

高压套管介质损耗因数实时监测算法及精度分析

陈杰

湖北省天门市,上海凌至物联网有限公司,200123;

摘要:本文提出一种基于离散傅里叶变换(DFT)谐波分析法的高压套管介质损耗因数(tgδ)实时监测算法, 通过同步采集末屏泄漏电流与母线电压信号,提取基波分量并计算相位差,结合电容型设备电流超前电压特性推 导介损值。系统采用多维抗干扰设计,包括特制合金外壳(抗磁导率≥5000 H/m)与 IP65 防护抑制电磁干扰、 自适应噪声抵消算法消除谐波(谐波抑制比≥40 dB)、GPS 授时模块(同步误差<1 μs)确保信号同步,以及 多点标定法优化传感器线性度(全量程<0.02%)。现场验证表明,国网常州政平±500kV 换流站介损绝对误差 <0.0002,电容量相对误差<0.2%,极端工况下稳定性偏差<0.3%,满足国家电网对 0.01%级精度的技术要求。该 算法为高压套管绝缘劣化、受潮等缺陷的早期预警提供了高可靠性技术支撑。

关键词:高压套管;介质损耗因数;实时监测;离散傅里叶变换(DFT);抗干扰设计;GPS 授时;精度验证 DOI: 10.69979/3060-8767.25.05.026

高压套管介质损耗因数(tgδ)的实时监测通过基 于离散傅里叶变换(DFT)的谐波分析法实现,核心为 同步采集末屏泄漏电流与母线电压信号,提取基波分量 并计算相位差,结合电容型设备电流超前电压特性推导 出 tgδ值。系统采用硬件屏蔽(特制合金外壳)与自适 应噪声抵消算法抑制电磁干扰,末屏传感器线性度<0.0 2%,GPS 授时技术确保同步误差<1μs,使介损测量误差 ≤±(标准读数×1%+0.0001),相对标准偏差≤0.3%。 国网常州政平±500kV换流站实测数据显示,介损绝对 误差<0.0002,电容量相对误差<0.2%,验证了算法在强 干扰环境下的高精度与稳定性,为套管绝缘状态评估及 故障预警提供了可靠技术支撑。

1 高压套管介质损耗因数实时监测算法

基于离散傅里叶变换(DFT)的谐波分析法是当前 主流的实时监测算法。核心原理是通过同步采集套管末 屏泄漏电流信号与母线电压信号,提取基波分量并计算 相位差,精确求解 tgδ。具体步骤如下:

1.1 信号采集与数字化

通过末屏接地线安装的高精度电流互感器获取泄漏电流 I(t),母线电压传感器获取电压信号 U(t),两者经模数转换后生成离散序列。

1.2 基波分量提取

对离散信号进行 DFT 变换,利用三角函数的正交性 分离基波分量:

$$U_{lm}\sin(\omega t + \alpha_1) = \frac{2}{T} \int_0^T u(t)\sin\omega t dt (\mathbb{E} \mathbb{E} \mathbb{E} \mathbb{E})$$
$$I_{lm}\sin(\omega t + \beta_1) = \frac{2}{T} \int_0^T i(t)\sin\omega t dt (\mathbb{E} \mathbb{E} \mathbb{E} \mathbb{E})$$

1.3 相位差与介损计算

基波相位差 $\Delta \phi = \beta 1 - \alpha 1$,结合电容型设备电流超前电压 90°的特性,介质损耗因数计算为:

$$\tan \delta = \tan \left[\frac{\pi}{2} - \Delta \phi \right]$$

通过优化算法抑制高次谐波和电磁干扰,系统可实 现介损测量误差≤±(标准读数×1%+0.0001),相对 标准偏差≤0.3%,满足行业对0.01%级精度的需求。

2 测量精度优化措施

2.1 环境干扰抑制

高压套管在线监测系统面临的主要环境干扰包括 强电磁场、系统频率波动及谐波干扰,其产生的测量误 差直接影响介质损耗因数(tgδ)的精度。针对不同干 扰类型,系统采用多维抑制策略,具体措施如下: 2.1.1强电磁场抑制

高压变电站内强电磁场易导致末屏泄漏电流信号 畸变。系统通过特制合金金属外壳(抗磁导率≥5000 H /m)与 IP65 防护等级设计,实现电磁屏蔽与密封防护。 实测表明,屏蔽后传感器内部磁场强度衰减至外部环境 的 5%以下,末屏泄漏电流测量线性度提升至<0.02%(量 程 0.5~500 mA)。

2.1.2 频率波动与谐波干扰抑制

受影知刊出版社 JZK publishing

系统频率波动(±0.5 Hz)及谐波(3[~]50 次)会引 入相位差误差。通过自适应噪声抵消算法,动态跟踪基 波频率并滤除非同步谐波分量。算法采用滑动窗口 DFT (窗口宽度 10 周期),使谐波干扰导致的 tg δ 偏差从 0.1%降至<0.02%。

2.1.3 硬件与软件协同优化

干扰类型	抑制措施	技术参数	效果
电磁干扰	合金外壳	磁场衰减	泄漏电流线
	+IP65 防护	≥95%	性度<0.02%
谐波干扰	自适应滤波	谐波抑制比	介损误差
	+同步采样	≥40 dB	<0.0002
频率波动	GPS 授时同	时间同步误	相位差计算
	步	差<1 μs	误差 <0.001°
环境温湿度波 动	传感器温漂 补偿	温漂系数≤5 ppm/℃	全年测量稳 定性偏差 <0.3%

2.1.4 现场验证与数据对比

以国网常州政平±500kV换流站为例,对比干扰抑

制前后数据:

工况	未抑制干扰 时 tgδ 波动范 围	抑制干扰后 tgδ 波动范围	误差降 幅
强电磁环 境	0.25%~0.40%	0.256%~0.278%	65%
谐波注入 (5次)	±0.15%	±0.02%	86.7%
频率偏移 ±0.5 Hz	±0.1%	±0.01%	90%

通过上述综合措施,系统在复杂工况下实现介损绝 对误差<0.0002,满足国家电网对0.01%级精度的严苛要 求,为套管绝缘状态评估提供可靠数据支撑。

2.2 硬件线性度校准

末屏泄漏电流传感器的非线性误差是影响介质损 耗因数(tgδ)测量精度的关键因素。为确保在 0.5 m A⁵00 mA 宽量程内线性度<0.02%,系统采用多点标定法 与动态补偿算法,具体流程及效果如下:

2.2.1 校准方法与设备

通过 0.01 级高精度标准电流源(型号: FLUKE 550 0A)对传感器进行全量程分段标定,覆盖 0.5 mA、10

mA、100 mA、300 mA、500 mA等关键节点。标定数据经 最小二乘法拟合生成非线性补偿曲线,并固化至采集模 块 FPGA 中,实现实时动态校正。

2.2.2 校准参数与性能

校准参数	标定条件	校准后性能
量程范围	0.5 mA~500 mA	全量程覆盖
标准电流源精度	±0.01%读数 +0.005%量程	基准误差 <0.005%
标定点数量	10 点(对数分布)	拟合优度 R ² ≥0.9999
温漂补偿	-40°C~+85°C	温漂系数≤5 ppm/℃

2.2.3 校准前后对比

以某型号传感器为例,校准前后线性误差对比如下:

电流值 (mA)	校准前误差 (%)	校准后误 差(%)	误差降幅
0.5	±0.15	±0.018	88%
10	±0.12	±0.015	87.5%
100	±0.08	±0.012	85%
500	±0.05	±0.010	80%

2.3.4 现场应用验证

在国网常州政平±500kV 换流站部署后,传感器连续运行 12 个月的稳定性数据显示:

线性度漂移: <0.003%/年(满足<0.02%要求);

极端工况适应性: 在-30℃低温与+70℃高温下,线性度偏差均<0.015%;

介损关联误差:传感器非线性导致的 tg δ 附加误差 ≤0.0001,占总误差比例<5%。

通过硬件校准与动态补偿,系统实现了末屏泄漏电 流的高精度测量,为介损因数计算提供了可靠数据基础, 全面支持国家电网对套管状态监测的严苛精度要求。

2.3 同步采样技术

高压套管介质损耗因数的精准测量依赖于电压与 电流信号的严格同步采集。相位偏移会导致基波分量提 取误差,进而影响介损计算结果。为此,系统采用 GPS 授时模块与高精度时钟芯片,实现多通道信号的纳秒级



同步,具体技术方案及验证如下:

2.3.1 同步机制设计

授时模块选型:采用 ublox NEO-M8T 高精度授时模块,支持多频段 GPS/北斗信号,授时精度<30 ns;

时钟同步架构: 主控 FPGA 内置恒温晶振 (OCXO), 频率稳定度≤±0.1 ppm, 结合 PLL 锁相环技术, 确保 采样时钟抖动<50 ps;

信号触发模式:电压与电流信号通过硬件触发电路 同步启动采样,消除软件触发延迟(典型值<0.1 µs)。 2.3.2 性能参数与误差分析

参数	技术指标	测试条件	误差贡献
时间同步误 差	<1 µs	全工况 (- 40℃~+85℃)	相位差误 差<0.001°
采样率	10 kS/s(可 配置)	基波频率 50 Hz	谐波分辨 率≤0.1%
时钟抖动	<50 ps	强电磁环境(30 kV/m)	介损附加 误差 <0.0001
抗干扰能力	符合 IEC 61000-4-30 Class A	谐波畸变率 20%	同步稳定 性>99.9%

2.3.3 同步失效场景与冗余设计

卫星信号丢失:系统切换至恒温晶振自主守时模式, 24 小时内时间漂移<10 μs;

电磁脉冲干扰:采用同轴屏蔽电缆与磁环滤波,抑 制共模干扰(CMRR≥120 dB);

多设备协同:通过 IEEE 1588 精确时间协议(PTP)
实现站内多监测终端μs级同步,组网误差<2 μs。
2.3.4 现场验证与数据对比

以国网常州政平±500kV 换流站为例,同步技术应用前后数据对比如下:_____

工况	未同步时介损 波动范围	同步后介损 波动范围	误差降幅
正常负荷	0.28%~0.35%	0.256%~0.278 %	60%
谐波注入(7 次)	±0.12%	±0.02%	83.3%
极端温度 (-30 ℃)	±0.15%	±0.03%	80%

通过 GPS 授时与硬件协同优化,系统在复杂工况下

实现时间同步误差<1 μs,相位差计算精度达 0.001°, 为介损测量提供高可靠性保障,满足国家电网对 0.01% 级精度的严苛要求。

2.4 现场数据验证

以国网常州政平±500kV 换流站监测数据为例,对 比在线监测结果与离线试验数据:

相位	参数	离线值	在线监测范围	误差分析
A 相	tgδ	0.265%	0.256%~0.278 %	绝对误差 <0.0002
	电容量	601.9 pF	600.555~601.2 55 pF	相对误差 <0.2%
B 相	tgδ	0.297%	0.290%~0.312 %	符合精度 指标
C 相	tgδ	0.349%	0.330%~0.356 %	稳定性偏 差<0.3%

3 高压套管介质损耗因数实时监测算法及精度 分析

高压套管介质损耗因数实时监测算法及精度分析

3.1 基于 DFT 谐波分析的核心算法

高压套管介质损耗因数(tgδ)的实时监测采用离 散傅里叶变换(DFT)谐波分析法,通过同步采集末屏 泄漏电流 I(t)与母线电压 U(t)信号,提取基波分量并 计算相位差。算法核心步骤包括:

信号数字化:利用高精度电流互感器(精度±0.02%) 与电压传感器(精度±0.01%)将模拟信号转换为离散 序列;

基波分离:通过 DFT 提取基波幅值与相位,消除高 次谐波干扰;

相位差计算:结合电容型设备电流超前电压 90°9 0°特性,推导介损公式:

$$\tan \delta = \tan \left[\frac{\pi}{2} - \left(\beta_1 - \alpha_1\right)\right]$$

该算法使介损测量误差≤±(标准读数×1%+0.000 1),满足 0.01%级精度需求。

3.2 多维度抗干扰设计

为应对强电磁场、谐波及频率波动等干扰,系统采 用硬件-软件协同优化策略:

硬件屏蔽:特制合金外壳(抗磁导率≥5000 H/m)



与 IP65 防护,降低外部磁场影响至 5%以下;

软件滤波: 自适应噪声抵消算法抑制谐波, 谐波抑制比≥40 dB;

同步采样: GPS 授时模块(误差<1 µs)确保信号 同步,相位差计算误差<0.001°。

干扰类型	抑制措施	效果
电磁干扰	合金外壳+IP65	泄漏电流线性度 <0.02%
谐波干扰	自适应滤波	介损误差<0.0002
频率波动	GPS 授时	时间同步误差<1 μs

3.3 高精度传感器校准技术

末屏泄漏电流传感器的非线性误差通过多点标定 法与动态补偿算法优化:

校准设备: 0.01 级标准电流源(FLUKE 5500A)分段标定(0.5⁵00 mA);

性能提升:校准后全量程线性度<0.02%,极端温度 下偏差<0.015%;

数据验证: 国网政平站 12 个月运行数据显示,线 性度年漂移<0.003%,关联介损误差≤0.0001。

3.4 同步采样技术的工程实现

电压与电流信号的严格同步依赖 GPS 授时+恒温晶 振架构:

授时模块: ublox NEO-M8T, 授时精度<30 ns;

冗余设计:卫星信号丢失时,自主守时 24 小时漂移<10 μs;

多设备协同: IEEE 1588 协议实现站内终端μs级同步。

参数	指标	影响
时间同步误差	<1 u s	相位差误差
时间内少伙庄	<1 µ3	<0.001°
采样率	10 kS/s	谐波分辨率≤0.1%
培工 提 能 力	IEC 61000-4-30 Class	同步趋空性、00.0%
DU DUBE/J	A	问少虑足吐~99.9%

3.5 现场应用与精度验证

以国网常州政平±500kV 换流站为例,算法与技术的综合应用效果显著:

介损精度: 绝对误差<0.0002(A相: 0.256%~0.27 8% vs 离线值 0.265%);

电容量误差:相对误差<0.2%(A相: 600.555~601.

255 pF vs 601.9 pF);

极端工况适应性: -30℃至+70℃环境下,介损波动范围<0.03%。

数据表明,系统在复杂电磁环境中兼具高精度与稳 定性,为国家电网套管状态智能评估与故障预警提供了 可靠技术支撑。

4 结论

本文提出的算法通过DFT 谐波分析与多维度抗干扰 设计,实现了高压套管介质损耗因数的实时高精度监测。 实际应用表明,系统在强电磁环境下的测量重复性与稳 定性达到行业领先水平,为套管状态预警与运维决策提 供了可靠技术支撑。

参考文献

[1]张天旭,任志勇,宁欣.某500 kV变压器高压套管电容量及介质损耗因数异常分析[J].山东电力高等专科学校学报,2025,28(01):27-30.

[2]杜航,刘贵,黄峰远,苏刚,谢俊杰.基于频域介电谱 技术的变压器套管介质损耗因数超标检测研究[J].机 电信息,2024,(21):15-18.

[3]陈图南,李康,邱宗甲,韩冬,张国强.强制对流对高 压套管油介质中乙炔分子传质过程的影响[J].电机与 控制学报,2024,28(04):31-40.

[4] 董明, 刘阳, 杨凯歌, 席英杰, 胡一卓, 任明. 基于故障树理论的电容型套管故障模拟与辨识[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(06): 1-9.

[5]杨嘉晨,汤向华,许周宁,赵新,沈鑫.110kV 主变高 压套管试验数据异常分析[J].农村电气化,2020,(11): 39-41.

[6] 李欢欢, 韦孝三. 红外测温技术在节日保电期间的 应用[J]. 电工材料, 2020, (05): 20-23.

[7] 穆强,喻勇丽,李奇艳.一起主变压器高压套管介质 损耗异常及处理[J].水电与抽水蓄能,2020,6(03):88-90+106.

[8]黄晓峰,吴胥阳,张健聪,王颖剑.一起高压套管更换末屏引出装置后介质损耗因数异常分析[J].浙江电力,2019,38(04):81-84.