

免维护呼吸器导通检测装置的研制与应用研究

肖 健,张付粤,张益珩,罗 浩,付文启,龚正旭,王珂煌
(国网四川省电力公司特高压直流中心,四川 成都 610042)

摘要:当前特高压换流变压器采用免维护式呼吸器替代传统呼吸器,由于无呼吸油杯,一旦发生气路堵塞无法直观判断油浸设备的呼吸状态。为此,借鉴“电子式肺功能”肺活量检测计的技术原理,设计了一种携带方便、使用便捷的导通检测装置,通过传感电路检测读取呼吸器的“呼吸状态”并就地显示读取结果,满足对换流变压器日常维护和验收工作的使用需求,同时可大幅缩短检测时间并提高检测精度。将所设计的检测装置实物样本安装在换流变压器呼吸器上,通过实验验证了其导通性检测的有效性。

关键词:换流变压器;呼吸器;导通检测;呼吸状态

中图分类号:TM 406 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2024)02-0094-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240216

Research on Development and Application of Maintenance-free Respirator Conduction Detection Device

XIAO Jian, ZHANG Fuyue, ZHANG Yihang, LUO Hao, FU Wenqi, GONG Zhengxu, WANG Keyu
(UHVDC Center of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610042, Sichuan, China)

Abstract: At present, maintenance-free respirators are used to replace traditional respirators in UHV converter transformers. Due to lack of breathing oil cup, the breathing state of oil-immersed equipment can not be judged directly in case of gas circuit blockage. For this reason, the technical principle of spirometer with "electronic lung function" is used for reference to design a portable and convenient conduction detection device, which can detect and read the "breathing state" of respirator through sensing circuit and display the reading on the spot, so it can meet the use needs in daily maintenance and acceptance work of converter transformer, and at the same time, it can significantly shorten the detection time and improve the detection accuracy. Finally, a physical sample of the designed detection device is manufactured and installed on the respirators in converter transformers. The effectiveness of its conduction detection is verified by experiments.

Key words: converter transformer; respirator; conduction detection; respiratory state

0 引言

中国电力系统电源与负荷呈逆向分布的特点^[1]。为满足长距离、大容量和经济性的输电需求,特高压直流输电示范工程蓬勃发展^[2]。换流变压器是特高压换流站的核心部件,受天气变化和传输负荷影响,需要耐受油温从环境温度到八九十摄氏度的大幅温度变化考验^[3]。呼吸器是换流变压器的组成部分,当换流变压器内部绝缘油随运行温度变化而膨胀或收缩时,油枕内油位浮动,需要通过呼吸器与外界气体交换^[4],因此,呼吸器为稳定换

流变压器内气体压力起着重要的作用。

当前大型油浸式变压器已采用新型免维护式呼吸器代替传统油杯式呼吸器,通过烘干器自加热功能保持干燥剂长期有效,节省了人力运维成本^[5]。但由于取消了传统呼吸器的“呼吸油杯”设计,在现场无法直观判断换流变压器呼吸状态。当换流变压器温度异常而油枕油位未明显变化时,须停电诊断排查气路是否堵塞,费时费力且流程繁琐;一旦未及时发现气路堵塞,还存在压力释放阀误动作风险。

目前对于呼吸器工作状态的判断主要通过在线监测和评估手段^[6-7],检测硅胶变色来实现。如文献^[8]和文献^[9]通过机器视觉技术进行识别,利用数字图像处理技术,采用矩阵检测法进行硅胶颜色

直方图统计以判断呼吸器运行状态;文献[10]基于色相饱和度值特征变换与目标检测的分析方法,利用单发多盒探测器跟踪和提取呼吸器正常颜色和异常颜色,来判断呼吸器运行状态。通过配置湿度传感器^[11]、重量感应传感器^[12]与图像识别相结合的方法,也可避免呼吸器过度使用造成的变压器绝缘油含水量超标。然而,以上检测方法都是基于呼吸器处于正常导通状态进行判断的,并没有考虑气路堵塞情况的出现;并且都局限于判断呼吸器工作状态是否正常,而无法追踪换流变压器的运行状态;判断方法主要基于硅胶的变色情况,监测周期过长,检测结果不直观,主观性较大,并且对在线监测装置的利用率也较低。

当前虽已研制带呼吸油杯的免维护呼吸器,但目前的大多数电力设备工作在无人值守场合,通过肉眼观察气泡反映的呼吸状态已不能适应当前自动化水平^[13],且当大型油浸式设备呼吸作用微弱时,短时难以观测气泡现象,不便于巡视观察。

为此,下面基于换流变压器通过呼吸器与外界气体交换的本质,借鉴“电子式肺功能”肺活量检测计的技术原理,设计了一种免维护呼吸器导通检测装置。通过配置两个气流传感器,可以直接检测出呼吸气路是否导通,并判断换流变压器处于“呼气”或“吸气”状态;还可时刻检测气流大小,形成历史追踪数据库,用于纵向对比换流变压器健康状态。所设计的导通检测装置在布拖换流站的换流变压器上进行了安装和试验,初步验证了该装置判断气路是否导通并跟踪检测换流变压器运行状态的可行性。

1 免维护呼吸器的结构与工作原理

1.1 免维护呼吸器的结构

免维护呼吸器的结构如图1所示,其主要组成部分包括:1)装有变色硅胶的罐子,用于换流变压器与外界进行气体交换时保证吸入空气的干燥性,

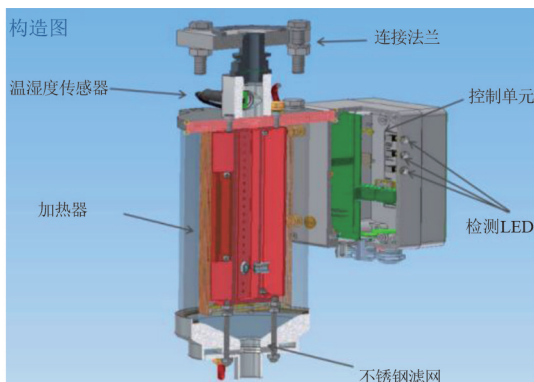


图1 免维护呼吸器结构

是呼吸器最主要的功能实现单元,通常分为A罐(运行)和B罐(备用),并可用电机设备进行切换;2)温湿度传感器,用于检测交换气体的温度和湿度,从而判断环境状态与硅胶是否处于正常可除湿状态;3)加热器,对硅胶进行加热再生,并防止不锈钢滤网覆冰影响呼吸器的正常运行;4)不锈钢滤网,用于去除吸入空气的杂质;5)控制单元装置,用于接收传感器数据,并根据控制逻辑发出相应指令。

1.2 免维护呼吸器的工作原理

免维护呼吸器在正常运行时,换流变压器可与外界进行正常气体交换,呼吸器吸收水分保证干燥空气流入。湿度传感器持续监测硅胶湿度并将数据传入到控制单元,当检测到湿度达到设定值时,启动设备内的电磁阀切换运行硅胶罐与备用硅胶罐,将运行硅胶罐转为备用后,启动加热器对湿度不合格的硅胶进行干燥再生,待湿度传感器检测达标后停止加热。温度传感器时刻检测呼吸器内部温度,一旦低于设定温度,控制单元启动加热器进行加热,保持罐内温度满足要求,避免出现罐内结冰等现象。通过这种双罐交替加热再生的方式,可确保换流变压器与外部空气交换的过程中时刻吸入干燥空气,并且在硅胶干燥去水的过程中不会将水分带入到换流变压器内部。

在相同运行工况下,免维护呼吸器相比于传统呼吸器,可以实现硅胶超过50次的干燥再生,理论上可10年无须进行维护。由于充分利用了变色硅胶可循环往复使用的特点,采用双罐切换自愈再生的手段,大幅增加了材料的利用效率,既规避人工拆解干燥更换流程,又降低硅胶分解产生有害物质对人体和环境造成伤害的风险。

然而,为了精简机构降低运维难度,换流变压器的免维护呼吸器不设呼吸油杯,但也使得在巡检时无法直观判断吸湿气路是否导通,存在错误判断设备真实呼吸状态的风险。例如在2021年,±800 kV雅砻江换流站极2低YDC相换流变压器由于气路堵塞原因无法正常呼吸,最终导致了压力释放阀启动。

为此,设计一种能持续实时监测呼吸器气路导通情况的检测装置具有实际价值意义。

2 气路导通检测装置的研制

2.1 工作原理与控制电路设计

借鉴电子式肺功能肺活量检测计原理^[14],结构如图2所示,采用漏斗式吹嘴向测试的仪器用力呼气,基于红外线信号采集的气流传感器,可响应气流

流速与容量并在显示屏显示,实现健康状态参数的监测。

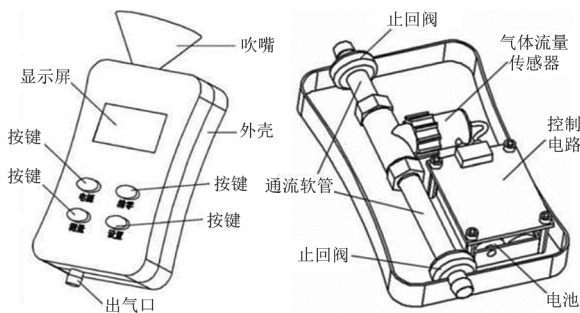


图2 电子式肺功能肺活量检测计结构

换流变压器的呼吸检测具有相同的原理,结合技术需要与功能要求,所设计呼吸器呼吸气流检测系统如图3所示。根据呼吸器结构,该检测装置需安装在其通气口下方处。所设计的气体流量读取电路是基于热式气流传感器,将检测到的管径内气体流量速度转换为相应的电压信号,经过检测电路滤波处理后再放大,然后输出到MCU单片机。MCU单片机将接收的气体流量模拟信号转化为数字信号,进行数据存储并在仪表显示。

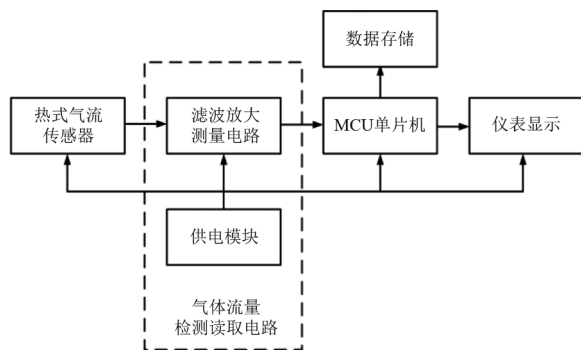


图3 气体流量检测系统

热式气流传感器传出相应的电信号之后,滤波放大电路是信号转换的关键。作用在于读取特定频率或频带上的电信号,对其他频带的电信号进行阻塞,消除杂波信号,并对选取信号进行放大处理。

所设计检测装置基于 CSMC 0.5 μm DPTM CMOS 工艺,电源电压为 $5\text{ V} \pm 0.5\text{ V}$,温度范围为 $-40\text{ }^\circ\text{C} \sim 125\text{ }^\circ\text{C}$,温度典型值为 $27\text{ }^\circ\text{C}$ 。热式气流传感器设计有双通道输出信号,第一个通道输出与气体监测流量相关的电压信号;第二个通道输出参考电压信号,通过两个电压信号的比值来确定气体监测流量。据此需要设计双带通滤波放大电路,两条电路主体结构相同,增益选择不同。通过咨询免维护呼吸器制造商,双带通道滤波放大电路设定值为:中心频率为 10 Hz ;第一路通道的输入为与气体监测流量相关的电压信号,记为 V_{in1} ,中心频率增益

设置建议值为 66 dB ;第二路通道的输入为参考电压信号,记为 V_{ref} ,中心频率增益建议值为 77 dB 。

为保证滤波放大器通带增益需求足够,采用级联方式形成四阶带通滤波器,其结构如图4所示,其中 $R_1 = R_2, C_1 = C_3, R_3 = R_4, C_2 = C_4$ 。

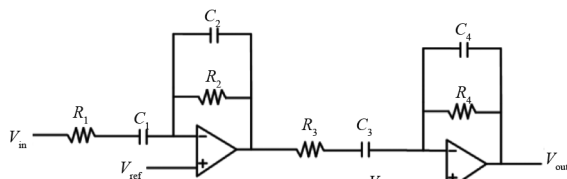


图4 四阶带通滤波器

传输函数式为

$$H(S) = \left(\frac{R_2 C_1 S}{(R_1 C_1 S_1 + 1)(R_2 C_2 S + 1)} \right)^2 \quad (1)$$

四阶增益表达式为

$$A(m) = \left(\frac{R_2 C_1}{R_1 C_1 + R_2 C_2} \right)^2 \quad (2)$$

对输入电信号进行带通滤波之后,设计了相应放大电路。该电路采用了具有高增益低噪声的两级运算放大器,如图5所示。

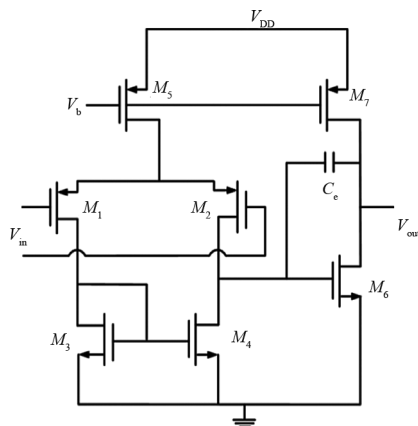


图5 两级运算放大器

经过滤波放大电路后,将传感器输入的电信号转换为模拟信号输入至MCU单片机内进行数据存储和显示。

2.2 关键元件选择

根据功能要求,为确保换流变压器在弱呼吸状态下也能精确检测,选择采用流量小于 1 L/min 时也能精准检测的热式气流传感器^[15],并基于第2.1节的检测系统框图,制作了集成电路板样品来进行功能验证。

按照需求,气路导通检测装置需准确甄别换流变压器“呼”和“吸”状态并检测气量,同时还应当避免自然风、冷却器产风、变压器振动等外界因素干扰。因此,采用两个单向检测气流传感器反向串接的方式,实现对不同方向气流流速的监测记录,保证

当换流变压器“呼”或“吸”时,有且仅有一个气流传感器有示数。进一步结合实际安装的便利性和维护的简易度,设计了如图 6 所示的单路双通式结构方案。气路导通检测装置除配置了数据储存功能用于历史数据追踪外,还具备就地读数的功能,保证在巡检时能实时观察当前换流变压器的呼吸流量状态。

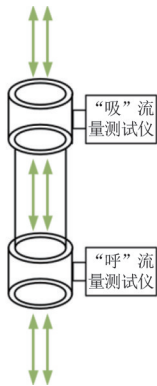


图 6 单路双通结构方案

检测装置与呼吸器通气口的连接设置是较为关键的安装步骤。换流站内通常有多个不同厂家制造且高、低端体积容量不同的换流变压器,其配置的呼吸器管口尺寸不同,这就要求设计的导通检测装置要具备良好的弹性和密封性,可套接上不同尺寸的呼吸器管口。因此,选择了如图 7 所示的橡胶制品对接口作为连接部分。

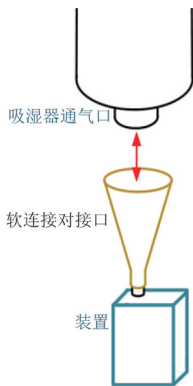


图 7 吸湿通气口采用软连接

同时,为保证气流检测的有效性并避免在极端条件下胶囊过度憋气导致的瓦斯继电器、油流继电器误动,前期开展收集了多个换流站免维护呼吸器主要制造厂商的呼吸管口尺寸,包括沈阳明远、MR、上海锐开、珠海智润、Qualitrol 等公司,免维护呼吸器下端管口尺寸集中在 20~24 mm,由此最终设计气流传感器对接管口直径为 25 mm。

3 应用验证

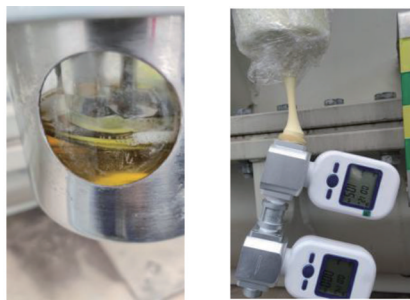
所设计的气体导通检测装置组建安装后的样品

如图 8 所示。



图 8 样品装置

为验证装置气体导通检测的有效性,选择在 ± 800 kV 建昌换流站内带有呼吸油杯的在运 500 kV 主变压器上进行功能测试,如图 9 所示。测试时间选择为气温变动较大的下午。



(a) 主变压器呼吸油杯 (b) 仪器测试环境

图 9 主变压器气路导通测试

根据油杯内呼吸气泡以及内外油杯的油差情况,与检测的呼吸器内流量数据进行对比来进行验证。记录流量数据,测试时间为 30 s,测试结果如图 10 所示。

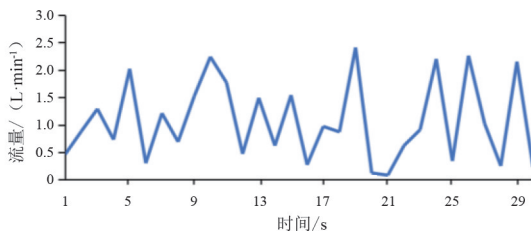


图 10 主变压器呼吸器流量检测结果

在测试过程中,油杯内部液位一直高于外部液位,且存在气泡,证明变压器一直处于吸气状态。而根据图中结果,测试数据虽波动较大但也一直记录在吸气状态(即数据为正),分析该情况是由于传统呼吸器呼吸气体由油中气泡带出,因此气流随气泡逐个冒出,检测结果呈现陡峭段形状符合实际现象,验证了所设计装置功能的有效性。

为进一步验证装置的导通检测能力和数据追踪能力,选择在 ± 800 kV 换流站总计 24 台换流变压器的免维护呼吸器通气口上装配样本装置并进行数据监测记录,记录的时间地点如表 1 所示,提取前

30 min 的检测数据,检测结果如图 11 所示。

表 1 导通检测试验记录

序号	试验地点	试验时间
1	极 II 低端换流变压器组	10 月 12 日 10:38—11:21
2	极 II 高端换流变压器组	10 月 12 日 20:32—21:15
3	极 I 低端换流变压器组	10 月 13 日 15:12—15:38
4	极 I 高端换流变压器组	10 月 14 日 16:35—17:02

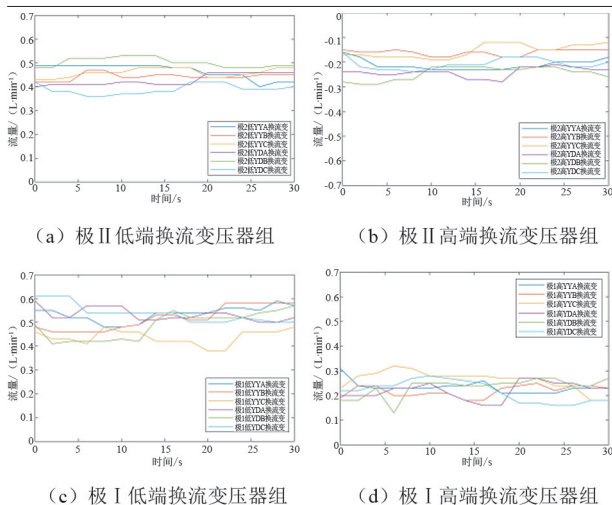


图 11 换流变压器呼吸器流量记录检测结果

由表 1 和图 11 可知:在 10 月 12 日晚试验的时间里,极 II 高端换流变压器组都处于呼气状态,这表明油温在不断上升,该换流站处于外送功率上调或者环境温度上升的阶段;除此以外,其他检测时间段的换流变压器组都处于吸气状态,这表明油温在不断下降,该换流站处于外送功率降低或者环境温度降低的阶段。经测试数据与换流变压器实际运行工况比对,呼吸状态与该换流站实际负荷日曲线及现场环境温度变化情况呈正相关关系。

4 结论

上面基于“电子式肺功能”肺活量检测计的技术原理,设计了一种通过热流传感器监测免维护呼吸器气路导通情况的检测装置。该装置经过滤波放大电路提升了监测的灵敏度,所设计的样本装置在 ± 800 kV 建昌换流站内的 500 kV 主变压器与高、低端换流变压器上进行了试验验证,得出的结论如下:

1) 无呼吸油杯的免维护呼吸器无法直接检测气路是否导通,采用所设计的导通检测装置能就地显示呼吸器的呼吸状态,满足日常维护和验收工作需求。

2) 所设计的导通检测装置能跟踪检测换流变压器内部气压的变化趋势,若能结合环境温度变化和换流站运行模式,可用作综合判断换流变压器运行健康状态的一种手段。

参考文献

- [1] 鄢朝辉,李兆伟,王维洲,等. 直流闭锁故障下风电并网功率和直流输送功率的耦合关系分析[J]. 中国电力, 2021, 54(6):175-182.
- [2] 单节杉,王璇,田鑫萃. 基于贝杰龙模型多点联合判断的特高压直流输电线路纵联保护[J]. 四川电力技术, 2021, 44(5):6-10.
- [3] 池明赫,李毅恒,罗青林,等. 运行环境对换流变压器油纸绝缘电场分布的影响[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(5):71-79.
- [4] 姜昀芑,任伟,白东亚,等. 基于 LSTM 的变压器呼吸器硅胶变色程度预测模型[J]. 变压器, 2021, 58(3):57-61.
- [5] 武剑灵,孙瑞龙,岳永刚. 智能免维护呼吸器在变压器应用中的优势[J]. 变压器, 2016, 53(3):47-49.
- [6] 王玉财,李志远,王振锋,等. 基于无线传感器网络的变压器呼吸器在线监测系统[J]. 宁夏电力, 2020(2):28-32.
- [7] 李瑞生,许丹,翟登辉,等. 基于 HSV 特征变换与目标检测的变压器呼吸器缺陷智能识别方法[J]. 高压技术, 2020, 46(9):3027-3035.
- [8] 辛明勇,肖小兵,刘斌,等. 基于图像处理的变压器呼吸器自动检测[J]. 数学的实践与认识, 2018, 48(2):127-133.
- [9] 李瑞生,许丹,翟登辉,等. 基于 HSV 特征变换与目标检测的变压器呼吸器缺陷智能识别方法[J]. 高压技术, 2020, 46(9):3027-3035.
- [10] 施润杰. 基于自适应阈值分割的电力变压器呼吸器变色检测方法[J]. 江西电力, 2022, 46(8):36-41.
- [11] 李春阳,张健能,劳锦富,等. 一种基于压力和温湿度传感器的变压器新型呼吸器, 110779597AU[P]. 2020-02-11.
- [12] 金甲杰,钱诚. 充油类电气设备呼吸装置的改进及新型呼吸器[J]. 安徽电力, 2014, 31(4):24-26.
- [13] 鲍明杰,柯常军. 一种状态可监测的免维护吸湿器及监测方法:110364331B[P]. 2020-09-29.
- [14] 胡振禹,王鹏,刘宝亮. 肺活量计的电子式检测装置设计与模拟研究[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(33):36-39.
- [15] 机械工业仪器仪表元器件标准化技术委员会. 热式质量流量传感器:JB/T 13111—2017 [S]. 北京:机械工业出版社, 2018.

作者简介:

肖健(1989),男,硕士,高级工程师,从事特高压直流输电控制保护与设备检修工作;

张付粤(1993),男,工程师,从事特高压直流输电控制保护与设备检修工作。

(收稿日期:2023-06-21)