

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2012.05.011

基于瞬时无功理论的并联型有源滤波器恒功率控制

赵 焕, 王艺颖

(江苏科技大学 电子信息学院, 江苏 镇江 212018)

摘 要: 针对有源滤波器谐波电流检测的复杂性以及响应延迟, 根据瞬时无功理论, 提出了并联型有源滤波器恒功率控制策略。该控制策略通过实现逆变器有功功率和无功功率的解耦, 分离出待补偿的功率分量, 采用空间矢量调制算法, 实现系统的恒功率控制。通过 Matlab/Simulink 进行仿真验证, 结果显示该策略可以有效抑制系统交流侧谐波电流, 补偿无功功率, 输出稳定的有功功率, 改善系统稳态性能, 证明了该策略的正确性和有效性。

关键词: 瞬时无功理论; 并联型有源滤波器; 恒功率控制

中图分类号: TN713

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2012)05-0046-05

Constant Power Control For Shunt Active Filter Based on Instantaneous Reactive Power Theory

Zhao Huan, Wang Yiyang

(School of Electronics & Information, Jiangsu University of Science & Technology, Zhenjiang Jiangsu 212018, China)

Abstract: In view of complexity and response delay of shunt active filter harmonic current detection, constant power control for shunt active filter is introduced based on instantaneous power theory. Through the inverter active power and reactive power decoupling, separates the compensated power component and applies the space vector modulation algorithm to realize system constant power control. The Matlab/Simulink simulation shows that the strategy is effective on inhibiting AC harmonic current, compensating reactive power, outputting stable active power as well as improving the system steady-state performance, which verifying the control correctness and validity.

Keywords: instantaneous power theory; shunt active power filter; constant power control

0 引言

近年来, 随着非线性负载的大量使用, 电力系统中的谐波污染日益严重, 该问题会产生电力设备过热, 电压波形畸变、闪变, 干扰通信等一系列问题。因此, 消除电网中的谐波污染是提高电能质量中的一个重要课题。有源电力滤波器 (active power

filter, APF) 作为抑制电网谐波污染、无功补偿、改善电能质量的电力电子设备受到越来越广泛的研究和关注^[1-2]。

并联有源滤波器的概念首先由 Gyugyi 和 Stryula 于 1976 年提出。该装置设置在非线性负载附近, 通过实时地确定补偿电流的参考值, 并通过变流器准确地合成出来, 从而补偿负载的谐波电流。因而其

收稿日期: 2012-08-15

基金项目: 江苏省高校优势学科建设工程基金资助项目

作者简介: 赵 焕 (1981-), 男, 河南开封人, 江苏科技大学讲师, 硕士, 主要从事电力电子与电力传动的研究,

E-mails: zhaohuan131@yahoo.com.cn

不仅可以补偿特定谐波电流,还可以对负载谐波分量的任意组合进行补偿,从而实现了补偿的选择性和适应性。另外,它还可以在电网中阻尼谐波,用来避免由并联电容和串联电感中间产生的谐波震荡而产生的谐波扩散^[3-4]。

有源电力滤波器的控制算法决定了该装置的补偿特性,而其理论基础便是瞬时无功理论。该理论具有物理意义明确,适用范围广,计算简便以及检测延迟时间短等优点。传统有源滤波器控制设计中,多采用 $p-q$ 法或 i_p-i_q 法检测谐波分量来实现补偿^[5-7]。但是以上两种方法在电压、电流不对称或者含有谐波分量时,检测结果存在误差。为了使控制方式适用于一般情况,本文从功率角度重新设计控制器,与传统控制策略相比,省去了坐标反变换,减少了中间环节,提高了系统响应速度,具有良好的控制效果。通过仿真实验,证明上述策略的正确性和有效性。

1 基于瞬时无功理论的 APF 工作机制

1.1 瞬时无功理论

瞬时无功理论最早由 Hirofumi Akagi 于 1982 年提出,后经过逐步完善,现已成为电力调节领域内的基本理论之一。

在三相静止坐标系 (a,b,c) 中,三相瞬时电压和电流为 v_a, v_b, v_c 和 i_a, i_b, i_c , 经过 Clarke 变换和 Park 变换,得到两相静止坐标系 (α, β) 和两相旋转坐标系 (d, q) 下的对应分量 v_α, v_β, v_0 和 i_α, i_β, i_0 以及 v_d, v_q 和 i_d, i_q 。其中 v_0, i_0 为零序分量,如果零序分量可以忽略,根据电压和电流的 α 轴分量和 β 轴分量,可以定义一个瞬时电压矢量和瞬时电流矢量,如式 (1) 所示。

$$\mathbf{e} = v_\alpha + jv_\beta, \mathbf{i} = i_\alpha + ji_\beta, \quad (1)$$

其中 j 为虚数单位,且 $j = \sqrt{-1}$ 。

定义瞬时复功率为电压矢量和电流矢量共轭的乘积,即:

$$s = \mathbf{e} \cdot \mathbf{i}^* = (v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) + j(v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta). \quad (2)$$

定义有功功率 P 和无功功率 Q 为

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}. \quad (3)$$

在 (d, q) 坐标系下 P, Q 表示为

$$P = u_d i_d + u_q i_q, Q = u_q i_d - u_d i_q. \quad (4)$$

因为电网电压矢量 \mathbf{e} 初始位置与 d 轴重合,所以 $u_q = 0$, 则将式 (2) 化为

$$P = u_d i_d, Q = -u_d i_q, \quad (5)$$

式中: P 的物理意义表示单位时间内的总瞬时能量流; Q 的物理意义表示系统各项之间正在交换的能量大小。

1.2 三相 APF 主电路结构及工作原理

并联有源滤波器的基本结构如图 1 所示,补偿对象为非线性负载,并联有源滤波器主电路采用电压源型 PWM 逆变器。其中 e_a, e_b, e_c 表示三相电网电压, i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} 表示三相电网电流, i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc} 表示三相负载电流, i_{Ca}, i_{Cb}, i_{Cc} 表示 APF 产生的补偿电流, C 表示直流稳压电容, L 表示交流滤波电感,用来抑制较高的 di/dt 。同时, APF 交流侧并联有 C 和 R 组成一个小型无源滤波器,用于滤除开关频率附近的电流纹波。非线性负载工作时从电网中汲取电流 i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc} , 其中包括大量的谐波成分,通过有源滤波器的补偿,将谐波限制在负载端,同时也达到了避免谐波扩散的作用。

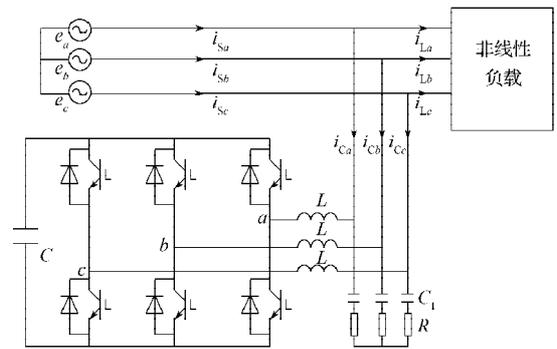


图1 三相有源滤波器拓扑结构

Fig. 1 The topological structure for three phase active power filter

传统的有源滤波器控制策略中,多通过检查主电路谐波电流的方式对负载进行补偿,主要归纳为 $p-q$ 法和 i_p-i_q 法。

根据瞬时无功理论,电流矢量 \mathbf{i} 在 α 轴和 β 轴上的电流可以表达为有功功率和无功功率的函数,如式 (6) 所示。

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} + \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha p} \\ i_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

式中: $i_{\alpha p}$ 为 α 轴上的瞬时有功电流;

$i_{\alpha q}$ 为 α 轴上的瞬时无功电流;

$i_{\beta p}$ 为 β 轴上的瞬时有功电流;

$i_{\beta q}$ 为 β 轴上的瞬时无功电流。

$p-q$ 谐波电流检测法通过式 (4) 计算出 P, Q , 再

经低通滤波器 (low power filter, LPF) 得到 P, Q 的恒定分量 \bar{P} 和 \bar{Q} 。由于在电网电压平衡时, \bar{P} 为基波有功电流与电压作用产生, \bar{Q} 为基波无功电流与电压作用产生, 故通过式 (6) 以及 Clarke 反变换, 便可以检测出电流 i_a, i_b, i_c 的基波分量 i_{af}, i_{bf}, i_{cf} , 将 i_a, i_b, i_c 与 i_{af}, i_{bf}, i_{cf} 相减便得到谐波分量 i_{ah}, i_{bh}, i_{ch} 。

i_p-i_q 法中不经过 P, Q 的计算而通过利用电网电压的同步信号, 直接生成 i_p, i_q , 再经过 LPF 得到其直流分量, 然后通过坐标反变换且与原信号相减, 得到补偿电流指令信号。

以上两种方法在电网电压对称和无畸变状态下的补偿效果是一致的, 且在算法复杂程度和延迟效果方面接近。但在电网电压不对称或畸变时, 电压和电流均包括正序、负序和零序分量或谐波分量。当只考虑电压电流不对称时, 三相瞬时电压、电流表示为

$$\begin{cases} v_a = \sqrt{2}V_+ \sin(\omega t + \phi_{v+}) + \sqrt{2}V_- \sin(\omega t + \phi_{v-}), \\ v_b = \sqrt{2}V_+ \sin(\omega t - 2\pi/3 + \phi_{v+}) + \sqrt{2}V_- \sin(\omega t + 2\pi/3 + \phi_{v-}), \\ v_c = \sqrt{2}V_+ \sin(\omega t + 2\pi/3 + \phi_{v+}) + \sqrt{2}V_- \sin(\omega t - 2\pi/3 + \phi_{v-}); \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} i_a = \sqrt{2}I_+ \sin(\omega t + \phi_{i+}) + \sqrt{2}I_- \sin(\omega t + \phi_{i-}), \\ i_b = \sqrt{2}I_+ \sin(\omega t - 2\pi/3 + \phi_{i+}) + \sqrt{2}I_- \sin(\omega t + 2\pi/3 + \phi_{i-}), \\ i_c = \sqrt{2}I_+ \sin(\omega t + 2\pi/3 + \phi_{i+}) + \sqrt{2}I_- \sin(\omega t - 2\pi/3 + \phi_{i-}). \end{cases} \quad (8)$$

按照式 (3) 得到此时的有功功率和无功功率为

$$\begin{cases} \bar{P} = 3V_+ I_+ \cos(\phi_{v+} - \phi_{i+}) + 3V_- I_- \cos(\phi_{v-} - \phi_{i-}), \\ \bar{Q} = 3V_+ I_+ \sin(\phi_{v+} - \phi_{i+}) - 3V_- I_- \sin(\phi_{v-} - \phi_{i-}), \\ \tilde{P} = -3V_+ I_+ \cos(2\omega t + \phi_{v+} + \phi_{i-}) - 3V_- I_- \cos(2\omega t + \phi_{v-} + \phi_{i+}), \\ \tilde{Q} = -3V_+ I_- \sin(2\omega t + \phi_{v+} + \phi_{i-}) + 3V_- I_+ \sin(2\omega t + \phi_{v-} + \phi_{i+}). \end{cases} \quad (9)$$

其中, $\bar{P}, \bar{Q}, \tilde{P}, \tilde{Q}$ 表示对应功率的恒定分量和震荡分量。

式 (9) 表明, 电压和电流中的正序分量和负序分量对功率的恒定值均有贡献; 震荡分量是由正序电压和负序电流以及负序电压和正序电流的乘积产生的。此时按照 $p-q$ 法, 由式 (6) 可知, 参与计算的和均中包含负序分量成分, 使得计算结果不能满足电流为正弦的要求。而按照 i_p-i_q 法, 按照式 (6) 进行计算, 得到补偿电流为正弦波, 但是由式 (9) 可知, 补偿掉了负序分量所产生的恒定功率。进一步的分析表明, 当电压不对称或畸变时, $p-q$ 法和 i_p-i_q 法均不能保证同时满足电网向负载提供恒定的有功功率和电网电流不包含谐波电流两个条件^[8]。因此本文提出有源滤波器恒功率控制, 以实现电网向负

载提供恒定有功功率的目的。

2 三相有源滤波器恒功率控制策略

按照瞬时无功理论, 计算出的负载三相瞬时有功功率和三相瞬时无功功率都可以分解成恒定部分和震荡部分, 即

$$P = \bar{P} + \tilde{P}, \quad Q = \bar{Q} + \tilde{Q}. \quad (10)$$

通过具体的补偿目的, 便可以选择功率中不需要的部分。从能量角度看, 包括电网电压不对称或畸变的情况, 最理想的补偿效果是使有源滤波器吸收的有功功率为负载的有功功率震荡部分 $-\tilde{P}$, 同时还应该吸收负载产生的无功功率 $-Q$ 。这时负载从电网汲取一个恒定的有功功率且不吸收无功功率。电网电流等于负载产生恒定有功功率的电流, 并且达到了传递同样能量条件下其有效值的最小值, 同时还补偿了负载产生的谐波, 因此, 采用以下方法构造控制器。

经过坐标变换, 三相 PWM 逆变器在 (d, q) 坐标系下的数学模型为^[9-10]:

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = e_d + \omega Li_q - v_{dc} S_d, \\ L \frac{di_q}{dt} = e_q - \omega Li_d - v_{dc} S_q. \end{cases} \quad (11)$$

$$\frac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q) = v_{dc} i_{dc} S_k. \quad (12)$$

式中: e_d, e_q 为电网电压矢量;

i_d, i_q 为电网电流矢量;

S_d, S_q 为开关函数在 d 轴和 q 上的对应分量。

根据式 (5), 将上式变形为

$$\begin{cases} L \frac{dP}{dt} = e_d^2 - \omega L Q - v_{dc} S_d e_d, \\ L \frac{dQ}{dt} = e_q (-e_d) + \omega L P - v_{dc} S_q (-e_d). \end{cases} \quad (13)$$

从上式看出, P, Q 是互相耦合的, 因此采用前馈解耦的控制策略实现 P, Q 的解耦控制。 $v_{dc} S_d e_d$ 和 $v_{dc} S_q (-e_d)$ 的控制方程构建如下:

$$\begin{cases} v_{dc} S_d e_d = -\left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}\right)(P^* - P) - \omega L Q + e_d^2, \\ v_{dc} S_q (-e_d) = -\left(K_{iq} + \frac{K_{il}}{s}\right)(Q^* - Q) + \omega L P + e_q (-e_d). \end{cases} \quad (14)$$

通过以上算法实现了 P, Q 的解耦, 既控制了有功功率和无功功率, 又能根据补偿目的, 使有源滤波器的有功功率和无功功率按照预期变化。

图 2 是三相有源滤波器恒功率控制原理框图。

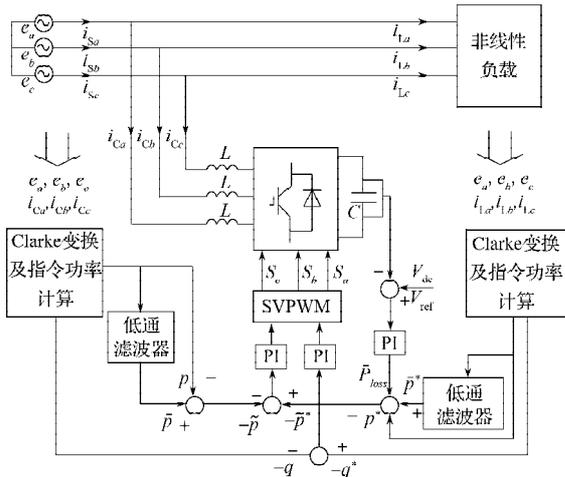


图2 三相有源滤波器恒功率控制原理框图

Fig. 2 Block diagram of three-phase APF constant power control

由图2所示, 根据瞬时无功理论, 通过 e_a, e_b, e_c 和 i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc} 实时计算负载的有功功率 P 和无功功率 Q , 并通过低通滤波器将功率的恒定部分和震荡部分分离出来作为功率控制指令信号。另外, 需从电网中吸收一个小的有功功率 \bar{P}_{loss} , 将其施加到 P^* , 用来补偿逆变器的开关损耗和阻性损耗, 从而保持直流电容器的电压稳定。然后与利用同样方法计算出的逆变器实际功率信号 $-\tilde{p}$ 和 $-Q$ 比较, 在此增加负号是为了与图1中电流的方向相一致。最后经过PI调节器产生实际控制信号, 利用SVPWM算法最终控制开关管的动作。

与传统电流检测法相比, 本方法从功率控制角度入手, 省去了坐标反变换环节, 简化了控制系统结构, 减少了中间系统响应延迟, 提高了抗干扰能力。同时也有效地抑制了系统谐波, 保证单位功率因数运行。

3 系统仿真与结果分析

根据以上算法, 利用Matlab/Simulink建立有源滤波器恒功率控制的系统模型, 并与传统电流检测方法进行比较研究。其中仿真参数如下: 负载采用晶闸管三相全桥电路, 其触发延迟角为 30° ; 整流桥负载电阻 $5\ \Omega$; 电网电压有效值 $220\ \text{V}$; 频率 $50\ \text{Hz}$; 电感 $0.1\ \text{mH}$; 电感内阻 $0.5\ \Omega$; 逆变器直流电压 $600\ \text{V}$; 开关频率 $10\ \text{kHz}$; 低通滤波器截止频率 $50\ \text{Hz}$ 。所得仿真结果如图3~5所示。

从图3中的电流波形可以看出, 有源滤波器恒功率控制能够有效补偿负载电流, 经补偿后, 抑制住电路谐波电流, 提高功率因数, 使系统电流接近正弦波。

从图4的波形可以看出有源滤波器恒功率控制能够有效补偿负载电流, 系统电流接近正弦波。补偿前, 负载电流谐波含量较高, 且主要谐波频率为 $5, 7, 11, 13, 17$ 等; 补偿后, 主电路谐波电流谐波含量较低, 且谐波次数减少。

由图5的波形显示, 系统有功功率震荡分量被消除, 只输出恒定有功功率, 无功功率接近完全消除, 系统功率因数接近1。

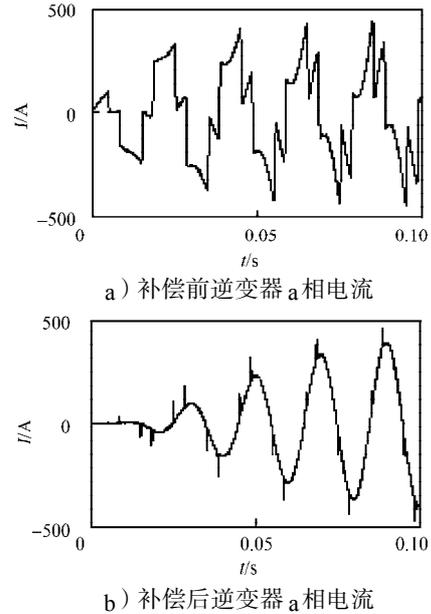


图3 补偿前后逆变器a相电流

Fig. 3 a phase current of inverter before and after compensation

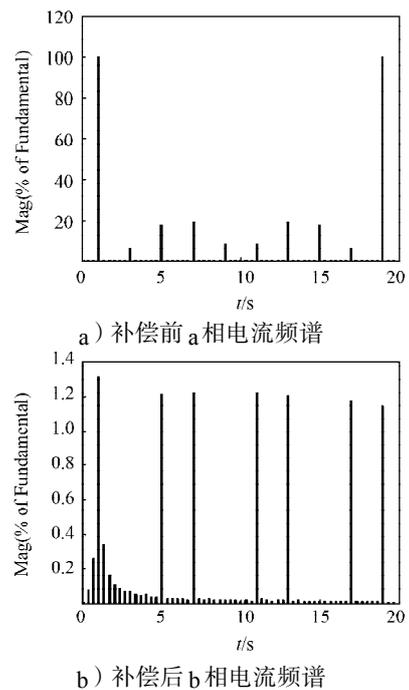


图4 补偿前后电流 i_{Ca} 频谱分析

Fig. 4 Current i_{Ca} FFT analysis before and after compensation

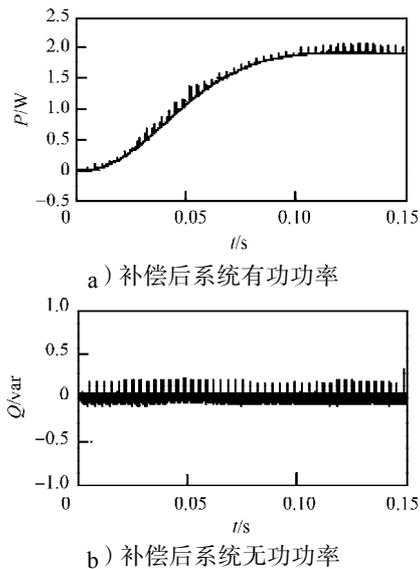


图5 有功功率和无功功率波形

Fig. 5 Waveforms of active power and reactive power

4 结语

本文提出了有源滤波器恒功率控制，从功率角度分析了有源滤波器系统工作原理，该策略控制对象明确，能够有效抑制系统谐波，提高系统功率因数。与传统控制相比，省去坐标反变换，简化了控制结构，提高了系统响应速度。仿真结果验证了该方法的有效性和正确性。

参考文献:

- [1] 王兆安, 杨君, 刘进军, 等. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2006: 4-6.
Wang Zhaoan, Yang Jun, Liu Jinjun, et al. Harmonic Suppression and Reactive Power Compensation[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2006: 4-6.
- [2] 顾建军, 徐殿国, 刘汉奎, 等. 有源滤波技术现状及其发展[J]. 电机与控制学报, 2003, 7(2): 126-132.
Gu Jianjun, Xu Dianguo, Liu Hankui, et al. Active Power Filter Technology and Its Development[J]. Electric Machines and Control, 2003, 7(2): 126-132.
- [3] Gyugyi L, Strycula E C. Active AC Power Filters[C]//In Proceedings of IEEE Industry Applications Annual Meeting. Chicago: [s.n.], 1976: 529-535.
- [4] Akagi H, Fujita H, Wada K. A Shunt Active Filter Based on Voltage Detection for Harmonic Termination of a Radial Power Distribution Line[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(3): 638-645.
- [5] 李圣清, 朱英浩, 周有庆, 等. 电网谐波检测方法的综述[J]. 高电压技术, 2004, 30(3): 39-42.
Li Shengqing, Zhu Yinhao, Zhou Youqing, et al. The Overview of Detecting Methods for Harmonic in Power System [J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(3): 39-42.
- [6] 何英杰, 邹云屏, 黄柱, 等. 基于瞬时无功功率理论的改进谐波检测算法[J]. 电网技术, 2007, 31(6): 79-83.
He Yingjie, Zou Yunping, Huang Zhu, et al. An Improved Algorithm for Harmonic Current Detection Based on Instantaneous Reactive Power Theory[J]. Power System Technology, 2007, 31(6): 79-83.
- [7] 王立峰, 郑建勇, 梅军, 等. 基于瞬时无功功率理论谐波电流并行检测算法研究[J]. 华东电力, 2011, 39(6): 890-894.
Wang Lifeng, Zheng Jianyong, Mei Jun, et al. Harmonic Current Parallel-Measurement Algorithm Based on Instantaneous Reactive Power Theory[J]. East China Electric Power, 2011, 39(6): 890-894.
- [8] Aredes M, Hafner J, Heumann K. Three-Phase Four-Wire Shunt Active Filter Control Strategies[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, 12(2): 311-318.
- [9] Malinowski M, Kazmierkowski M P, Trzynadlowski A M. A Comparative Study of Control Techniques for PWM Rectifiers in AC Adjustable Speed Drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(6): 1390-1396.
- [10] Wang Jiuhe, Yin Hongren, Zhang Jinlong, et al. Study on Power Decoupling Control of Three Phase Voltage Source PWM Rectifiers[C]//Conference Proceedings of CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference (Volume1). Shanghai: Conference Publication. 2006: 1-5.

(责任编辑: 申剑)