

一种基于 dqo 变换改进的电流检测新方法

顾启民¹, 郑建勇², 尤 鋈²

(1. 常熟理工学院自动化系, 江苏 常熟 215500; 2. 东南大学电气工程系, 江苏 南京 210096)

摘要: 在传统 dqo 变换的基础上, 提出一种改进型电流检测新方法。通过快速合成正序电压作为锁相环的基准参考, 可以正确、实时地检测有功电流、无功电流, 进而求出基波电流、负序电流和谐波电流, 解决了三相电压不对称系统中实时提取基波正序分量求解复杂而困难的问题, 并分析了电流检测动态跟踪情况。仿真研究表明: 该方法灵活、简便, 且具有良好的实时性, 满足无功与谐波电流检测的要求, 且可应用在三相三线制和三相四线制系统中。

关键词: 三相不对称系统; 正序电压; 快速合成; 无功电流; 谐波电流

A new method of current detection based on dqo-coordinate-transformation

GU Qi-min¹, ZHENG Jian-yong², YOU Jun²

(1. Department of Automation, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, China;

2. Department of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: An improved new method of current detection based on traditional dqo-coordinate-transformation is presented, through which the positive sequence voltage, working as reference voltage of PLL, can be rapidly synthesized. On the basis of that, the active currents, reactive currents and harmonic currents can be obtained instantly, thus the complex and difficult problem of extracting the fundamental positive sequence voltage components from a unbalanced three-phase system in real-time can be solved. Then the dynamic track of current detection is analyzed. Simulation results show that the method is flexible, simple, and has a good real-time property. It meets the requirements of detecting reactive and harmonic currents, and can be applied in three-phase three-wire and three-phase four-wire system.

Key words: unbalanced three-phase system; positive sequence voltage; rapid synthesis; reactive current; harmonic currents

中图分类号: TM744 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)23-0021-05

0 引言

在电力系统中, 无功功率和高次谐波的补偿问题已得到了广泛的关注。作为实际补偿装置—有源电力滤波器 (APF) 是综合治理电网谐波、不平衡及无功的有效手段, 而无功与谐波电流检测方法的实时性、准确性及灵活性直接关系到 APF 的补偿效果。目前, 谐波电流的检测方法有很多种, 主要有基于瞬时无功功率理论的检测法^[1-3]、基于 Fryze 功率定义检测法^[4-5]、基于频域分析的 FFT 检测法^[6]、自适应检测法^[7]、小波变换检测法和基于神经网络的检测法等。其中, 基于三相电路瞬时无功功率理论的 p-q、 i_p-i_q 和 dqo 算法在有源电力滤波器中得到了有效的应用, 但都存在一定的局限性。如在电源电压不对称情况下, p-q 算法的检测结果有明显误

差^[8-9]; i_p-i_q 算法能正确检测出谐波电流, 但不能正确检测有功和无功电流^[10]。文献[11]指出了 dqo 算法在电源电压不对称情况下, 由于锁相环的锁相结果受到负序和零序电压分量的影响而与正序电压分量之间存在相位差, 使检测结果产生系统误差, 其解决的方法是将三相电压进行 dqo 变换后再经滤波器滤除不对称分量来获取基波电压的正序分量。该方法在增加了两个滤波器的同时增加了运算的复杂性, 对系统测量会产生延时, 影响检测的实时性。

本文在传统 dqo 算法的基础上, 提出了一种基于正序电压快速合成方法来对 dqo 算法进行改进, 实现正确、实时地检测有功、无功和谐波电流。通过理论和仿真实验证明, 该方法灵活、简便、实时性好, 为 APF 的正确补偿提供了一个更好的途径。

1 电流的检测原理与分析

设在三相系统中, 各相的负载电流分别为 i_{La} 、 i_{Lb} 、 i_{Lc} , 用对称分量法表示成正序、负序和零序的

基金项目: 苏州市科技发展计划资助项目 (SG0839); 江苏省高校自然科学研究计划项目 (07KJD470004)

叠加形式。

$$\begin{aligned}
 i_{La} &= \sum_{n=1}^{\infty} I_n^+ \sin(n\omega t + \varphi_{in+}) + \sum_{n=1}^{\infty} I_n^- \sin(n\omega t + \varphi_{in-}) + \\
 &\quad \sum_{n=1}^{\infty} I_n^0 \sin(n\omega t + \varphi_{in0}) \\
 i_{Lb} &= \sum_{n=1}^{\infty} I_n^+ \sin(n\omega t - 2\pi/3 + \varphi_{in+}) + \\
 &\quad \sum_{n=1}^{\infty} I_n^- \sin(n\omega t + 2\pi/3 + \varphi_{in-}) + \sum_{n=1}^{\infty} I_n^0 \sin(n\omega t + \varphi_{in0}) \\
 i_{Lc} &= \sum_{n=1}^{\infty} I_n^+ \sin(n\omega t + 2\pi/3 + \varphi_{in+}) + \\
 &\quad \sum_{n=1}^{\infty} I_n^- \sin(n\omega t - 2\pi/3 + \varphi_{in-}) + \sum_{n=1}^{\infty} I_n^0 \sin(n\omega t + \varphi_{in0})
 \end{aligned} \quad (1)$$

式中： n 为正整数， I_n^+ 、 I_n^- 、 I_n^0 分别对应负载电流中 n 次谐波的正序、负序和零序分量的幅值； φ_{in+} 、 φ_{in-} 、 φ_{in0} 分别对应负载电流中 n 次谐波的正序、负序和零序分量的初相角。

电流检测的原理是以 a 相电压的瞬时值 u_a 为参考基准，将负载电流从静止的 abc 三相坐标系变换到以电网基波角频率 ω 逆时针方向同步旋转 dqo 坐标系中。变换关系式为：

$$\begin{bmatrix} i_d & i_q & i_o \end{bmatrix}^T = \mathbf{C} \begin{bmatrix} i_{La} & i_{Lb} & i_{Lc} \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

式中， \mathbf{C} 是 abc-dqo 坐标的变换矩阵。

$$\mathbf{C} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\omega t & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ -\sin\omega t & -\sin(\omega t - 2\pi/3) & -\sin(\omega t + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}$$

将式 (1) 代入式 (2) 变换得：

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^{\infty} I_n^+ \cos[(n-1)\omega t + \varphi_{in+}] + \sum_{n=1}^{\infty} I_n^- \cos[(n+1)\omega t + \varphi_{in-}] \\ \sum_{n=1}^{\infty} I_n^+ \sin[(n-1)\omega t + \varphi_{in+}] - \sum_{n=1}^{\infty} I_n^- \sin[(n+1)\omega t + \varphi_{in-}] \\ \sum_{n=1}^{\infty} I_n^0 \sin(n\omega t + \varphi_{in0}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

从上式中可以看出，第 n 次正序分量变换成 dqo 坐标系下的第 $n-1$ 次分量；第 n 次负序分量变换成 dqo 坐标系下的第 $n+1$ 次分量；由于三相负载电流中只有 $n=1$ 的基波正序分量转换成 d 轴、q 轴上成为 2 个直流分量，而在 o 轴上的基波正序分量为 0。三相电流的零序分量在 d 轴、q 轴上的分量都为零，即零序分量对 i_d 、 i_q 没有影响。因此，只需将 i_d 、 i_q 通过低通滤波器 (LPF) 把交流成分滤去，提取出直流分量，得：

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_d \\ \bar{i}_q \\ \bar{i}_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} I_1^+ \cos\varphi_{i+} \\ I_1^+ \sin\varphi_{i+} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

根据有功功率定义，基波正序电流矢量 I_1^+ 在基波正序电压 U_1^+ 上的投影为基波正序有功电流 I_{1p}^+ ，而在 U_1^+ 的法线上的投影为基波正序无功电流 I_{1q}^+ ，所以有 $\bar{i}_d = I_{1p}^+$ 对应于基波正序有功分量、 $\bar{i}_q = I_{1q}^+$ 对应于基波正序无功分量。这个结论是在三相电压对称无畸变情况下得出的。此时的电压和电流在 dqo 坐标系的矢量关系如图 1 (a) 所示。

当电网电压存在畸变时，由于 dqo 的变换矩阵中只取 $\sin\omega t$ 和 $\cos\omega t$ 参与运算，畸变电压的谐波成份在运算过程中不出现，因而上述结论仍然成立。

当电网电压不对称时，电压中将包含负序分量和零序分量，锁相环的锁相结果是与电压 u_a 的正序、负序、零序之和同相，而与正序电压 U_1^+ 之间存在相位差 φ_{u1+} ，他们的矢量关系如图 1 (b) 所示。从图 1 (b) 中可看出：此时的基波正序电压 U_1^+ 与 dqo 坐标系中的 d 轴不再重合，所以， \bar{i}_d 、 \bar{i}_q 已不再对应于基波正序的有功和无功电流分量，虽然对基波正序电流分量的求解没有影响^[12]，但不能正确求解出基波正序的有功和无功电流。从上述分析可以看出，准确求解基波正序有功和无功电流的关键是如何消除基波正序电压 U_1^+ 和 d 轴之间的相位差 φ_{u1+} ，使 U_1^+ 和 d 轴重合。如果能将基波正序电压直接从电网电压中合成出来，使锁相环能够直接跟踪基波正序电压，也就消除了电网电压与基波正序电压的相位差 φ_{u1+} ，从而可以实现准确求解基波正序的有功和无功电流。

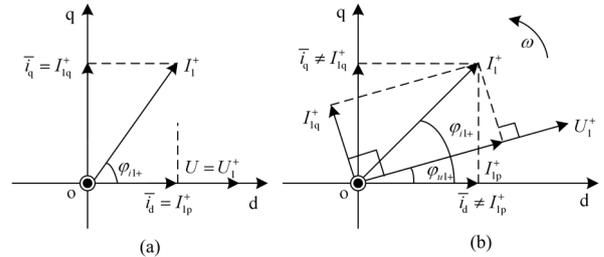


图 1 电压和电流在 dqo 坐标系的矢量关系

Fig.1 Vectorial relations of the voltages and currents in the dqo coordinate system

2 正序电压快速合成原理

在三相电压不对称情况下，有对称分量法可知，任意三相的相电压 u_a 、 u_b 、 u_c 可表示为：

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_a^+ \\ \dot{U}_a^- \\ \dot{U}_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, $a = e^{j120^\circ}$ 、 $a^2 = e^{j240^\circ}$ 。通过逆变换得:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a^+ \\ \dot{U}_a^- \\ \dot{U}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

从上式可知, a 相正序电压为:

$$\dot{U}_a^+ = (\dot{U}_a + a^2\dot{U}_b + a\dot{U}_c)/3 \quad (7)$$

从式 (7) 中可以看出: 正序电压求取只与三相电网电压 \dot{U}_a 、 \dot{U}_b 、 \dot{U}_c 有关, 而与负序、零序无关。如按式 (7) 直接合成正序电压, \dot{U}_b 需要移相 $+240^\circ$ 角、 \dot{U}_c 移相 $+120^\circ$ 角, 合成后的 \dot{U}_a^+ 将至少要延迟 $2/3$ 的电网电压周期, 这样会对电流的实时检测带来较大延迟的影响。为此, 对式 (7) 作进一步改造:

$$a^2\dot{U}_b = \dot{U}_b e^{j240^\circ} = -\dot{U}_b e^{j60^\circ} \quad (8)$$

$$a\dot{U}_c = \dot{U}_c e^{j120^\circ} = -\dot{U}_c + \dot{U}_c e^{j60^\circ} \quad (9)$$

则:

$$\begin{aligned} U_a^+ &= (\dot{U}_a + a^2\dot{U}_b + a\dot{U}_c)/3 = \\ &(\dot{U}_a - \dot{U}_b e^{j60^\circ} - \dot{U}_c + \dot{U}_c e^{j60^\circ})/3 \end{aligned} \quad (10)$$

由式 (8)、(9) 可以看出: $a^2\dot{U}_b$ 可以由 \dot{U}_b 移相 $+60^\circ$ 角后取负值得到; $a\dot{U}_c$ 可以由 \dot{U}_c 取负值和 \dot{U}_c 移相 $+60^\circ$ 角后相加得到; 由此, 式 (10) 中各相电压最大移相为 60° , 即用式 (10) 来合成的 \dot{U}_a^+ 的延时仅为 $1/6$ 的电网电压周期。当用 DSP 实现数字移相时, 通常可通过电压传感器或变换器来获得三相电压 \dot{U}_a 、 \dot{U}_b 、 \dot{U}_c , 经 A/D 转换后存放于数据存储单元中, 存储器的存储空间只需 $1/6$ 周期的数据存放量就可以满足要求, 占用的 DSP 资源也较小。

3 谐波和无功电流检测的实现

基于正序电压合成的无功与谐波电流检测电路原理如图 2 所示。

从图 2 中可以看出, 锁相环跟踪的是经三相合成后的正序电压 \dot{U}_a^+ , 从而消除了三相不对称电压中的因负序和零序电压的影响所产生的相位差 φ_{a1+} 。所以, 有 $\bar{i}_d = I_{1p}^+$ 对应于基波正序有功电流分量、 $\bar{i}_q = I_{1q}^+$ 对应于基波正序无功电流分量。设在三相三线制系统中, 由于无零序通路, 也就没有零序

电流。当对 \bar{i}_d 和 \bar{i}_q 同时进行 dqo 反变换时, 得到的结果是负载电流的基波正序电流分量, 将负载电流减去基波正序电流分量可得到负序电流与谐波电流的和; 当单独对 \bar{i}_d 分量进行 dqo 反变换时, 得到的结果是负载电流的有功电流分量, 将负载电流减去有功电流分量可得到基波无功、负序与谐波电流之和; 当单独对 \bar{i}_q 分量进行反变换时, 得到的结果是负载电流的无功电流分量。因此, 图 2 所示的电流检测原理灵活多样, 同时, 由于经 dqo 变换得到的 \bar{i}_d 和 \bar{i}_q 中不含有零序分量, 所以, 该方法不加修改就可以应用于三相四线制系统中。

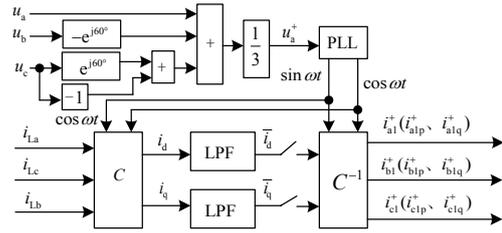


图 2 谐波和无功电流检测原理图

Fig.2 Fundamental diagram of harmonic and reactive currents detection

4 仿真对比与分析

为了验证本文所提出的检测方法, 在下列条件下采用 Matlab 进行仿真。设系统由三相不对称电源与 6 脉冲相控晶闸管整流负载组成的三相三线制形式。其中, 三相不对称电源电压的正序分量有效值为 220 V (a 相的初相位为 0°) 和负序分量的有效值为 20 V (a 相初相位为 45°) 组成; 相控晶闸管整流延迟触发角为 6° , 负载电阻为 $5\ \Omega$ 、滤波电感为 10 mH 。

图 3 为三相不对称电源电压波形, 实线为 a 相、虚线为 b 相、点划线为 c 相, 以下类同, 由于负序电压的作用, 使得三相电压产生严重不平衡, 并有相移, 如图中 a 相电压的初相角明显不为 0 。

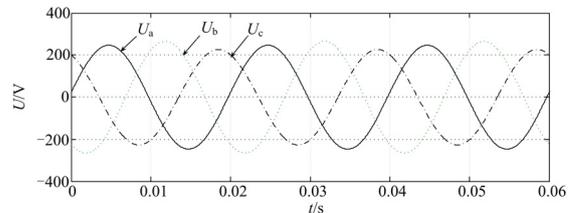


图 3 三相不对称电源电压波形

Fig.3 Three-phase asymmetrical power supply voltage waveform

图 4 为采用图 2 所示的三相正序电压快速合成

法得到的 a 相正序电压 u_{a+} 波形, 从图中可以看出延迟 60° 角后正序电压 u_{a+} 合成、合成后的初相位为 0° 。

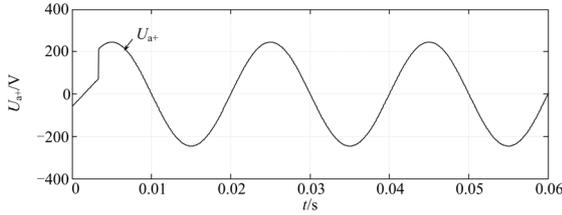


图 4 三相合成的正序电压波形

Fig.4 Three-phase synthesis of positive sequence voltage waveform

图 5 为三相负载电流 $i_{L(a,b,c)}$ 波形, 严重畸变且不对称, 并在 0.5 s 时负载电流增加一倍, 以便考察电流检测的动态响应。

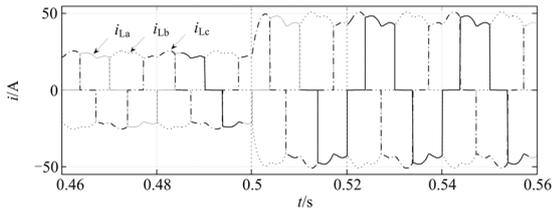


图 5 三相负载电流波形

Fig.5 Three-phase load current waveform

图 6 为三相基波正序电流 $i_{(a,b,c)f+}$ 的波形, 从图中可看出, 约经过半个周期后就能跟踪上负载电流的变化。

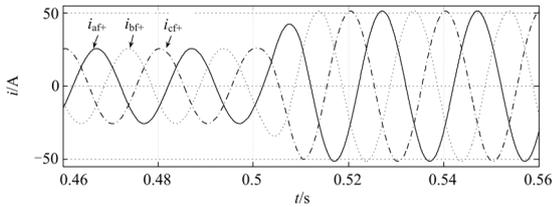


图 6 三相基波正序电流波形

Fig.6 Three-phase fundamental positive sequence current waveform

图 7 为三相基波正序有功电流波形。其中, 图 7 (a) 是锁相环直接以电网 a 相电压为参考的三相电流基波正序有功电流 $i_{(a,b,c)p}$ 波形, 图 7 (b) 是锁相环以电网 a 相基波正序电压 u_{a+} 为参考的三相电流基波正序有功电流 $i'_{(a,b,c)p}$ 波形, 比较两图可以看出: 除了相位不同外, 其幅值也不相同, 所以由相位差 $\varphi_{u_{a+}}$ 造成的误差是不能忽略的。

图 8 为三相基波正序无功电流波形。其中, 图 8 (a) 是锁相环直接以电网 a 相电压为参考的三相

电流基波正序无功电流 $i_{(a,b,c)q}$ 波形, 图 8 (b) 是锁相环以电网 a 相基波正序电压 u_{a+} 为参考的三相电流基波正序无功电流 $i'_{(a,b,c)q}$ 波形, 分析结论与图 7 的分析结果一致。

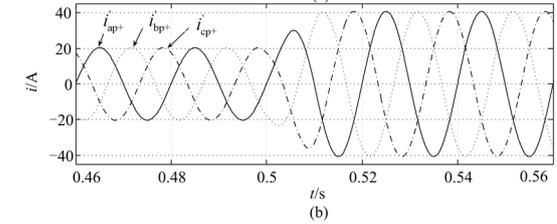
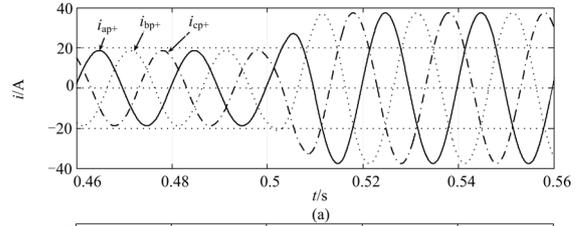


图 7 三相基波有功电流波形

Fig.7 Three-phase fundamental active current waveform

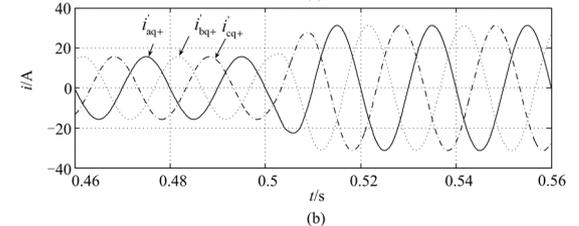
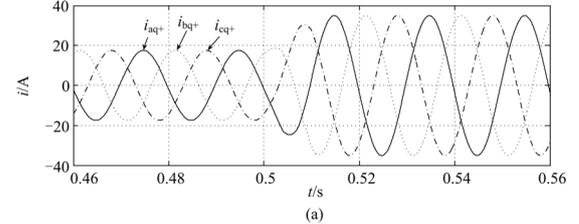


图 8 三相基波无功电流波形

Fig.8 Three-phase reactive current waveform

图 9 是锁相环以电网 a 相基波正序电压为参考的谐波电流波形, 其中图 9 (a) 为负载电流减去基波正序电流后得到的谐波电流 i_{ah} 波形, 图 9 (b) 为负载电流减去基波正序有功电流后得到的谐波与无功电流之和 I'_{ah} 波形。

5 结论

提出了一种基于 dqo 变换改进的电流检测新方法。通过快速合成正序电压作为锁相环的基准参考, 可以正确测量有功电流、无功电流, 进而求出基波电流、负序电流和谐波电流。解决了三相电压不对称系统中实时提取基波正序分量求解复杂而困难的问题, 并分析了电流检测动态跟踪情况。

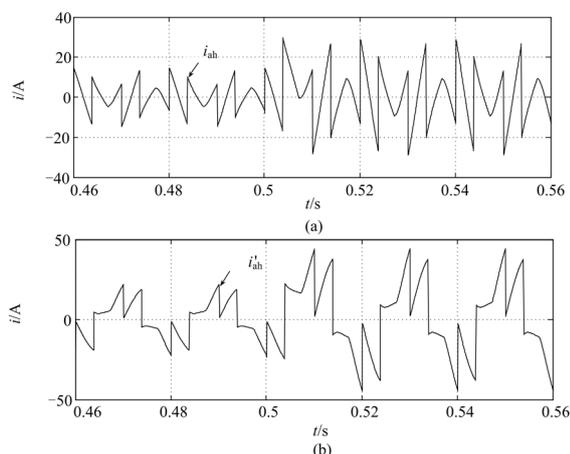


图9 谐波电流波形

Fig.9 Waveform of harmonic currents

该方法原理简单, 物理意义清晰。仿真结果表明, 该方法灵活、简便, 且具有良好的实时性, 满足无功与谐波电流检测的要求, 且可应用在三相三线制和三相四线制系统中, 其有很强的实用性和普遍性。

参考文献

- [1] Akagi H, Kanazawa Y, Nabae A. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits [C]. //Proc JIEE IPEC. Tokyo: 1983.
- [2] 王兆安, 李民, 卓放. 三相电路瞬时无功功率理论的三研究[J]. 电工技术学报, 1992 (3): 55-59.
WANG Zhao-an, LI Min, ZHUO Fang. A study on the theory of instantaneous reactive power of three-phase circuits[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1992 (3): 55-59.
- [3] 李庚银, 陈志业, 丁巧林, 等. d-q 坐标系下广义无功功率定义及其补偿[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16 (3): 176-179.
LI Geng-yin, CHEN Zhi-ye, DING Qiao-lin, et al. Definition of generalized instantaneous reactive power in d-q coordinates and its compensation [J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16 (3): 176-179.
- [4] Pitor Filipski. The measurement of distortion current and distortion power[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1984, 33 (1) : 36-40.
- [5] Pitor Filipski. A new approach to reactive current and reactive power measurement in nonsinusoidal systems[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1980, 29 (4): 423-426.
- [6] 庞浩, 李东霞, 俎云霄, 等. 应用 FFT 进行电力系统谐波分析的改进算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 50-54.
PANG Hao, LI Dong-xia, ZU Yun-xiao, et al. An improved algorithm for harmonic analysis of power system using FFT technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (6): 50-54.
- [7] LUO Shi-guo. An adaptive detecting method for harmonic and reactive current[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1995, 42 (1): 85-89.
- [8] EI-Habrouk M, Darwish M K, Mehta P. Active power filters: a review [J]. IEE Proc-Electr Power Appl, 2000, 147 (5): 403-413.
- [9] 李建奇, 罗安, 汤赐, 等. 一种新型负序基波电流检测方法及其应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (15): 71-74.
LI Jian-qi, LUO An, TANG Ci, et al. A novel detecting method for negative sequence fundamental current and its applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (15): 71-74.
- [10] 马大铭, 朱东起, 高景德. 三相电压不对称时谐波和无功电流的准确检测[J]. 清华大学学报, 1997, 37 (4): 7-10.
MA Da-ming, ZHU Dong-qi, GAO Jing-de. Accurate detection for harmonics and reactive currents in the case of unsymmetrical three-phase voltages[J]. Journal of Tsinghua University, 1997, 37 (4): 7-10.
- [11] 袁川, 杨洪耕. 三相电压畸变且不对称时电流基波正序有功分量的改进瞬时检测方法研究[J]. 继电器, 2005, 33(14): 57-59.
YUAN Chuan, YANG Hong-geng. An advanced instantaneous detection method for fundamental positive-sequence active current under unsymmetrical and distorted three-phase system voltage[J]. Relay, 2005, 33 (14): 57-59.
- [12] 韩松, 邱国跃, 彭小俊. 相位差 θ 对谐波及无功电流检测的影响分析[J]. 电测与仪表, 2005(4): 1-3.
HAN Song, QIU Guo-yue, PENG Xiao-jun. The analysis for the test of harmonic and Reactive by the phase difference θ [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2005 (4): 1-3.

收稿日期: 2010-06-01; 修回日期: 2010-08-26

作者简介:

顾启民(1957-), 男, 副教授, 本科, 研究方向为现代测试技术与电力电子技术应用; E-mail: gqm@cslg.cn

郑建勇(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子与电力传动;

尤 鋈(1975-), 男, 讲师, 博士研究生, 研究方向为电力电子。