

# 电力系统谐波的一种新的单相检测法

曾坚永, 任震

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 在瞬时无功功率理论的基础上, 针对一般基于 d - q 变换的检测方法不能检测不对称三相电流的谐波的缺点, 提出了一种新的电网谐波检测方法。此方法属于单相检测法, 先提取电网电流中的某相基波幅值, 再将基波幅值乘以与该相电流同相位的正弦波, 从而得出该相的瞬时基波电流。该方法相对简化了结构, 并且采用了改进的算法, 能很好地运用于单相电路和三相电路的谐波检测。仿真结果表明, 在电网三相电流对称和不对称的两种情况下, 这种方法都能保证检测的实时性和精确性。

**关键词:** 谐波检测; 单相; 不对称三相电流

**中图分类号:** TM714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)23-0036-04

## 0 引言

在电力网络上, 非线性负载的广泛使用导致了高含量的不平衡非正弦谐波, 使得电力系统产生大范围的电能质量的下降。例如电气化铁道的牵引负荷产生大量谐波直接注入电力系统, 对电力系统和其它用户产生的影响不容忽视, 因此对牵引负荷注入电力系统的谐波进行限制势在必行<sup>[1]</sup>。另外, 由于我国东部地区电力需求的迅猛发展, 直流输电工程的应用也越来越广泛。目前广东已经有 3 条直流线路投入运行, 与原有的 5 条交流输电线路形成交直混合输电的格局。在这样复杂的系统里面, 谐波的检测和抑制工作就变得更为重要和困难, 但是它又是电网安全运行的一项重要工作。

为了有效而精确地消除谐波, 目前人们已经逐渐倾向于使用混合滤波器。在有源滤波环节里面, 谐波的检测是重要的第一步。目前, 已有各种用于三相电路系统的谐波和无功电流检测方法。快速傅里叶变换能计算基波无功、有功及各次谐波分量, 但存在频谱泄漏和栅栏现象, 要依靠加窗插值算法来消除这些现象<sup>[2,3]</sup>; 同步信号检测法<sup>[4]</sup>需要先检测出基波电压正序分量, 才能检测基波正序电流分量, 且只能检测基波无功和谐波电流分量的总和。

目前理论比较成熟的是基于瞬时无功功率理论的方法, 这些方法普遍都采用 d - q 变换及反变换。在三相电流检测的过程中, 倘若电网电压在不对称运行时, 检测效果将受到影响, 基波有明显畸变, 这要通过提取电压的正序分量来解决, 但增加了检测

系统的复杂度。倘若使用 3 个单相检测电路, 则检测效果不受不平衡电流影响, 但由于其经济问题和结构复杂而受到限制; 同时, HVDC 系统直流侧谐波以及电铁谐波的治理, 也迫切需要更先进和经济的单相谐波检测方法和滤波方法。随着电力电子技术的发展及其工艺的日渐成熟, 将会出现廉价、大功率的有源滤波器, 目前广泛使用的无源滤波方案将逐渐地被有源滤波方案或者混合滤波方案所代替。而本文则是针对这些情况提出一种新的单相检测方法, 该方法比一般单相检测法提高了检测的速度和精度, 同时由于其结构有所简化, 所以应用于三相检测时, 其可行性就可以不受到系统的投资和运行费用的限制, 更重要的是它可以避免受到三相不对称电流的影响。

## 1 本文提出的单相检测法原理

采用 d - q 变换和反变换正是一般的三相检测方法无法用于不平衡电流检测的原因(这将在后面的实例比较中解释), 而单相检测可以轻易避开这个弱点; 以往的单相检测法在运算过程中两次使用从电压得到的正余弦同步信号, 使得 PLL 锁相环这个模块的运算精度和反应速度对于整个电路影响较大。本文根据这些情况提出一种新的单相检测法。

首先利用 CT 或者其它互感器得到三相电流中的一相电流的信号, 假设其表达式为:  $i =$

$$\sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n)$$

然后利用控制电路产生任意相位的、频率与被测电流基波相同的正余弦信号:  $\sin(\omega t + \theta)$  与  $\cos(\omega t + \theta)$

1) 把正弦信号与电流信号相乘, 可得

$$i_A \sin(\omega t + \theta) = \sin(\omega t + \theta) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) = \frac{1}{2} [I_1 \cos(\theta - \theta_1) - I_1 \cos(2\omega t + \theta + \theta_1)] + \frac{1}{2} \sum_{n=2}^{\infty} I_n [\cos[(n-1)\omega t + \theta - \theta_n] - \cos[(n+1)\omega t + \theta + \theta_n]] \quad (1)$$

2) 把余弦信号与电流信号相乘,则有

$$i_A (\cos \omega t + \theta) = \cos(\omega t + \theta) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) = \frac{1}{2} [I_1 \sin(\theta - \theta_1) + I_1 \sin(2\omega t + \theta + \theta_1)] + \frac{1}{2} \sum_{n=2}^{\infty} I_n [\sin[(n+1)\omega t + \theta + \theta_n] + \sin[(n-1)\omega t + \theta - \theta_n]] \quad (2)$$

上两式的右边第一项分别为  $0.5 I_1 \cos(\theta - \theta_1)$  和  $0.5 I_1 \sin(\theta - \theta_1)$ ,就是要用于检测的直流分量。通过低通滤波器把交流分量滤去之后,将两个直流分量输入一个运算模块,便可输出基波电流的幅值,该模块的运算公式为:

$$I_1 = 2 \sqrt{[0.5 I_1 \cos(\theta - \theta_1)]^2 + [0.5 I_1 \sin(\theta - \theta_1)]^2} \quad (3)$$

对于基波电流的相角  $\theta_1$ ,可以通过锁相环 PLL 得到,基于这个方法所得到的基波电流为  $I_1 \sin \omega t$ 。根据这个方法的单相电流检测原理框图如图 1 所示。

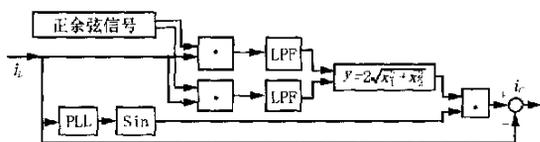


图 1 本文提出的检测法原理图

Fig. 1 Block diagram of the proposed harmonic detecting method

从这个单相检测法可以看出,相对于一般的三相检测法,它不必采用 ABC 坐标系到  $\alpha - \beta$  坐标系的变换与逆变换(d-q 转换),而使用了幅值的计算,计算复杂度降低了;一般的方法需要利用 PLL 从电压获得正弦和余弦信号并且分别用于两次计算,而本方法只是利用 PLL 从电流获得正弦信号并且只用于一次计算,从而减少了 PLL 的运算精度对电路的影响,又相对简化了电路。这都有利于检测速度和精度的提高。基于本方法做出的三相谐波电流检测电路,可以克服一般三相检测法在三相电流不平衡时存在的不能单独检测出谐波电流的缺点,在复杂程度上相对于一般的单相检测法有所降低。当只需

要补偿高次谐波,特别是不需要检测无功电流时,本方法是非常合适的。

对于低通滤波器的选择,在考虑了精度和反应速度两者相平衡的前提下,经过测试比较,发现三阶的 Elliptic 滤波器在本文仿真的条件下能取得较为满意的滤波效果。

## 2 Matlab 数字仿真

因为软件仿真的条件是理想化的,所以相对于采用 ABC 坐标系到  $\alpha - \beta$  坐标系的变换与逆变换的单相检测法,本文所提出的方法在检测速度和精度上的提升有待实际硬件的证明。但从原理分析中可以看出,本文的方法在电路简化上的改进是显而易见的,一方面有利于减少影响速度和精度的因素,另一个重要的方面是增大了应用于三相检测的可行性。下面通过 Simulink 仿真工具,检验本文的方法在三相谐波电流检测中的作用,并将其与 d-q 检测法进行比较,假设一相的电流表达式为(单位 A):

$$I = 10 \sin \omega t + 1.9 \sin 5 \omega t + 1.2 \sin 7 \omega t + 0.85 \sin 11 \omega t + 0.68 \sin 13 \omega t + 0.49 \sin 17 \omega t \quad (4)$$

### 2.1 电流为对称正弦形

如果三相电压为对称正弦波,A、B、C 相的基波电流幅值均相等,用单相检测法得到的基波分量与三相检测法所得的基波分量一致。电网中的原始三相电流如图 2 所示。

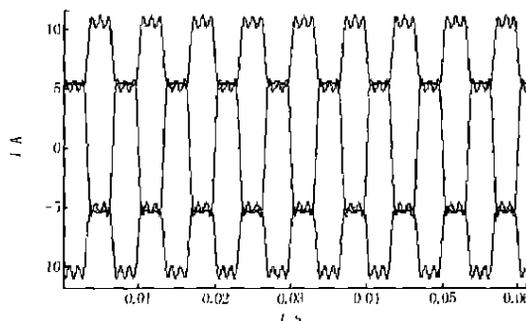


图 2 电网中的原始三相电流

Fig. 2 Original three-phase currents

表 1 两种方法的检测结果比较 (对称三相电流)

Tab. 1 Comparison of two measurement methods (balanced three-phase currents)

	A 相/A	B 相/A	C 相/A
原始电流	10	10	10
三相检测(d-q)法	9.949	9.933	9.943
本文的方法	9.936	9.985	10.026

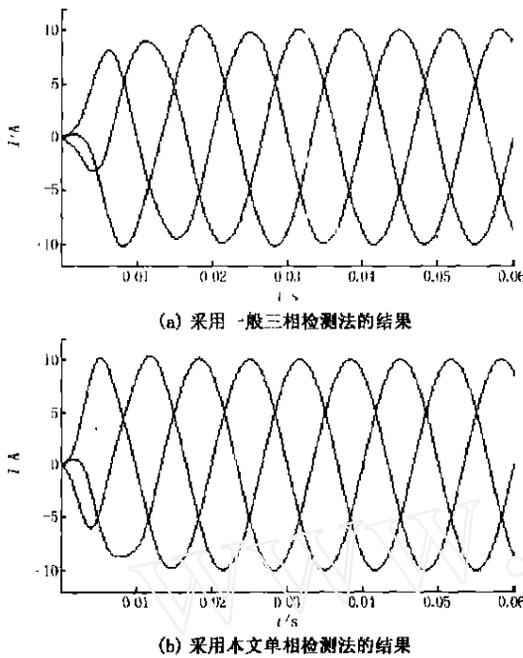


图3 谐波检测后的相电流图

Fig.3 Main phase currents after harmonic detection

从图3可以看出,当采用相同的低通滤波器时,两种检测方法要得到稳定波形所需的周波数是相同的。当波形稳定之后,两种方法均能精确地检测出三相的基波电流,检测得到的各相基波电流幅值如表1所示。

2.2 电流为不对称正弦形

当电压波形中存在负序分量时,同次谐波的负序电压分量和负序电流分量将产生平均有功分量和无功分量。同样,当电压和电流波形中存在零序分量时,同次谐波的零序电压分量和零序电流分量将产生平均有功分量和无功分量。假设有一相与其他两相不平衡,如  $I_{A1} = 1.5 I_{B1} = 1.5 I_{C1}$ ,利用三相检测法来检测的过程,在进行 d - q 转换的时候,会把不对称的一相的基波分量平均分到其他两相中去,分析过程如下。

设三相电流为:

$$i_{abc} = \begin{bmatrix} 1.5 I_1 \sin(\omega t + \varphi) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n \omega t + n \varphi) \\ I_1 \sin(\omega t - \frac{2}{3} + \varphi) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin[n(\omega t - \frac{2}{3} + \varphi) + n] \\ I_1 \sin(\omega t - \frac{4}{3} + \varphi) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin[n(\omega t - \frac{4}{3} + \varphi) + n] \end{bmatrix} \quad (5)$$

根据瞬时无功功率理论求得

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = [C_1][C]^{-1} i_{abc} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} I_1 \cos(\omega t + \varphi) + I_{ph} \\ -I_1 \sin(\omega t + \varphi) + I_{qt} \end{bmatrix} +$$

$$\frac{I_1}{2\sqrt{6}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi) - \cos(2\omega t + \varphi) \\ -\sin(\omega t + \varphi) - \sin(2\omega t + \varphi) \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中:  $[C_1] = \begin{bmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ -\cos \omega t & -\sin \omega t \end{bmatrix}$ ,

$$[C] = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$$

经LPF滤除交流分量后,得到直流分量  $\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} =$

$\frac{7\sqrt{6}}{12} \begin{bmatrix} I_1 \cos \varphi \\ -I_1 \sin \varphi \end{bmatrix}$ ,这时再经过逆变换得到的基波电流将是:

$$[i_{abc}^*] = [C][C_1]^{-1} \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{7}{6} \begin{bmatrix} I_1 \sin(\omega t + \varphi) \\ I_1 \sin(\omega t - 2/3 + \varphi) \\ I_1 \sin(\omega t - 4/3 + \varphi) \end{bmatrix} \quad (7)$$

可见,如果A相电流增加了0.5倍,那么用三相检测法检测出的各相基波电流的幅值均增加了1/6,使检测结果产生了错误。

在这个情况下,本文所提出的单相检测方法就不会受各相电流幅不对称的影响。分析如下:假设某一相的包含谐波在内的电流表达式为  $i_x = k I_1 \cdot$

$\sin(\omega t + \varphi) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n \omega t + n \varphi)$ ,其中k为新的基波电流幅值与原来基波电流幅值之比。根据本文所提的方法,可以得到其基波表达式为:

$$i_{x1} = 2 \sqrt{[0.5 k I_1 \cos(\omega t + \varphi)]^2 + [0.5 k I_1 \sin(\omega t + \varphi)]^2} \cdot \sin(\omega t + \varphi) = k I_1 \sin(\omega t + \varphi) \quad (8)$$

可见本方法是针对一相进行检测的,所以不会受到其它两相的基波电流值影响。为证明这一结论,本文假设A相的基波电流幅值变成原来的1.5倍,在这个假设的基础上再进行两种检测方法的比较。这时三相电流波形如图4所示,而A相电流的表达式为(单位为A):

$$I_A = 15 \sin \omega t + 1.9 \sin 5 \omega t + 1.2 \sin 7 \omega t + 0.85 \sin 11 \omega t + 0.68 \sin 13 \omega t + 0.49 \sin 17 \omega t \quad (9)$$

在该情况下,分别利用三相检测法和本文的方法来检测波形,得到的结果分别如图5、6所示。

从上面两组图形的比较可以看出,在基波电流幅值有畸变或者三相电流不对称的情况下,用三相法检测谐波会导致错误的结果,在波形稳定之后,各相电流的幅值均与实际不符,显示出一般三相检测法的局限性。而用本文所提出的单相检测法就能克服这种缺陷,两种方法检测得到的各相基波电流幅

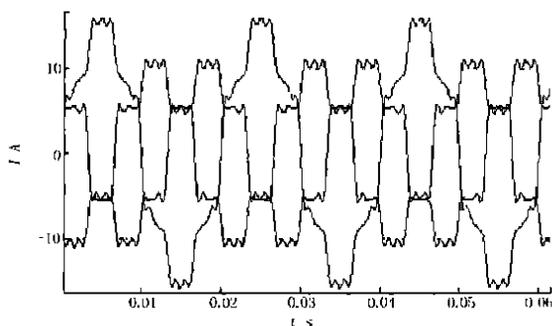
图4 三相不对称情况下 ( $I_{A1} = 1.5 I_{A1}$ ) 的相电流

Fig. 4 Phase currents in unbalanced condition of

$$I_{A1} = 1.5 I_{A1}$$

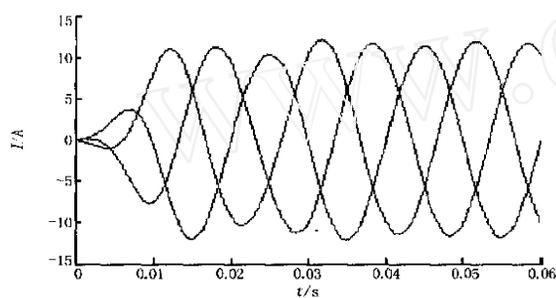


图5 用三相检测法得到的波形

Fig. 5 Main phase currents wave with three-phase detecting method

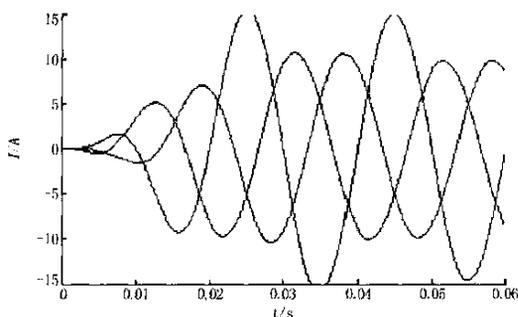


图6 用本文提出的单相检测法得到的波形

Fig. 6 Main phase currents wave with the proposed method

值如表2所示,检测所得到的结果证明了单相检测法在电网电压三相对称和不对称的情况下,均能精确地进行谐波检测。

### 3 结论

在分析了瞬时无功功率理论的基础上,针对电网谐波电流时常出现不对称的情况,提出了一种单

相检测法。对比一般的单相检测方法,本方法无需采用d-q转换,而采用了相对简单的幅值计算模块,并且减少了锁相环模块的个数,在一定程度上降

表2 两种方法的检测结果比较(不对称三相电流)

Tab. 2 Comparison of two detecting methods

(unbalanced three-phase currents)

	A相/A	B相/A	C相/A
原始电流	15	10	10
三相检测(d-q)法	11.655	11.696	11.649
本文的方法	14.944	9.963	9.963

低了系统对锁相环的运算精度的依赖性;而本方法应用于三相谐波电流检测时,在保证一定的经济性的前提下,能克服基于d-q变换的三相检测方法在不对称电流情况下检测有误的缺点。本文用Simulink对电流为三相对称和三相不对称两种情况作了仿真,验证了分析结果。

### 参考文献:

- [1] 解绍锋,李群湛(XIE Shao-feng, LI Qun-zhan). 电气化铁道谐波叠加指数研究(Study on Summation Exponent of Harmonic of Electric Railway)[J]. 铁道学报(Journal of the China Railway Society), 2003, 25(3): 117-121.
- [2] Zhang F S, Geng Z X, Yuan W. The Algorithm of Interpolating Windowed FFT for Harmonics Analysis of Electric Power System[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16(2).
- [3] Jain V K, Collins W L, Davis D C. High accuracy Analog Measurements via Interpolated FFT[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 1979, 28(2): 112-113.
- [4] 丁洪发,段献忠,何仰赞(DING Hong-fa, DUAN Xian-zhong, HE Yang-zan). 同步检测法的改进及其在三相不对称无功补偿中的应用(Improvement of Synchronous Detection Method and Application for VAR Compensation of Unbalanced Three Phase Systems)[J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 2000, 20(6): 17-21.

收稿日期: 2004-03-22; 修回日期: 2004-05-09

作者简介:

曾坚永(1979-),男,硕士研究生,研究方向为高压直流输电;E-mail: keenwin@tom.com

任震(1938-),男,教授,博士生导师,从事高压直流输电、电力系统可靠性及电力系统谐波分析和治理等方面的研究。

(下转第57页 continued on page 57)

京:电子工业出版社(Beijing: Publishing House of Electronics Industry), 2000.

路平(1979-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: luping@mail.sdu.edu.cn

梁军(1956-),男,教授,主要从事电力系统运行与控制方向的研究。

收稿日期: 2004-03-15

作者简介:

### DSP and CPLD based real-time and synchronous measurement device for power system

LU Ping, LIANG Jun, YUN Zhi-hao, LIU Yr-tian

(School of Electrical Engineering, Shandong University Jinan 250061, China)

**Abstract:** The functional characteristics and hardware configuration of a newly developed device for real time and synchronous measurement are introduced. To reduce the CPU's burden, complex programmable logic device (CPLD) is utilized to realize phase locking, import GPS, and send out sampling pulse. In order to reduce the quantity of wire and raise reliability and stability of the device, I/O interface and programmable function of CPLD are used to implement the function of various logic devices by compiling software of CPLD. The digital signal processor (DSP) is used to realize control and mathematics operation. The mixed programming technology of DSP not only fully exerts its powerful digital signal processing ability, but also shortens the developing period of the device. This device can meet requirements of systems real-time and synchronous measurement, and also can be applied in other online monitoring fields.

**Key words:** CPLD; DSP; GPS; synchronous measurement

(上接第 35 页 continued from page 35)

作者简介:

zhaobaozju@zju.edu.cn

赵波(1977-),男,博士研究生,研究方向为智能优化算法和多智能体技术在电力系统中的应用; E-mail:

曹一家(1969-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统优化与控制、进化计算与计算智能。

### Research on the MAS architecture of power market simulating system

ZHAO Bo, CAO Yr-jia

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** With the development of power industry restructuring, the simulating system plays an important role in studying bidding strategies, market operation and market operators training. This paper provides a simulating system based on multi-agent system (MAS) and CORBA technology. Moreover, the advantages of using multi-agent system and CORBA in the simulating platform are discussed in detail. The novel simulating system can be used on various market models, which is in accordance with the demand of the stability, flexibility and reliability.

**Key words:** power market simulating system; multi-agent systems; CORBA criterion

(上接第 39 页 continued from page 39)

### A new method of single-phase measurement for power system harmonics

ZENG Jian-yong, REN Zhen

(Electrical Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Based on the instantaneous reactive power theory, this paper presents a new harmonic detecting method in contrast to the methods which involve  $d-q$  transform and can not work under unbalanced currents. This is a single-phase measurement that multiplies the amplitude of fundamental current of a line by a sine signal which has the same phase with the current. With simpler block structure and improved algorithm, the proposed method performs well both in single-phase circuits and three-phase circuits. The simulation shows that this method is of real-time and accuracy under both balanced and unbalanced three-phase currents.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No. 50337010).

**Key words:** harmonic measurement; single phase; unbalanced three-phase currents