

# 基于改进谐波分析法的氧化锌避雷器在线监测系统

郦晓飞, 周国平, 张成, 张成武, 刘涛

(南京林业大学 信息科学技术学院, 江苏 南京 210037)

**摘要:** 针对基于FFT的传统谐波分析法测氧化锌避雷器(MOA)阻性电流时会由于电网频率波动造成频谱泄漏和栅栏效应的问题, 对Nuttall窗三谱线插值算法进行改进, 利用硬件检测基波频率, 推导相关计算公式, 大幅减少了原算法计算量, 并将改进后算法与采样频率自适应调整相结合, 提出一种改进谐波分析法, 能够有效解决上述问题, 提升阻性电流测量精度。通过仿真验证改进谐波算法的精度与稳定性, 并基于该算法对MOA在线监测系统进行软硬件设计。测试结果表明, 该系统性能稳定, 精度较高, 满足MOA在线监测的要求。

**关键词:** 氧化锌避雷器; 在线监测; 谐波分析法; Nuttall窗; 采样频率; 自适应调整

中图分类号: TP277 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)01-0142-05

## Online Monitoring System for Zinc-oxide Arrester Based on Improved Harmonic Analysis Method

LI Xiao-fei, ZHOU Guo-ping, ZHANG Cheng, ZHANG Cheng-wu, LIU Tao

(College of Information Science and Technology, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037 China)

**Abstract:** To address the problem of spectrum leakage and fence effect caused by the fluctuation of grid frequency when measuring the resistive current of zinc oxide arrester (MOA) by the traditional harmonic analysis method based on FFT, the paper improves the Nuttall window tri-spectral interpolation algorithm by using hardware to detect the fundamental frequency and derive the relevant calculation formula, which reduces the calculation volume of the original algorithm and proposes an improved harmonic analysis method by combines the improved algorithm with the adaptive adjustment of sampling frequency, which can effectively solve the above problems and improve the accuracy of resistive current measurement. The accuracy and stability of the improved harmonic algorithm are verified by simulation, and the software and hardware design of the online monitoring system of zinc oxide arrester based on this algorithm is carried out. The test results show that the system has stable performance, high accuracy, and can effectively realize the online monitoring of MOA status.

**Keywords:** metal zinc-oxide arrester; on-line monitoring; harmonic analysis method; Nuttall window; adaptive adjustment; sampling frequency

## 0 引言

氧化锌避雷器(MOA)作为电力系统中重要的过电压保护设备,对电力系统的安全稳定运行有着重要的影响<sup>[1]</sup>。在长期运行的过程中,MOA由于工频高压、密封不严等情况,会出现老化或受潮现象,直接表现为正常电压下,MOA泄漏电流与功耗增加,导致MOA发热严重,最终热崩溃甚至爆炸<sup>[2]</sup>。因此,MOA的在线监测对保障供电可靠性有着重要的实际意义。

目前国内外学者已针对MOA在线监测系统展开了广泛的研究。余亚东等人研制的高压换流站交流侧避雷器在线监测系统<sup>[3]</sup>,对MOA在线监测系统进行了较为完整的设计,但该系统精度较低。高旭光研制的基于FPGA和MCU的避雷器在线监测系统<sup>[4]</sup>,能够结合APP方便实

现MOA在线监测,但该系统硬件结构复杂,且并未对系统实际精度进行验证。宋选锋等人提出了基于IOWA的避雷器状态预测方法<sup>[5]</sup>,但该算法复杂,下位机不易移植。针对上述问题,对Nuttall窗三谱线插值算法进行改进,大幅减少了算法计算量,易于下位机实现,同时将改进后算法与采样频率自适应调整相结合,提出了一种改进谐波分析法,有效提高了电网频率范围内阻性电流测量精度。基于该算法对MOA在线监测系统进行软硬件设计,系统能够稳定准确提取MOA阻性电流基波与3次谐波幅值,获得了良好的效果。

## 1 MOA在线监测系统概述

### 1.1 MOA在线监测系统原理与结构

MOA可等效为非线性电阻和电容的并联,在母线电压作用下,其泄漏电流可分解为容性电流和阻性电流。相

\*基金项目: 国家自然科学基金资助项目(32171788)

收稿日期: 2023-09-01

关研究表明,MOA受潮和老化时,会分别导致阻性电流基波和3次谐波幅值显著增大<sup>[6]</sup>,通过测量阻性电流基波和3次谐波幅值,可有效实现对MOA的在线监测。但阻性电流占MOA泄漏电流比例小,阻性电流基波和3次谐波幅值仅为 $\mu\text{A}$ 级,如何准确测量两者幅值成为MOA在线监测的研究重点与难点。

目前,MOA在线监测方法主要包括全电流法<sup>[7]</sup>、基波法<sup>[8]</sup>、容性电流补偿法<sup>[9]</sup>与谐波分析法<sup>[10]</sup>。与其他算法相比,谐波分析法通过同步采集MOA母线电压和泄漏电流,利用快速傅里叶变换(FFT)能够同时求得阻性电流基波与3次谐波幅值,从而准确区分MOA故障类型。但该方法受电网频率波动影响,容易产生频谱泄漏与栅栏效应,影响阻性电流测量精度。文章下文通过Nuttall窗三谱线插值改进算法与采样频率自适应调整对谐波分析法进行改进,有效提高了谐波分析法精度,实现了MOA阻性电流基波与3次谐波幅值的高精度测量。

MOA在线监测系统结构如图1所示。由于MOA三相泄漏电流采样点相距较远,故采用分布测量、集中处理的方式。三相电压采集装置采集MOA三相母线电压数据;A、B、C相电流采集装置分别采集各相泄漏电流数据,同时通过高频雷电传感器,记录雷击次数。监控主机通过分布采集的电流和电压数据,集中计算阻性电流基波和3次谐波幅值,判断MOA是否发生故障,并上传数据至监控中心。

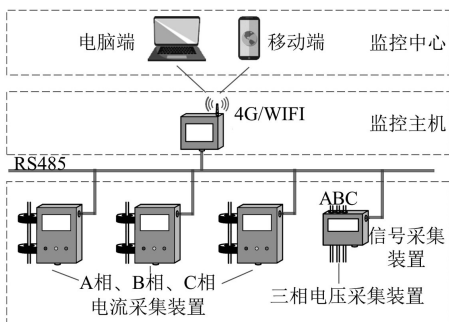


图1 系统结构示意图

## 1.2 改进谐波分析法

谐波分析法易受电网频率波动影响,导致非同步采样,产生频谱泄漏和栅栏效应,影响测量精度。仿真表明,在电网波动范围内,谐波分析法阻性电流基波与3次谐波幅值的最大相对误差分别为1.04%和6.28%,严重影响MOA的在线监测,需通过加窗插值算法进行改进,以减少电网频率波动引起的误差。目前精度高,计算量小,适合下位机移植的窗函数主要有Hanning窗、Blackman窗、Nuttall窗等。在MATLAB中搭建MOA仿真模型,电压频率波动范围为 $50\text{ Hz} \pm 0.5\text{ Hz}$ ,采样频率和采样点数分别为 $6400\text{ Hz}$ 和 $512$ 点,上述窗函数加窗插值算

法的阻性电流相对误差如图2所示。其中Nuttall窗选用4项5阶Nuttall窗,相较于其他形式Nuttall窗,该窗旁瓣衰减速度高,最大旁瓣低,能够有效减少频谱泄漏。

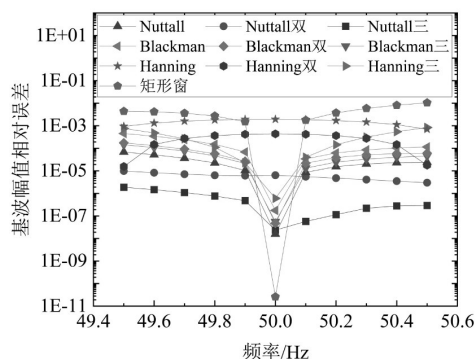


图2 各算法基波幅值相对误差

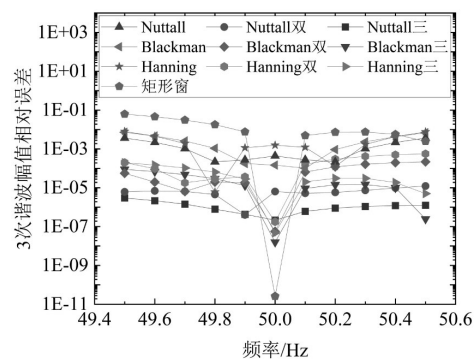


图3 各算法3次谐波幅值相对误差

如图2和图3所示,与其他算法相比,4项5阶Nuttall窗三谱线插值算法阻性电流基波与3次谐波平均相对误差均最小,仅为 $6.21 \times 10^{-7}$ 和 $1.18 \times 10^{-6}$ ,更适用于MOA阻性电流的测量。但该算法在采样频率与电网实际频率误差 $\Delta f_F$ 较大时,阻性电流基波与3次谐波幅值相对误差出现了较大增长,表明该算法抗干扰性较差。文章提出将该三谱线算法与采样频率自适应调整相结合,利用硬件实时追踪电网频率,并自适应调整采样频率,减小 $\Delta f_F$ ,从而进一步提高阻性电流测量精度。在 $0.001\text{ Hz}$ 的采样频率自适应调整精度下,该算法结合采样频率自适应调整的相对误差如图4所示。

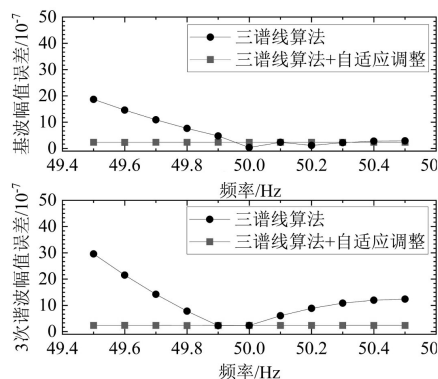


图4 自适应调整前后相对误差

仿真结果表明,通过采样频率自适应调整,能够有效提升三谱线算法在 $\Delta f_F$ 较大时的精度,使得在整个电网频率波动范围内,阻性电流基波与3次谐波幅值最大相对误差分别由 $1.87 \times 10^{-6}$ 、 $2.96 \times 10^{-6}$ 下降至 $2.36 \times 10^{-7}$ 、 $2.39 \times 10^{-7}$ ,有效提升了该三谱线算法的抗干扰性。同时三谱线算法第*i*次谐波求解是通过在 $(i \times 50 \pm 15)$  Hz频段中寻找幅值最大的谱线 $k_{i0}$ ,并结合其左右两边的谱线 $k_{i1}$ 、 $k_{i2}$ ,实现*i*次谐波频率 $f_i$ 的计算与相位、幅值的修正。而上述方案已经通过硬件实时追踪电网频率 $f_0$ ,因此*i*次谐波频率 $f_i$ 可由电网频率直接得到, $k_{i0}$ 、 $k_{i1}$ 、 $k_{i2}$ 三根谱线可由式(1)所得。

$$\begin{cases} k_{i0} = \max \{ \text{int}(\frac{i \times f_0}{\Delta f}), \text{int}(\frac{i \times f_0}{\Delta f}) + 1 \} \\ k_{i1} = k_{i0} - 1 \\ k_{i2} = k_{i0} + 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中:int表示向下取整, $\Delta f$ 为离散频率间隔。

相较原算法,基于上述推导的Nuttall窗三谱线插值改进算法,各次谐波峰值点附近幅值最大的谱线求解所需的比较次数可由29次降至1次,在精度不变的情况下,大幅减少了计算量。

综上所述,基于Nuttall窗三谱线插值改进算法与采样频率自适应调整的改进谐波分析法,计算量小,易于下位机移植;测量精度高,抗干扰性好,能够准确实现阻性电流的测量。

## 2 信号采集装置硬件设计

### 2.1 信号采集装置硬件结构

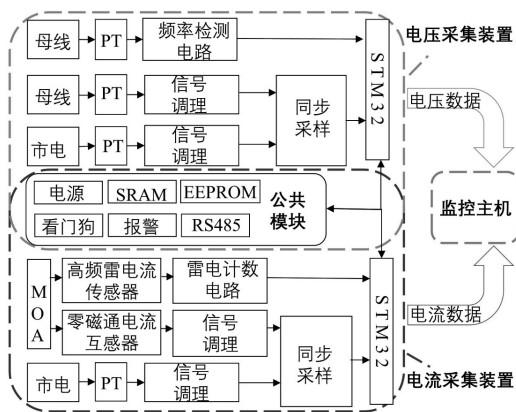


图5 系统硬件框图

信号采集装置可分为电压、电流采集装置,分别负责MOA母线电压和泄漏电流的信号采集工作,其硬件框图如图5所示,电源、SRAM等公共模块为两信号采集装置相同的模块。系统通过频率检测电路,实时追踪电网频率,实现采样频率自适应调整;再通过零磁通电流互感器和电压互感器同步采集MOA泄漏电流与母线电压信号。

信号经过自适应放大、滤波等信号调理后,以市电作为参考相位,实现同步采样,并送入STM32进行信号处理,计算MOA阻性电流基波和3次谐波幅值。当MOA所在电路遭受雷击时,高频雷电流传感器配合雷电计数电路实现雷电计数功能。

### 2.2 零磁通电流传感器

MOA泄漏电流的幅值小(0.1 mA~50 mA),且阻性电流的计算对相位敏感,因此对传感器比差与角差要求高。文章采用定制的无源零磁通电流传感器,以坡莫合金作为铁芯材料,通过使传感器近似工作在零磁通状态,大大提升了传感器对微小电流的测量精度。实验表明,校正后的传感器精度可达0.2级,满足MOA在线监测要求。

### 2.3 七级自适应放大电路

MOA泄漏电流的幅值小、跨度大,如图6所示,文章提出采用七级运放组合的方式,根据泄漏电流幅值范围,尤其针对误差较大的小电流区域进行多级划分,确定七种不同放大倍数,使得不同幅值的MOA泄漏电流均能得到适当放大,相较于直接进行AD采集或使用单一放大电路,能够有效提升系统测量精度与灵活性。在电路设计中针对第一级放大电路增加调零电路,同时采用低温漂、高精度运放芯片AD706,以避免零点漂移致使放大后的信号超出AD7606采集量程。

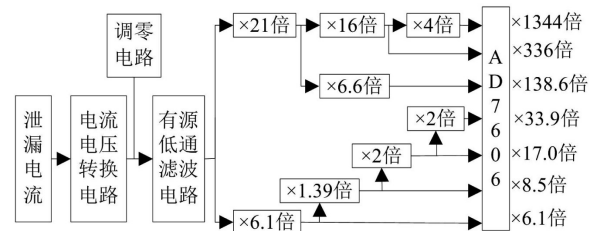


图6 七级自适应放大电路框图

STM32首先读取放大倍数最小的AD采集通道以确定实际泄漏电流的大致幅值,再根据该幅值选择合适放大倍数的AD采集通道,实现自适应放大功能。

## 3 MOA在线监测系统软件设计

电网频率一般变化较为缓慢,相邻周波频率近似相同,因此可通过追踪实际电网频率,进行采样频率修正,实现采样频率自适应调整,该方式相较锁相环倍频的自适应调整方式,极大简化了硬件电路,易于实现。信号采集装置软件主要流程如图7所示。

装置采用STM32的可变静态存储控制器(Flexible Static Memory Controller,FSMC)接口配合AD7606实现AD数据的并口采集,该方式配置简单、占用资源少、读取速度快,利用直接存储器访问,快速实现FSMC至CPU的数据自主转移工作,极大减少了CPU的运算量,提高了

程序的执行效率。

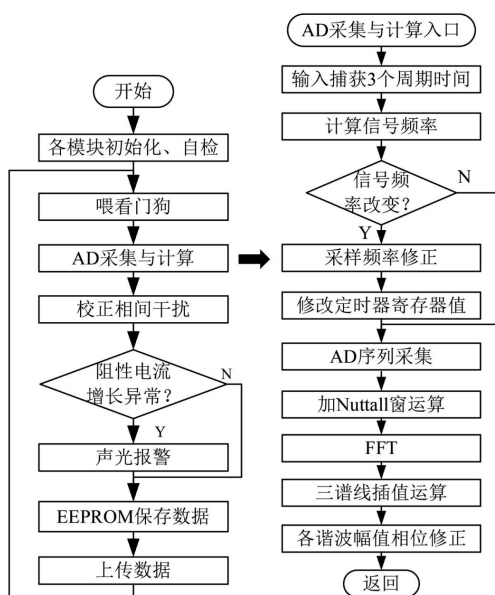


图7 信号采集装置主要流程

为满足国标要求,方便运维人员进行监测,系统监控主机部分采用SQLite数据库对MOA数据进行存储,同时通过数据可视化实现对MOA实时数据、历史曲线进行展示。

#### 4 MOA在线监测系统结果分析

MOA信号采集装置PCB板与机箱外壳分别如图8所示,采用PM805A电力综合自动化测试仪对MOA在线监测系统测量精度与重复性进行测试。

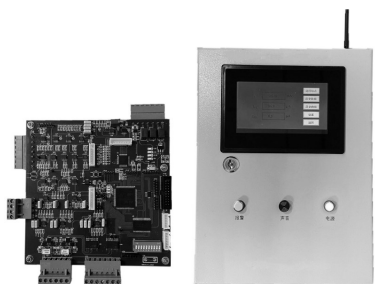


图8 信号采集装置PCB与外壳

##### 4.1 精度测试

在0.1 mA~50 mA泄漏电流幅值范围内,对MOA阻性电流基波分量 $I_{R1}$ 和3次谐波分量 $I_{R3}$ 进行测试,根据式(2)式(3)计算测量误差和相对误差。

$$\varepsilon_1 = C_m - C_s \quad (2)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{|C_m - C_s|}{C_s} \times 100\% \quad (3)$$

式中, $\varepsilon_1$ 为测量误差, $\varepsilon_2$ 为相对误差, $C_m$ 为测量值, $C_s$ 为标准值。

如图9所示, $I_{R1}$ 与 $I_{R3}$ 测量误差绝对值与泄漏电流幅值大致呈正相关,主要原因是MOA电压与电流夹角 $\theta$ 测

量精度确定的条件下,根据式(3)阻性电流测量误差主要由泄漏电流幅值决定。整体来看, $I_{R1}$ 与 $I_{R3}$ 测量误差绝对值最大仅为18.1  $\mu$ A和3.9  $\mu$ A,相对误差均小于 $\pm$ (标准值 $\times 2\% + 5 \mu$ A),满足相关技术规范要求,能够准确测量MOA阻性电流。

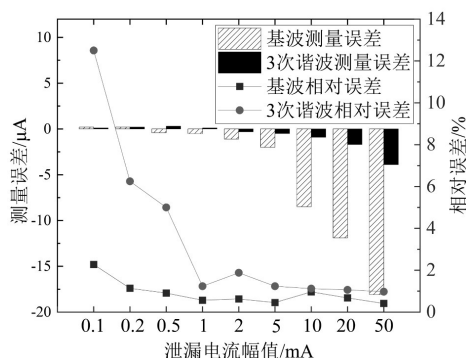


图9 阻性电流测量误差分析

##### 4.2 重复性测试

针对精度测试中的4个稳定测量点,分别连续读取6次测量数据,根据式(4)计算各测量值相对标准差(relative standard deviation, RSD),测试结果如表1所示。

$$RSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}{n-1}} \times \frac{1}{\bar{C}} \times 100\% \quad (4)$$

式中, $n$ 为测量次数, $C_i$ 为第 $i$ 次测量结果, $\bar{C}$ 为 $n$ 次测量结果平均值。

表1 稳定测量点RSD

工作状态	电流/mA
通信模块激活状态	323.25
通信模块通信状态	48.21
通信模块空闲状态	3.19
电机驱动	173.10
切断供电开关MSP430激活状态	301.21
切断供电开关MSP430休眠状态	9.01

四个稳定测量点的 $I_{R1}$ 、 $I_{R3}$ 的RSD均不超过1.7%,表明各个测量点6次测量值离散程度小,该系统重复性好,性能稳定。

#### 5 结束语

文章介绍了MOA在线监测的原理,针对MOA在线监测系统进行了软硬件设计,提出了一种基于Nuttall窗三谱线插值改进算法与采样频率自适应调整的改进谐波分析法,并将该方法应用于MOA在线监测系统中,有效提高了系统的精度与抗干扰性。设计了零磁通电流传感器、七级自适应放大电路等硬件模块,有效提升了系统的精度与灵活性。研制的系统满足MOA在线监测对精度

(下转第172页)