

基于 $i_p - i_q$ 法的混合有源滤波器谐波电流检测方法

刘春花^{1,2}, 周腊吾¹

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410000; 2. 衡阳财经工业职业技术学院, 湖南 衡阳 421002)

摘要: 有源滤波器是一种消除电力系统谐波污染的重要装置。提出了一种建立在 $i_p - i_q$ 法的基础上, 用混合有源滤波器对任意次谐波电流进行检测的方法。该方法是通过增加预置补偿角, 对数字控制器产生的时间延迟做出补偿, 实现谐波的实时补偿。理论分析与仿真结果表明该方法具有较好的检测功能, 且算法简单, 易于实现。

关键词: 混合型有源滤波器; $i_p - i_q$ 法; 谐波; 仿真

中图分类号: TM713; TM76 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)05-0024-03

0 引言

随着电力电子技术的发展, 非线性负载的大量使用, 电网中大量的谐波污染给电力系统造成许多不良后果^[1-3]。有源滤波器是治理电力系统谐波污染的有效手段, 其基本工作原理是向电网中注入一个与负载谐波电流大小相等、方向相反的电流进行动态补偿^[4-6], 克服了传统 LC 滤波器的输出不能随电力系统中谐波变化而变化的缺点, 从而起到补偿作用, 达到消除或减小负载谐波电流对电网污染的目的。

利用 $i_p - i_q$ 法^[7] 在混合型电力滤波器中对任意次谐波电流进行检测。通过增加预置补偿角的方式对数字式控制器产生的时间延迟做出补偿, 减少了延迟对于谐波补偿的影响。

1 混合型有源滤波器控制原理

如图 1 所示的混合型有源滤波器是由一个并联无源滤波器和一个有源滤波器串联而成。无源滤波器常用于抑制电流谐波, 有源滤波器用于提高无源滤波器的运行性能。

混合型有源滤波器的工作原理: 有源滤波器让电源阻抗与无源滤波器和有源滤波器全部串联的谐波阻抗相等并等于零。

2 基于瞬时无功功率理论的 $i_p - i_q$ 法

$i_p - i_q$ 法原理如图 2 所示, 图 2 中 i_a, i_b, i_c 分别为三相三线制系统的各相电流瞬时值; e_a 为 a 相的电

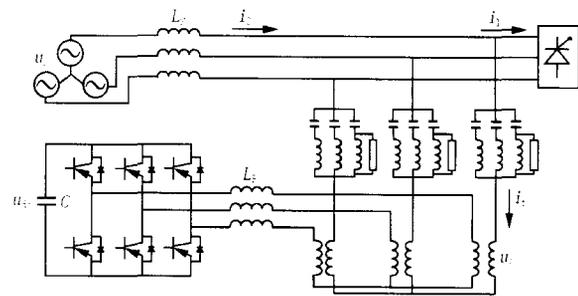


图 1 混合有源滤波器控制原理电路图

Fig 1 Control circuit diagram of hybrid active power filter

压瞬时值; i_{af}, i_{bf}, i_{cf} 分别为各相基波电流; i_{ah}, i_{bh}, i_{ch} 分别为各相谐波电流; PLL 为锁相环; 信号发生器为正、余弦发生电路; LPF 为低通滤波器。

$$C = \begin{bmatrix} -\sin t & \cos t \\ \cos t & \sin t \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$C_{32} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

该方法通过锁相环和正、余弦发生器得到与电源电压 e_a 同相位的正弦信号和对应的余弦信号。这两个信号与 i_a, i_b, i_c 一起计算出基波有功电流和基波无功电流 i_p, i_q :

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = CC_{32} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

然后经 LPF 滤波得出 i_p, i_q 的直流分量 \bar{i}_p, \bar{i}_q 。

由于 i_p, i_q 是由 i_{af}, i_{bf}, i_{cf} 所产生的, 因此由 \bar{i}_p, \bar{i}_q 即可计算出 i_{af}, i_{bf}, i_{cf} 。

基金项目: 湖南省自然科学基金 (02JJY2089), 湖南大学青年基金资助项目

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_{ah} \\ \bar{i}_{bh} \\ \bar{i}_{ch} \end{bmatrix} = C_{23} C^{-1} \begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_q \end{bmatrix} \quad (4)$$

进而计算出 $\bar{i}_{ah}, \bar{i}_{bh}, \bar{i}_{ch}$, 即:

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_{ah} \\ \bar{i}_{bh} \\ \bar{i}_{ch} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

i_p-i_q 法通过锁相环和低通滤波器分离出基波电流和谐波电流。

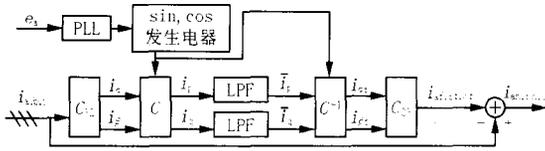


图 2 i_p-i_q 算法原理图

Fig 2 Principle of i_p-i_q algorithm

3 i_p-i_q 法检测任意次谐波电流

下面以 7 次谐波为例,对于三相三线制系统谐波电流进行检测,如图 3 所示。

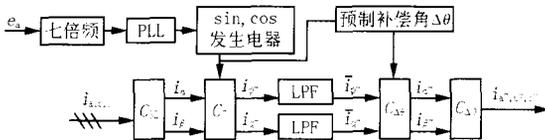


图 3 i_p-i_q 法预制补偿角的 7 次谐波检测原理图

Fig 3 Detecting seventh harmonic adopting added compensatory angle with i_p-i_q algorithm

将 e_a 七倍频后通过锁相环和正、余弦发生电路得到与同相位的正弦信号 $\sin 7t$ 和对应的余弦信号 $\cos 7t$, 从而得到变换阵 C_7 :

$$C_7 = \begin{bmatrix} -\sin 7t & \cos 7t \\ \cos 7t & \sin 7t \end{bmatrix} \quad (6)$$

将三相电流 i_a, i_b, i_c 经过 3S/2S 变换, 变换成静止、两相坐标系的电流 i, i :

$$\begin{bmatrix} i \\ i \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

将两相电流 i, i 经过变换阵 C_7 得出在该坐标系下的各次谐波的有功和无功电流分量 \bar{i}_p, \bar{i}_q :

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_q \end{bmatrix} = C_7 \begin{bmatrix} i \\ i \end{bmatrix} = C_7 C_{32} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

将有功和无功电流分量 \bar{i}_p, \bar{i}_q 经 LPF 滤波得出

7 次谐波的有功和无功直流分量 \bar{i}_p, \bar{i}_q 再经变换阵 C , 求出两相坐标系电流 i_7, i_7 。其中的 C 为:

$$C = \begin{bmatrix} -\sin(7t + \theta) & \cos(7t + \theta) \\ \cos(7t + \theta) & \sin(7t + \theta) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$= 7 T$$

式中 T 为采样周期, 亦为延迟时间。

如果控制器需要, 可将 i_7, i_7 经 2S/3S 变换最终得出 7 次谐波电流 i_{a7}, i_{b7}, i_{c7} :

$$\begin{bmatrix} i_{a7} \\ i_{b7} \\ i_{c7} \end{bmatrix} = C_{23} \begin{bmatrix} i_7 \\ i_7 \end{bmatrix} \quad (10)$$

4 延迟时间分析

对于数字式控制器, 需要至少一个采样周期 T 的运算时间, 同时 PWM 逆变器的输出也需要一个 T 的时间建立电压, 如图 4 所示。

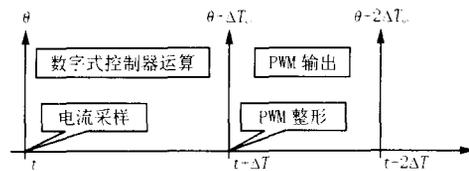


图 4 延迟时间原理图

Fig 4 Principle of time delay

从电流采样到谐波补偿, 至少存在一个 T 的延迟时间。在延迟时间 T 内, 设基波角频率为 ω , n 次谐波在这 T 内旋转了 $\theta = n \omega T = 2n f T$ (rad)。如果不对这个延迟时间进行补偿, 则旋转变换 C 及其逆变换 C^{-1} 不再是恒等变换, 严重时, 某高次谐波的补偿甚至会形成正反馈。

5 仿真分析

从图 5 可以看出, 含有 7 次谐波的负载电流波形有畸变, 在工频情况下, 7 次谐波在 $T=0.5 \text{ ms}$ 的延迟时间内旋转的角度 $\theta = 2 \times 7 \times 3.14 \times 50 \times 0.5 \text{ ms} = 63^\circ$ 。如不对它进行补偿, 则谐波含量达 15.3%。相反, 从图 7 可以看出, 采用本文提出的 i_p-i_q 预置延迟补偿角的方法补偿后, 电流波形比较接近于正弦波。

6 结论

本文在 i_p-i_q 法的基础上, 通过预置延迟时间补偿角的方式, 针对混合型有源电力滤波器的任意指定次数 (如 7 次) 谐波电流进行检测, 补偿后的电流

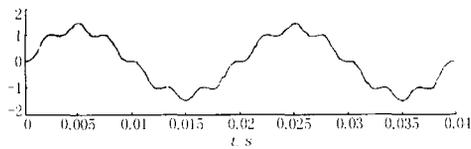


图 5 只含 7 次谐波的负载电流波形

Fig 5 Waveform of bad current with seventh harmonic

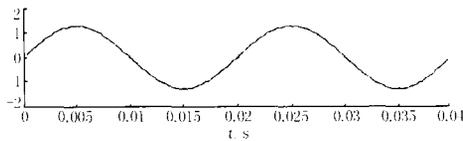


图 6 基波电流波形

Fig 6 Waveform of fundamental wave

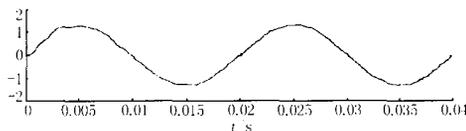


图 7 滤除 7 次谐波, 补偿 T 后的电流波形

Fig 7 Waveform of detected current with seventh harmonic filtered and T compensated

波形接近正弦波。理论分析和仿真结果证实了这种方法的可靠性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] YUWEN Bo, JIANG Xin-jian, ZHU Dong-qi Study on the Performance of the Combined Power Filter with Unsymmetrical Condition [Z].
- [3] 张超, 杨耕, 杜继宏. 有源电力滤波器任意次谐波电流检测的新算法 [J]. 电机与控制学报, 2002, 6(3): 252-255.
ZHANG Chao, YANG Geng, DU Ji-hong A New Algorithm for Random Harmonic Current Detection of Active Power Filter [J]. Electric Machines and Control, 2002, 6(3): 252-255.
- [4] 戴朝波, 林海雪, 雷林绪. 单相并联型电力有源滤波器的仿真分析 [J]. 电网技术, 2001, 25(8): 28-32.
DAI Chao-bo, LI Hai-xue, LEI Lin-xu Simulation and Analysis of Single Phase Shunt Active Power Filter [J]. Power System Technology, 2001, 25(8): 28-32.
- [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] 郑琼林, 路国锋, 郝荣泰. 能降低端电压和容量的有源电力滤波器并联混合补偿拓扑结构研究 [J]. 北方交通大学学报, 1994, 23(2): 45-46.
ZHENG Qiong-lin, LU Guo-feng, HAO Rong-tai A Probe in Shunt Hybrid-compensator Topology with Reduced APFs Rating and Terminal-voltage [J]. Journal of Northern Jiaotong University, 1994, 23(2): 45-46.
- [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. 245-312.
WANG Zhao-an, YANG Jun, LIU Jin-jun Harmonic Suppression and Reactive Power Compensation [M]. Beijing: China Machine Press, 1998. 245-312.

收稿日期: 2004-06-24

作者简介:

刘春花 (1970 -), 女, 硕士研究生, 研究方向为有源滤波器的检测与应用; E-mail: liuchunhua417654@126.com
周腊吾 (1965 -), 男, 博士, 主要研究方向为有源滤波器的研制. E-mail: zhoulawu@hnu.cn

Method of harmonic current detection for hybrid active power filter based on $i_p - i_q$ principle

LU Chun-hua^{1,2}, ZHOU La-wu¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410000, China;

2. Hengyang College of Finance Vocational Technology, Hengyang 421002, China)

Abstract: Active power filter is an important device to eliminate the pollution of harmonics. A new method for random harmonic current detection of hybrid active power filter based on $i_p - i_q$ principle is presented. This method employs added compensatory angle to compensate controller's time delay and realize the real time compensation. Theoretical analysis and simulation results show that this method has high performance of detecting the harmonics and is easy to implement.

This project supported by National Natural Science Foundation of Hunan Province (02JJY2089).

Key words: hybrid power filter; $i_p - i_q$ method; harmonics; simulation