

基于变压器声级振动在线监测系统方案设计与实施探讨

高松林

上海欣影电力科技股份有限公司 上海 200331

摘要: 变压器作为电力系统^[1]的核心设备,其运行状态直接关乎电力系统的安全与经济运行。传统变压器故障诊断以油中溶解气体色谱分析法为主,难以发现绕组变形、铁芯松动等早期故障。本文提出一种变压器声级振动在线监测系统,通过采集变压器振动、噪声、中性点电流及高低压侧电压电流信号,运用小波包变换^[2]、希尔伯特黄变换^[3]等技术进行数据分析,实现对变压器内部早期故障的精准诊断。该系统无需接入变压器内部电气量,不影响设备正常运行,为变压器故障诊断提供了全新的补充手段,具备重要的工程应用价值。

关键词: 变压器;声级振动;在线监测;早期故障诊断;信号处理

引言

变压器作为电力系统中不可替代的关键设备,本质是基于电磁感应原理实现“电压等级转换”和“能量高效传递”的核心枢纽——从发电厂到用户的全链条中,它解决了电能远距离的传输、不同场景电压的适配、系统稳定运行的三大核心问题,没有变压器,电力就无法安全地、经济地送达千家万户和工业终端。然而变压器在长期运行过程中,受电流电压波动、机械损伤、绝缘老化、工作环境变化及运行时间累积等多种因素影响,不可避免地会出现各类故障。

传统的变压器在线监测方式以油中溶解气体色谱分析法为核心,该方法通过分析故障后变压器油中留存的故障气体推断设备问题,但仅能在故障发生后发现问题,无法实现早期故障的预判与识别。当变压器出现绕组、铁芯因过载冲击或机械原因导致的变形,以及运行振动引发的紧固螺母、铁压钉松动等早期缺陷时,油中故障气体各组分仍保持正常,油色谱分析方法难以有效捕捉此类隐患,可能导致故障进一步发展,引发严重的电力事故。

为此,研究人员研发了变压器声级振动在线监测系统,通过多维信号采集与专业数据分析,实现对变压器早期故障的有效监测。本文将详细阐述该系统的设计原理、功能参数、安装要求及应用价值,为变压器故障诊断技术的优化提供参考。

一、系统设计

1. 技术原理

变压器声级振动在线监测系统的核心原理是通过采

集多维度信号,结合专业信号处理技术,实现对变压器运行状态的精准判断。系统主要是采集变压器的振动信号、噪声信号、包括高低压侧A、B、C三相的电压电流信号以及中性点的电流信号,经数据分析与诊断后,输出设备运行状态信息。

振动加速度传感器的安装方式主要是吸附于变压器本体的表面,噪声传感器的安装方式则是布置在变压器的周围,两种传感器分别用于采集振动和噪声的信号;中性点传感器专门测量中性点电流信号。分布式数据采集器完成数据采集后,就地进行分析、量化与编码,再将数据传送至系统进行展示。

为准确反映变压器内部振动状况,避免绕组、铁芯振动信号衰减过快,振动加速度传感器被安装在变压器绕组A/B/C各相上下端对应的外壳处。在线监测声振分析法通过对这些信号的测量与分析,能够有效预测变压器绕组、铁芯故障,尤其对传统方法难以检测的绕组、铁芯夹件及其他结构件松动故障具有良好的监测效果,是对传统故障诊断方法的重要完善。

系统整体由分布式信号采集模块、数据处理模块、通信模块和监控系统组成。信号采集模块负责各类信号的获取;数据处理模块对采集到的信号进行专业分析处理;通信模块实现实时数据传输;监控系统则用于信号的实时展示及设备故障的分析判断。

2. 模块设计

系统的采样信号分析与处理采用小波包变换理论^[2]、希尔伯特黄变换理论^[3]针对信号进行提取。由于变压器的振动信号多为非平稳信号,而传统傅里叶变换又无法

满足处理需求,交叉小波变换作为小波分析理论的延伸和拓展,其真正的优势在于能够在时频域空间中精准解析到两个非平稳信号之间的关联特征。上述变换技术能够运用到变压器多测点振动信号的分析场景,通过提取不同测点的信号在时间-频率维度的相关属性,能够有效定位具有强相关性的频率分量。

从技术原理来看,小波变换能够将一维信号在时域与频域进行双重展开,从而细致捕捉信号变化的各类细节特征。基于这一基础构建的交叉小波变换,进一步实现了对两个信号相关性在时频域内分布规律的直观呈现,而其变换系数的数值大小,直接对应着信号间相关程度的强弱。

如果尺度函数 ϕ 和小波函数 ψ 满足如下小波双尺度差分的方程,且令

$$u_0(t) = \phi(t)$$

$$u_1(t) = \psi(t)$$

因为绕组的振动取决于负载电流的平方,即

$$F_{winding} \propto i^2$$

由于电流的频率和电网的频率一致,因此绕组的主要谐波分量即是负载电流的频率量,且和负载电流频率满足2倍关系,等于100Hz。

因此,由上述双尺度递归方程所定义的函数,可称为基于尺度函数 ϕ 的小波包。

$$\left\{ u_{2^l}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h(k) u_l(2t - k) \right\} l=0, 1, 2, \dots$$

$$\left\{ u_{2^l+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} g(k) u_l(2t - k) \right\} l=0, 1, 2, \dots$$

式中, $h(k)$ 和 $g(k)$ 是双尺度的序列,可以理解为低通滤波器和高通滤波器的系数,小波包函数作为小波函数 ψ 的一种推广,构成了 $L^2(\mathbb{R})$ 空间上的一组规范的正交基。

小波包作为小波变换的拓展形式,经严谨的数学推导得以构建。它不仅完整承袭了小波变换在时间尺度分析与局部化表征方面的核心优势,还实现了更为精细的信号解析能力,从而大幅提升了信号分析的整体性能与适用范围。绕组振动与负载电流的平方成正比,考虑到电流频率等于电网频率,绕组的主要谐波分量为负载电流频率的2倍,即100Hz,这一特性为信号分析与故障判断提供了重要依据。

系统软件采用B/S架构设计,涵盖展示层、服务层、存储层和设备边缘层。展示层面向用户(管理员、维护

人员、开发者)提供设备状态展示、数据趋势分析、数据导出等功能;服务层包含MATLAB计算分析服务、数据管理、设备管理等核心模块,基于C++/C#组件库实现算法支持,采用MongoDB和MySQL数据库进行数据存储;存储层依托Linux x64服务器、1T硬盘等基础设施;设备边缘层负责设备接入,支持IEC61850通信协议或私有协议。

软件及算法重点说明:

(1) 采用61850通信协议,建立关系型数据库;

(2) 构建系统独立使用平台,同时数据纳入欣影健康评估系统。开发针对在线监测各传感器的配置调试界面,数据展示,报警处理及应该具有的功能;

(3) 准确分离出铁芯、绕组或其他振动信号,对采集实时的数据要能够形成时域及频域谱图分,离出由于中性点电流变化对信号的干扰;

(4) 建立变压器绕组、铁芯、其他振动状况与电压电流的特征函数,计算出个频率段的振动幅值与频率大小,准确表述出振动幅值与频率的关系函数,可以进行故障阈值设定及变化率判别;

(5) 能够提出变压器绕组及铁心故障状况判断的依据(根据信号幅值、频率的特征);

(6) 对噪声变化有基本的判断,区分内部及外部故障(是否为固定件或其他附件松动等)。

二、系统功能及技术参数

1. 核心功能

系统具备变压器原副边每相不同频率下振动幅值的连续在线监测、越限告警及趋势分析功能,最短数据采集间隔为1小时(可调节),同时支持内部振动信号二维(F-S)图谱展示、振动幅值-振动频率关系分析及铁芯与绕组有效幅度相关分析,能够实现绕组或铁芯故障识别、中性点电流监测及固定件故障基本定位。

具体功能包括:

● 状态监测: 能够自动采集被监测设备的状态参量,该模块可完成信号调理、模数转换及数据预处理等核心操作,不仅能实现监测参量的就地数字化转换与缓存存储,还可按设定周期将数据上传至综合监测单元或站端监测单元,同时支持通过本地计算机直接提取相关数据;

● 数据记录: 装置运行期间可准确记录动态数据,当遭遇装置自身异常、电源中断、电压波动或电压跌落等突发状况时,能够自动生成并标记对应的事件信息,

不丢失已记录的数据，不允许人工删除和修改动态记录的数据，即使按任意开关或按键也不会抹去已记录信息；

●异常报警：对各类异常的状态发出报警信号，报警限值可灵活地修改；

●故障自诊断：具备自身故障的诊断能力，并且能够按要求将自诊断结果远传；

●通信功能：支持远方修改定值和相关参数，能够按照说明书规定的不同速率传输数据报文，也能够响应上位机召唤传送记录数据，在断开通信网络连接的时候可正确报出通信中断。

2. 监测对象

变压器声级振动在线监测系统主要的监测对象包括绕组振动、铁心振动和冷却器连接松动三部分：

(1) 绕组振动：

①当绕组发生变形并逐步发展为短路故障的过程中，会产生由结构自身振动与强迫振荡共同作用引发的复杂振动现象；

②运行中遭受各种短路故障，雷击等情况后自身变化；

③绕组变形的累积效应。

(2) 铁芯振动：

①绝缘受潮或损伤，铁芯碰油箱、夹件情况；

②油箱内部可能出现多余金属残留物堆积的情况，同时还可能存在硅钢片局部短路、穿心螺杆的钢座套长度超标，以及钢座套与硅钢片发生短接等问题；

③选用质量有问题的硅钢片；

④铁芯组件中铁质夹件松动，铁芯过热，从而铁芯压紧进一步变松；

⑤铁芯中产生涡流，空载损耗增加，铁芯出现局部过热。

(3) 冷却器连接松动；

①中性点电流增大、地磁影响后，直流反向直流输入。

三、现场应用

1. 监测装置安装

传感器安装需严格遵循位置要求，振动加速度传感器安装在变压器绕组A/B/C各相上下端对应的外壳处，

噪声传感器布置在变压器周围合适位置，中性点传感器按指定方式安装以确保测量精度。采集装置需固定在稳定、干燥的环境中，避免受到振动、潮湿等因素影响。

2. 系统后台展示

系统后台支持多倍频振动分量实时显示、单测量点振动谱图展示、振动信号初分离结果呈现及振动对比试验数据展示等功能，通过直观的图谱和数据呈现，方便工作人员实时掌握变压器运行状态，及时发现异常情况。

小结

变压器声级振动在线监测系统通过创新的监测理念和先进的技术手段，有效弥补了传统变压器故障诊断方法的不足。该系统采用非侵入式设计，无需接入变压器内部电气量，在不影响设备正常运行的前提下，能够精准采集振动、噪声、中性点电流等多维度信号，结合小波包变换、希尔伯特黄变换等专业信号处理技术，实现对变压器绕组变形、铁芯松动等早期故障的有效识别与定位。

系统具备完善的监测、数据记录、报警、自诊断及通信功能，技术参数满足工程应用要求，现场安装便捷，后台展示直观易懂。通过该系统的应用，能够实现变压器故障的早发现、早预防，降低故障发展风险，减少电力事故造成的损失，为电力系统的安全经济运行提供有力保障。

未来，随着信息技术的不断发展，可进一步优化系统的信号处理算法，提升故障诊断的精准度和效率，拓展系统的适用场景和功能范围，推动变压器在线监测技术向更加智能化、高效化的方向发展。

参考文献

- [1]DL/T 860 变电站通信网络和系统
- [2]董明，严璋，杨莉.基于小波包变换的变压器振动信号特征提取[J].中国电机工程学报，2002，22(5)：115-118.
- [3]杨洪耕，肖先勇，刘亚梅.基于希尔伯特-黄变换的变压器振动信号分析[J].电力系统自动化，2008，32(12)：53-56.