

基于单位功率因数的 谐波和无功电流实时检测方法

张红莲,袁兆强

(三峡大学 电气信息学院,湖北 宜昌 443002)

摘要: 针对有源电力滤波器中广泛采用的基于瞬时无功功率理论的检测技术的局限性,将功率因数的概念引入有源电力滤波器的控制中,提出了基于单位功率因数(UPF)的谐波和无功电流实时检测技术,对其特性进行了分析。该方法电路结构简单、动态响应速度快、检测精度高。通过仿真研究证实了方法的有效性和可行性。

关键词: 单位功率因数; 有源电力滤波器; 谐波和无功电流; 低通滤波器

中图分类号: TN 713+.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2006)02-0037-03

随着现代电力电子技术的发展,各种电力电子装置给各种电能变换带来了巨大的方便,但与此同时也给电网带来了功率因数降低和谐波污染等不利影响。因此,对电网进行谐波治理和提高功率因数已成为电力电子技术、电力系统等众多领域的重大课题^[1-4]。而有源滤波器(APF)是近年来发展起来的一种抑制电力谐波和补偿无功电流的新型电力电子装置^[5-8]。现阶段有源电力滤波器广泛采用的基于瞬时无功功率理论^[3]的检测技术,该方法存在坐标变换、滤波器等环节,结构比较复杂。另外,该检测法仅适用于三相电路,对于单相电路至今仍无一种公认成熟的检测方法^[8]。本文采用一种新的基于单位功率因数(UPF)的谐波和无功电流检测方法,此方法能实时检测需补偿的指令电流,不需要进行坐标变换,在负载变化时能较快地跟踪,适用于单相、三相四线制及三相不平衡的系统。

1 基于UPF的谐波和无功电流检测方法

该控制策略的目的是使非线性负载和滤波器的并联等效为一电阻性负载。假设电网电压无畸变,傅里叶展开为

$$u_s(t) = U_{sm} \sin \omega t \tag{1}$$

如加上滤波器后负载侧的输入阻抗呈电阻性,则补偿后的网侧电流可表示为

$$i_s(t) = G u_s(t) = G U_{sm} \sin \omega t \tag{2}$$

式中 G 为复合负载(非线性负载和滤波器的组合)电导。

电网电流是与电网电压同频同相的正弦波,且没有谐波成分,功率因数 1(单位功率因数)。

假设补偿前电网电流的傅里叶展开为

$$i_s(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n(n\omega t + \varphi_m) = G u_s(t) + i_q(t) \tag{3}$$

式中 $i_q(t)$ 为广义的谐波电流(无功电流与谐波电

流之和),不产生有功功率,即满足:

$$\frac{1}{T} \int_{t=0}^T u_s(t) i_q(t) dt = 0 \tag{4}$$

将式(3)代入式(4)中得到:

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} \int_{t=0}^T u_s(t) i_q(t) dt &= \frac{1}{T} \int_{t=0}^T u_s(t) [i_s(t) - G u_s(t)] dt = \\ &= \frac{1}{T} \left[\int_{t=0}^T u_s(t) i_s(t) dt - \right. \\ &\quad \left. G \int_{t=0}^T u_s^2(t) dt \right] = 0 \\ G &= \frac{\frac{1}{T} \int_{t=0}^T u_s i_s(t) dt}{\frac{1}{T} \int_{t=0}^T u_s^2(t) dt} \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} u_s(t) i_s(t) &= (U_{sm} \sin \omega t) \left[\sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_{in}) \right] = \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} A_n \sin(n\omega t + \varphi_{an}) \end{aligned}$$

$$u_s^2(t) = (U_{sm} \sin \omega t)^2 = \frac{U_{sm}^2}{2} (1 - \cos 2\omega t)$$

从上述 2 式可见, $u_s(t) i_s(t)$ 和 $u_s^2(t)$ 在 1 个周期内的积分各为其直流分量与积分周期的乘积,即

$$G = \frac{\frac{1}{T} \int_{t=0}^T u_s(t) i_s(t) dt}{\frac{1}{T} \int_{t=0}^T u_s^2(t) dt} = u_s i_s / u_s^2 \tag{6}$$

电流的有功分量为

$$i_p(t) = G u_s(t) \tag{7}$$

$$i_q(t) = i_s(t) - i_p(t) = i_s(t) - G u_s(t) \tag{8}$$

根据上面的运算过程,就得到一种单相电路的谐波和无功电流检测方法。电路构成如图 1 所示。其中输出端 2 检测出的是 i_p ,此时输出端 1 得到的是 i_q 。

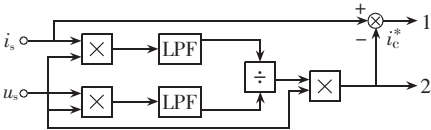


图 1 谐波和无功电流检测电路

Fig.1 Harmonic and reactive current detection circuit

2 特性分析

图 1 表明,本文所用的单相电路的谐波和无功电流检测方法,电路结构很简单。因为它只需要 4 个乘(除)法器、2 个加(减)器和 2 个低通滤波器(LPF)。比起基于瞬时无功功率理论的从三相谐波检测方法推广得到的单相电路谐波和无功电流检测方法要简单得多,其实现也要容易很多。由于所用元件类型与它完全一样,因此,所提出的谐波和无功电流检测方法也是一种实时检测方法。

一般,固定频率滤波器存在相移和由于元件参数变化引起的频率漂移问题。由于采用它时必须直接根据电源频率设计,所以最后的谐波检测效果较差。本文提出的电路中,尽管也有固定频率的 LPF,但是它的目的是要分离出一个直流分量,因此设计时只要选择远离电源频率的 LPF 截止频率,电路性能就基本不会受 LPF 的相移影响,也不会受 LPF 参数变化所引起的频率漂移的影响。

3 仿真和实验研究

本文利用 Matlab 工具箱和仿真环境 Simulink 研究单位功率因数的谐波和无功电流检测方法^[9]。

图 2 给出畸变电流波形,它是在 $-2.5 \sim +2.5$ A 间变化、周期为 0.02 s 的方波电流。

对畸变电流进行傅里叶分析,可通过理论计算得出各个分量的实际波形。

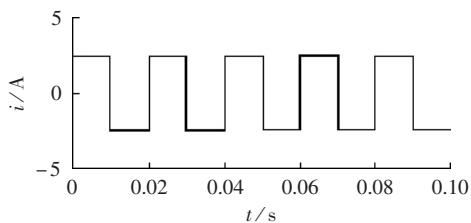


图 2 畸变电流

Fig.2 Distorted current

它们的表达式分别为

$$i_d(t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{10}{\pi n} \sin n\omega t$$

$$i_p(t) = \frac{10}{\pi} \sin \omega t$$

$$i_q(t) = i_d(t) - i_p(t)$$
(9)

本文选 LPF 的阶数为 2 阶^[10],图 3 为 LPF 的截止频率 $f_c = 20$ Hz 时检测得出的结果。为便于比较,图中同时给出了理论计算得出的实际波形,对应的实际波形和检测波形之间的误差曲线分别如图 3 (b)和图 3(d)所示。

从图中可见,1 个周期内检测波形就能跟踪上实际波形的变化,动态响应比较快,并且从对应的误差曲线能够看出,电路的检测精度比较高。

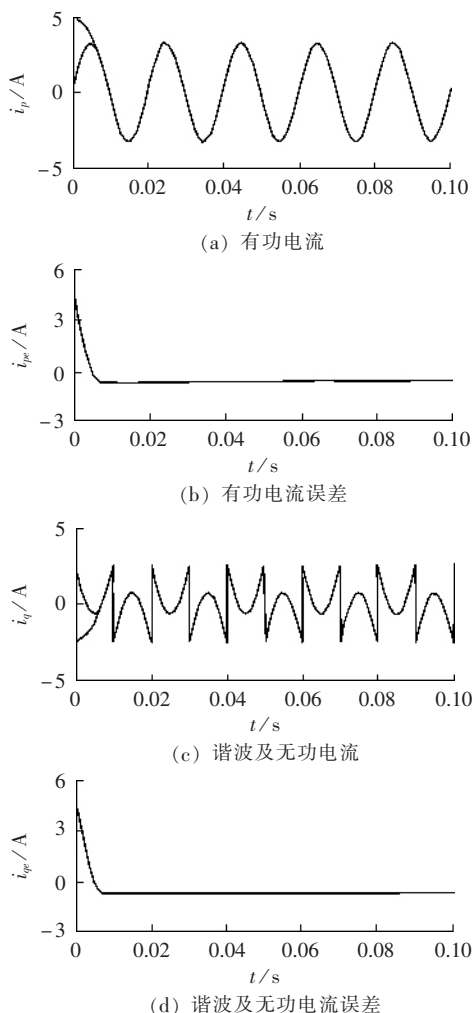
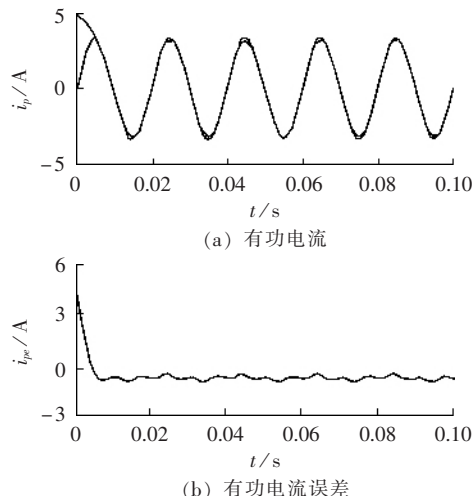
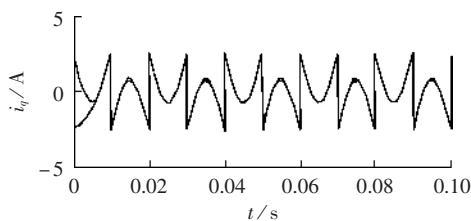


图 3 当 LPF 的 $f_c = 20$ Hz 时检测结果

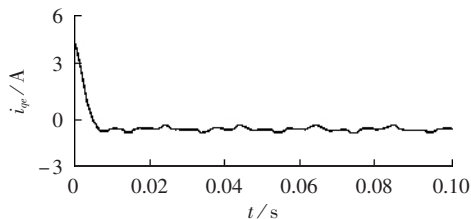
Fig.3 Detected results of LPF with $f_c = 20$ Hz

图 4 为 LPF 的截止频率 $f_c = 40$ Hz 时检测得出的结果。比较图 3 和图 4 发现,LPF 截止频率的选取对图 1 所示电路的检测效果影响很大。从理论分析上看, f_c 越小,检测精度越高,但会引起延时加大,使动态响应过程变慢。 f_c 取得大了,尽管可加快检测电路的动态响应过程,但是有部分谐波不能被 LPF 衰减掉,容易造成检测波形失真,影响检测精度。因此,在实际应用中要兼顾电路的动态响应和检测精度。





(c) 谐波及无功电流



(d) 谐波及无功电流误差

图 4 当 LPF 的 $f_c=40\text{ Hz}$ 时检测结果Fig.4 Detected results of LPF with $f_c=40\text{ Hz}$

4 结语

本文通过分析基于单位功率的谐波和无功电流检测法工作原理,给出了检测电路框图并进行了计算机仿真研究。理论分析和仿真结果表明,该检测方法不仅具有实时性好、准确度高、检测电路简单等优点,而且可以广泛用于单相和三相四线不平衡系统中,是一种值得推广的方法。

参考文献:

- [1] AKAGI H. Prospects of new technologies for power electronics in the 21st century[C]// **Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002:Asia Pacific**. [S.l.]:IEEE/PES,2002:1399 - 1404.
- [2] AKAGI H. New trends in active filters for power conditioning[J]. **IEEE Trans. on Industry Application**,1996, 32(6):1312 - 1322.
- [3] 童梅,项基. 一种混合型电力滤波器的变结构控制[J]. **电工技术学报**,2002,17(1):59 - 63.
TONG Mei,XIANG Ji. Variable structure control for a hybrid power filter[J]. **Transactions of China Electrotechnical Society**,2002,17(1):59 - 63.
- [4] 刘进军,刘波,王兆安. 基于瞬时无功功率理论的串联混

合型单相电力有源滤波器[J]. **中国电机工程学报**, 1997, 17(1):37 - 41.

- LIU Jin-jun,LIU Bo,WANG Zhao-an. Hybrid type series active power filter used in single-phase circuit based on instantaneous reactive power theory[J]. **Proceedings of the CSEE**,2002,17(1):37 - 41.
- [5] 李达义,陈乔夫,贾正春. 一种新型的串联型有源电力滤波器[J]. **电力系统自动化**,2000,24(18):27 - 29.
LI Da-yi,CHEN Qiao-fu,JIA Zheng-chun. A new type series active power filter[J]. **Automation of Electric Power Systems**,2000,24(18):27 - 29.
- [6] 胡铭,陈珩. 有源滤波技术及其应用[J]. **电力系统自动化**,2000,24(3):66 - 70.
HU Ming,CHEN Heng. Active power filter technology and its application[J]. **Automation of Electric Power Systems**,2000,24(3):66 - 70.
- [7] 王兆安,杨军,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [8] 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. A detection method for harmonics and reactive currents in single-phase circuits[J]. **Transactions of China Electrotechnical Society**,1996,11(3):42 - 46.
- [9] 王金星,王庆平,贾长朱. Matlab 在有源滤波器仿真设计中的应用[J]. **电力系统及其自动化学报**,2001,13(4):43 - 46.
WANG Jin-xing,WANG Qing-ping,JIA Chang-zhu. Application of Matlab in design and simulation of active power filter[J]. **Proceeding of the EPSA**,2001,13(4):43 - 46.
- [10] 王群,姚为正,王兆安. 低通滤波器对谐波检测电路的影响[J]. **西安交通大学学报**,1999,33(4):5 - 8.
WANG Qun,YAO Wei-zheng,WANG Zhao-an. Effect of low pass filter on harmonics detection circuit[J]. **Journal of Xi'an Jiaotong University**,1999,33(4):5 - 8.

(责任编辑:李 玲)

作者简介:

张红莲(1981-),女,福建三明人,硕士研究生,研究方向为有源滤波与无功补偿(E-mail:zhholi2001@163.com)。

Real time detection approach of harmonic and reactive currents based on UPF

ZHANG Hong-lian,YUAN Zhao-qiang

(College of Electrical Engineering & Information Technology,
Three Gorges University,Yichang 443002,China)

Abstract: Aimed at the limitation of instantaneous reactive power theory broadly adopted in active power filters,the concept of power factor is introduced into its control system. A harmonic and reactive currents detection technique based on unity power factor is provided and its characteristics are analyzed. The proposed approach,which has simple structure,fast dynamic response speed and high detection precision,is verified effective and feasible with simulation studies.

Key words: unity power factor; active power filter; harmonic and reactive currents; low pass filter