

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.03.009

户外单元式环网柜的通风效果仿真与优化措施

汪清¹, 朱正国¹, 贾志东², 申子魁², 徐笑然²

(1. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518001; 2. 清华大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

摘要: 城市配电系统广泛应用的户外环网柜在湿热的南方地区易产生凝露,因凝露引发的环网柜故障时常发生。文中提出通过加强自然通风散热阻碍凝露形成,首先对现有两种共箱方式的环网柜三维建模,然后利用Ansys CFX软件对不同通风设计的环网柜内部流域进行仿真,考虑百叶窗式通风口的横向位置、纵向间距以及顶部空间高度对内部通风散热效果的影响。最后讨论了在凝露发生后,通过在顶盖下表面涂覆亲水性涂料并设计合适的倾角避免凝露坠落至电气设备,最终得出最优设计。

关键词: 环网柜; 自然通风散热; 有限元仿真; 亲水性涂层

Simulation and Optimization of Outdoor RMU Ventilation Effect

WANG Qing¹, ZHU Zhengguo¹, JIA Zhidong², SHEN Zikui², XU Xiaoran²

(1. Shenzhen Power Supply Co., Ltd., Guangdong Shenzhen 518001, China;

2. Shenzhen Graduate School of Tsinghua University, Guangdong Shenzhen 518055, China)

Abstract: The outdoor RMU, which is widely used in urban distribution system, always encounters condensation problem in hot and humid southern region. In this paper, it is proposed to prevent condensation formation by strengthening natural ventilation and heat dissipation. First, make 3D models for RMU with two different structures. Then, use Ansys CFX to simulate the internal basin with different design in lateral and vertical spacing of vents and height of top space. A discussion is also made on how to reduce potential hazards by choosing coating and roof inclination when condensation has occurred inevitably in extreme weather. An optimized design is put forward finally.

Key words: RMU; natural ventilation and heat dissipation; finite element simulation; hydrophilic coating

0 引言

中国南方气候温暖湿润雨量充沛,空气湿度大。特别是沿海城市比如深圳,每年3月至4月,南海吹来的温暖而潮湿的空气,与北方吹来的寒冷气流相遇形成静止锋,使华南地区非常潮湿,阴晴不定。深圳地区部分环网柜周边环境潮湿,箱体通风设计不够合理,通风不畅致使柜内温度过高且湿气聚集。柜内水蒸气在降温过程中凝结成露,凝露长期附着会引起操作机构的腐蚀、绝缘下降,恶劣的可能会造成爬电和闪络,严重影响供电可靠性^[1-2]。

目前国内采取的防凝露措施主要是辅助设计,包括安装抽湿机、加热器及制冷系统等装置破坏凝

露形成条件。此类方法一定程度上改善柜内环境,但安装改造工程量较大,本身存在可靠性问题^[3-9]。

内部加热器一般是人为控制投切,操作性差。可能出现投入后不关或未能及时启动加热器两种极端情况。前者造成电能浪费,后者柜内相对湿度得不到及时控制。通过凝露传感器控制加热器的启动也存在缺陷。首先,凝露传感器属于被动型器件,即一定要等到物体表面降到露点温度,凝露发生时才会驱动加热器,对已经在表面聚积的凝露效果甚微。其次,凝露的产生过程具有统计意义上的规律,最先出现凝露的部位在一定区域内具有随机性。如果凝露传感器安装位置不当,那么即便内部关键表面发生结露,凝露控制器仍有一定概率监测

不到导致加热器不能及时投入^[10-13]。

美国较多采用的环网柜防凝露措施是提高设备的防护等级,隔绝外部潮气进入或采用在操作机构表面涂覆抗盐雾腐蚀的涂层延长设备寿命。欧洲则采用独立的多路供电,以缩小故障范围方便处理。户外环网柜需要定期操作检修,达不到电子设备封装的防护等级,且底部是潮湿的电缆沟,湿气会从进线口渗入环网柜,隔绝外部潮气实施困难^[14]。

文中提出通过加强自然通风散热,在符合经济运行的前提下,阻碍凝露形成。利用有限元分析软件 Ansys CFX 对环网柜内部流域进行仿真,寻找最优通风口设计。最后讨论了在极端天气下,减小凝露危害的措施。

1 准静态分析

外界无风时,环网柜内部作为一个相对封闭的环境,与外界空气的交换能力和速度有限,对内部空气可做准静态分析。由于存在外部热源,系统无法达到热平衡状态,但可以近似达到力学平衡。母线部位高温区A和外壳附近低温区B的水蒸气状态方程为:

$$P_{\text{vaporA}} V_A = n_{\text{vaporA}} R T_A \quad (1)$$

$$P_{\text{vaporB}} V_B = n_{\text{vaporB}} R T_B \quad (2)$$

力学平衡状态下水蒸气的分压强相同,可得到

$$\rho_{\text{vaporA}} T_A = \rho_{\text{vaporB}} T_B \quad (3)$$

即壳体内部水蒸气的密度与绝对温度成反比,换言之,绝对湿度与绝对温度成反比。稳态时内部的温度场,也反映了绝对湿度在内部的分布。

深圳地区在回南天的平均气温为20℃,现场调研发现母线部位的温升约为5~10℃。根据空气常数表,推导出不同温度区域的相对湿度分布。

$$RH = \frac{\rho_{\text{vapor}}}{\rho d_b} \quad (4)$$

式(4)中:RH(0~100%)为相对湿度; ρ 为干空气密度,kg/m³;d_b(干空气)为饱和空气含湿量,g/kg。

假设母线部位温度为26℃,相对湿度分别为50%,60%,70%,80%及90%,箱体内部不同温度区的相对湿度见图1。

横线为发生凝露的临界线,曲线与横线的交点即为发生凝露的临界点。例如,26℃高温区RH=90%,24℃低温区的水蒸气临近饱和;26℃高温区RH=60%,18℃低温区的水蒸气临近饱和。后者与夏季空调房间的窗户外侧出现冷凝水的情况类似,说明假设合理,推导结果与实际接近。

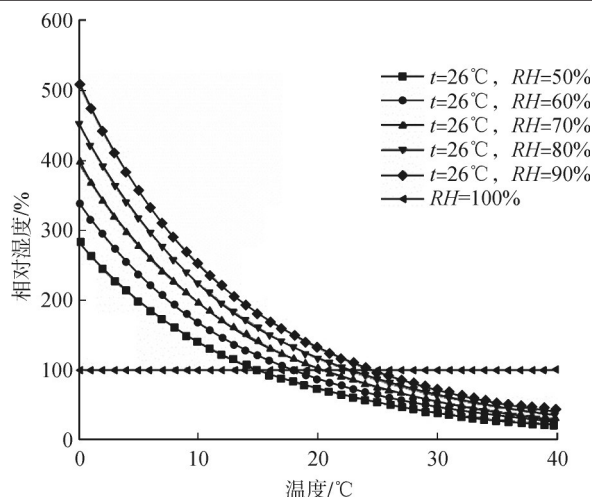


图1 相对湿度与温度的关系

Fig. 1 Relative humidity at different temperature

假设初始时刻环网柜没有运行,内部将充斥和环境相同状态的空气。某一时刻环网柜上电运行,内部空气将运动至新的平衡状态。

环网柜运行后箱体内部低温区相对湿度将上升,高温区相对湿度较原来下降,二者分居环境值两侧。温差越大,这种分化就越明显,见图2。

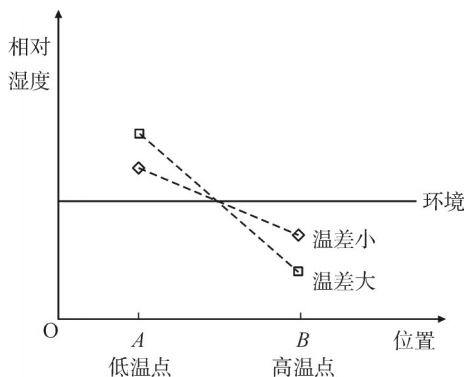


图2 内部温差引起相对湿度差

Fig. 2 Relative humidity difference caused by temperature difference

系统内最先发生凝露的部位在A点附近,调研显示A点在远离母线的靠下部位,底部高湿的另一原因是来自电缆沟的潮气,所以通风口应开在低温区以缓和局部高湿。

温差越小,A点冷凝的条件就越不容易满足,所以应增强高温区散热。无风时主要靠自然对流;有风时靠运动的气流散热,效果与通风口分布有关。

2 仿真分析与改进设计

参考南方电网典型设计的尺寸,对两种共箱方式的环网柜建模。其I型为KKKK(1 720 mm×1 000 mm×1 800 mm);其II型为PT+KKKK+DTU(2 950 mm×1 160 mm×2 100 mm),箱体与环网柜的间距为150 mm,

见图3。百叶窗通风口尺寸为80 mm×150 mm×10 mm，为减小仿真时的计算量，化曲为直，以三角形模拟通风口的凸出部分，见图4。

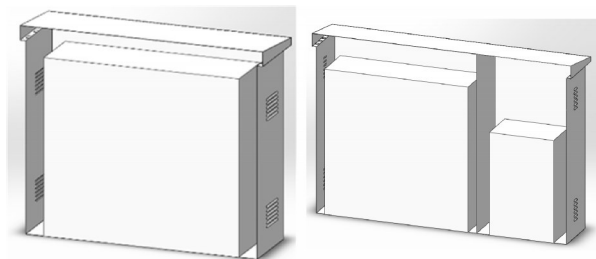


图 3 两种共箱方式环网柜的三维模型
Fig. 3 Two kinds of 3D models

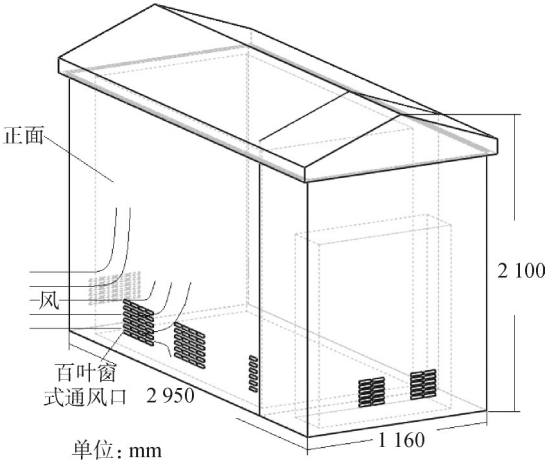


图 4 II 型环网柜整体示意图
Fig. 4 Overall diagram of ring network cabinet II

根据气象局数据，设定环境温度为20℃，外界风速为2.5 m/s。中压环网柜母线发热功率约250 W，平均分布于母线穿过位置，见图5。钢板的厚度为2 mm，导热系数为45 W/m·K。整个环网柜装置放置于预设流域内，流体选择理想空气与理想水蒸气混合，混合体积比为0.8:0.2^[15-17]。

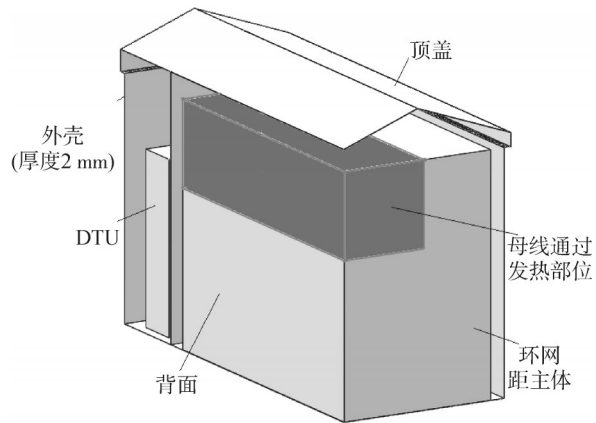


图 5 II 型环网柜剖面示意图
Fig. 5 Profile diagram of ring network cabinet II

2.1 I 型仿真结果分析

2.1.1 无风时仿真结果

首先对无风情况下环网柜内部的温湿度分布以及自然对流情况进行仿真，结果见图6-8。

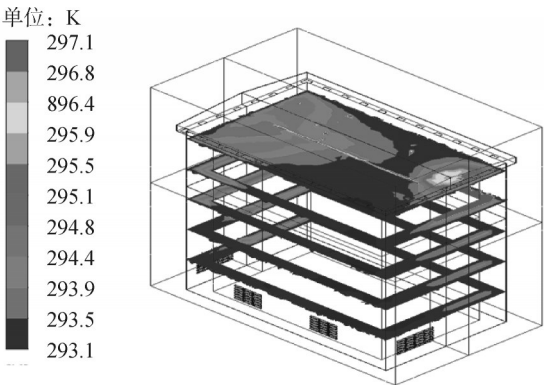


图 6 I 型箱体内部温度分布
Fig. 6 Temperature distribution in box I

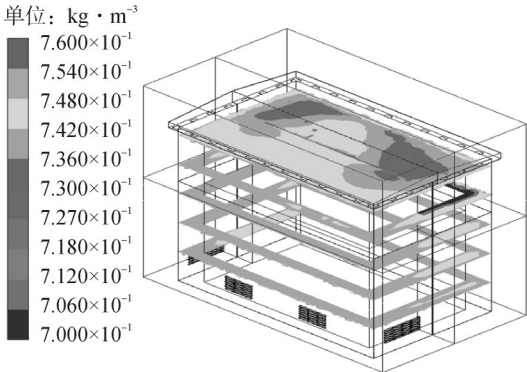


图 7 箱体内部湿度分布
Fig. 7 Humidity distribution in box I

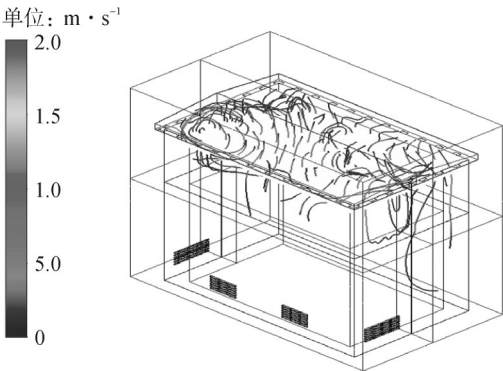


图 8 箱体顶部自然对流
Fig. 8 Natural convection at top of box I

影响自然对流的因素主要是顶部空间的高度H，表1给出了母线部位温升随H的变化。

表 1 无风时母线部位均温与顶部高度的关系

Table 1 Relationship between the average temperature of bus part and height with no wind					
参数	数值				
H/mm	150	250	350	450	
母线部位均温/℃	57.0	55.8	52.2	53.3	

随着顶部高度的增加,母线部位温度呈现先降低后升高的趋势,这是由于自由对流高度的影响。热空气在被抬升过程中,速度越来越快,温度越来越低。通过金属壳体与外界的热交换功率 P 与下表面热空气流动速度 v 和内外温差 δt 有关,可以证明 $P \propto v \cdot \delta t$ 。在高度增加过程中, v 先增大后减小, δt 逐渐减小,所以热交换功率变化趋势不单调,存在极大值。实际设计时,还应考虑对流凝结高度,防止上升的热空气在顶盖冷凝。

2.1.2 有风时仿真结果

有风时,影响散热效果的因素还包括通风口的位置分布,利用控制变量法,改变通风口的横向位置坐标 X 和纵向间距 Y 开展仿真,固定 h 为150 mm,见图9。

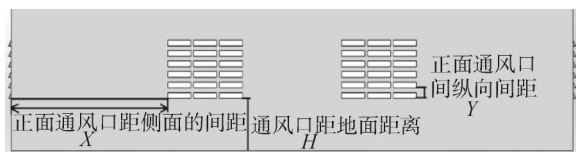


图9 环网柜正面通风口示意

Fig. 9 Schematic front vents

保持 $H=350$ mm不变,分别对 $X-Y=200-30$ 、 $200-40$ 、 $200-50$ 、 $200-60$ 、 $350-30$ 、 $350-40$ 、 $350-50$ 、 $350-60$ 、 $500-30$ 、 $500-40$ 、 $500-50$ 、 $500-60$ 、 $650-30$ 、 $650-40$ 、 $650-50$ 、 $650-60$ mm 16种情况进行仿真,读取每组设计下母线部位平均温升,见图10。

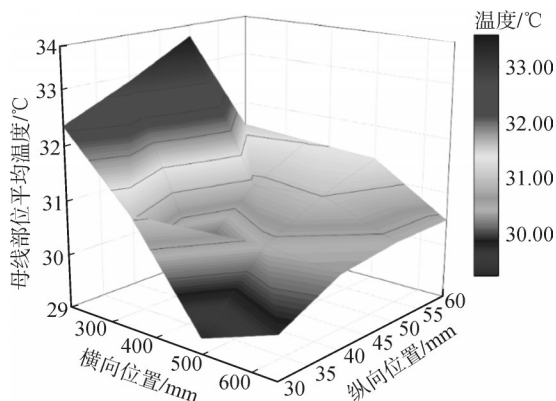


图10 I型环网柜不同通风设计下母线部位均温

Fig. 10 Average temperature of bus part in box I under different vents designs

可以看出,当 X 较小时,随着 X 的增大,母线部位温度显著下降;当 $X=500$ mm时,随着 Y 的减小,母线部位温度显著下降。母线部位温度在不同阶段对 X 、 Y 的敏感程度不同。16组设计在通风条件下母线温度最低的为 $X-Y=500-30$ mm。

令 $X-Y=500-30$ mm不变,改变顶部空间高度 H ,表2给出了母线部位温升随 H 的变化。

表2 有风时母线部位均温与顶部高度关系

Table 2 Relationship between the average temperature of bus part and height with wind

参数	数值			
H/mm	150	250	350	450
母线部位均温/ $^{\circ}\text{C}$	28.8	29.1	29.3	32.2

顶部空间高度增加,母线部位温度升高,这是由于坡屋顶式的顶盖对空气有导流作用,气流在上方沿顶盖运动,高度增加不利于环网柜上表面散热。

2.2 II型仿真结果分析

与I型相同,对环网柜开展16组仿真,得出不同设计下的母线部位均温,见图11。

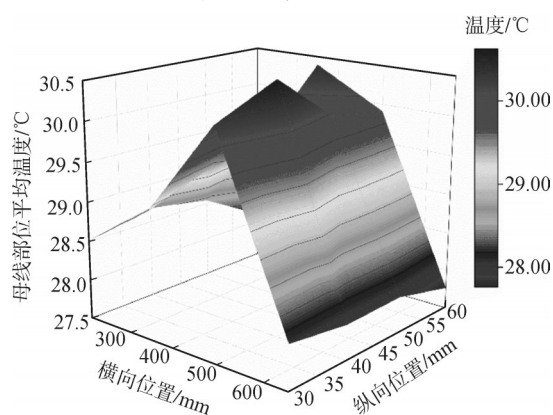


图11 II型环网柜不同通风设计下母线部位均温

Fig. 11 Average temperature of bus part in box II under different vents designs

可以看出,母线部位温度纵向间距关系不大,当正面通风口位于两侧或位于中间时,温度降低,当 $X=650$ mm时,温度达到最低值。固定 $X=650$ mm不变,当 $Y=40$ mm时,正面进风量达到最大。与I型不同的是,II型由于DTU室而无法在环网柜室右侧开设通风口,导致母线部位右侧出现局部高温。其原因如,当通风口靠近中间时,通过右侧通风口的气流会绕经左侧到达出口,导致右通道的气流减少,见图12。

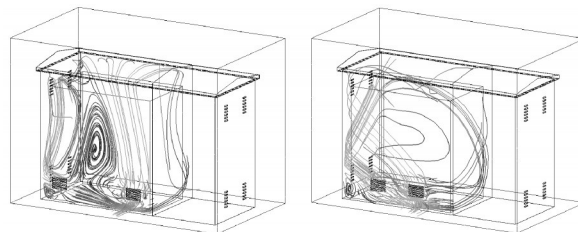


图12 不同路径的空气流量

Fig. 12 Air flow through different paths

根据圆形管道水头损失公式

$$\Delta P = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho v^2}{2} \quad (5)$$

增大流量 $Q(\propto d^2 v)$ 的方法包括增大等效直径 d

或减小等效路程 l , 对应措施包括以下两种:

1) 环网柜在箱体内部偏左放置, 使右侧间距略大于左侧间距;

2) 在正对环网柜右侧间隙额外开设通风口。

2.3 减小凝露危害的措施

在极端天气下, 环网柜内部不可避免的出现凝露, 应尽量减小凝露带来的危害。带电运行的电气设备由于发热致其温度高于周围空气, 所以水汽不会直接在其表面发生冷凝。根据案例报告, 闪络事故多为顶盖的凝露滴落所致^[18-19]。

调研发现, 环网柜顶盖处凝露以滴状附着, 部分倾角较小, 凝露无法滑落; 部分倾角较大, 凝露滑落途中相互汇集。两种情况最终导致凝露体积逐渐增大, 最终无法承受自重而坠落。故顶盖下表面应涂覆亲水性涂层, 且倾角大于临界滚动角^[20-21]。

常用的亲水性涂层包括水性环氧树脂、丙氨酸聚氨酯以及纳米二氧化硅。利用图 13 的临界滚动角测量平台装置模拟水滴在平板下方亲水涂层表面的运动状态, 发现在下表面, 水性环氧树脂呈现憎水性, 而丙氨酸聚氨酯和纳米二氧化硅仍呈现亲水性, 临界滚动角均小于 20° , 且在液体沿面滚落前不会竖直坠落^[22]。

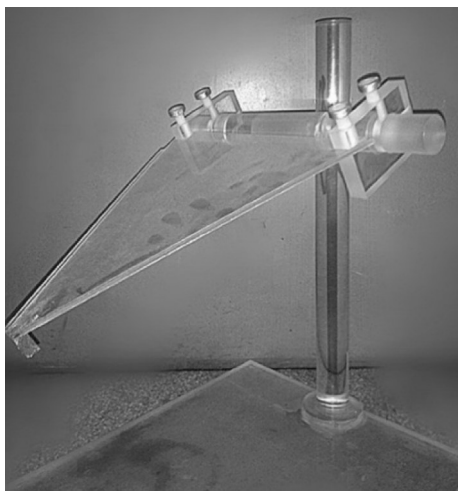


图 13 临界滚动角测量平台

Fig. 13 Device on measuring critical roll angle

3 结语

针对南方高湿天气对环网柜的耐候性要求, 文中提出通过优化自然通风散热达到阻碍凝露发生的效果。首先利用有限元仿真软件 Ansys CFX 对两种共箱方式(是否带侧箱)的环网柜内部开展流-热耦合仿真, 指导百叶窗式通风口的设计, 以达到散热最优。最后讨论了顶盖倾角以及内部亲水性涂层的选择。综合以上讨论, 设计了抗凝

露型环网柜外壳, 带侧箱的环网柜外壳设计示意图见图 14。

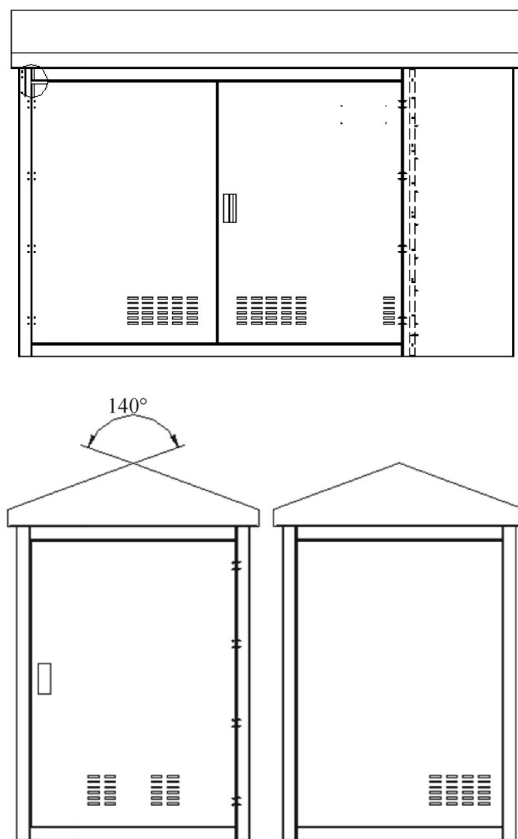


图 14 II 型环网柜外壳设计示意图

Fig. 14 Optimal design of box II

参考文献:

- [1] 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(1):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(1):87-91.
- [2] 李锐腾, 杜松怀, 苏娟, 等. 一起 10 kV 环网柜故障分析[J]. 机电信息, 2015(12):55-56.
LI Ruiteng, DU Songhuai, SU Juan, et al. Breakdown analysis of 10 kV ring network cabinet[J]. Mechanical and Electrical Information, 2015(12):55-56.
- [3] 麦琳. 环网柜防凝露方法探讨[J]. 科技风, 2013(22):23.
MAI Lin. Discussion on anti-condensation method of ring network cabinet[J]. Technology Wind, 2013 (22):23.
- [4] 吴鸿彬, 郑康铭, 林佳雁. 开关柜防凝露技术浅谈[J]. 电工文摘, 2016(4):63-65.
WU Hongbin, ZHENG Kangming, LIN Jiayan. Discussion on anti-condensation technology of switch cabinet[J]. Electrical Engineering Abstracts, 2016(4):63-65.
- [5] 赵开文. 开关柜除湿及快速消除凝露研究[J]. 电工文摘, 2016(2):26-27.

- ZHAO Kaiwen. Study on rapid elimination of condensation in switch cabinet[J]. Electrical Engineering Abstracts, 2016 (2):26-27.
- [6] 李 炜. 变电站防凝露集中控制技术的研[J]. 低碳世界, 2016 (20):55-56.
- LI Wei. Research on centralized control technology of anti-condensation in electricity substation[J]. Low Carbon World, 2016(20):55-56.
- [7] 刘建戈. 空气相对湿度及凝露对中置式开关柜的影响及对策[J]. 电工技术, 2016(2):26-28.
- LIU Jiange. Influence of air relative humidity and condensation on center-mounted switchgear and countermeasures [J]. Electric engineering, 2016(2):26-28.
- [8] 郭建武. 地下室环网柜凝露解决方案的研究[J]. 浙江电力, 2015(8):25-27.
- GUO Jianwu. Study on solution of condensation in basement ring network cabinet[J]. Zhejiang Electric Power, 2015 (8):25-27.
- [9] 姜 毅, 周成华, 郭俊峰, 等. 智能端子箱防凝露控制器的研制与试验研究[J]. 高压电器, 2010, 08:59-62.
- JIANG Yi, ZHOU Chenghua, GUO Junfeng, et al. Development and researching of intelligent controller for preventing condensation in terminal box[J]. High Voltage Apparatus, 2010(8):59-62.
- [10] 罗宣国, 夏丽建. 电气设备的防凝露技术研究[J]. 可再生能源, 2014(4):489-49.
- LUO Xuanguo, XIA Lijian. Study on anti-condensation technology of electrical equipment[J]. Renewable Energy Resources, 2014(4):489-49.
- [11] 赖义汉, 王宇松, 傅智河. 电力柜智能除湿系统研究与设计[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2016(1):87-92.
- LAI Yihan, WANG Yusong, FU Zhihe. Research and design of intelligent dehumidification system in switchgear[J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology Natural Science Edition, 2016(1):87-92.
- [12] 吴英俊, 马丽军, 郑 悠, 等. 基于在线采集技术的开关柜湿度数据研究[J]. 电子技术与软件工程, 2016, 06:230-231.
- WU Yingjun, MA Lijun, ZHENG You, et al. Study on the humidity data of switchgear based on on-line acquisition technology[J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2016(6):230-231.
- [13] 汪泽州, 沈春林, 顾卫华, 等. 浅谈环网柜除湿除尘装置的研制[J]. 通讯世界, 2016, 15:149-150.
- WANG Zezhou, SHEN Chunlin, GU Weihua, et al. Development of dehumidification and dust-cleaning device of ring network cabinet[J]. Telecom World, 2016(15):149-150.
- [14] 张 炜, 王 也. 配电网环网柜防凝露措施研究[J]. 技术与市场, 2015(11):63.
- ZHANG Wei, WANG Ye. Study on anti-condensation measures for ring network cabinet in distribution network[J]. Technology and Market, 2015(11):63.
- [15] 刘 巍. 带通风孔开关柜内部凝露数值模拟[J]. 科学家, 2016(3):53.
- LIU Wei. Numerical simulation of condensation in switchgear with ventilation [J]. Scientist, 2016(3):53.
- [16] 陈 荣, 闫 新, 严 玮, 等. 开关柜内凝露现象数值模拟研究[J]. 资源节约与环保, 2015(5):21.
- CHEN Rong, YAN Xin, YAN Wei, et al. Numerical simulation of condensation in switchgear[J]. Resources Economization & Environment, 2015(5):21.
- [17] 高 飞. Ansys CFX 14.0 超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013.
- GAO Fei. Ansys CFX 14.0 super learning handbook[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2013.
- [18] TENCER M, MOSS J S. Humidity management of outdoor electronic equipment: Methods, pitfalls, and recommendations[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2002, 25(1): 66-72.
- [19] DIAZ C, PATINO D. Design and manufacturing of a scale RMU[C]//IEEE 2nd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC). Manizales: IEEE, 2015: 1-6.
- [20] 费 千, 岳丹婷. 液滴从固体壁面脱落条件的分析[J]. 大连海事大学学报, 1997, 03:93-96.
- FEI Qing, YUE Danting. Analysis of drop-off condition of liquid droplets from solid wall[J]. Journal of Dalian Maritime University, 1997(3):93-96.
- [21] 秦 亮. 亲/疏水表面上液滴接触角滞后的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- QIN Liang. Study on contact angle of droplets on hysteresis and hydrophobic surface[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [22] 郝瑞英. 硅胶涂层用于金属机柜的防凝露研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- HAO Ruiying. Study on application of silica gel coating in anti-condensation of metal cabinets[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- 汪 清(1988—), 女, 工程师, 硕士, 从事配电网技术监督与技术支持工作。
- 朱正国(1977—), 男, 高级工程师, 硕士, 从事配电网技术管理工作。
- 贾志东(1966—), 男, 教授, 博士, 从事高电压外绝缘技术研究。