

[文章编号] 1003-4684(2019)01-0044-04

# 应用于配电网电容电流检测的相位比较方法

张 杰, 郑逸凡

(湖北工业大学太阳能高效利用湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430068)

**[摘 要]** 配电网电容电流测量方法中,二频法和谐振法都需要测量电压互感器开口三角形侧电压、电流信号的相位差来进行相应的计算,因此提出一种带 FIR 数字工频滤波的相位比较方法,该相位比较方法包括 FIR 数字工频滤波单元、相位延时消除单元以及相位比较单元,对各单元原理和实现过程进行了详细的介绍,并通过仿真验证所提方法的正确性。结果表明该方法可以消除电力系统工频干扰,精确测量电压互感器开口三角形侧电压、电流相位差。

**[关键词]** 电容电流测量; FIR 数字工频滤波; 相位比较

**[中图分类号]** TM930.12

**[文献标识码]** A

随着配电网容量不断加大,输电距离逐渐增加,电力电缆在电力系统中使用的比例也越来越大<sup>[1]</sup>,电力系统中接地电容电流大大增加,特别在电力系统单相短路时会产生电弧,危害设备及人身安全,降低电力系统的运行可靠性。准确测量电容电流是选取消弧线圈容量以及配电网灵活调谐的重要依据<sup>[2]</sup>。

信号注入法是在电力系统中性点(一般取电压互感器开口三角形侧)注入小信号来进行测量,不影响电力系统正常运行,使用较广。信号注入法中的二频法和谐振法都需要准确测量电压互感器开口三角形侧电压电流相位差来进行相应的计算。文献[3-4]将示波器接在电压互感器开口三角形侧的两端,通过示波器显示的电压、电流波形观察相位差,这种方式不直观且误差较大;文献[5]通过单片机相位测量模块测量相位差,但电力系统工频干扰没有消除;文献[6]采用 T 型陷波电路滤除工频信号,但模拟电路易发生老化故障。因此,本文针对传统相位测量方法的不足,提供了一种带 FIR 数字工频滤波的相位比较方法,采用具有线性相位的 FIR 数字滤波滤除电力系统工频干扰的同时,省去了示波器,能方便直观地观察电压互感器开口三角形侧电压、电流相位差。

## 1 相位检测原理

此相位比较方法具体可分为三个单元,分别是: FIR 数字工频滤波单元、相位延时消除单元以及相位比较单元。其总体结构见图 1,其中 FIR 数字工频滤波单元用于将电压互感器开口三角形侧电压、电流信号进行滤波,消除电力系统工频干扰,滤波后的信号由相位延时消除单元截取信号稳定部分并保证无相位失真输出给相位比较单元,相位比较单元对处理后的信号进行分析,计算出电压、电流相位差。

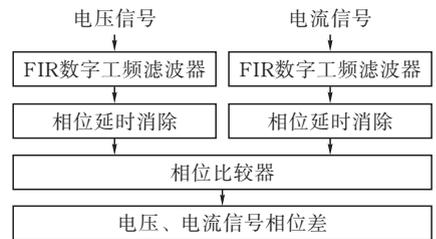


图 1 相位测量总体结构图

## 2 各单元设计方法

### 2.1 FIR 数字工频滤波单元设计

本单元采用 MATLAB 软件里提供的 FDA-TOOL 工具包进行设计。FDATool 工具包是 MATLAB 信号处理工具箱里的专业滤波器设计分析工具<sup>[7]</sup>,设计非常直观、方便,只需要设计几个参

[收稿日期] 2018-04-19

[第一作者] 张 杰(1972-),男,湖北武汉人,湖北工业大学副教授,研究方向为电力电子在智能微电网中的应用

[通信作者] 郑逸凡(1994-),男,湖北汉川人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为电气工程

数,参数设计步骤如下。

1)根据电压互感器开口三角形侧的电压、电流信号频率范围确定合适的采样频率,确保信号无失真的同时尽量减少滤波器阶数。

2)以 50 Hz 为对称轴,

确定通带截止频率以及阻带截止频率。阻带截止频率应尽量远离工频,而通带截止频率应尽量靠近工频,这样可以提高滤波器的品质因素并对工频有良好的陷波效果,将其都转化为数字频率

$$\omega_p = \frac{2 \cdot 2\pi \cdot f_p}{f_s}$$

式中:  $\omega_p$  为数字频率;  $f_p$  为通带(阻带)截止频率;  $f_s$  为采样频率。

3)计算过渡带宽,并根据阻带最小衰减选取合适窗函数,过渡带宽

$$\Delta B = \omega_{s1} - \omega_{p1}$$

式中:  $\omega_{s1}$  为阻带下限截止数字频率;  $\omega_{p1}$  为通带下限截止数字频率。

4)结合第三步计算所得的过渡带宽及选定的窗函数,通过窗函数查表求得滤波器阶数。

5)计算归一化阻带下限截止数字频率和阻带上限截止数字频率

$$\omega_1 = \frac{\omega_{p1} + \frac{\Delta B}{2}}{\pi}$$

式中:  $\omega_1$  为归一化阻带下限截止数字频率;  $\omega_{p1}$  为通带下限截止数字频率;  $\omega_{p2}$  为通带上限截止数字频率。

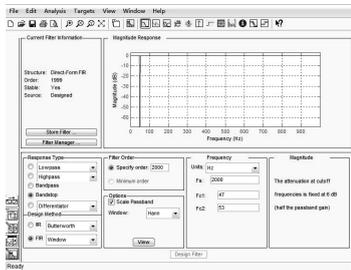


图 2 FIR 工频滤波器具体参数

将以上参数的计算结果输入 FDATool 设计窗口(图 2),其中在 response 一栏选择 Bandstop 选项表明是带阻滤波;在 Design Method 一栏选择 FIR 和 Window 选项表明是用窗函数法设计;根据阻带最小衰减,在 Options 一栏选择窗函数为汉宁窗;在 Frequency Specification 一栏选择采样频率为 2000 Hz,截止频率为 47 Hz 和 53 Hz;根据过渡带宽及选定的窗函数,通过查表求得滤波器阶数,然后在 Filter Order 一栏确定滤波器阶数为 2000 阶。FDATool 内部的实现内核是一些滤波器设计函数,用此工具包设计比函数设计要方便得多。

## 2.2 相位延时消除单元设计

对于 FIR 滤波器来说,其冲击响应为一对称序列,即

$$h[n] = h[N-1-n]$$

$N$  为奇数,其对称中心点为  $\tau = (N-1)/2$

$$H(z) = \sum_{n=0}^{N-1} h[n] \cdot z^{-n} = z^{-\frac{N-1}{2}} \cdot$$

$$\left\{ \sum_{n=0}^{\frac{N-1}{2}-1} \left( h[n] \cdot z^{\frac{N-1}{2}-n} + h[N-1-n] \cdot z^{\frac{N-1}{2}-(N-1-n)} \right) + h\left[\frac{N-1}{2}\right] \right\}$$

$$\therefore h[n] \cdot z^{\frac{N-1}{2}-n} + h[N-1-n] \cdot z^{\frac{N-1}{2}-(N-1-n)} = h[n](z^{\frac{N-1}{2}-n} + z^{-\frac{N-1}{2}-n})$$

对频率响应特性:

$$H(e^{j\omega}) = e^{-j\frac{N-1}{2}\omega} \cdot \left\{ \sum_{n=0}^{\frac{N-1}{2}-1} h[n] \cdot$$

$$e^{j\left(\frac{N-1}{2}-n\right)\omega} + e^{-j\left(\frac{N-1}{2}-n\right)\omega} + h\left[\frac{N-1}{2}\right] \right\}$$

$$= e^{-j\frac{N-1}{2}\omega} \cdot \left\{ \sum_{n=0}^{\frac{N-1}{2}-1} h[n] \cdot$$

$$\cos\left(\frac{N-1}{2}-n\right)\omega + h\left[\frac{N-1}{2}\right] \right\} = e^{-j\frac{N-1}{2}\omega} \cdot A(\omega)$$

$$|H(e^{j\omega})| = |A(\omega)|$$

$$\arg(H(e^{j\omega})) = -\frac{N-1}{2}\omega = -\tau\omega$$

即线性相位特性。系统相延时和群延时等于  $\tau$ ,只需将固定延时消除即可还原波形。

相位延时消除单元结构见图 3,图中的输入为经过 FIR 数字工频滤波单元处理后的电压、电流信号,固定相位延时与若干周期延时相加后作为开关的闭合时间,这样就在保持相位无失真的同时只保留了信号的稳定段,使后续的相位差测量更加准确。

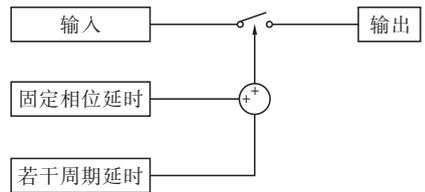


图 3 相位延时消除单元结构图

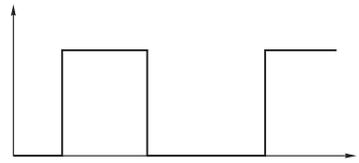
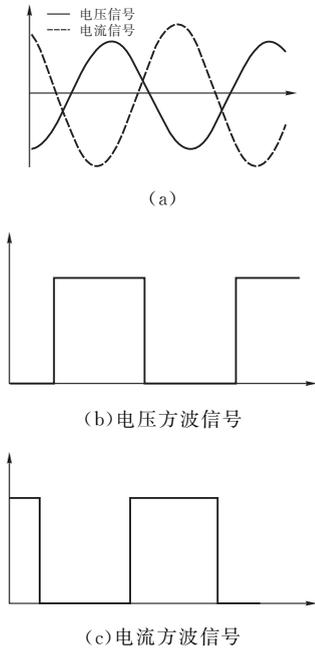
基于上述结构,详细实现步骤如下:

1)利用公式  $(N-1)/(2 \times f_s)$  计算滤波后的固定相位延时,其中  $N$  表示滤波器阶数;  $f_s$  表示滤波器采样频率。

2)在固定延时上加上若干个电压/电流周期得到信号截取开始时间,使其截取后的波形稳定且无相位失真,电压、电流信号延时周期数相同。

### 2.3 相位比较单元设计

相位比较单元基于方波变换的测量方法,两路同频率的正弦信号经过零比较转换为方波信号,中一个方波信号取反后和另一个方波信号进行与运算,得到的脉冲宽度再与信号周期相除并乘以  $360^\circ$  即对应为两信号相位差(图 4)。



(d)电压与电流非信号与运算

图 4 相位测量方法原理图

为提高相位比较器的响应速度,脉冲信号应尽量靠近 0 时刻并保证其完整性,因此需要进行完整脉冲选择。相位比较单元结构见图 5,经过相位延时消除单元处理的电压、电流正弦信号由过零比较器转化为相位一致的方波信号,电流方波信号取反后与电压方波信号相乘得到带有相位差信息的一系列脉冲信号,每一个完整的脉冲宽度都与相位差有关,而不完整的脉冲则需舍弃,图 4 中虚线框部分为完整脉冲选择模块:由状态保持器保持相位延时消除单元开关闭合时间的信号值,与 1 相加,若输出为 1,则表明第一个脉冲信号是完整的,因此选取通道 1 输出,将第一个脉冲保留,其余脉冲舍去;若输出为 2,则表明第二个脉冲信号才是完整的,选取通道 2 输出,将第二个脉冲保留,其余脉冲舍去。最后通过积分运算得到脉冲宽度并乘以电压(电流)角频率得到电压、电流相位差。

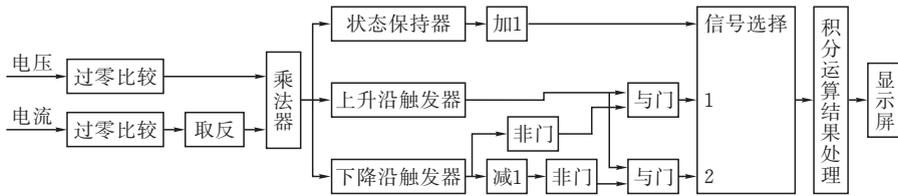


图 5 相位比较单元结构图

### 3 仿真验证

采用 MATLAB/Simulink 搭建仿真模型,图 6 为 FIR 数字工频滤波模块与相位延时消除模块,其中电压互感器开口三角形侧的电压、电流信号用正弦信号源进行模拟,经过采样变为数字信号送入 FIR 数字滤波器,经过滤波处理的信号输出到 MATLAB 的工作窗口,由于数字信号的不平滑特性,将导致测量误差加大,因此在工作窗口中利用三

次多项式插值函数进行插值转换,转换为模拟信号后输入到图 7 所示的相位比较模块,输出结果。

模拟的电压互感器开口三角形侧电压信号频率为 200 Hz,相角为  $0^\circ$ ; 电流信号频率为 200 Hz,相角为  $60^\circ$ ; 干扰工频信号频率为 50 Hz,相角为  $0^\circ$ 。其中仿真输出的电压、电流相位差为  $59.74^\circ$ ,误差为  $0.26^\circ$ 。测量结果与理论值相当接近,测量精度较高。

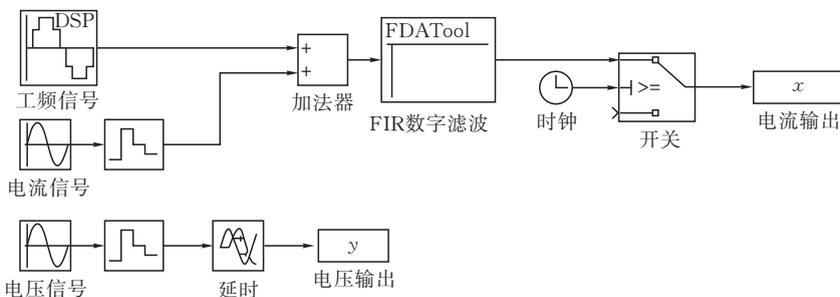


图 6 FIR 数字工频滤波与相位延时消除模块仿真图

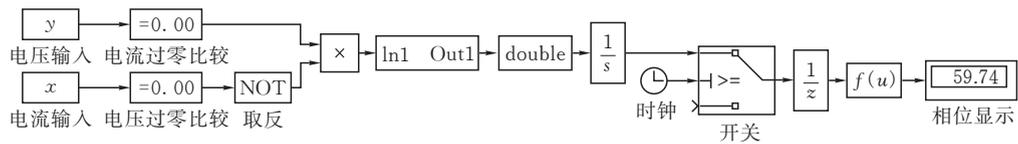


图 7 相位比较模块仿真图

## 4 总结

该种带 FIR 数字工频滤波的相位比较方法利用了 FIR 数字滤波的线形相位特性,并采用延时的方式进行相位补偿,保证了相位的不失真,避免了模拟滤波器的电压飘移、温度漂移和噪声等问题,能稳定工作。在信号注入法配电网电容电流检测中,能较好地滤除电力系统正常运行的工频干扰信号,并通过基于方波变换的相位比较器直接输出结果,测量直观方便,有较高的应用价值。

### [ 参 考 文 献 ]

[1] 李晓波,苗晓鹏,桑振华,等.基于偏置阻抗法的配电网

电容电流测量新方法[J].电力系统保护与控制,2014,42(4):22-26.

[2] 周求宽,姚骏,刘衍,等.基于三频法的配电网电容电流测量新方法[J].电测与仪表,2017,54(10):44-49.

[3] 景旭,孙岩洲,宋晓燕.高频信号注入法测量配电网电容电流及滤波的研究[J].电测与仪表,2016,53(24):6-11.

[4] 宋晓燕.基于注入高频信号的配电网电容电流测量方法的研究[D].焦作:河南理工大学,2015.

[5] 林凌,刘明光.基于变频信号法的一种对地电容电流检测系统[J].电力系统保护与控制,2014,42(23):44-49.

[6] 姜金龙.基于谐振接地系统电容电流检测方法的比较研究[D].鞍山:辽宁科技大学,2016.

[7] 王坤非,王泰华,姚学召,等.基于 MATLAB/Simulink-FIR 数字滤波器设计的不同实现方法研究[J].电子测量技术,2017,40(1):17-25.

# The Method of Phase Comparison Applied to Capacitor Current Detection in Distribution Network

ZHANG Jie, ZHENG Yifan

(Hubei Collaborative Innovation center for high-efficiency utilization of solar energy in Hubei University of Technology, Hubei, Wuhan 430000, China)

**Abstract:** In the capacitance current measurement method of distribution network, both the two-frequency method and the resonant method need to measure the phase difference of the open triangular side voltage and current of the voltage transformer to carry on the corresponding calculation. In this paper, a phase comparison method with FIR digital power frequency filter is proposed. The phase comparison method includes FIR digital power frequency filter unit, phase delay cancellation unit and phase comparison unit. The principle and the implementation process of each unit are introduced in detail in this paper, and the correctness of the proposed method is verified by simulation. The results show that this method can eliminate the power frequency interference and accurately measure phase difference of the open triangular side voltage and current.

**Keywords:** capacitive current measurement; FIR digital power frequency filtering; phase comparison

[责任编辑:张岩芳]