

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.01.001

温湿度对户外设备凝露现象的影响研究

郭沁^{1,2}, 张炜琦³, 郭雨⁴, 汪司珂⁵, 刘云鹏¹

(1.河北省输变电设备安全防御重点实验室, 河北保定 071003; 2.国网武汉供电公司, 武汉 430013; 3.国网河北省电力公司检修分公司, 石家庄 050070; 4.国网湖北省电力公司电力科学研究院, 武汉 430077; 5.国网湖北省电力公司计量中心, 武汉 430080)

摘要: 户外设备长期工作在高温高湿、低温高湿等情况下, 极易形成凝露, 危害电路设备的正常运行。针对上述现象, 文中在人工环境气候室内搭建了真型开关柜凝露试验系统, 记录了不同温差及相对湿度条件下凝露形成时间, 并测量了未形成凝露时的柜体内壁温度。结果表明: 凝露形成时间是由温差和相对湿度共同影响的, 当相对湿度不变时, 温差越大, 凝露形成时间越短; 而当温差不变时, 相对湿度越高, 凝露形成时间也越短; 并且, 形成凝露的露点温度始终高于物体表面温度。最后, 提出可通过减小温差、降低相对湿度及将设备温度控制在露点温度以上的方法防止凝露现象, 为实际工程防凝露提供参考。

关键词: 户外设备; 试验系统; 凝露时间; 温差; 相对湿度; 露点温度

Study on the Influence of Temperature and Humidity on the Condensation of Outdoor Equipment

GUO Qin^{1,2}, ZHANG Weiqi³, GUO Yu⁴, WANG Sike⁵, LIU Yunpeng¹

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense, North China Electric Power University, Hebei Baoding 071003, China; 2. State Grid Wuhan Power Supply Company, Wuhan 430013, China; 3. State Grid Hebei Maintenance Branch, Shijiazhuang 050070, China; 4. State Grid HuBei Electric Power Research Institute, Wuhan 430077, China; 5. State Grid Hubei Electric Power Company Measurement Center, Wuhan 430080, China)

Abstract: Owing to long-term work in high temperature and high humidity or low temperature and high humidity, outdoor equipment can easily format condensation, which harms the normal operation of the circuit devices. In view of the above phenomena, a true switch cabinet condensation test system is set up in the artificial climate chamber, the condensation formation time under different temperature difference and relative humidity is recorded, and the temperature of the inner wall of the cabinet is measured when condensation is unformed. The results show that, the condensation formation time is influenced by temperature difference and relative humidity, when the relative humidity is constant, the greater the temperature difference, the shorter the time of condensation formation; however, when the temperature difference is constant, the higher the relative humidity, the shorter the time of condensation formation; and the dew point temperature is always higher than the surface temperature of the object. Finally, the methods of reducing the temperature difference and relative humidity, and controlling the device temperature above the dew point temperature are proposed to avoid the condensation phenomenon, which can provide some references of preventing condensation for practical engineering.

Key words: outdoor equipment; experiment system; condensation time; temperature difference; relative humidity; dew point temperature

收稿日期: 2018-01-25; 修回日期: 2018-03-30

基金项目: 国家电网公司科技项目(5202231402LB)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid (5202231402LB).

0 引言

近年来,随着社会用电量的大幅增加和我国电网建设的迅猛发展,对电力系统供电可靠性的要求越来越高,然而,户外设备作为电能传输、分配的重要组成部分,其表面甚至内部凝露现象普遍存在,造成电气设备绝缘性能下降,引发设备绝缘“闪络”和对零部件腐蚀等^[1-2],增大了电力事故发生的可能性,环网柜带电指示器周围腐蚀情况见图1。因此,解决变电站户外设备的凝露现象尤为重要和迫切。

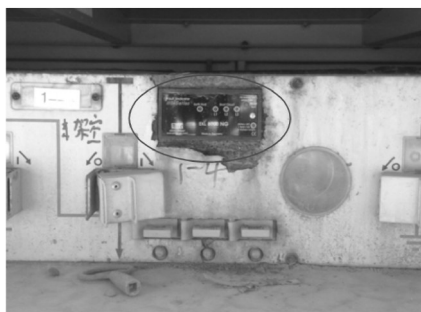


图1 指示器腐蚀情况

Fig.1 Corrosion condition of the indicator

文[3-6]阐述了凝露对户外设备的危害,并提出从升高温度、降低湿度以及提高设备自身防凝露能力3个方面防止凝露产生;文[7]采用在柜内烧开水的方法简单模拟了凝露现象,并通过工频耐压、雷电冲击以及测量主回路和绝缘电阻实验量化了凝露的危害,得出凝露会使设备各方面性能下降;文[8-9]分析了电极表面凝露对其附近电场分布的影响,得出凝露产生的电场畸变会使放电起始电压降低;文[10-14]采用温湿度控制器减小户外设备内外温差以及降低柜内湿度,破坏凝露形成的条件,从而避免凝露的发生;文[15-18]在设备表面涂覆干燥剂和超疏水材料延缓凝露产生,达到了一定的防凝露效果;文[19-22]分别采用了膜除湿法、电化学法、热泵法、HVAC(heating, ventilation, air-conditioning),通过降低绝对湿度达到除湿的作用。

综上所述,国内外主要从凝露危害和防凝露措施方面对凝露现象进行了研究,对凝露形成的原因及机理研究相对较少,并且尚未开展完整的、系统的实验论证,还无法明确给出不同环境下的凝露发生条件,理论及实验支撑能力有待进一步提高。因此,文中以ABB UniGear ZS1 开关柜为研究对象,在人工环境气候室内搭建真型开关柜凝露试验系统,模拟不同柜内外温差、柜内相对湿度条件下凝露现象,寻找凝露发展规律。

1 凝露试验系统

凝露是由于高温、高湿的气体在遇到低温物体时,当达到露点温度而在其表面液化为液体的现象。在电力系统中,凝露是指各种机构箱、配电柜和开关柜等高压电路设备的柜体内壁表面温度下降到露点温度以下时,内壁表面会发生水珠凝结的现象^[23]。因此,进行凝露试验时,需控制开关柜内温度、湿度以及环境温度。

1.1 柜内温湿度控制

温湿度控制是一种反馈控制。文中选用贝龙HS-656温湿度控制器,其主要由温湿度传感器以及温湿度调节器组成,温湿度传感器将检测到的开关柜内温湿度数值传递给温湿度调节器,温湿度调节器将检测值和目标设定值进行比较,并通过继电器控制加热器和加湿器的开断,从而实现开关柜内温湿度控制^[24-26],使开关柜内温湿度达到稳定,该控制器的温度调节范围为 $-9.9 \sim 99.9^{\circ}\text{C}$,精度为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$,相对湿度调节范围为 $0 \sim 99.9\%$,精度为 $\pm 2\%$,温湿度控制原理见图2。

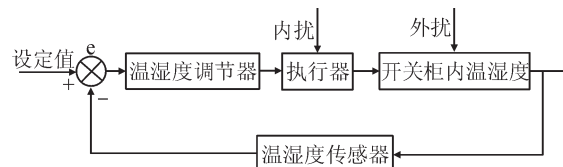


图2 温湿度控制原理图

Fig.2 The temperature and humidity control schematic diagram

1.2 环境温度控制

温度控制原理与温湿度控制原理相同。利用人工环境气候室真实模拟不同工况条件,其温度调节范围为 $-20 \sim 40^{\circ}\text{C}$,精度为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 。温度传感器将环境温度传递给温度处理器,温度处理器通过风侧电加热系统及制冷机组对环境室内温度进行控制,人工环境气候室内部结构见图3。

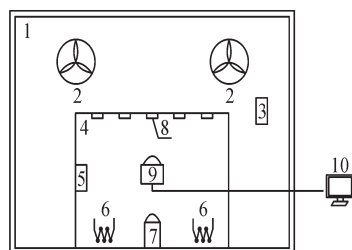


图3 人工环境气候室内部结构图

Fig.3 Internal structure of the artificial climate chamber

1.3 凝露观测系统

凝露观测系统见图4。该系统主要包括:人工环境气候室、风机、温度传感器、开关柜、温湿度控制器、加热器、加湿器、水分检测试纸、CCD摄像机、计算机。温湿度控制器与气候室分别用于控制开关柜内温湿度和环境温度,水分检测试纸用于检测是否有凝露产生(当有凝露产生时,试纸将由橙红色瞬间变为黄绿色),CCD摄像机联合计算机用于观测并记录柜顶内壁凝露时间。



1-人工环境气候室; 2-风机; 3-温度传感器; 4-开关柜;
5-温湿度控制器; 6-加热器; 7-加湿器; 8-水分检测试纸;
9-CCD; 10-计算机

图4 凝露观测系统

Fig.4 The condensation observation system

2 试验结果及处理

结合实际运行中,户外设备产生凝露时,相对湿度总是很高的情况,设定开关柜内相对湿度分别为50%、60%、70%、80%、90%,记录开关柜内温度为30℃,环境温度分别为5、10、15、20和25℃时,凝露形成所需的时间,见表1。表1中,“—”代表没有形成凝露。从中提取数据并处理,凝露时间与温差和相对湿度关系见图5。

表1 不同温差、相对湿度下凝露时间

温差/℃	相对湿度				
	50%	60%	70%	80%	90%
5	—	—	—	—	60
10	—	—	127	50	22
15	—	125	50	23	12
20	48	27	16	7	4
25	32	18	10	5	2

由表1和图5可以得出:当相对湿度不变时,温差越大,形成凝露所需时间越短。相对湿度为70%时,柜内外温差为10、15、20、25℃的凝露时间依次为127、50、16、10 min。因此,凝露形成时间的减小速率随柜内外温差的增大而逐渐减小。

当温差不变时,相对湿度越大,凝露形成所需

时间也越短。当柜内外温差为15℃时,相对湿度为60%、70%、80%、90%的凝露时间依次为125、50、23、12 min。因此,凝露形成时间的减小速率随相对湿度的升高而逐渐减小。

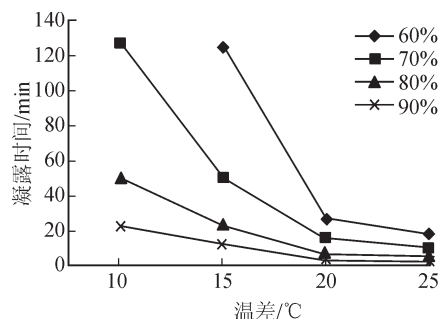


图5 凝露时间与温差和相对湿度关系

Fig.5 The relationship between condensation time and temperature difference with relative humidity

由表1中温差为15℃、相对湿度为60%时,凝露时间为125 min,大于温差为10℃、相对湿度为80%时的凝露时间50 min。因此,可以得出:凝露时间与温差、相对湿度不是单一的对对应关系,而是由它们共同影响。温度降低时,空气饱和所需的水分也减少,所以,当温差很大时,即使相对湿度较小,也能在温度较低的柜体内壁产生凝露,如表1中温差为25℃、相对湿度为50%时,凝露时间为32 min;温度升高时,同等相对湿度的空气能够包含的更多的水蒸气,当该空气遇到温度更低的柜体内壁时,也能达到饱和。因此,当相对湿度很大时,即使温差较低,也能产生凝露,如表1中相对湿度为90%、温差为5℃,凝露时间为60 min。

为分析表1中凝露未形成的原因及条件,利用Fluke 62MAX红外测温仪测量未形成凝露时,不同温差、相对湿度条件下柜体内壁温度,见表2。

表2 不同温差、相对湿度下柜体内壁温度

温差/℃	相对湿度				
	50%	60%	70%	80%	90%
5	26.9	27.0	26.9	27.2	26.9
10	23.0	23.1	22.8	22.9	23.0

相对湿度分别为50%、60%、70%、80%、90%时,柜内空气温度(30℃)对应的露点温度分别为18.4、21.4、23.9、26.2、28.2℃,根据表2及相应露点温度提取数据曲线,见图6。

由图6和表2可知,温度一定时,露点温度随相对湿度的增大而升高。当露点温度低于柜体内壁温度时,凝露现象不会发生;反之,当露点温度高于柜体内壁温度时,凝露现象才可能发生,即形成凝

露的露点温度始终高于物体表面温度。

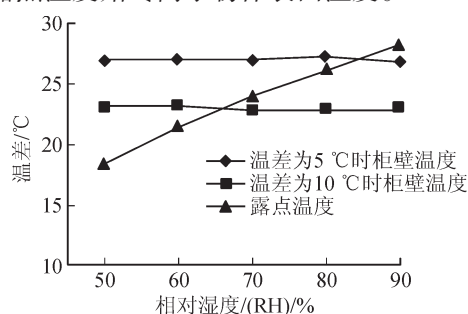


图6 柜壁温度与露点温度

Fig.6 The cabinet wall temperature and dew point temperature

3 结论

文中在人工环境气候室内搭建了真型开关柜凝露试验系统,记录了不同温差及相对湿度条件下凝露形成时间,并测量了未形成凝露时的柜体内壁温度,得出如下结论:

1)凝露形成时间与温差、相对湿度不是单一的对应关系,而是由它们共同影响。

2)当柜内相对湿度不变时,柜内外温差越大,凝露形成时间越短,且其减小速率随柜内外温差的增大而逐渐减小;而当柜内外温差不变时,柜内相对湿度越高,凝露形成时间也越短,且其减小速率随柜内相对湿度的升高也逐渐减小。

3)当露点温度低于柜体内壁温度时,凝露现象不会产生;反之,当露点温度高于柜体内壁温度时,才可能形成凝露,即形成凝露的露点温度始终高于物体表面温度。

4)防止户外设备凝露现象,可采取减小柜内外温差和降低柜内相对湿度的方法,并将设备温度控制在露点温度以上。

参考文献:

- [1] 钟家喜,金李鸣,徐 彬,等. 国产12 kV铠装式金属封闭开关设备技术隐患分析与对策[J]. 高压电器, 2007, 43(3):232-234.
ZHONG Jiayi, JIN Liming, XU Bin, et al. Analysis and countermeasures of the technical potential problems in domestic 12 kV metalclad switchgears[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(3): 232-234.
- [2] 杨士辰,贲志棠,蒋大为,等. 开关柜内加热器运行状态的节能减排分析[J]. 华东电力, 2014, 42(11):2388-2390.
YANG Shichen, BEN Zhitang, JIANG Dawei, et al. Energy conservation analysis on heater running status in HV switchgear[J]. East China Electric Power, 2014, 42(11):

- 2388-2390.
- [3] 岳新峰. 12 kV中置柜加热除湿方式探讨[J]. 高压电器, 2002, 38(3):57-58.
YUE Xinfeng. Discussion about the heating and dehumidification style in 12 kV switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(3):57-58.
- [4] 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, 32(4):489-492.
LUO Xuanguo, XIA Lijian. Research on dewing prevention technology for electrical - equipment[J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(4):489-492.
- [5] 李英奇,王战红,梅超美,等. 一起开关柜凝露闪络事故分析与预防措施[J]. 陕西电力, 2009(4):51-53.
LI Yingqi, WANG Zhanhong, MEI Chaomei, et al. Reason analysis of one dewing flashover accidentswitchgear & its preventive measure[J]. Shaanxi Electric Power, 2009(4):51-53.
- [6] 羊万其. 室外端子箱凝露现象与解决方案分析[J]. 技术与市场, 2014, 21(1):56-57.
YANG Wanqi. Analysis of outdoor terminal box condensation phenomena and solutions[J]. Technology and Market, 2014, 21(1):56-57.
- [7] 叶成刚. 35 kV在役开关柜绝缘结构改进研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
YE Chenggang. Research on insulation structure improvements of 35 kV in service switchgear panel[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2012.
- [8] 周显达. 大气参数对电气设备外绝缘影响的研究[D]. 广州:华南理工大学, 2012.
ZHOU Xianda. Research on the influence of atmospheric parameters on electrical equipment outer insulation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [9] 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.
- [10] 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, 46(8): 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, 46(8):59-62.
- [11] 周丰群,张义民,何 超. 电气设备用温度凝露控制器的研制[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(3):61-62.
ZHOU Fengqun, ZHANG Yimin, HE Chao. Development of temperature and dewing controller for electric equipment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(3):61-62.
- [12] 刘曙光,孙兴丽. 成套开关设备防凝露用湿度传感器的设计[J]. 控制工程, 2009(16):176-178.
LIU Shuguang, SUN Xingli. Design of humidity sensor for

- anti - condensing in switchgear[J]. Control Engineering of China, 2009(16):176-178.
- [13] 林 伟,汪金刚. 采用模糊控制技术的电气设备防凝露控制器[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2012,4(2):36-39.
LIN Wei, WANG Jingang. Study of intelligent controller for preventing moist in electrical equipment based on fuzzy control[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2012,4(2):36-39.
- [14] 孟艳清,赵宏伟,邹育霖. 基于 ARM 的开关柜智能监控装置研究[J]. 高压电器, 2014,50(3):29-35.
MENG Yanqing, ZHAO Hongwei, ZOU Yulin. Research of the smart monitoring control device for switchboard based on ARM[J]. High Voltage Apparatus, 2014,50(3):29-35.
- [15] 郝瑞英,葛天舒,代彦军. 金属表面涂覆干燥剂的防凝露研究[J]. 上海交通大学学报, 2014,48(11):1588-1594.
HAO Ruiying, GE Tianshu, DAI Yanjun. Anti-condensation based on desiccant-coated metal surface[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2014,48(11):1588-1594.
- [16] 殷 平,沈国励,王 桦. 超疏水表面防凝露[J]. 暖通空调, 2006,36(4):50-56.
YIN Ping, SHEN Guoli, WAN Hua. Superhydrophobic surface technique for preventing condensation[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2006,36(4):50-56.
- [17] 李会娟. 超疏水铝箔的可控制备及抗凝露抗结霜性能研究[D]. 南京:南京理工大学,2013.
LI Huijuan. Controlled fabrication of superhydrophobic Al foil with anti-dew and anti-frosting properties[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2013.
- [18] 曹树龙. 铜材表面超疏水纳米膜构筑及抗凝露与滴状冷凝性能研究[D]. 苏州:苏州大学,2013.
CHAO Shulong. Construction of superhydrophobic nanofilm on the surface of copper and studies on the performances of anti - dew and dropwise condensation[D]. Suzhou: Suzhou University, 2013.
- [19] ZHANG L Z, ZHU D S, DENG X H, et al. Thermodynamic modeling of a novel air dehumidification system[J]. Energy and Buildings, 2005,37(3):279-286.
- [20] CHOU S K, CHUA K J, HO J C, et al. On the study of an energy-efficient greenhouse for heating, cooling and dehumidification applications[J]. Applied Energy, 2004,77(4):355-373.
- [21] MAZZEI P, MINICHELLO F, PALMA D. HVAC dehumidification system for thermal engineering[J]. Applied Thermal Engineering, 2005,25(5-6):677-707.
- [22] LA D, DAI Y J, LI Y, et al. Technical development of rotary desiccant dehumidification and air conditioning: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010,14(1):130-147.
- [23] 孙亚芬. 高压电路设备防凝露控制的研究[J]. 自动化技术与应用, 2009,28(4):100-102.
SUN Yafen. Dew-proofing method for high-voltage electrical equipment[J]. Techniques of Automation and Applications, 2009,28(4):100-102.
- [24] 彭勇刚,韦 巍. 人工气候箱温湿度模糊控制[J]. 农业工程学报, 2006,22(8):166-169.
PENG Yonggang, WEI Wei. Fuzzy control overtemperature and humidity of artificial climate chest[J]. Transactions of the CSAE, 2006,22(8):166-169.
- [25] 伍文平,张智盛,张 明. 环境实验室温、湿度模糊控制系统设计[J]. 现代电子技术, 2009,21(8):149-151.
WU Wenping, ZHANG Zhisheng, ZHANG Ming. Design of condition lab's temperature and humidity fuzzy control system[J]. Modern Electronics Technique, 2009,21(8):149-151.
- [26] 张如萍,唐育正. 基于 PLC 的温湿度控制系统设计与实现[J]. 暖通空调, 2010,40(8):128-130.
ZHANG Ruping, TANG Yuzheng. Design and implementation of temperature and humidity control system based on PLC[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2010,40(8):128-130.
- 郭 沁(1992—),男,硕士,助理工程师,研究方向为高电压、绝缘技术和变电运行维护。
- 张炜琦(1990—),男,本科,工程师,研究方向为高电压试验与电气设备检修。
- 郭 雨(1988—),女,硕士,工程师,研究方向为电气测量技术。
- 汪司珂(1984—),男,硕士,工程师,研究方向为电气测量技术。
- 刘云鹏(1976—),男,博士生导师,教授,研究方向为特高压输电技术、电气设备状态监测与故障诊断和高电压绝缘技术等。