

三相四线有源电力滤波器的三闭环控制策略

郑丹, 廖敏, 刘振权, 李云祥, 沈志达, 杨继深

(中国航天科工集团第二研究院 706 所, 北京 100854)

摘要:为解决三桥臂电容中点式三相四线有源电力滤波器存在的上下桥臂直流侧电压不平衡的问题和启动过程中直流侧电压超调的问题,提出一种三闭环控制策略。通过分析直流侧电压对控制系统的影响,纹波产生的原因,提出直流侧电压的控制指标。在分析直流侧电压与能量交换的关系的基础上,提出一种直流侧电压均压控制方法。针对直流侧总电压在启动过程中的超调问题给出解决方案,给出一种软启方案控制超调,并在大负载和小负载两种情况提出不同控制方案。最后通过实验数据,对这些控制方案进行了验证。

关键词:电力有源滤波器;三相四线;直流侧电压控制;直流侧均压

Three closed loops control strategy of three-phase four-wire active power filter

ZHENG Dan, LIAO Min, LIU Zhen-quan, LI Yun-xiang, SHEN Zhi-da, YANG Ji-shen

(Second Academy of China Aerospace Science and Industry Corporation, Beijing 100854, China)

Abstract: To deal with DC voltage unbalance on two arms and the total DC voltage overshoot during startup, three closed loops control strategy of three-phase four-wire active power filter (APF) is shown. The influence of DC voltage on the APF and the origin of DC voltage ripple is analyzed. Besides the DC voltage control targets are presented. Based on the relationship of DC voltage and energy exchange, a method of DC voltage balance on two arms is proposed. A solution is given about the total DC voltage overshoot during startup. As the difference under heavy load and light load, control strategies are selected respectively. At last, experiment is done to verify the principle above.

Key words: active power filter (APF); three-phase four-wire; DC voltage control; DC voltage balance control

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)22-0095-05

0 引言

近年来,电力电子装置等非线性负载的使用日益广泛,谐波和无功电流对电力系统的危害日趋严重,对电能质量治理的必要性已逐渐提上日程。电力有源滤波器(APF)是理想的能动态抑制谐波和补偿无功的电力电子装置,比较其他无源治理方式有明显优势。在低压配电系统中,三相四线制是最主要的供电方式,在工业现场和民用建筑中得到广泛应用。三相四线有源滤波器,主要拓扑结构^[1-6]有三桥臂电容中点式和四桥臂式。文献[1-6]对这两种拓扑结构做分析,在同等补偿效果情况下,四桥臂结构直流侧电压较低,不存在直流电容平衡问题,控制简单。但四桥臂 APF 需要一对额外的桥臂,成本和体积不如三桥臂中点引出式 APF 具有优势。

目前对于直流侧电压控制的研究集中于直流侧总电压的控制^[7-10]。而对于三相四线系统,必须要

对直流侧上下桥臂做均压控制,这方面的研究较少。文献[11]提出了零序电流控制法,只给出了设计方法,并无理论分析和推导。对于直流侧总电压的控制主要是控制有功电流的流向,电压环作为外环,电流环作为内环,把电压环的输出叠加到电流环给定来实现控制。但对于实际应用中,电压环的反馈量是瞬时值还是平均值,控制周期是开关周期还是工频周期都没有给出详细分析和比较,而实际工程中这又是比较关键的部分。另外电流环和电压环耦合紧密,一旦电压环出现误差,必然影响电流环精度,电流环不受控又会影响电压环控制效果,形成正反馈导致系统瘫痪。

本文通过分析直流侧电压对控制系统的影响,直流侧电压纹波产生的原因,提出直流侧电压的控制指标。在分析直流侧电压与能量交换的关系的基础上,提出一种直流侧电压均压控制方法。针对直流侧总电压在启动过程中的超调问题给出解决方

案, 并在大负载和小负载两种情况提出不同控制方法。最后通过实验, 对这些控制方案进行了验证。

1 直流侧电压的控制要求

以一台三桥臂电容中点式三相四线 APF 作为对象, 其原理接线如图 1 所示。

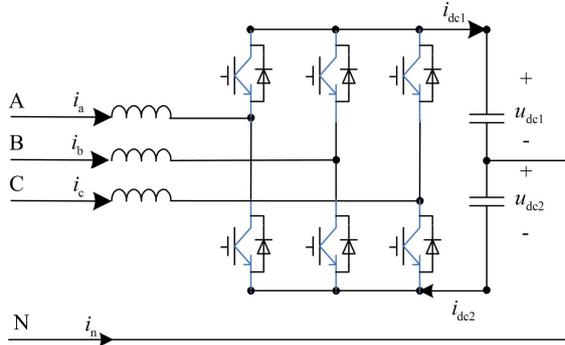


图 1 三相四线 APF 的拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of three-phase four-wire APF

图 1 中各项参数如下: 额定电压 380 V, 额定电流 100 A, IGBT 为 1 200 V/400 A, 直流侧电容 450 V/10 000 μF 2 串 2 并联, 输出电抗器 300 μH /100 A。定义直流侧总电压 $u_{dc}=u_{dc1}+u_{dc2}$, 上下桥臂直流侧电压差 $\Delta u_{dc}=u_{dc1}-u_{dc2}$, u_{dc} 上的直流分量为 U_{dc} , u_{dc} 上的交流分量幅值为 U_{dch} 。APF 直流侧储存能量为 $W=\frac{1}{2}CU_{dc}^2$ 。假设交流侧电压为理想电压, 即只存在基波正序分量。持续的有功电流会在交流侧和直流侧之间持续交换能量, 所以会使直流侧总电压上的直流分量 U_{dc} 发生变化; 而无功和谐波不会产生有功功率, 所以即使是持续的无功和谐波电流, 也只能引起直流侧总电压上的交流纹波, 不会影响直流侧总电压的平均值。

电容的耐压决定直流侧电压必须小于 900 V, 同时 IGBT 通断时由于母排上的杂散电感会在 IGBT 上叠加一个尖峰电压, 此尖峰电压与直流母排的工艺和 IGBT 的吸收电路有关, 一般为 $1.2 U_{dc} \sim 1.4 U_{dc}$, 由此得出控制条件:

$$U_{dc} < 857 \text{ V} \quad (1)$$

为保证直流侧对交流侧的控制能力, 直流侧电压需要大于交流侧电压的最大值, 理论上 U_{dc} 越大, APF 的控制能力越强。由此得出控制条件:

$$U_{dc} > 220 \times 1.414 \times 2 = 622 \text{ V} \quad (2)$$

同时由于 APF 需要发出谐波和无功电流, 会有瞬时的能量吞吐, 从而要求直流侧总电压平均值稳定的情况下瞬时值需要有一定的波动。纹波大小主要取决于 APF 的输出电流和直流侧电容的容量。文献[12]根据交直流侧能量交换推导了直流侧电压的

周期性波动规律。直流侧电压和直流侧电流关系如式 (3) 所示。

$$u_{dc} = \frac{1}{C} \int i_{dc} dt = \frac{1}{C} \int \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (3)$$

由于电压对电流的积分关系, 同样电流幅值情况, 频率低的频段影响大, 考虑极端情况, APF 输出 100 A 无功电流, 简化 $i_{dc} = 100\sqrt{2}\cos(100\pi t)$, 得到:

$$U_{dch} = 45 \text{ V} \quad (4)$$

直流侧电容的差异以及零序电流的波动会引起直流侧电压的不平衡, 从而导致电流环误差, 以及直流侧电容过压等一系列严重问题。要求直流侧电压平衡, 由此得出控制条件:

$$\Delta u_{dc} = 0 \quad (5)$$

综合式 (1)、式 (2)、式 (4)、式 (5) 得出 APF 直流侧控制的要求: $U_{dc}=800$; $\Delta u_{dc}=0$; 平均值稳定无超调。

2 直流侧电压平衡控制算法

在图 1 中, 根据基尔霍夫电流定律可得:

$$i_a + i_b + i_c - i_n = 0 \quad (6)$$

$$i_{dc1} - i_{dc2} - i_n = 0 \quad (7)$$

在理想情况下, $i_a+i_b+i_c=0$, 推出 $i_n=0$, $i_{dc1}=i_{dc2}$ 。假设 $C1=C2$, 得出 $u_{dc1}=u_{dc2}$, $\Delta u_{dc}=0$ 。当直流侧电容容量有误差时, $u_{dc1}/u_{dc2}=C2/C1$, $\Delta u_{dc} \neq 0$ 。当 APF 输出电流包含零序分量, 即 $i_a+i_b+i_c=i_n \neq 0$ 时, $i_{dc1}-i_{dc2}=i_n$, $u_{dc1} \neq u_{dc2}$ 。由以上推导得出: 直流侧电容的误差, 负载电流不平衡, 负载的 $3n$ ($n=1,2,3, \dots$) 次谐波都会影响直流侧电压平衡。

本文提出一种瞬时直流控制法来消除直流侧电压偏差。将图 1 简化为单相系统如图 2 所示。

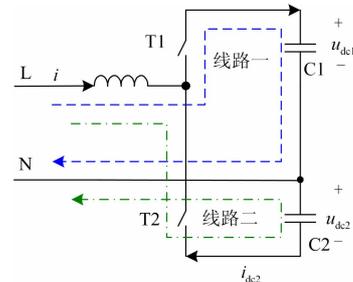


图 2 单相系统直流侧均压控制示意图

Fig. 2 DC voltage balance control scheme block of single phase system

规定电流 i 方向为正, 当 T1 闭合, T2 断开时, 电流按线路一流经 $C1$, $C1$ 电压上升, Δu_{dc} 增大; 当 T2 闭合, T1 断开时, 电流按线路二流经 $C2$,

C2 电压下降, Δu_{dc} 增大。无论 T1 还是 T2 导通, 只要控制 i 的方向持续为正, Δu_{dc} 增大; 反之控制 i 的方向持续为负, Δu_{dc} 减小。推广到三相系统, 令 $i_a+i_b+i_c=i_n/3$, 控制 i_n 的方向即可以控制 $\Delta u_{dc}=0$ 。另外由于直流侧均压控制对实时性要求较高, 控制周期采用开关周期, 反馈量采用瞬时值。

3 直流侧总电压控制算法

3.1 直流侧电压超调控制

根据第 1 节论述, 直流侧等效为一阶惯性系统, 直流侧总电压采用 PI 控制, 比例环节主要在动态过程起作用, 增强系统快速性, 积分环节主要在静态过程起作用, 消除稳态误差。

相对所选用的器件耐压值, 直流侧电压较高, 且有交流波动。为了可靠保护器件, 硬件模拟部分对上下直流侧电压分别保护且分为两级, 一级保护电压阈值为 420 V, 二级保护电压阈值为 425 V, 直流侧瞬时过压都会引起保护动作。电压上升过程中的超调有可能导致误报警, 必须严格限制超调量。

文献[13-15]介绍了模糊控制方法来抑制超调, 但运算量大, 不易实现。本文对直流侧总电压的控制选用经典的 PI 控制, 应用分段控制方法来抑制超调。直流侧总电压的控制过程分为: 缓冲阶段、软启阶段、正常工作阶段, 如图 3 所示。

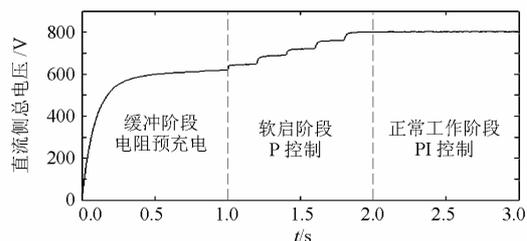


图 3 直流侧电压的启动过程
Fig. 3 DC voltage startup process

APF 系统通电后, 首先进入缓冲阶段, 由续流二极管和缓冲电阻给直流侧电容充电, U_{dc} 由 0 V 开

始上升, 稳定至 622 V, 缓冲过程结束。软启阶段采用给定电压分段的方法控制超调, 给定电压每阶段增加 40 V, 阶梯式上升, 此阶段 APF 还没有正式投入工作, 主要控制目标是系统稳定、抑致电压超调, 采用比例控制。当直流侧电压上升至给定目标值 800 V 且稳定后, APF 进入正常工作阶段, 主要控制目标是系统稳定, 电压稳态误差小, 此时在比例控制的基础上增加积分控制。

3.2 直流侧总电压纹波控制

进入正常工作阶段后, APF 输出电流同时会影响补偿精度、直流侧总电压和直流侧电压平衡。当 APF 输出电流较大时, 直流侧和交流侧交换的能量也会比较大, 导致直流侧电压波动较大, 同时 IGBT 关断的电压尖峰也会增大, IGBT 承担的过压风险较大。此时需要主动抑制直流侧总电压纹波。调整直流侧总电压控制环的反馈量为瞬时值, 控制周期为开关周期, 能有效抑制直流侧总电压周期波动。调节直流侧的电流所占输出电流的比例较小, 不会影响 APF 电流补偿精度。

3.3 直流侧总电压平均值控制

当 APF 输出电流较小时, 如果还是以瞬时值为反馈量, 开关周期为控制周期, 直流侧总电压控制环向电流环注入的高频电流较大, 会影响小电流的补偿效果。此时直流侧过压风险较小, 主要控制目标是补偿精度。调整控制周期为工频周期, 反馈量为工频周期内平均值, 对直流侧总电压作用的电流为基波有功电流, 控制特点是反应慢, 但无高频干扰。

4 APF 的三闭环控制

APF 采用如图 4 所示的三闭环控制策略。直流侧均压控制环和直流侧总电压控制环作为外环, 控制量叠加到电流环的给定, 通过电流环起作用。两个电压环均采用 PI 控制。由于直流侧电压不平衡对 PWM 调制结果影响很大, 直流侧均压控制环调节速度要快于直流侧总电压控制环。

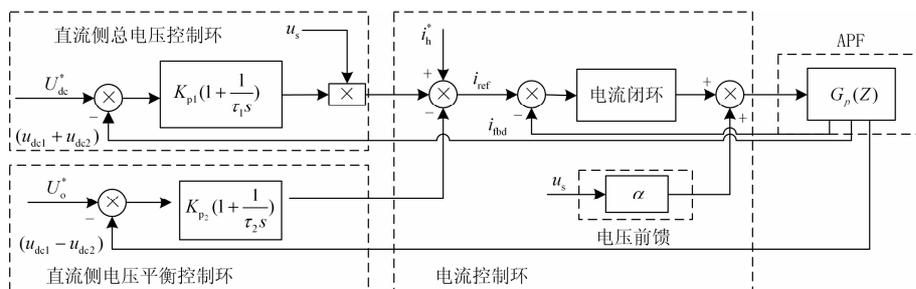


图 4 APF 三闭环控制系统框图

Fig. 4 System control block diagram of three closed loop control strategy

在小电流情况下，由于直流侧电压波动较小，直流侧总电压控制环采用工频周期作为控制周期，平均值作为反馈量，优点是电流补偿精度高。在大电流情况下，由于谐波和无功电流虽然不会引起直流侧电压平均值波动，但是瞬时的能量吞吐会使直流侧电压瞬时值波动较大，为保证 IGBT 和直流侧电解电容不会瞬时过压，直流侧总电压控制环采用开关周期作为控制周期，瞬时值作为反馈量，优点是对直流侧总电压纹波抑制效果好。

5 实验验证

以图 1 所示电路为主体结构，搭建 380V/100A 三相四线 APF 实验平台，对上述分析进行实验验证。图 5 为示波器接高压探头测得 APF 直流侧电压在缓冲阶段、软启阶段和正常工作阶段的动态过程，其中通道 1 为直流侧上半桥臂电压，通道 2 为直流侧下半桥臂电压。两条曲线高度重合，表明上下桥臂直流电压相等， Δu_{dc} 趋于零。实验结果显示整个动态过程直流侧电压平衡、稳定、无超调。

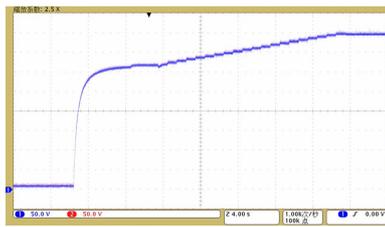
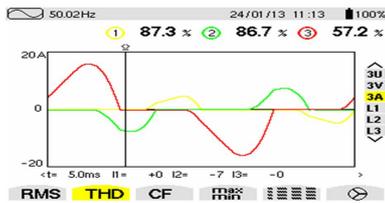


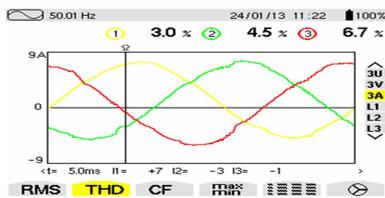
图 5 上下桥臂直流侧电压动态波形

Fig. 5 Transient DC voltage waveforms of two arms

图 6 为由电能质量分析仪测得轻载情况 APF 的补偿效果，实验负载为三个单相整流电路阻容型负载，特点是电流小、畸变率高、三相不平衡。直流侧升压完成后开始输出电流，此时直流侧电压平衡



(a) 补偿前电流波形



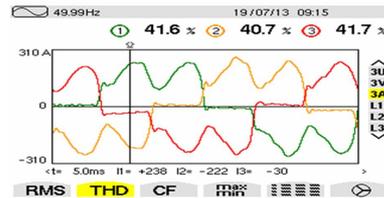
(b) 补偿后电流波形

图 6 轻载情况 APF 的补偿效果

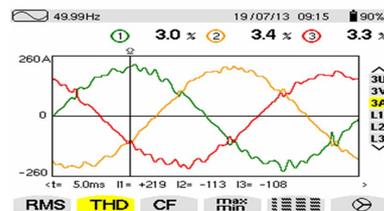
Fig. 6 APF compensation under light load

控制环采用开关周期作为控制周期，瞬时值作为反馈值；为减小电压控制对补偿电流的影响，直流侧总电压控制环采用工频周期作为控制周期，平均值作为反馈量。实验结果表明补偿后总畸变率由 80% 降到 5% 左右，并且三相电流不平衡度由 70% 补偿到 2%，补偿效果理想。APF 输出补偿电流有效值约为 5A，在如此小的电流情况下 APF 的电压控制环没有对电流补偿精度造成影响。

图 7 为由电能质量分析仪测得满载情况 APF 的补偿效果，实验负载采用交流电机对拖四象限变流器回馈电网的方式给出。直流侧升压完成后开始输出电流，此时直流侧电压平衡控制环采用开关周期作为控制周期，瞬时值作为反馈值；为控制直流侧电压波动，直流侧总电压控制环采用开关周期作为控制周期，瞬时值作为反馈量。实验结果表明补偿后总畸变率由 40% 降到 3% 左右，补偿效果理想。在如此大的电流情况下 APF 上下桥直流侧电压稳定控制在 400V 左右，直流侧电压保护值为 420V，直流侧电压误差控制在 5% 以内，APF 没有瞬时过压保护出现。



(a) 补偿前电流波形



(b) 补偿后电流波形

图 7 满载情况 APF 补偿效果

Fig. 7 APF compensation under full load

6 结论

本文首先给出三相四线制 APF 直流侧电压的控制要求。提出一种直流侧电压平衡的控制方法。采用给定电压分段的控制策略，解决 APF 启动过程中直流侧电压超调的问题。给出 APF 的三闭环控制策略。通过调整 PI 控制的控制周期和反馈量，在不同负载选择不同的控制策略以满足系统对响应速度和补偿精度的要求。

最后, 通过小电流、不平衡负载和满负荷负载两组实验验证应用此方法设计的 APF, 能够保持上下桥臂直流侧电压平衡, 直流侧电压稳定、无超调。APF 整体的补偿精度和动态响应速度满足要求。

参考文献

- [1] 乐健, 刘开培. 基于统一数学模型的三相四线制并联有源电力滤波器的参数优化方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 220-227.
LE Jian, LIU Kai-pei. Parameters optimization method of three-phase four-wire shunt active power filter based on unified mathematical model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 220-227.
- [2] 张晓, 李新宇, 周睿. 三相四桥臂并联型 APF 无差拍控制策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 78-83.
ZHANG Xiao, LI Xin-yu, ZHOU Rui. Study on a deadbeat control scheme for three-phase four-leg shunt active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 78-83.
- [3] 阮新波, 严仰光. 四桥臂三相逆变器的控制策略[J]. 电工技术学报, 2000, 15(1): 61-64.
RUAN Xin-bo, YAN Yang-guang. The control strategy for three-phase inverter with four bridge legs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000, 15(1): 61-64.
- [4] 刘海波, 毛承雄, 陆继明, 等. 四桥臂三相四线制并联 APF-STATCOM[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 11-17.
LIU Hai-bo, MAO Cheng-xiong, LU Ji-ming, et al. Three-phase four-wire shunt APF-STATCOM using a four-leg converter[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 11-17.
- [5] 杨晓利, 葛宝明, 姜新建. 并联型多重化三相四线有源电力滤波器综合控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 103-108.
YANG Xiao-li, GE Bao-ming, JIANG Xin-jian. Integrated control strategy of three-phase four-wire shunt active power filter using multiple converters[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23): 103-108.
- [6] 戴宁怡, 黄民聪, 唐净, 等. 新型三维空间矢量脉宽调制在三相四线系统中的应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(17): 45-49.
DAI Ning-yi, HUANG Min-cong, TANG Jing, et al. A novel 3-dimensional space vector modulation for 3-phase 4-wire system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(17): 45-49.
- [7] 王兆安, 杨君, 刘进军, 等. 谐波抑制和无功补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
WANG Zhao-an, YANG Jun, LIU Jin-jun, et al. Harmonic suppression and reactive power compensation [M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [8] 郑丹, 曾国宏, 沈志达, 等. 基于 Park 变换的改进谐波分析算法[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(6): 1480-1482.
ZHENG Dan, ZENG Guo-hong, SHEN Zhi-da, et al. Improved harmonic diction method based on Park conversation[J]. Computer Engineering and Design, 2009, 30(6): 1480-1482.
- [9] 谢斌, 戴珂, 张树全, 等. 并联型有源电力滤波器直流侧电压优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(9): 23-29.
XIE Bin, DAI Ke, ZHANG Shu-quan, et al. Optimization control of DC link voltage for shunt active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(9): 23-29.
- [10] 王立峰, 郑建勇, 梅军, 等. 有源滤波装置直流侧电压控制瞬时能量平衡建模[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 229-234.
WANG Li-feng, ZHENG Jian-yong, MEI Jun, et al. Instantaneous energy equilibrium modeling of DC side voltage control for active power filter device[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 229-234.
- [11] 唐忠, 江颖达, 姚永生, 等. 三相四线制电容中点式并联有源电力滤波器直流侧电压控制[J]. 电测与仪表, 2011, 48(5): 41-44.
TANG Zhong, JIANG Ying-da, YAO Yong-sheng, et al. Direct-side voltage control of mid-point capacitor three-phase four-wire shunt active power filter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2011, 48(5): 41-44.
- [12] 全恒立, 刘志刚, 张钢, 等. 并联型有源滤波器主电路关键参数设计[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 106-112.
QUAN Heng-li, LIU Zhi-gang, ZHANG Gang, et al. Design of main circuit's key parameters on shunt active power filters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 106-112.
- [13] 孔令军, 张晓, 李晓迅, 等. 并联型有源电力滤波器直流侧电压模糊内模控制方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 224-228.
KONG Ling-jun, ZHANG Xiao, LI Xiao-xun, et al. Research on DC-side voltage fuzzy internal model of shunt active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 224-228.
- [14] 常鹏飞, 曾继伦, 王彤, 等. 三相四线有源电力滤波器直流侧电压控制方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(8): 75-78.
CHANG Peng-fei, ZENG Ji-lun, WANG Tong, et al. Research on DC-side voltage control methods of three-phase four-wire active power filters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(8): 75-78.
- [15] 殷志柱, 杨煜普, 董祖毅, 等. 基于双闭环模糊控制的有源电力滤波器[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(4): 58-62.
YIN Zhi-zhu, YANG Yu-pu, DONG Zu-yi, et al. Double-closed-loop fuzzy controlled active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(4): 58-62.

收稿日期: 2014-06-25; 修回日期: 2014-08-04

作者简介:

郑丹(1982-), 女, 工学硕士, 工程师, 主要研究方向为电力电子技术应用, 有源电能质量治理等; E-mail: 05121677@bjtu.edu.cn

廖敏(1985-), 女, 工学硕士, 工程师, 主要研究方向为电力电子技术及应用、伺服驱动器等。