Study on interference suppression technology in transient voltage test of high voltage switchgear

Qu Cao Peng Gong

State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd. Jingzhou Power Supply Company Substation Operation and Maintenance Branch, Jingzhou, Hubei, 434000, China

Abstract

the high voltage switch cabinet as a key component of power system, its stable operation is crucial to ensure the continuity and reliability of distribution, transient voltage (TEV) test technology as a non-invasive local discharge online monitoring method, has been widely used in the power industry in recent years, but in the actual test process, external interference signal, such as electromagnetic noise, environmental noise and noise from the equipment itself, often have a significant impact on the test results, so as to reduce the accuracy and reliability of the test. In this paper, the interference source in the transient voltage test of the switch cabinet is discussed, and then a series of effective interference suppression techniques are proposed to improve the accuracy and sensitivity of the test and provide a more reliable guarantee for the safe operation of the power system.

Keywords

high voltage switch cabinet; transient voltage test; interference suppression technology

高压开关柜暂态地电压测试中的干扰抑制技术研究

曹曲 龚鹏

国网湖北省电力有限公司荆州供电公司变电运维分公司, 中国·湖北 荆州 434000

摘要

高压开关柜作为电力系统的关键部件,其稳定运行对保证配电的连续性和可靠性至关重要,暂态地电压(TEV)测试技术作为一种非侵入式局部放电在线监测方法,近年来在电力行业得到了广泛应用,但在实际测试过程中,外界干扰信号,如电磁噪声、环境噪声和设备本身产生的噪声等,往往会对测试结果产生重大影响,从而降低测试的准确性和可靠性。本文对高压开关柜暂态地电压测试中的干扰源进行了深入探讨,并提出了一系列有效的干扰抑制技术,以提高测试的准确性和灵敏度,为电力系统的安全运行提供更可靠的保障。

关键词

高压开关柜; 暂态地电压测试; 干扰抑制技术

1 引言

随着电网的发展,高压开关柜在电力系统中的应用越来越广泛,开关设备内部的绝缘劣化和潜在缺陷可能导致局部放电,从而导致设备故障。因此,对高压开关柜进行局部放电在线监测尤为重要。瞬态电压测试技术作为一种非侵入式检测方法,具有操作简单、抗干扰能力强等优点,已广泛应用于高压开关柜的局部放电监测。但是在测试的过程中,不可避免地会受到各种干扰信号的影响,导致测试结果不准确,本文将对高压开关柜瞬态地电压测试中的干扰源进行分析,并提出相应的干扰抑制技术。

2 高压开关柜暂态地电压测试原理

2.1 电磁波辐射和传播机理

高压开关柜暂态地电压测试(TEV)测试技术的基础是了解高压设备中局部放电事件引起的电磁辐射及其传播特性,局部放电是电力设备绝缘系统中常见的物理现象,当绝缘介质中的电场强度超过其容许极限时就会发生,这些放电事件伴随着能量的快速释放,形成瞬态电流脉冲,这些脉冲以电磁波的形式在设备及其周围空间中快速传播,其传播速度接近光速,约为每秒3亿米(3×10^8 米/秒)^[1]。电磁波的传播不仅受设备内部结构的影响,还受外部环境的制约,在高压开关柜等复杂结构中,电磁波可能通过各种路径传播,如金属壁、绝缘介质和气隙,金属壁作为导体,对电磁波有一定的屏蔽作用,但也可能作为二次辐射源,将电磁波传导到机柜外部,绝缘介质与空气间隙的介电常数和电导率的差异影响电磁波的传播速度和衰减特性,了解电磁

【作者简介】曹曲(1967-),男,中国湖北北京山人,变电运行高级技师,从事电气工程研究。

波在高压开关柜中的具体传播路径和衰减机理，对于准确捕获 TEV 信号至关重要。此外，局部放电产生的电磁波具有宽带特性，其频率成分从几赫兹到几百兆赫兹不等，对于 TEV 测试，关注的主要频率范围通常在 MHz 到几百 MHz 之间，这是由电容耦合传感器的响应特性和背景噪声水平决定的，在这个频率范围内，电磁波的传播特性相对稳定，受介质损耗和色散效应的影响较小，有利于信号的精确测量和分析。

2.2 电容耦合传感机制

电容耦合传感器作为 TEV 测试系统的核心部件，其工作原理是基于电容的基本物理效应，当传感器安装在高压开关柜的金属外壳上时，在外壳和传感器之间形成微小的电容结构，该电容的大小取决于传感器和外壳之间的距离、接触面积以及它们之间的绝缘介质（通常是空气或薄绝缘材料）。当开关柜内发生局部放电时，金属外壳上的瞬态电压变化会在电容器两端产生相应的电位差，从而驱动电流通过传感器内部的电路，这个电流经过放大处理后，可以转换成电压信号输出。传感器的灵敏度直接取决于其电容和内部电路的增益特性，为了提高测试的准确性，传感器的设计需要兼顾高灵敏度和抗干扰能力。

值得注意的是，电容耦合传感器的响应特性也受其安装位置和方向的影响，在实际应用中，传感器的最佳安装位置通常位于开关柜的侧面或顶部，因为这些位置更容易捕捉到内部放电事件辐射的电磁波，传感器的方向应与电磁波的主要传播方向一致，以最大限度地提高信号接收效率。

2.3 信号采集和处理流程

高压开关柜暂态地电压测试的信号采集和处理流程是一项复杂而精细的系统工程，涉及许多关键步骤和技术环节，传感器捕捉到的高频瞬态电压信号需要前置放大器进行初步放大，这一步对于提高信号的信噪比非常重要，因为原始信号往往非常微弱，容易受到环境噪声和设备本身噪声的干扰，前置放大器的设计需要兼顾高增益和低噪声特性，以保证信号的准确放大和传输。然后，放大的信号被发送到模数转换器（ADC）进行数字处理，ADC 的采样率和分辨率对于信号保真度和后续分析非常重要，在实际应用中，通常采用高采样率（如每秒百万次采样）和高分辨率（如 16 位或更高）的 ADC 来保证信号的准确捕获和转换。数字化后的信号进入信号处理阶段，包括滤波、去噪、特征提取等步骤，滤波操作旨在消除环境噪声和设备噪声对测试结果的影响，通常通过带通滤波器或自适应滤波器来实现，去噪操作进一步减少了信号中的随机噪声分量，并提高了信号的信噪比，特征提取是信号处理的关键步骤之一，它通过频谱分析、时域分析或时频分析等手段提取与局部放电有关的特征参数，如特征频率、幅值和相位等。根据提取的特征参数，结合开关柜的结构和运行参数，对局部放电的位置、类型和

严重程度进行评估，这个过程需要综合运用多种分析方法和算法，如模式识别、机器学习等，以提高评估的准确性和可靠性，整个信号采集和处理过程需要高精度的硬件设备和先进的算法支持，以保证测试的准确性和可靠性，为电力系统的安全运行提供有力保障。

3 干扰源分析

3.1 环境噪声

在高压开关柜暂态地电压测试（TEV）测试中，环境噪声是一个不可忽视的，环境噪声主要来源于自然界的电磁辐射和人类活动产生的电磁干扰。自然界的电磁辐射包括闪电和太阳黑子活动等自然现象产生的电磁波，可能覆盖 TEV 信号的频率范围，从而干扰测试结果，人类活动产生的电磁干扰更为复杂，包括无线电通信、电力线传输、工业设备运行等来源。^[2]以无线电通信为例，移动通信基站、无线电台等无线电发射设备在工作时会产生强大的电磁波，这些波段的电磁波可能与 TEV 信号的频率相近，导致信号在传输过程中产生干扰。据研究，移动通信基站的发射功率通常在几百瓦到几千瓦之间，而 TEV 信号的强度相对较弱，通常在微伏到毫伏的级别，在无线电通信密集的地区进行 TEV 测试时，需要特别注意避免无线电信号的干扰。此外，电力线传输也是环境噪声的重要来源之一，电力线传输电能时会产生电磁场，电磁场可能通过空气、土壤等介质传播到测试现场，干扰 TEV 信号。在高压输电线路附近进行 TEV 测试时，这种干扰尤其明显，据测量，高压输电线路产生的电磁场强度可能达到几百微特斯拉到几千微特斯拉，而 TEV 信号的磁场分量相对较小，因此很容易受到电力线传输产生的电磁场的干扰。

3.2 设备本身噪声的多样性和抑制

设备本身的噪声主要来源于测试系统的电子元器件、传感器、放大器等元件的固有噪声，以及电路中的热噪声和散粒噪声，这些噪声成分在测试过程中会叠加在 TEV 信号上，导致信号质量下降。以传感器为例，当电容耦合传感器捕捉到 TEV 信号时，电子元件（如电阻、电容、晶体管等）在其内部电路会产生一定的噪声。这些噪声成分可能包括热噪声、散粒噪声和 $1/f$ 噪声，热噪声是电子元件中微小粒子热运动产生的随机噪声，其大小与温度成正比。散粒噪声是由电子在导体中运动的不连续性引起的，其大小与电流强度成正比， $1/f$ 噪声是一种与频率成反比的噪声成分，通常在低频段比较明显。为了抑制设备噪声对 TEV 测试的影响，可以采取各种措施，比如选择低噪声的电子元件和传感器以及优化电路设计来降低噪声；采用差分放大技术或锁定放大技术等信号处理技术，提高信噪比；在测试过程中保持测试环境稳定，避免温度变化、电磁干扰等因素对测试结果的影响。

4 高压开关柜暂态地电压测试中干扰抑制技术分析

4.1 小波变换去噪技术

小波变换去噪技术是一种高效成熟的干扰抑制方法，小波变换作为一种时频分析方法，能够同时提供信号的时域和频域信息，特别适合处理非平稳信号和突变信号。在 TEV 测试中，开关柜内部放电产生的电磁波信号往往伴随着大量的噪声干扰，如热噪声、系统白噪声等，这些噪声成分可能在频域中与 TEV 信号重叠，这使得难以直接提取信号。小波变换去噪技术通过选择合适的母小波函数和分解层数，将信号分解成不同频率分量的小波系数，然后通过阈值处理去除噪声分量，最后通过小波重构得到去噪后的信号。以 A220kV 变电站 35kV 开关柜的 TEV 测试为例，测试仪首先采集了开关柜的 TEV 信号，并应用小波变换去噪技术对其进行处理。通过对比处理前后的信号波形，发现去噪后的信号波形更加清晰，噪声成分明显减少，TEV 信号的特征更加明显，通过计算信噪比等评价指标，也验证了小波变换去噪技术在 TEV 测试中的有效性。

4.2 电磁屏蔽和接地技术

电磁屏蔽技术通过使用导电材料（如金属板、金属网）将测试系统与其他电磁干扰源隔开，减少电磁场的相互干扰，接地技术是将测试系统的金属外壳、屏蔽层等部分与大地连接起来，形成等电位体，从而消除或减少因电位差而产生的电磁干扰。在 500kV 变电站开关设备的 TEV 测试中，测试人员发现测试系统的传感器容易受到周围电磁场的干扰，导致测试结果不稳定，为了解决这个问题，测试人员采用了电磁屏蔽和接地技术进行优化，在传感器周围安装了金属屏蔽网，将传感器与周围的电磁干扰源隔离开来，他们还将传感器的金属外壳与大地连接起来，形成了一个等电位体。通过这些措施的实施，测试仪成功降低了电磁干扰对测试结果的影响，提高了测试的准确性和稳定性。

4.3 时差定位技术

时差定位技术是高压开关柜暂态地电压测试中常用的定位方法，它通过在开关柜的不同位置放置多个传感器，利用电磁波传播速度的差异来测量电磁波脉冲从放电点到不同传感器的时间差，从而确定放电点的位置，在实际应用中，TDOA 定位技术容易受到多种因素的干扰，如传感器之间的耦合干扰、电磁波在金属盒中的反射和折射等。为了提高 TDOA 定位技术的准确性和可靠性，测试人员对其进行了改

进，优化了传感器的布局 and 数量，以确保传感器能够覆盖整个开关柜的放电区域。同时，还采用先进的信号处理技术对电磁脉冲信号进行提取和识别，以减少噪声成分的干扰，测试仪还考虑了电磁波在金属盒中的传播特性，对定位算法进行了修改和优化。以 B110kV 变电站开关设备 TEV 测试为例，测试人员采用改进的时差法定位放电点，通过对比不同传感器的时差数据，他们成功确定了放电点的位置，并进行了修复，修复后，开关柜在后续测试中表现良好，没有出现放电现象。

4.4 实施综合抗干扰策略

单一的抗干扰方法往往难以完全排除所有的干扰因素，测试人员需要采取全面的抗干扰策略来应对各种复杂的干扰情况，综合抗干扰策略包括多种方法的联合应用，如小波变换去噪技术、电磁屏蔽和接地技术、时差定位技术的改进等。^[1]在 C 大型电力公司高压开关柜暂态地电压测试中，测试人员采用了综合抗干扰策略来应对各种干扰因素，利用小波变换去噪技术对采集的 TEV 信号进行去噪，提高了信号的信噪比，采用电磁屏蔽和接地技术，减少电磁干扰对测试结果的影响，用改进的时差法定位放电点，并进行修复。通过这些措施的实施，测试人员成功提高了 TEV 测试的准确性和可靠性，为电力系统的安全运行提供了有力保障。

5 结语

虽然目前国内外对高压开关柜暂态地电压测试中的干扰抑制技术进行了大量研究，也有部分产品问世并投入电力公司进行应用，但是，除了各种局部方法本身尚有一些难点需要克服以外，目前高压开关柜暂态地电压测试中的干扰抑制技术不能全面、有效、可靠地反映开关柜内部的局部情况，更不能对开关柜中局部以外的其他常见故障进行在线测试。因此，亟需开发基于多种局部暂态地电压测试中的干扰抑制技术来实现对开关柜运行状态的更准确的评估。在此基础上，才能扬长避短，更有助于及时发现开关柜的绝缘缺陷，防患于未然，确保电网的运行稳定性。

参考文献

- [1] 钱钰钰. 开关柜局部放电检测技术的应用分析[J]. 清洗世界, 2019,35(07):67-68.
- [2] 赵晓冰, 满晓平, 朴永鑫, 杨杰, 王江城. 开关柜局部放电监测系统的研究[J]. 电子世界, 2019(14):172-173.
- [3] 刘学. 开关柜局部放电综合检测方法的研究与应用[J]. 科技风, 2019(17):184.