

基于 COMSOL Multiphysics 软件的某地铁配电柜 温湿度控制策略*

邓 雷¹ 崔光磊²

(1. 武汉地铁运营有限公司, 430030, 武汉; 2. 东北大学辽宁省深部工程与智能技术重点实验室, 110819, 沈阳)

摘 要 [目的] 运行在长江流域高温高湿环境中的配电柜, 易受自然环境的影响发生内部凝露现象, 引发设备受潮及故障。为避免凝露引发的配电柜故障, 有必要分析凝露现象产生的机理, 研究配电柜的温湿度控制策略。[方法] 基于凝露引发的配电柜故障, 分析了凝露现象产生的机理及主要影响因素。以中部某城市地铁配电间内配电柜为例, 利用 COMSOL Multiphysics 仿真软件构建配电柜全尺寸多物理场耦合仿真模型。基于环境测控的历史数据进行仿真, 分析配电柜内温度及湿度变化对柜内凝露现象的影响。基于 2022 年数据, 统计自然状态下各月的凝露概率, 结合仿真计算结果提出配电柜温湿度控制策略, 并通过仿真计算对控制效果进行分析。[结果及结论] 凝露现象同相对湿度和露点温度密切相关。6 月和 7 月的凝露概率最高, 入夜后凌晨至清晨最易发生凝露。提高配电间空调设置温度并降低环境相对湿度, 可显著降低配电柜发生凝露的概率。具体控制策略为: 在夏季空调制冷时, 配电间内空调温度设置不宜低于 26 ℃; 在配电间增设除湿机, 将环境相对湿度降低至 75% 及以下。经仿真结果验证, 温湿度控制策略具有良好的防凝露效果。

关键词 地铁; 配电柜; 多物理场; 温湿度; 凝露

中图分类号 U224.3; U231.5

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2025.04.014

Temperature and Humidity Control Strategy of Certain Subway Power Distribution Cabinet Based on COMSOL Multiphysics Software DENG Lei¹, CUI Guanglei²

(1. Wuhan Metro Operation Co., Ltd., 430030, Wuhan, China; 2. Key Laboratory of Liaoning Province on Deep Engineering and Intelligent Technology, Northeastern University, 110819, Shenyang, China)

Abstract [Objective] PDC (power distribution cabinet) operating in the high temperature and high humidity environment of the Yangtze River Basin are prone to internal condensation under the influence of the natural environment, resulting

in equipment moisture and failure. To avoid PDC failure caused by condensation, it is necessary to analyze the formation mechanism of condensation and study the temperature and humidity control strategy of PDC. [Method] Based on the distribution cabinet failure caused by condensation, the mechanism and main influencing factors of condensation phenomenon are analyzed. Taking PDC in the subway power distribution room of a city in Central China as an example, COMSOL Multiphysics simulation software is used to build a full-scale multi-physics field coupling simulation model of PDC. Based on the historical data of environmental measurement and control, a simulation is carried out to analyze the impact of PDC internal temperature and humidity changes on the condensation phenomenon inside. Based on the data from 2022, the condensation probability of each month under natural conditions is statistically analyzed, and the temperature and humidity control strategy for PDC is proposed in combination with the simulation calculation results, and the control effect is analyzed through simulation calculation. [Result & Conclusion] Condensation is closely related to relative humidity and dew point temperature. The probability of condensation is highest in June and July, and it is most likely to occur from midnight to early morning after nightfall. Increasing the air conditioning setting temperature in the power distribution room and lowering the relative humidity of the environment can significantly reduce the probability of condensation in PDC. The specific control strategy is: when the air conditioning is cooling in summer, the air conditioning temperature in the power distribution room should not be set lower than 26 ℃; adding a dehumidifier in the power distribution room could reduce the relative humidity of the environment to 75% or below. The simulation results verify that the temperature and humidity control strategy has a good anti-condensation effect.

Key words subway; power distribution cabinet; multi-physics field; temperature and humidity; condensation

* 国家自然科学基金青年基金项目(12002081)

0 引言

电力系统中的凝露是指当空气中水分含量达到一定程度时,空气中的水蒸气在温度较低的各类电气设备上凝结的现象^[1]。

若电气设备运行环境的湿度过高,昼夜温差大,连接桥架密封不严有水汽串入,或墙体渗漏水等,电气设备内部均会出现凝露现象^[2]。配电柜内出现的凝露会降低柜内电气元件的机械和电气性能,导致绝缘体表面产生沿面放电,进而引发相间、相对地放电事故^[3-5]。此类事故在供配电企业中不胜枚举,已经成为电气设备安全运行的一大障碍。

在我国长江中下游地区,每年6月中旬到7月上旬前后通常为梅雨季,空气湿度大、气温高。此时,地铁地下车站的空气湿度非常大,地面及墙面的水汽常常像淋水一般凝结。在这种环境条件下,车站设备房内凝露现象较为突出。

针对长江中下游地区城市地铁车站配电柜凝露现象,本文对400 V配电柜建立有限元模型,分析柜内凝露条件,进而提出降低凝露产生的方法,以期提高配电柜安全稳定性。

1 凝露现象及分析

1.1 凝露现象及原因分析

2022年6月某天,某地铁临湖地下车站发生配电柜母线排相间短路故障,造成环控系统一路母线失电。经对设备现场进行检查,未发现周围墙体、桥架有渗漏水情况,故排除渗漏水引发此次故障。检查故障配电柜,发现进线母线排上有水渍痕迹,柜体侧壁和线缆上仍有少许肉眼可见的水珠,母线排与绝缘板之间也有水渍。

对现场环境温湿度进行测量,测得当时现场环境温度为26.9℃、RH(相对湿度)为93.8%(根据露点温度、环境温度与相对湿度的关系,当环境相对湿度达到90%、环境温度27℃时,露点温度为25.2℃)。由此判断,配电柜内水渍为凝露。

1.2 故障原因分析

结合故障配电柜内出现的凝露可判断:湿空气遇到温度较低的配电柜内部母线排、端子等金属元器件时,在冷热交换界面析出液态水,产生凝露现象;柜内裸露母线排上出现的冷凝水混合肉眼不可见的灰尘,在相与相铜排之间产生导电通道,最终导致母线排发生短路故障。

该次事件发生后,组织对配电柜凝露情况排查,发现部分站点母线排和柜体存在凝露情况,甚至该站该配电柜后续母线排上再次出现冷凝水,进一步证实了凝露为导致该次故障的直接原因。

1.3 凝露产生机理

当空气中水分浓度达到一定程度时,空气中的水蒸气会在温度较低的各类电气设备上凝结,这一现象称为凝露^[1]。

对于配电柜来说,当柜内环境空气湿度较大,而柜体或柜内元器件(如裸露铜排、断路器触头等)表面温度低于露点温度,使得局部空气水蒸气浓度达到饱和时,湿空气中的水蒸气便会在固体表面析出、凝结成水滴。

1.4 凝露的影响因素分析

由凝露的产生机理可知,凝露现象同相对湿度及露点温度密切相关。

1.4.1 相对湿度的影响

地铁车站的配电柜一般为非全封闭形式,柜后有散热孔,采用上进上出的配电方式,柜内的相对湿度与配电间环境相对湿度基本一致,含湿量变化主要来自外界环境空气流动。长江中下游地区,地铁车站每年5—9月通常采用小新风模式,即外界新风与空调大系统制冷混合后送入配电间。因此,配电间内湿度基本与外界环境保持一致,配电柜内温度变化主要来自柜内外环境空气对流和柜内导线热效应。其中,母线铜排上流过大电流,产生热效应,等效于存在热源。这些热量通过对流和热传导的方式向周边空气传导,使得柜内温度分布存在时间和空间的差异,因此凝露产生位置情况复杂。

1.4.2 露点温度的影响

地铁车站的配电间一般设置有多联机,叠加车站的大系统制冷,因此配电间环境温度一般较低。在同等湿度条件下,配电间环境温度相比于室外环境温度,更加接近于此湿度下的露点温度。而配电柜柜体多为金属材质,热阻较小,故柜体温度会低于配电间空气温度。此时,相比于配电间环境温度,柜体温度会进一步接近配电间环境的露点温度。故当柜内较高温度的高湿空气接触到温度较低的金属柜体时,就会在柜体上产生凝露。

2 仿真模型及边界条件

针对长江中下游地区地下站配电柜凝露现象的产生机理及影响因素,本文以某地铁地下车站的

环控柜进线柜为例建立配电柜仿真模型,采用COMSOL Multiphysics多物理场有限元仿真软件,利用软件灵活快速的模块化建模功能建立仿真模型,采用传热、传质等模块对配电柜内外环境所涉及的凝露物理过程进行仿真,模拟配电柜内部的温度、湿度分布情况,进而分析配电柜内部的温度、湿度分布特点,为配电柜温湿度控制策略提供依据。

2.1 几何模型

本文建立的配电柜全尺寸几何模型如图1所示。为在不影响计算结果准确性的前提下减少计算时间和降低计算难度,考虑到该配电柜内二次线缆等发热量较小,且本文主要研究柜内整体空间区域的温湿度分布情况,故所建几何模型忽略了二次线缆等细小部件,简化了大量尖角及影响不大的部件,仅保留进线母线排及柜体。几何模型尺寸为0.8 m(x向)×0.8 m(z向)×2.1 m(y向)。

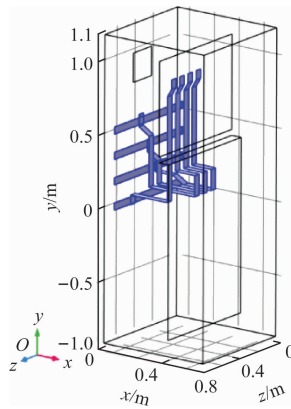


图1 配电柜几何模型

Fig.1 Geometric model of PDC

2.2 物理场耦合仿真

将几何模型导入COSMSOL Multiphysics软件,进行电-磁-热-流的物理场耦合仿真,流程如图2所示。

经电磁分析计算可得柜内母线排的欧姆损耗密度大小及分布。在热流耦合分析中,电磁分析得到的欧姆损耗作为热源,并通过瞬态分析得到随外界环境变化的柜内温度场和气流场分布。

2.2.1 电磁场计算

当配电柜通有三相交流电流时,在铜母线排上会产生欧姆损耗。电磁场计算控制方程及欧姆损耗计算式为^[6]:

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}_s - \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (1)$$

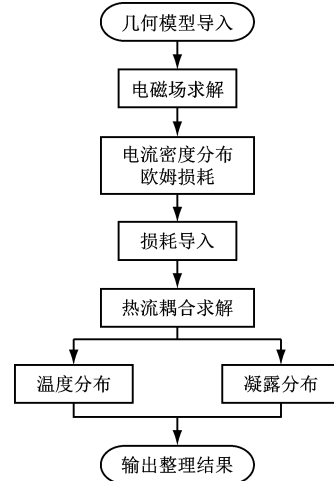


图2 物理场耦合仿真流程

Fig.2 Flow chart of physics coupled simulation

$$P = \int_V \frac{\mathbf{J} \cdot \mathbf{J}^*}{2\gamma} dV \quad (2)$$

式中:

∇ ——那勃勒算子;

μ, γ ——电导率、磁导率;

\mathbf{A} ——磁矢势矩阵;

\mathbf{J}_s ——源电流密度矩阵;

\mathbf{J} ——电流密度矩阵;

\mathbf{J}^* ——电流密度的复共轭矩阵;

V ——电压;

t ——时间;

P ——欧姆损耗。

2.2.2 流场模型

考虑到配电柜内气流场存在不规则变化,仿真中流体模块采用低雷诺数湍流模型—— $k-\varepsilon$ 模型(k 为湍流动能, ε 为湍流动能耗散率)。此外,配电柜内空气流速相对较低,且压力变化相对较小,可视为不可压缩牛顿流体。考虑重力场影响,配电柜内空气的瞬态数学模型(包括质量守恒方程、动量守恒方程)和能量守恒方程^[7]为:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot (-p\mathbf{I} + \mathbf{K}) + \mathbf{F} + \rho \mathbf{g} \\ \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\mathbf{K} = (\nu + \nu_T) (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) - \frac{2}{3} (\nu + \nu_T) (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} - \frac{2}{3} \rho k \mathbf{I} \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) k =$$

$$\nabla \cdot \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \varepsilon = \nabla \cdot \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} f_\varepsilon(\rho, \nu, k, \varepsilon, l_w) \quad (6)$$

$$\begin{cases} \nabla G \cdot \nabla G + \sigma_w G(\nabla \cdot \nabla G) = (1 + 2\sigma_w) G^4 \\ l_w = \frac{1}{G} - \frac{l_{\text{ref}}}{2} \end{cases} \quad (7)$$

$$\nu_T = \rho C_\nu \frac{k^2}{\varepsilon} f_\nu(\rho, \nu, k, \varepsilon, l_w) \quad (8)$$

$$P_k = \nu_T \left[\mathbf{U} : \left(\mathbf{U} + \mathbf{U}^T - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \mathbf{u})^2 \right) \right] - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (9)$$

式中:

\mathbf{u} ——流体流速,为三维空间矢量;
 p ——流体压力;
 ρ ——空气密度;
 \mathbf{g} ——重力加速度矢量;
 \mathbf{I} ——单位矩阵;
 \mathbf{K} ——应力项展开式;
 \mathbf{F} ——体积力矢量;
 G ——壁距离导数;
 l_{ref} ——湍流参考长度;
 l_w ——湍流长度;
 ν ——流体动力黏度;
 ν_T ——湍流黏度;
 f_ε, f_ν ——耗散率函数、动力黏度函数;
 P_k ——生成项展开式;
 $\sigma_k, \sigma_\varepsilon, \sigma_w, C_\nu, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}$ ——瞬态数学模型的经验常数;

\mathbf{U} ——三维空间矢量变化向量, $\mathbf{U} = [\nabla u_x \quad \nabla u_y \quad \nabla u_z]$, 其中 u_x, u_y, u_z 为 \mathbf{u} 的 x, y, z 向分量。

2.2.3 传热模型

配电柜放置于配电间内,配电柜与配电间内空气存在热交换,柜内电气设备在实际运行过程中的损耗也会以散热的形式同配电柜内空气及配电柜壳体发生热交换。整个模型包含固体和流体,因此可采用“固体+传热”模块来计算传热场,其数学模型为^[8]:

$$\begin{cases} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q \\ \mathbf{q} = -\lambda \nabla T \end{cases} \quad (10)$$

式中:

C_p ——定压热容;
 q ——热流密度;
 λ ——导热系数;
 Q ——热源项;
 T ——温度。

2.2.4 湿度场模型

为研究配电柜内对流、扩散及柜体表面发生凝露的过程,选择“空气中的水分运输”模型来对模拟水汽传输过程,数学模型为^[9]:

$$M_v \frac{\partial c_v}{\partial t} + M_v \mathbf{u} \cdot \nabla c_v + \nabla \cdot \mathbf{g}_w = Z \quad (11)$$

$$\mathbf{g}_w = -M_v D \nabla c_v \quad (12)$$

$$c_v = \phi_w c_{\text{sat}} \quad (13)$$

式中:

M_v ——水蒸气摩尔质量;
 ϕ_w ——相对湿度;
 c_v, c_{sat} ——水蒸气的质量浓度、饱和质量浓度;
 D ——水蒸气在空气中的扩散系数;
 \mathbf{g}_w ——蒸汽扩散通量;
 Z ——湿气源项。

2.3 边界条件

环控电控柜典型额定电流为 600 A(额定频率 50 Hz 下),选取该电流作为电磁场计算的输入条件,计算母线排上产生的电磁损耗,作为配电柜运行时的主要热源。选择武汉市天河机场监测点(北纬 30.784°N,东经 114.208°E,海拔高度为 34 m)的环境气温、气压和相对湿度的监测数据作为外部环境条件。配电间设置有空调,夏季室温保持为 26℃。

3 自然状态下配电柜凝露情况分析

根据气象局长江中下游地区的环境测控数据,在每年 6 月中旬到 7 月上旬前后的梅雨季节,空气湿度非常大。根据武汉市天河机场监测点的气象数据,2022 年 1、3、6、7、9 月等典型月份中旬(当月 15 日)温湿度数据如图 3 所示。由图 3 可知:空气湿度最高值出现在 6 月 15 日上午 07:00,可以达到 89.7%,空气温度最高在 7 月 15 日下午 3 h,可以达到 32℃。

3.1 典型日自然通风时配电柜凝露分析

以 6 月 15 日自然通风(无空调)状态下配电间内配电柜为例进行仿真计算,可得 02:00、10:00 的

柜体温度及风口侧湿度分布,分别如图4及图5所示。

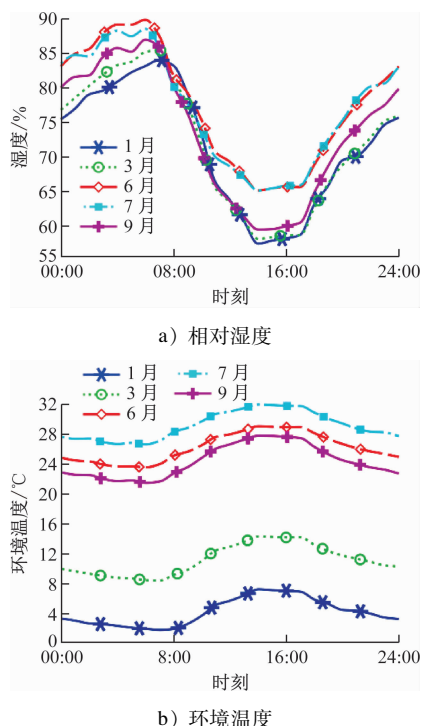


图3 武汉市天河机场2022年典型月份中旬的空气温湿度数据

Fig.3 Air temperature and humidity data in mid part of the typical months in Tianhe Airport, Wuhan City in 2022

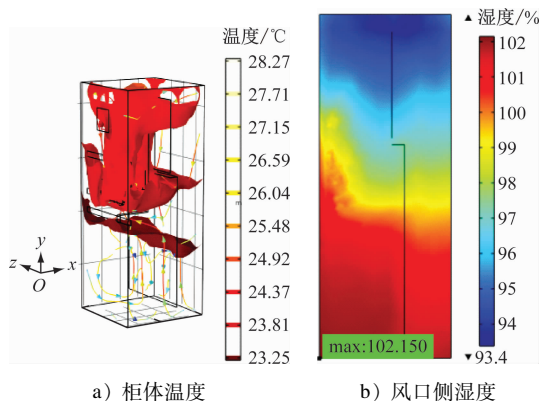


图4 02:00的柜体温度及风口侧湿度分布

Fig.4 Cabinet temperature and humidity on the air outlet side at 02:00

由图4可见,凌晨02:00柜体最高温度为28.3℃;母线排附近温度高于其他区域,说明母线排附近出现了明显的空气对流;柜内整体湿度温度差异较为明显,最大湿度出现在柜体下角落处,柜体风口一侧截面最大湿度达到102%,表明此时已经出现凝露现象。

由图5可知,上午10:00柜体最高温度为29.7℃;柜内整体湿度降低,最大湿度出现在柜体下角落处,柜体风口一侧截面最大湿度为92%,凝露消失。

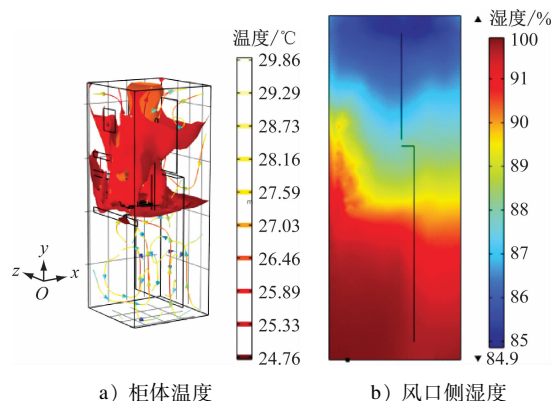


图5 10:00的柜体温度及风口侧湿度分布

Fig.5 Cabinet temperature and humidity on the air outlet side at 10:00

分析仿真计算得到的6月15日全天不同时刻柜内湿度计算结果,绘制00:00—12:00柜内最大湿度变化情况,如图6所示。由图6结果可见,在00:00—08:00时间段内,配电柜内最大湿度均达到100%,有凝露风险;08:00之后,随着环境温度的逐渐升高,湿度降低、凝露消失。

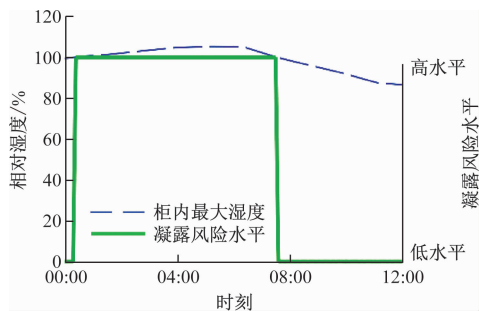


图6 00:00—12:00的柜内最大湿度

Fig.6 Maximum humidity inside the cabinet from 00:00 to 12:00

3.2 全年自然通风时配电柜凝露情况分析

以2022年气象数据条件为基础,对配电柜在全年自然通风情况下其凝露情况进行分析,选取2022年每月的10个自然日作为统计日,计算全日(00:00—24:00)柜体凝露情况,若发生凝露则计为1次。

分析仿真计算得到的全年120个统计日的凝露次数,得到凝露概率如表1所示,其中:凝露概率 =

凝露次数/当月统计日数。

由表 1 可知: 6 月和 7 月的凝露概率为 50% 以上, 远高于其他月份的凝露概率; 5 月和 8 月有一定的概率发生柜体凝露现象; 其他月份基本上不会发生柜体凝露现象。结合既往的配电柜运行经验及故障实际情况可知, 上述计算结果与现场实际情况吻合, 这也验证了模型和边界条件设置的准确性。此外, 根据全日的温湿度仿真结果, 入夜后凌晨至清晨是最易发生凝露的时段。

表 1 2022 年自然状态下的凝露情况统计
Tab.1 Condensation statistics under natural conditions in 2022

月份	凝露次数/次	凝露概率/%
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	2	17
6	7	58
7	6	50
8	3	25
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0

4 温湿度控制策略

4.1 空调设置温度的影响及控制策略

夏季车站设备房空调机组进行制冷时, 空调设置温度一般为 26 ℃。有些配电间位于冷水机房附近, 制冷空气最先经过配电间, 导致配电间实际温度可达到 23 ℃左右, 更接近于空气露点温度, 加剧了配电间内配电柜凝露情况。对此, 本研究选取 2022 年 7 月 15 日环境数据为基础进行仿真计算, 分析空调温度对凝露的影响, 并探讨空调设置的合适温度。

通过仿真计算, 不同空调设置温度下的凝露情况统计如表 2 所示。

由表 2 可知: 当空调设置温度 ≥ 26 ℃时, 配电柜基本不发生凝露现象; 当空调设置温度 ≤ 25 ℃时, 配电柜会发生凝露现象, 且随着空调设置温度的降低, 凝露持续时间越来越长, 即温度越低, 越易

发生凝露。因此, 在夏季空调制冷季节, 应严格监测配电间整体环境温度, 配电间内空调设置温度不宜低于 26 ℃。一旦发现配电间内环境温度低于 25 ℃, 应立即调整空调设置温度和空调冷量, 确保环境温度不低于 26 ℃。

表 2 不同空调设置温度下的凝露情况统计

Tab.2 Condensation statistics at different air conditioning setting temperatures

空调设置温度/℃	是否发生凝露	凝露时段
28	否	
27	否	
26	否	
25	是	01:42 ~ 06:30
24	是	00:06 ~ 12:00
23	是	00:00 ~ 14:00

注: 凝露时段是指在一天 00:00—24:00 时间段内, 凝露出现的时间段。

在空调设置温度为 25 ℃的情况下, 01:42 时开始发生凝露现象, 04:00 时柜内相对湿度约为 101.4%, 达到湿度最大值, 此时配电柜湿度分布如图 7 所示。

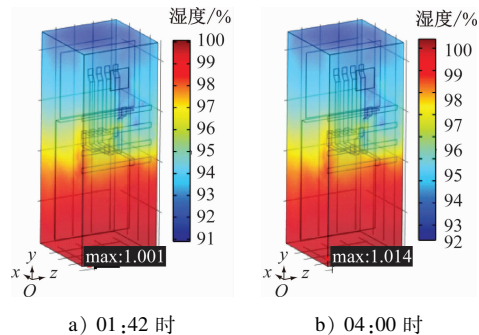


图 7 发生凝露时的配电柜湿度分布

Fig. 7 Humidity distribution in PDC when condensation occurs

由图 7 可看出, 温度控制策略模型中, 最先发生凝露的部位在柜底。这也符合热空气上浮、冷空气下沉的规律。可见, 布置在柜底的元器件更易受到凝露的影响。

4.2 湿度影响及控制策略

由表 1, 自然状态下 2022 年 5—8 月配电柜均发生凝露现象。结合空调设置温度的影响进行分析, 该凝露现象产生原因主要如下:

1) 配电房的空调虽具有独立除湿功能, 但除湿量小、除湿慢。

2) 在梅雨季时,环境温度还处于较低水平,大部分时间的环境温度都在 25℃ 以下。此时,空调机组在除湿模式下吹出的冷风,会使环境温度进一步降低,很可能低于露点温度。

3) 由于空调机是固定安装的,只能在局部小面积范围除湿,耗电量且除湿效果不明显。

对此,建议在配电间额外配置除湿机,采用压缩机式连续除湿控制配电间内湿度。本文以增设德业(Deye)品牌除湿机为例,计算在人为降低环境相对湿度时配电柜凝露情况,如表 3 所示。

表 3 降低环境相对湿度时的配电柜凝露情况
Tab.3 Condensation in PDC under reduced ambient humidity conditions

月份	不同环境相对湿度的凝露概率/%		
	自然状态下	湿度为 80%	湿度为 75%
5	17	0	0
6	58	8	0
7	50	8	0
8	25	0	0

由表 3 可知:相比于自然状态,降低环境相对湿度时,凝露概率会显著降低;当环境相对湿度降低至 80% 时,凝露概率最高仅为 8%;当环境相对湿度降低至 75% 时,配电柜不会发生凝露。这说明降低环境相对湿度对改善凝露状况成效显著。

5 结语

本文以中部某城市地铁地下车站配电间内配电柜为例,建立配电柜全尺寸多物理场耦合仿真模型,分析配电柜内流-热-湿多物理耦合下温度、湿度变化对柜内凝露现象的影响,结论如下:

1) 在自然条件下,6 月和 7 月易发生凝露,且凝露时段多在凌晨。

2) 在夏季空调制冷季节,要注意监测配电间整体环境温度,配电间内空调温度设置不宜低于 26℃,以降低配电柜内凝露现象发生的概率。

3) 降低环境相对湿度至 75% 及以下,可显著降低配电柜发生凝露的概率。对此,可考虑湿热天气在配电间运行除湿机,以降低配电柜凝露概率,避免凝露引发配电柜故障。

参考文献

[1] 王喆,李品德,高伟,等. 35 kV 高压配电室全智能防凝露系

统的开发及应用[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(11): 13.

WANG Zhe, LI Pinde, GAO Wei, et al. Development and application of a fully intelligent condensation prevention system for 35 kV high-voltage power distribution room[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(11): 13.

[2] 袁博. 开关柜内凝露现象研究的发展综述[J]. 价值工程, 2018, 37(29): 271.

YUAN Bo. Review on the development of condensation phenomenon in switch cabinet[J]. Value Engineering, 2018, 37(29): 271.

[3] 刘理. 地铁变电所内成套开关设备防潮除湿分析及措施[J]. 电子测试, 2017(19): 105.

LIU Li. Analysis and measures for moisture proof and dehumidification of switchgear in metro substation[J]. Electronic Test, 2017(19): 105.

[4] 顾泽波,赵雪茹,郭力. 开关柜凝露问题研究的现状与进展[J]. 机电工程技术, 2022, 51(4): 25.

GU Zebo, ZHAO Xueru, GUO Li. Current situation and progress of research on condensation in switchgear[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2022, 51(4): 25.

[5] 王岭积. 配电柜防凝露技术及应用[J]. 工程技术研究, 2022, 7(3): 70.

WANG Lingji. Anti-condensation technology of distribution cabinet and its application[J]. Engineering and Technological Research, 2022, 7(3): 70.

[6] 冯慈璋,马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 198-206.

FENG Cizhang, MA Xikui. An introduction to engineering electromagnetic fields[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 198-206.

[7] 张兆顺,崔桂香. 流体力学[M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2015.

ZHANG Zhaoshun, CUI Guixiang. Hydromechanics[M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2015.

[8] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 268-271.

YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006: 268-271.

[9] 柯斯乐. 扩散流体系统中的传质[M]. 王宇新,姜忠义,译. 北京: 化学工业出版社, 2002.

CUSSLER E L. Diffusion: mass transfer in fluid systems[M]. WANG Yuxin, JIANG Zhongyi, trans. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.

· 收稿日期:2023-02-06 修回日期:2023-03-10 出版日期:2025-04-10

Received:2023-02-06 Revised:2023-03-10 Published:2025-04-10

· 通信作者: 邓雷,高级工程师, denglei@wuhanrt.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license