

基于双闭环模糊控制的有源电力滤波器

殷志柱^{1,2}, 杨煜普¹, 董祖毅², 徐琳¹, 周荔丹¹, 姚钢¹

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200030; 2. 上海输配电股份有限公司, 上海 200050)

摘要: 有源电力滤波器普遍采用双闭环控制。从双闭环协调控制的思路出发, 通过对有源电力滤波器运行时内外环之间的相互耦合的研究, 总结了双闭环 PI 参数协调控制的规律, 并把总结的控制规律应用模糊控制的方式对有源电力滤波器进行控制。仿真结果和实验测试结果表明所述方法不仅使得直流母线电压在启动过程中的超调量很小, 电压收敛速度快, 而且发出的冲击电流很小, 从而大大增强了系统运行的可靠性和直流母线电压的稳定性。仿真结果和实验测试结果表明, 该方案能显著提高系统响应速度, 并使注入电网的谐波电流达到 IEEE519-1992 的要求。

关键词: 有源电力滤波器; 协调控制; 双闭环控制; 模糊 PI 算法; 智能控制

Double-closed-loop fuzzy controlled active power filter

YIN Zhi-zhu^{1,2}, YANG Yu-pu¹, DONG Zu-yi², XU Lin¹, ZHOU Li-dan¹, YAO Gang¹

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;

2. Shanghai Power Transmission & Distribution Co., Ltd, Shanghai 200050, China)

Abstract: An active power filter (APF) is always controlled by double-closed-loop (DCL) regulation algorithm, namely, the inner current-loop and the outer voltage-loop. This paper studies the coordinates control of the inner current-loop and the outer voltage-loop of active power filter, and presents the rules of proportional-integral (PI) parameters tuning method in DCL. The active power filter is controlled by fuzzy logic controller whose fuzzification and defuzzification processes come from the coordinated selection of PI parameters in the inner current-loop and the outer voltage-loop controllers. The proposed control scheme results in smaller transient overshoot and faster convergence in the DC bus voltage of the APF. In addition, the compensating current generated by APF in start-up is very small. Therefore, system reliability as well as the stability of the DC bus voltage of the APF are greatly enhanced.

Key words: active power filter (APF); coordinated control; double-closed-loop control; fuzzy logic control; intelligent control

中图分类号: TM714 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2010)04-0058-05

0 引言

随着电力电子技术的发展, 电力电子装置的容量不断增大, 其应用领域不断扩展, 使用的数量也在迅速上升, 给电网带来越来越严重的电能质量问题; 另一方面, 随着对电能质量敏感的用电设备不断增多, 电力用户对电能质量的要求也越来越高, 因此改善电能质量对于电网和用电设备的安全以及经济运行具有重要的意义。

对于谐波抑制装置, 无源电力滤波器 (Passive Power Filter, PPF) 因其结构简单、成本低、容量大, 同时对于特定次谐波有较好的滤波效果, 仍在广泛使用, 但是其滤波效果受电网阻抗和自身参数影响较大, 易与电网阻抗发生串并联谐振而引起事

故。与无源滤波器相比, 有源电力滤波器 (Active Power Filter, APF) 具有高度可控制和快速响应特性, 并且能跟踪补偿各次谐波, 自动产生所需要的快速变化的无功功率, 其特性不受系统影响, 无谐波放大危险, 相对体积重量较小等突出优点, 因而已成为电力谐波抑制和无功补偿的重要手段。

传统有源电力滤波器较多采用双闭环 PI 控制, PI 参数根据仿真确定下来后即不作修改。文献[1]从模糊逻辑控制的机理出发对模糊逻辑的应用作了概要的介绍。文献[2]用模糊 PI 的方法仅对电压环的 PI 参数进行调节保证直流电压的稳定, 但是从结果上来看电压超调还是比较大。文献[3]是根据电流的偏差量作为 Fuzzy-PID 的输入对于电流环进行模糊控制, 提高了补偿精度。

本文着重研究了电压环与电流环之间 PI 参数的交互影响, 并在多次仿真的基础上得出了一个双闭环 PI 参数调节规律, 把调节规律写进 Fuzzy 逻辑控制规则库。在有源电力滤波器控制过程中, 以电压偏差作为输入变量, 根据电压的偏差状态对电压环和电流环的 PI 参数进行调整。仿真结果和实验测试结果表明, 该方法能显著提高系统的响应速度, 并使注入电网的谐波电流达到 IEEE519-1992 要求。

1 双闭环模糊控制原理

1.1 主电路结构

本项目主电路采取三单相 H 桥型结构, 如图 1 所示。根据有源电力滤波器所采用的主电路拓扑结构的不同, 可以分为三相桥式主电路结构(包括三相三线制和三相四线制)和单相 H 桥型主电路拓扑结构。其中单相 H 桥型主电路结构适用于有中线的系统, 每一相由一个独立的 H 桥构成, 三相之间互不影响。三单相 H 桥型单相 H 桥型主电路结构的有源电力滤波器控制简单, 直流电压要求比较低, 易于模块化设计。本论文的研究对象是单相 H 桥型主电路滤波器, 主电路如图 1 所示。

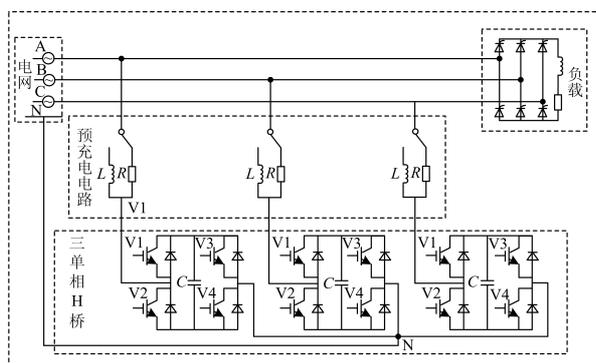


图 1 三单相 H 桥型 APF 的主电路

Fig.1 Circuit diagram of single-phase H-bridge APF

1.2 双闭环模糊控制框图

对于有源电力滤波器, 电流环使用线性控制方式。一般来说, 可以选择四阶参考模型作为校正系统, 这样可以保证系统的动态响应和稳态精度。同时因为电流环的响应远远快于直流侧电压环的响应, 分析直流侧电压环时可以忽略电流环的响应, 而假设电流环总是能及时地跟随给定的电流指令信号, 忽略直流侧的高频分量^[6]。按照上述分析总结出双闭环模糊控制系统的框图, 如图 2 所示。

在图 2 所示双闭环控制模型中, 对于 H 桥型的有源电力滤波器(不含电抗)建立了两个模型, 在电流环里变流器等效为一个放大环节:

$$G(s) = U_{dc} / 2V_{tr} \quad (1)$$

在电压环里变流器等效为一个比例积分环节:

$$G(s) = 3E / sCU_{dc} \quad (2)$$

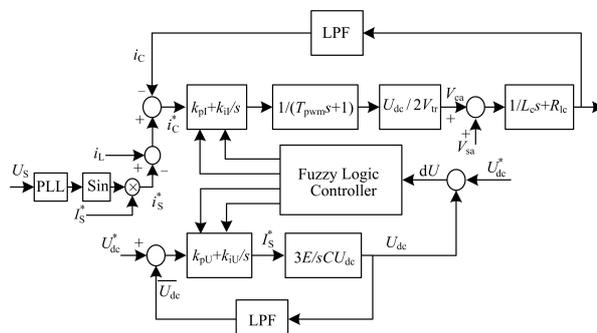


图 2 双闭环模糊控制系统框图

Fig.2 Block diagram of double-closed-loop control system

从总体上来说, 电流环和电压环的偏差信号通过 PI 参数的调节共同作用于控制对象 H 桥型主电路, 达到直流侧电压稳定控制及电流的跟踪控制; 电压控制的输出量是系统电流参考值的有效值 I_s^* , 通过锁相环 PLL 得到标准的正弦信号与 I_s^* 相乘, 得到系统电流参考值 i_s^* , 与负载电流 i_L 相减, 即得到补偿装置的电流参考值 i_c^* , 然后与实际补偿装置的输出电流 i_c 形成电流环, 进行 PI 控制。

图 2 所示双闭环控制系统框图虽然希望能够电流环电压环实现解耦控制, 目的是为了把电压环和电流环控制分开, 从而简化 PI 参数计算。但是在实际系统中要完成解耦, 除了仅仅通过设计低通滤波器是不够的, 还要求有硬件参数的保证:

条件一: 直流电容足够大, 从而保证谐波电流的波动几乎不影响直流电压变化或者很小。

条件二: 变流器吸收有功速度很慢, 系统中流过有功电流很小, 对谐波电流影响也要非常微小。

但是如果直流电容足够大, 一旦电容有一个小的电压波动就需要有一个比较大的有功流入, 所以一定会影响到谐波电流的输出, 所以上述两个条件的满足是矛盾的。此外由于设备成本及结构安装的限制, 直流电容值不会太大, 所以双闭环之间的耦合在实际系统中是必然的, 可从两个方面理解:

1) 从能量的平衡角度来说, 直流电容波动必然导致电流环有电流的变化, 反过来电流环电流的变化必然在一个阶段内引起直流电容电压的变化。

2) 从单纯的控制算法来说, 因为是电流环指令跟电压环指令做了代数和后送入到 PWM 发生器里, 所以电流环的 PI 参数变化通过改变电流环指令信号数值改变, 进而引起电流环指令在总指令信号

中的比例变化，那么就会导致电压环响应特性发生改变。

基于上述原因，在研究过程从本质上来说，电压、电流环之间是相互影响的。电流控制可能会引起电压波动，电压控制也可能会引起电流冲击，所以需要从全局的角度思考一个控制策略，实时协调有源电力滤波器的电流环和直流环的特性，这也是本文的研究目的。

2 模糊控制器的实现

2.1 输入输出模糊化

本课题研究的模糊控制器，输入变量为电压偏差 dU ，输出变量为双环的 PI 参数（电压环比例系数 k_{pU} ，积分系数 k_{iU} ，电流环比例系数 k_{pI} ，电流环积分系数 k_{iI} ）。对于输入变量直流电压偏差设为 5 个语言值：low、m-low、ok、m-high、high 分别代表高度欠压、欠压、合理波动、过压、高度过压。对于输出变量双环的 PI 参数设为 3 个语言值：little、mid、big 分别代表参数数值小、中等、大。

Matlab 中的 Fuzzy Logic Controller 模块里面有几十种隶属度函数可供选择使用。对于有源电力滤波器的直流母线电压变量选择隶属函数，可以选择 trimf 函数建立三角波形隶属度函数。

输入变量模糊化（输出去模糊化）后的在各自定义域内的关系如图 3、图 4 所示。

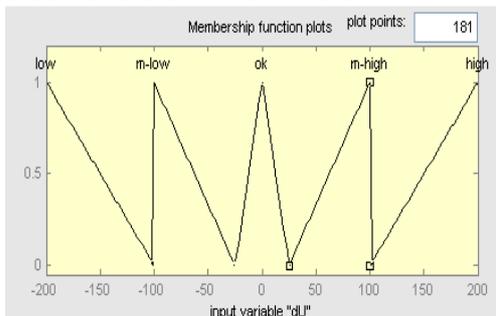


图 3 模糊变量 dU 的隶属度函数图
Fig.3 Subjection function of fuzzy variable dU

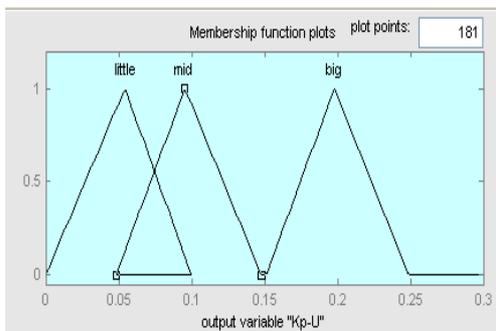


图 4 模糊变量 k_{pU} 的隶属度函数图
Fig.4 Subjection function of fuzzy variable k_{pU}

2.2 基于专家系统的模糊控制规则

针对一个跟线性系统有控制律 I：

1) 对于电压环或者电流环，如果超调比较大，应该适当减小 K_p / K_i 比例。

2) 如果电流环或者电压环超调不大，但是出现振荡，应该适当增大 K_p / K_i 比例。

从双闭环反馈耦合控制的角度来看，可以总结出控制规律 II：

3) 如果电压超调相对电流冲击大很多，可以适当减小 K_{p_u} / K_{p_i} 的比例。

4) 如果电压超调相对电流冲击比较小，可以适当增大 K_{p_u} / K_{p_i} 的比例。

5) 电流环的积分环节应该要尽量小，因为这个高开关频率实时系统，积分的累积可能会使得系统补偿滞后并振荡。

根据上述控制律，通过对低压有源电力滤波器的实验和仿真可知，双闭环中的 PI 控制参数在控制有源电力滤波器运行时是有耦合的，电流环的参数变化也会引起电压环的波动，同时电压环的参数变化也会引起电流环的冲击，为了提高有源电力滤波器的性能，就需要在其运行过程中按照一定规律调节双闭环的 PI 参数，使得有源电力滤波器不仅启动过程电流冲击小，电压超调小，而且要求电压收敛快，补偿精度好。通过对本文研究有源电力滤波器模型进行多次仿真，发现有源电力滤波器内外环 PI 参数有如下规律，得出模糊控制器中 PI 输出规则如下：

- If (dU is low) then (k_{pU} is mid) (k_{iU} is little) (k_{pI} is little) (k_{iI} is little)
- If (dU is m-low) then (k_{pU} is mid) (k_{iU} is little) (k_{pI} is little) (k_{iI} is little)
- If (dU is high) then (k_{pU} is mid) (k_{iU} is little) (k_{pI} is mid) (k_{iI} is little)
- If (dU is m-high) then (k_{pU} is mid) (k_{iU} is little) (k_{pI} is mid) (k_{iI} is mid)
- If (dU is ok) then (k_{pU} is mid) (k_{iU} is big) (k_{pI} is little) (k_{iI} is mid)

其中： dU ：直流母线电压偏差为 dU ；电压环比例系数为 k_{pU} ；电压环积分系数为 k_{iU} ；电流环比例系数为 k_{pI} ；电流环积分系数为 k_{iI} 。

2.3 仿真实验及仿真结果

为了验证本文方法的正确性和有效性，采用 Matlab 仿真软件进行了仿真，仿真模型参数设置如下：电网电压 $U_s=380\text{ V}$ ，负载为不可控六脉波整流器，带电阻 $3\ \Omega$ ，预充电电阻 $R=20\ \Omega$ ，直流母线期

望电压 $U_{dc}=500$ V, 直流电容 $C=2\ 350\ \mu\text{F}$, 滤波电感 $L=2$ mH, 系统开关频率为 10 kHz。

投入运行时, 利用预充电电阻对电容进行充电至 300 V 左右, 经过一个启动过程, 使得直流母线电压维持在 500 V, 然后有源电力滤波器可以稳定地开始输出补偿谐波。

通过 Matlab 中自有的模糊控制模块, 实现上述模糊化的过程以及模糊规则的设定, 仿真后得到如图 5、图 6 所示波形, 仅以 A 相为例给出仿真结果。由图 5 可知, 通过模糊算法协调双闭环的参数后, 直流母线电压 (U_{c_a}) 上升速度合理, 电压超调小收敛快, 从而对直流电容有较好的保护作用, 提高了有功电流效率。此外, 启动过程冲击电流也非常小, 跟稳定输出的谐波电流幅值相当, 大大降低了因为启动过电流造成器件损坏的可能性。由图 6 可知, 本算法的采用保证了补偿后电网电流 (I_{s_a}) 基本正弦。

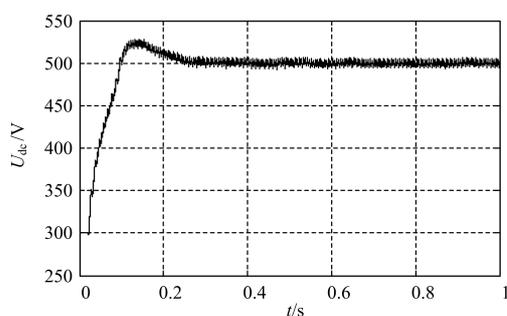


图 5 A 相直流电压

Fig.5 Waveforms of DC side voltage U_{c-a}

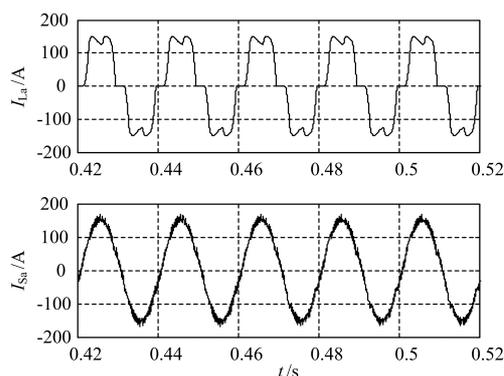


图 6 A 相负载电流波形和系统电流波形

Fig.6 Waveforms of load current and source side current

2.4 实验结果

为了进一步验证本文方法的正确性, 在仿真的基础上进行了实验研究, 实验采用的硬件参数跟仿真参数一致, 仅仅是负载容量变为原来的 1.5 倍, 采用不可控六脉波整流器带电阻作为谐波负载对有

源滤波器的稳态性能进行了测试, 如图 7、8、9。

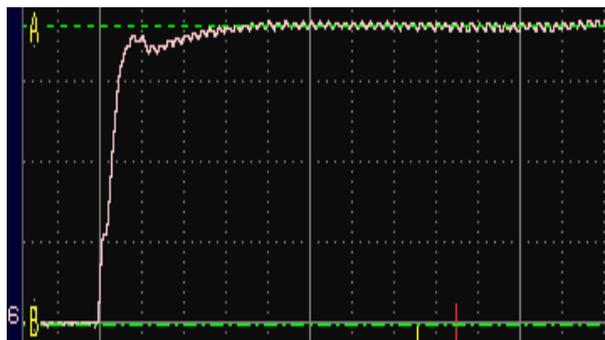


图 7 A 相直流电压

Fig.7 Experimental waveforms of DC side voltage U_{c-a}

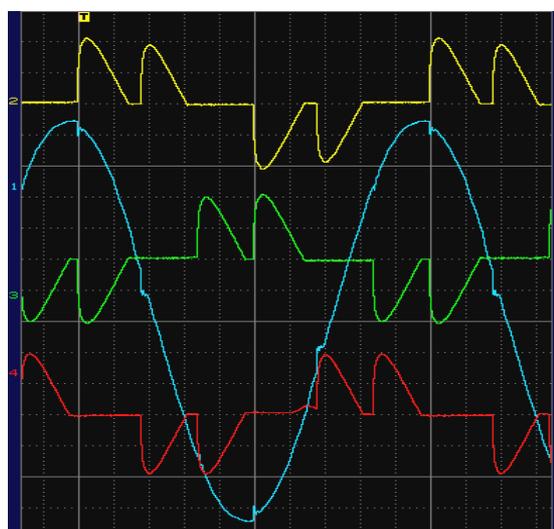


图 8 补偿前负载三相电流波形图

Fig.8 Experimental waveforms of load currents before compensation

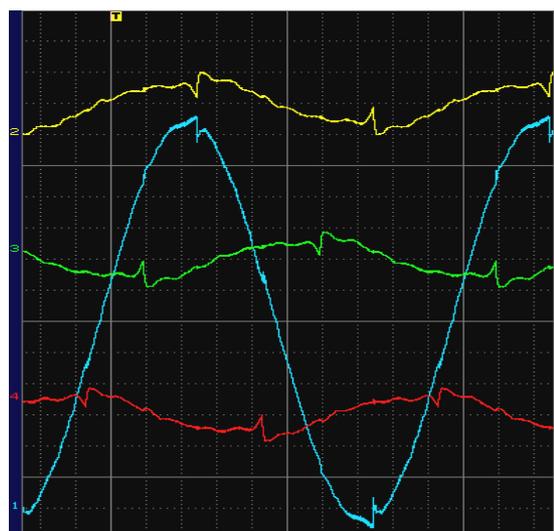


图 9 补偿后系统三相电流波形图

Fig.9 Experimental waveforms of source side currents after compensation

图 7 为直流侧电压波形, X 轴为 0.1 s/格, Y 轴为 50 V/格, 投入运行时, 利用预充电电阻对电容进行充电至 300 V 左右, 经过 0.1 s 的启动过程, 使得直流母线电压维持在 500 V, 整个过程与仿真波形一致, 说明模糊控制算法能有效地应用于直流电压的控制, 具有可实现性。

图 8 和图 9 分别为补偿前负载三相电流波形和补偿后系统三相电流波形。由图可见, 补偿前电网电流存在严重畸变, APF 投入运行后, 系统电流有效值明显降低, 主导谐波衰减明显, 系统电流接近正弦, 节能效益显著。

3 结论

本文着重研究了电压环与电流环之间 PI 参数的协调控制原理, 并在仿真的基础上得出了双环 PI 参数调节规律, 以模糊控制的方法来实现有源电力滤波控制。选择电压偏差为输入, 双环 PI 参数为输出。通过仿真的波形可以看出, 这种控制方法不仅减小了直流电压启动过程的超调量, 收敛速度非常快, 而且冲击电流非常小, 有效地保护了开关器件的安全, 可以大大提高设备可靠性。说明双闭环模糊控制应用于电力有源滤波器的可行性, 同时实验结果也验证了这种方法的正确性和有效性。但是本文的研究方法以电压环为主控制对象, 通过耦合作用降低电流环冲击。如果能够把电流环的电流信息加入到模糊控制器进行双变量判决协调 PI 参数, 应该能够进一步提高性能, 这个问题还有待进一步研究。

参考文献

[1] 刘桂英, 粟时平. 模糊逻辑在有源电力滤波器智能控制中的应用[J]. 电气开关, 2003(1): 10-14.
LIU Gui-ying, SU Shi-ping. Fuzzy Logic Used in Intelligent Control of Active Power Filter[J]. Electric Switchgear, 2003(1): 10-14.

[2] 盛光忠, 郭贵莲, 崔志强. 模糊控制在并联有源滤波器中的应用[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2004, 26 (2): 173-175.
SHENG Guang-zhong, GUO Gui-lian, CUI Zhi-qiang. Cybernetic Research on Fuzzy Controller in Direct Current Capacitance and Voltage of PAPF[J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Science Edition, 2004, 26 (2): 173-175.

[3] 李刚, 罗安. 一种新型混合型有源滤波器的模糊 PI 控

制[J]. 电力电子技术, 2005, 39 (4): 91-93.
LI Gang, LUO An. Fuzzy-PI Control of a New Hybrid Active Power Filter[J]. Power Electronics, 2005, 39(4): 91-93.

[4] 马永健, 徐政, 沈沉. 有源电力滤波器闭环控制算法研究[J]. 电工技术学报, 2006, 21 (2): 73-78.
MA Yong-jian, XU Zheng, SHEN Chen. Studies of Closed-loop Control Strategy of Active Power Filters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21 (2): 73-78.

[5] 唐欣, 罗安, 涂春鸣. 有源滤波器中输出滤波器的参数设计及优化[J]. 电力电子技术, 2005, 39(5): 91-94.
TANG Xin, LUO An, TU Chun-ming. Design and Optimization of Output Filter of Parallel Active Power Filters[J]. Power Electronics, 2005, 39 (5): 91-94.

[6] 吴麒. 自动控制原理(下) [M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
WU Qi. Automatic Control Theory (II) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1992.

[7] 马皓, 张涛, 韩思亮. 新型逆变器滑模控制方案研究[J]. 电工技术学报, 2005, 20 (7): 50-56.
MA Hao, ZHANG Tao, HAN Si-liang. Analysis and Design of Sliding Mode Control for Novel Buck Inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20 (7): 50-56.

[8] 曾光, 柯敏倩, 张静刚. 模糊-PID 控制在 SVC 中的应用[J]. 西安理工大学学报, 2005, 21 (3): 245-248.
ZENG Guang, KE Min-qian, ZHANG Jing-gang. The Design of Fuzzy-PID Control Applied to SVC[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2005, 21 (3): 245-248.

[9] Sabanovic A, Fridman L M, Spurgeon S. Variable Structure Systems: From Principles to Implementation [M]. London(United Kingdom): The Institution of Electrical Engineers, 2004.

收稿日期: 2009-03-17; 修回日期: 2009-04-22

作者简介:

殷志柱(1979-), 男, 工程硕士, 研究方向为电力系统谐波的智能化补偿技术; E-mail: yinzz@sptd.com.cn
杨煜普(1960-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能控制理论与应用、智能测控与自动化装置等;
董祖毅(1950-), 男, 学士, 教授级高工, 目前研究方向为工业控制及自动化。