

SF₆ 断路器在线绝缘监测方法研究

胡晓光¹, 孙来军²

(1. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学 电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 在详细分析 SF₆ 气体中水分危害和气体水分测试方法的基础上, 介绍了一种新型的 SF₆ 断路器微水检测仪。检测仪所使用的 SF₆ 气体露点温度检测与温度补偿方法不仅可以克服压力因素影响, 而且还能够直观地表示气体的绝缘状况。经实验和测试证明该检测仪测量精确, 能够满足 SF₆ 断路器微水在线监测的需求。

关键词: SF₆ 断路器; 绝缘; 在线监测; 露点

中图分类号: TM 561.3; TM 93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2006)04-0001-03

0 引言

SF₆ 气体优异的绝缘与灭弧性能使 SF₆ 开关设备得到广泛的应用。多年的运行经验表明: 保证 SF₆ 设备可靠运行并就其绝缘性能进行监视的重要环节是对 SF₆ 气体中水分含量进行有效的监视。早在 20 世纪 70 年代 SF₆ 断路器用于电力系统的初期, 美国就曾发生过多起因湿度超标而引起设备爆炸的事故。近年来, 我国 SF₆ 断路器因湿度超标而引起事故也时有发生。SF₆ 气体中水分主要有 2 方面危害^[1-4]。

a. 水分引起化学腐蚀作用: SF₆ 气体在常温下是稳定的, 当温度低于 500℃ 时一般不会自行分解, 但当其中含有水分时, 温度在 200℃ 以上就开始分解, 生成物中含有无机酸中腐蚀性最强的氢氟酸和 SO₂; 更主要的是, 在电弧作用下 SF₆ 分解产物在与其反应生成水解衍生物, 它们均具有腐蚀性和毒性。

b. 水分对绝缘的危害: SF₆ 中的水分除对设备绝缘件和金属部件产生腐蚀作用外, 还在其表面产生凝结水, 附着在绝缘件的表面, 造成沿面的闪络, 当水分由液态变成固态后, 对设备的危害才减小。

因此, 做好 SF₆ 断路器微水含量监测对其安全运行十分重要。本文首先介绍了目前所使用的各种湿度检测方法; 其次在详细分析气体湿度随温度、压力变化情况的基础上, 开发了一种新型的 SF₆ 断路器微水检测仪; 最后介绍测试仪的使用和安装。

1 湿度测试方法

目前, 国内外微水监测技术的主要方法有: 重量法、电解法、振动频率法、冷镜法、阻容法等。这些方法各有利弊, 分别适用于不同情况, 下面就这几种方法加以介绍。

1.1 重量法

重量法是 IEC 推荐的仲裁法, 是一种经典的测量

方法。该方法让样气流经干燥剂, 通过测量干燥剂吸收的水分量, 与样气体积之比得到样气湿度。其优点是精度高, 最大允许误差可达 0.1%; 缺点是具体操作较困难, 尤其是对于低湿度气体, 同时浪费大量气体。因而只适合于测量露点 -32℃ 以上的气体, 实际上单纯利用该方法测湿度的仪器较少。

1.2 电解法

将干燥剂吸收的水分经电解池电解成氢气和氧气排出, 电解电流的大小与水分含量成正比, 通过检测电流测得样气的湿度。该方法弥补了重量法的缺点, 测量量程可达 -80℃ 以下, 且精度较好、价格便宜; 缺点是电解池气路需要在使用前干燥很长时间, 且对气体的腐蚀性及清洁性要求较高。

1.3 振动频率法

将重量法中的干燥剂换用一种吸湿性的石英晶体, 根据该晶体吸收水分质量不同时振动频率不同的特点, 让待测气体和标准干燥气流经该晶体, 因而产生不同的振动频率差 Δf_1 和 Δf_2 , 计算 2 频率之差即可得到样气的湿度。该方法具有电解法一样的优点, 且使用前勿须干燥。

1.4 冷镜法

冷镜法也是一种经典的测量方法。让气体流经冷凝镜, 通过等压制冷, 使得气体达到饱和结露状态, 测量冷凝镜此时的温度即是样气的露点。该方法的主要优点是精度高, 尤其在采用半导体制冷和光电检测技术后, 不确定度可达 0.1℃; 缺点是响应速度较慢, 尤其在低露点时, 达到平衡的时间甚至达数小时, 同时该方法对样气的清洁性和腐蚀性要求较高, 否则会影响光电检测效果或产生“伪结露”造成测量误差。

1.5 阻容法

阻容法是一种不断完善的湿度测量方法。利用一个高纯铝棒, 表面氧化成一层超薄的氧化铝薄膜, 其外镀一层多孔的网状金膜, 金膜与铝棒之间形成电容, 由于氧化铝薄膜的吸水特性, 导致电容值随样

气水分的多少而改变,测量电容值即可得样气的湿度。该方法的主要优点是测量量程可更低,响应速度非常快,因而多用于现场和快速测量场合;缺点是精度较差,不确定度多为 $\pm 2 \sim \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

在我国多使用露点仪或基于电解法设计的微水测量仪。这些方法主要有 3 个缺点^[1,3]。

a. 属于离线检测,不能实时反应 SF_6 的当前湿度。 SF_6 内水分结露点随断路器内、外温度,气体压力等环境条件的变化而改变,瞬时的高湿有可能带来严重后果。

b. 耗气量大。以上提到的各种方法大多是将断路器内部 SF_6 气体放出,使其流过仪器来检测湿度,这样在每次检测时都要耗费大量的 SF_6 气体,同时外部仪器每次接入都会给 SF_6 气体带来很多水分。

c. 测试复杂,费时费力。每次测试都需要搬运仪器到现场、连接导气管、安装阀门、等待传感器反应时间,在测试完后还要使用洁净干燥的气体(最好为氮气)清洗系统,每次测试都要耗费大量的人力、物力和时间。

另外,以上测试 SF_6 含水量的方法对外界环境温度、技术人员的技术熟练程度和经验要求较高。针对目前 SF_6 断路器维护、检修的现状,及设备维护向在线监测、自动化管理方向发展的需要,设计一套实用的 SF_6 断路器微水在线监测的系统不仅可减少很多的繁琐检修测试,节省许多不必要的开支,而且对于断路器本身的维护、运行状态监测具有重要意义。

2 在线监测方案设计

2.1 SF_6 气体湿度检测原理

SF_6 设备气体湿度随环境温度的变化而变化,且湿度的变化滞后于环境温度的变化。在温度变化时影响湿度的有 2 个因素^[4-5]。

a. 当温度增加时,零部件的水分放出量增加,使 SF_6 气体的含水量增加。而当温度降低时,断路器气室内壁以及零部件吸回一部分水分,使 SF_6 气体的含水量降低。设备中 SF_6 气体的含水量受到环境温度的影响,湿度随温度升高而增大,随温度降低而减小,但不完全是线性关系。

b. 温度升高饱和气体含水量增加,温度降低饱和气体含水量减少。

由于对断路器造成危害的是结露的水分,而不是绝对的含水量,因而,随着温度的变化,气体湿度如何变化将取决于以上 2 个因素的变化情况。我国电力行业 1997 年新颁标准《电力设备预防性试验规程》中规定湿度标准,电弧气室大修后不大于 150×10^{-6} (体积比),运行中不大于 300×10^{-6} ,并规定测试温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。新规程规定了测试温度,但在执行时比较困难,因为对于大多数的户外断路器而言,检测时保持温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 几乎不可能实现,这就需要将在任何温度下测得的湿度值转换到标定温度下。

我国现行标准中湿度的测量单位是无量纲的体积比^[6],它是 SF_6 气体的水蒸气分压与系统总压力之比,与压力无关。但实际上,绝缘却是与压力有关的,

气体压力越高,温度就应该越低,才能满足闪络电压不至于下降,即 SF_6 气体允许含水量与工作压力成反比关系,气体压力越高,允许含水量就越小。而用露点温度来表示气体湿度则可以克服这个缺点,露点温度本身就包含了压力因素,即不同压力下露点温度不同,不到露点温度就不会结露,它能够直观表示气体的绝缘状况,露点表示也具有它本身的缺点,它使测量变得比较麻烦,因为在常压下测得的露点并不是设备压力下的露点,还需要进一步的折算。

2.2 微水检测仪设计

SF_6 微水的检测属于低湿测量,传统的湿度传感器不能测量或反应不够灵敏,线性度差。本系统设计使用最新聚酰亚胺等高分子树脂材料做成的薄膜电容式湿度传感器,该电容式传感器电容值随周围环境相对湿度(RH)大小成比例的吸收或释放水分,进而使其介电常数发生变化。这种传感器以物理吸附为主,可在 $1\% \sim 100\% \text{ RH}$ 范围内测量^[3]。以该传感器为基础设计的微水检测仪以 Atmega 128 单片机为核心,包括:标准气体湿度监测、 SF_6 气体湿度监测、内部温度监测、环境温度监测、LCD 显示和通信接口等几个组成部分,结构框图如图 1 所示。

图中的标准气体为露点小于 $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的密闭纯净氮气,它与待检 SF_6 气体压力、温度相同,但其湿度可认为不发生变化,这样利用 2 种气体中传感器产生信号的差频可以摒弃温度、压力变化的影响,得到只与湿度有关

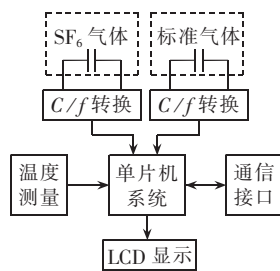


图 1 系统框图

Fig.1 Block diagram of the system
的信号频率; C/f 转换是将传感器的电容信号转换为频率信号,2 路信号分别由单片机定时器测频;温度测量部分主要测量气体温度和环境温度,其主要目的是对系统硬件电路的输出偏移温度补偿和湿度传感器漂移温度补偿。具体补偿办法在文献[3]中有详细介绍。

在检测仪实际工作时,分别用相同的湿度传感器测量 SF_6 气体和标准气体的湿度,通过相同的 C/f 转换电路处理后由单片机检测 2 频率信号;经软件处理得到差频信号,并利用差频信号与内存中的数据库匹配,求取当前检测气体露点温度。数据处理过程如图 2 所示,其中的湿度转换是根据维护人员习惯,将露点温度转换为更为直观的形式,如体积浓度值、相对湿度等。

SF_6 断路器微水测试仪为单一直流 24 V 供电,本地实时显示测量结果,也可通过 RS-485/CAN 通信接口与主控室连接,形成监测系统。测试仪的安装十分简单、方便,将测试仪的标准接口与断路器的充气口直接连接即

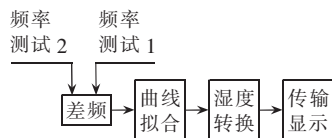


图 2 湿度信号处理

Fig.2 Processing of humidity signal

可。充气时可以将充气接头直接与测试仪另一侧接口连接。该测试仪经中国电力科学院测试标定,完全适用于当前 SF₆ 断路器的低湿测试。

2.3 监测系统

SF₆ 气体微水检测仪结合高压断路器机械状态在线检测系统^[3,7-9],构成 SF₆ 断路器状态检测系统,系统结构如图 3 所示(图中 a 为数据处理模块,b 为电寿命诊断模块,c 为数据模块)。图中微水检测仪数据传输到现场监测系统,与其他数据打包后通过 CAN 总线传到主控室;在没有机械状态在线监测系统时,检测仪也可通过其自身的 CAN 接口或 RS-485 接口与主控室连接。

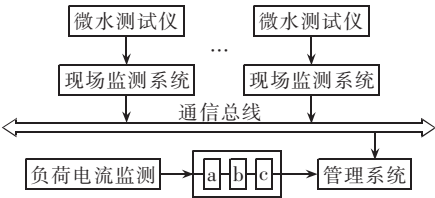


图 3 高压断路器状态检测系统

Fig.3 Test system of high-voltage circuit breakers

3 结语

本文在分析水分对 SF₆ 断路器危害和湿度的各种检测方法的基础上,研究了在线监测 SF₆ 气体微水含量的原理和方法。目前,该测试仪正在试运行阶段,运行状况良好。该测试仪的投入,实现了对 SF₆ 气体中水分含量的在线监视,不仅可以减少很多的繁琐检修测试,节省许多不必要的开支,而且对于断路器本身的维护、运行状态监测起重要作用。

参考文献:

[1] 胡雨龙,陈伟根,孙才新. SF₆ 气体中微水含量模拟在线检测初探[J]. 高电压技术,2002,28(4):30-32.
HU Yu-long,CHEN Wei-gen,SUN Cai-xin. Elementary research of on line monitoring of moisture content in SF₆ [J]. **High Voltage Engineering**,2002,28(4):30-32.
[2] 白玉清,郭利军,杨建仁. SF₆ 电器设备气体湿度与绝缘的探讨[J]. 山西水利科技,2002,145(3):64-65.
BAI Yu-qing,GUO Li-jun,YANG Jian-ren. Study of gas humidity and insulation of SF₆ electrical equipment[J]. **Shanxi Hydrotechnics**,2002,145(3):64-65.
[3] 伊晓光,孙来军,胡晓光. 湿敏电容式传感器测量 SF₆ 气

体湿度的研究[J]. 华北电力技术,2004(4):17-18.
YI Xiao-guang,SUN Lai-jun,HU Xiao-guang. Research on using humidity sensor to measure humidity of SF₆ [J]. **North China Electric Power**,2004(4):17-18.
[4] 陈新岗,陈渝光,黄建国,等. 环境温度及湿度对 SF₆ 断路器中微量水分的影响及控制措施[J]. 高压电器,2004,40(1):63-64.
CHEN Xin-gang,CHEN Yu-guang,HUANG Jian-guo, et al. Influence of ambient temperature and humidity on the moisture content in SF₆ circuit breaker and its control[J]. **High Voltage Apparatus**,2004,40(1):63-64.
[5] 滑春桃,王晓东. SF₆ 电器设备气体湿度测量分析[J]. 山西电力,2004(3):17-18.
HUA Chun-tao,WANG Xiao-dong. Analyse of electric device gas temperature measurement [J]. **Shanxi Electric Power**,2004(3):17-18.
[6] 张丽娜. SF₆ 电器设备气体湿度与绝缘[J]. 高压电器,2004,40(3):46-47.
ZHANG Li-na. Humidity and insulation of SF₆ in electric equipments[J]. **High Voltage Apparatus**,2004,40(3):46-47.
[7] MA Shao-hua,XU Jian-yuan,WANG Ji-mei. A method for intellectualized detection and fault diagnosis of vacuum circuit breakers [C]// **2000 IEEE 19th Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum**. Xi'an: IEEE,2000:771-774.
[8] 沈力,黄瑜珑,钱家骊. 高压断路器机械状态监测的研究[J]. 中国电机工程学报,1997,17(2):113-117.
SHEN Li,HUANG Yu-long,QIAN Jia-li. Research on mechanical condition monitoring for HV circuit breakers [J]. **Proceedings of the CSEE**,1997,17(2):113-117.
[9] 王昌钧. SF₆ 高压断路器机械参量在线监测系统[J]. 电网技术,1999,23(7):34-37.
WANG Chang-jun. Mechanical parameter on-line monitoring system for SF₆ high voltage circuit breakers [J]. **Power System Technology**,1999,23(7):34-37.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

胡晓光(1961-),女,黑龙江哈尔滨人,教授,博士研究生导师,研究方向为电能计量装置、电气设备在线监测以及故障诊断;
孙来军(1977-),男,山东嘉祥人,博士研究生,研究方向为高压断路器状态监测与故障诊断(E-mail:slaijun@126.com)。

Research on insulation monitoring of SF₆ circuit breaker

HU Xiao-guang¹,SUN Lai-jun²

- (1. Harbin Engineering University,Harbin 150001,China;
- 2. Harbin Institute of Technology,Harbin 150001,China)

Abstract: Based on the detail analysis of harmful moisture to SF₆ and the methods to detect the moisture,a monitoring instrument of SF₆ circuit breaker insulation is introduced. The gas pressure has no influence on its dew point measurement and temperature compensate. It displays the gas insulation. Approved by tests,this instrument detects moisture with high accuracy,and meets the need of low moisture on-line detection for SF₆ circuit breaker.

Key words: SF₆ circuit breaker; insulation; on-line monitoring; dew point