

基于瞬时无功功率理论谐波检测方法的研究

张俊敏, 田 徽

(中南民族大学计算机学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 对三相三线制、三相四线制系统以及单相系统中的基于瞬时无功功率理论的谐波检测方法进行了系统地分析, 通过理论分析和仿真讨论了这些方法的动态过程、时间滞后、计算量以及稳态精度等特性。在比较各种方法在电压畸变时相互关系的基础上, 指出各种方法存在的问题。针对这些问题提出了解决方案。

关键词: 瞬时无功功率理论; 谐波检测; 均值滤波; 重采样

Study on harmonic detection methods based on instantaneous reactive power theory

ZHANG Jun-min, TIAN Wei

(South-Central University for Nationalities, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper discusses the harmonic detecting methods based on the instantaneous reactive power theory in three-phase three-wire system, three-phase four-wire system and single-phase system respectively. The characteristics such as dynamic performance, time lag, calculation number and stable precision are listed by theoretical analysis and Matlab simulation. Then the relationships of these methods especially when source voltage is distortion are given. Based on these conclusions, the solutions are put forward one by one.

Key words: instantaneous reactive power theory; harmonic detection; mean filter; resample

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)18-0033-04

0 引言

1920~1930年间, 德国提出了静态整流器产生的波形畸变问题, 从此谐波问题引起了人们的广泛关注^[1]。电网中的谐波主要是由各种大容量电力和用电变流设备以及其它非线性负载产生的^[2]。传统的谐波抑制方法有两大类, 一类是对产生谐波的谐波源装置本身进行改造的方法^[3], 另一类是设置谐波滤波装置的方法。目前谐波抑制的一个重要趋势是采用有源滤波器APF (Active Power Filter)^[4]检测出谐波电流, 对电网中的谐波进行补偿。

大量文献提出了不同的谐波检测方法, 本文对目前常用的基于瞬时无功功率理论类的检测方法进行分析, 以理论推导和仿真来说明这些方法的优缺点, 给出各种不同方法的动态过程、时间滞后、计算量、以及稳态精度等特性。旨在对这一类检测方法选择的时候给出适当的指导。

1 基于瞬时无功功率理论的检测方法

基于瞬时无功功率的谐波检测是目前最常用和最重要的方法。该方法首先在三相电路中得到了

广泛的应用。其基本原理如图1所示。其中 e 为电网电压, i 为电网电流, i_h 为谐波电流的总和。

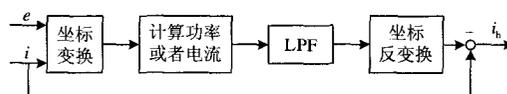


图1 基于瞬时无功功率理论的谐波检测

Fig.1 Principle of harmonic detecting method based on instantaneous reactive theory

1.1 三相三线制电路谐波电流的检测^[5]

以三相电路瞬时无功功率理论为基础, 计算 $p-q$ 或者 $ip-iq$ 为出发点即可得出三相电路谐波的两种检测方法, 分别成为 $p-q$ 方式即参考功率方式和 $ip-iq$ 方式即参考电流方式, 这两种方法在很多文献中都有详述, 在此就不过多叙述。

1.2 单相电路谐波电流的检测

文献[6]把瞬时无功功率理论应用到单相电路中, 通过延时将单相电路构造成新的三相三线制电路或者直接构造 $\alpha-\beta$ 坐标下的电路, 这一不必要的延时对检测方法的动态响应是很不利的, 本文不予考虑。文献[7]仿照三相电路中的瞬时无功功率理论

在单相电路中提出了瞬时谐波检测，认为在单相电路中，电流中和电压同频同相的分量为基波有功电流，电流中和电压同频相位相差 90° 的分量为基波无功电流，其他为谐波成分。与三相三线制方法对应起来，可知文献[7]提出的方法实际上是单相电路的参考电流法，与之对应有单相参考功率方法。

1.3 三相四线制谐波电流的检测

三相四线制谐波电流的检测方法有两种。一是：文献[2]将三相三线制的p-q和ip-iq方法运用到三相四线制电路中，基本思想是将零序电压（电流）从其他三相中剔除，构造出新的三相三线制电路，核心未改变。二是：Hyosung Kim提出的基于三维坐标变换的p-q-r谐波检测理论^[8,9]。基本思想是在空间坐标系下把电压电流先经过C33变换到 $0-\alpha-\beta$ 面，再以电压为基准将 $0-\alpha-\beta$ 面上的电流和电压变换至p-q-r坐标系下，p轴与电压矢量方向相同，q轴在 $\alpha-\beta$ 坐标平面上，这样只有在p轴上的电压分量不为零，在q轴和r轴上电压均为零。同三相三线制一样也有参考功率方式和参考电流方式。

瞬时无功功率理论需要两次坐标变换，计算量非常之大，导致了检测谐波时计算需要的时间是无法忽略的，瞬时理论仅仅是理论上的瞬时而已，且目前大多数数字检测系统中的低通滤波器采用IIR滤波器，跟随性能不好。因此在基于瞬时无功功率理论的谐波检测方法中存在的主要问题有：1) 计算量较大。2) 常用数字低通滤波器的跟随时间较长。

2 谐波检测基本方法的比较

2.1 动态过程的比较

在三相三线制和三相四线制系统中，系统中的LPF选用3阶Butterworth低通滤波器，动态响应时间大概为一个半周期；单相系统中的LPF选用4阶Butterworth低通滤波器，动态响应时间大概为二个半周期。分别如图2、3所示。

对称三相系统和单相系统可以采用文献[10]中提到的均值滤波器，分别将动态时间缩短到1/6和1/2个周期，如图4、5所示。

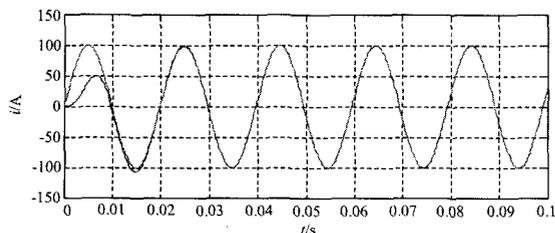


图2 3阶 Butterworth 滤波器的跟随性能

Fig.2 The following performance of 3 order Butterworth filter

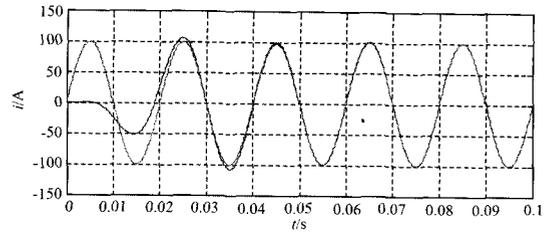


图3 4阶 Butterworth 滤波器的跟随性能

Fig.3 The following performance of 4 order Butterworth filter

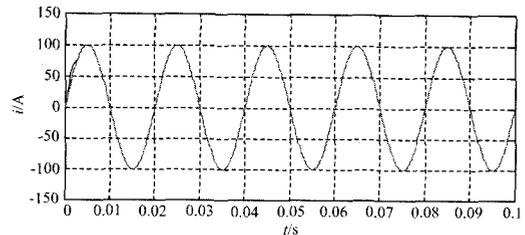


图4 基于均值滤波器的三相检测系统的跟随性能

Fig.4 The following performance II of the three-phase harmonic detecting system

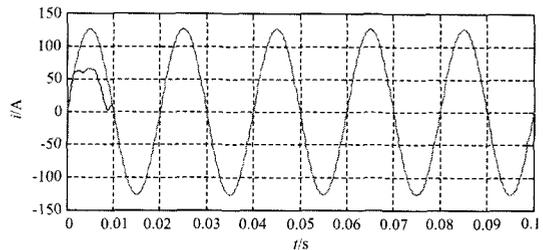


图5 基于均值滤波器的单相检测系统的跟随性能

Fig.5 The following performance II of the single-phase harmonic detecting system

2.2 计算量与实现复杂度的比较

以下计算量分析均以得到基波分量为前提。

单相和三相系统的LPF分别采用4阶和3阶Butterworth低通滤波器的计算量如表1所示。分别采用均值滤波器的计算量如表2所示。

表1 基于巴特沃斯滤波器的计算量

Tab.1 Calculation of the methods based Butterworth filter

检测方法		加法次数	乘法次数	
单相	参考功率法	16	18	
	参考电流法	17	20	
三相三线制 (p-q)	参考功率法	32	33	
	参考电流法	28	27	
三相四线制	p-q	参考功率法	35	33
		参考电流法	31	27
	p-q-r	参考功率法	53	101
		参考电流法	65	95

表 2 基于均值滤波器的谐波检测的计算量

Tab.2 Calculation of the methods based on mean filter

检测方法		加法次数	乘法次数
单相	参考功率法	2	3
	参考电流法	3	5
三相三线制 (p-q)	参考功率法	22	22
	参考电流法	22	12
三相四线制	p-q	参考功率法	35
		参考电流法	31
	p-q-r	参考功率法	43
		参考电流法	43

通过上面两个表格发现, 瞬时无功功率理论谐波检测方法的计算量非常大, 为了不至于在计算上面花费过多的时间, 文献[10]提出了一种基于重采样理论的检测方法, 可以将计算量降低到原来的四分之一, 在不改变所采用的滤波器的特性的同时, 较好地节约了计算花费的时间。

2.3 稳态精度的比较

对于瞬时无功功率理论的检测方法的稳态精度是和滤波器的选择有关系的。如表 3 所示。

表 3 各种方法的稳态精度比较

Tab.3 Stable precision of detecting methods

检测方法	FIR	3阶Butterworth	4阶Butterworth
THD/(%)	0	1.1	1.3

2.4 电压无畸变时几种方法的相互关系

瞬时无功功率理论里面单相系统、三项三相制系统和三项四线制系统的参考功率法和参考电流法的基本原理如表4所示。表格中需要说明的是:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a - i_0 \\ i_b - i_0 \\ i_c - i_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} e_p \\ e_q \\ e_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{0a\beta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ i_a \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中:

$$A = \frac{1}{e_{0a\beta}} \begin{bmatrix} e_0 & e_a & e_\beta \\ 0 & -\frac{e_{0a\beta}e_\beta}{e_{a\beta}} & \frac{e_{0a\beta}e_a}{e_{a\beta}} \\ e_{a\beta} & -\frac{e_0e_a}{e_{a\beta}} & -\frac{e_\beta e_0}{e_{a\beta}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$e_{a\beta} = \sqrt{e_a^2 + e_\beta^2}, e_{0a\beta} = \sqrt{e_0^2 + e_a^2 + e_\beta^2} \quad (5)$$

$$p = \bar{e}_{pqr} \cdot \bar{i}_{pqr} = e_p i_p \quad (6)$$

表4 瞬时无功功率理论各种检测方法的原理

Tab.4 Principles of methods based on instantaneous reactive theory

检测方法		检测原理	
单相	参考功率法	$p = u_s i_s = U \sin(\omega t) i_s$ $q = u_\perp i_s = U \cos(\omega t) i_s$	
	参考电流法	$I_p = \sin(\omega t) i_s$ $I_q = \cos(\omega t) i_s$	
三相三线制 p-q	参考功率法	$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = UCC_{32} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$	
	参考电流法	$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = CC_{32} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$	
三相四线制	p-q	参考功率法	$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = UCC_{32} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$
		参考电流法	$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = CC_{32} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$
	p-q-r	参考功率法	$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} i_0 \\ i_a \\ i_\beta \end{bmatrix}$
		参考电流法	$p = \bar{e}_{pqr} \cdot \bar{i}_{pqr} = e_p i_p$

因此电压无畸变时均能准确检测出谐波。

2.5 电压畸变时检测方法的相互关系

基于瞬时无功功率理论的补偿方法理论上已经十分成熟, 可以对电力系统中一项或者几项指标进行补偿。三相三线制电路中, 当电压畸变时, p-q方式检测出的谐波电流是不准确的, 而ip-iq方式由于只取 $\sin \omega t$ 和 $\cos \omega t$ 参与运算, 结果是准确的。单相检测方法的优缺点和三相三线制的类似。三相四线制中p-q-r方法和传统瞬时无功功率理论的区别在于: 在电压有畸变的情况下, 用p-q-r的两种方法进行谐波检测, 均不能完全检测出系统谐波和无

功电流^[9],原因是电压畸变时,p轴上电压中的直流量并不完全来自电压基波正序分量。

3 结论

本文对目前研究较多的基于瞬时无功功率理论谐波检测方法进行了深入的分析,以理论推导和仿真来说明这些方法的优缺点,给出各种不同方法的动态过程、时间滞后、计算量、以及稳态精度等特性。

参考文献

- [1] 吴竟昌.供电系统谐波[M].北京:中国电力出版社,1998.
- [2] Hammad A E.Analysis of Second Harmonic Instability for the Chateauguay HVDC/SVC Scheme[M]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992,(11):410-415.
- [3] LUO Shi-guo,HOU Zheng-cheng. An Adaptive Detecting Method for Harmonic and Reactive Current[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1995,42(1): 85-89.
- [4] 朱鹏程,李勋,康勇,等.统一电能质量控制器控制策略研究[J].中国电机工程学报,2004,24(8):67-73. ZHU Peng-cheng, LI Xun, KANG Yong, et al. Study of Control Strategy for Unified Power Quality Conditioner [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 67-73.
- [5] 丁洪发,段献忠.同步检测法的改进及其在三相不对称无功补偿中的应用[J].中国电机工程学报,2000,20(6):17-20.
- [6] 杨君,王兆安,邱关源.单相电路谐波及无功电流的一种检测方法[J].电工技术学报,1996,11(3):42-46. YANG Jun, WANG Zhao-an, QIU Guan-yuan. Detecting Method for Harmonics and Reactive Currents in Single-Phase Circuits[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1977, 17(1): 37-41.

- [7] 蒋斌,颜钢锋,赵光宙.单相电路瞬时谐波及无功电流实时检测新方法[J].电力系统自动化,2000,25(21):35-39. JIANG Bin, YAN Gang-feng, ZHAO Guang-zhou. A New Method for Real-Time Detecting Harmonics and Reactive Currents in Single-phase Circuit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 25(21): 35-39.
- [8] Kim H, Blaabjerg F. Instantaneous Power Compensation in Three-phase Systems by Using p-q-r Theory [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2002,17(5):701-710.
- [9] 刘开培,陈艳慧,张俊敏.基于p-q-r法的电力系统谐波检测方法[J].中国电机工程学报,2005,25(14):25-29. LIU Kai-pei, CHEN Yan-hui, ZHANG Jun-min. Harmonic Detection Method for Power System Based on p-q-r Theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2005,25(14): 25-29.
- [10] 刘开培,张俊敏.基于重采样理论和均值滤波的三相电路谐波检测方法[J].中国电机工程学报,2003,23(9):78-82. LIU Kai-pei, ZHANG Jun-min. Harmonics Detection Method for Three-phase Circuits Based on Resampling Theory and Mean Filtering[J]. Proceedings of the CSEE, 2003,23(9): 78-82.
- [11] 刘开培,张俊敏.基于重采样的三相谐波检测瞬时无功功率法[J].电力系统自动化,2003,27(12):151-153. LIU Kai-pei, ZHANG Jun-min. Harmonics Detecting Method for Three-phase Circuits Based on Resampling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003,27(12): 151-153.

收稿日期:2007-12-12; 修回日期:2008-01-23

作者简介:

张俊敏(1977-),女,博士,研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: forzhanghua@sohu.com

(上接第14页 continued from page 14)

- [12] Mohan Mathur R, Varma R K.基于晶闸管的柔性交流输电控制装置[M].徐政,译.北京:机械工业出版社,2005. Mohan Mathur R, Varma R K.Thyristor-based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems[M]. XU Zheng,Trans.Beijing: China Machine Press, 2005.

作者简介:

刘青(1974-),女,讲师,博士研究生,主要从事微机保护、FACTS元件对保护影响方面的研究;E-mail: liuqing0816@yahoo.com.cn

郑振华(1984-),男,硕士研究生,研究方向为微机保护;

王增平(1964-),男,教授,博士生导师,主要从事微机保护、变电站综合自动化等方面的研究。

收稿日期:2007-12-04; 修回日期:2008-02-24