文章编号:1674-7070(2009)02-0161-04

基于瞬时无功功率理论的电流高次谐波检测方法研究

卢秀和[1]　徐铭[1]

摘要

介绍了基于瞬时无功功率理论的谐波检测方法原理,通过对基于瞬时无功功率理论的 i_p-i_q 检测方法在电流谐波检测应用中的分析研究,在 i_p-i_q 检测方法的基础上,提出了一种适于电流高次谐波检测的改进 i_p-i_q 检测方法. 这种方法通过在原检测方法中补加上负序分量检测环节,可检测出电流高次谐波的正序和负序分量,进而实现电流高次谐波的检测. 最后,通过仿真实验表明了改进的方法对电流高次谐波的检测比原方法具有更好的准确性,更适于对具体的高次谐波进行检测.

关键词

瞬时无功功率;谐波检测;仿真

中图分类号 TM714

文献标志码 A

收稿日期 2009-07-06

资助项目 国家科技支撑计划(2007BAE17B02);吉林省科技发展计划(20060402-1)

作者简介

卢秀和,男,博士,教授,主要从事电力变换节能技术及数字传动系统的研究工作

徐铭(通讯作者),男,硕士生,研究方向为数字传动及节能控制技术.

xm20071983@sina.com

1 长春工业大学 电气与电子工程学院,长春,130012

0 引言

Introduction

随着各种电力电子装置在电力系统及其他行业的广泛应用,电能得到了更加充分的利用,但也产生了大量的谐波,对电网产生了严重的污染,已影响到电网的安全运行和居民的正常用电,电力谐波已经成为电力系统的一大公害,对电力系统谐波问题的研究已经变得非常迫切. 谐波检测是研究谐波问题的一个重要部分,对谐波的治理有着重要的指导作用.

目前,诸多的电流谐波检测方法中,基于瞬时无功功率理论的 i_p-i_q 谐波检测方法是应用比较广的一种. 此方法具有检测电路简单、延时少、实时性好等优点,它能够检测出电流基波分量和电流总的谐波分量,并对系统总的谐波分量的检测具有较高的准确性. 在很多实际谐波污染的治理中,需要检测出具体的电流高次谐波分量,传统的 i_p-i_q 检测方法已经不能满足这种电流高次谐波的检测需求. 有鉴于此,本文在介绍传统的 i_p-i_q 电流谐波检测方法的基础上,对具体电流高次谐波的检测提出了一种改进的 i_p-i_q 谐波检测方法.

1 基于瞬时无功功率的 i_p-i_q 检测法原理

The principle of i_p-i_q detecting method based on instantaneous reactive power

瞬时无功功率理论是由日本学者赤木泰文在 1983 年首先提出的,主要是针对 3 相 3 线制电路谐波的实时检测. 瞬时无功功率理论的基本思想是对输入信号进行变换把其中的基频分量转化为直流量,而其它的高频分量仍然为交流量,然后通过低通滤波器提取出包含基频分量的直流量,再进行反变换来得到基频分量. 以该理论为基础,可以得出谐波电流的实时检测方法. i_p-i_q 算法就是在此理论基础上推导出来的.

设 3 相电路为 3 相 3 线制,3 相各电压的瞬时值分别为 u_a、u_b、u_c;3 相电流瞬时值分别为 i_a、i_b、i_c. 通过 3 相与 2 相的坐标变换,分别变换到 α-β 2 相正交的坐标系中,在 2 相坐标系中的瞬时电压,瞬时电流分别为 u_α、u_β,i_α、i_β,然后将它们在电流合成矢量 $\boldsymbol{i}$ 和电压合成矢量 $\boldsymbol{u}$ 及其法线上投影,得到瞬时无功电流 i_p 和瞬时无功电流 i_q. 再经过低通滤波器(LPF)得滤波得出 i_p、i_q 的直流分量 i_p^z、i_q^z,直流分量对应于 i_a、i_b、i_c 中的基波分量,再进行反变换可得 abc 坐标下的基波电流

分量.

$$\boldsymbol{C}_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}, \boldsymbol{C}_{23} = \boldsymbol{C}_{32}^{\mathrm{T}}, \quad (1)$$

$$\boldsymbol{C}_1 = \boldsymbol{C}_2\begin{bmatrix} \sin\omega_0 t & -\cos\omega_0 t \\ -\cos\omega_0 t & -\sin\omega_0 t \end{bmatrix}. \quad (2)$$

然后,3 相电流瞬时值减去 3 相基波电流就得到 3 相瞬时谐波电流. 检测基波和谐波电流的原理如图 1 所示.

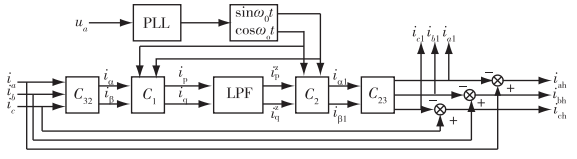


图 1 检测基波和谐波电流的原理

Fig. 1 The schematic diagram of fundamental and harmonic current detection

在图 1 中,PLL 为锁相环电路,LPF 为数字低通滤波器. α 相电压 u_a 通过 PLL 和正、余弦函数发生器得到正弦信号和余弦信号,从而得到变换矩阵 $\boldsymbol{C}_1$、$\boldsymbol{C}_2$.

2 适于电流高次谐波检测的改进方法

The improved method of high-order harmonic current detection

根据前述检测原理可知,它通过检测出电流基波正序分量,然后与电流值相减得出电流谐波分量. 虽然,根据式(2)把变换矩阵 $\boldsymbol{C}_1$、$\boldsymbol{C}_2$ 中的角频率 ω_0 变为 $k\omega_0$ 也能进行高次谐波的检测,但通过对式(2)的分析得知它检测出的只是高次谐波中的正序分量,遗漏了高次谐波中的负序分量. 这样检测出的谐波就不是实际存在的高次谐波分量. 通过对式(2)的进一步分析得知,只要把 3 相瞬时电压 u_a、u_b、u_c 的相序改写为负序的形式,就可以检测出高次谐波的负序分量. 具体检测原理如下:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \boldsymbol{C}_{32}\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \boldsymbol{C}_{32}\begin{bmatrix} U\sin k\omega_0 t \\ U\sin(k\omega_0 t + \frac{2}{3}\pi) \\ U\sin(k\omega_0 t - \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 U 为 3 相电压幅值.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \boldsymbol{C}_{32}\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

瞬时功率理论定义

$$u = u_0 \angle \phi_u, i = i_0 \angle \phi_i, \quad (5)$$

$$i_p = i\cos\phi, i_q = i\sin\phi, \phi = \phi_u - \phi_i. \quad (6)$$

根据定义,3 相瞬时有功功率 P(瞬时无功功率 Q)为电压矢量的模 u_0 和 3 相电路瞬时有功电流 i_p(3 相瞬时无功电流 i_q)的乘积. 即:

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0 i_p \\ u_0 i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}. \quad (7)$$

根据式(3)和文献[3]中的 $u_0^2 = \frac{3}{2}U^2$,有

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}}\,U\begin{bmatrix} -\sin k\omega_0 t \\ -\cos k\omega_0 t \end{bmatrix} = u_0\begin{bmatrix} -\sin k\omega_0 t \\ -\cos k\omega_0 t \end{bmatrix}, \quad (8)$$

结合式(7)与(8)有

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{1}{u_0}\begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix} = \boldsymbol{A}\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} -\sin k\omega_0 t & -\cos k\omega_0 t \\ -\cos k\omega_0 t & \sin k\omega_0 t \end{bmatrix}.$$

把式(4)代入式(9)的右边,有

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{C}_{32}\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \boldsymbol{C}_1^{-}\boldsymbol{C}_{32}\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (10)$$

接着,i_p、i_q 经过低通滤波器(LPF)分离出直流分量 i_p^z、i_q^z,直流分量再根据式(10)和(4)进行反变换就可以得到 abc 坐标下的谐波负序分量,即

$$\begin{bmatrix} i_{ak}^- \\ i_{bk}^- \\ i_{ck}^- \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}\boldsymbol{A}\begin{bmatrix} i_p^z \\ i_q^z \end{bmatrix} = \boldsymbol{C}_{23}\boldsymbol{C}_2^{-}\begin{bmatrix} i_p^z \\ i_q^z \end{bmatrix}. \quad (11)$$

为弥补图 1 检测方法遗漏谐波负序分量的缺点,本文对其进行一些改进,同时加入了负序检测环节,使其能够同时检测出高次谐波分量中的正、负序分量,然后检测出的正、负序分量相加得出高次谐波分量. 图 2 为高次谐波分量检测方法的改进原理.

图 2 中:$\boldsymbol{C}_{32}$、$\boldsymbol{C}_{23}$同上,为 3 相和 2 相间的变换矩阵;$\boldsymbol{C}_1^{+}$、$\boldsymbol{C}_2^{+}$ 为正序的正余弦变换矩阵;$\boldsymbol{C}_1^{-}$、$\boldsymbol{C}_2^{-}$ 为负序的正余弦变换矩阵.

$$\boldsymbol{C}_1^{+} = \boldsymbol{C}_2^{+} = \begin{bmatrix} \sin k\omega_0 t & -\cos k\omega_0 t \\ -\cos k\omega_0 t & -\sin k\omega_0 t \end{bmatrix}, \quad (12)$$

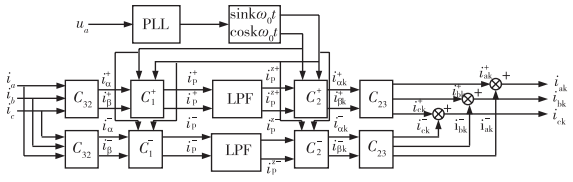


图 2　高次($k>1$)谐波电流检测的原理

Fig. 2　The schematic diagram of high-order harmonic current detection

$$\boldsymbol{C}_1^- = \boldsymbol{C}_2^- = \begin{bmatrix} -\sin k\omega_0 t & -\cos k\omega_0 t \\ -\cos k\omega_0 t & \sin k\omega_0 t \end{bmatrix}. \quad (13)$$

根据图 2 所示的改进方法原理,其具体的高次谐波检测过程为:首先,3 相电流 i_a、i_b、i_c 分别通过正序变换矩阵 $\boldsymbol{C}_{32}\boldsymbol{C}_1^+$ 和负序变换矩阵 $\boldsymbol{C}_{32}\boldsymbol{C}_1^-$ 得到正序量 i_p^+、i_q^+ 和负序量 i_p^-、i_q^-;接着,正序量 i_p^+、i_q^+ 和负序量 i_p^-、i_q^- 分别经过 LPF 滤波,得出各自相应的直流分量;然后,直流分量再通过正序反变换 $\boldsymbol{C}_2^+\boldsymbol{C}_{23}$ 和负序反变换 $\boldsymbol{C}_2^-\boldsymbol{C}_{23}$ 就得出电流高次谐波的正序分量 i_{ak}^+、i_{bk}^+、i_{ck}^+ 和负序分量 i_{ak}^-、i_{bk}^-、i_{ck}^-;最后,正序分量 i_{ak}^+、i_{bk}^+、i_{ck}^+ 和负序分量 i_{ak}^-、i_{bk}^-、i_{ck}^- 2 者相加就得出所要检测的高次谐波分量.

3　仿真实验

Simulation experiment

采用 Matlab 软件对文中所述 2 种 i_p-i_q 谐波检测方法进行仿真,先用图 1 方法检测电流基波分量和电流总谐波谐波分量,再分别用图 1 和图 2 方法检测具体某高次谐波分量. 设原始信号为

$$i(t) = 15\cos \omega t + 1.6\cos 3\omega t + 3.5\cos 5\omega t,$$

$$f = 50 \text{ HZ}.$$

信号采样频率设为 6 400 HZ,在每个工频周期内的采样数据为 128 点,LPE 采用 3 阶 Elliptic 低通滤波器. 仿真结果如图 3 ~ 图 6 所示.

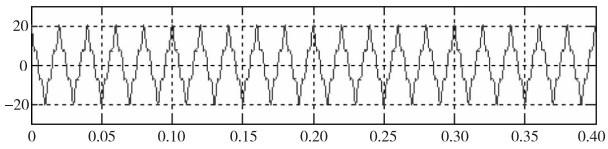


图 3　待检测电流信号波形

Fig. 3　Current signal waveform to be detected

根据图 4 所示的仿真波形可以明显看出,图 1 检测方法能准确的检测出基波分量和总谐波分量.

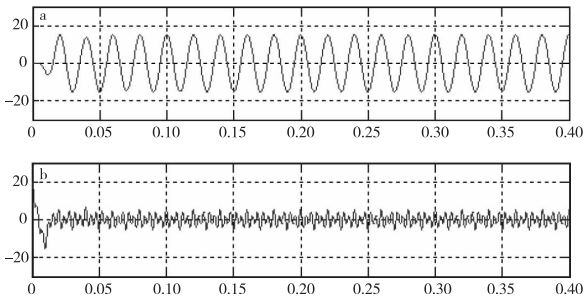


图 4　用图 1 方法检测到的电流基波分量(a)和电流总谐波分量(b)

Fig. 4　Detected current fundamental component(a) and current total harmonic component(b) using Fig. 1 method

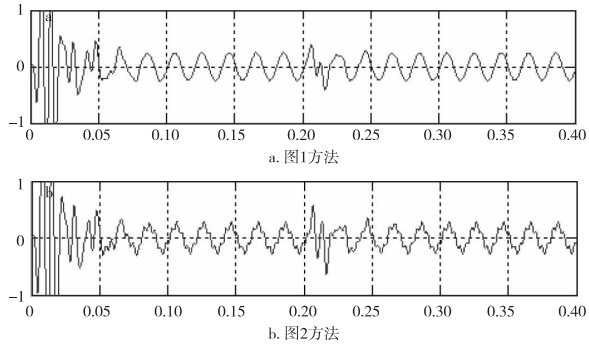


图 5　检测到的电流 3 次谐波分量

Fig. 5　Detected current third harmonic component

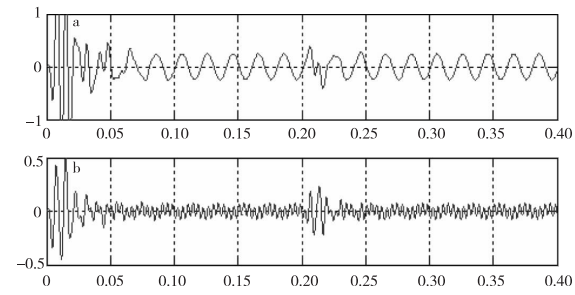


图 6　用图 2 方法检测到的电流 3 次谐波正序分量(a)、电流 3 次谐波负序分量(b)

Fig. 6　Detected current third harmonic positive(a) and negative components(b) using Fig. 2 method

仿真检测某高次谐波分量时,以 3 次谐波为例. 分别用传统方法和改进方法检测电流 3 次谐波分量,检测仿真如图 5 所示.

3 次谐波的检测,通过图 5 和图 6 的仿真结果得出;图 1 方法只检测出了 3 次谐波中的正序分量;图 2方法能够检测出 3 次谐波中的正序分量、负序分

量进而检测出 3 次谐波.

4 结束语

Concluding remarks

基于瞬时无功功率理论的 i_p-i_q 谐波检测方法对电流基波分量和谐波分量的检测具有很好的准确性和实时性等优点,在实际中得到了一定的应用. 但是在具体高次谐波分量的检测中会存在比较大的误差. 本文在原有检测方法的基础上介绍了 1 种更适合于高次谐波检测的改进 i_p-i_q 谐波检测方法. 仿真实验表明:改进的方法在高次谐波检测方面比原方法具有更好的准确性;更适于对具体的高次谐波进行检测;原方法则比较适合于基波和总谐波的检测.

参考文献

References

[1] 马惠,刘静芳. 基于瞬时无功功率理论的三相电路谐波、无功和不平衡电流检测[J]. 四川电力技术,2004(4):4-7
MA Hui, LIU Jingfang. The detection of three-phase circuit harmonic, reactive and unbalanced current based on instantaneous reactive power theory[J]. SI Chuan Electric Technology, 2004(4): 4-7

[2] 周强,郭巍,阳初春,等. 基于瞬时无功功率理论谐波检测方法的研究[J]. 电测与仪表,2006,43(9):8-10
ZHOU Qiang, GUO Wei, YANG Chuchun, et al. The study of harmonic detection method based on instantaneous reactive power theory[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2006, 43(9): 8-10

[3] 陆秀令,周蜡吾. 基于瞬时无功功率的谐波电压检测[J]. 高电技术,2006,32(1):88-90
LU Xiuling, ZHOU Lawu. The method of harmonic voltage detection based on instantaneous reactive power[J]. High Voltage Technology, 2006, 32(1): 88-90

[4] 罗安. 电网谐波治理和无功补偿技术及装备[M]. 北京:中国电力出版社,2006
LUO An. Power grid harmonic control and ceactive power compensation technology & equipment[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006

[5] Hirofumi A, Satoshi O, Hyosung K. The theory of instantaneous power in three-phase four-wire system: A comprehensive approach [J]. IEEE, 1999: 431-439

[6] 李建林,张仲超. 关于谐波及无功电流检测方法的综述[J]. 电力系统及自动化学报,2003,15(4):89-93
LI Jianlin, ZHANG Zhongchao. The summary of harmonic and reactive current detection method[J]. Journal of Power System and Its Automation, 2003, 15(4): 89-93

Study of high-order harmonic current detecting method based on instantaneous reactive power theory

LU Xiuhe[1] XU Ming[1]

1 Institute of Electrical and Electronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012

Abstract The principle of harmonic detecting method based on instantaneous reactive power theory is introduced in this paper. After the analytical study of i_p-i_q detecting method based on instantaneous reactive power theory as well as its application in the current harmonic detection, and on the basis of this method, an improved i_p-i_q detecting method suitable for the high-order harmonic current detection is proposed. This method add the detection of negative-phase-sequence to the original method, and thus it can detect positive- and negative-phase-sequence components of high-order harmonic current, so the detection of high-order harmonic current is achieved. Finally, it is shown through simulation experiments that the improved method has an advantage over the original method in high-order harmonic current detection.

Key words instantaneous reactive power; harmonic detection; simulation