

配电静止同步补偿器的补偿电流检测方法

唐杰¹, 罗安², 涂春鸣², 欧剑波², 盘宏斌²

(1. 邵阳学院电气工程系, 湖南省邵阳市 422000;
2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南省长沙市 410082)

Detection Method of Compensation Current for DSTATCOM

TANG Jie¹, LUO An², TU Chun-ming², OU Jian-bo², PAN Hong-bin²

(1. Department of Electrical Engineering, Shaoyang University, Shaoyang 422000, Hunan Province, China;
2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China)

ABSTRACT: The detection of compensator current has important influence on the compensation performance of DSTATCOM when it is used for load compensation. A detection method based on synchronous reference frame is proposed. A single-phase voltage is derived and used to form virtual symmetrical three-phase system. The d axis of the synchronous reference frame is always synchronous with the voltage vector in virtual symmetrical three-phase system. The load current is projected on voltage vector. The component of d axis of the load current, which synchronous with the voltage vector is feed into low pass filter and the compensation current is derived. Compared with traditionally detection method based on synchronous transformation the detection method proposed in this paper need simple calculation and can detect compensation current accurately under unbalance voltage conditions. The principle of the detection method is interpreted by power balance theory. The feasibility and effectiveness of the detection method is verified by theoretic analysis and simulation results.

KEY WORDS: distribution static synchronous compensator; detection method; power quality; harmonics

摘要: 配电静止同步补偿器(distribution static synchronous compensator, DSTATCOM)用于负荷补偿时, 补偿电流指令信号的检测环节对其补偿性能有着重要的影响。该文提出了一种基于同步旋转坐标变换的谐波、无功和负序电流综合检测方法。该方法利用电网电压中的一相电压构造虚拟的对称三相系统, 然后以对称三相电压形成的合成矢量作为同步旋转坐标系中的 d 轴, 将负荷电流矢量投影到电网电压矢量上, 通过低通滤波器后便可得到要检测的补偿电流指令信

号。与传统的同步旋转坐标变换法相比较, 该方法计算简单, 且在电网电压不对称条件下, 仍能很好地检测出负荷电流中的谐波、无功和负序分量, 满足 DSTATCOM 负荷补偿的要求。同时还根据功率平衡准则对文中所提检测方法的原理进行了简单的分析。理论分析和仿真结果证明了该文所提检测方法的正确性和有效性。

关键词: 配电静止同步补偿器; 检测方法; 电能质量; 谐波

0 引言

随着配电网中的非线性、冲击性和不平衡负荷的日益增多, 配电网中的谐波污染、电压闪变、电压不平衡等电能质量问题也日益严重。给电力系统和重要的电力用户带来了不利影响, 配电网电能质量控制刻不容缓。配电静止同步补偿器(DSTATCOM)是一种重要的用户电力装置, 能综合地解决上述电能质量问题^[1-5]。补偿电流的检测和控制技术是 DSTATCOM 中的 2 项重要的核心技术, 是 DSTATCOM 能否有效解决上述电能质量问题的关键因素。因此开展对补偿电流检测和控制技术的研究具有重要的意义。本文重点论述 DSTATCOM 用于负荷补偿时补偿电流的检测技术。

目前对谐波、无功和负序电流的检测大多基于瞬时无功功率理论的 pq 变换法及其改进方法^[6-8]和基于同步坐标变换的 dp 变换法^[9-11], 以及自适应检测法^[12-16]。自适应检测法存在计算延时长, 不适合进行实时控制; 传统的 pq 及 dp 检测法在电网电压不对称情况下会产生检测误差, 而在实际电网中, 三相电压不对称是普遍存在的现象。因此, 研究电网电压不对称条件下补偿电流的检测技术具有重要意义。为此, 不少学者在这方面做了许多卓有成效

基金项目: 国家 863 高技术基金项目(2004AA001032); 湖南省自然科学基金项目(06JJ50102)。

The National High Technology Research and Development of China (863 Programme)(2004AA001032).

的研究工作。文献[17]提出一种基于空间矢量的基波正序分量、负序分量及谐波分量的检测方法，该方法利用空间矢量的概念，在复平面上成功地实现了对滤波器相移的补偿和基波正序、负序分量的实时分解；文献[18]利用查表的方式代替锁相环获取同步变换角，对电源电压逐个周期进行计数得到实时的角频率；文献[19]直接在时域内对电流移相 60° 进行计算得到各序分量值；文献[20]对三相电源电压进行 $\alpha\beta$ 变换得到 $u_{\alpha\beta}$ ，利用 $u_{\alpha\beta}$ 的矢量角作为同步旋转角。但当电源电压出现不对称情况时， $u_{\alpha\beta}$ 的矢量角并不能匀速旋转，不能用此时的旋转角定义旋转坐标系，所以电流检测精度会受到影响。文献[21]提出了一种基于电网电压矢量的同步参考坐标变换检测法，跟传统的同步坐标变换法相比较具有一定的优越性，但该文的检测方法在电网电压不对称时无法检测出负荷电流中的全部谐波和负序分量，不能满足 DSTATCOM 谐波、无功和负序电流综合检测与补偿的要求。本文在总结上述检测方法的基础上，提出一种 DSTATCOM 用于负荷补偿时的谐波、无功和负序电流综合检测方法，该方法不需要采用锁相环电路获得同步旋转角，消除了 PLL 给检测带来的不利影响，且在电网电压幅值不对称条件下实现了同步旋转角能实时跟踪电网电压基波正序频率的变化，即匀速旋转，达到了补偿电流准确检测的目的。并利用功率平衡准则对基于电源电压矢量的同步参考坐标法的检测与补偿原理进行了解释。

1 考虑电网电压不对称时的同步参考坐标法

1.1 基本原理

为了减小基于电网电压矢量的同步参考坐标法在电网电压不对称条件下的检测误差，本文提出了利用虚拟对称三相系统的合成电压矢量形成旋转坐标系的基本思想。首先利用电网电压中的一相电压构造虚拟的对称三相系统(只考虑电网电压的幅值不对称，而事实上这样做满足实际电网情况)。以 a 相电压为例，将 a 相电压延时 60° 并反相构成 c 相电压，由 a、c 相电压便可得到 b 相电压。

设 a 相电压为

$$u_a = U_{am} \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

式中： U_{am} 为 a 相电压的幅值； φ 为初相角。

a 相电压延时 60° 后并反相得到的 c 相电压为

$$u_b = u_a - u_c = U_{am} \sin(\omega t + \varphi + 120^\circ) \quad (2)$$

于是可得 b 相电压为

$$u_a = -u_b - u_c = U_{am} \sin(\omega t + \varphi - 120^\circ) \quad (3)$$

由式(1)~(3)构成的三相系统为对称的三相系统，本文称之为虚拟对称三相系统。在此基础上用虚拟对称三相系统的合成电压矢量作为旋转坐标系的 d 轴，这样便能实现旋转坐标系的 d 轴能近似的等效实际的电网电压基波正序分量的合成矢量，旋转坐标能匀速旋转。因此，在电网电压不对称条件下仍能准确地检测出负荷电流中的谐波、无功和负序电流。如果考虑电网电压的畸变情况，可在虚拟对称三相系统的构建之前插入 a 相电压的基波提取电路，但这样做会增加控制系统的延时。在具体实现时，为了解决上述延时问题，可以采用信号预测的方法^[22]。

整个检测法的原理框图如图 1 所示。图中的“构造对称三相系统”部分采用的是前述的基于 a 相电压延时的虚拟对称三相系统构造方法。

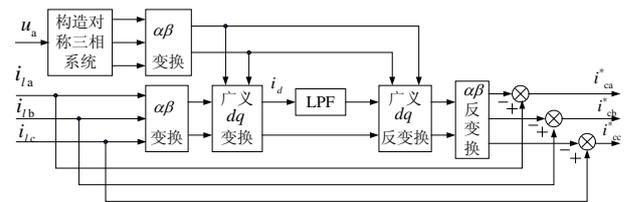


图 1 改进的同步旋转参考坐标法

Fig. 1 SRF method proposed in this paper

对虚拟对称三相系统的三相电压 u_{abc} 和负荷电流 i_{abc} 分别实施 $\alpha\beta$ 坐标变换后可以得到 $\alpha\beta$ 平面上的电压矢量 \mathbf{u} 和电流矢量 \mathbf{i} ，见图 2。图中定义 dq 旋转坐标系的 d 轴与虚拟对称三相系统的合成电压矢量 \mathbf{u} 重合。

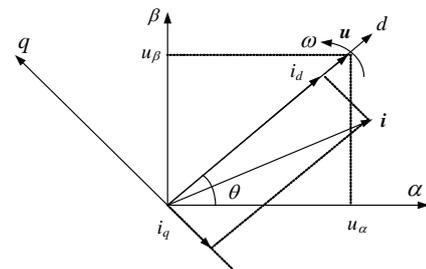


图 2 电压矢量和电流矢量示意图

Fig. 2 Voltage vector and current vector in stationary and synchronous reference frame

由图 2 中的几何关系可得

$$\begin{cases} \cos \theta = u_\alpha / \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \\ \sin \theta = u_\beta / \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \end{cases} \quad (4)$$

在 $\alpha\beta$ 坐标中，为了得到负荷电流矢量 \mathbf{i} 中与电网电压矢量 \mathbf{u} 同步旋转的分量，将电流矢量 \mathbf{i} 投影到电压矢量 \mathbf{u} 上^[21]，可得

$$\mathbf{i}_u = \begin{bmatrix} (i_\alpha u_\alpha + i_\beta u_\beta) \cdot u_\alpha / (u_\alpha^2 + u_\beta^2) \\ (i_\alpha u_\alpha + i_\beta u_\beta) \cdot u_\beta / (u_\alpha^2 + u_\beta^2) \end{bmatrix} \quad (5)$$

而 $\alpha\beta$ 坐标变换到 dq 坐标的变换关系为

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

由图2和式(4)~(6)可以得到电流矢量在电压矢量下投影的同步电流为^[21]

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{u_\alpha}{\sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}} & \frac{u_\beta}{\sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}} \\ -\frac{u_\beta}{\sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}} & \frac{u_\alpha}{\sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{i_\alpha u_\alpha + i_\beta u_\beta}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \cdot u_\alpha \\ \frac{i_\alpha u_\alpha + i_\beta u_\beta}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \cdot u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{i_\alpha u_\alpha + i_\beta u_\beta}{\sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{i}_d + \tilde{i}_d \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

可见, 电流矢量在电压矢量下的投影中无功电流 i_q 为零, 有功电流 i_d 含有直流分量和交流分量。将 i_d 通过低通滤波器, 可以得到同步电流的直流分量 \bar{i}_d , 即为与电网电压矢量具有同步转速的分量, 亦即负荷电流中的基波正序有功分量。然后通过反变换就可以得到谐波、无功和负序电流的基准信号 \mathbf{i}_{Cabc}^* 。

$$\mathbf{i}_{Cabc}^* = \mathbf{i}_{labc} - \begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{C}_{dq/\alpha\beta} \cdot \mathbf{C}_{dq/abc} \quad (8)$$

式中: \mathbf{i}_{labc} 为三相负荷电流; $\mathbf{C}_{dq/\alpha\beta}$ 为 dq 坐标到 $\alpha\beta$ 坐标的变换矩阵; $\mathbf{C}_{\alpha\beta/abc}$ 为 $\alpha\beta$ 坐标到 abc 坐标的变换矩阵。

1.2 基于功率平衡准则的补偿原理分析

利用本文所提检测方法形成DSTATCM补偿电流指令信号对负荷进行补偿时, 负荷电流中的谐波、无功和负序电流由DSTATCOM提供, 系统只提供三相对称的正序基波有功电流。可见利用本文所提检测方法形成补偿电流指令信号对负荷进行补偿不会导致电网电流畸变的恶化。下面从功率平衡准则的原理出发, 对本文所提检测方法的补偿原理做进一步探讨。

考虑到负荷功率是由三相基波正序功率、负序有功功率和谐波功率构成。根据功率平衡准则, 负荷消耗的负序有功功率和谐波功率成分须由DSTATCOM提供, 因此DSTATCOM需要从电网吸收基波有功。再以负序和谐波功率的形式提供给负荷, 因此系统提供的基波正序有功电流要大于负荷所需要的基波正序有功电流。DSTATCOM完成从

电网吸收的基波有功功率转化为负荷所需的负序和谐波功率是由直流侧电容完成的。正是由于DSTATCOM直流侧电容的储能和能量转化作用, 使得电源在补偿前后提供的功率是相等的, 仍然满足通用瞬时功率理论。

2 仿真分析

2.1 电网电压不对称条件下补偿电流的检测

为了验证本文所提出检测方法的正确性和有效性, 在Matlab/simulink环境下对电网电压不对称条件下采用本文的方法进行谐波、无功和负序电流的检测进行了仿真分析。图3给出了用于仿真研究的电网电压波形和负荷电流波形(标么值), 电网电压波形三相不对称, 负荷电流中含有谐波、无功和负序分量。

图4给出了无虚拟对称三相系统构造电路检测

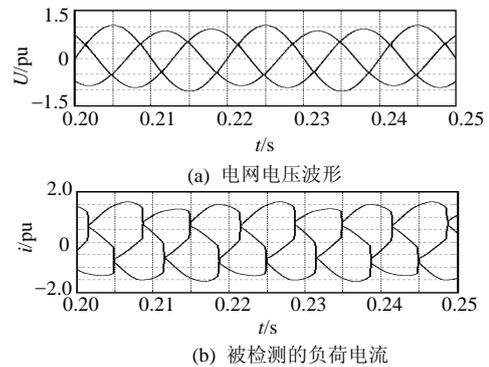


图3 电网电压波形和负荷电流波形

Fig. 3 Main source voltage and load current waveform

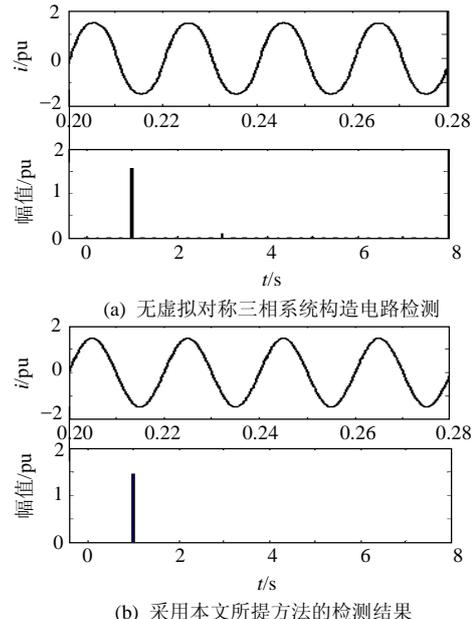


图4 基波正序有功电流检测波形及频谱

Fig. 4 Fundamental load current under different detection method and its spectrum

法和本文提出检测方法检测出的基波正序有功电流波形及其频谱。

从以上仿真波形可以看出，当电网电压不对称时，无虚拟对称三相系统构造电路检测法检测出的基波正序有功电流中仍含有负序和谐波分量，其值要大于采用本文检测方法所得到的基波正序有功电流。这表明当电网电压不对称时，无虚拟对称三相系统构造电路检测法不能精确地检测负荷电流中的谐波、无功和负序电流。而采用本文所提的检测方法，检测效果有明显改善。证明了本文所提检测方法的正确性和有效性。

2.2 在 DSTATCOM 中的应用

根据所提出的谐波、无功和负序电流检测方法，在 Matlab/simulink 环境下搭建了 DSTATCOM 系统仿真模型。仿真模型中 DSTATCOM 系统构成如图 5 所示，DSTATCOM 用来补偿负荷电流中的谐波、无功和负序分量。DSTATCOM 仿真模型中检测控制模块采用的补偿电流检测方法为本文所提出的考虑电网电压不对称的同步参考坐标法，电流控制方法采用滞环电流控制。值得注意的是，为了维持 DSTATCOM 直流侧电容电压的恒定，在图 1 的基础上增加了直流侧电容电压闭环控制环节。图 1 所示的检测电路也应做相应变动，即在瞬时有功电流的直流分量上叠加了一个调节信号，这个调节信号来自直流侧电容电压指令值与反馈值的误差经 PI 调节器后的输出量。

图 6 给出了 DSTATCOM 在电网电压不对称条件下的仿真结果。图 6(a)为电网电压波形，图 6(b)、(c)给出了电源电压不对称情况下 DSTATCOM 投运前后电网电流波形。可见，利用本文所提检测方法对负荷电流进行补偿时，在电网电压不对称条件下能取得不错的补偿效果。

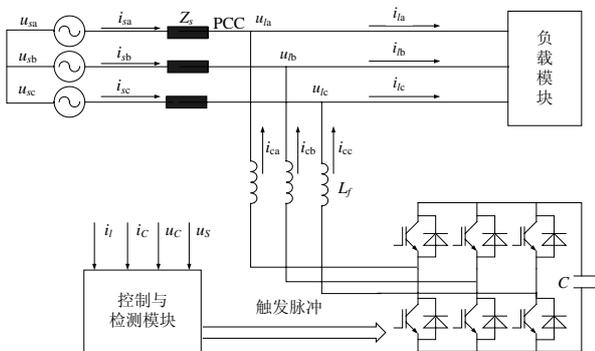


图 5 DSTATCOM 系统构成
Fig. 5 System configuration of DSTATCOM

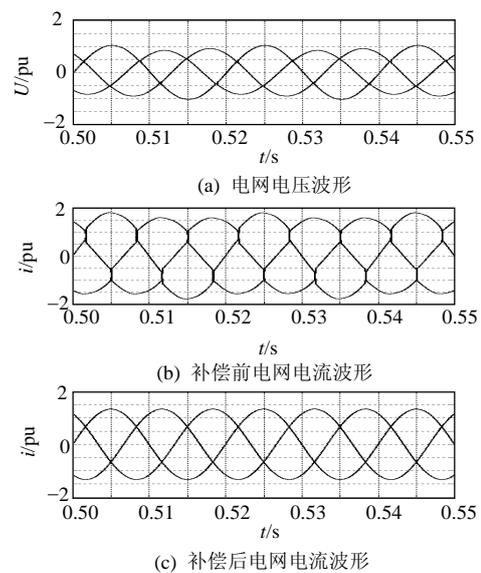


图 6 仿真波形
Fig. 6 Simulation results

3 结论

考虑到实际电网中三相不对称现象普遍存在，本文提出了一种新的补偿电流检测方法，该方法利用单相电网电压构造虚拟的对称三相系统，进而构造匀速旋转的同步旋转坐标系，提高了同步参考坐标法的检测精度。对基于电网电压矢量的同步参考坐标法的补偿原理进行了合理的功率解释。理论分析和仿真结果表明，在电网电压不对称条件下，本文所提出的方法仍能准确检测负荷电流中的谐波、无功和负序分量。当电网电压畸变时，只要在本文所提的方法上做适当修改即可实现谐波、无功和负序电流的综合检测和补偿，为电力系统负荷补偿参考电流检测提供新的途径。

参考文献

- [1] Wang P, Jenkins N, Bollen M H J. Experimental investigation of voltage sag mitigation by an advanced static var compensator[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1998, 13(4): 1461-1467.
- [2] Sensarma P S, Padiyar K R, Ramanarayanan V. Analysis and performance evaluation of a distribution STATCOM for compensating voltage fluctuations[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2001, 16(2): 259-264.
- [3] 袁佳歆, 陈柏超, 万黎, 等. 利用配电网静止无功补偿器改善电网电能质量的方法[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 81-84. Yuan Jiaxin, Chen Baichao, Wan Li, et al. The method to improve power quality of distribution system by distribution static compensator[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 81-84(in Chinese).
- [4] 李旷, 刘进军, 魏标, 等. 静止无功发生器补偿电网电压不平衡的控制及其优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 58-63. Li Kuang, Liu Jinjun, Wei Biao, et al. Control and optimization of

- static var generator for grid voltage unbalance mitigation [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 58-63(in Chinese).
- [5] Lee W C, Lee T K, Hyun D S. A three-phase parallel active power filter operating with PCC voltage compensation with consideration for an unbalanced load[J]. IEEE Tran. on Power Electronics, 2002, 17(5): 807-814.
- [6] 何益宏, 卓放, 周新, 等. 利用瞬时无功功率理论检测谐波电流方法的改进[J]. 电工技术学报, 2003, 18(1): 87-89.
He Yihong, Zhuo Fang, Zhou Xin, et al. A modified method for measuring harmonic current based on instantaneous reactive power theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(1): 87-89(in Chinese).
- [7] Peng F Z, George W Ott, Donald J Adams. Harmonic and reactive power compensation based on the generalized instantaneous reactive power theory for three-phase four-wire systems[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 1998, 13(6): 1174-1181.
- [8] Akagi H, Kanazawa Y, Nabae A. Instantaneous reactive power compensator comprising switching devices without energy storage components[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1984, 20(3): 625-630.
- [9] 马莉, 周景海, 吕征宇, 等. 一种基于 $d-q$ 变换的改进型谐波检测方案的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(10): 55-58.
Ma Li, Zhou Jinghai, Lü Zhengyu, et al. An improved harmonic detecting approach based on d-q rotating coordination transformation [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(10): 55-58(in Chinese).
- [10] Bhattacharya S, Divan D. Synchronous frame based controller implementation for a hybrid series active filter system[C]. 1995 IEEE/IAS Annual Meeting, Orlando, USA, 1995.
- [11] Chen C L, Lin C E, Huang C L. Reactive and harmonic current compensation for unbalanced three-phase system using the synchronous detection method[J]. Electric Power System Research, 1993, 26(3): 163-170.
- [12] Karimi H, Karimi-ghartemani M, Iravani M R, et al. An adaptive filter for synchronous extraction of harmonics and distortions[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2003, 18(4): 1350-1356.
- [13] 汤红诚, 伍建林, 李著信, 等. 一种基于人工神经元的实时谐波及无功电流数字检测方法[J]. 电网技术, 2002, 26(12): 13-17.
Tang Hongcheng, Wu Jianlin, Li Zhuxin, et al. A real-time approach to digital detection of harmonics and reactive currents based on artificial neurons[J]. Power System Technology, 2002, 26(12): 13-17(in Chinese).
- [14] 高大威, 孙孝瑞. 基于自适应线性神经网络三相畸变电流检测新方法实现[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(3): 49-52.
Gao Dawei, Sun Xiaorui. A detecting approach of three-phase distortion currents based on adaptive linear neural network and its being realized[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(3): 49-52(in Chinese).
- [15] Wang Qun, Wu Ning, Wang Zhaoan. A neuron adaptive detecting approach of harmonic current for APF and its realization of analog circuits[J]. IEEE Trans. on Instrumentation Measurement, 2001, 50(1): 77-84.
- [16] Luo S, Hou Z. An adaptive detecting method for harmonic and reactive currents[J]. IEEE. Trans. on Industrial Electronics, 1995, 42(1): 85-89.
- [17] 张桂斌, 豫政, 王广柱. 基于空间矢量的基波正序、负序分量及谐波分量的实时检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 1-5.
Zhang Guibin, Xu Zheng, Wang Guangzhu. Study and simulation of real-time detection method for fundamental positive sequence, negative sequence components and harmonic components based on space vector[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 1-5(in Chinese).
- [18] 孙驰, 魏光辉, 毕增君. 基于同步坐标变换的三相不对称系统的无功与谐波电流的检测[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 43-48.
Sun Chi, Wei Guanghui, Bi Zengjun. Detection for reactive and harmonics currents of unbalanced three-phase systems based on synchronous reference frame transformation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 43-48(in Chinese).
- [19] Cutri R, Matakas L Jr. A new instantaneous method for harmonics, positive and negative sequence detection for compensation of distorted currents with static converters using pulse width modulation [C]. International Conference on Harmonics and Quality of Power, New York, USA, 2005.
- [20] Soares V, Verdelho P, Marques G D. Instantaneous active and reactive current component method for active filters[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2000, 15(4): 660-669.
- [21] 陈东华, 谢少军, 周波. 用于有源电力滤波器谐波和无功电流检测的一种改进同步参考坐标法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 62-67.
Chen Donghua, Xie Shaojun, Zhou Bo. An improved synchronous reference frame method for harmonics and reactive currents detection fo active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 62-67(in Chinese).
- [22] 李红雨, 吴隆辉, 卓放, 等. 一种新型的快速电流检测方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 57-62.
Li Hongyu, Wu Longhui, Zhuo Fang, et al. Study on the novel fast current detection method[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 57-62(in Chinese).



唐杰

收稿日期: 2007-08-14。

作者简介:

唐杰(1975—), 男, 博士, 主要从事电力系统谐波抑制及无功功率补偿方面的研究, tang_jie4952@yahoo.com.cn;

罗安(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电气工程和工程方面的教学与科研工作。

(编辑 王彦骏)