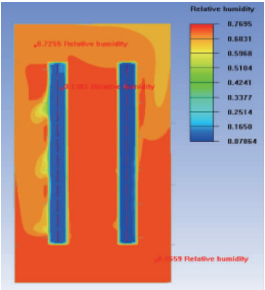


图 6 配电室内水平高度 1.5 m 处湿度云图
Fig. 6 Humidity nephogram of 1.5 m level in distribution room

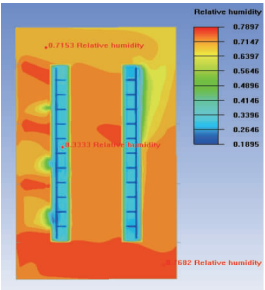


图 7 配电室内水平高度 2 m 处湿度云图
Fig. 7 Humidity nephogram of 2 m level in distribution room

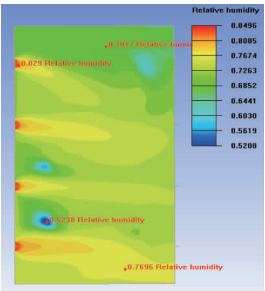


图 8 配电室内水平高度 2.5 m 处湿度云图
Fig. 8 Humidity nephogram of 2.5 m level in distribution room

湿度场仿真结果表明:在室内没有水分蒸发源的情况下,室内相对湿度值会低于室外大气相对湿度值;相对湿度值和温度值成反比,即温度越高的地方,相对湿度越低;配电柜散热格栅和风机之间形成了风道,两个风道间的相对湿度值会明显高于周围环境,若大气温度或湿度在短时间内发生较大变化,易发生凝露,应对风道之间的相对湿度进行重点监测^[17-18]。

5 结论

变电站配电室内诸多电气设备对温度和湿度的要求较高,根据典型配电室结构、实际运行条件,采用 ANSYS 有限元分析软件建立了仿真计算模型,通过对室内立体的温度场和湿度场计算,对结果进行温湿度场的分布规律分析,得到以下结论:

(1) 配电室内大部分热量聚集于配电柜内部,如果不及时进行通风散热,热量大量聚积造成温度上升,柜内最高温升可达 35℃,对电气设备的绝缘非常不利。

(2) 提高风机流量可以降低配电柜内温度,但超过一定流量后,继续增加流量对配电柜的降温效果会减弱。

(3) 风机和配电柜的散热口之间会形成风道,由于风道的影响,机柜顶部在特定区域温度会较高,而且风道间的相对湿度会明显高于其它区域,应对风道间的相对湿度进行重点监测,以防止凝露。

参考文献:

- [1] 黄益庄. 智能变电站是变电站综合自动化的发展目标[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(02):45-48.
HUANG Yizhuang. Smart substation is the further objective of SAS [J]. Power System Protection & Control,2013,41(02):45-48.
- [2] 刘云鹏,郭沁. 高压开关柜电缆室温湿度场数值计算分析[J]. 高压电器,2017,53(09):6-10+16.
LIU Yunpeng, GUO Qin. Numerical calculation of temperature and humidity fields in cable room of high-voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus,2017,53(09):6-10+16.
- [3] 耿江海,钦雨晨,郭沁等. 不同通风条件对环网柜凝露现象的影响[J]. 中国电力,2017,50(11):103-107.
GENG Jianghai, QIN Yuchen, GUO Qin, et al. Research on RMU condensation phenomenon under different ventilation conditions [J]. Electric Power,2017,50(11):103-107.
- [4] 林浩然,牛海清,张耿斌,等. 高湿条件下空气间隙放电规律的试验研究[J]. 高压电器,2014,50(01):87-91.
LIN Haoran, NIU Haiqing, ZHANG Gengbin, et al. Experimental

- study on air-gap discharge characteristics in heavy humidity [J]. High Voltage Apparatus,2014,50(01):87-91.
- [5] 韦玮,李鑫,徐晓刚,等. 基于 Fluent 的植物绝缘油配电变压器温度场有限元仿真分析[J]. 广东电力,2016,29(10):121-126.
WEI Wei, LI Xin, XU Xiaogang, et al. Finite element simulation for temperature field of vegetable insulating oil distribution transformer based on fluent[J]. Guangdong Electric power,2016,29(10):121-126.
- [6] 汪德华,杨春,王革鹏,等. 基于 Fluent 的超高压变压器二维温度场分析[J]. 高压电器,2015,51(06):161-165.
WANG Dehua, YANG Chun, WANG Gepeng, et al. Analysis of two-dimensional temperature field in ultra-high voltage transformer based on fluent[J]. High Voltage Apparatus,2015,51(06):161-165.
- [7] 王秉政,江健武,赵灵,等. 高压开关柜接触发热温度场数值计算[J]. 高压电器,2013,49(12):42-48.
WANG Bingzheng, JIANG Jianwu, ZHAO Ling, et al. Temperature field simulation of contact heating in high voltage switchgear [J]. High Voltage Apparatus,2013,49(12):42-48.
- [8] 徐立群,申亮,倪福生. KYN28A-12 kV/4000A 开关柜的结构改进与温度场分析[J]. 高压电器,2017,53(03):254-258.
XU Liqun, SHEN Liang, NI Fusheng. Structure modification and temperature field analysis of KYN28A-12 kV/4 000 A switchgear cabinet[J]. High Voltage Apparatus,2017,53(03):254-258.
- [9] 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.
- [10] 刘凤英,郭振华,景崇友,等. 油浸式变压器绕组热点温度的计算与影响因素的研究[J]. 变压器,2014,51(06):22-26.
LIU Fengying, GUO Zhenhua, JING Chongyou, et al. Research on influence factors and calculation of winding hot spot temperature of oil-immersed transformer [J]. Transformer,2014,51(06):22-26.
- [11] 华征,侯智剑,戚岭娜,等. 基于 Fluent 的集合式并联电容器内部温度场仿真分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2016,37(04):37-42.
HUA Zheng, HOU Zhijian, QI Lingna, et al. Internal temperature field simulation analysis of assembled shunt capacitor based on fluent [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2016,37(04):37-42.
- [12] 倪学锋,王子建,林浩,等. 特高压用并联电容器温度场仿真[J]. 高压电器,2016,52(02):107-114.
NI Xuefeng, WANG Zijian, LIN Hao, et al. Temperature field simulation of shunt power capacitor used to uhv engineering [J]. High Voltage Apparatus,2016,52(02):107-114.

[13]

石光,曾凯,吴春红,等. 基于 ANSYS 的多次换相失败时平波电抗器暂态温度场仿真[J]. 变压器,2016,53(11):29-33.
SHI Guang, ZENG Kai, WU Chunhong, et al. Transient temperature field simulation based on ANSYS for smoothing reactor during commutation failure repeatedly [J]. Transformer, 2016,53(11):29-33.

[14]

陈荆州,杜志业,王栋,等. 高压开关柜温度场数值分析[J]. 电工电能新技术,2018,37(01):38-44.
CHEN Jingzhou, DU Zhiye, WANG Dong, et al. Numerical analysis of temperature field of high voltage switchgear [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering & Energy,2018,37(01):38-44.

[15]

熊兰,徐敏捷,杨子康,等. 高压开关柜电缆室温度场分析及在线监测系统构建[J]. 电力自动化设备,2014,34(6):153-157.
XIONG Lan, XU Minjie, YANG Zikang, et al. Thermal field analysis for cable room of high-voltage switchgear and design of online monitoring system [J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(06):153-157.

[16]

钱家骊,袁大陆,杨丽华,等. 高压开关柜—结构、计算、运行、发展[M]. 北京:中国电力出版社,2007.

[17]

陈丽,黄新波,吴孟魁,等. 箱式变电站温湿度在线监测关键技术研究[J]. 广东电力,2016,29(05):118-123.
CHEN Li, HUANG Xinbo, WU Mengkui, et al. Research on key technology for online monitoring on humiture of box-type substation[J]. Guangdong Electric Power,2016,29(05):118-123.

[18]

贺琛,王彦波,王云烨. 基于电力通信传输网大数据的温度监测系统研究[J]. 浙江电力,2016,35(07):65-68.
HE Chen, WANG Yanbo, WANG Yunye. Research on temperature monitoring system based on big data of power communication transmission system[J]. Zhejiang Electric Power, 2016,35(07):65-68.

收稿日期:2018-10-12

作者简介:



范 强(1986),男,硕士,研究方向为电力系统继电保护、新能源建模分析与发电技术等。

(本文责任编辑:范 斌)

Model and simulation analysis of temperature field and humidity field in a distribution room

FAN Qiang¹, LV Qiansu¹, QIU Jiyang², WANG Xu³, DAI Yu⁴, HU Yazhe⁵

- (1. Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002 Guizhou, China;
2. Duyun Power Supply Bureau of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Duyun 558000 Guizhou, China;
3. Guizhou Chuangxing Electric PowerResearch Institute, Guiyang 550002 Guizhou, China;
4. Guizhou Power GridCo., Ltd., Guiyang 550001 Guizhou, China;
5. Guangzhou Suihua Energy Technology Company Limited, Guangzhou 510530 Guangdong, China)

Abstract: Distribution equipment in substation distribution room has stringent requirements on environment temperature and humidity, so it is necessary to study the distribution law of temperature and humidity in distribution room, which is helpful to improve the reliability of distribution equipment. According to the energy transfer equation related to temperature calculation and the gas diffusion equation related to humidity calculation, it can be seen from the theoretical calculation formula that the direct calculation involves multivariable coupling, so it is difficult to solve. In this paper, the finite element analysis software ANSYS is used to simulate the temperature field and humidity field in the distribution room. Firstly, the simulation calculation model is established according to the actual typical distribution room, and the finite element mesh is divided accurately. Secondly, the simulation parameters are set according to the field operation, then the horizontal distribution of indoor temperature field and humidity field is obtained by the simulation calculation model. Then, by changing the flow rate of the fan, the effect of the change of the flow rate of the fan on the internal temperature of the distribution cabinet is analyzed, and the distribution law of the temperature field and the humidity field in the distribution room is summarized.

Key words: distribution room; temperature field; humidity field; finite element analysis