

中置式开关柜凝露的产生、影响及防治

刘建戈

(淮安供电公司, 江苏 淮安 223000)

摘 要: 根据中置式开关柜发生绝缘故障的现象, 从空气湿度及凝露的产生、中置柜的结构、除湿装置分析入手, 研究空气相对湿度及凝露对中置柜运行的影响。提出从开关室的大环境、中置柜的小环境及运维检修策略三个方面采取措施, 实现水汽“进不来, 排得出, 抗得住”, 避免中置柜绝缘故障的发生。

关键词: 相对湿度; 凝露; 中置柜; 除湿

0 引言

KYN28 型中置式开关柜是上世纪 90 年代中期开发的产品, 简称中置柜, 由于具有防护等级高、安装维护方便、“五防”安全可靠等优点, 逐步取代了固定式和箱式开关柜, 在变电站得到了广泛的应用。但近年来的运行经验表明, 中置柜发生绝缘故障的比例远远超过固定式 (GG-1A) 及箱式 (XGN2) 等老式开关柜。是什么原因导致中置柜在运行一段时间后频繁出绝缘故障? 本文分析空气湿度及凝露的产生、中置柜的结构、除湿装置特点, 研究空气湿度及凝露对中置柜运行的影响及相应应对措施。

1 故障情况

某地在 8~12 月份连续出现多起中置柜绝缘故障, 在短时间内呈集中爆发趋势。各类电气期刊上也有大量中置柜绝缘故障方面的文章, 发生故障的开关柜通常为 KYN28 型中置柜, 运行时间 7~11 年。部分故障发生了开关柜爆炸和母线失电等情况, 导致了变电站的长时间失电。这多起故障中, 开关室内的相对湿度在 75~87%RH 之间, 92%故障开关柜内有水汽, 柜内绝缘件、母排等均有不同程度的受潮凝露现象; 60%左右室内电缆沟有积水, 母线及断路器触头上有氧化物; 约 70%在故障前系统发生单相接地。

从上述现象分析, 潮湿空气及凝露是中置柜发生绝缘故障的最初原因。

2 空气相对湿度与凝露分析

2.1 相对湿度

度量潮湿空气通常有两个指标, 即绝对湿度和相对湿度。绝对湿度亦称体积水分浓度, 指单位体积内水蒸气的质量, 用 d_v 表示,

$$d_v = m_v / V \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

(1)

式中: V —湿气的体积, m^3 ; m_v —水蒸气的质量, kg 。相对湿度是指湿空气中水蒸气的摩尔分数与相同温度和压力条件下饱和水蒸气的摩尔分数之百分比, 用 U 表示,

$$U = (x_v / x_{sv}) \times 100\% (\%RH) \quad (2)$$

式中: x_v —水蒸气的摩尔分数; mol/mol ; x_{sv} —饱和水蒸气的摩尔分数, mol/mol 。

日常生活中, 通常用相对湿度来表示空气潮湿情况, 如 60%RH。标准《高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求》(GB/T11022-2011) 中规定开关柜正常使用条件之一是日平均相对湿度小于等于 95%RH。

2.2 凝露

凝露是指环境温度低于空气相对湿度的露点温度时, 空气中的水蒸气凝结成水珠。露点温度是空气中水蒸气达到饱和状态而液化成露珠所需要温度。同一环境条件下, 空气相对湿度越高, 露点温度越接近环境空气温度, 凝露越容易发生。空气露点温度常用马格努斯修正公式进行计算^[1],

$$T_d = \frac{b}{\frac{a}{\text{Log}\left(\frac{e}{E_0}\right)} - 1} \quad (3)$$

式中: $e = U \cdot E_s$, $E_s = E_0 \times 10^{\frac{a-t}{b+t}}$; T_d —露

点温度, $^{\circ}\text{C}$; e —空气的水蒸汽压, hPa ; a 、 b —参数, $a=7.5$, $b=237.3$; U —空气相对湿度, $\%RH$; E_s —空气的饱和水蒸汽压, hPa ; E_0 —气温 0°C 时的饱和水蒸汽压, $E_0 = 6.11 \text{ hPa}$; t —空气温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

按公式 (3) 计算开关室内相对湿度条件下的露点温度, 如表 1 所示。在 $85\%RH$ 以上高湿情况下, 露点温度与环境温度之间的平均差值不到 3°C , $85\%RH$ 仅为 0.8°C ; 空气相对湿度越高露点温度与环境温度之间的平均差值越小, 越容易产生凝露。

表 1 大气条件下空气相对湿度对应的露点温度 $^{\circ}\text{C}$

温度/℃	相对环境湿度/%									
	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
16	5	7	8	9	10	11	12	13	14	15
21	11	12	13	14	15	16	17	18	19	21
24	13	14	16	17	18	19	20	21	22	23
29	18	19	21	22	23	24	26	27	28	28
32	21	22	23	25	26	27	28	29	31	31
35	23	24	26	27	29	30	31	32	33	34
与露点温度 差平均值/℃	11	9.8	8.3	7.2	6	5	3.8	2.8	1.7	0.8

某地处于华东平原, 全年以湿热天气为主, 春秋季节空气湿度大, 昼夜温差可达 $6\sim 14^{\circ}\text{C}$, 月平均相对湿度 $72\sim 84\%RH$, 其中秋季高于春季。开关室积聚湿气较多时, 易周而复始产生凝露, 积累到秋季量更大, 因此水汽引起的中置柜绝缘故障多发生在下半年。

2.3 对电气设备运行的影响

(1) 对空气绝缘的影响

研究表明, 当温度保持不变的条件下, 球间隙放电电压在 80% 以下低湿条件下, 随着相对湿度的增加, 球间隙放电电压逐渐增加; $80\%RH$ 以上高湿条件下随着相对湿度的增加, 间隙放电电压减小, 但高湿并不会造成放电电压严重降低。而有凝露时球间隙放电电压, 几乎降为正常值的一半^[2]。因此, 空气相对湿度小于等于 $95\%RH$ 时对开关柜的空气绝缘没有显著的影响, 也符合开关设备标准对运行环境相对湿度日平均 $\leq 95\%RH$ 、月平均要求 $\leq 90\%RH$ 的要求。

(2) 对导体的影响

大气对金属表面的腐蚀可分为干大气腐蚀、潮大气腐蚀和湿大气腐蚀三类。当空气十分干燥时,

大气中的氧产生常温氧化, 其特点是形成不可见的保护性氧化膜和某些金属失泽现象, 干大气腐蚀通常很缓慢。潮大气腐蚀是指金属在空气相对湿度小于 $100\%RH$ 时, 表面存在肉眼不可见的薄液膜层 ($10\text{nm}\sim 1\mu\text{m}$) 时发生的大气腐蚀; 在超过临界相对湿度以及空气存在杂质时, 腐蚀速率会增加。湿大气腐蚀是指金属表面存在肉眼可见的液膜 ($1\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$) 时发生的大气腐蚀, 如空气相对湿度约为 100% 出现凝露或水、雨、雾等形式直接溅落在金属表面上时。金属表面的液膜及其污染物, 往往使金属从化学腐蚀转为电化学腐蚀^[3]。

潮大气腐蚀中金属氧化腐蚀的空气相对湿度临界值, 钢为 $70\%RH$, 铜为 $60\%RH$, 铝为 $76\%RH$ 。将金属存放于该临界值以上的环境中, 氧化腐蚀速度随空气相对湿度值的增加而不断加速^[4]。中置柜故障有大量断路器手车触头及母排氧化现象, 如图 1 所示, 是潮大气腐蚀和湿大气腐蚀共同作用的结果。铜排氧化后, 粉状氧化物落在绝缘套管上, 容量形成导电通道, 减少了母排与柜体外壳之间的距离。断路器手车的动静触头氧化后, 一方面会有粉状氧化物落在触头盒内, 降低爬电距离; 另一方面加大动静触头之间的接触电阻, 易发生热故障, 发热后绝缘材料受热分解, 绝缘性能下降。



图1 受潮氧化的断路器触头

(3) 对绝缘材料的影响

开关柜的绝缘件有绝缘支柱、母线套管和触头盒三种, 通常是采用环氧树脂压铸而成。在潮湿环境下, 由于材料内部结构基团极性及其吸水性, 容易与水分子结合形成氢键, 使导电性增加, 表面电阻率和体积电阻率降低。连续 144 h 的湿度老化情况下, 环氧树脂表面电阻率在 $75\%RH$ 环境下由 $5.13\times 10^{13}\ \Omega$ 降为 $6.75\times 10^{12}\ \Omega$, 在 $95\%RH$ 环境下降为 $1.32\times 10^{12}\ \Omega$, 高湿度环境下表面电阻降为老化前的 $1/40$ ^[5]。

凝露会在绝缘材料表面形成结晶水, 当空气中粉尘溶解于结晶水后, 由于局部电子的快速运动和

结合, 会在绝缘材料表面形成小电弧燃烧, 破坏绝缘材料的表面绝缘。随着不断分解效应和污化效应的累积, 会在绝缘表面形成灰白色的粉末印痕彻底破坏绝缘性能, 并最终导致设备相间或对地短路^[6]。

3 潮湿空气的来源与凝露的形成

3.1 开关室内的水汽

在多起开关柜绝缘故障中, 出现开关室电缆沟内有积水现象。故障发生前一周曾有降雨过程, 检查发现有室内电缆沟低于室外电缆沟, 且入室的电缆沟口处未做防水处理, 导致室外电缆沟内积水倒灌入室内, 水深达 20cm。电缆沟进入开关室时通常都采用防火胶泥和防火板进行防火封堵, 并防止小动物进入。防火胶泥时间长易干裂, 没有防水作用, 室外电缆沟有积水时便会渗入室内电缆沟。另一种情况是变电站四周有蓄水的水稻田, 室内电缆沟底部不断渗水。进入电缆沟的水缓慢蒸发到开关室空气中, 一部分通过出线仓进入中置柜中, 电缆沟积水是开关室空气相对湿度增大的一个重要原因。

一座发生绝缘故障的变电站电缆沟非常干燥, 沟内灰尘呈粉末状, 但开关室内空气相对湿度达到 82%RH。检查发现故障开关柜后侧正对排气扇口, 其他越接近排气扇口的开关柜水汽越严重, 铜排(未加绝缘护套)和静触头铜绿越多。排气扇口使开关室内空气与外界空气直接相通, 户外高湿度的空气直接渗透进室内。开关室进气口或排气扇口虽有百叶窗, 但由于其上下或前后对称设计, 使开关柜腹背湿空气形成对流, 使高湿空气直接进入开关室和开关柜内。因此, 进气口和排气扇口是开关室的空气湿度增大的另一个重要原因。

3.2 开关柜内的水汽

潮湿空气进入开关室后会逐步进入开关柜中, 一是通过开关柜出线仓的电缆孔, 二是通过柜体结构间的缝隙逐渐渗入。电缆沟内积水和潮湿空气通过未封都好出线仓电缆孔进入开关柜, 是开关柜内潮湿空气产生的最直接途径。从排气扇口和通风口进入及通过电缆沟盖板缝隙蒸发到开关室的潮湿空气, 会通过开关柜壳体的缝隙缓慢地进入柜体内。KYN28 型中置柜壳体由 2mm 厚敷铝锌钢板双重折弯组装而成, 柜体的外壳和各功能单元的隔板均采

用螺栓联接, 防护等级为 IP4X, 对液体及气体无防护等级, 潮湿空气进来慢排出更难。

3.3 柜内凝露的形成

进入柜内的潮湿空气, 当温度降至露点温度以下时便开始凝露。但在检查时发现柜门上没有水汽, 柜内的板上却敷了一层水珠。中置柜的柜门是喷塑的普通钢板, 塑料的导热系数在 0.2~0.5 W/mK 之间, 柜内是导热系数为 54.4 W/mK 敷铝锌钢板, 同样的环境下敷铝锌钢板比喷塑的普通钢板具有更好的导热性能, 温度下降时敷铝锌钢板表面温度下降更快, 最先形成凝露。柜门温度下降较慢, 且其空气流通好于柜内, 因此出现了柜内结露柜门不结露的现象。排气扇口让潮湿空气进入开关室, 靠近的开关柜先得水汽; 夜晚温度下降时, 排气扇口进入的冷空气也使靠近的开关柜先降温凝结成水。

柜内母线仓敷铝锌钢板的凝露形成的水珠, 顺着钢板淌到仓底, 一部分则淌到母线套管和触头盒上。几起故障中, 氧化最严重的两座站的开关柜内铜排没有加装绝缘护套, 而电解铜的导热系数达 401W/mK, 环境温度下降时铜排的温度下降更快, 更容易凝结水。水滴顺着横母线流向垂直的引下排, 进入上静触头盒, 上静触头盒受潮绝缘性能下降和断路器上触头氧化。这也是绝缘故障点主要发生在断路器仓的上触头处或母线仓内的原因。



图2 受潮氧化的铜排和静触头

虽然开关室内的湿度未超过日平均相对湿度 $\leq 95\%RH$ 的要求, 但高湿时段渗入开关柜的潮湿空气, 夜晚气温降低时凝结成水珠附着在敷铝锌钢板、导体和绝缘件上, 发生缓慢的腐蚀, 短时间对绝缘影响不明显。日积月累对绝缘材料的缓慢影响和铜排的氧化作用, 达到一定程度和条件时, 就发生了绝缘故障。这也是多起发生绝缘故障的中置柜运行了 7~11 年的原因。发生故障前出现系统单相接地的故障, 之前开关柜的绝缘已非常薄弱, 接地后非故障相电压上升 1.73 倍, 导致绝缘击穿发生故障。

4 除湿装置

开关室和开关柜应进行除湿防止凝露，才能保证开关柜的安全运行。常用的除湿方法有：加热、冷却、空气流动、压缩、固体吸附和液体吸收式等除湿方法^[7]。变电站内潮湿空气的处理主要采用加热、冷却和流动三种方式，根据使用的位置可分为用于开关室和用于开关柜内的除湿设备。

4.1 开关室的除湿设备

开关柜室内常用的除湿设备有空调和工业除湿机两种。空调的主要功能是制冷和制热，除湿是附加功能。其原理是当空气流过蒸发器时，由于冷却降温作用使空气温度达到露点温度以下，部分水蒸气会凝结成水析出，从而达到除湿的目的。工业除湿机的工作原理与空调除湿原理一致，但进风和出风量大，可分为降温型、一般型和调温型三种机型。降温型除湿机空气经冷凝除湿后温度随之降低，一般型除湿机使除湿后的空气再经过冷凝器加热升温，调温型除湿机是出风温度可进行调节，后两者除湿效果更好。

空调所带除湿功能的除湿量为专业除湿机的30%左右，空调除湿带来整个空间温度的降低，降低了空气的湿度，但是也可能导致在不希望的地方出现凝露。一般型和调温型除湿机不会带来空间温度的降低，只会将水蒸气冷凝为水，而且不同程度的提高了空气温度，更宜于开关柜室干燥环境的建立。工业除湿机的进气量大于空调，进气滤网过滤掉空气中的灰尘等杂质，净化空气的效果也远好于空调。

此外，开关室中还利用空气流动进行除湿，主要是利用开关室的门窗和排气扇。打开门窗或开启排风扇让室外干燥的空气进入室内，置换出室内潮湿的空气，门窗是自然通风，而排风扇是强排风。门窗和排风扇需要人工开启，有时也会让室外的潮湿空气进入室内。

4.2 开关柜的除湿装置

开关柜的除湿装置主要有加热式和制冷抽湿式两种原理，其中加热式除湿控制器有凝露控制和温湿度控制两种类型。凝露控制器是在相对湿度为93%RH 拐点处，触发启动加热，使柜内温度始终高于露点温度，破坏凝露条件形成。其凝露传感器采用高分子半导体电阻材料，吸收水分后阻值变大，高湿状态下灵敏度高，但 93%RH 的拐点对凝

露的预防过迟，对整个控制起不到预防的作用。温湿度控制器采用温度或湿度的控制方式，在相对湿度大于 85%或温度低于 5℃时启动加热，相对湿度小于 75%RH 或温度高于 13℃时加热器停止工作。在温度高且相对湿度较高未达到启动值时，但露点温度和环境温度很接近，控制不及时有可能发生凝露。

加热型除湿装置的常用加热器有梳状铝合金加热板和薄式硅橡胶加热板。梳状铝合金加热板利用空气自然散热，工作时表面温度可达130℃，连续加热寿命3~4个月，由于变电站内所用电压偏高，实际使用寿命更短。薄式硅橡胶加热板散热面紧贴柜体敷铝锌板上，利用柜体的敷铝锌板散热，另一面浇铸了一层硅橡胶，工作时表面温度不超过80℃，连续加热寿命可达15~20年^[8]。在加热器发生断线等故障时，目前普通的除湿装置没有监测和报警功能，而一些智能温湿度控制器具有加热回路自检和报警功能，便于及时处理。



图3 梳状铝合金加热板和薄式硅橡胶加热板

中置柜使用的制冷抽湿型除湿装置，利用半导体制冷片产生低温点，通过使空气中的水分在制冷片的冷端表面凝结成水滴，顺着冷凝槽和管道排出柜体，起到对开关柜的除湿效果。制冷抽湿型除湿装置因需要向外排水，故在室内开关柜使用并不多，常用于室外环网柜和配电箱等。

5 防治凝露的措施及应用

避免因潮湿空气及凝露产生中置柜绝缘故障，应从开关室的大环境、中置柜的小环境及运维检修策略三个方面采取措施，实现水汽“进不来，排得出，抗得住”。

5.1 开关室内除湿防潮

防止开关室积水必须要从电缆沟的防水做起。首先要减少室外电缆沟的积水，电缆沟应按0.5~2%设置坡度，在集水井处配置自动排水系统，排出电缆沟积水。其次应使室内电缆沟高于室外电缆沟 20cm；电缆沟进入开关室时，在防火墙外侧增加防水墙。室外电缆沟靠近开关室位置，可

采用一块透明的有机玻璃盖板替代笨重的水泥盖板,方便检查电缆沟积水和防水墙情况。由于特殊地理环境造成沟底渗水的室内电缆沟,须对沟底和立面用 SBS 防水材料进行处理,再抹上防水砂浆。电缆沟一般位于地面以下会沉积湿气,自然通风性差形成不空气对流,水分散发慢,可将室内电缆沟设置几处网格状镂空盖板,便于检查和水汽散发。



图4 电缆沟透明盖板和镂空盖板

对于开关室的排气扇口可以直接封掉,需要排风时可直接打开门窗;或将其安装窗户,仅在需要打开,但排气扇的安装位置比较高,操作不方便。实际上,开关柜在运行时产生的热量非常小无需排风,很多开关室无排风扇安全运行至今。目前,变电站的典型设计中开关室都设有排气扇口和进气口,需要按地区的环境条件区别对待。

在控制水汽进入开关室的基础上,安装除湿装置可有效降室内空气相对湿度。开关室除湿装置普遍采用一般型或调温型工业除湿机,可根据开关室面积选用除湿量相应的除湿机:通常除湿量 50 升/日适用面积 50~70 m²,除湿量 90 升/日适用面积 100~150m²左右,除湿量 168 升/日适用面积 150~240 m²左右。由于中压出线保护装置安装在开关柜面板上,开关室内基本装有空调,空调与除湿机的配合使用,可有效地降低开关室中空气含有水蒸气的绝对量^[9]。使用过程中注意对空调和除湿机的保养,至少每季度清除过滤网灰尘,检查排水管道。

5.2 开关柜内除湿防潮

开关柜的除湿装置宜选用温湿度控制器,宜可调温湿度启动值和有回路故障报警功能;在日温差大的地区或时段,低温的启动值提高至 10℃~15℃,高湿度地区或季节,湿度启值调到 55%RH~70%RH,以扩大环境温度与露点的差值。加热器应采用薄式硅橡胶加热板,并将传感器和加热板分别安装在柜内两侧;在雨季及高湿天气下,应将加热板长期投入运行,其他时段置于自动

运行状态。如选用梳状铝合金加热板,宜配置风扇使热空气快速流动,同时所用电电压应不超过额定电压的 5%。

无论是加热后的空气还是积聚在开关柜内的潮湿空气,必须排出开关柜才能带走水分。中置柜的结构造成了长期缓慢进入的潮湿空气很难及时排出,因此必须增加开关柜内空气流通的通道。一种方案是在母线仓的泄压通道板上安装排风扇,出线仓和断路器仓由于泄压通道板狭窄而无法安装。母线仓上安装排风扇后,可向柜外抽出潮湿空气,但同时也将柜底部潮湿内空气抽上来;或向母线仓内吹入干燥的空气,相比较而言向内压风效果更好。在风扇故障时,因在母线正上方需要停母线处理,是不利因素。另一种方案是,在出线仓、母线仓和断路器仓的泄压通道板上加工百叶孔,出口方向向侧面,柜内空气与柜外自由流通,也可阻止向下的灰尘落入。

开关柜采取除湿防潮措施的基础上,还应选用性能优良的绝缘材料抵御水分对运行的影响。前文分析了铜排由于很高的导热系数,在达到露点温度时更快地凝露,绝缘橡胶热缩套的导热系数 0.2W/mK 左右,加装绝缘橡胶热缩套不仅加强了母线的绝缘,也降低了潮湿空气直接在母排上凝露的概率。绝缘件应采用环氧树脂或 SMC 材料等阻燃性绝缘材料,不可采用聚碳酸酯、酚醛树脂或聚氯乙烯等有机绝缘材料;爬距应大于等于 20mm/kV。母线绝缘套管应选用带双屏蔽结构,如图 5 所示套管内壁有与导体相连的均压环,外部与柜体外壳相连的屏蔽罩,改善套管内外的电场分布,避免因局部放电对绝缘的破坏。

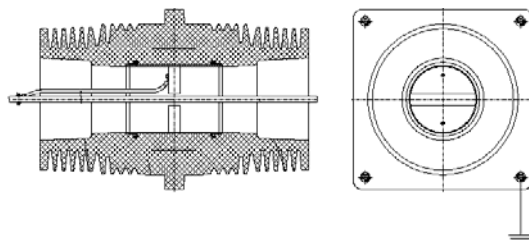


图5 双屏蔽母线套管

5.3 运行检修策略

在防止水汽进入开关室和开关柜的基础上,还需要加强对环境的监控和开关柜的运行管理,优化检修策略,将可能发生的绝缘故障的隐患消灭在萌芽状态。

环境的监控重点要关注雨天室外内电缆沟的积水, 及浓雾等高湿天气下开关室内空气相对湿度。雨季到来之前对电缆沟积水井、水泵等排水设施进行检查和试验, 确保排水设施能正常工作。雨后及时检查室外内电缆沟有无积水, 室内相对湿度及工业除湿机和开关柜上除湿装置是否已启动, 必要时人工启动。日常巡视中, 应采用“望、闻、听”的方法检查开关柜有无水汽、臭氧味和放电声, 发现异常应及时停电处理。每季度或发现异常现象时, 应开展局放和暂态地电压的带电检测; 局放在 8~15dB 时为注意状态, 需要跟踪检测, 大于 15dB 则视为缺陷需要及时处理; 暂态地电压大于 20dB 则视为缺陷。在系统发生单相接地时, 及时查找和隔离接地点, 减少非故障相设备承受线电压的时间。

开关柜的检修周期 6 年, 由于母线检修涉及的停电范围大, 在状态检修策略下母线的评价通常都是良好状态, 普遍存在“失修”的情况。因此, 在开关柜投运 4~6 年内应安排一次母线检修。通过开仓检查和对母线的交流耐压试验, 评估环境对开关柜及母线长期运行的影响, 母线套管、触头盒的绝缘性能变化情况, 安排检修计划, 使母线处于健康的运行状态。应注意开关设备的交流耐压现场试验电压原为出厂试验电压的 80%, 在 2014 年后的规程取消了此规定, 如 10kV 母线检修时相对地及相间交流耐压试验值 34kV 调到 42kV^[10]。同时, 柜内除湿装置的传感器、控制器和加热器与一次设备应同步试验和维护, 确保其正常工作发挥除湿作用。

6 结论

空气相对湿度及凝露对中置柜的绝缘影响及至故障的发生, 是开关室环境、开关柜结构、绝缘材料和除湿装置等多因一果。完全避免凝露对开关柜的绝缘影响, 必须从水汽的产生入手, 从源头上减

少开关室和开关柜内潮湿空气; 配置合适的除湿装置, 确保除湿装置的正常和有效运行, 保持开关室和开关柜的干燥; 选用性能优良的绝缘材料, 抵御一般水汽的浸湿和抗湿度老化; 优化开关柜的运检策略, 及时发现和处理绝缘隐患, 防止潮湿空气及凝露对开关柜绝缘影响的累积效应。

参考文献:

- [1] JGJ/T151-2008, 建筑门窗玻璃幕墙热工和计算规程[S].
- [2] 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.
- [3] 邓飞凤, 裴锋, 刘拥军. 空气相对湿度对室外电气柜内金属腐蚀的影响及防潮措施[J]. 华中电力, 2008, 21(2): 57-60.
- [4] 郭滨滨. 电气设备结露及其防治对策[J]. 科技情报开发与经济, 2004, 14(3): 184-185.
- [5] 李波. 湿热老化对环氧树脂复合材料电学性能影响研[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [6] 孙伟, 胡小红, 董继明. 10kV 开闭所的全方位防潮[J]. 浙江电力, 2012(3): 26-27, 34.
- [7] 徐亚军, 孟宪利, 李富贵. 中置式高压开关柜除凝露的方法[J]. 煤矿电机, 2011(6): 106-107.
- [8] 岳新峰. 12kV 中置柜加热除湿方式探讨[J]. 高压电器, 2002, 38(3): 57-58.
- [9] 黄强, 陈贵亮, 张维静, 等. 变电站高压开关柜室防潮除湿方法及治理措施[J]. 安徽电力, 2012, 29(3): 37-39.
- [10] 江苏省电力公司. 输变电设备交接试验规程(Q/GDW 10108-02-001-2014)[Z]. 南京: 江苏省电力公司, 2014.

作者简介:

刘建戈 (1974-), 男, 江苏金湖人, 高级工程师, 从事电力系统自动化及电网运行管理。