

DOI: 10.7667/PSPC180346

# 12 kV 高压开关柜受潮凝露机理及防治关键技术探讨

潘岐泽, 杨芳, 杨志

(广东电网有限责任公司清远供电局, 广东 清远 511518)

**摘要:** 如何防止开关柜内受潮导致的设备误动和拒动, 具有重要的现实意义。基于此, 对开关柜受潮凝露机理及其防治关键技术进行了探讨。首先, 介绍了开关柜结构特点及其受潮凝露防治现状, 详细分析了开关柜凝露产生的机理、原因、条件和危害。然后, 对防凝露相关的措施和改进方法进行了简要描述, 这些方法可有效消除开关柜在运行过程中发生的故障。最后, 提出了一种开关柜受潮凝露机理的研究方案。该方案涵盖了开关柜受潮凝露发生的影响要素分析和受潮凝露机理研究模拟环境的搭建方案, 并采用“源”的概念进行了干燥气源除湿系统的方案设计。基于该方案, 对开关柜受潮凝露机理及防治关键技术进行了展望。

**关键词:** 开关柜; 受潮凝露; 防治措施; 故障; 凝露点计算

## Discussion on mechanism of the dampness and dewing inside 12 kV high-voltage switchgear and its key control techniques

PAN Qize, YANG Fang, YANG Zhi

(Qingyuan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd, Qingyuan 511518, China)

**Abstract:** How to prevent the equipment from malfunctioning and refusing caused by moisture in the switchgear has important practical significance. On this basis, the occurrence mechanisms of moisture and dewing in the switchgear and its key technologies for prevention and control are discussed. Firstly, the structural characteristics of the switchgear and the status quo of the prevention and control of the moisture and dewing are introduced. The mechanism, causes, conditions and hazards of the dewing of the switchgear are analyzed in detail. Then, the anti-dewing related measures and improvement methods are briefly described. These methods can effectively eliminate the failures occurred in the switchgear during operation. Lastly, an investigation scheme for the mechanism of moisture and dewing in switchgear is proposed. The scheme covers the analysis of the influence factors on the phenomena of moisture and dewing in the switchgear and the construction scheme of the simulation environment for the moisture and dewing mechanism research, and moreover, in which the concept of source is adopted to design a dry gas source based dehumidification system. Based on this scheme, the mechanism of moisture and dewing and the key technologies of prevention and control for the switchgear are prospected.

This work is supported by Science and Technology Projects of China Southern Power Grid (No. GDKJXM20162530 (031800KK52160015)).

**Key words:** switchgear; dampness and dewing; countermeasure; fault; condensation point calculation

## 0 引言

12 kV 开关柜是配电网中的一种核心的电气设备, 它主要起到电能分配、故障隔离等作用<sup>[1-2]</sup>。因此, 一旦这类设备发生故障, 将造成较大范围的

停电和经济损失<sup>[3]</sup>。随着人们生活水平的不断提高, 当前社会中人们对供电的可靠性要求越来越高<sup>[4-7]</sup>。电气设备自投入运行之日起, 就存在受潮凝露的问题。以广东电网为例, 其处于高温高湿的亚热带, 常年多雨, 且每年有一段家家户户墙壁地面都凝水的“回南天”天气。在此阶段, 高压开关柜防潮防凝露是必须认真考虑的工作, 相应的开关柜技术规范也需要配置防潮装置。此外, 在广东电网高压开

基金项目: 中国南方电网科技项目资助 (GDKJXM20162530 (031800KK52160015))

关柜的实际运行过程中, 各地都经常反映开关柜出现受潮凝露这一现象, 其中有不少的开关柜发生绝缘击穿, 引起弧光短路, 从而导致停电, 造成社会影响和经济损失<sup>[8]</sup>。

近代科学研究表明, 凝露的产生与温度( $^{\circ}\text{C}$ )、湿度(%RH)、气压(kPa)3个要素紧密相关<sup>[2]</sup>, 为防止凝露的产生, 人们在不同的应用场合可使用不同的除湿方法。例如, 在锂电池生产车间, 采用大型的转轮除湿机加冷冻机的组合方法, 将空气中的水分消除, 可以将凝露温度降到零下数十度。开关柜分散布置在一个个配电房里, 每个房间里的数量从几台到几十台, 都要求将配电房的环境维持在类似于锂电池车间的条件下, 经济上并不可行。在开关柜的使用条件下, 气压通常为大气压, 可视为常数, 可控的参数为温度  $t$  和湿度  $F$ 。

总的来说, 目前对开关柜的受潮凝露机理的建模研究较少, 只有一些研究机构公开发表过少量文献<sup>[9-16]</sup>, 其中, 文献[9]结合现场高压开关柜内出现的受潮凝露现象, 简要分析了该开关柜凝露产生的原因、发生的条件和造成的危害, 并提出了一些防止凝露与潮气的技术措施; 文献[10]针对北京市城区配电网 2012 年至 2014 年共涉及的 15 台开关柜、2 条母线的停电事故, 对该城区配网开关柜的受潮原因进行了详细分析, 提出了一些针对性的除湿措施, 并阐述了新型除湿装置的原理和效果; 文献[11]针对如何防止户外箱柜内设备受潮引起的交直流绝缘下降而导致的设备误动和拒动, 通过十几年来的运行维护经验, 从箱柜设计选型、安装施工工艺及日常维护三个方面入手, 对 500 kV 变电(换流)站户外箱柜防潮、防凝露治理进行了研究, 并取得了较好的治理效果; 文献[12]针对 10 kV 金属封闭开关柜存在的柜内凝露现象, 研究了该现象出现的原理, 并就应对策略进行了简要分析; 文献[13]则通过对凝露原理的分析以及对开关柜凝露原因和现有开关柜防凝露措施的讨论, 提出了一种新型高压开关柜防凝露管理系统, 可为解决高压开关柜普遍存在的空气湿度大、易于凝露等难以治理的问题提供有效的防范处理措施; 此外, 针对金属封闭开关柜内由于露水凝结导致的开关柜爆炸等安全事故问题, 文献[14]设计了一套基于 ZigBee 和 GPRS 通信技术的多路温湿度在线采集系统, 可在阴晴交替的天气条件下, 对耐火泥破损程度不同的金属封闭开关柜内的温湿度分布进行实时监测, 并可利用相关性检测对开关柜内不同位置的湿度数据进行分析。该研究表明金属封闭开关柜内凝露和潮气产生的主要来源为电缆沟, 因此提出可在开关柜底部安装除湿装置、

增加通风装置以及提高电缆沟的密封性以应对凝露现象。文献[15]针对杭州市余杭电网环网中普遍存在的环网开关柜凝露问题进行分析研究, 并提出了一些解决方案; 文献[16]则对开关柜凝露、绝缘受潮原因进行了探讨, 并提出了相应的整改措施。此外, 文献[17]论述了将开关柜的模型理想为一个二维封闭口腔, 研究结论认为内部空气湿度高、环境温度低时, 冷凝容易产生且发生速率较快, 并得出了容易发生凝露现象的柜体部位; 文献[17]论述的开关柜物理模型与文献[18]基本相同, 但是加入了热源, 用于研究热源安装位置的不同对凝露部位的影响, 研究认为柜内湿空气的流动特性和温度分布对凝露的产生具有重要影响, 由此提出了可在凝露面增加电阻丝、增加保温层来有效防止凝露现象的发生。

总的来说, 目前对于开关柜受潮凝露防治技术的研究, 普遍存在分散、持续性差等特点, 创新性并不是很高。这些研究中所构建的物理模型往往过于理想, 导致与实际的开关柜模型区别较大, 但可起到一定的作用。同时, 受基础理论研究量少的影 响, 国内研究机构对开关柜受潮凝露防治新技术的研究往往专注于某一方面, 如研究冷凝除湿与加热除湿的优劣, 研究提高柜体温度高于环境温度来保证不产生凝露, 研究控制器等。在这些研究中, 最主要的问题是系统性和持续性不强, 普遍存在浅尝辄止的情况。因此, 对开关柜的受潮凝露防治技术还需要开展更多更深入的研究。

此外, 目前对开关柜安全运行造成严重威胁的受潮凝露防治, 常规的方法是在开关柜内配置加热板, 或巡视人员到现场通风、打开防潮灯等, 并通过提高温度、对流换气等方式来降低湿度, 以防止开关柜受潮。以广东电网为例, 由于开关柜结构特点、广东潮湿高温气候条件的影响和人工巡视操作及时性的局限影响等, 运维管理部门无法杜绝开关柜内发生受潮凝露的现象, 从而导致柜体绝缘性能下降, 常常需要进行停电检修更换, 甚至因不能及时消除隐患而发生接地故障, 比如单相、两相接地, 甚至是三相接地故障。

为此, 基于目前对开关柜的受潮凝露防治技术的研究情况, 本文对开关柜受潮凝露机理及其防治关键技术进行了探讨。详细介绍了开关柜的结构特点、开关柜凝露产生的机理、原因、条件和危害, 并对相关的防治措施和改进方法进行了简要描述, 这些方法可有效消除开关柜在运行过程中发生的故障。最后, 本文提出了一种开关柜受潮凝露机理研究方案, 该方案涵盖了开关柜受潮凝露发生的影响

要素分析和凝露点的计算方法以及受潮凝露机理的研究方法。本文可对相关设备管理部门和运维部门开展开关柜受潮凝露机理及防治技术研究提供一定的借鉴和参考。

## 1 开关柜结构特点及其受潮凝露防治现状

### 1.1 开关柜结构特点

开关柜(switchgear)是一种起到电力汇集、分配、控制、保护的重要电力设备<sup>[19-22]</sup>。本文中所指开关柜为 12 kV 金属密闭开关柜,即高压开关柜(按我国使用习惯,可统称为高压柜)。高压开关柜现场受潮凝露的实例示意图,如图 1 所示。

本文中所提到的高压开关柜为空气绝缘开关柜,按结构特点可将其分为 3 类:箱式固定柜(XGN)、铠装式手车柜(KYN)和箱式环网柜(HXGN),如表 1 所示。

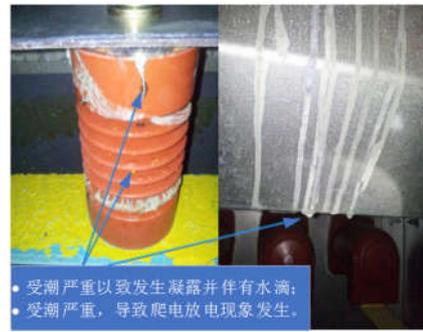


图 1 开关柜受潮凝露现场实例示意图

Fig. 1 A field case of moisture and dewing for the switchgear

基于表 1,并经详细调研,本文对箱式固定柜(XGN)、铠装式手车柜(KYN)、箱式环网柜(HXGN)这 3 种开关柜的典型实物进行了三维设计,分别如图 2(a)、2(b)和 2(c)所示。

表 1 3 种空气绝缘开关柜结构特点

Table 1 Structural feature of the three categories of air-insulation switchgears

项目类型	固定柜(XGN)	手车柜(KYN)	环网柜(HXGN)
参考尺寸(宽×深×高/mm <sup>3</sup> )	1 100×1 300×2 650	800×1 500×2 360	700×900×2 000
参考体积/m <sup>3</sup>	3.79	2.83	1.26
柜体密封情况	<ul style="list-style-type: none"> <li>外壳防护等级为 IP3X</li> <li>允许存在 2.5 mm 的缝隙</li> <li>密封情况较差</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>外壳防护等级为 IP4X</li> <li>允许存在 1.0 mm 的缝隙</li> <li>密封情况较好</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>外壳防护等级为 IP3X</li> <li>允许存在 2.5 mm 的缝隙</li> <li>密封情况较差</li> </ul>
隔室密封情况	<ul style="list-style-type: none"> <li>高压部分:分为电缆室、断路器室、母线室、前下隔室,有防潮要求,各高压隔室间有大面积的互通通道</li> <li>低压部分:只有一个继电保护室</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高压部分:分为电缆室、断路器室、母线室、前下隔室(通常是空的,不安装任何元件,但刚好处于断路器室下方,其潮湿程度对断路器室影响较大),且有防潮要求,各高压隔室间基本相互独立,只有很小间隙连通</li> <li>低压部分:只有一个继电保护室</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高压部分:分为电缆及负荷开关室、母线室,有防潮要求,2 个高压隔室间有大面积互通通道</li> <li>低压部分:只有一个仪表室</li> </ul>
安装方式	<ul style="list-style-type: none"> <li>室内坐地安装,柜底有电缆沟或电缆坑,电缆从柜底进入</li> <li>柜后有约 1.1~1.2 m 维护通道</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>安装方式同 XGN</li> <li>柜后有约 0.8~1.0 m 维护通道</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>安装方式同 XGN</li> <li>柜体设计成后封板,多数靠墙安装,柜后无通风更易受潮</li> </ul>
使用场合	开闭所	开闭所,配电站	配电站

### 1.2 受潮凝露防治现状分析

众所周知,12 kV 高压开关柜在运行过程中极易受到外界环境的影响,导致发生受潮、绝缘下降等,从而引起放电的情况;更严重的是,在昼夜温差大、湿冷季节、雨季的情况下极易产生凝露,使得开关柜运行环境无法得到有效保障,导致产生局部放电、对地引弧,最后相间短路将绝缘故障发展为燃弧爆炸事故,造成供电中断、经济损失。

为解决开关柜受潮凝露问题,国内外逐渐对受潮凝露的形成机理及防治措施进行了初步研究。以广东电网为例,目前广东电网公司制定的开关柜技术规范明文规定,高压开关柜必须配置防潮设备。各制造厂家主要是利用加热器产生热量,提高柜内

温度,但这种方法存在效果差、有防潮死区的缺点,从目前的运行情况来看,广东电网每年仍有相当数量的开关柜因受潮凝露发生故障,设备管理部门和运维部门保障电网安全运行的压力很大,急需开展开关柜受潮凝露机理及防治关键技术的研究。

通过调研发现,由于国外与国内存在设备差异和运行管理差异,对开关柜专门的受潮凝露建模和防治新技术研究非常少,因此暂时无法获得相关的研究现状。这主要是由于欧美国家的开关柜与我国有较大差异,如较多使用全绝缘开关柜,而我国较多使用空气绝缘开关柜,另外我国与外国气候条件也不尽相同,因此,国外对于开关柜受潮凝露问题的研究没有国内那么迫切。

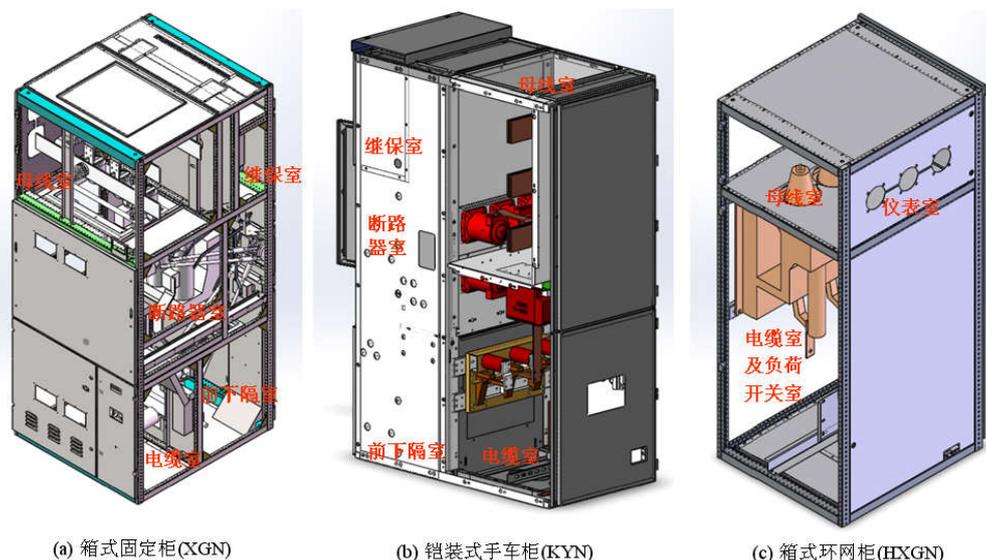


图 2 3 种开关柜三维结构设计示意图

Fig. 2 Design of three-dimensional structure diagram of three categories of switchgears

国内相关行业和机构对开关柜防潮防凝露做了不少研究, 已尝试加热、冷凝、对流换气等方法, 但实际效果并不佳, 无法完全满足开关柜安全运行的要求。此外, 国内对开关柜受潮凝露建模的研究机构也相对较少, 起步相对较晚, 较少涉及开关柜内部受潮凝露防治技术的研究, 而针对开关柜的其他方面, 文献[21]对中压固体绝缘开关柜的绝缘技术进行了相关研究; 文献[22]则对中压开关柜内部电弧试验的影响因素进行了研究。国内方面, 目前国家电网公司天津市电力公司与华北电力大学正联合开展相关研究。文献[23]基于光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)开发了一套新颖的温度监控系统, 用于监测高压开关柜内部的环境温度; 对于中压开关柜, 文献[24]开发了一套基于双 CPU 的在线监测设备, 利用自制的红外温度传感器可监测柜内汇流排的温度; 文献[25]对混合式气体绝缘开关柜进行了相关研究; 2002 年, 周丰群等<sup>[26]</sup>研制了一种温度凝露控制器, 作为一种保护型电器, 可为各种柜(箱)式电气提供适宜的温湿度运行环境。当环境湿度达到凝露时, 该控制器可自动启控, 以接通卸载电源去除潮气。此外, 文献[27]中开发了一种配网开关柜防凝露的管理系统, 该系统涵盖采集温湿度数据的检测装置, 所检测的数据可通过 GPRS 技术发送到主站的管理系统中, 用于分析判断是否需要向开闭所内的除湿设备发送运行命令。该系统通过初步的试验, 表明可提高电网运行的稳定性和可靠性。

针对高压开关柜受潮凝露现象的除湿技术, 目

前大多采用加热除湿法, 部分使用半导体冷凝的除湿方法, 但这两种除湿技术都存在如下明显的缺陷:

1) 除湿设备均布置在设备内部高压隔离室内, 发生故障一定要停电才能进行处理, 由此增加了计划外的停电时间, 影响社会效益和经济效益, 而且增加了工作量和作业风险。

2) 冷凝除湿在低温高湿情况下容易凝霜, 除湿效果几乎为零。

3) 加热除湿方法在高温高湿情况下存在温度过高, 容易出现加速绝缘老化的弊端。

4) 两种方法的精细化程度欠缺, 基本没有关注到开关柜结构特点对除湿的影响。实际上开关柜内空间狭小, 内有绝缘件, 开关元件、CT/PT、安装件、电缆头等, 元件多、形状和材质不一, 空间不规则, 内部又形成空气流通不畅的小空间, 柜内各处的温度也存在差异, 如不对这些因素展开精细化研究, 则防潮防凝露无法做到全面彻底消除。

因此, 对于开关柜受潮凝露防治新技术的研究, 本文认为关键在于创新, 可采用“源”的概念, 用干燥气源来取代现有的除湿防凝露装置, 以开关柜作为用气对象, 但其难点在于对干燥气源装置的开发, 配气系统控制、气压稳定和温度调节控制、开关柜内空气强制流动控制等方面的研究。

## 2 开关柜凝露产生的机理分析

### 2.1 开关柜凝露产生的机理、原因、危害和措施

#### 2.1.1 开关柜凝露产生的机理、原因和危害

12 kV 开关柜内凝露是一个十分复杂的现象,

下面从凝露现象产生的机理、开关柜凝露产生的原因、凝露造成的危害、开关柜防露措施等方面出发,对 12 kV 金属封闭开关柜内凝露现象进行简要分析。

凝露产生机理:凝露现象在实际的运行过程中产生,而产生的原因则多与高压开关柜自身的结构设计有着密切关系。根据图 2 所示的 3 种开关柜三维结构设计,显而易见开关柜无法做到全封闭。因此,当开关柜密封性不强时,对于空气湿度较大的地区开关柜运行时极易发生凝露现象,而由于其防范方面存在诸多问题,因而由开关柜凝露引起的绝缘故障频繁发生,造成室内开关柜全面烧毁的事故。此外,由于负荷和环境的频繁变化,造成开关柜内部及其周围环境发生一定的变化,进而引起柜内外压力差,产生类似“呼吸”的作用。同时由于各个高压隔室比较密封,因此水汽进入后不容易散出,导致一定的累积效应发生,造成开关柜发生受潮凝露<sup>[28]</sup>。潮湿空气即凝露是开关柜发生绝缘故障的最初原因。

从本质上来说,凝露现象发生的机理是当开关柜内部与空气接触的物体表面温度低于空气的露点时,在物体表面发生凝露现象。这里的露点或露点温度通常指在固定的大气压下,空气中所含的气态水达到饱和而凝结成液态水所需要降至的温度。空气温度  $t$ (单位 $^{\circ}\text{C}$ )、空气相对湿度  $F$ (单位%RH)和空气的饱和水蒸汽压  $E_s$ (单位 hPa)三者之间并没有非常确切的函数关系,且多需要通过经验数据来进行判定。下面介绍一种基于马努斯修正公式的空气凝露点温度计算方法。

假设柜内空气温度为  $t$ , $^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度为  $F$ ,%RH,可采用马努斯公式计算凝露点,步骤如下所述。

首先,计算出  $t^{\circ}\text{C}$  空气在水面( $t>0^{\circ}\text{C}$ )或冰面( $t\leq 0^{\circ}\text{C}$ )的饱和水蒸汽压力  $E_s$ (单位 hPa)为

$$E_s = E_0 \times 10^{\frac{axt}{b+t}} \quad (1)$$

式中: $E_s$  为饱和水蒸汽压力(单位 hPa); $E_0$  为气温为  $0^{\circ}\text{C}$  时的饱和水蒸汽压(单位 hPa); $a$ 、 $b$  为系数, $t>0^{\circ}\text{C}$  时,取水面值  $a=7.5$ , $b=237.3$ ;  $t\leq 0^{\circ}\text{C}$  时,取冰面值  $a=9.5$ , $b=265.5$ 。

然后,计算  $t^{\circ}\text{C}$  空气在已知相对湿度为  $F$  下的水蒸汽压力(单位%RH),即空气的饱和水蒸汽压  $E$ (单位 hPa)为

$$E = \frac{E_s \times F}{100} \quad (2)$$

最后,根据建筑门窗玻璃幕墙热工和计算规程<sup>[29-31]</sup>,空气凝露点温度  $T_d$  可最终表示成式(3)所示

的马努斯修正计算公式。

$$T_d = \frac{b \times \lg(E/E_0)}{a - \lg(E/E_0)} = \frac{b}{\frac{a}{\lg\left(\frac{0.01 \times E_s \times F}{6.11}\right)} - 1} \quad (3)$$

式中: $T_d$  为露点温度, $^{\circ}\text{C}$ ;  $a$  和  $b$  为修正参数,含义同上; $E_0$  含义同上,取值 6.11 hPa; $E_s$  和  $E$  含义同上,分别如式(1)和式(2)所示;因此,根据式(3),可知凝露发生的影响因素主要有 3 个:温度  $t$ (会影响到  $a$  和  $b$  的取值)、空气相对湿度  $F$  和空气的饱和水蒸汽压  $E_s$ 。

开关柜发生凝露现象的原因是多种多样的。根据工程经验,首先开关柜凝露的产生多与变电站的设置位置有着一定的联系,我国大部分变电站大多都设置在城郊地区,极易受到城市热岛现象的影响,从而导致开关室内部空气湿度相对较大。其次,开关柜凝露产生的原因多与其自身结构密切相关,例如高压开关柜大多由金属覆铝锌板拼接而成,导致其密封性不强、缝隙较多,并且底部有高密度电缆沟,从而导致高压开关柜室内空气湿度相对较高。最后,还有一个原因就是当电源负荷在一定时间内发生变化时,会引起高压开关柜内导体部分、开关设备、绝缘部分等表面温度出现较大程度的变化,在这种相对湿度较高、温度变化大的狭小空间内,极易引起柜体本身、导体部分、设备部分等表面出现凝露现象。

举个例子,当高压开关柜密封性不强,开关室内电缆沟存有积水时,柜内上层开关设备在运行过程中不断发热,加速底部的水汽不断上升至开关柜内,引起柜内相对湿度快速升高,从而更易导致凝露现象发生,这将会引起绝缘件部分的表面发生明显的绝缘沿边放电现象。

因此,总的来说,高压开关柜凝露现象是否发生取决于室内温度(即空气温度  $t$ )、柜内温度、空气相对湿度  $F$ 、空气的饱和水蒸汽压  $E_s$ 、露点温度以及柜内结构和通风散热状态<sup>[9]</sup>。

文献[9]提出以下几种具体情况会明显导致高压开关柜发生凝露现象:一是长期处于备用状态的母联开关柜、低负荷的开关柜等;二是与开关室所处位置有关,如处于二层楼或有地下电缆室,其潮气现象较微弱,而对于潮湿回暖的天气则易发生设备发电现象;三是当开关柜的底部电缆仓密封性较差时,导致水汽极易进入柜内,加大柜内的湿度,在一定的温差条件下就容易形成凝露;四是开关柜顶部设计的好坏,也会影响到凝露现象的发生。

### 2.1.2 开关柜凝露产生的危害

如 2.1.1 节所述, 金属高压开关柜无法保证全封闭运行, 因此当水汽进入柜内时, 不易散出, 由于累积效应, 柜体内部会发生受潮凝露。当柜内潮气湿度较大或内部已经形成一定程度的凝露时, 容易导致隔板表面形成爬弧, 产生闪络放电, 且随着放电的增多, 隔板绝缘将被破坏, 在其表面逐渐形成一层薄薄的导电液膜, 使得隔板的绝缘性能不断降低<sup>[9]</sup>。此外, 当母联开关柜内湿度较大时, 水珠或凝露可能会导致母排形成沿边或沿面放电。这样一来, 如果遇到过电压作用, 则更容易引发两相短路, 甚至是三相短路故障。总的来说, 高压开关柜的受潮凝露防治是提高开关柜安全运行水平的重要事项, 及时将开关柜内空气中的水分凝结成水并排出, 对开关柜的安全运行具有重要意义。

## 2.2 相关的防治措施和改进方法

高压开关柜的防潮措施具有很高的应用价值。在 2.1 节中, 认为凝露现象发生的重要原因之一在于变电站位置的设置, 因此高压开关柜防凝露措施应当在结合凝露产生的机理、原因和条件(2.1.1 节中提到)以及变电站所处地理位置及其所配置高压开关柜的自身结构和运行特点之后, 根据实际需要执行, 且在执行过程中需要对现存的防凝露措施中存在的问题有清晰的认识, 然后采取有针对性的改进措施来设计开发新型的高压开关柜防凝露装置或系统, 从而能够取得较为良好的凝露防治效果<sup>[12]</sup>。

根据实际工程经验, 并结合文献[12,16,18], 在高压开关柜防潮湿和凝露方面, 可采取如下防治措施。

1) 结合实际开关柜的结构特点和运行环境, 合理选用空气置换法, 比如干燥空气除湿法, 去除柜内的湿空气, 置换获得更多的洁净、干燥的新空气, 并在同一时刻将潮湿的空气及时排出, 使得柜体内最终可充满干燥空气, 这种措施称为干燥空气置换法, 需要相应的设备辅助才能实现。需要特别强调的是, 在进行干燥空气置换时, 应确保柜外或电缆沟内的潮湿空气难以进入柜内, 以防止二次凝露现象发生。此外, 使用干燥空气除湿法时, 也可同时配合使用加热除湿法以降低柜内的空气湿度。这样一来, 在防止凝露现象发生的同时也可有效避免局部放电现象或短路事故的发生。

2) 对 12 kV 金属封闭开关柜内通风道进行优化设计, 并科学、合理地布置通风道的路径、进风口的位置、出风口的位置, 优化传感器的设置工作, 合理选择控制策略等可有效防止潮湿和凝露现象发生。例如, 根据开关柜的实际结构, 对柜内各类温

湿度传感器进行科学、合理地布置, 确保柜内的密封性达到一定的要求, 尤其是确保地面与电缆沟保持充分的密封性, 以避免由于密封性不足造成的柜内电气设备绝缘性能降低, 发生沿面放电、闪络、烧毁等事故, 如文献[12]中提到, 在优化传感器设置工作过程中, 可将传感器安装在隔室内电气设备集中区域的上部, 能起到良好的应用效果; 再者, 对开关柜通风道路径布置、通风进风口、出风口位置进行优化设计, 并考虑内部结构对空气对流的阻力影响, 可有效提升 12 kV 金属开关柜的密封性, 与此同时, 做好内部电弧的防护工作, 可进一步消除运行的安全风险; 此外, 设置科学的指令, 制定合理的控制策略, 控制柜内各式传感器能有效检测温湿度等环境数据, 并使开关柜能执行不同的控制策略, 从而准确地、快速地投切除湿装置。再比如如文献[18]通过研究发现, 合理科学地布置柜内加热器的位置可显著提高实际的加热除湿效果, 进而有效防治凝露现象的发生。

3) 有效降低周围空气湿度和减少温差。配电室内密封良好, 平时空调运行湿度保持在 60%~80%, 通过加装抽湿机容易实现降低配电室湿度的目的。电缆层则必须配置事故通风装置, 并在排风机上配置停机自密封的闸板, 对所有电缆出入口进行密封, 尽可能降低电缆层的湿度。此外, 降低温差也是一种控制凝露发生的有效措施, 并可同步实现降低开关柜加热器的运行时间, 有效节能。例如, 当保持配电室在 28 °C 左右运行时, 能有效防止开关柜出现凝露。

4) 建立实用的开关柜受潮凝露数学模型, 研究并应用新型防治技术和装置。在建立数学模型方面参考文献[18], 首先需要对模型进行一定的假设, 如忽略冷凝水的热阻及其对流动的影响, 仅考虑当壁面温度低于湿空气的露点温度时发生凝露, 固体壁面(开关柜四周均为壁面)上采用无滑移边界条件, 开关柜内部为湿空气(即干空气和水蒸气的混合气体)等, 然后建立开关柜的控制方程, 包括连续性方程、动量方程、能量方程和质量输运方程(这些方程的具体公式可参考文献[18])。最后计算水蒸气的冷凝速率  $m_v$ <sup>[18]</sup>为

$$m_v = D \left. \frac{\partial \rho}{\partial n} \right|_i \quad (4)$$

式中:  $D$  为湿空气的扩散系数;  $\rho$  为湿空气(混合相)的密度, 混合相的密度为各个相的密度按体积分数的权重相加, 即

$$\rho = \sum_{i=1}^n \alpha_i \rho_i \quad (5)$$

因此，当壁面温度高于湿空气的露点温度时，冷凝速率为 0，源项  $S_m=m_v=0$ ，而当壁面温度低于湿空气的露点温度时，冷凝速率可按照式(4)来进行计算<sup>[18-19]</sup>。这也进一步说明，在空气湿度保持一定的情况下，相对湿度越高，则其露点温度越高且越接近于空气温度，也即相对湿度越高的空气越容易因气温变化而产生凝露现象<sup>[13]</sup>。

在应用新型防治技术和装置方面，可通过集成应用于干燥气体除湿技术、空气循环技术等新技术，投入应用后能改变目前单一以加热为主的局面，能适应开关柜狭小、复杂空间的防潮防凝露要求，不留防潮死区。同时，近年来物联网技术<sup>[14]</sup>、智能控制技术、“互联网+”技术的逐步应用，将可改变目前分散管理的局面，实现集中监控管理，及时发现除湿故障和湿度超标，并对近凝露点进行预警，其运维底线在于保证不发生长时间高湿度、凝露等现象，确保设备安全运行，使开关柜的运维效率大大提高。

总的来说，在开关柜受潮凝露防治方面，通过制定合理的防治措施，可提高除湿效果，而选择合适的温湿度控制器也显得至关重要，该类控制器最好可自动调整温湿度启动值，并具备监测异常值的报警功能，具体可参考文献[28]中提到的在日温差较大的地区或时段、高湿度地区或季节、雨季或高湿天气等情况时，温湿度控制器应当如何投切和使用。

### 3 开关柜受潮凝露机理研究方案

#### 3.1 开关柜受潮凝露发生的影响要素

空气可以看作由绝干空气、水汽、尘埃 3 部分组成。绝对湿度为单位空气在一定压力及温度下所含的水汽的质量，饱和湿度则为单位空气在该条件下所能包含的最大水汽质量。温度越高，空气中所能包含的水汽越多，饱和湿度越大，绝对湿度与饱和湿度的比值为相对湿度。如果保持空气的湿度而降低空气温度，当温度低至一定值后，水蒸气的分压力达到当时空气温度的饱和压力，该条件下的空气中水汽就达到饱和。如果再进一步降低空气温度，水汽就会从空气中冷凝析出形成露滴，这种现象被称为凝露。因此，凝露是环境温度低于空气相对湿度的露点温度时，由空气中的水蒸气凝结成的水珠<sup>[28-29]</sup>。其中露点温度是空气中水蒸气达到饱和状态液化成露珠所需要的温度。

#### 3.2 开关柜受潮凝露机理研究方案

根据 2.1 节中露点温度的计算步骤，本文研究了适用范围内的环境条件：温度  $t$  为 0~40 °C，相对

湿度为 40%~100% RH，大气压取当地大气压。同时，作为典型计算，本文取标准大气压(101.325 kPa)，此范围内的凝露点计算结果如图 3 所示。其中，空气温度  $t$  为 0~40 °C，相对湿度下的露点温度值为在标准大气压下的取值，分别为 40 °C、45 °C、50 °C、55 °C、60 °C、65 °C、70 °C、75 °C、80 °C、85 °C、90 °C、95 °C 和 100 °C。

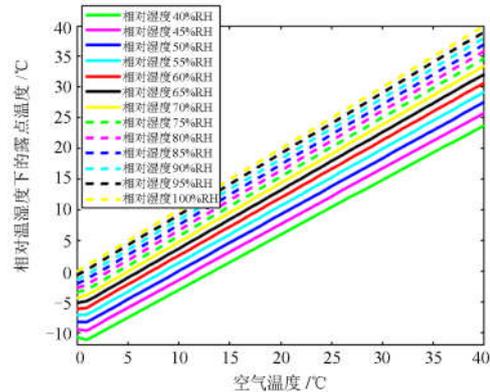


图 3 不同相对湿度下的凝露点计算值

Fig. 3 Calculation result of dewing points under different relative temperature and humidity values

基于图 3，本文提出一种开关柜受潮凝露机理研究方案。首先，在监控软件设计中将凝露点计算的算法(如 2.2 节所示)写入程序，以实时计算柜内、环境的凝露点；然后，根据计算结果生成曲线，并与柜内温度进行比较，直观显示防潮防凝露的效果；最后，进行综合分析判断，只要两条曲线没有相交，就表明凝露现象受到控制而没有发生，曲线间的距离表征了除湿效果，即距离越远，防凝露效果越佳。该方案中对各个参数的选择严格按照 2.2 节中的基于马努斯修正公式的空气凝露点温度计算公式，该方法是经过长期的工程运行经验所得出的，具有一定的合理性。

在软件设计时，除了硬件电路支撑外，最主要的支撑还是来自理论仿真，即对高压开关柜受潮凝露防治机理研究的模拟环境的搭建，其环境要素主要包括开关柜实物模型、配电房环境模拟、运行工况模拟和除湿装置运行模拟，如图 4 所示。

1) 开关柜实物模型的模拟环境设计。该模型严格按照中国南方电网公司配网开关柜技术规范设计制造，包括元件配置、外形尺寸和 IP 等级，并且按照底座配置、传感器安装配置要求进行特殊设计；外形尺寸、额定电压、额定电流、柜体密封按照电网规范设计，目的是为了使研究符合电网开关柜的实际结构；传感器安装配置的要求是为了实时和持续

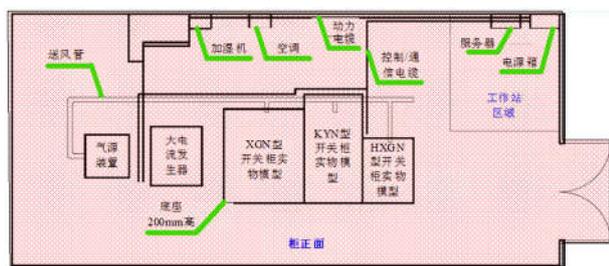


图4 开关柜受潮凝露机理研究模拟环境搭建

Fig. 4 Establishment of simulation environment for the mechanism investigation of damping and dewing phenomena occurred in the high-voltage switchgear

地采集开关柜各个隔室内影响凝露发生的3个要素,即温度、湿度、气压的分布和变化情况,是研究中需要用到的大量数据来源;而配置红外热成像测温仪,一个 $160 \times 120$ 像素的热像仪,可以提供数千个温度测量点,则可弥补传感器数量的不足,或者弥补安装位置局限的不足。

2) 配电房环境的模拟设计。包括配电房、加湿装置、空调装置;配电房可以安装三面开关柜实物模型等设备为基本要求,宽度 $4\,000\text{ mm}$ ,长度 $9\,000\text{ mm}$ ,高度 $3\,800\text{ mm}$ ,其他方面与一般的配电房要求无异;加湿装置的作用是提供可调节的湿度环境,选用智能型超声波加湿设备,每小时最大加湿能力为 $3\text{ kG}$ ,加湿量可根据需要进行调整,以实现配电房湿度的调节;空调装置的作用是提供可调节的湿度环境,选用变频驱动的空调将湿度的波动控制在最小。配电房环境的模拟设计可实现高温高湿、低温高湿的极端环境,或其他需要研究的贴近实际的环境。

3) 开关柜带载运行工况模拟设计。开关柜带载运行工况模拟通过大电流发生器来实现,大电流发生器输入电源为 $\text{AC}400$ ,输出电流为三相,最大为 $2\,000\text{ A}$ ,输出电流可调整为开关柜额定电流,或者任意电流,这样就实现了开关柜带载运行时发热效应的工况的模拟。大电流发生器通过电缆与开关柜母线室引出的铜排连接,连接方式为三相连接,每个开关柜都在电缆室内将三相短接起来,这样,当开关合闸时,就能实现与实际运行一样的带载运行工况模拟,可反映开关柜运行时发热对凝露形成的影响。

4) 开关柜几种常用防凝露防潮方法模拟使用设计。开关柜几种常用防凝露防潮方法分别为加热法、冷凝排水法、干燥空气除湿法。

硬件电路支撑方面,本文主要开发了基于转轮除湿法的干燥气源除湿装置,作为仿真环境模拟的

硬件支撑。该转轮除湿机的干燥气源技术将在3.3节做详细介绍。

因此,在该方案中,利用图3所示的计算结果,将具有很强的指导意义,具体阐述如下。

1) 当温度在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,湿度在 $70\%\text{RH}$ 以上时,凝露点与柜内温度的差值不会太大。具体而言,在 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,实施一定的防治技术具有指标意义。若柜内凝露点与柜内温差大于或小于 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,则需提前进行除湿控制,因此,柜内温度是控制湿度以外的第二个防凝露的重要参数。当其数值设置小于 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,将发出预警信息,提示及时巡视维护,控制柜内凝露点低于柜外环境凝露点。

2) 大气压可取当地的年平均大气压

通过将气压作为变量进行计算,其他两个要素即温度和湿度不变的条件下,当大气压变化 $\pm 5\%$ 时,对凝露点的影响在 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内。对于设备安装,当地的大气压主要受海拔高度、气候条件的影响,其偏差不可能超出 $\pm 5\%$ 的范围。因此,可将当地大气压作为一个常数来应用,柜内的传感器此时只需要温度和湿度达到要求即可,而不必为了采用凝露点控制技术进行凝露防治而增加气压传感器,这样一来,降低了成本,同时提高了可靠性。

该方案可对防凝露时的各要素进行控制,简要分析如下所述。

1) 控制温度是控制凝露点的直接方法,比较容易实现,这也是目前主要采用的方式,但这种方法忽视了防潮的诉求,因为柜内的湿气没有排出,提高温度只是提高了容纳湿气的能力。如果湿气还在进入,则凝结有可能接近甚至低于环境温度,这是一个非常不利的因素。同时加热导致开关柜运行受到一定的影响。

2) 控制湿度是控制凝露点的最好方法,这种方法实现了受潮凝露防治的要求,柜内的湿气被排出,柜内的温度几乎不会升高,此时柜内的凝露点远低于环境凝露点。

3) 控制气压是最不可行的方案,因为开关柜结构的原因,与外界相通的间隙很多,全面密封改造成成本很大,因此建立高压的可行性很低。

基于上述研究,本文认为在所提方案中应以控制湿度为主,控制温度则可作为一种辅助手段。当除湿设备发生故障时,该辅助手段可应急用于防止凝露的发生,直到计划停电检修时间的到来,以减少不必要的停电维护,所以控湿和控温这两者是主次关系、辅助关系和备用关系。

通过大量检索和调研发现目前对于开关柜的受潮凝露机理的建模往往过于理想化<sup>[31-33]</sup>。首先,

在物理模型上，其将开关柜简化为一个二维的封闭空间；其次，将开关柜视为一个空的封闭金属结构，该结构没有隔室、元件、局部封闭区域，因此凝露都发生在柜壁上<sup>[18]</sup>，如图 5(a)所示。这与实际的开关柜结构及柜内凝露现象可能随处发生的情况有很大区别，如图 5(b)所示。另一个局限就是当前所搭建的物理模型通常只研究了温度这一个变量，具体来说是通过理论方式来研究温度场的分布，用等温线对开关柜隔室进行分区，这无疑具有明显的局限性。

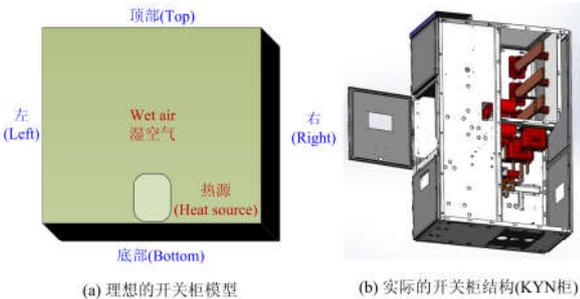


图 5 理想的和实际的开关柜模型

Fig. 5 Ideal and practical switchgear models

### 3.3 采用“源”的概念的干燥气源除湿系统设计

为了实现本文提出的一种高压开关柜受潮凝露防治关键技术研究方案，基于遍布开关柜内的传感器监测的数据，通过比较分析来确定最优的喷嘴和最佳的安装角度。因此，设计基于干燥气源技术的除湿系统，其基本结构如图 6 所示。

在介绍干燥气源除湿技术之前，首先简要介绍两种传统的除湿方法，这也是目前应用最广泛的两种除湿方法。一种是加热除湿法，其除湿设备为加热器。该方法通过加热器提高开关柜内的温度，提高空气溶解水分的能力，以达到降低相对湿度的目的，使凝露不易发生。采用该方法进行除湿时，柜内湿气没有完全排出，只是提高空气温度后提高了容纳能力，降低了相对湿度。此外，该方法受安装位置、功率大小和空气流通的限制，存在防凝露防潮死区，因此加热除湿法不能完全实现防潮防凝露。另一种传统的除湿方法是冷凝除湿法，其除湿设备为半导体除湿机。该方法利用制冷片作为核心部件，冷端产生非常低的温度，使空气中水分冷凝在凝水面，并通过排水孔排出。在环境温度变化缓慢的情况下，该方法可很好地避免凝露的产生。但如果环境温度变化较快，此时柜体内某些部位的温度快速降低至露点形成凝露，而此刻柜体内部的湿度反而会有所下降，这就导致除湿装置无法判断到凝露现象已经产生，从而无法快速消除凝露。因此，该除

湿方法有如下缺点：低温高湿时除湿效率很低、有漏水的风险、破坏 IP 防护等级、防小动物能力差等，这也限制了其大规模应用。

相比于上述两种传统除湿方法存在的明显缺点，干燥气源除湿技术是近年来才逐渐推广使用的一种创新除湿方法。该技术也称为干燥气体置换法。该方法是防治开关柜受潮凝露的创新方法，其基本原理是使用干燥气源制造干燥气体，升压调温后通过送风管通入开关柜，将柜内的潮湿空气挤出，形成置换效果，具有集中供气、效率高、速度快，除湿装置在开关柜外，变分散控制为集中控制、柜内无除湿元件、可改善配电房内潮湿环境、检修维护时不需要停电等优点。通过在配电房内安装干燥气源和送风管，各开关底部安装分支进风管，气源装置的运行根据设置定值自动启动、升压、调节温度和停止，即可以模拟开关柜采用干燥气体置换法进行凝露防治的效果。

在图 6 中，处理空气为从循环进气口进入，经转轮吸收水分后，变为干燥空气，进入气压调节与温度调节装置，在这里气压进行升高便于输送，对温度进行调节以适应开关柜防凝露防潮的要求和运行温度的要求。从气压与温度调节装置出来的干燥气体经过开关柜供气阀门(VS1)控制，向开关柜供气，气体从开关柜排风口或缝隙流散到室内，再通

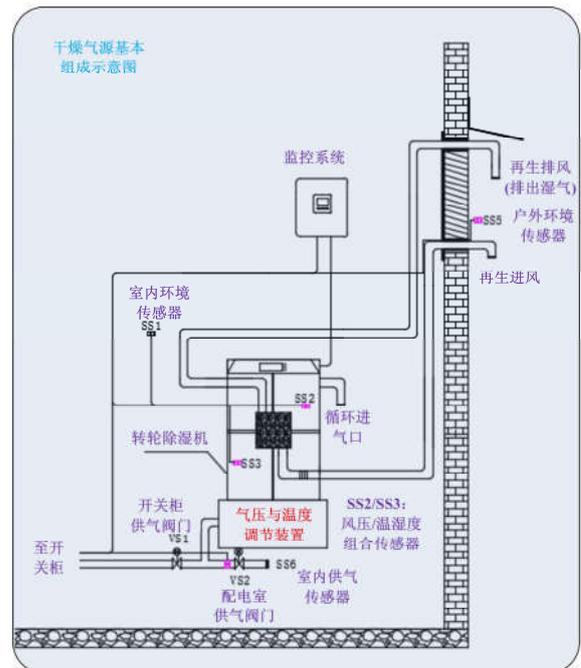


图 6 干燥气源除湿系统的基本结构设计

Fig. 6 Basic structure design of the dry-air source technology based dehumidification system

过循环进气口进入, 形成循环, 开关柜和室内空气的水分被吸收, 变得干燥。在开关柜不需要用气或气源充足的情况下, 通过室内供气阀门(VS2)进行供气, 以调节室内环境, 转轮吸收后的水分则通过再生排风排出室外。

实现干燥气源除湿的关键之处在于对开关柜内空气强制流动特性的研究, 然而, 目前阶段尚未出现有关该方面的深入研究。因此, 采用传统的除湿方法时, 往往存在防潮死区。而采用干燥空气除湿法的好处在于, 可以充分利用供气系统的气压, 使得柜内空气强制流动, 实现柜内整个空间均有干燥空气流通, 消除防潮死区。同时, 通过喷嘴角度布置, 驱动空气产生旋转流动增强除湿效率, 可向特定狭小部位供气, 实现全柜防潮、防凝露。为实现这一非常关键的研究, 可通过对遍布柜内的传感器监测的数据进行比较分析, 以找出最优的喷嘴和最佳的安装角度。

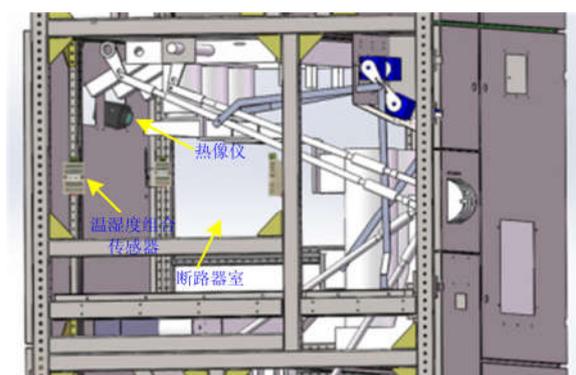
#### 4 展望

针对现有开关柜防潮凝露建模过于理想和简单、实用性不强等问题, 在第3节所提方案的基础上, 突破现有研究的局限, 未来需要着重结合测试分析方法进行开关柜的建模, 克服依赖于明确的物理关系作为基础的机理分析方法的不足。本文认为未来开关柜受潮凝露新技术的研究趋势, 将会是综合多种技术, 实现创新除湿防凝露技术的应用。而结合物联网技术、智能控制技术、“互联网+”技术的应用, 将改变目前分散管理的局面, 转变为集中监控管理, 可及时发现除湿故障和湿度超标, 并对近凝露点进行预警, 达到新的运维高度, 确保设备安全运行, 同时使得开关柜的运维效率大大提升。

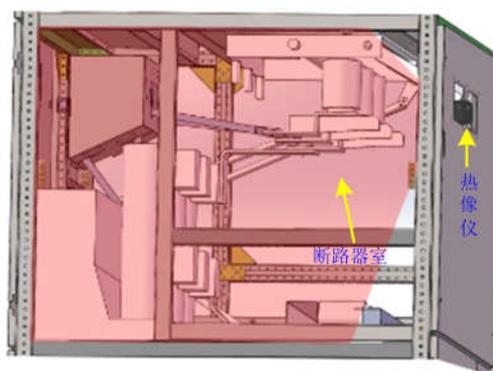
通过对开关柜进行三维立体的设计, 是一种行之有效的建模方法。以前文的三维开关柜立体设计为例, 图2呈现了开关柜整体及各隔室内部结构, 通过合理配置传感器, 再通过微环境研究的监控系统来进行测试分析, 将是一种有效的、实用性高的建模方法。同时, 为配合测试分析方法的有效实施, 还有必要搭建一个用于研究的模拟环境, 进行模拟开关柜的运行和数据的采集。

在上述建模方法中, 建模的过程依托于开关柜实物模型、除湿装置工作的真实情景进行, 在立体空间内测量各隔室不同地点的湿度、温度, 并绘制模型图。湿度的检测则通过布置在柜内各隔室的湿度传感器进行, 在每个隔室的底部、中部、顶部各分布4个传感器, 每个隔室共12个传感器。此外, 为实现数据的定点处理, 可采用温湿度组合传感器,

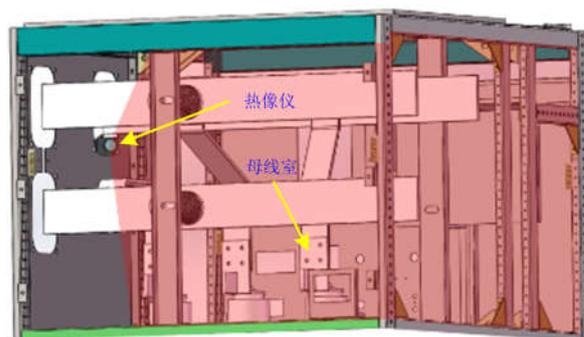
进而直接求出此点的凝露点数据。温度的检测则通过红外热成像仪进行, 由于开关柜空间狭小, 应选用广角(80 °C)的红外热像测温仪, 可监测到整个三维空间上数以万计的点, 可进行成像图上任意选点测温、任意划定区域测温, 最小成像距离满足柜内测温的需求。而在其景深内, 几万个像素点成像后, 可精确检测的温度点数达到1万个点以上。通过空间分析, 选取有代表性的点, 可以精确得到隔室内温度的分布情况。此过程测试方法建模的传感器布置设计如图7(a)—7(d)所示, 该图展示了XGN柜的情况, 而对于KYN、HXGN另外两种柜型的布置方式, 则基本一致。



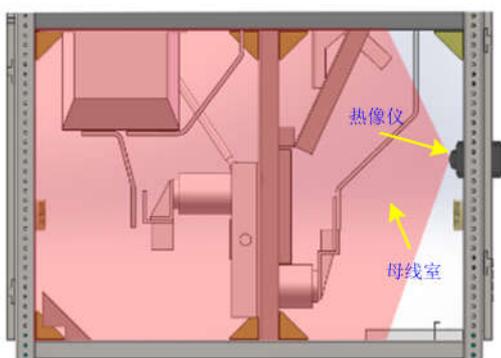
(a) XGN柜断路器室传感器布置示意图



(b) XGN柜断路器室红外热像仪布置及其测量景深示意图



(c) XGN柜母线室红外热像仪布置及其测量景深示意图



(d) XGN柜电缆室红外热像仪布置及其测量景深示意图

图7 高压开关柜内传感器布置设计

Fig. 7 Placement design of the sensors in the high-voltage switchgear

## 5 结论

当前,在国家新时代的号召下,我国涌现出技术创新的浪潮,电网公司更是重视创新驱动,除继续大力推进科技项目研发工作之外,还推出职工创新、金点子比赛等重要举措,成效显著。对于开关柜受潮凝露问题的研究,今后发展方向:一是要加强开关柜特有的运行环境下受潮凝露机理的基础性研究,深入揭示各要素的影响;二是研究新型防治技术和装置,增强效果,提高可靠性;三是要及时预警,及时干预,逐步实现状态检修。

开关柜受潮凝露机理建模的发展趋势,将会变得更加精细,应充分考虑开关柜的复杂结构,使所建模型更加趋于实际。而随着研究的开展,将会有更多的机构开展此项工作,建模的方式和方法也会更多。本文通过对开关柜受潮凝露技术的探讨,其创新之处在于提出了一种行之有效的高压开关柜受潮凝露防治机理的研究方案,涵盖了开关柜受潮凝露机理研究仿真环境的搭建、开关柜受潮凝露机理研究中基于最新的干燥空气除湿技术的方案研究和开关柜受潮凝露的详细防治措施,并对高压开关柜内传感器布置进行了详细设计。

本文认为未来高压开关柜受潮凝露防治研究的趋势,将会是综合多种智能防治技术,实现创新除湿防凝露技术的应用,而新技术的研究关键在于创新。本文认为应采用“源”的概念,用干燥气源来取代现有的除湿防凝露装置,将开关柜作为用气对象,其研究难点在于干燥气源装置开发、配气系统、气压稳定和温度调节控制、开关柜内空气强制流动控制的研究。本文通过对开关柜受潮凝露机理及其防治关键技术的探讨,可为相关设备管理部门

和运维部门开展开关柜受潮凝露机理及防治技术研究提供一定的借鉴和参考。

## 参考文献

- [1] 苏东, 马仲能, 李成翔, 等. 配网开关柜全生命周期成本模型及敏感度分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 150-155.  
SU Dong, MA Zhongneng, LI Chengxiang, et al. Life cycle cost model and sensitivity analysis of switchgear[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 150-155.
- [2] 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, 37(4): 51-53.  
LI Yingqi, WANG Zhanhong, MEI Chaomei, et al. Reason analysis of one dewing flashover accident in switchgear & its preventive measure[J]. Shaanxi Electric Power, 2009, 37(4): 51-53.
- [3] 苗红霞, 萧旋旋, 江冰, 等. 基于信息融合的预装式变电站健康状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 85-91.  
MIAO Hongxia, XIAO Xuanxuan, JIANG Bing, et al. State evaluation of prefabricated substation based on information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 85-91.
- [4] 徐志, 程乐峰, 余涛, 等. 电力节能诊断计算器手机应用程序设计[J]. 广东电力, 2015, 28(11): 116-120.  
XU Zhi, CHENG Lefeng, YU Tao, et al. Design of power energy saving and diagnosis calculator APP for mobile phone[J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(11): 116-120.
- [5] 杨家全, 陆海, 李邦源, 等. 基于帝国竞争算法的电网碳排放优化模型[J]. 广东电力, 2016, 29(3): 25-32.  
YANG Jiaquan, LU Hai, LI Bangyuan, et al. Optimization model of grid carbon emissions based on imperialist competitive algorithm[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(3): 25-32.
- [6] 汤毅, 程乐峰, 李正佳, 等. 基于智能台区的配电网经济运行及优化高级分析系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 150-158.  
TANG Yi, CHENG Lefeng, LI Zhengjia, et al. Design of economic operation and optimization analysis system based on intelligent area power network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 150-158.
- [7] 蔡德华, 陈柏熹, 程乐峰, 等. 实施需求侧管理对提高发电系统可靠性的影响探究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 51-56.  
CAI Dehua, CHEN Baixi, CHENG Lefeng, et al. Effective study about the implementation of demand side

- management on improving reliability of generation system[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(10): 51-56.
- [8] 林勇, 徐钦伟, 张俊强, 等. 基于ECP的轨道交通直流牵引供电系统开关状态评价算法[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(5): 16-24.  
LIN Yong, XU Qinwei, ZHANG Junqiang, et al. Status evaluation algorithm of DC traction power supply system switchgear based on ECP for rail transit[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(5): 16-24.
- [9] 曾文清. 高压开关柜防凝露技术研究与实践[J]. *冶金动力*, 2016, 32(10): 49-50.  
ZENG Wenqing. Study and practice of anti-condensation technology for high-voltage switchgear[J]. *Metallurgical Power*, 2016, 32(10): 49-50.
- [10] 肖羽. 配电网开关柜受潮与除湿[J]. *农村电气化*, 2016, 23(12): 28-28.  
XIAO Yu. Dampness and arefaction of switchgear in distribution network[J]. *Rural Electrification*, 2016, 23(12): 28-28.
- [11] 徐侃. 浅谈500 kV变电(换流)站户外箱柜防潮、防凝露治理[J]. *科技资讯*, 2013, 10(32): 121-122.  
XU Kan. The protective measures to avoid dampness and condensation of outdoor box at 500 kV transformer substation[J]. *Science & Technology Information*, 2013, 10(32): 121-122.
- [12] 林芳强. 10 kV金属封闭开关柜存在的柜内凝露现象及策略[J]. *科技尚品*, 2017, 28(9): 196-196.  
LIN Fangqiang. Indoor dewing phenomenon and strategy in metal-enclosed switchgear[J]. *Premiere*, 2017, 28(9): 196-196.
- [13] 李传江. 高压开关柜新型防凝露系统的研究与应用[J]. *华电技术*, 2016, 38(8): 16-18.  
LI Chuanjiang. Research and application of high-voltage switchgear new-type anti-dewing system[J]. *Huadian Technology*, 2016, 38(8): 16-18.
- [14] 郑悠, 方丹丹, 吴英俊, 等. 基于物联网的开关柜内凝露形成及除湿研究[J]. *机电工程*, 2017, 34(6): 664-668.  
ZHENG You, FANG Dandan, WU Yingjun, et al. Formation mechanism and countermeasures of dewing in the metal enclosed switch cabinet based on internet of things[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(6): 664-668.
- [15] 蒋涛, 孙微庭. 环网开关柜凝露问题的分析与解决方案[J]. *农村电工*, 2011, 19(1): 28-28.  
JIANG Tao, SUN Weiting. Analysis and solution of dewing problems for the looped-network switchgear[J]. *Rural Electrician*, 2011, 19(1): 28-28.
- [16] 应兵荣, 余永松, 王亮. 开关柜凝露、绝缘受潮原因及防范措施探讨[J]. *机电信息*, 2015, 22(30): 63-66.  
YING Bingrong, YU Yongsong, WANG Liang. Discussion on dewing, insulation dampness reason and countermeasures of switchgear[J]. *Mechanical and Electrical Information*, 2015, 22(30): 63-66.
- [17] 陈荣, 闫新, 严玮, 等. 开关柜内凝露现象数值模拟研究[J]. *资料节约与环保*, 2015, 11(5): 21-23.  
CHEN Rong, YAN Xin, YAN Wei, et al. Numerical situation study of dewing phenomenon in switchgear[J]. *Resources Economization & Environmental Protection*, 2015, 11(5): 21-23.
- [18] 陈荣, 闫新, 张弛, 等. 几种闭式开关柜防凝露方法的模拟研究[J]. *节能*, 2015, 35(9): 26-31.  
CHEN Rong, YAN Xin, ZHANG Chi, et al. Numerical study of several anti-condensation methods for closed switch cabinet[J]. *Energy Conservation*, 2015, 35(9): 26-31.
- [19] 齐昕, 张育臣, 唐喜, 等. 基于IEC 61850的配网成套开关状态监测系统研制[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(6): 109-114.  
QI Xin, ZHANG Yuchen, TANG Xi, et al. Development of distribution network switchgear condition monitoring system based on IEC 61850[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(6): 109-114.
- [20] BO Z Q, LIN X N, WANG Q P, et al. Developments of power system protection and control[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [21] SHIOIRI T, SATO J, OZAKI T, et al. Insulation technology for medium voltage solid insulated switchgear[C] // 2003 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, October 19-22, 2003, Albuquerque, NM, USA: 341-344.
- [22] WAHLE A B, PIETSCH G J. Effect of energy absorption systems on internal arc testing of medium voltage switchgear[C] // IEEE 17th International Conference on Gas Discharges and Their Applications, September 7-12, 2008, Cardiff, UK: 193-196.
- [23] LI Y Q, CHENG W L. A novel temperature monitoring system based on FBG for switchgear[C] // IEEE Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, March 28-31, 2010, Chengdu, China: 1-4.
- [24] HUANG X P, WANG X, QIANG W. Development of on-line monitoring equipment of medium voltage switchgear[C] // IEEE 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments (ICEMI '07), August 16-18, 2007, Xi'an, China: 388-392.
- [25] KANG J H, CHOI S M, DONG E, et al. Development of

electromagnetic actuator for hybrid type gas insulated switchgear[C] // International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG 2007), April 12-14, 2007, Setubal, Portugal: 499-503.

[26] 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.

[27] 李晓东, 陈中显. 一种配网开关柜防凝露的管理系统[J]. 电工电气, 2016, 23(9): 58-61.  
LI Xiaodong, CHEN Zhongxian. A kind of management system of anti-condensation for distribution network switch cabinet[J]. Electrotechnics Electric, 2016, 23(9): 58-61.

[28] 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, 37(2): 26-28.  
LIU Jiange. Impact of relative air humidity and dewing on mid-set switchgear and the strategy[J]. Electric Engineering, 2016, 37(2): 26-28.

[29] RUAN S F, WU M Y, DAI M L, et al. The study on a seismic test of high-voltage electrical switch cabinet[C] // Proceedings of the IEEE Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), March 27-31, 2009, Wuhan, China: 1-6.

[30] 建筑门窗玻璃幕墙热工计算规程: JGJ/T151—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.  
Thermotechnical specification for calculation of architectural glass windows & doors, and curtain: JGJ/T151—2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.

[31] 杨增汪, 王宜怀, 戴新宇. 基于 ZigBee 和 GPRS 的高压开关柜无线监测系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 203-206, 211.  
YANG Zengwang, WANG Yihuai, DAI Xinyu. Design of wireless monitoring system for high voltage switchgear based on ZigBee and GPRS[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 203-206, 211.

[32] 林根德, 陈达, 黄继来, 等. 某 35 kV 开关柜局部放电及受潮的原因分析[J]. 电工电气, 2017, 24(8): 39-42.  
LIN Gende, CHEN Da, HUANG Jilai, et al. Causes analysis of partial discharge and damp for certain 35 kV switchgear[J]. Electrotechnics Electric, 2017, 24(8): 39-42.

[33] 刘革明, 尹项根, 蔡树立, 等. 一种基于双 DSP 的环网柜测控保护终端[J]. 继电器, 2005, 33(8): 52-55, 60.  
LIU Geming, YIN Xianggen, CAI Shuli, et al. A device integrated with control measurement and protection functions based on two DSPs for ring main unit[J]. Relay, 2005, 33(8): 52-55, 60.

收稿日期: 2018-03-28; 修回日期: 2018-07-20

作者简介:

潘岐泽(1979—), 男, 通信作者, 本科, 工程师, 研究方向为配电网技术、配网自动化; E-mail: panqize\_qygdj@163.com

杨芳(1986—), 男, 工学硕士, 工程师, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: yangfang\_qygdj@163.com

杨志(1982—), 男, 工学硕士, 工程师, 研究方向为电力系统运行、供电可靠性。E-mail: yangzhi21st@126.com

(编辑 姜新丽)