

文章编号: 1005—0523(2005)05—0071—04

基于瞬时无功功率理论的谐波检测仿真分析

毛 鹏, 王银乐

(华东交通大学 电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:系统地介绍了基于瞬时无功功率理论的谐波检测法, 利用 Simulink 进行了动态仿真. 对检测方法的稳定性和适用范围进行了阐述和推导, 并通过仿真试验予以证实. 文中还就影响系统动态性能的因素进行了分析, 并给出了建议.

关 键 词:瞬时无功功率理论; 谐波检测法; 仿真

中图分类号: TM131.4

文献标识码: A

0 引言

20 世纪 70 年代以来, 随着微电子、计算机、电力电子技术的飞速发展, 各种电力电子装置在工业、交通及家庭中的应用日益广泛. 这些非线性负载的应用给整个电力系统带来了严重的谐波污染. 这既降低了电力系统的稳定性, 又给邻近用户带来了干扰. 在这种背景下, 作为典型的动态谐波电流补偿装置, 有源电力滤波器(Active Power Filter, 简称 APF)得到了工程界的青睐.

APF 的技术关键之一在于快速准确的谐波检测, 自从瞬时无功功率理论^[1]提出以来, 基于瞬时无功功率理论的谐波电流检测法在 APF 中得到了广泛的应用. 作为该理论的发展应用, i_p-i_q 谐波电流检测法因其不受电网电压畸变或不平衡等因素的影响, 所以在谐波的实时检测中得到了应用. 本文通过理论推导以及模拟不同电网环境下的动态仿真试验得出结论, 该方法完全可以满足实时控制中对检测的准确性、实时性的要求.

1 三相电路瞬时无功功率理论

1.1 概述

三相瞬时无功功率理论于 1983 年由日本学者提出, 该理论以瞬时有功功率 p 和瞬时无功功率 q 的定义为基础, 但未对有关的电流量进行定义. 此后该理论的发展又引出了瞬时有功电流 i_p 和瞬时无功电流 i_q 的概念, 并以此建立了 i_p-i_q 谐波电流检测法. 该方法不论在电源电压畸变时, 还是在三相电压不对称时, 都能准确完成对谐波电流的检测^[2].

设三相电路各相电压和电流的瞬时值分别为 e_a, e_b, e_c 和 i_a, i_b, i_c , 把它们转换到正交 $\alpha-\beta$ 坐标下得到 e_α, e_β 和 i_α, i_β , 转换关系为:

$$\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = c_{32} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$$

$$\text{其中 } C_{32} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & 1-2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$$

1.2 三相电路谐波电流检测原理

根据三相瞬时无功功率理论建立的谐波检测方法有: $p-q$ 法, i_p-i_q 法. 前者受电压畸变的影响

收稿日期: 2005—03—16

作者简介: 毛鹏(1979—), 男, 山东泗水人, 华东交通大学硕士研究生

较大,准确性差^[3],而 $i_p - i_q$ 法则不受电网电压畸变等因素的影响.下面直接给出瞬时有功电流 i_p 和瞬时无功电流 i_q 的表达式

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = CC_{32} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

$$\text{其中 } C = \begin{bmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ -\cos \omega t & -\sin \omega t \end{bmatrix}$$

矩阵 C 中的正弦信号 $\sin \omega t$ 和余弦信号 $\cos \omega t$ 是与电网 A 相正序基波电压同相位的,即角频率和初相角都相同.传统方式通过锁相环(Phase Locked Loop—PLL)实现对 A 相电压频率和相位的锁定,但是当电网电压畸变时,这种方法很难准确捕捉 A 相正序电压.所以,近来又有学者提出带前置低通滤波的 A 相正序基波电压提取法.限于篇幅,这里假定已经得到 A 相正序基波电压同相位的正余弦信号.当 i_a, i_b, i_c 不对称或者畸变时, i_p, i_q 将由直流分量 $\bar{i}_p, \bar{i}_q$ 和交流分量构成,其中的直流分量对应正序基波分量(基波有功电流和基波无功电流),而交流分量分别与三相电流的谐波分量对应.所以,只要滤除其中交流成分,再把直流分量 $\bar{i}_p, \bar{i}_q$ 转换到三相坐标下就得到了负载电流中的正序基波分量, i_{af}, i_{bf}, i_{cf} ^[4],转换过程如下:

$$\begin{bmatrix} i_{af} \\ i_{bf} \\ i_{cf} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ -\cos \omega t & -\sin \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_q \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t + \varphi_1) \\ \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi_1) \\ \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi_1) \end{bmatrix}$$

用原负载电流减去此基波电流即可得到所要补偿的谐波电流:

$$\begin{aligned} \bar{i}_{ah} &= i_a - i_{af} \\ \bar{i}_{bh} &= i_b - i_{bf} \\ \bar{i}_{ch} &= i_c - i_{cf} \end{aligned}$$

根据以上原理阐述得出图 1 所示的原理框图.顺便指出,当要检测谐波和无功电流之和时,只需断开图 1 中 i_q 通道;如果只需检测无功电流分量,则对 i_q 反变换即可^[2].

2 负载谐波电流检测的算例分析

理想的电网电压波形应是正弦波,而实际的电网电压总存在不同程度的畸变,据 1999 年的有关统计,我国电网电压畸变率平均已达 2%—3%,严重时段,畸变率更高.因此,研究电网电压畸变下谐波电流的检测更具现实意义.

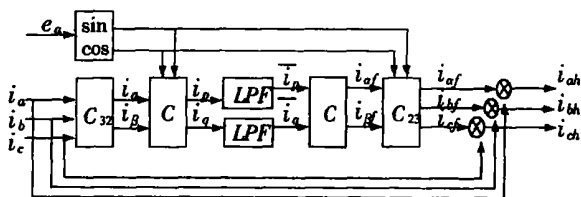


图 1 $I_p - I_q$ 谐波检测法原理图

假设电网电压三相对称,负载电流的傅立叶级数展开式为:

$$i_a = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad i_b = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin[n\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi_n] \quad i_c = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin[n\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi_n]$$

式中: $n=3k \pm 1$ k 为整数($k=0$ 时取 1); ω 为基波角频率; I_n, φ_n 分别为 n 次电流谐波的有效值和初相角;按照图 1 算法原理图可得:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \\ \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(n\omega t + \varphi_n) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ -\cos \omega t & -\sin \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_q \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos[(n-1)\omega t + \varphi_n] \\ -\sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin[(n-1)\omega t + \varphi_n] \end{bmatrix}$$

i_p 经过低通滤波后,再转换到三相坐标下可得其直流分量 $\bar{i}_p, \bar{i}_q$:

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3} I_1 \cos \varphi_1 \\ -\sqrt{3} I_1 \sin \varphi_1 \end{bmatrix}$$

将该直流分量变换到三相系统,最终将负载电流中的基波准确分离出来.

3 仿真及试验结果

为更好地分析检测系统的动静态性能,这里以常见的三相全桥二极管整流电路为负载,在 Simulink 下建立了仿真模型.

试验 1:电网电压额定频率 50 Hz,线电压 380 V.图 2 给出了利用 i_p-i_q 法的检测结果,从中可以看出,该方法很好地检测出了基波分量.图 3 给出了负载电流及检测出的基波分量的频谱.

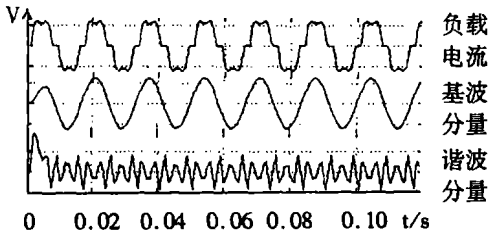


图 2 负载电流及检测结果

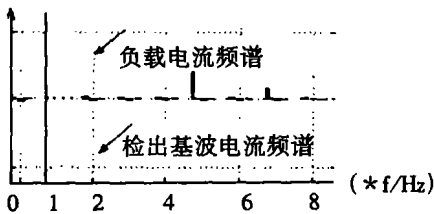


图 3 负载电流及检出基波的频谱

试验 2:模拟实际系统中的畸变电压,在电网电压中叠加了 5 次和 7 次谐波.图 4 给出了此时系统的电压波形.图 5 为检测结果图,可以看出,法也准确检测出了负载中的基波电流分量.

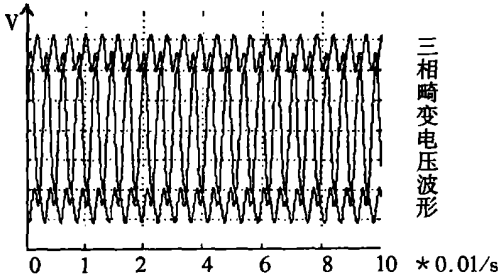


图 4 畸变的三相电压波形

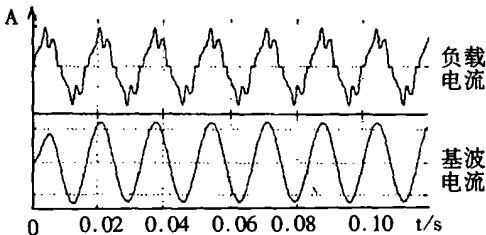


图 5 畸变电压下的负载电流和检出基波的电流波形

检测方法中的低通滤波器的设计是关键,它很大程度上影响检测系统的动态性能,图 6 给出了不同阶数的低通滤波器下,系统检测性能的对比,可以看出,低阶低通滤波响应更快.

4 结论

通过理论分析和仿真结果可以看出:

1) 就 i_p-i_q 谐波电流检测法的总体性能而言,该方法算法简洁,灵活性大,适当更改结构,可以分离出基波中的有功分量或无功分量.

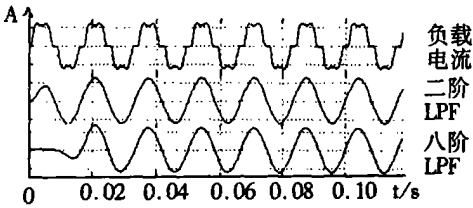


图 6 二阶和八阶低通滤波下的检测结果比较

2) 就检测方法的适用条件而言,由于只取与 A 相基波正序电压同相位的 $\sin \omega t$ 和 $\cos \omega t$ 参与运算,即使电网电压存在畸变或者不平衡也不会影响基波电流检测的准确性.本仿真中有意在电网电压中加入了 0.2 pu 的五次谐波电压和 0.15 pu 的七次谐波电压(都以基波的电压为基准值),以模拟实际电网.通过图 5 的仿真结果可以清楚地看出,基波检测并没有受到影响.这是很具现实意义的.还应指出,市电电压不对称时,只要能准确得到与基波正序电压同相位的正余弦信号,该方法还能准确分离出基波电流的有功分量和无功分量.显然,传统的 PLL 技术是不能实现上述检测目标的.

3) 就检测的动态性能而言,在电流采样、相位锁定、坐标系转换、滤波等影响检测实时性的诸因素中,低通滤波器的类型、阶数和截至频率是最关键的,图 6 给出的仿真结果显示,高阶滤波器检测的延迟约一个基波周期.考虑到现有的 DSP 芯片的处理速度和 APF 中功率开关的动作频率,采用二阶巴特沃兹(Buttutworth)低通滤波器,截至频率为 25 Hz (延时约 20 ms)足以协调检测实时性和准确性的关系,实现检测要求.

参考文献:

[1] AKAGI I. New Trends in Active Filters for Power Conditioning [J]. IEEE Transaction on Industry Applications, 1996, 32(6): 1312—1322.

[2] 刘凤君. Delta 逆变技术及其在交流电源中的应用[M]. 北京:机械工业出版社,2003.

[3] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:北京机械工业出版社,1998.

[4] DUKE R M, ROUND S D. The Steady-State Performance of a

Controlled Current Active Filter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1993, 8(2): 140—146.

Simulation Analysis of Harmonic Detecting Method Based on Theory of Instantaneous Reactive Power

MAO Peng, WANG Yin-le

(School of Electrical Engineering, East China Jiaotong Uni., Nanchang 330013 China)

Abstract: This paper gives a general introduction to the i_p-i_q harmonics detecting method based on the theory of instantaneous reactive power and gives simulating model with the software of Simulink. Reliability and applicability of the detecting method are discussed and deduced. Both are validated through simulation results. Analysis on factors effecting dynamic performance of the system are given and some advices are given at the same time.

Key words: instantaneous reactive power; hammonic detecting method; simulation

(上接第 57 页)

4 结束语

本段加筋土挡墙施工前集思广益、大胆创新、模仿定型组合钢模,设计制作了面板模型,安拆方便快捷,重量轻,刚度好,提高了生产效益,保证了墙面板的质量。在施工过程中,精心组织,严格控制,墙体质量得到铁道部第二勘察设计院、西南交通大学监理公司的好评。

参考文献:

[1] 崔江余. 建筑基坑工程设计计算与施工[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1999.
[2] 龚晓南. 深基坑工程设计施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
[3] 杭州市建筑业管理局. 建筑业 10 项新技术与研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
[4] 厦门建设委员会. 深基坑支护技术[M]. 北京中国水利水电出版社, 1999.
[5] 中国建筑科学研究院. 建筑基坑支护技术规程[M]. 北京, 中国建筑工业出版社, 1999.

Construction Technology and Innovation of the Reinforced Retailing Wall

PAN Chun-rong

(Beijing Construction Corporation of the Group of China-Rail-Electricity, Beijing 100000)

Abstract: Integrated with a practical engineering example, the article probes into construction technology of the reinforced retailing wall and its innovation in precasting model of wall face slab, It has very useful value.

Key words: the reinforced retailing wall; construction innovation