

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.10.014

直流穿墙套管内部温湿度分布规律实验研究

梁基重¹, 李艳鹏¹, 张 昱¹, 徐丽萌², 李军浩²

(1. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 太原 030001; 2. 西安交通大学电气学院, 西安 710049)

摘要: 直流穿墙套管是连接换流站与阀厅的关键设备,其户内侧和户外侧处于完全不同的运行环境中,户内侧位于室内保持恒温;户外侧位于自然环境中,冬季环境温度最低可达 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$,昼夜温差达 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$,而室内外温差最大可至 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。文中针对这种大温差条件搭建模拟直流穿墙套管运行的实验平台,测量大温差条件下穿墙套管内部温湿度分布。实验结果表明:套管内部温度分布呈现上高下低的趋势,运行过程中套管内部户外侧靠近中下部的点温度最低,相对湿度最高且随着温度的降低而持续升高。套管内部湿度分布与温度呈相反的趋势,降温30 h后相对湿度最高可达66.39%,易产生凝露,降低套管内部绝缘可靠性进而发生闪络故障,影响直流穿墙套管的稳定运行。套管中心导杆不同负载条件下,内部温度分布对湿度的直接影响较小,温度通过影响电容心子内部水分的吸附与释放间接影响湿度的分布。

关键词: 直流穿墙套管; 温度分布; 湿度分布; 大温差

Experimental Study on the Temperature and Humidity Distribution Patterns Inside the DC Wall Bushing

LIANG Jizhong¹, LI Yanpeng¹, ZHANG Yu¹, XU Limeng², LI Junhao²

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030001, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The DC wall bushing is a key device connecting the converter station and the valve hall. Its indoor and outdoor sides are in completely different operating environments. The indoor side is located indoors to maintain a constant temperature. While, the outdoor side is located in a natural environment, the ambient temperature in winter can be as low as $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, the temperature difference between day and night can reach $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the maximum temperature difference between indoor and outdoor can reach $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. To address this large temperature difference condition, an experimental platform simulating the operation of the DC wall bushing is established to measure the internal temperature and humidity distribution inside the bushing under such conditions. The experimental results show that the temperature distribution inside the bushing shows a trend of high at the top and low at the bottom. During operation, the temperature of the point near the middle and lower part of the outdoor side of the bushing is the lowest, and the relative humidity is the highest and continues to increase with the decrease of temperature. The humidity distribution inside the bushing shows an opposite trend to the temperature. The relative humidity can reach up to 66.39% after cooling for 30 h, which is prone to condensation, reduction of insulation reliability inside the bushing and occurrence of flashover failure, affecting the stable operation of the DC bushing. Under different load conditions of the central conductor of the wall bushing, the internal temperature distribution has little direct impact on the humidity. The temperature indirectly affects the humidity distribution by affecting the adsorption and release of moisture inside the capacitor core.

Key words: DC wall bushing; temperature distribution; humidity distribution; large temperature difference

收稿日期:2026-05-05; 修回日期:2026-08-03

基金项目:国网山西省电力公司科技项目(52053023000N)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Shanxi Electric Power Company(52053023000N).

0 引言

近年来,高压直流输电领域发展迅速,作为连接换流站与阀厅的枢纽设备,直流穿墙套管的稳定性尤为关键^[1-4]。SF₆气体因其稳定的性能和高电气强度被广泛用作直流穿墙套管的气体绝缘介质。但由于套管内部气体残留、密封性差以及绝缘部件内部水分的吸附和释放等原因,SF₆气体中会含有少量水分,微水含量会直接影响套管的运行可靠性。2022年2月,雁门关换流站极1的±400 kV SF₆气体绝缘直流穿墙套管户外侧玻璃钢筒与电容心子的气固分界面处发生了严重的贯穿性闪络故障,故障当日最低温度-28.8℃,最高温度-3.7℃,昼夜温差可达25.1℃,这种极大的昼夜温差与户内外温差条件下直流穿墙套管的绝缘失效机理目前尚不明确。因此,探究在大温差条件下穿墙套管内部微水的迁移和汇聚机制,对于确保其长期稳定运行具有重要的研究价值。

目前的研究表明,环境温度会影响SF₆中的水分含量,IEEE对SF₆气体绝缘设备中的水分测量和控制方法进行了详细的研究和总结,并给出表示微水含量的方法^[5]。M C Lessard等人建立了可以实时监测水分的气体绝缘开关设备(GIS)实验平台^[6],测试了256天的SF₆气体温度和水分变化情况。SF₆气室内的水分含量随季节变化呈周期性变化,冬季含量较低,夏季含量较高。任项搭建了高压气体绝缘电流互感器测试平台^[7],采用露点法测量了环境温度急剧变化时电流互感器内部气体的露点、相对湿度和温度^[8-18]。

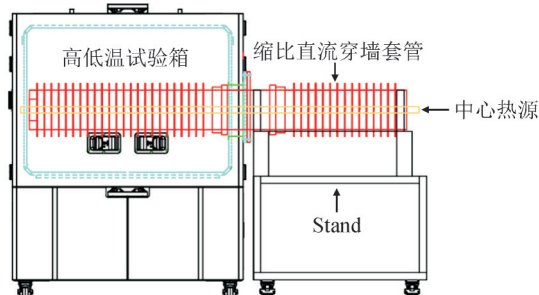
尽管环境温度对SF₆中微水含量影响的研究已较为成熟,但针对直流穿墙套管内部SF₆微水的迁移汇聚特性研究尚未涉足。因此对于大温差条件下直流穿墙套管内部微水迁移汇聚原理的研究具有重要意义。

文中搭建了实验平台,模拟大温差条件下直流穿墙套管的运行状态,监测套管户外侧环境温度变化30 h套管内部温度、湿度的变化情况,并研究了填充气体类别及中心导杆负载条件对套管内部微水迁移汇聚的影响。

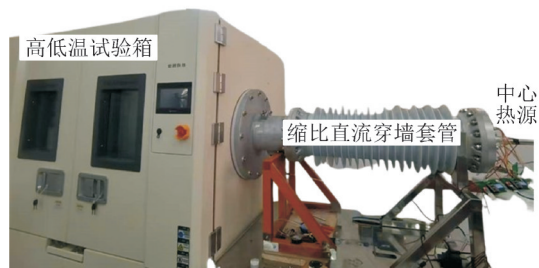
1 实验平台

为模拟大温差条件下直流穿墙套管的运行状态,搭建实验平台见图1。图1主要组件包括:缩比直流穿墙套管、高低温试验箱、中心热源3个部分。

本试验对于缩比套管户外侧的环境温度控制采取某公司设计研发的高低温湿热试验箱。箱体内部温度可在-40~150℃间调节,并能实现以1℃/h的速率降温。由于实验室内无法长时间施加大电流,无法采用中心导杆通流的方式作为热源加热,为模拟中心导杆实际发热状况,在中心导杆内部安装功率可调的热源。



(a) 实验平台示意图



(b) 实验平台实物图

图1 实验平台

Fig. 1 Experimental platform

套管内部温湿度的测量由传感器实现,将封装好的装置分别内嵌在套管的不同位置来实现不同位置微水的测量,传感器的安装位置见图2。户内侧和户外侧共取7个监测(point)点。其中测点3、测点1为户外侧及户内侧套管温度最高处,测点2为户内侧套管温度最低处,他们靠近法兰但是距离法兰有一定距离。由于放电事故发生在汇流环所在位置附近,测点4、测点5、测点6、测点7安装在汇流环所在的位置,可重点分析该处的温度变化规律。测量数据通过屏蔽线引出到直流穿墙套管外部实现微水的实时测量与数据的传输

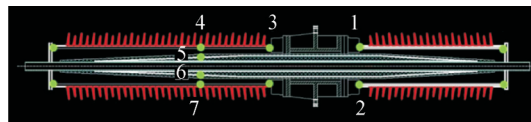


图2 传感器位置示意图

Fig. 2 Sensor position schematic diagram

测得各点的气体密度、温度、 B_{20} 可计算该点相对湿度的值^[19-21]。

$$\rho = \frac{m_v}{V} = \rho_{\text{气}} \frac{m_v}{m_{\text{气}}} = \rho_{\text{气}} \cdot B_w \cdot 10^{-3} \quad (1)$$

式(1)中: ρ 为水蒸气密度, g/m^3 ; $\rho_{\text{气}}$ 为气体密度, kg/m^3 ; m_{v} 为混合气体含微水质量, g ; V 为混合气体体积, m^3 ; $m_{\text{气}}$ 为 SF_6 气体质量, kg ; B_{w} 为微水质量比, $\mu\text{g}/\text{g}$ 。

传感器测得的微水体积比,将其转化为质量比的换算公式为

$$B_{\text{v}} = \frac{P_{\text{e}}}{p - P_{\text{e}}} \cdot 10^6 = 8.1 B_{\text{w}} \quad (2)$$

式(2)中: B_{v} 为微水体积比, $\mu\text{L}/\text{L}$; P_{e} 为在露点温度下的饱和水蒸气压, Pa ; p 为混合气体的总压力, Pa 。

绝对湿度与相对湿度间存在换算关系,由此可以计算出相对湿度

$$\rho = 216.7 \left[\frac{\frac{RH}{100} \cdot A \exp\left(\frac{mT}{T_{\text{n}} + T}\right)}{273.15 + T} \right] \quad (3)$$

式(3)中: T 为气体实际温度, $^{\circ}\text{C}$; $T > 0$ 时, m 等于17.62, T_{n} 等于243.21 $^{\circ}\text{C}$; $T \leq 0$ 时, m 等于22.46, T_{n} 等于272.62 $^{\circ}\text{C}$; A 等于611.2 Pa 。

2 实验结果

2.1 大温差条件下套管内部温湿度分布

由于北部地区冬季昼夜温差可达30 $^{\circ}\text{C}$,设置初始环境温度为0 $^{\circ}\text{C}$ 并以1 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 线性下降30 h;设置中心导杆的温度为45 $^{\circ}\text{C}$,安装倾斜角为0 $^{\circ}$ 。监测点温度随时间变化见图3,对于轴向温度分布,测点1和测点2的温度远高于其余监测点,由于户内侧环境温度高于户外侧环境温度,套管户内侧部分温度高于户外侧;测点3的温度高于测点4,户内侧气体由温度较高向户内侧流动。套管轴向温度分布同时受到环境温度和户内外气体交换的影响。

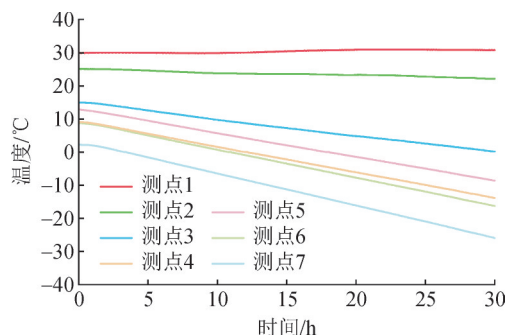


图3 监测点温度随时间变化曲线

Fig. 3 Temperature change curve of sampling point with time

对于径向温度分布,测点1的温度高于测点2、测点4的温度高于测点7、测点5的温度高于测点6,温度分布整体呈现“上高下低”的趋势,即横截面上

中心导杆上方温度高于中心导杆下方。由于 SF_6 气体的密度与温度有关,在重力作用下穿墙套管内部将产生自然对流现象,使同一径向截面上温度并非均匀分布,环形空间一定范围内离开发热固体表面越远气体的温度反而有所上升,传热学称之为等温线的反转。测点5的温度高于测点4,电容心子受到中心导杆的加热而温度较高。

观察温度动态变化过程可知,由于户内侧环境温度基本不变,套管户内侧监测点温度也基本维持不变;测点7温度基本与环境温度保持一致,温度变化速度也接近环境温度变化速度;电容心子户外上下点温度同时受到环境温度与中心导杆加热的影响,温度变化速度较慢;户内侧温度受穿墙法兰气孔处的户内外的气体交换、穿墙法兰自身温度下降以及中心导杆温度变化共同影响,温度变化幅度较小。30 h时的环境温度为-30 $^{\circ}\text{C}$,然而套管内部 SF_6 气体温度均高于-30 $^{\circ}\text{C}$,气体温度变化明显滞后于环境温度。

降温30 h后监测点的实际温度、露点温度和密度见表1,密度分布趋势和温度分布相反,户内侧温度较高, SF_6 气体受热膨胀向户外侧流动导致密度降低;同理, SF_6 气体受热向上运动中心导杆上部气体密度较大。测点7的实际温度最接近露点温度,最易发生凝露;而户内侧的测试点测点1和测点2实际温度和露点温度相差较大,不易发生凝露。文[7]表明无论环境温度如何变化,相对湿度都是表征的微水含量的最佳单位,后文采取相对湿度判断气体的凝露裕度。

表1 降温30 h套管内部参数表

Table 1 Parameter table of sampling points for 30 h cooling duration

测点	实际温度/ $^{\circ}\text{C}$	露点温度/ $^{\circ}\text{C}$	温度差/ $^{\circ}\text{C}$	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
1	30.80	-6.59	37.39	9.57
2	22.17	-10.55	32.72	9.91
3	0.20	-21.29	21.49	10.34
4	-13.84	-27.24	13.40	11.38
5	-8.60	-25.97	17.37	10.97
6	-16.22	-28.33	12.11	11.02
7	-25.90	-30.10	4.20	11.42

监测点相对湿度随时间变化见图4,相对湿度的分布趋势与温度分布相反,监测点的温度越高,相对湿度越低;户外侧相对湿度整体大于户内侧且存在明显上下分层,即相同径向截面上,靠下部的监测点相对湿度较大而更易发生凝露,靠上部监测点处相对湿度较小而不易发生凝露。户内侧相对

湿度基本保持不变。测点7处 SF_6 气体温度低且密度大且距离露点温度近,故相对湿度大。户内侧整体气体温度较高,不易发生凝露。

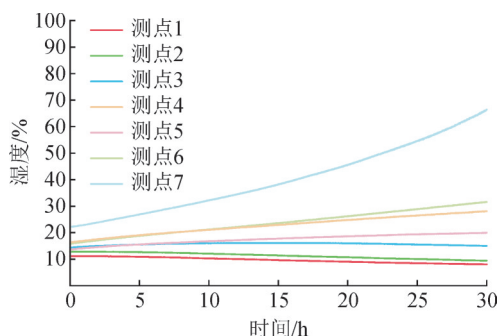


图4 监测点湿度随时间变化曲线

Fig. 4 Humidity change curve of sampling point with time

观察相对湿度的动态变化可知,0时刻套管内部相对湿度较为接近,但随着降温过程的进行,套管内部不同位置相对湿度随时间变化趋势有所不同,户内侧相对湿度远小于户外侧且随时间波动较小,测点7由于温度低且密度大相对湿度变化最为剧烈。测点7初始相对湿度为22.10%,降温30 h相对湿度增大至66.39%,相对湿度的显著增大可能会导致凝露和绝缘闪络。

2.2 内部气体对套管内部温湿度的影响

为探究 SF_6 气体初始水分的含量对于温度和相对湿度的影响,将套管内部的 SF_6 气体替换为空气,其余条件保持不变。监测点温度随时间变化见图5,套管内部充 SF_6 和空气对于套管内部温度分布没有明显影响,由于气体的导热系数显著低于固体和液体,气体的差异对于温度分布影响较小。

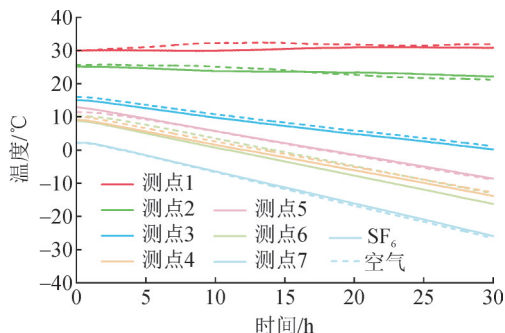


图5 监测点温度随时间变化曲线

Fig. 5 Temperature change curve of sampling point with time

监测点湿度随时间变化见图6,由于空气中水分含量较高,套管内部填充空气时各点的相对湿度均高于填充 SF_6 ;1~12 h时,户外侧环境温度下降,二者各点的相对湿度均以相同的速率上升;12~30 h,

由于空气条件下,测点7的相对湿度已达到80%,套管内部可能已经发生凝露,随着户外侧环境温度的下降,各点的相对湿度反而下降。而 SF_6 条件下各点的相对湿度继续上升,30 h后测点7的相对湿度为65%。在套管的实际运行中,气体内部微水含量的控制及为重要,降温情况下气体的相对湿度会显著上升,若相对湿度过高可能在降温途中就发生凝露,进而发生闪络,影响套管的安全运行。

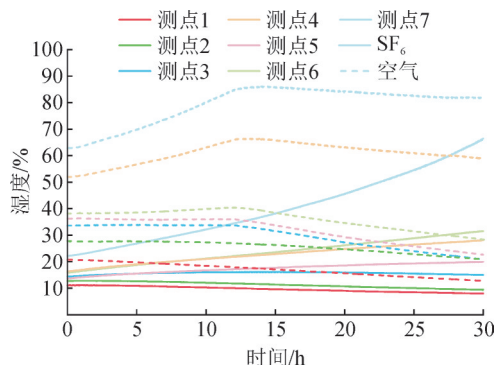


图6 监测点湿度随时间变化曲线

Fig. 6 Humidity change curve of sampling point with time

2.3 不同负载对套管内部温湿度的影响

2.3.1 小负荷

中心导杆载流减少时其发热功率将减少,对于套管内部温度分布产生影响。其他条件保持不变,设置中心导杆温度为35℃,套管内部监测点温度随时间变化见图7。中心导杆承载电流减少使其发热功率降低,发热量减少,套管内部温度均有所下降。套管户内侧监测点温度主要受环境温度影响,因此变化不明显;电容心子监测点即测点5和测点6温度变化最为明显,远高于其余监测点温度。

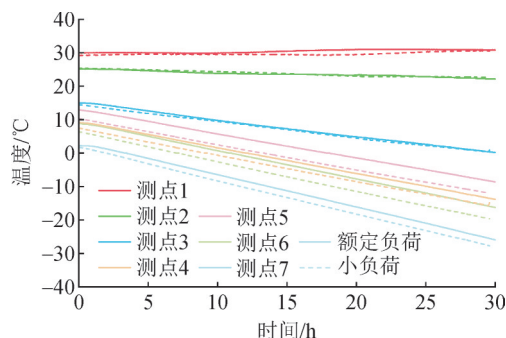


图7 监测点温度随时间变化曲线

Fig. 7 Temperature change curve of sampling point with time

额定负载及轻载下冷却30 h后的温度见表2,其中测点5、测点6的温度变化最为明显,远高于其他监测点的温度。

表2 不同负载条件下降温30 h后监测点温度

Table 2 Temperature under rated load and light load after cooling for 30 h

监测点	正常负载温度/℃	小负载温度/℃	温度差/℃
1	30.80	30.53	0.28
2	22.17	22.60	-0.43
3	0.20	0.90	-0.70
4	-13.84	-14.8	0.96
5	-8.60	-11.76	3.16
6	-16.22	-19.58	3.36
7	-25.90	-27.70	1.80

监测点湿度随时间变化见图8,负载电流减小时户外侧相对湿度变化较小。由于主要温度变化集中在套管中部的电容心子等固体部件处,SF₆气体通道狭窄且占比较少,故温度变化对于SF₆气体中微水含量的直接影响较小。中心导杆电流降低,电容心子的温度降低,电容心子吸附更多微水,测点7的相对湿度下降。

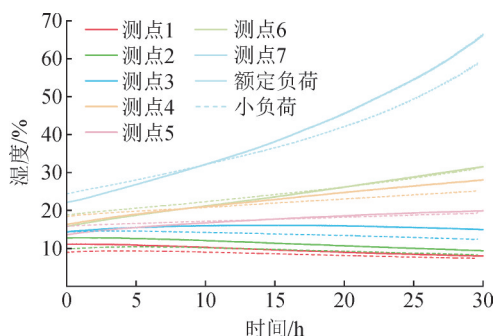


图8 监测点湿度随时间变化曲线

Fig. 8 Humidity change curve of sampling point with time

2.3.2 超载

中心导杆载流增加时其发热功率将增加,对于套管内部温度分布产生影响。其他条件保持不变,设置中心导杆温度为55℃,套管内部监测点温度随时间变化见图9。中心导杆发热功率增高,套管内部温度均有所上升。

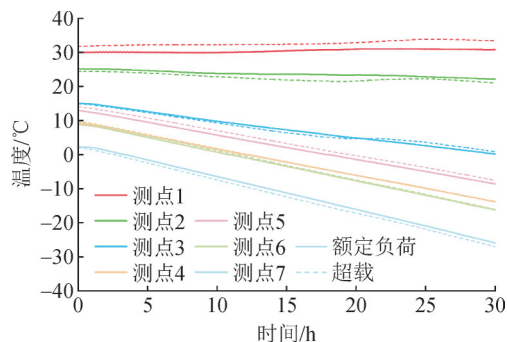


图9 监测点温度随时间变化曲线

Fig. 9 Temperature change curve of sampling point with time

监测点湿度随时间变化见图10。套管整体温度上升,电容心子释放微水,测点7相对湿度上升,且温度变化斜率不变。但温度变化集中在套管中部的电容心子等固体部件处,SF₆气体通道狭窄且占比较少,故温度升高对于其余各点湿度影响较小。

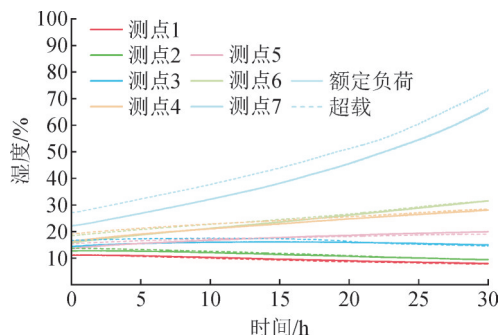


图10 监测点湿度随时间变化曲线

Fig. 10 Humidity change curve of sampling point with time

3 结论

文中针对直流穿墙套管实际运行时遇到的大昼夜温差与大户内外温差现象,搭建了研究套管内部温湿度分布的实验平台,分析环境温度动态变化时穿墙套管内部温度以及相对湿度分布特性,对比不同影响因素对于微水迁移汇聚特性的影响。主要结论如下:

1)户外侧环境温度下降过程中,由于气体的自然对流套管内部的温度呈现出上高下低的分布趋势,套管内部中下侧即测点7为套管内部温度最低的点;相对湿度的分布与温度分布呈现出相反的趋势并随着温度的降低持续升高。

2)内部填充气体的不同对于套管内部的温度分布没有影响。空气中含有较多的微水含量,套管内部填充空气时整体的湿度绝对值较高,甚至出现凝露现象。对于套管内部填充气体的微水含量控制极为重要。

3)负载电流对于套管内部温湿度的影响主要通过电容心子的吸附和释放微水实现,小负载时套管内部整体温度下降,电容心子吸附微水,相对湿度也下降;超载时套管内部整体温度上升,电容心子释放微水,相对湿度上升。

参考文献:

- [1] 李乃一,彭宗仁,刘 鹏. 110 kV 直流SF₆气体绝缘穿墙套管电场仿真分析[J]. 高电压技术,2020,46(1):205-214.
Li Naiyi, Peng Zongren, Liu Peng. Electric field simulation and analysis of 110 kV DC SF₆ gas-insulated wall bushing[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 205-214.

- [2] 程 显,刘 赛,葛国伟,等. ± 400 kV 直流穿墙套管用环保气体的绝缘特性[J]. 电工技术学报, 2025, 40(3): 900-912.
Cheng Xian, Liu Sai, Ge Guowei, et al. Insulation characterization of environmentally friendly gases for ± 400 kV DC wall bushing [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(3): 900-912.
- [3] 徐 政.直流输电的基本特性及其应用模式概述[J]. 电力建设, 2025, 46(10): 34-43.
Xu Zheng. Overview of basic characteristics and application modes of DC power transmission [J]. Electric Power Construction, 2025, 46(10): 34-43.
- [4] 任 冲,崔明建.面向新型电力系统支撑需求的构网型技术多维量化评估体系综述[J]. 智慧电力, 2026, 54(3): 1-11.
Ren Chong, Cui Mingjian. A review of multi - dimensional quantitative evaluation system for grid - forming technologies oriented towards support requirements of new power systems [J]. Smart Power, 2026, 54(3): 1-11.
- [5] IEEE Std C37. 122. 5: 2013 IEEE guide for moisture measurement and control in SF₆ gas-insulated equipment[S].
- [6] Lessard M C, Larocque G, Gendron S, et al. A new approach for assessing the moisture content in SF₆ - insulated equipment[C]// 2016 IEEE Electrical Insulation Conference(EIC), 2016: 539-542.
- [7] Ren Xiang, Ding Weidong, Zhou Wenwu, et al. The moisture in SF₆ insulated CTs considering current and change of ambient temperature[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(3): 1184-1191.
- [8] 丁 宁,穆海宝,梁兆杰,等. 水分对干式套管环氧浸渍纸材料介电特性的影响[J]. 电工技术学报, 2022, 37(11): 2716-2724.
Ding Ning, Mu Haibao, Liang Zhaojie, et al. Effect of moisture on the dielectric properties of epoxy resin impregnated paper for dry-type bushing [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(11): 2716-2724.
- [9] 吴奇宝. 环境温度对SF₆气体湿度影响的分析[J]. 高压电器, 2001, 37(5): 56.
Wu Qibao. Influence of ambient temperature on humidity in SF₆ [J]. High Voltage Apparatus, 2001, 37(5): 56.
- [10] Zargar Z H, Akram K J, Biswal G R, et al. A linear capacitive sensor for ppm moisture measurement in SF₆ gas-insulated switchgear [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021(70): 1-8.
- [11] Ma Jintan, Zhang Qiaogen, Guo Can, et al. Influence of moisture on the dielectric strength of insulators in GIS[C]// 2017 IEEE Electrical Insulation Conference(EIC), 2017: 58-61.
- [12] Carter H G, Kibler K G. Langmuir - type model for anomalous moisture diffusion in composite resins[J]. Journal of Composite Materials, 1978, 12(2): 118-131.
- [13] Zhou Fusheng, Huang Ruodong, Gao Chao, et al. Migration characteristics of moisture in RIP materials and its influence on surface insulation characteristics[C]// 2023 IEEE 6th International Electrical and Energy Conference(CIEEC), 2023: 829-832.
- [14] Oommen T V. Moisture equilibrium charts for transformer insulation drying practice[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984, PAS-103(10): 3062-3067.
- [15] Lam E, Hopkins M. Moisture evacuation procedure for gas insulated transmission bus[C]// 2005/2006 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2006: 969-975.
- [16] 张 欣,马径坦,张乔根,等. SF₆电气设备中水分控制标准的研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 240-246.
Zhang Xin, Ma Jintan, Zhang Qiaogen, et al. Research on control standards of moisture content in SF₆ electrical equipment [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 240-246.
- [17] 张丽娜. SF₆电器设备气体湿度与绝缘[J]. 高压电器, 2000, 36(3): 46-47.
Zhang Lina. The gas moisture and insulation on SF₆ insulated electric equipment [J]. High Voltage Apparatus, 2000, 36(3): 46-47.
- [18] 申积良,刘卫东,汤美云,等. SF₆互感器气体湿度异常情况分析及处理[J]. 湖南电力, 2006, 26(6): 20-22.
Shen Jiliang, Liu Weidong, Tang Meiyun, et al. Analysis and treatment of abnormal condition of gas humidity in SF₆ transformer [J]. Hunan Electric Power, 2006, 26(6): 20-22.
- [19] 李泰军,王章启,张 挺,等. SF₆气体水分管理标准的探讨及密度与湿度监测的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 169-174.
Li Taijun, Wang Zhangqi, Zhang Ting, et al. Discussion about the water vapor content standard & research on monitoring SF₆ gas 's density and humidity [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 169-174.
- [20] Zhang Han, Liu Yajin, Yan Jun, et al. Study on micro-water measurement method based on SF₆ insulation equipment in high altitude area[J]. AIP Conference Proceedings, 1971(1): 040036.
- [21] 张晓琴,朱洪斌,余 翔,等. 应用卡尔费休库仑法测定运行SF₆气体中的微量水分[J]. 高压电器, 2023, 59(5): 185-192.
Zhang Xiaoqin, Zhu Hongbin, Yu Xiang, et al. Micromoisture measurement of operating SF₆ gas by Karl Fischer coulometry [J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(5): 185-192.

梁基重(1985—),男,高级工程师,研究方向为高电压与绝缘技术(E-mail: chonggen@163.com)。

李军浩(1980—),男,博士,教授,主要从事电气设备试验技术及监测技术研究(通信作者)(E-mail: junhaoli@mail.xjtu.edu.cn)。