

无锁相环单相电路谐波及无功电流综合检测新方法

吕晓琴, 张秀峰, 章春军

(西南交通大学峨眉校区, 四川 峨眉 614202)

摘要: 提出了新的无锁相环单相电路谐波及无功电流综合检测方法。该方法不需要锁相环电路, 只需要通过构造任意初相位的基频正余弦信号, 再与负载电压和电流经过相关变换后, 就能分离出电压的基波分量, 以及电流的基波有功分量, 从而最终检测出电路的谐波与无功综合电流。在电网电压无畸变和存在畸变两种情况下分别进行了仿真。仿真结果证实其能够实现电网在有源滤波器的作用下只提供负载基波有功分量的目的, 且不受电网电压畸变影响。

关键词: 无锁相环; 单相电路; 谐波及无功; 电压畸变; 检测

New detecting method of harmonics and reactive currents in single circuit without phase lock loop

Lü Xiao-qin, ZHANG Xiu-feng, ZHANG Chun-jun
(Emei Campus, Southwest Jiaotong University, Emei 614202, China)

Abstract: A new harmonics and reactive currents detecting method in single circuit is proposed in this paper. This method doesn't use phase lock loop. Only with constructing fundamental sine and cosine signals under arbitrary initial phase, and through mathematical transformation, it can separate both fundamental voltage and fundamental active current, and finally detect harmonic and reactive comprehensive currents. It has theoretical derivation and simulations under voltages with and without distortion in this paper. Simulations has proved that fundamental active current is transported in system with work of the active filter, and whether waveform of voltage is distortion, the results can not be affected.

Key words: without phase lock loop; single circuit; harmonics and reactive currents; distortion voltage; detecting

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)06-0045-04

0 引言

随着电力电子设备等非线性负荷在电力系统中的广泛应用, 电网中的谐波及无功电流污染日益严重。用有源滤波器补偿电网中的谐波及无功已受到广泛的关注。有源滤波器补偿谐波及无功电流的基本原理是产生一个与该谐波及无功电流大小相等, 方向相反的电流, 从而相互抵消, 达到补偿的目的。有源滤波器是否能够准确补偿, 关键在于要实时准确地检测出指令电流。对于单相电路中的典型负载, 牵引供电系统交直整流型电力机车, 其产生的奇次谐波和无功分量对电网电能质量存在一定的影响。传统的单相电路谐波及无功电流检测方法是基于三相电路 p-q 法或 i_p-i_q 法^[1-3], 用虚拟三相或两相的方法检测出指令电流, 以及单相电路有功电流分离法^[4]。其中 p-q 法检测结果受到电网电压畸变影响, i_p-i_q 法和有功电流分离法需要采用锁相环电路, 增

加了检测电路的复杂性。

关于无锁相环的指令电流检测方法, 文献[5-7]进行了相关研究, 都是基于三相电路, 而且只讨论了谐波电流的检测。有源滤波器补偿的最佳效果是希望电网只含有负荷基波有功电流分量, 因此指令电流的检测应该同时包括谐波及无功电流的综合检测。

本文基于单相电路, 提出了一种新的谐波及无功电流的综合检测方法。该方法通过产生基频下任意相位的正余弦信号, 不需要锁相环电路就能分离出单相负荷所含的基波有功电流分量, 从而检测出谐波及无功的综合电流。该方法检测结果不受电网电压畸变影响, 节省了锁相环电路, 通过分析及仿真证明了方法的正确性和可行性。

1 单相电路谐波电流的无锁相环检测原理

谐波电流的检测, 关键在于能够分离出基波电流, 通过式(1)可得到谐波电流:

$$\dot{i}_h = \dot{i}_L - \dot{i}_1 \quad (1)$$

基金项目: 西南交通大学青年教师科研起步项目 (2008Q020)

式中： i_h 为所要检测的谐波电流； i_L 为负载电流； i_1 为基波电流。无锁相环的谐波电流检测原理如图 1 所示^[8]。

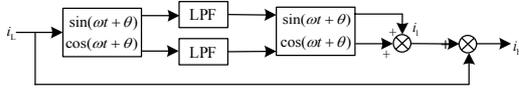


图 1 无锁相环的谐波电流检测原理
Fig.1 Harmonics detecting without PLL

当单相负载为牵引供电系统交直整流型电力机车时，其产生的谐波为奇次谐波。为不失一般性，以下的理论分析假设负载电流谐波次数为 2, 3, 4, …，其推导过程适用于所有单相谐波负荷。因此假设负载电流表达式为：

$$i_L = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(\omega t + \alpha_n) \quad (2)$$

其中： I_n 为负载电流有效值； n 为谐波次数； α_n 为 n 次谐波电流初相位。

由于实际电网的电压和电流基波频率都是 50 Hz，经过有源滤波器补偿后也希望得到 50 Hz 的基频信号，因此可由正余弦发生电路产生基频下的任意初相位正余弦信号 $\sin(\omega t + \theta)$ 和 $\cos(\omega t + \theta)$ ，把此正余弦信号分别与负载电流 i_L 相乘，其结果由交流和直流两部分组成，即：

$$i_L \sin(\omega t + \theta) = \frac{\sqrt{2}}{2} I_1 \cos(\theta - \alpha_1) + \tilde{i}_a \quad (3)$$

$$i_L \cos(\omega t + \theta) = -\frac{\sqrt{2}}{2} I_1 \sin(\theta - \alpha_1) + \tilde{i}_b \quad (4)$$

通过两倍增益的低通滤波器后，可得到两直流信号 ($\sqrt{2} I_1 \cos(\theta - \alpha)$ 、 $-\sqrt{2} I_1 \cos(\theta - \alpha)$)，再把此直流信号与相同的正余弦信号相乘后相加：

$$i_1 = \sqrt{2} I_1 \cos(\theta - \alpha) \sin(\omega t + \theta) - \sqrt{2} I_1 \cos(\theta - \alpha) \cos(\omega t + \theta) + \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t + \theta) \quad (5)$$

最后，通过式 (1) 即可检测出负载电流中所含的谐波电流。该方法实现了无锁相环的单相电路谐波电流检测，通过有源滤波器可实现谐波的补偿。下面将具体分析无锁相环单相电路的谐波及无功电流的综合检测，通过有源滤波器可实现谐波及无功的同时补偿。

2 畸变电压下无锁相环单相电路谐波及无功电流综合检测新方法

理想的电网电压波形应为正弦波，但实际的电网电压波形由于不同的原因会有一定的畸变^[1]。因此，

这里以电网电压畸变为条件进行分析。首先，设畸变的单相电网电压和负载电流分别为：

$$\begin{cases} u_L = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} U_n \sin(\omega t + \varphi_n) \\ i_L = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n - \alpha_n) \end{cases} \quad (6)$$

式中： U_n 、 I_n 分别为负载电压、电流有效值； n 为谐波次数； φ_n 为 n 次谐波电压的初相位（其中，基波电压的初相位为 φ_1 ）； α_n 为 n 次谐波电流的功率因数角。其中，基波有功电流和基波无功电流为：

$$\begin{cases} i_{1p} = \sqrt{2} I_1 \cos \alpha_1 \sin(\omega t + \varphi_1) = \sqrt{2} I_{1p} \sin(\omega t + \varphi_1) \\ i_{1q} = -\sqrt{2} I_1 \sin \alpha_1 \cos(\omega t + \varphi_1) = -\sqrt{2} I_{1q} \cos(\omega t + \varphi_1) \end{cases} \quad (7)$$

相同地，把负载电流 i_L 与任意初相位的正余弦信号 $\sin(\omega t + \theta)$ 和 $\cos(\omega t + \theta)$ 相乘：

$$i_L \sin(\omega t + \theta) = \bar{i}_s + \tilde{i}_s = \frac{\sqrt{2}}{2} I_{1p} \cos(\theta - \varphi_1) - \frac{\sqrt{2}}{2} I_{1q} \sin(\theta - \varphi_1) + \tilde{i}_s \quad (8)$$

$$i_L \cos(\omega t + \theta) = \bar{i}_c + \tilde{i}_c = -\frac{\sqrt{2}}{2} I_{1p} \sin(\theta - \varphi_1) - \frac{\sqrt{2}}{2} I_{1q} \cos(\theta - \varphi_1) + \tilde{i}_c \quad (9)$$

把负载电压 u_L 同样乘以此正余弦信号，得：

$$u_L \sin(\omega t + \theta) = \bar{u}_s + \tilde{u}_s = \frac{\sqrt{2}}{2} U_1 \cos(\theta - \varphi_1) + \tilde{u}_s \quad (10)$$

$$u_L \cos(\omega t + \theta) = \bar{u}_c + \tilde{u}_c = -\frac{\sqrt{2}}{2} U_1 \sin(\theta - \varphi_1) + \tilde{u}_c \quad (11)$$

通过两倍增益的低通滤波器后，可得到以下直流信号：

$$\begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} I_{1p} \cos(\theta - \varphi_1) - \sqrt{2} I_{1q} \sin(\theta - \varphi_1) \\ -\sqrt{2} I_{1p} \sin(\theta - \varphi_1) - \sqrt{2} I_{1q} \cos(\theta - \varphi_1) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} U_{L11} \\ U_{L12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} U_1 \cos(\theta - \varphi_1) \\ -\sqrt{2} U_1 \sin(\theta - \varphi_1) \end{bmatrix} \quad (13)$$

式 (12) 和式 (13) 中， I_{L1} 乘以 U_{L11} ， I_{L2} 乘以 U_{L12} ，再相加，可得：

$$\begin{aligned} I_{L1} U_{L11} + I_{L2} U_{L12} &= 2U_1 I_{1p} \cos^2(\theta - \varphi_1) + \\ &2U_1 I_{1p} \sin^2(\theta - \varphi_1) - 2U_1 I_{1q} \sin(\theta - \varphi_1) \cos(\theta - \varphi_1) + \\ &2U_1 I_{1q} \sin(\theta - \varphi_1) \cos(\theta - \varphi_1) = 2U_1 I_{1p} \end{aligned} \quad (14)$$

把式 (14) 所得结果直接乘以分离出来的基波电压 ($u_1 = \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$)，见图 2 中 u_1 支路，

即:

$$i'_{ip} = 2U_1 I_{ip} (\sqrt{2} U_1 \sin(\omega t + \varphi_1)) = 2\sqrt{2} U_1^2 I_{ip} \sin(\omega t + \varphi_1) \quad (15)$$

式(15)除以 $2U_1^2$ 即为负载所含基波有功电流 i_{ip} (式(7))。要获得负载基波电压有效值的平方

U_1^2 , 可先求得基波电压瞬时量的平方 u_1^2 , 再通过两倍增益低通滤波器即可。

$$u_1^2 = (\sqrt{2} U_1 \sin(\omega t + \varphi_1))^2 = U_1^2 (1 - \cos 2(\omega t + \varphi_1)) \quad (16)$$

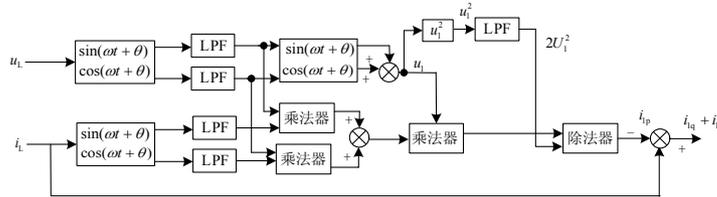


图2 无锁相环单相电路谐波及无功电流检测新方法

Fig.2 New harmonic and reactive current detecting method without PLL of single circuit

通过以上推导, 可最终检测出负载谐波和无功电流为:

$$i_{iq} + i_h = i_L - i_{ip} \quad (17)$$

此种方法实现了单相电路无锁相环谐波与无功电流的综合检测。推导的过程是基于电压畸变的条件下, 也就是说该方法不受电压畸变影响, 不仅去掉了锁相环电路, 而且无论电压是否畸变, 都能准确分离出基波有功分量, 检测出负载中所含谐波与无功电流。

3 仿真分析

本文基于 Matlab/Simulink, 在电网电压无畸变和存在畸变两种情况下分别进行了仿真。

3.1 电压无畸变条件下

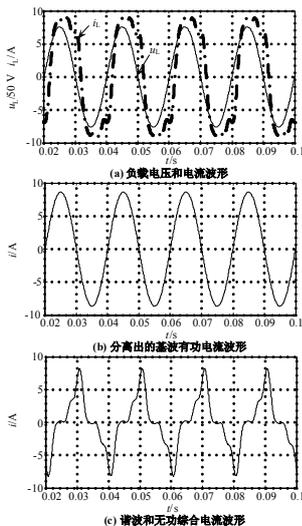


图3 电压波形无畸变时的波形图
Fig.3 Waveforms under normal voltage

首先电压无畸变时, 负载电压和电流波形如图

3 (a) 所示。其中, 负载电流假设为电力机车谐波电流, 含有 3、5、7 奇次谐波。图 3 (b) 为通过上述检测方法分离出的与电网电压同相位的基波有功电流分量, 图 3 (c) 即为最终检测出的谐波和无功综合电流波形。

由此, 在电压无畸变时, 使用该种方法能够综合检测出负载中所含谐波和无功电流。

3.2 畸变电压下

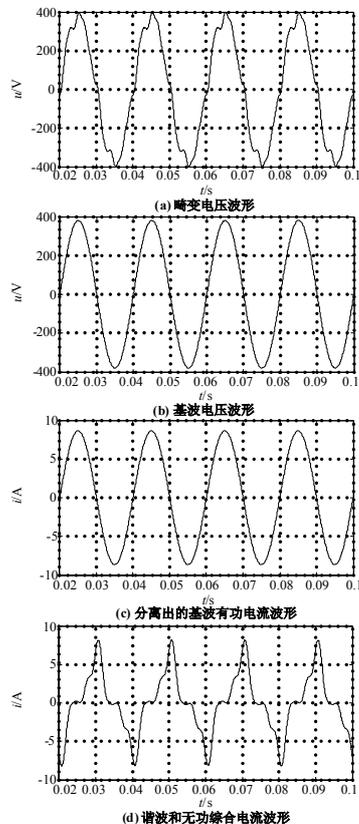


图4 畸变电压下的波形图
Fig.4 Waveforms with distortion voltage

仿真中假设的电网畸变电压波形如图 4 (a) 所示, 负荷电流波形不变。通过图 2 的变换, 可分离出电网电压的基波波形, 如图 4 (b)。图 4 (c) 和 (d) 分别为检测出的负载基波有功电流和谐波及无功综合补偿电流。

两种电压条件下, 仿真时假设的负载电流波形是一致的, 通过仿真结果可以看出, 检测出来的谐波及无功综合电流波形是相同的, 这亦证明了本文提出的检测方法不受电网电压波形畸变影响, 检测结果准确。

4 结论

本文提出的无锁相环单相电路谐波和无功电流检测方法, 通过构造任意初相位的基频正余弦信号, 经过基本变换后, 能够分离出电压或电流的基波分量和基波有功分量, 从而最终检测出需要有源滤波器补偿的谐波和无功综合补偿电流。该种方法的实现不受电网电压畸变的影响, 不存在锁相环电路, 实施简单方便, 有利于用 DSP 等数字芯片实现。

参考文献

[1] 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, 2002.
WANG Zhao-an, YANG Jun, LIU Jin-jun. Harmonic Control and Reactive Power Compensation[M]. Beijing: China Machine Press, 2002.

[2] 杨杰, 赖声礼, 李心广, 等. 三相电压不对称时谐波与基波有功、无功电流的精确检测方法研究[J]. 继电器, 2003, 31(4): 6-9.
YANG Jie, LAI Sheng-li, LI Xin-guang, et al. Research on Precision Detection Method of Harmonics Fundamental Active Current and Reactive Current in the Case of Asymmetrical Three-phase Voltage[J]. Relay, 2003, 31(4): 6-9.

[3] 王玉斌, 吕燕, 李英俊. 三相电压不对称时谐波和无功电流的准确检测新方法[J]. 继电器, 2006, 34(18): 47-51.
WANG Yu-bin, Lü Yan, LI Ying-jun. New Precision Detection Method of Harmonics and Reactive Current under Asymmetrical Three-phase Voltage[J]. Relay, 2006, 34(18): 47-51.

[4] 任永峰, 李含寿, 贺纲, 等. 两种单相电路瞬时谐波及无功电流实时检测方法分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(1): 95-98.
REN Yong-feng, LI Han-shou, HE Gang. The Analysis of Two Real-time Detecting Approaches of Instantaneous Harmonic and Reactive Current in Single-phase Circuit[J]. Proceeding of the EPSA, 2003, 15(1): 95-98.

[5] 戴列峰, 蒋平, 田大强. 无锁相环 d-q 谐波电流检测法的实现[J]. 电网技术, 2003, 27(8): 46-49.
DAI Lie-feng, JIANG Ping, TIAN Da-qiang. Realization of Harmonic Current Detection of d-q Transformation without Phase Lock Loop[J]. Power System Technology, 2003, 27(8): 46-49.

[6] 尉冰娟, 王明渝, 张淑国. 无锁相环 i_p-i_q 法在有源滤波器中的实现[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(2): 50-53.
WEI Bing-juan, WANG Ming-yu, ZHANG Shu-guo. Realization of i_p-i_q Method without Phase Lock Loop in Active Filter[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2006, 18(2): 50-53.

[7] 周林, 张凤, 栗秋华, 等. 无锁相环 i_p-i_q 检测任意次谐波电流的新方法[J]. 高电压技术, 2007, 33(7): 129-133.
ZHOU Lin, ZHANG Feng, LI Qiu-hua, et al. New Algorithm for Random Harmonic Current Detection Using i_p-i_q without Phase Lock Loop[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(7): 129-133.

[8] 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, 24(21): 35-38.
JIANG Bin, YAN Gang-feng, ZHAO Guang-zhou. A New Method for Real-time Detecting Harmonic and Reactive Currents in Single Phase Circuit [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(21): 35-38.

收稿日期: 2009-04-22; 修回日期: 2009-08-03

作者简介:

吕晓琴 (1980-), 女, 讲师, 硕士, 研究方向为电能质量综合补偿技术; E-mail: xiaogin93@163.com
张秀峰 (1961-), 男, 教授, 博士, 主要从事供电技术、继电保护和电力电子技术方面的研究工作;
章春军 (1981-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事铁道机车车辆方面研究。

(上接第 44 页 continued from page 44)

[7] Morren J, de Hann S W H. Short-Circuit Current of Wind Turbines with Doubly Fed Induction Generator [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(1): 174-180.

[8] XIANG Da-wei, LI Ran, Tavner P J, et al. Control of a Doubly Fed Induction Generator in a Wind Turbine During Grid Fault Ride-through[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2006, 21(3): 652-662.

[9] HE Yi-kang, HU Jia-bing, ZHAO Ren-de. Modeling and Control of Wind-turbine Used DFIG Under Network Fault Conditions[A]. in: ICEMS[C]. 2005. 986-991.

[10] Petersson A. Analysis, Modeling and Control of

Doubly-fed Induction Generators for Wind Turbines[D]. Chalmers University of Technology, 2005.

[11] Pena R, Clare J C, Asher G M. Doubly Fed Induction Generator Using Back-to-back PWM Converters and Its Application to Variable-speed Wind-energy Generation [J]. IEE Proc-Electr Power Appl, 1996, 143(3): 231-241.

收稿日期: 2009-04-15; 修回日期: 2009-06-04

作者简介:

郭家虎 (1974-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力电子与电力传动, 新能源发电。E-mail: hn_gjh@163.com