

一种改进的单相电路谐波和无功电流检测法

姜海洋, 王硕禾, 薛强

(石家庄铁道大学 电气与工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:针对牵引供电系统三相/单相供电特性,提出了一种检测谐波的新方法,该方法克服了现存单相系统谐波电流检测法计算复杂、运算量大的缺点,能够实现任意次谐波的单独分析;在LabVIEW平台上易于实现,可用于实际工程问题。经过仿真及实验分析结果表明,该算法能够有效地对任意次谐波进行检测,并能准确显示谐波相位。

关键词:电能质量;单相检测;任意次谐波;LabVIEW

中图分类号:TM714 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2016)02-0093-05

0 引言

有源电力滤波器是治理电网谐波污染的有力工具,但其性能与谐波的精确检测有关。在某些保护中,需要精确提取某一次谐波信号并对其进行故障信号分析。目前很多理论都是检测谐波之和的大小,但是工程实际中有时需要具体分析某一次谐波的值,因此任意次谐波检测法越来越受到重视。目前,很多谐波电流检测法基本上都是针对三相系统,例如基于瞬时无功功率理论的pd检测法和 i_p-i_q 检测法^[1-6],dq0坐标系下的谐波电流检测法^[7]。但是针对单相系统的谐波电流检测法目前还没有公认的方法,很多学者进行了研究,有的学者根据正交函数的特性计算单相电路谐波和无功电流^[8],有的学者根据三角函数特性计算单相电路谐波及无功电流^[9],上述算法其精度在很大程度上依赖于锁相环;由于在工程实际中锁相环对相位的精确提取有一定的困难,也有学者提出了不同的无锁相环的谐波检测法^[10]。

本文给出了一种无锁相环的单相任意次谐波实时检测方法,通过参考信号与被检测信号相乘,在经过改进后的滤波器得到 m 次谐波的波形和相位,省去了锁相环,同时改进后的滤波器也改善了单纯低通滤波器提取信号后的波动情况。

1 检测原理

在单相系统里,特别是对于牵引供电系统其被检测电流通常只含有奇次谐波,所以设被检测电流为

$$i = \sum_{n=1,3,5\cdots}^{\infty} I_n \sqrt{2} \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (1)$$

式中, I_n 、 φ_n 为 n 次谐波的电流有效值和相位角。

式(1)两边同乘以 $2\sin(m\omega t)$,则

$$\begin{aligned} 2i \sin(m\omega t) &= 2I_n \sum_{n=1,3,5\cdots}^{\infty} \sqrt{2} \sin(n\omega t + \varphi_n) \sin(m\omega t) = \\ &\sqrt{2} I_n \sum_n \{ \cos[(n\omega - m\omega)t + \varphi_n] - \cos[(n\omega + m\omega)t + \varphi_n] \} \end{aligned} \quad (2)$$

假设需要对 m 次谐波进行检测时,则式(2)可改写为

$$2i \sin(m\omega t) = \sqrt{2} I_m \{ \cos\varphi_m - \cos[(2m\omega t) + \varphi_m] \} +$$

收稿日期:2015-08-03 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.2016.02.18

基金项目:河北省教育厅项目(QN2014204)

作者简介:姜海洋(1987-),男,硕士研究生,研究方向为电能质量检测。E-mail:zedong.9999@163.com

姜海洋,王硕禾,薛强.一种改进的单相电路谐波和无功电流检测法[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2016,29(2):93-96.

$$\sqrt{2}I_n \sum_{n(n \neq m)}^{\infty} \{ \cos(n\omega - m\omega)t + \varphi_n \} - \cos[(n\omega + m\omega)t + \varphi_n] \} \quad (3)$$

可以观察到,式(3)等号右边第一个多项式为 $\sqrt{2}I_m \{ \cos\varphi_m - \cos[(2m\omega)t + \varphi_m] \}$,由直流分量 $\sqrt{2}I_m \cos\varphi_m$ 和交流分量 $\sqrt{2}I_m \cos[(2m\omega)t + \varphi_m]$ 组成,而其中的直流分量 $\sqrt{2}I_m \cos\varphi_m$ 就是期望得到的信号,为了得到此直流分量,可将式(3)经过低通滤波器来得到此直流分量,然后将得到的直流分量再乘以 $\sin(m\omega t)$,即

$$i_{m1} = \sqrt{2}I_m \sin(m\omega t) \cos\varphi_m \quad (4)$$

同理,将式(1)两边同乘以 $2\cos(m\omega t)$,得

$$2i\cos(m\omega t) = 2I_n \sum_{n=1,3,5\cdots}^{\infty} \sqrt{2}\sin(n\omega t + \varphi_n)\cos(m\omega t) = \sqrt{2}I_n \sum_n^{\infty} \{ \sin[(n\omega - m\omega)t + \varphi_n] + \sin[(n\omega + m\omega)t + \varphi_n] \} \quad (5)$$

因为需要对 m 次谐波进行检测,所以式(5)也可以改写为

$$2i\cos(m\omega t) = \sqrt{2}I_m \{ \sin\varphi_m + \sin[2m\omega t + \varphi_m] \} + \sqrt{2}I_n \sum_{n \neq m}^{\infty} \{ \sin[(n\omega - m\omega)t + \varphi_n] + \sin[(n\omega + m\omega)t + \varphi_n] \} \quad (6)$$

同理,式(6)等号右边的直流分量 $\sqrt{2}I_m \sin\varphi_m$ 为需要得到的信号,将式(6)经过低通滤波器后再乘以 $\cos(m\omega t)$,得

$$i_{m2} = \sqrt{2}I_m \cos(m\omega t) \sin\varphi_m \quad (7)$$

将式(4)式和式(7)相加,可得

$$i_m = i_{m1} + i_{m2} = \sqrt{2}I_m \sin(m\omega t + \varphi_m) \quad (8)$$

即可得到 m 次谐波电流。如果要求取基波有功电流和基波无功电流,只需取 $m=1$,式(4)即为基波有功电流,式(7)即为基波无功电流。

如果关心所测 m 次谐波的相位角,可将式(3)经过低通滤波器后提取出值 $k_1 = \sqrt{2}I_m \cos\varphi_m$,从式(8)中提取出峰值 $k_2 = \sqrt{2}I_m$,所以 m 次谐波的相位角 φ_m 为

$$\varphi_m = \arccos\left(\frac{k_1}{k_2}\right) \quad (9)$$

2 滤波器的设计

信号的提取是改进的单相系统无功电流和谐波电流检测法的关键步骤,本方法选用巴特沃斯低通滤波器和改进的滑动平均滤波器组合来提取信号。程序框图如图 1。

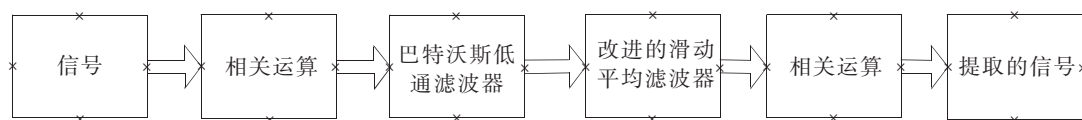


图 1 信号经过滤波器的框图

2.1 巴特沃斯滤波器

巴特沃斯滤波器是一种具有强大平坦幅度响应的低通滤波器,其在各个领域里已有广泛应用。与贝塞尔、切比雪夫滤波器相比,巴特沃斯滤波器在线性相位、衰减斜率和加载特性等几个方面具有特性均衡的优点。

2.1.1 巴特沃斯低通滤波器的特性分析

巴特沃斯滤波器的幅度平方函数为

$$|H(j\lambda)|^2 = \frac{1}{1 + C^2 \lambda^{2N}} \quad (10)$$

式中, C 为一常数参数; N 为滤波器阶数; Ω 为角频率; Ω_p 为通带上限角频率; $\lambda = \Omega/\Omega_p$ 为归一化低通截止频率。

幅度平方函数也可以改写为

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\Omega}{\Omega_c}\right)^{2n}} \quad (11)$$

式中, n 为滤波器阶数; Ω_c 为低通滤波器的截止频率。该滤波器具有一些特殊性质:

- (1) 对所有的 n , 都有当 $\Omega=0$ 时, $|H(j0)|^2=1$;
- (2) 对所有的 n , 都有当 $\Omega=\Omega_c$ 时, $|H(j0)|^2=\frac{1}{2}$;
- (3) $|H(j\omega)|^2$ 是 ω 的单调递减函数, 即不会出现幅度响应的起伏;
- (4) 当 $n \rightarrow \infty$ 时, 巴特沃斯滤波器趋向于理想的低通滤波器;
- (5) 在 $\omega=0$ 处平方幅度响应的各级导数均存在且等于 0, 因此 $|H(j\omega)|^2$ 在该点上取得最大值, 且具有最大平坦性。

2.1.2 巴特沃斯滤波器的设计

根据式(10)对巴特沃斯滤波器进行设计, 巴特沃斯滤波器的设计方法为: 根据设计指标要求 λ_p (通带截止频率), α_p (通带衰减), λ_s (阻带起始频率), α_s (阻带衰减) 确定归一化巴特沃斯低通滤波器幅度平方函数中的待定系数 C 及滤波器的阶数 N ; 然后再根据幅度平方函数确定巴特沃斯低通滤波器的传递函数 $H(s)$ 。但是在具体的工程应用中, C 与 N 的确定还要考虑到各种环境的影响, 所以本文中 C 与 N 的确定是综合考虑理论计算值与实际因素所确定的。然后再根据脉冲响应不变变换法或双线性变换法实现 $H(s)$ 到 $H(z)$ 转换。

2.2 改进的滑动平均滤波器

滑动平均滤波器属于有限冲击响应低通滤波器, 具有实现简单, 稳态时滤波精度高。滑动平均滤波器是一种非递归滤波器, 它可平滑输入信号, 具有低通滤波效果。 N 项滑动平均滤波器差分方程的一般形式为

$$\bar{y} = \{x(n) + x(n-1) + \dots + x[n-(N-1)]\}/N \quad (12)$$

N 项滑动平均滤波器的传递函数为

$$H(z) = [(1 - z^{-N})/(1 - z^{-1})]/N \quad (13)$$

其频率响应为

$$H(j\omega) = [(1 - e^{-j\omega TN})/(1 - e^{-j\omega T})]/M \quad (14)$$

滑动平均滤波器也可视为周期平均的改进方法。通常会用周期平均方法计算采样有效值等, 借鉴基于滑窗的傅里叶分解方法中在滑窗内进行累加运算的思想, 将滑窗与周期平均方法相结合, 就是滑动平均滤波器。本方法选用了 100 个点的滑窗, 即每 100 个点的数据进行一次累加平均, 滑窗计算完后向后滑动, 直至数据计算完成。

3 仿真分析

采用 LabVIEW 进行仿真分析, 首先将被检测的电流信号分别乘以 $2\sin(m\omega t)$ 和 $2\cos(m\omega t)$ 后得到的信号再经过改进的滤波器(改进的的滤波器由巴特沃斯滤波器和改进的滑动平均滤波器组合而成)得到需要提取的直流信号, 提取的直流信号再分别乘以 $\sin(m\omega t)$ 和 $\cos(m\omega t)$ 后相加得到 m 次谐波, 同时显示 m 次谐波的相位信息, 峰值等信息。程序的整体框图如图 2。

经实验分析, 巴特沃斯滤波器的阶数设定为 3, 截止频率设定为 10 Hz, 这样能获得比较理想的效果。

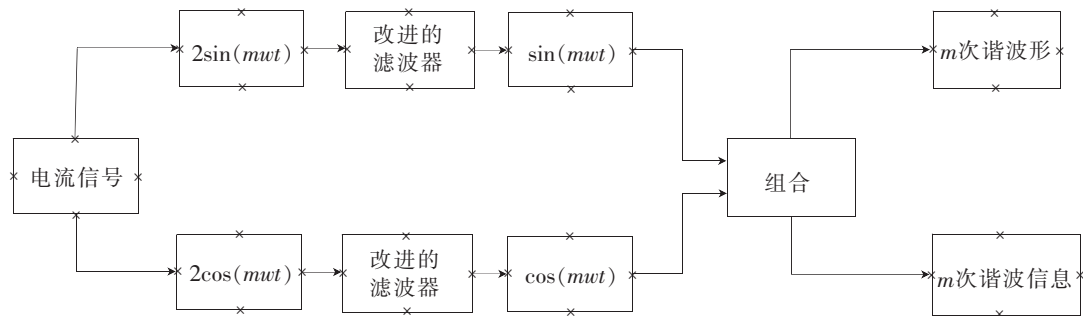


图 2 谐波检测的整体框图

假设被检测的电流信号为 A , 电流信号 A 分别由频率 50 Hz, 幅值为 10, 相角为 0° 的电流 A_1 、频率 150 Hz, 幅值为 5, 相角为 43° 的电流 A_2 、频率 250 Hz, 幅值为 2, 相角为 0° 的电流 A_3 、频率 350 Hz, 幅值为 1, 相角为 30° 的电流 A_4 、频率 450 Hz, 幅值为 0.5, 相角为 0° 的电流 A_5 组成, 即 $A=A_1+A_2+A_3+A_4+A_5$ 。

图 3 中纵坐标为电流幅值, 横坐标为时间。

现在假设检测频率为 150 Hz, 幅值为 5, 相位为 43° 的谐波, 检测结果如图 4。

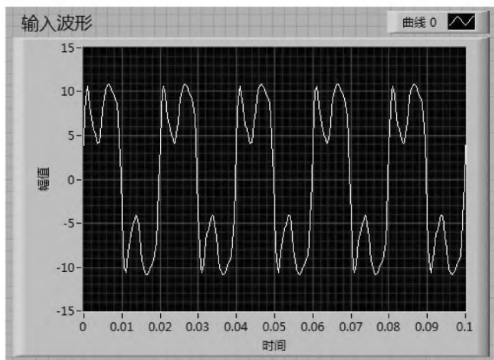


图 3 谐波电流

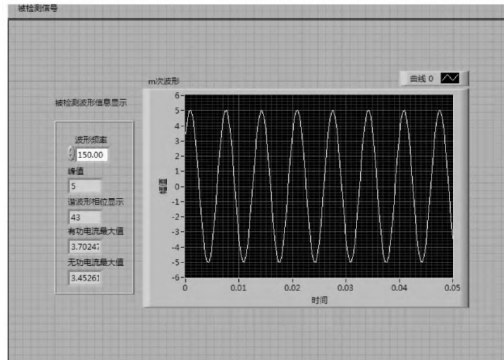


图 4 测试结果图

理论计算结果为:

因为 A_2 电流相位角为 43° , 其有功电流最大值为 $i_p = \sqrt{2}I_m \times \cos 43 = 3.66$ 。测试有功电流最大值为 3.70, 误差为 1%, 综合考虑环境因素, 1% 的误差属于可接受范围。其无功电流最大值为 $i_p = \sqrt{2}I_m \times \sin 43 = 3.41$ 。

测试显示值为 3.45, 误差为 1%, 综合考虑环境因素, 1% 的误差属于可接受范围。

4 结论

针对目前单相谐波电流及无功电流检测方法所存在的问题, 对单相电流进行了分解, 提出了一种新的单相电路谐波电流及无功电流检测方法, 本方法只需要对谐波电流进行采样计算, 不需要电压信息, 所以电压畸变对谐波电流检测无影响, 并且通过对低通滤波器的改进, 使提取的信号没有波动, 并且其在 Labview 上容易实现。从仿真结果看, 本方法可以精确的显示 m 次谐波相位、峰值, 对于 m 次谐波的有功电流最大值和无功电流最大值的计算误差不高于 1%, 综合考虑环境因素, 1% 的误差属于可接受范围。本方法算法简便, 易于实现, 可用于工程实际。

(下转第 101 页)

Study on Automatic Identification Method of Analog Signals Modulation Using DSP

Liu Jingna¹, Chen Guobin², Jin Guolei³

(1. School of Electrical and Electronics Engineering Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Logistics Department, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

3. DaTong Local Railway Company, Datong 037000, China)

Abstract: An Orthogonal Digital Frequency conversion based on Bessel interpolation is proposed for DSP, which can realize automatic recognition of modulated signal. The program can extract the orthogonal and phase components of the signal, and the basic parameters of the signal with higher accuracy. The characteristic parameters can be accurately identified by the modulation mode of the signal. Finally, the feasibility is proved by computer and DSP simulation.

Key words: DSP; DDC; automatic recognition

(上接第 96 页)

参 考 文 献

- [1] 卢秀和,徐铭. 基于瞬时无功功率理论的高次谐波电流检测方法研究[J]. 电测与仪表, 2010, 47(2): 9-12.
- [2] 何英杰,刘进军,王兆安,等. 一种基于瞬时无功功率理论的数字谐波检测[J]. 兰州铁道学院学报, 2010, 25(8): 185-192.
- [3] 李自成,孙玉坤,朱志莹. 两种基于瞬时无功功率理论的单相电路谐波电流检测方法的比较研究[J]. 电测与仪表, 2009, 46(8): 33-38.
- [4] 杨怀仁. 基于瞬时无功功率理论的三相谐波电流检测研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014.
- [5] 叶佳明. 基于瞬时无功功率理论的谐波和无功电流检测方法研究[D]. 重庆:重庆大学, 2012.
- [6] 杨俊亮. 基于瞬时无功功率理论的电力系统谐波检测及抑制方法研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2014.
- [7] 张庆超,刘劲磊. 一种改进的任意整数次谐波电压检测方法[J]. 电网技术, 2007, 31(16): 48-52.
- [8] 孙曙光,王景芹,师顺泉. 单相电路谐波及无功电流实时检测的研究[J]. 电测与仪表, 2008, 45(1): 4-7.
- [9] 陆秀令,张松华,曹才开,等. 单相电路谐波及无功电流新型检测方法[J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 163-165.
- [10] 周福林,李群湛,郭成. 无锁相环单相任意次谐波电流实时检测方法[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(3): 360-364.

An Improved Method of Harmonic and Reactive Current Detection

Lou Haiyang, Wang Shuohe, Xue Qiang

(School of Electrical and Electronics Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: For the characteristics of three-phase and single-phase power supply of traction power supply system, a new method is proposed. This method overcomes the shortcoming of the existing single phase system, which can be used for the calculation of the complex and large computation. It is easy to be realized in Labview platform and can be used in practical engineering. The simulation and experimental results show that the proposed algorithm can detect any harmonic effectively and show the phase of the harmonic accurately.

Key words: power quality; single phase detection; any harmonics; LabVIEW