

三相三线制有源滤波器的改进无差拍控制

史丽萍, 蔡儒军, 陈丽兵, 王攀攀

(中国矿业大学信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 针对平推预测无差拍控制存在稳态误差的问题, 提出了一种改进的有源电力滤波器控制策略。该方法将重复控制器嵌入基于平推预测的无差拍控制, 结合重复控制和无差拍控制优势, 弥补无差拍控制的固有缺陷, 快速消除每一采样周期的稳态误差。根据有源电力滤波器的数学模型, 得到应用于电流环的无差拍控制算法, 给出了重复无差拍控制电流环各个子环节的设计过程。基于 Matlab 仿真环境和物理实验平台对所提控制策略进行分析, 验证了所提方法的有效性和优越性。

关键词: 有源电力滤波器; 重复控制; 无差拍控制; 稳态误差; 动态响应

A deadbeat control scheme for three-phase three-wire active power filter

SHI Li-ping, CAI Ru-jun, CHEN Li-bing, WANG Pan-pan

(School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: The flat-push prediction deadbeat control is of steady-state error. In order to avoid this defect, an improved control strategy based on active power filter is proposed. Compared with traditional deadbeat control, this method embeds the repetitive controller into flat-push prediction deadbeat control, combines with advantages of repetitive control and deadbeat control, and avoids the inherent deficiencies of deadbeat control. At the same time, it fast eliminates the steady-state error of each sampling period. Based on the active power filter mathematical model, the deadbeat control algorithm applied in current loop is deduced, and the design of repetitive deadbeat control for each sub-loop of current loop is given. The results of simulation and experiments based on Matlab demonstrate the effectiveness and superiority of the proposed method.

Key words: active power filter; repetitive control; deadbeat control; steady-state error; dynamic response

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)14-0032-06

0 引言

随着电力电子技术的飞速发展, 大量的电力电子装置被广泛应用于各类工业现场, 这些电力电子装置的运行使得电网电压和电流发生非线性畸变, 由其引起的谐波污染和电力危害已经超过传统的谐波源^[1-2]。与传统的无源滤波装置相比, 有源电力滤波器 (APF) 作为一种可针对于电力系统的谐波和无功快速进行动态补偿的电力电子装置得到人们广泛的关注和研究^[3-4]。目前, APF 电流环主要的控制策略主要有三角波比较控制^[5]、滞环控制^[6]、PI 控制^[7]和重复控制^[8-9]等。随着微处理技术的不断发展, 基于数字控制、跟踪效果好的无差拍控制策略也成为这个控制领域一个研究的热点。

减少或消除采样周期的延迟和对指令电流做出

高精度的预测是无差拍控制实现最优效果的前提。文献[10]提出了将上一个基波周期相应时刻的指令电流采样值来近似为当前周期预测电流下一拍的输出值, 该方法在系统处于稳态的时候可以实现较高的输出精度, 但在突变负载的工况下, 系统电流波形存在较大的畸变。文献[11]对 PWM 整流器运行在四象限工况下的某一开关周期的电流进行分析, 并提出取该开关周期的中间时刻的电流值来消除误差, 但是取样的时延带来的误差问题依然没有解决。本文针对于三相三线制 APF 提出了一种基于重复控制器的改进无差拍控制策略, 该控制策略利用重复控制器来消除平推预测带来的周期性误差, 以此得到较高的控制精度。

1 并联型有源电力滤波器的数学模型

图 1 为三相并联型 APF 的电路模型, e_a 、 e_b 、 e_c 分别为三相系统电压, i_a 、 i_b 、 i_c 为 APF 控制发出

的补偿电流, 假定变流器三相输出支路的电感和电阻值均对称, 其值分别为 R 和 L , C 为主回路直流侧电容, u_a 、 u_b 、 u_c 分别为变流器网侧输出的三相电压, 负载为带不可控整流器的非线性负载。APF 经过分离出负载电流中的谐波和无功分量作为指令电流信号, 控制变流器输出补偿电流 i_a 、 i_b 、 i_c 来抵消系统电流的谐波和无功成分, 使得系统电流波形趋于正弦, 且系统电流与电网电压基本同相位, 这就是并联 APF 的基本原理。

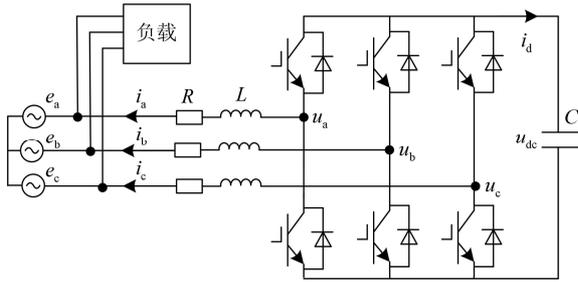


图 1 三相并联 APF 电路模型

Fig. 1 Circuit model of three-phase shunt APF

为便于控制器的设计与分析^[12], 实现解耦控制, 由图 1 得到 APF 在 $\alpha\beta$ 坐标系的数学模型如式 (1) 所示。

$$\begin{cases} u_\alpha = L \frac{di_\alpha}{dt} + i_\alpha R + e_\alpha \\ u_\beta = L \frac{di_\beta}{dt} + i_\beta R + e_\beta \end{cases} \quad (1)$$

2 基于重复控制器的无差拍控制复合策略

2.1 重复控制器基本原理

重复控制器可以看成是由多个谐振频率为基波频率整数倍的谐振控制器并联而成, 由内模原理可知, 如果在 APF 反馈控制系统的环路中嵌入一个重复控制器, 那么这个系统理论上就能够实现对 APF 包含多个频率分量的指令电流信号实现无静差跟踪, 即使反馈系统的输入误差为零, 它依然能够继续保持这个效果。

根据以上的分析, 在离散域下, 可将重复控制器设计为

$$G_{RE}(z) = \frac{1}{1 - z^{-N}} \quad (2)$$

式(2)中, N 为控制系统每周期的采样次数, $N = T/T_s$, T 为重复控制器重复输出的周期, 这里取为基波周期, T_s 为采样周期, 取 10^{-4} s。最后可得 N 为 200, 即在一个基波周期里采样 200 个点。

2.2 无差拍控制策略

无差拍控制实质上是一种针对于离散采样系统而提出的预测控制算法, 其控制精度主要由 $k+1$ 时刻的预测补偿电流值的精度所决定的。目前, 比较常见的电流预测方案有平推预测、重复预测、二阶外推差值预测及由以上预测方案相结合的预测方法^[4]。本文的预测方案选取平推预测, 即使得 $i_\alpha(k+1) = i_\alpha^*(k)$, $i_\beta(k+1) = i_\beta^*(k)$, 由此得到式 (3)。

$$\begin{cases} u_\alpha(k) = \frac{L}{T_s} [i_\alpha^*(k) - i_\alpha(k)] + Ri_\alpha(k) + e_\alpha(k) \\ u_\beta(k) = \frac{L}{T_s} [i_\beta^*(k) - i_\beta(k)] + Ri_\beta(k) + e_\beta(k) \end{cases} \quad (3)$$

将 α 轴的数学模型以系统框图的形式画出, 如图 2 所示, 其中, $G_p(z)$ 为被控对象的传递函数 (为便于分析, 假定 SVPWM 环节增益为 1, 不计其延时时间)。

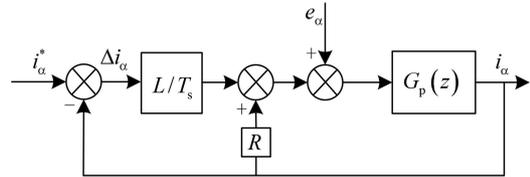

 图 2 α 轴无差拍控制框图

 Fig. 2 Block diagram of deadbeat control of α shaft

由图 2 不难看出, 仅仅使用平推预测的无差拍控制方案在事实上已变成差一拍控制, 这对跟随性和控制精度要求较高的 APF 控制系统来讲是很不利的。因此, 需对这种控制方案进行改进。

2.3 基于重复控制器的无差拍控制策略及设计

为了进一步提高补偿性能, 本文在无差拍控制的电流环中嵌入重复控制器, 其 α 轴下的控制原理框图如图 3 所示。下面对 APF 控制系统电流环各个部分进行分析设计。

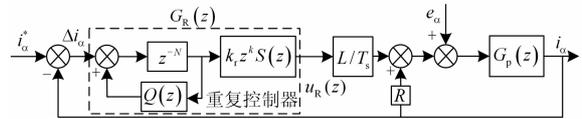

 图 3 α 轴下基于重复控制器的无差拍控制框图

 Fig. 3 Block diagram of deadbeat control based on repetitive controller under α shaft

由于 $G_{RE}(z)$ 的极点都处于 z 域以零为原点的单位圆上, 处于临界稳定状态, 很容易受到外界的干扰而进入不稳定区域。 $Q(z)$ 的设置使得重复控制环节变成了“准积分”环节, 牺牲跟踪精度换来的是使系统更趋于稳定, 综合考虑稳定性和跟踪精度的

要求,可按 3%的误差选取 $Q(z)$,即使得 $Q(z)=0.97$ 。

$S(z)$ 可选择低通滤波器来实现,对于 APF 来说,一般要求它能够对 25 及以下次谐波进行补偿,为此低通滤波器的截止频率可选为 $f_c=1.5$ kHz,折中考虑各类滤波器的精度和动态响应能力,这里选取二阶巴特沃斯低通滤波器,采样频率为 10 kHz。由此得到 $S(z)$ 的脉冲传函数为

$$S(z) = \frac{0.1311z^2 + 0.2622z + 0.1311}{z^2 - 0.7478z + 0.2722} \quad (4)$$

由 $S(z)$ 脉冲传函可以得到其组延迟特性曲线如图 4 所示。由该图可以看出在 0~1.5 kHz 频率范围内, $S(z)$ 会带来近 2 个采样周期的延迟,加上无差拍控制本身延迟的 1 个采样周期,总延时约为 3 个采样周期,因此超前补偿环节 k 可取为 3。

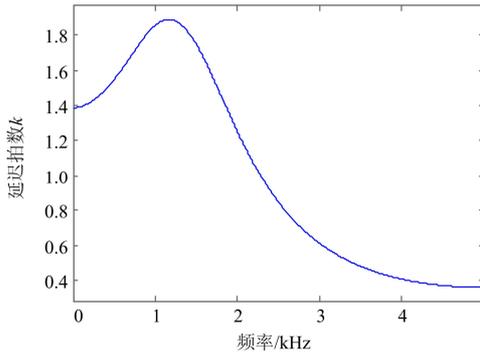


图 4 $S(z)$ 组延迟特性曲线

Fig. 4 $S(z)$ group delay characteristic curves

由式 1 可得被控对象的传递函数为

$$G_p(s) = \frac{1}{LS + R} \quad (5)$$

代入主电路的参数 $L=2.5$ mH, $R=0.2$ Ω , 采样周期 $T_s=10^{-4}$ s, 经加零阶保持器的 z 变换法离散化后得到

$$G_p(z) = \frac{0.03984}{z - 0.992} \quad (6)$$

由图 3 可以得到系统嵌入的重复控制器传递函数为

$$G_R(z) = \frac{u_R(z)}{\Delta i_\alpha(z)} = \frac{k_r z^{k-N} S(z)}{1 - Q(z) z^{-N}} \quad (7)$$

经推导得到误差与指令电流的关系为

$$\Delta i_\alpha(z) = \frac{z^N - Q(z)}{z^N - [Q(z) - k_r z^k LS(z) G_p(z) / T_s]} i_\alpha^*(z) \quad (8)$$

由式(8)得系统的特征方程为

$$z^N - [Q(z) - k_r z^k LS(z) G_p(z) / T_s] = 0 \quad (9)$$

可令

$$H(z) = Q(z) - k_r z^k LS(z) G_p(z) / T_s \quad (10)$$

由控制理论可知,如果保证式(10)特征根的模值小于 1,即满足

$$|H(z)| = |z^N| = |Q(z) - k_r z^k LS(z) G_p(z) / T_s| < 1 \quad (11)$$

那么系统便是稳定的。 k_r 的值应在权衡系统整体稳定性和动态响应速度间折中选取,本文中 k_r 取值 0.9^[2]。

3 系统仿真分析

为了验证本文所提出的改进无差拍控制策略的有效性,基于 Matlab 平台搭建三相三线制 APF 仿真模块进行分析。主要仿真参数为:电网电压峰值为 380 V;谐波源为三相不可控整流器带阻感负载,其中 $R_D=10$ Ω , $L_D=3$ mH;主电路直流侧电容 $C=4\ 000$ μ F,直流侧给定电压 $u_{dc}=850$ V;输出支路的电感值 $L=2.5$ mH,等效电阻 $R=0.3$ Ω ;为观察 APF 动态响应能力,在 0.4 s 处突加电阻负载,其阻值为 12 Ω 。

图 5~图 7 分别为加载前后负载电流波形和频谱图、APF 电流跟踪控制采用平推无差拍控制及采用重复无差拍控制得出的仿真结果。由仿真结果可知:加载前后负载电流的畸变率分别为 27.14% 和 25.98%,负载电流包含的 $6k \pm 1$ 次特征次数谐波明显,这是由所带不可控整流桥负载造成的;在经平推差拍控制补偿后网侧电流波形虽得到很大的改善,但是加载前后其畸变率仍然分别达到了 8.47% 和 9.04%,超过国家标准值 5%的限定要求,且补偿电流不能很好地跟踪指令电流;经重复无差拍控制补偿后电流波形已近似为正弦波,加载前后网侧电

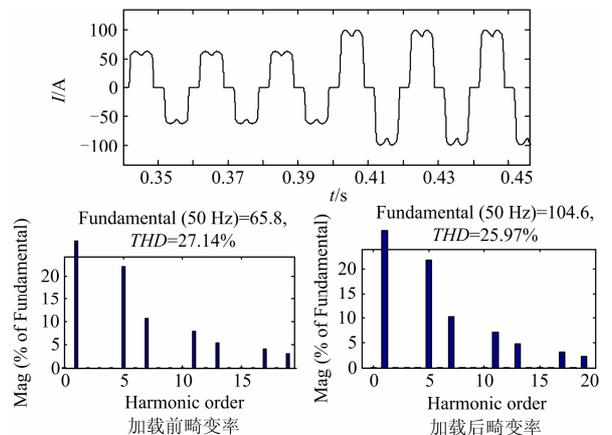


图 5 负载电流波形及频谱图

Fig. 5 Load current waveform and frequency spectrum

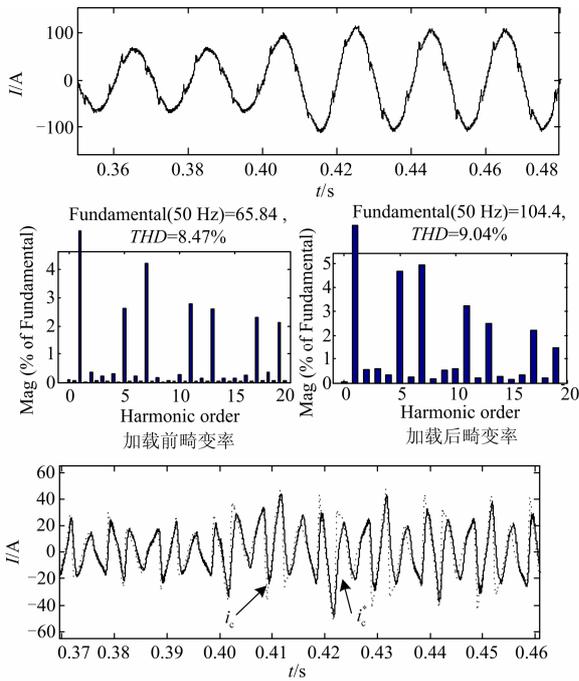


图 6 平推无差拍控制仿真结果

Fig. 6 Emulated waveform with deadbeat control based on plat-push prediction

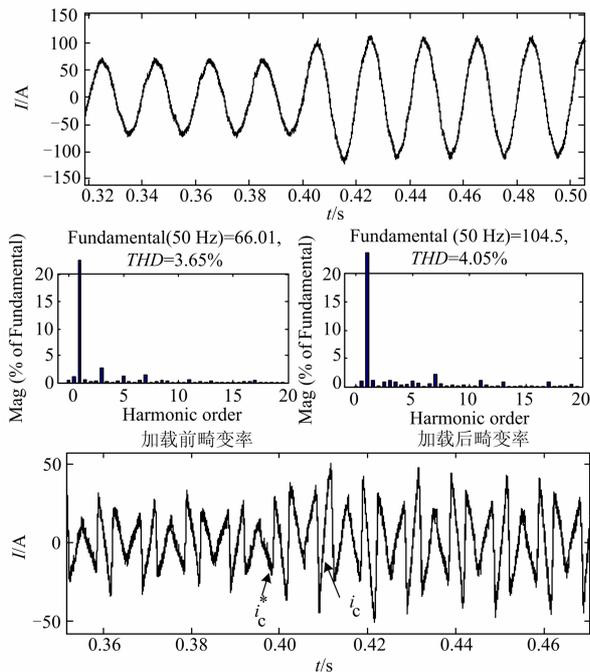


图 7 重复无差拍控制仿真结果

Fig. 7 Emulated waveform with deadbeat control based on repetitive controller

流的畸变率分别降为 3.65%和 4.05%, 且自然换相处的“突起”基本得到抑制, 说明所设计的重复无差拍控制器有足够的电流环带宽来跟踪指令电流。

在突加负载动态过程中, 网侧电流波形在一个基波周期内便能达到稳定, 且补偿电流波形始终与指令电流波形重合。由此验证所提控制策略对变负载工况有很好的动态适应能力, 且其动态响应速度快, 跟踪补偿效果良好。

4 实验验证

为了更进一步验证所提出改进无差拍控制算法的正确有效性, 在三相三线制 APF 实验平台对基于重复控制器的无差拍控制策略进行实验研究。实验平台的主电路开关器件为英飞凌 IGBT, 控制单元的核心为 TMS320F28335, 以三相不可控整流桥带阻感负载作为谐波源, 在系统进入稳态后加载, 实验参数与仿真参数基本一致。

图 8~图 11 为实验波形图, 可以看出: 在 APF 投入补偿前, 网侧电流存在较大的畸变率, 其值为 22.59%, 网侧电流与电网电压波形存在相位差; 经 APF 补偿以后, 网侧电流波形已近似为正弦, 其畸变率为 3.73%, 网侧电流与电压基本同相位, 无功功率得到较好的补偿; 在对 APF 进行加载后, 网侧电流畸变率为 3.94%, 直流侧电压仅在加载时刻波动以后便重新回到给定值 850 V 处, 补偿电流在一个基波周期内便能跟踪上指令电流的变化, 由此可见, 本文所提控制策略能适应突变负载的影响。

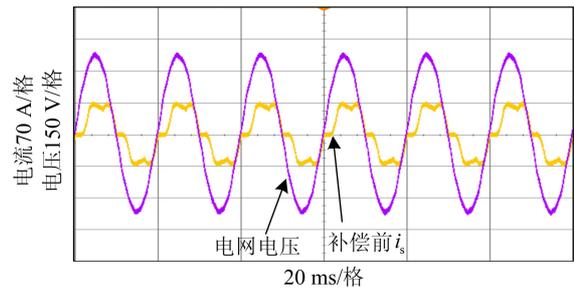


图 8 补偿前电网电压与电流波形图

Fig. 8 Voltage and current waveforms before compensation

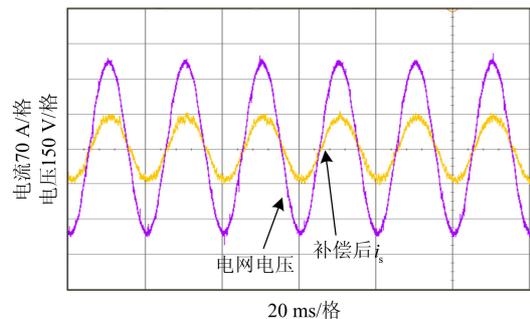


图 9 补偿后电网电压与电流波形图

Fig. 9 Voltage and current waveforms after compensation

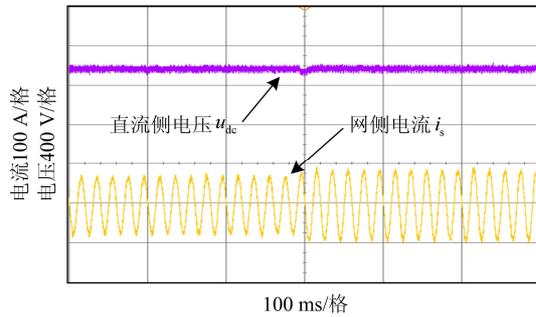


图 10 加载前后网侧电流和直流侧电压波形图

Fig. 10 Current and DC voltage waveforms before and after loading

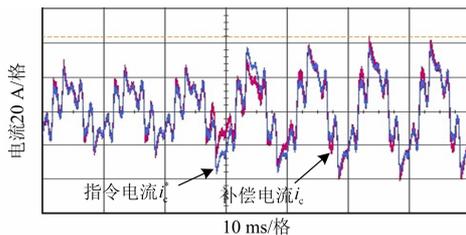


图 11 加载前后补偿电流与指令电流波形图

Fig. 11 Compensation current and command current waveform before and after loading

5 结论

为克服平推预测无差拍控制稳态精度低, 重复控制动态响应慢、鲁棒性差的缺点, 针对三相三线制 APF 提出一种基于重复控制器的无差拍控制策略, 该方法采用基于平推预测的无差拍电流控制, 结合重复控制器来消除稳态误差。仿真及实验结果表明, APF 能有效地进行谐波抑制和无功补偿, 且其稳态误差小, 动态响应速度快, 性能良好, 由此证实了所提出控制策略及设计方法是有效可行的。

参考文献

- [1] 张晓, 孔令军, 孙华, 等. 三相三线制并联型有源电力滤波器的准滑模变结构控制[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(21): 40-44.
- ZHANG Xiao, KONG Ling-jun, SUN Hua, et al. The quasi-sliding mode control of the shunt active power filter in three-phase three-wire system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(21): 40-44.
- [2] 乔鸣忠, 夏益辉, 梁京辉, 等. 基于重复-PI 的复合控制应用于并联有源滤波器研究[J]. 电力系统保护与控制

制, 2013, 41(14): 54-59.

- QIAO Ming-zhong, XIA Yi-hui, LIANG Jing-hui, et al. Research on PI control based compound controller applying to shunt active filter[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 54-59.
- [3] 刘飞, 宫金武, 彭光强, 等. 一种复合式重复控制在并联型有源电力滤波器设计中的应用[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 138-145.
- LIU Fei, GONG Jin-wu, PENG Guang-qiang, et al. Application of compound repetitive control in shunt active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 138-145.
- [4] 周娟, 秦静, 王子绩, 等. 内置重复控制器无差拍控制在有源滤波器中的应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 233-238.
- ZHOU Juan, QIN Jing, WANG Zi-ji, et al. Application of deadbeat control with plug-in repetitive controller in active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 233-238.
- [5] 侯睿, 郭伟峰, 武健, 等. 基于多采样率定时比较技术的并联有源滤波[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 123-128.
- HOU Rui, GUO Wei-feng, WU Jian, et al. Shunt active filter based on multirate sampled timer comparison technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 123-128.
- [6] 乐健, 姜齐荣, 韩英铎. 基于统一数学模型的三相四线有源电力滤波器的电流滞环控制策略分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 85-91.
- LE Jian, JIANG Qi-rong, HAN Ying-duo. The analysis of hysteresis current control strategy of three-phase four-wire APF based on the unified mathematic model[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 85-91.
- [7] 杨秋霞, 高金玲, 赵晔, 等. 有源电力滤波器的特定次谐波控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 119-123.

- YANG Qiu-xia, GAO Jin-ling, ZHAO Ye, et al. Research on specific harmonic control strategy for active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 119-123.
- [8] 武健, 何娜, 徐殿国. 重复控制在并联有源滤波器中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(18): 66-71.
- WU Jian, HE Na, XU Dian-guo. Application of repetitive control technique in shunt active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(18): 66-71.
- [9] 耿攀, 戴珂, 魏学良. 三相并联型有源电力滤波器电流重复控制[J]. 电工技术学报, 2007, 22(2): 127-131.
- GENG Pan, DAI Ke, WEI Xue-liang. The repetitive control algorithm based current waveform correction for shunt active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(2): 127-131.
- [10] 韩郁, 詹长江, 赵炳良, 等. 三电平并联型电能质量调节器的控制技术研究[J]. 清华大学学报, 2000, 40(3): 40-43.
- HAN Yu, ZHAN Chang-jiang, ZHAO Bing-liang, et al. Control of tri-level shunt power quality conditioners[J]. Journal of Tsinghua University, 2000, 40(3): 40-43.
- [11] 李春龙, 沈颂华, 卢家林, 等. 基于状态观测器的 PWM 整流器电流环无差拍控制技术[J]. 电工技术学报, 2006, 21(12): 84-89.
- LI Chun-long, SHEN Song-hua, LU Jia-lin, et al. Deadbeat control for current loop of PWM rectifier based on state-observer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(12): 84-89.
- [12] CHEN Yun, ZHA Xiao-ming. A novel active power filter topology based on coordinate transformation[C] // 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2009: 197-200.

收稿日期: 2013-10-08; 修回日期: 2013-11-22

作者简介:

史丽萍 (1964-), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电能质量分析与控制、设备与电网运行及故障诊断;

蔡儒军 (1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用; E-mail: crjab@163.com

陈丽兵 (1979-), 男, 博士研究生, 研究方向为大功率电力电子变流技术及无功补偿。