

带分布式电源的有源滤波器的模糊自适应控制

徐长波[†], 李春文, 鲁伟

(清华大学 自动化系, 北京 100084)

摘要: 由于分布式电源逆变并网发电与有源电力滤波器(active power filter, APF)在结构功能上具有相似性, 本文提出了结合绿色分布式电源的有源电力滤波器拓扑结构, 这种结构使APF除了能够滤除谐波外, 还可以向负载供电, 拓展了APF的应用范围, 有利于电网的绿化和供能的多元化. 分布式电源通过逆变升压整流来维持APF直流侧的电容电压的稳定, 而不需要消耗电网中的能量. 针对畸变电压的工况, 设计了自适应 dq 检测算法; 在APF控制上采用了自适应模糊控制的策略, 不仅能快速跟踪谐波电流, 而且具有较强的鲁棒性. 仿真结果验证了该系统设计的可行性和可靠性, 证明了本文所提算法的有效性和正确性.

关键词: 有源电力滤波器; 分布式电源; 自适应 dq 检测算法; 自适应模糊控制

中图分类号: TP273 文献标识码: A

Adaptive fuzzy control for active power filter with distributed generators

XU Chang-bo[†], LI Chun-wen, LU Wei

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Distributed generators connected to the grid by inverter are similar to active power filters (APF) in structure and function. We propose the combination of APF and the green distributed generation (DG), which not only compensates the system harmonic currents but also supplies power energy to the loads when the grid power is interrupted. It is also beneficial to the greening of power grid and the diversification of power supply. The energy from the DG is utilized to maintain the DC-link capacitor voltage by inverting, boosting and rectifying. To deal with the harmonic voltage, an adaptive dq harmonic detection method is designed. Based on the detected reference harmonic currents, an adaptive fuzzy controller is applied to rapidly and precisely track the reference harmonics. Simulation results in MATLAB demonstrate the reliability and feasibility of the above mentioned control strategy.

Key words: active power filter (APF); distributed generation; adaptive dq detection algorithm; adaptive fuzzy control

1 引言(Introduction)

随着社会的发展, 各种开关电源、变频器的大量应用给电网带来了大量的谐波. 谐波电流不仅增加了输电线路的损耗, 而且影响高精尖设备的正常工作, 甚至危害电网的安全运行. 为了解决电能质量中的谐波问题, 常用的就是无源滤波器, 它具有良好的经济性, 但其只能对特定次的谐波进行补偿, 且容易发生谐波放大的现象^[1]. 而有源电力滤波器(active power filter, APF)是目前谐波治理的有效工具之一, 具有良好的动态补偿特性, 滤波特性不受电网阻抗的影响, 安全性能更高^[2], 在实际中得到了普遍的应用.

目前供电系统以集中式供电为主, 但是集中式供电存在事故率高, 经济性差, 难以满足电力生产和市

场化的需求等缺点, 因此分布式发电技术成为近些年来研究的重点, 特别是基于新能源的分布式发电技术成为电力系统中的新热点^[3-5]. 相比大电网, 它投资少, 能耗低, 具有很强的灵活性和稳定性^[6-7], 是未来电力工业的主要发展方向. 分布式发电单元通过逆变器并入电网, 与APF拓扑结构很相似. APF直流侧为储能单元, 靠电网能量来维持电压稳定; 分布式电源(distributed generation, DG)的直流侧为分布式发电单元, 为输出提供能量; APF的输出为谐波电流和无功功率, DG电源逆变向电网输出有功功率^[8-10]. 由此本文提出了结合绿色电源的APF, 该装置不仅具有滤除谐波的功能, 而且在系统断电后可以向负载提供有功功率, 可以作为备用电源. 它具有如下优点: 1) 可以补

偿负载的非线性特性, 减小负载谐波电流对电网的污染, 有利于配电网的稳定; 2) 当母线故障, 可以通过分布式电源, 向电网注入有功功率, 为负载提供能量; 3) 装置的小型化, 有利于配电网的广泛应用^[11].

本文为了使所提装置能够稳定运行, 针对电压畸变的情况, 提出了一种改进的谐波检测方法, 准确快速地提取基波电压相位信号, 取代了传统检测算法的锁相环, 不仅可以抑制谐波电压对电流检测的影响, 而且也可以精确快速检测出谐波信号; 为了抑制 APF 模型参数对控制器设计的影响, 本文采用模糊自适应控制的策略, 使 APF 的输出电流快速跟踪参考信号, 而且具有很强的鲁棒性. 最后的仿真结果也验证了本文所提策略的有效性.

2 结合分布式电源 APF 的系统模型(System model of APF with distributed generation)

本文研究的结合分布式电源的三相 APF 拓扑结构如图 1 所示. 供电端是绿色可再生能源, 经过逆变升压整流为 APF 直流侧电容提供能量, 而不需要从电网吸收能量. 并联逆变器由全桥逆变器构成, 输出采用 RL 电路滤除高频信号后与系统电网连接.

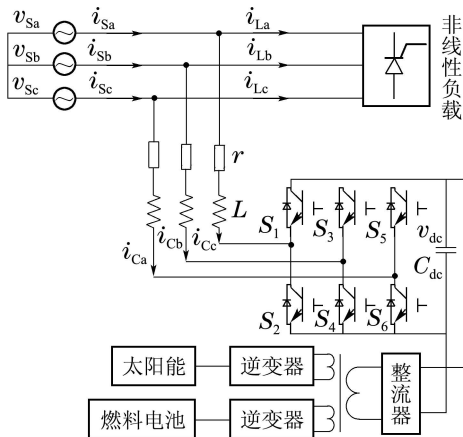


图 1 结合分布式电源的 APF 的拓扑结构
Fig. 1 Topology of the APF with DG

图 1 中: $v_{sj} (j = a, b, c)$ 为三相电网电压; i_{sj}, i_{Lj} 和 i_{Cj} 分别为电网系统电流、负载电流和 APF 的输出补偿电流; L 为滤波电感, r 为等效电阻且三相电感值和电阻相同; C_{dc} 和 v_{dc} 为直流侧电容及其两端的电压; $S_1 \sim S_6$ 为开关器件. 通过检测和控制算法合理控制开关器件的开断, 实现 i_{Cj} 跟踪其参考值 i_{Cj}^* , 使电网系统电流为期望的正弦波. 本文将 APF 与分布式电源相结合, 扩展了 APF 的应用范围. 它在 dq 同步旋转坐标系下的周期平均模型为

$$\begin{cases} \frac{di_{Cd}}{dt} = -\frac{r}{L}i_{Cd} + \omega i_{Cq} - \frac{v_{dc}}{L}s_d + \frac{v_{sd}}{L}, \\ \frac{di_{Cq}}{dt} = -\frac{r}{L}i_{Cq} - \omega i_{Cd} - \frac{v_{dc}}{L}s_q + \frac{v_{sq}}{L}. \end{cases} \quad (1)$$

3 三相三线 APF 自适应 dq 检测算法 (Three-phase three-wire APF adaptive dq detection algorithm)

针对电网电压含有多重零点、畸变严重的情况, 本文在传统 dq 算法中, 采用自适应算法取代传统算法的锁相环, 避免谐波电压信号对电流检测的影响. 定义目标函数^[12]

$$E_v = \frac{1}{2}e_{va}^2 = \frac{1}{2}(V_{sa} - y_v)^2. \quad (2)$$

根据误差反向传播算法, 经过 k 步训练后的权系数

$$w_{vi}(k+1) = w_{vi}(k) + \Delta w_{vi}(k), \quad (3)$$

$$\Delta w_{vi}(k) = -\gamma \frac{\partial E_v(k)}{\partial y_v(k)} \frac{\partial y_v(k)}{\partial w_{vi}(k)} = \gamma (V_s(k) - y_v(k)) x_i(k), \quad (4)$$

其中: $i = 1, 2$, γ 为学习率, y_v 为线性神经元输出. 由于学习率 γ 是常值, 不能根据误差变化而调整, 从而影响了参数收敛的速度. 由此本文提出了自调整的学习率, 定义为

$$\begin{cases} \gamma = \frac{m}{h(k)}, \\ h(k) = \alpha h(k-1) + \beta E_v(k), \end{cases} \quad (5)$$

其中: $0 < \alpha < 1$, $0 < \beta < 1$. 由式 (5) 可知学习率是和误差成反比的, k 为比例系数. 学习训练中, 当 E_v 比较小时, 说明调整方向正确, 学习率 γ 会增大从而加快收敛速度; 当比较大时, 说明调整的方向错误, 学习率会减小, 以提高检测的速度. 由此可以得到与 A 相电压同相位的单位正弦和余弦信号:

$$\begin{cases} \sin(\omega t + \alpha_a) = \frac{v_1}{\sqrt{\bar{w}_{v1}^2 + \bar{w}_{v2}^2}}, \\ \cos(\omega t + \alpha_a) = \frac{v'_1}{\sqrt{\bar{w}_{v1}^2 + \bar{w}_{v2}^2}}, \end{cases} \quad (6)$$

其中: $v_1 = \bar{w}_{v1}x_1 + \bar{w}_{v2}x_2$, $v'_1 = \bar{w}_{v1}x_2 - \bar{w}_{v2}x_1$, $\bar{w}_{v1}, \bar{w}_{v2}$ 为经过滤波后的常量部分.

如果输入信号为 $x_1 = \sin(n\omega t)$, $x_2 = \cos(n\omega t)$ 时, 就可以检测出第 n 次谐波电压相位信号. 取得基波电压相位, 采用 dq 检测算法, 获得谐波电流信号, 检测算法实现如图 2 所示.

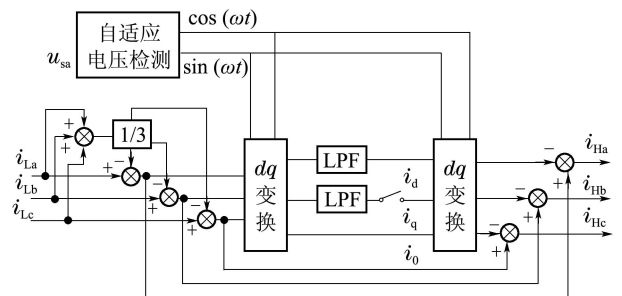


图 2 谐波检测电路框图

Fig. 2 Block diagram of harmonic current detecting circuit

4 模糊自适应控制(Fuzzy adaptive control)

第2节系统(1)的模型可以写成

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + bu, \\ y = x, \end{cases} \quad (7)$$

其中:

$$f(x) = \begin{bmatrix} -\frac{r}{L}i_{Cd} + \omega i_{Cq} + \frac{v_{sd}}{L} \\ \frac{r}{L}i_{Cq} - \omega i_{Cd} + \frac{v_{sq}}{L} \end{bmatrix},$$

$$b = \begin{bmatrix} -\frac{v_{dc}}{L} \\ -\frac{v_{dc}}{L} \end{bmatrix},$$

u 和 y 为系统的输入和输出,控制目标就是使输出 y 跟踪参考信号 y^* .

由于 $f(x)$ 和 b 都与系统参数有关,会随时间和外界条件的变化而变化,所以精确的控制律难以得到.而模糊控制系统可以作为万能逼近器,本文采用模糊控制器来代替最优控制器^[13-15].取

$$u = u(x), \quad (8)$$

模糊控制规则包括一系列的IF-THEN规则

Rule: IF x is A^l , THEN u is G^l ,

其中: A^l 和 G^l 分别表示 x 和 u 的模糊集, $l = 1, 2, \dots, m$, m 为模糊规则的数量.

对于单值模糊器,乘积推理机和中心解模糊器的模糊系统具有以下形式:

$$u(x) = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i \times \theta_i}{\sum_{i=1}^m \mu_i}, \quad (9)$$

其中: μ 为 x 的隶属度函数,并将 θ_i 当作自由参数,那么式(11)变为

$$u(x|\theta) = \theta^T \varepsilon(x), \quad (10)$$

其中: $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m)^T$ 为参数向量, $\varepsilon(x) = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m)^T$ 是模糊基函数,定义为

$$\varepsilon_i(x|\theta) = \frac{\mu_i}{\sum_{i=1}^m \mu_i}. \quad (11)$$

由此可以得到误差方程

$$\dot{e} = -ke + b(u^* - u(x|\theta)). \quad (12)$$

定义最优矢量参数

$$\theta^* = \arg \min_{\theta \in \mathbb{R}^m} [\sup_{x \in \mathbb{R}} |u_* - u(x|\theta)|], \quad (13)$$

取最小逼近误差

$$\phi = u(x|\theta) - u^*, \quad (14)$$

可以将方程(14)改写为

$$\dot{e} = -ke + b(\eta^T \varepsilon(x) - \phi), \quad (15)$$

这里 $\eta = \theta^* - \theta$ 为误差参数向量.

取Lyapunov方程

$$V = \frac{1}{2} x p x + \frac{b}{2\lambda} \eta^T \eta, \quad (16)$$

λ 是正常数, p 是唯一的满足下述Lyapunov等式的正常数:

$$kp + pk = -q. \quad (17)$$

对 V 进行时间求导可以得到

$$\frac{dV(t)}{dt} = -\frac{1}{2} e q e + e p b [\eta^T \varepsilon(x) - \phi] - \frac{b}{\lambda} \eta^T \dot{\theta}. \quad (18)$$

通过简化运算,可以进一步将(20)变换为下式:

$$\frac{dV(t)}{dt} = -\frac{1}{2} e q e + e p b \phi + \frac{b}{\lambda} \eta^T [\lambda e p \varepsilon(x) - \dot{\theta}]. \quad (19)$$

令自适应率定义为

$$\dot{\theta} = \lambda e p \varepsilon(x), \quad (20)$$

通过选择足够数量的模糊规则,可以使最下逼近误差 ϕ 很小,取上述的自适应率,可以得到

$$\frac{dV(t)}{dt} \approx -\frac{1}{2} e q e < 0, \quad (21)$$

所以系统是稳定的.

5 仿真结果(Simulation results)

为了验证本文所提自适应dq检测算法和模糊控制器的有效性,在MATLAB/Simulink环境下搭建了APF的仿真系统.系统的主要参数如下:系统电压及频率标称值220 V/50 Hz;直流侧电容 $C_{dc} = 20000 \mu\text{F}$,直流侧电压为1000 V;滤波电感 $L = 0.8 \text{ mH}$,电阻 $r = 0.2 \Omega$;两组三相整流桥负载分别为 $L_{L1} = 5 \text{ mH}$, $r_{L1} = 10 \Omega$, $L_{L2} = 5 \text{ mH}$, $r_{L2} = 15 \Omega$;PWM的开关频率 $f = 10 \text{ kHz}$;模糊控制器的参数为 $k = 200$, $\lambda = 500$;分布式电源先逆变,升压整流后为直流侧提供能量.

非线性负载1先运行,到0.2 s时负载2也投入运行. A相系统电压、负载电流如图3(a)–3(b)所示.由图3(a)–3(b)可知,负载电流畸变严重,从而影响系统电流的畸变,含有大量的谐波,其谐波畸变率THD = 27.86%. APF是0.04 s开始运行的,由图3(c)看出APF运行后,大量的高次谐波被补偿,系统电流近似为正弦波,负载变化前后THD分别为3.35%和3.23%,符合电网谐波含量的要求;而且当谐波变化后,也能迅速跟踪,因此验证了本文控制策略的有效性,而且谐波产生的能量来源于绿色分布式电源,而非从电网中获得,大大节约了电能,而且消除了谐波,有利于电网的稳定运行.上述仿真验证当负载变化时,APF仍具有良好的动态品质.

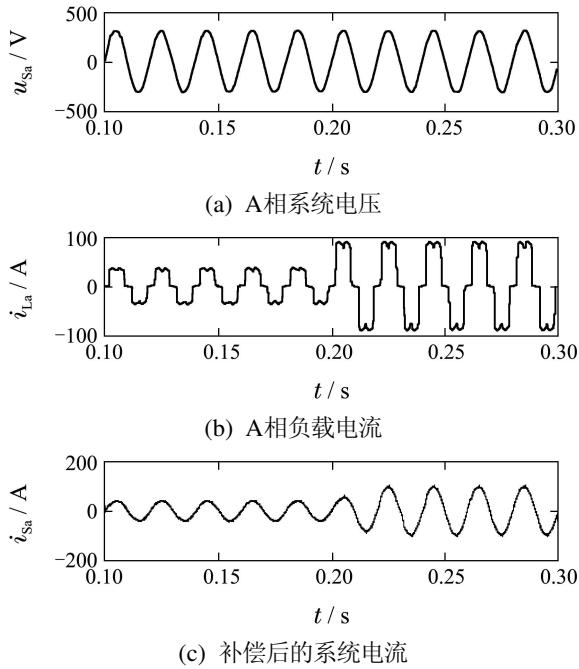


图 3 PCC处的电压、负载电流及补偿后的系统电流
 Fig. 3 Voltage of the PCC, load current and system current after compensation

下面考虑当APF的系统参数变化时, 所提控制策略的鲁棒性. 图4是滤波电抗器分别在0.3 mH, 0.8 mH和1.3 mH时, APF输出电流的跟踪波形. 当电感变小时, 高频谐波不能被有效滤除, 会使谐波含量增大; 而当电感变大时, 跟踪速度会变慢, 也会导致谐波含量增大, 但在0.3 mH到1.3 mH的范围内, 补偿后的THD都可以控制在5%以内, 由此可以看出本文控制对系统参数扰动具有很强的抑制作用, 具有很强的鲁棒性.

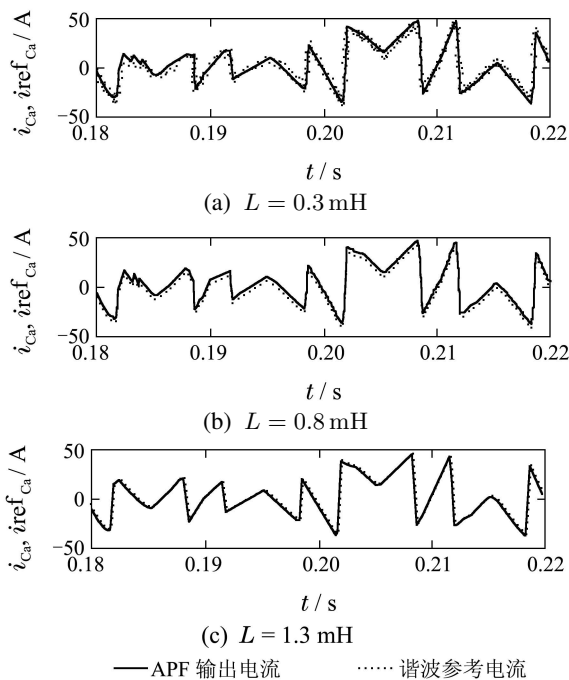
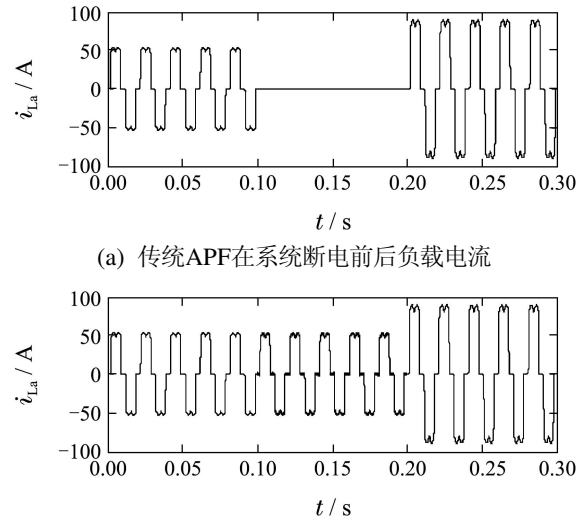


图 4 不同系统参数下APF输出电流跟踪图
 Fig. 4 APF output currents track diagram with the different system parameters

在0.1 s~0.2 s间系统突然断电时, 负载的运行情况如图5所示. 图5(a)是传统APF在系统断电后负载不能正常工作, 而图5(b)是结合分布式电源的APF在系统断电后, 通过分布式电源的逆变, 为负载的正常工作提供能量, 这时的APF相当于一台UPS电源; 当0.2 s系统恢复后, APF又恢复为滤波器, 补偿由负载运行产生的谐波电流. 图6为负载两侧电压波形, 当APF作为电源时, 由于开关电源和产生的谐波电流, 会使电压波出现一定数量的毛刺.



(a) 传统APF在系统断电前后负载电流
 (b) 结合分布式电源的APF在系统断电前后负载电流
 图 5 当系统0.1 s~0.2 s断电时, 没有分布式电源和带有分布式电源下A相的负载电流

Fig. 5 System power failure in 0.1 s~0.2 s, A-phase load current without DG and with DG

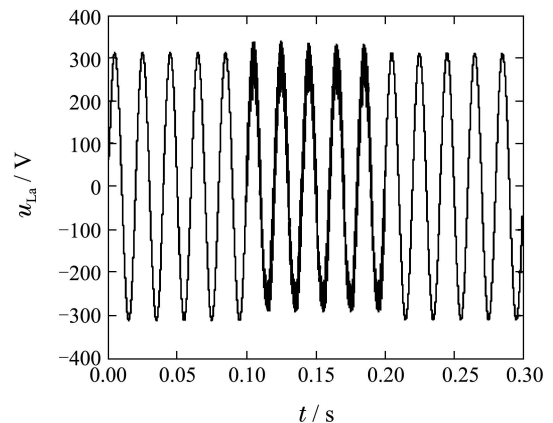


图 6 系统断电后, 带有分布式电源下A相负载的电压波形
 Fig. 6 After system power down, A-phase load voltage with DG

6 结论(Conclusions)

本文提出了带有分布式电源的APF装置, 该装置采用的自适应dq检测算法可以抑制电压畸变, 含有多重零点的工况, 而且可以准确快速的得到谐波电流信号; 模糊自适应控制算法采用模糊控制器的逼近特性,

对系统参数扰动有更强的鲁棒性, 可以实现对谐波电流的快速的跟踪, 补偿谐波电流, 净化电网环境. 仿真结果显示该系统不仅可以补偿非线性负载产生的谐波电流, 而且当系统供电出现故障时, 也可以为负载输出有功, 保证负载的正常运行. 随着绿色分布式能源的大量应用, 这种装置为APF的发展提供了新思路, 具有广阔的空间和较高的实用价值.

参考文献(References):

- [1] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
(WANG Zhao'an, YANG Jun, LIU Jinjun. *Harmonic Suppression and Reactive Power Compensation* [M]. Beijing: China Machine Press, 1998.)
- [2] AKAGI H. New trends in active filters for power conditioning [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1996, 32(6): 1312 – 1322.
- [3] 王建, 李兴源, 邱晓燕. 含有分布式发电装置的电力系统研究综述 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 90 – 97.
(WANG Jian, LI Xingyuan, QIU Xiaoyan. Power system research on distributed generation penetration [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2005, 29(24): 90 – 97.)
- [4] 颜文旭, 纪志成. 电压畸变条件下三相三线有源电力滤波器的T-S模糊 H_∞ 控制 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29(6): 803 – 810.
(YAN Wenxu, JI Zhicheng. T-S fuzzy H_∞ control for three-phase three-wire active power filter in power voltage distortion condition [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(6): 803 – 810.)
- [5] YUVARJAN S, YU D C, XU S G. A novel power converter for photovoltaic applications [J]. *Journal of Power Sources*, 2004, 135(1/2): 327 – 331.
- [6] 杨琳霞. 分布式电源和有源电力滤波器的优化组合研究 [J]. 电气自动化, 2011, 33(1): 76 – 77.
(YANG Linxia. Study of the optimal combination of DG and APF [J]. *Electrical Automation*, 2011, 33(1): 76 – 77.)
- [7] 张国荣, 张铁良, 丁明, 等. 具有光伏并网发电功能的统一电能质量调节器仿真 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(14): 82 – 86.
(ZHANG Guorong, ZHANG Tieliang, DING Ming, et al. Simulation research on unified power quality conditioner with PV grid connected generation [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(14): 82 – 86.)
- [8] ZHAN Y Q, LI Y H, CHOISS, et al. The design of a fuel cell-based power-quality control center to realize unbundled power quality supply [J]. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 2006, 21(3): 1421 – 1429.
- [9] 夏向阳, 龚芬, 周峰. 配电网中分布式并网发电装置的复合控制策略 [J]. 高电压技术, 2011, 37(8): 2010 – 2015.
(XIA Xiangyang, GONG Fen, ZHOU Feng. Composite control strategy in distributed grid-connected generation devices of distribution network [J]. *High Voltage Engineering*, 2011, 37(8): 2010 – 2015.)
- [10] 姜春霞, 贾文超, 宗鸣. 有源电力滤波器在分布式发电系统中的应用 [J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(22): 50 – 53.
(JIANG Chunxia, JIA Wenchao, ZONG Ming. Application of active power filter in distributed power system [J]. *Power System Protection and Control*, 2008, 36(22): 50 – 53.)
- [11] 戎袁杰, 李春文, 李建敏, 等. 基于燃料电池的电能质量控制器设计 [J]. 电机与控制学报, 2009, 13(1): 52 – 55.
(RONG Yuanjie, LI Chunwen, LI Jianmin, et al. Design of fuel cell based power quality control device [J]. *Electric Machines and Control*, 2009, 13(1): 52 – 55.)
- [12] RONG Y J, LI C W, DING Q Q. An adaptive harmonic detection and a novel current control strategy for unified power quality conditioner [J]. *Simulation Modeling Practice and Theory*, 2009, 17(5): 955 – 966.
- [13] BHENDE C N, MISHRS S, JAIN S K. TS-fuzzy-controlled active power filter for load compensation [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, 21(3): 1459 – 1465.
- [14] WANG L X. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy System*, 1993, 1(2): 146 – 155.
- [15] 徐长波, 王荣蓉, 李春文. 自适应模糊控制在三相三线有源电力滤波器中的应用 [C] //中国控制会议. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
(XU Changbo, WANG Rongrong, LI Chunwen. Application of adaptive fuzzy control in three-phase three-wire shunt active power filter [C] //*Proceedings of the 27th Chinese Control Conference*. Beijing: Beihang University Press, 2008.)

作者简介:

徐长波 (1982–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为电能质量谐波治理与非线性控制策略的应用, Email: xcb07@mails.tsinghua.edu.cn;

李春文 (1958–), 男, 博士, 教授, 目前研究方向为非线性系统分析与控制、电力系统控制及运动控制等, E-mail: lcw@tsinghua.edu.cn;

鲁伟 (1987–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为电力系统非线性控制及电能质量分析与治理, E-mail: lu-w09@mails.tsinghua.edu.cn.