

变压器局部放电试验抗干扰技术应用研究

程海, 吴滔, 王城良

(丽水正阳电力建设有限公司, 浙江 丽水 323000)

摘要 现场试验环境冗杂, 变压器局部放电试验是检验绝缘状态的核心手段, 但各类电磁干扰常使得测量结果失准, 严重地制约了绝缘状态判断的准确性, 本文针对现场局部放电试验的抗干扰技术应用, 分析了干扰信号的来源、时域特征及传播途径, 提出了硬件滤波、时域开窗、脉冲极性鉴别及动态平衡回路的融合抗干扰技术工法。融合某 220 kV 变电站变压器现场试验的工程实践, 详细地说明了技术工法的实行步骤以及参数配置, 依托对比试验数据验证了技术应用效果, 以期在现场变压器绝缘状态的准确判断提供技术参考。结果表明, 本文提出的抗干扰技术工法能有效抑制背景噪声、周期性干扰及随机脉冲干扰, 明显地增强了局部放电信号的信噪比以及检测灵敏度。

关键词 变压器; 局部放电; 试验抗干扰技术

中图分类号: TM41

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.036

0 引言

在电力系统运行可靠性方面, 变压器是重点设备, 运行可靠性直接关系到电网的安全稳定, 局部放电是变压器绝缘劣化的重要征兆, 凭借局部放电试验可在设备投运前及运行过程中有效发现绝缘缺陷。但是, 现场试验环境一般伴随强烈的电磁干扰, 此类干扰信号幅值可能远超真实的局部放电信号, 使得测量系统无法准确捕获放电脉冲, 甚至得出错误的绝缘状态判断。所以, 如何有效抑制以及排除各类干扰, 增加局部放电测量的准确性以及可靠性, 成为现场试验中的核心技术难题。本文不追求理论模型的创新, 而是立足于工程实践, 从干扰的本质特征出发, 整合出一套系统化、可操作性强的抗干扰技术工法。重点说明干扰信号的诊断识别方法、硬件与软件协同的抑制技术, 并结合实际工程实例, 详细说明上述技术应用的具体操作、参数选择及效果验证, 以期为电力设备现场试验人员提供技术参考。

1 现场局部放电试验干扰信号的来源与特征分析

1.1 试验回路中连续周期性干扰的电磁耦合机理与频域特征

在现场变压器局部放电试验中, 连续周期性干扰是最为常见的干扰类型之一, 能量大多集中于特定的频带范围内, 此类干扰大多来自试验现场周边的带电

运行设备, 尤其是同变电站内在运行状态的其他电压等级母线、断路器操作机构及高压输电线。此类设备在正常运行时会产生稳定的工频电磁场, 基频为 50 Hz, 同样因设备本身的非线性特性及铁磁元件的磁滞效应, 还会衍生出大量的高次谐波分量, 谐波频率一般为 100 Hz、150 Hz、200 Hz 直至数千赫兹^[1]。当试验回路, 包含高压引线、变压器套管及测量阻抗, 在此类变化的电磁场时, 回路上会因电磁感应而耦合出对应频率的电压以及电流, 形成连续的周期性干扰波形。从频域观点分析, 该类干扰呈现出鲜明的离散谱线特征, 谱线间隔恰好为 50 Hz, 干扰素量集中在工频的奇次或者偶次谐波频率点上, 幅值相对稳定且有重复性。分析信号特征, 此类干扰一旦进入测量系统, 会以及真实的局部放电信号叠加, 真实的局部放电信号是宽频带、非周期性的瞬态脉冲, 而周期性干扰则表现为窄带、持续的波形, 两者在时域以及频域均有明显的差异, 这种本质差异是后续使用频域滤波以及时域开窗技术实行干扰抑制的物理基础。

1.2 试验电源侧传导干扰的生成机制与波形畸变规律

试验电源系统的作用不仅显现在给予试验能量, 还充当传导干扰的核心入口, 现场试验一般选用移动式发电机组或者依托变电站用电系统供电, 此类电源系统的输出波形不是理想的正弦波, 发电机组运行时,

作者简介: 程海 (1988-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 电力工程。

转子励磁系统的整流环节会产生换向尖峰, 此类尖峰以高频脉冲形式叠加在工频电压波形上, 经由供电电缆直接传导到试验变压器及被试变压器的低压侧^[2]。传导干扰的波形特征显现为与工频电压同步的脉冲串, 脉冲宽度多在微秒级, 与重复频率以及工频周期相关, 观察传导干扰的传播特性, 发现传播途径以及试验电压完全一致, 且干扰脉冲幅值常随试验电压升高而增大, 频谱以及真实局部放电信号高度重叠, 使得单纯依托频域滤波比较难有效区分, 必须融合时域特征与信号相位关系实行融合判别。

2 基于信号特征差异的局部放电试验综合抗干扰技术工法

2.1 采用宽频带电流互感器与无源滤波器组合的硬件前置抑制工法

与传统铁氧体磁芯互感器相比, 纳米晶磁芯拥有更高的磁导率和更低的损耗, 低频段衰减工频及谐波干扰的能力更强, 高频段还能保持平坦的响应特性, 保证真实局部放电信号的无畸变传输, 电流互感器输出端使用三级无源滤波网络实行串联配置。第一级是高通滤波器, 截止频率设定为 30 kHz, 用于衰减试验电源及邻近设备产生的工频及低次谐波干扰, 该滤波器使用电容以及电阻的串联结构, 电容值选择 0.1 μF , 电阻值选择 100 Ω , 形成转折频率约 16 kHz 的高通特性, 有效滤除 50 Hz 至数千赫兹的周期性干扰素^[3]。电路结构里, 第二级是低通滤波器, 截止频率设定为 30 MHz, 使用电感以及电容构成的 π 型网络, 电感量选择 1 μH , 电容量选择 100 pF, 用来抑制超高频段的电磁辐射干扰, 防止高频噪声进入放大器产生互调失真。第三级是陷波滤波器, 针对现场实测干扰频谱中能量集中的特定频率点, 如某次测量中发现的 1.2 MHz 强广播信号干扰, 使用 LC 串联谐振电路构成的陷波网络, 实现对该频点干扰的深度衰减, 三级滤波器协同工作后, 进入放大器的干扰总能量减少约 30 dB 至 40 dB, 后续的数字信号处理已获得有利条件。

2.2 基于脉冲时域波形与相位窗口的动态开窗抑制工法

时域开窗技术的应用分析表明, 该技术有效地利用局部放电信号与周期性干扰在时间分布上的差异, 凭借设定时间窗口实现有效信号段的选择性截取, 本工法使用双通道同步采集架构, 测量通道连接被试变压器末屏或者套管末屏处的测量阻抗, 负责采集包含放电脉冲以及干扰的混合信号; 参照通道则连接试验变压器高压侧的电压分压器, 用于获取试验电压的相

位基准。在信号处理流程方面, 先是凭借过零比较电路将相位参照信号转换为工频周期方波, 使用锁相环技术实现工频周期的精确锁定, 相位误差严格地控制在 $\pm 0.1^\circ$ 范围内, 随后软件系统把完整工频周期离散化为 360 个相位窗口, 每个窗口对应 1° 相位宽度。系统依靠连续采集多工频周期信号, 自动建立各相位窗口内脉冲出现概率的统计分布, 依据局部放电机理特征, 真实放电脉冲一般集中在电压波形的特定相位区域, 譬如 $\pm$ 峰值附近或者过零点附近, 相位分布模式以及绝缘缺陷类型有着强相关性。相比之下, 电源侧传导的换向尖峰等周期性干扰, 出现相位有着严格固定性, 且与工频电压特定相位点保持精确同步。统计结果分析表明, 系统自动识别出脉冲出现概率异常集中且幅值波动较小的相位区间, 判定此为干扰相位窗口。随后, 数据处理环节屏蔽了判定为干扰相位窗口内的所有脉冲信号, 只保留其余相位窗口内的脉冲用于局部放电分析, 这一类动态开窗方法可依据现场实际的干扰分布情况自适应地调节窗口参数, 规避了固定窗口可能引发的局部放电漏判或者干扰误判问题, 特别适用于干扰源相位分布相对稳定的试验场景。

3 抗干扰技术在 220 kV 变压器现场局部放电试验中的应用

某 220 kV 变电站新建工程安装了一台 240 MVA 三相油浸式电力变压器, 需要实行现场局部放电试验, 该变压器型号为 SSZ11-240000/220, 额定电压为 220 kV/115 kV/10.5 kV, 试验现场环境繁复, 变电站内部分相邻间隔已带电运行, 包含一条 220 kV 出线及两条 110 kV 出线, 试验位置以及带电设备的最小直线距离约为 15 m。试验回路使用单边加压方式, 试验电源由一台 300 kW 柴油发电机组给予, 依托中间变压器升压后施加于被试变压器低压侧, 试验环境温度为 28 $^\circ\text{C}$, 相对湿度为 65%, 按照国家标准及设备制造厂要求, 局部放电试验在 1.5 倍额定电压下持续实行 30 min, 允许的最大局部放电量限值为 100 pC。为准确判断变压器绝缘状况, 需要采取有效的抗干扰措施以抑制现场各类干扰对测量结果的作用。

3.1 试验回路布置与传感器安装位置的优化选择

试验准备阶段, 在试验正式启动前, 先对试验回路做了精细的布置, 高压引线选用直径 25 mm 的铜管, 可减少引线的电晕放电, 铜管表面涂抹导电膏可减少接触电阻, 引线的走向尽量远离带电运行设备, 以及 220 kV 出线构架保持大于 3 m 的间距, 同时避免与建筑物钢结构形成闭合回路的空间布局。测量阻抗选用

Rogowski 线圈型高频电流传感器, 分别安装于变压器高压套管末屏接地线、铁芯接地线还有夹件接地线处, 高压套管末屏接地线处的传感器用于测量主绝缘内的局部放电信号, 该传感器在 10 kHz 至 20 MHz 频带内有着平坦的幅频响应, 灵敏度到了 1 mV/pC。铁芯接地线以及夹件接地线处的传感器用于辅助辨别干扰信号的来源以及极性, 所有传感器均使用双屏蔽同轴电缆连接至测量主机, 电缆外层屏蔽在传感器端以及主机端分别接地, 形成双端接地方式可抑制地环路干扰, 安装调试时, 传感器的安装位置经过反复地修正, 保证该装置与被测回路紧密地贴合。传感器以及接地线之间使用铜质压接端子实行连接, 避免因接触不良产生额外的脉冲噪声^[4]。

3.2 基于脉冲极性鉴别的外部辐射干扰信号识别与剔除

试验加压至 80 kV 后, 测量系统读数显示局部放电量约 150 pC 至 200 pC, 超过 100 pC 的限值, 脉冲波形上升沿以及衰减阶段较规则, 初步判定为可疑放电信号, 为确认信号来源, 启用双传感器极性鉴别功能, 把高压套管末屏传感器与铁芯接地线传感器接入鉴别模块。同步采集两个通道波形发现, 幅值较大的脉冲出现时, 两个传感器脉冲起始极性均为正向, 极性一致, 依据极性鉴别原理, 脉冲信号源自外部空间辐射耦合, 不是变压器内部局部放电, 排查现场环境发现, 脉冲出现时试验人员在附近使用对讲机通信, 对讲机射频信号被测量回路接收形成干扰脉冲^[5]。确认干扰源后, 要求试验期间停止区域内使用对讲机及其他无线电设备, 并把试验设备外壳及屏蔽层接地电阻从 2.5 Ω 降至 0.8 Ω 。测试结果证实, 经上述处理后再次测试, 极性相同的干扰脉冲几乎不见, 局部放电读数跌至 30 pC 以下, 说明原测得的 150 pC 至 200 pC 信号确实源于外部辐射干扰。

3.3 动态开窗技术对电源侧周期性传导干扰的抑制效果

试验现象分析表明, 当试验电压升至 140 kV 时, 局部放电量读数呈现出周期性的波动, 数值在 40 pC 至 80 pC 之间反复跳变, 凭借波形数据实行时域分析发现, 干扰脉冲出现在工频电压波形每半周的特定相位点, 即电压波形 ± 峰值过后的约 30° 电路位置, 且脉冲幅值相对稳定。该特征以及柴油发电机组励磁系统产生的换向尖峰高度吻合, 判定为电源侧的传导干扰, 启动动态开窗抑制功能, 系统先是采集 20 个工频周期的波形数据, 统计每个 1° 相位窗口内脉冲出现的

次数, 统计结果显示, 在 90° ± 5° 以及 270° ± 5° 的相位窗口内, 脉冲出现概率到了 100%, 且脉冲幅值变化范围小于 10%, 远高于其他窗口的脉冲出现概率以及幅值波动特性。据此, 系统自动把这两个相位区间设定为干扰屏蔽窗口, 窗口宽度各设定为 10°, 开启开窗抑制后, 相位窗口内的干扰脉冲被软件滤除, 局部放电读数稳定在 25 pC 左右, 且不再出现周期性波动, 屏蔽窗口宽度缩小后, 窗口宽度设为 5°, 局部放电读数保持稳定, 说明真实放电信号以及干扰信号在相位上无重叠, 开窗抑制未造成有效信号的损失。

4 结束语

在变压器局部放电试验现场环境下, 电磁干扰种类繁多, 频谱特征、时域波形及传播途径各不相同。本文依据工程实践, 详细分析了连续周期性干扰、传导干扰、空间辐射干扰及系统本底噪声的产生机理以及特征规律, 据此提出硬件前置滤波、时域动态开窗、双传感器极性鉴别及动态平衡差分对消四项抗干扰技术工法。经某 220 kV 变压器现场试验应用验证, 上述工法能针对性地解决特定类型干扰问题, 技术实现参数可依据现场实际干扰特征灵活变动, 表现出良好的适应性与可操作性, 融合使用多项抗干扰技术, 可以把干扰水平有效控制在较低范围, 明显加强局部放电测量的信噪比以及检测灵敏度, 保障试验结果的真实可靠。本文所述技术工法无需依托繁复设备以及深奥理论, 具备较佳的现场可推广性, 对增加电力设备绝缘诊断准确性有着实际参考价值。

参考文献:

- [1] 赵志刚, 刘永军, 陈天缘, 等. 基于贝叶斯优化与 CRITIC 方法的中压高频变压器绝缘结构优化设计 [J/OL]. 电工技术学报, 1-16 [2026-03-28]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.250568>.
- [2] 李梓琦, 史睿乾. 振荡冲击电压下电力变压器局部放电现场交接试验研究 [J]. 电气技术与经济, 2026(02):67-69.
- [3] 王清泉. 一起 500 kV 变压器油色谱异常事件分析及防范措施 [J]. 机电信息, 2026(04):31-34.
- [4] 杨宇翔, 李斯盟, 卜泽伟, 等. YD 联结换流变压器阀侧绕组饼间等效电压下的局部放电特性 [J]. 变压器, 2026, 63(02):14-23.
- [5] 宁海波. 油浸式电力变压器在线状态监测系统设计与应用研究 [J]. 家电维修, 2026(02):135-137.