

基于吸附势理论的 SF₆ 高压电器设备气体绝缘状态预测

吕超¹, 胡晓光²

(1. 哈尔滨工业大学电气工程学院, 黑龙江省哈尔滨市 150001;
2. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京市海淀区 100083)

Forecasting of the Insulation Property of SF₆ Gas-Insulated HV Equipment Based on Adsorption Potential Theory

LÜ Chao¹, HU Xiao-guang²

(1. School of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China; 2. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Haidian District, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: The relative humidity of SF₆ gas-insulated HV equipment reflects its insulation property intuitively. Because the relative humidity is a variable of temperature, the off-line relative humidity in different temperature is to be converted from the on-line value, the adsorption of water by equipment must be taken into account in such a course. This paper describes the adsorption of water vapour by the SF₆ gas-insulated HV equipment in the relationship between adsorption potential and adsorption space. The procedure of making the curve of "adsorption potential - adsorption space" is presented. Based on the on-line monitoring, the off-line relative humidity of SF₆ gas is calculated in different temperature by using the curve, and the corresponding results are applied to forecast the insulation property of SF₆ gas. The simulative experiment has been done in laboratory.

KEY WORDS: SF₆; HV equipment; Insulation property; Relative humidity; Adsorption potential

摘要: SF₆ 气体的相对湿度可以直观地反映 SF₆ 高压电器设备的绝缘状态。因为相对湿度值随温度变化, 所以不同温度的离线相对湿度要根据在线监测得到的相对湿度换算得到, 这一过程必须考虑设备对水分的吸附作用。文中在吸附势理论的基础上, 采用吸附势与吸附空间的关系曲线作为描述 SF₆ 高压电器设备对水分吸附作用的特性曲线, 并给出了曲线的制定方法及流程。在实时在线监测的基础上, 利用特性曲线推导了温度变化时 SF₆ 气体相对湿度的离线计算算法。以离线相对湿度作为预测气体绝缘状态的依据, 并在实验室

进行了模拟实验。

关键词: 六氟化硫; 高压电器设备; 绝缘状态; 相对湿度; 吸附势理论

1 引言

SF₆ 高压电器设备中的微水含量是影响 SF₆ 气体绝缘性能的重要因素, 如果 SF₆ 气体中的水分含量超标, 甚至在某些条件下导致凝露, 将会对设备安全构成严重威胁^[1-5], 因此对 SF₆ 高压电器设备的微水含量进行监测是十分必要的。

电力行业中目前多采用 20℃ 时设备中的水蒸气与 SF₆ 气体的体积比 (μL/L) 数值作为控制水分含量的标准^[6], 但是, 因为体积比湿度随温度变化较大, 而且不能直观反映气体的绝缘状态, 所以使用起来十分不便。SF₆ 气体的相对湿度可以非常直观地表征气体的凝露裕度^[7], 进而与气体的绝缘状态直接相关, 利用当今的传感和通信技术对 SF₆ 气体的相对湿度进行在线监测可以清楚地了解气体当前的绝缘状态。

对 SF₆ 高压电器设备进行微水监测的意义还在于及时发现设备的绝缘隐患, 以便合理地制定设备的检修计划。由于不同温度下水蒸气的饱和蒸气压不同和设备对水分的吸附作用^[8-9], 相对湿度是随着温度变化的, 所以对 SF₆ 气体的相对湿度进行在线监测只能反映当前温度下 SF₆ 气体的绝缘情况,

而不能反映温度变化时的气体状态。这样就可能造成当监测到的实时相对湿度超标时,往往已经错过了设备的最佳检修时机。因此在实时在线监测的同时,对温度变化后 SF₆ 气体的相对湿度进行离线预测将更有意义。现有的不同温度下的湿度换算方法^[10-12]都只是简单的从 SF₆ 气体的热力学性态角度来考虑,没有计及设备对水分的吸附作用。

若实现对 SF₆ 气体相对湿度的准确预测,就必须考虑设备对水分的吸附作用,因此必须能够提供设备在不同温度下的水分吸附特性。由于设备内部构件的材料和表面处理工艺不同,对于如何描述 SF₆ 设备对水分的吸附特性被认为十分复杂,目前还没有统一的观点。有的厂家提供了考虑吸附效应的湿度随温度变化的校正曲线,但是每条曲线只能代表一种含水量随温度的变化情况,适用性很差^[13]。本文在 Polanyi 吸附势理论的基础上,采用“吸附势-吸附空间”关系作为吸附特性,总结了通过实验获得特性曲线的方法和流程,以此为基础推导了 SF₆ 气体的相对湿度在不同温度下的离线预测算法,并在实验室进行了模拟实验。

2 Polanyi 吸附势理论

SF₆ 设备对水分的吸附属于物理吸附中的范德华吸附。描述范德华吸附的理论很多,早在 1914 年,Polanyi 提出了吸附势理论^[14-15],他认为:固体的周围都存在着吸引力场,气体分子就是由于这种力场的作用而被吸附的。距离固体表面越近,这种力场就越强,距离固体表面越远,这种力场就越弱,固体对吸附层以外的气体基本上没有力的作用。从固体表面至固体对周围气体不起作用的那个空间叫做极限吸附空间。Polanyi 将表面附近某点的吸附势 e 定义为将 1mol 气体从吸引力实际上不起作用的气相吸引到该点时所作的功。吸附势相等的点构成了图 1 中各虚线所示的等势面。

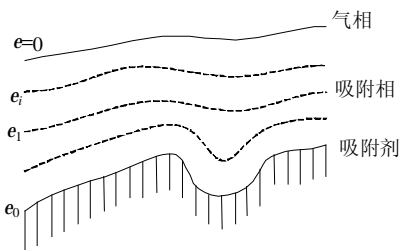


图1 吸附空间剖面图

Fig.1 Cutaway view of adsorption space

假设某状态下吸附相和气相的边界等势面为 i , 与等势面 i 相对应的吸附势和吸附空间的体积分

别用 e_i 和 j_i 来表示。根据吸附势与吸附空间的对应关系,可以将 e_i 写成 j_i 的函数形式

$$e_i = f(j_i) \quad (1)$$

式中 Polanyi 进一步假定 e_i 与温度无关,即吸附势的分布曲线在所有温度下都是一样的。

根据定义,吸附势的计算公式是

$$e_i = \int_{P_{gi}}^{P_{ai}} V_0 dP \quad (2)$$

式中 V_0 为吸附物的摩尔体积; P_{gi} 为气相的压力; P_{ai} 为吸附层 i 的压力。

Polanyi 认为范德华吸附与蒸气受压液化的过程相似,这样 e_i 就相当于将气体在恒温下由平衡压力 P_{gi} 压缩至该温度下液体的饱和蒸气压 P_{si} 时所作的功,如果将气体视为理想气体,则式(2)变形为

$$e_i = \int_{P_{gi}}^{P_{si}} \frac{RT_i}{P} dP = RT_i \ln \frac{P_{si}}{P_{gi}} \quad (3)$$

其中,气体常数 $R = 8.31 \text{ J/mol}$, T_i 为热力学温度。值得注意的是,如果吸附质是水,则式(3)可以变形为

$$e_i = RT_i \ln \frac{1}{H_i} = E_i(H_i) \quad (4)$$

式中 H_i 即为气相中水蒸气的相对湿度。

与 e_i 对应的 j_i 可以由吸附相的物质的量 n_{ai} 、 P_{gi} 以及吸附质液体的密度 r_i 求得

$$j_i = \frac{n_{ai} M}{r_i} \quad (5)$$

式中 M 为气体的分子量。

对 e_i 和 j_i 作图,就得到吸附特性曲线。实验证明 Polanyi 吸附势理论能在很宽的温度和压力范围内定量描述各种吸附剂吸附气体的平衡理论。因为理论假定式(1)与温度无关,因此,只要测定一个温度下的吸附曲线,就可以得到任何其他温度的吸附特性,这为绘制吸附特性曲线提供了方便,也是联系不同温度下气体状态的纽带。

3 吸附特性曲线的制作流程

因为基于吸附势理论的吸附特性曲线与温度无关,所以在用实验方法制作吸附特性曲线时对温度没有限制,这样大大简化了实验的流程,降低了对实验条件的要求。图 2 为模拟实验系统,其中 A 为体积为 V , 模拟 SF₆ 设备的密闭容器, B 为已知水分含量的 SF₆ 样气, A 与 B 之间经过控制阀门 S 相连接。为了在过程中测量气体的温度和相对湿度,在 A 上还装有温湿度变送装置 M。

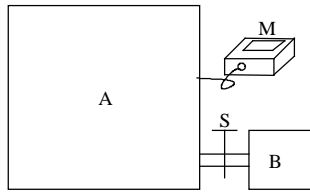


图2 模拟实验系统
Fig.2 Simulative system

具体的吸附特性曲线制作流程可以分为以下几个步骤：

(1) 用真空泵将 A 抽成真空。

(2) 通过阀门 S 控制流量，从 B 向 A 注入样气，每注入一定量的样气，记录进入 A 中的水分的总物质的量（通过流量和水分含量换算得到）和传感器 M 的数值。第 *i* 次记录：水分总量 n_i 、气体温度 T_i 、相对湿度 H_i 。

(3) 将 T_i 和 H_i 代入式(4)，计算得到 e_i 。

(4) 根据理想气体状态方程，水分中处于气相的物质的量为

$$n_{gi} = \frac{H_i P_{si} V}{RT_i} \quad (6)$$

将 n_i 和 n_{gi} 代入式(5)，得到

$$j_i = \frac{18(n_i - n_{gi})}{r_i} \quad (7)$$

(5) 重复(2)、(3)、(4)，作出 $e-j$ 关系曲线。

4 基于吸附势理论的 SF₆ 气体相对湿度的离线计算算法

在离线情况下对 SF₆ 气体的相对湿度进行计算的前提是设备内水分的总量保持不变。因此考虑推导各个状态下的水分总物质的量的表达式。

如果由在线监测手段已知当前温度 T_0 时的相对湿度为 H_0 ，则根据式(4)可以计算得到 T_0 时吸附层表面的吸附势 $e_0 = E_0(H_0)$ 。

假设 $j = F_n(e)$ 为吸附特性曲线的 n 次最小二乘近似多项式，则 T_0 时吸附相的物质的量为

$$n_{a0} = \frac{F_n(e_0) r_0}{18} \quad (8)$$

气相的物质的量可以由式(6)求得。这样，设备内水分的总摩尔数

$$n_0 = n_{a0} + n_{g0} = \frac{F_n(E_0(H_0)) r_0}{18} + \frac{H_0 P_{s0} V}{RT_0} = N_0(H_0) \quad (9)$$

如果温度 T_x 时的相对湿度未知，同样可以得到类似式(9)的 T_x 时的设备内水分的总摩尔数 n_x 的表达式

$$n_x = \frac{F_n(E_x(H_x)) r_x}{18} + \frac{H_x P_{sx} V}{RT_x} = N_x(H_x) \quad (10)$$

假设温度发生变化时，设备内水分的总量保持不变，则

$$n_x = n_0 \quad (11)$$

由式(11)实际得到了一个以 H_x 为未知数的非线性方程，利用求解非线性方程的牛顿迭代法^[10]，即可求得离线状态下的相对湿度 H_x 。

令 $F(H_x) = N_x(H_x) - n_x = 0$ ，根据牛顿迭代公式，具体的迭代过程可以表示为

$$F(H_{xk}) = \frac{F_n(E_x(H_{xk})) r_x}{18} + \frac{H_{xk} P_{sx} V}{RT_x} - n_x \quad (12)$$

$$F'(H_{xk}) = -\frac{r_x F'_n RT_x}{18 H_{xk}} + \frac{P_{sx} V}{RT_x} \quad (13)$$

$$H_{x(k+1)} = H_{xk} - \frac{F(H_{xk})}{F'(H_{xk})} \quad (14)$$

在一定的迭代精度下求得的 H_k 即为离线状态下的气体的相对湿度值。

5 算法的实验室模拟

首先依照图 2 搭建模拟实验系统。A 采用体积为 1m³ 的金属密闭箱体；B 为 SF₆ 储气装置；传感器 M 采用芬兰 Vaisala 公司的 DMP248 精密温湿度变送器，通过设计简单的 AD 转换电路和 RS232 通信程序，可以方便地获得 A 的温度以及相对湿度。

根据文中所介绍的特性曲线的制作流程，得到如图 3 所示实验系统的特性曲线利用最小二乘法，得到曲线的 $n=5$ 次近似多项式

$$j = 13.825 + 0.659e - 0.985e^2 - 0.282e^3 + 0.112e^4 - 0.008e^5 \quad (15)$$

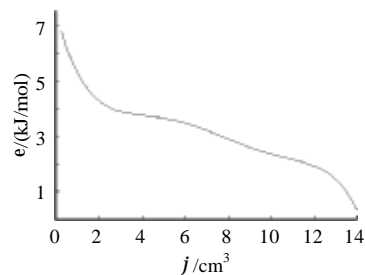


图3 实验系统吸附特性曲线

Fig.3 Adsorption character of simulative system

已知实验系统在 20℃ 时的相对湿度为 20.0%，得到各温度下的相对湿度预测值如表 1 中 H_1 所示。

断路器等 SF₆ 电器设备的内部材料多为环氧树脂，其工频闪络电压在相对湿度大于 30% 时呈明显下降的趋势。如将实验系统视为实际设备，当温度

表1 相对湿度预测值
Tab.1 Forecasted relative humidity

相对湿度	t/°C						
	-2	0	5	10	15	25	30
$H_1/\%$	30.1	29.4	27.4	25.1	22.7	17.0	14.9
$H_2/\%$	32.2	31.5	28.2	26.7	22.0	16.9	12.1

注: $H_{20^\circ\text{C}}=20\%$ 。

为 -2°C 时, H 值出现大于 30% 的情况, 说明虽然在当前温度 20°C 时, 气体的绝缘状态正常, 但当温度下降到 -2°C 以下, 系统的绝缘水平将要下降, 应该及时对设备进行检修。

表 1 中, H_2 为实际量测值, 可见利用文中方法得到的相对湿度离线预测值可以较真实地反应实验系统相对湿度随温度的变化规律。

如果不考虑吸附作用, 而只依据热力学换算公式

$$H_x = \frac{T_x}{T_0} \cdot \frac{P_{s0}}{P_{sx}} \cdot H_0 \quad (16)$$

可以得到, 当温度下降到 13°C 时, 相对湿度已经增加到 30.5%, 这会导致对设备绝缘状况的过坏估计, 造成不必要的设备检修。

6 结论

本文利用吸附势理论对 SF_6 高压电器设备的吸附特性进行了描述, 在此基础上推导了相对湿度的离线预测算法, 并以此作为判断气体绝缘状态的依据。文中方法使 SF_6 电器设备的水分管理更加科学化, 为 SF_6 电器设备绝缘状态的监测以及检修方案的确定提供了依据。

参考文献

- [1] 刘有为, 郑健超. 湿度对绝缘表面工频闪络电压的影响[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(5): 53-58.
Liu Youwei, Zheng Jianchao. Influence of humidity on power flashover voltage along insulating surfaces[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(5): 53-58.
- [2] 杜彦明, 顾霓鸿. 国内配电开关设备现状及事故情况[J]. 电网技术, 2002, 26(2): 70-76.
Du Yanming, Gu Nihong. Present situation and accidents analysis of distribution switchgear in domestic power system[J]. Power System Technology, 2002, 26(2): 70-76.
- [3] 汪汛, 邱毓昌. 气体绝缘开关装置(GIS)的近期发展动向[J]. 电网技术, 2003, 27(2): 54-57.
Wang feng, Qiu Yuchang. Recent development trend of gas insulated switchgear[J]. Power System Technology, 2003, 27(2): 54-57.
- [4] 林建龙, 邓敏, 林力辉. 高压绝缘设备在线监测系统[J]. 电网技术, 2002, 26(1): 86-88.
Lin Jianlong, Deng Min, Lin Lihui. An on-line insulation monitoring system for high voltage current transformer[J]. Power System Technology, 2002, 26(1): 86-88.
- [5] 苑瞬. 高压开关设备状态监测与诊断技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [6] IEEE Std 1125-1993, IEEE guide for moisture measurement and control in SF_6 gas-insulated equipment[S].
- [7] 李泰军, 王章启, 张挺, 等. SF_6 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 SF_6 gas's density and humidity[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 169-174.
- [8] Pfeiffer W, Ermeler K. Influence of the physical and chemical surface structure on the water adsorption characteristics of insulation materials[C]. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Darmstadt, Germany, 2000.
- [9] Ermeler K, Pfeiffer W. About the water adsorption characteristics of artificially degraded insulation material surfaces[C]. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Cancun, Mexico, 2002.
- [10] 李国兴. 环境温度对六氟化硫气体湿度的影响[J]. 黑龙江电力, 2002, 22(1): 33-36.
Li Guoxing. Effect of ambient temperature on humidity of SF_6 gas[J]. Heilongjiang Electric Power, 2002, 22(1): 33-36.
- [11] 白玉清, 郭利军, 杨建仁. SF_6 电器设备气体湿度与绝缘的探讨[J]. 山西水利科技, 2002, 8(3): 64-65.
Bai Yuqing, Guo Lijun, Yang Jianren. Study of gas humidity and insulation of SF_6 electrical equipment[J]. Shanxi Hydrotechnics, 2002, 8(3): 64-65.
- [12] 李明芸, 江秀臣, 曾奕. SF_6 气体微水含量在线监测系统[J]. 高压电器, 2004, 40(2): 98-100.
Li Mingyun, Jiang Xiuchen, Zeng Yi. An on-line monitoring system of humidity in the SF_6 gas[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(2): 98-100.
- [13] 陈化钢, 潘金奎, 吴跃华, 等. 高压开关电器故障诊断与处理[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2000.
- [14] 顾惕人, 李外郎. 表面化学[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [15] Ralph T. Yang. Adsorbents: fundamental and applications[M]. NJ: John Wiley & Sons, Inc, 2003.

收稿日期: 2005-08-25。

作者简介:

吕超(1978-), 男, 博士研究生, 从事 SF_6 断路器的绝缘监测与故障诊断等方面的研究工作;

胡晓光(1961-), 女, 教授, 博士生导师, 从事电气设备在线监测与故障诊断等方面的研究工作。

(责任编辑 韩蕾)