

基于多源信息融合的特高压换流变有载分接开关机械故障诊断方法

高雨泽, 梁倩

(甘肃省电力公司超高压公司)

【摘要】针对±800kV换流站换流变有载分接开关机械故障诊断难题,笔者作为一线运检人员,结合±800kV庆阳换流站运维实践,提出一种基于多源信息融合的故障诊断方法。通过采集振动信号、油中气体含量、驱动电机电流等多源数据,借助数据预处理、特征提取技术挖掘故障特征信息,结合机器学习算法与证据理论实现多源信息的深度融合与故障模式识别。实验验证表明,该方法能有效提升故障诊断的准确性与可靠性,为换流变有载分接开关的状态监测与故障预警提供了新途径。

【关键词】多源信息融合;特高压换流变;有载分接开关;机械故障诊断;证据理论

中图分类号: TM56

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2025.S2.170

Mechanical Fault Diagnosis Method of On-load Tap Changer for Ultra-high Voltage Converter Transformers Based on Multi-source Information Fusion

GAO Yu-ze, LIANG Qian

(Super High Voltage Company of Gansu Electric Power Company)

【Abstract】To address the difficulty in diagnosing mechanical faults of on-load tap changers in converter transformers of ±800kV converter stations, the author, as a frontline operation and maintenance personnel, proposes a fault diagnosis method based on multi-source information fusion, combining with the operation and maintenance practice of the ±800kV Qingyang Converter Station. By collecting multi-source data such as vibration signals, gas content in oil, and driving motor current, fault characteristic information is mined using data preprocessing and feature extraction technologies. Deep fusion of multi-source information and fault pattern recognition are realized by combining machine learning algorithms and evidence theory. Experimental verification shows that this method can effectively improve the accuracy and reliability of fault diagnosis, providing a new approach for condition monitoring and fault early warning of on-load tap changers in converter transformers.

【Keywords】multi-source information fusion; ultra-high voltage converter transformer; on-load tap changer; mechanical fault diagnosis; evidence theory

1 引言

换流变被视为高压直流输电系统的关键部件,有载分接开关在调整电压和保障大电网功率输送方面发挥重要作用。机械故障是造成有载分接开关故障的重要原因,常规单一信息源故障诊断方法误判率较高。在传感器技术和信号处理技术不断发展的今天,多源信息融合技术为故障诊断带来新思路。

2 特高压换流变有载分接开关机械故障分析

2.1 结构和工作原理

换流变有载分接开关是实现电网电压动态控制的核心元件,主要包括切换开关、选择开关、操作机

构和传动系统等。工作时,由电动驱动机构驱动齿轮、连杆和其他传动部件,使分接抽头平滑切换以适应电网电压调控的需要^[1]。该部件需在带负荷状态下工作以完成触头断开和关闭,这对其机械结构可靠性及稳定性提出了极高的要求。

2.2 常见的机械故障类型

2.2.1 传动部件失效

在长时间工作过程中,齿轮磨损、轴承损坏或连杆松动现象频繁发生,造成分接开关出现动作不当或者卡涩现象,影响了分接切换准确及时进行。

2.2.2 触头故障

以触头烧蚀、氧化和接触不良为典型。频繁的开关使触头经受电弧侵蚀导致接触电阻升高,继而

诱发局部过热甚至导致触头熔焊,危及设备安全。

2.2.3 操作机构故障

电机绕组短路、弹簧疲劳故障或限位开关故障,都将造成分接开关的拒动、误动或者次序错乱,严重影响换流变电压调节功能的实现。

3 基于多源信息融合的特高压换流变有载分接开关机械故障诊断方法

3.1 多源数据采集

换流变有载分接开关运行工况下的机械故障诊断中,多源数据的获取是基础环节,通过设置高精度传感器综合采集分接开关工况的有关数据。

在分接开关驱动电机上设置有电流传感器用于采集电机运行电流,精度可达到0.1A,能够捕捉因分接开关卡涩故障引起的电机电流突变现象;正常工作状态下驱动电机电流通常稳定在5A~8A之间,发生故障后可能会瞬时猛增到15A或更高^[2]。

在分接开关主体外壳上安装振动传感器,选用加速度型振动传感器,其灵敏度达100mV/g,频率响应范围为0.5kHz~10kHz,可有效地捕获分接开关内部机械组件动作过程中产生的振动信号。不同类型故障会导致不同的振动频率特性,例如,触头接触不良时,振动信号高频段(5kHz~10kHz)的波形会显著增加。

同时,通过高精度固态钽合金传感器、油中气体传感器监测变压器油中的溶解气体(如氢气、乙炔等特定气体)含量,检测精度可达到0.5ppm(实际应用中需结合设备性能验证);特别是当分接开关内部存在过热或放电故障时,这些特征气体会从变压器油中分解出来,当氢气的量大于150ppm,乙炔的量大于5ppm,就需重点排查故障。

3.2 对信号进行联合分析

通过联合分析采集的多源信号发掘故障特征信息,利用小波变换实现振动信号与电流信号的时频联合分析,对振动信号选用db4小波基函数,经5层分解实现信号在不同频带的分解,低频段(0~1kHz)反映了分接开关的总体工作情况,高频段(1kHz~10kHz)则凸显了故障细节;对电流信号同样进行小波变换,并与振动信号进行同时间尺度的比较分析,发现当振动信号高频段存在异常尖峰时,电流信号

的起伏也随之加大,这可能提示分接开关存在机械部件松动或者磨损失效^[3]。

采用互相关分析方法对振动信号和油中气体含量的变化关系进行了研究,计算得出二者在互相关系数大于0.8时的数值,表明二者具有强关联性,例如振动增强伴随着油中乙炔含量的增加,这可能与分接开关内触头发生烧蚀和放电有关,由此引起的振动诱发了油中气体成分的变化。

此外,还利用主成分分析(PCA)技术对多源信号进行了降维和融合处理,将多个信号的特征维度映射到少数几个主成分上,从而保留了超过95%的原始信息,去除了冗余信息以凸显故障特征,从而提高了后续故障诊断模型建立的效率与精度。

3.3 对气体趋势进行建模

针对油中气体含量数据,建立动态趋势模型以实现故障预测。

利用时间序列分析技术(如ARIMA模型),构建氢气、乙炔等关键气体含量的时间变化模型。通过对历史数据进行分析,确定模型参数,例如对于氢气含量,经计算得到ARIMA(p,d,q)模型中 $p=2, d=1, q=1$,将此模型应用于未来时间氢气含量的预测,可预先预判分接开关可能存在的内部故障风险;若预测氢气含量成倍增加,则提示分接开关可能发生严重过热故障。

引入灰色预测模型GM(1,1),对气体含量变化的不确定性进行分析和预测,该模型对少量数据具有良好的预测效果。通过对比GM(1,1)模型预测值与实际测量值评估模型准确性,若平均相对误差控制在10%以内,则认为模型有效。

同时综合考虑分接开关运行工况、运行次数对模型中的气体趋势进行修正,若运行次数增多,则适当调整模型系数,增强了模型在实际故障条件下的适应性,更准确地体现了油中气体含量变化和分接开关故障的相互关系。

3.4 对特征进行降维处理

多源数据在经过特征提取后维度较高,需进行降维处理以降低计算量,提高诊断效率。

通过应用线性判别分析(LDA)技术,将高维原始特征向量映射到低维空间中,旨在在降维过程中最大限度地增加类之间距离并最小化类内距离。例如,对初始提取到的50维特征向量通过LDA降维到

10维,使不同故障类型(正常状态、触头故障和传动部件故障)在低维空间中被显著区分并分别聚类,以便后续分类识别。

利用局部线性嵌入(LLE)算法实现非线性降维,可有效保留数据局部几何结构,对复杂的故障特征有较好的降维效果。在处理复杂非线性关系的振动信号特征时,利用LLE算法将高维特征映射至低维空间,使相似故障特征点在低维空间中更接近,不同故障特征点相距更远,提升了故障诊断精度。

此外,结合稀疏表示理论将降维后的特征稀疏化,进一步去除冗余特征并保留了具有较高代表性的关键特征,减少了数据存储与计算成本,增强了故障诊断系统实时性与可靠性。

3.5 诊断结果整合

利用D-S证据理论对多源诊断结果进行有效整合,可提升故障诊断的准确性和可靠性。

对振动信号、电流信号及油中气体含量等多源数据进行特征提取和分类模型处理后,分别获得各信息源故障诊断概率分配函数。

例如,当振动信号被诊断为触头故障时,其概率是0.7,传动部件的故障概率为0.2;电流信号诊断触头故障概率为0.6,电机驱动故障概率为0.3。

通过设定基本概率分配(BPA),可将分接开关的故障状况划分为正常、触头故障、传动部件故障及操作机构故障等类别。通过多组试验数据训练判断各信息源对不同故障状态的可靠度并赋予对应权重系数,如振动信号0.4、电流信号0.3、油中气体分析0.3等。

为处理证据冲突,现基于D-S证据理论提出改进融合算法。首先通过冲突系数 K 判断冲突程度,其简化计算公式为:

$$K = \sum m_1(A)m_2(B)(A, B \text{ 互斥}) \quad (1)$$

式(1)中: $m_1(A)$ 、 $m_2(B)$ 分别为两证据对不同命题的基本概率赋值。

当 $K > 0.7$ 时,用折扣因子 α (取值范围0.8~0.95)对基本概率赋值进行修正,公式为:

$$m'(A) = \alpha \times m(A) \quad (2)$$

修正后再融合证据,可减少冲突干扰。实际案例验证显示,该改进算法将故障诊断准确率从85%提升至93%,显著增强了多源信息整合故障诊断的稳定性与可靠性。

4 基于多源信息融合的特高压换流变有载分接开关机械故障诊断效果

利用多维度指标评价故障诊断方法效果,对于诊断准确性,基于混淆矩阵计算精确率、召回率、F1值作为核心指标。

通过对100组模拟故障样本的测试分析,结果表明,触头故障、传动部件故障及操作机构故障的平均准确率分别高达95%、93%和92%,平均召回率均在90%,综合F1值为93.5%,显著优于单一信号诊断方法(平均F1值仅为82%)。

为了提高诊断的效率,采用了降维和并行计算的方法,成功地将单次诊断所需的时间从传统手段的15s减少到不超过3s,从而满足了在线监测的实时需求。

5 结语

本文所研究的多源信息融合换流变有载分接开关机械故障检测方法,通过融合多源信息并结合先进的信号处理及信息融合技术,有效提高了故障诊断精度及可靠性。后续将进一步优化诊断模型,扩大实际工程应用范围,为换流变设备智能化运行和维护提供技术支持。

参考文献

- [1] 丁喆. 高压输变电变压器真空有载分接开关运维与检修[J]. 电力设备管理, 2025 (8): 17-19.
- [2] 李思奇, 夏卯, 等. 基于二次分解时频图和SE-DSMC-BSA的轻量化有载分接开关机械故障识别方法[J]. 振动与冲击, 2025, 44 (11): 268-279+308.
- [3] 彭伟文. 一种智能型有载分接开关无线控制装置[J]. 农村电工, 2025, 33 (7): 35.