

# 特高压站强电磁干扰环境对接地网特性参数测量的影响

许海锋<sup>1,2</sup> 石博<sup>3</sup> 王有之<sup>2</sup> 郑晓东<sup>3</sup> 王悦<sup>2</sup>

(1 郑州大学 河南省郑州市 450000 2 国网河南直流中心 河南省郑州市 450000 3 国网河南超高压公司 河南省郑州市 450000)

摘要：特高压是我国输电工程建设的必要条件，是实现远距离输电、大容量输电、高效能输电的重要保障。然而特高压输电产生的强电磁也会对接地网造成一定的干扰。论文通过对异频电压测量、强工频干扰滤除技术、微弱电压测量系统及性能测试等进行详细论述和分析，充分了解了强电磁干扰对接地网参数造成的影响，并给出了一定的解决方向，希望能够对后续研究人员提供一定的帮助。

关键词：特高压站；强电磁；接地网特性；环境干扰

## 1. 异频电压测量

### 1.1 异频电压测量原理

通过测量人工注入的异频电流的大小及地电位升得到接地网的参数是目前常用的手段<sup>[1]</sup>。但在大多数异频信号测量过程中，不可避免地存在 50Hz 工频干扰，并且这一干扰强度往往远大于待测异频信号，为了克服 50Hz 工频信号干扰，研究者已经开发了多种算法或者电路，包括最早期基于开关电容滤波技术的测试设备、基于软件滤波算法的测试电路，基于锁相放大器的测量电路等<sup>[2]</sup>。这些设备或者算法的基本原理是通过极窄带滤波其或者极窄带陷波器滤除 50Hz 工频干扰，而仅仅留下待测异频信号，然后通过信号的幅度相位测量实现干扰条件下的异频信号精确测量。

### 1.2 测量算法分析

我们将待测异频信号和工频干扰信号分别记作： $x_f(t)$  和  $x_{50}(t)$ 。信号测量过程中，得到的输出记作  $x(t)$ ，他是异频信号和工频干扰信号的混合，即：

$$x(t) = x_f(t) + x_{50}(t) \quad (3-1)$$

为了能够在 50Hz 工频信号  $x_{50}(t)$  干扰下，实现异频信号  $x_f(t)$  的精确测量，首先需要消除 50Hz 干扰信号。其中一个设计方案是希望通过简单的加减运算实现干扰抵消。

50Hz 工频信号的周期为 20ms，表明他的波形每隔 20ms 重复一次，即：

$$x_{50}(t) = x_{50}(t + kT_{50}) \quad (3-2)$$

其中  $k$  是正整数， $T_{50} = 20ms$  是 50Hz 工频信号的周期。于是使用下面的简单算法就能够实现工频干扰的抵消：

$$y(t) = x(t) - x(t + kT_{50}) \quad (3-3)$$

将式(3-1)带入上式，并应用式(3-3)可以得到，

$$y(t) = x_f(t) - x_f(t + kT_{50}) \quad (3-4)$$

从表达式可见，50Hz 工频干扰信号已经被抵消，但为了测量异频信号  $x_f(t)$ ，需要确保它不受抵消算法的影响，一个策略是通过设定异频信号的周期，使得它满足：

$$kT_{50} = (m + 0.5)T_f \quad (3-5)$$

其中  $T_f$  是异频信号的周期、 $T_{50}$  是 50Hz 工频信号的周期， $k$  和  $m$  都是正整数。当式(3-5)得到满足时，我们有：

$$kT_{50} = (m + 0.5)T_f \quad (3-6)$$

根据式(3-6)和(3-4)得到：

$$y(t) = 2x_f(t) \quad (3-7)$$

为了满足上述工频干扰抵消和异频信号无损保留的算法特性，要求异频信号的周期和工频信号的周期关系满足式(3-5)，经过简单转换得到：

$$F_f = \frac{m+0.5}{k} F_{50} \quad (3-8)$$

其中  $F_f$  是待测异频信号频率， $F_{50}=50Hz$  是工频干扰信号频率。

如果需要被测异频信号和工频信号频率接近（为了测量的阻抗特性尽量接近 50Hz 频率），所选的整数比例因子（ $k,m$ ）需要尽可能大，使得

$$\frac{m+0.5}{k} \cong 1 \quad (3-9)$$

然而选择较大的( $k,m$ )对带来的代价是算法需要的延迟：

$$t_d = kT_{50} \quad (3-10)$$

而延迟增加意味着需要更多的存储元。

比如对于采样率 10KSPS 的 16-bit ADC 硬件，采样点存储区能够容纳 4KB 采样点的话，通过计算可以发现系统能够实现的最大延迟为 204.8ms，可选的异频信号频率对应 最大为 10，可见对应的最接近 50Hz 的频率有 52.5Hz 和 47.5Hz<sup>[3]</sup>。

上面给出了通过简单的波形抵消实现异频信号测量方案，在实际应用中，除了 50Hz 工频信号干扰外，还经常会遇到工频信号的谐波，根据算法原理，50Hz 工频信号的谐波不会带来额外的影响。因为对于  $N$  次谐波，由

于其谐波的周期  $T_{50N}$  满足  $T_{50N} = T_{50}/N$ ，对延迟量为  $t_d = kT_{50}$  时，有：

$$x_{50N}(t + kT_{50}) = x_{50N}(t + NkT_{50N}) = X_{50N}(t) \quad (3-11)$$

这表明，对于式 (3-4) 给出的算法，可以同时抵消工频信号的高次谐波。

## 2. 强工频干扰滤除技术

### 2.1 二阶陷波器

抑制工频的简单方法是通过 2 阶带阻滤波器，下面是最常见的二阶带阻滤波器传递函数：

$$H(z) = \frac{1+\alpha}{2} \left( \frac{1 + \frac{2\beta}{1+\alpha} z^{-1} + z^{-2}}{1 + \beta z^{-1} + \alpha z^{-2}} \right) \quad (3-12)$$

其中参数  $\beta$  控制滤波器的中心频率，即：

$$\beta = -(1+\alpha) \cos \left( 2\pi \frac{f}{F_s} \right) \quad (3-13)$$

其中  $f$  是中心（陷波）频率， $F_s$  是采样率。

参数  $\alpha$  控制滤波器 Q 值，为了运算方便一般取：

$$\alpha = 1 - 2^{-K} \quad (3-14)$$

其中  $K$  为正整数， $K$  越大，滤波器 Q 值越高。使用该滤波器实现 50Hz 陷波器幅频响应。其中参数  $\alpha = 1 - 2^{-5}$ 、 $\beta = -1.872392516456084$ 。

### 2.2 梳状陷波器

另一种简易的滤波器结构是梳状陷波器，它的传输函数是：

$$H(z) = 1 - z^{-N} \quad (3-15)$$

对于 1000Hz 采样率的信号，取  $N=20$ ，得到滤波器幅频响应。

可见该滤波器能够滤除 50Hz 和他的所有谐波信号，一个滤波器能够实现前面多个陷波器的功能，并且结构简单。但该滤波器的缺点是陷波点附近信号被严重衰减，比如 50Hz 附近 47Hz-53Hz 的信号衰减超过 3dB，相比之下前面的二阶滤波器的陷波点附近信号衰减量可以通过调节充分降低<sup>[4]</sup>。

### 2.3 窄带滤波器

窄带滤波器能够从信号中选择出特定评频率的信号，这里采用二阶数字滤波器实现，传递函数为：

$$H(z) = \frac{1-\alpha}{2} \frac{1-z^{-2}}{1+\beta z^{-1}+\alpha z^{-2}} \quad (3-16)$$

参数  $\alpha$  和  $\beta$  和前面一样，决定了滤波器的 Q 值和中心

频点。 $\alpha=1-2^{-12}$  并且  $\beta$  选成使得滤波器中心频率，50Hz 附近信号频率超过 2Hz 后衰减就超过 40dB，意味着该数字滤波算法能够抑制和附近超过信号幅度 100 倍的干扰，选频性能优良。因此干扰的抑制不能仅仅依靠提高该滤波器的 Q 值，还需要配合前面给出的干扰陷波器一起进行<sup>[5]</sup>。

## 3. 微弱电压测量系统及性能测试

进行电压示值误差测试，通过变电源输出异频电压信号，记录此时选频电压表的示数，检测设备的示值误差。研制的设备示值误差在量程 1V 以内测量准确度高，满足需求<sup>[6]</sup>，但对于 10V 及以上的电压测量示数均在 5V 左右，存在着严重的示值误差，根本无法使用到现场，需要重新设计本套设备。通过抗干扰性能测试发现研制的设备在 37.25V/26.51mV=1405 倍的干扰下可正常工作，准备测量异频电压信号<sup>[7]</sup>。

## 4. 小结

本文主要对强干扰下微弱电压信号的准确测量做了研究，从系统原理到硬件电路和软件算法，最终选用陷波器和波形抵消算法结合的方式作为强干扰下微弱电压信号测量的方法。并通过控制继电器使不同的放大电路接入系统测量解决了单一放大电路对于幅值变化大的信号存在的饱和削顶的问题。通过本项目研究设计的选频万用表实现了抗千倍工频干扰。可将微弱异频电压信号进行准确测量，为接地装置特性参数准确测量奠定了基础。

## 参考文献：

- [1]徐魁文,苏江涛,赵文生等.强电磁干扰下射频集成微系统防护的挑战与机遇[J].安全与电磁兼容,2023,(04):9-17.
- [2]陈瑾,李明,彭志凌等.强电磁干扰下全电子引信通信孔的可靠性分析[J].兵器装备工程学报,2022,43(08):135-139.
- [3]韩静,詹艳,孙翔宇等.强电磁干扰环境下的大地电磁数据特征及处理[J].地震地质,2022,44(03):736-752.
- [4]程炜.特高压输电线路电磁环境的数值仿真研究[D].郑州大学,2011.DOI:10.7666/d.y1928816.
- [5]宋海龙,顾理强.强电磁环境下气体密度继电器抗干扰问题分析及改进[J].宁夏电力,2021(1):5.
- [6]涂奔.高压电力走廊对短波监测站无线电干扰实证研究[D].复旦大学,2012.
- [7]唐波,杨嘉炜,黄力,等.特高压线路对空雷达站电磁干扰的防护间距[J].三峡大学学报:自然科学版,2018,40(4):4.