

基于并联谐振的新型混合有源滤波器研究

牟龙华¹, 张大伟², 周伟¹

(1. 同济大学电气工程系, 上海 200092; 2. 成都电业局调度通信监控中心, 四川 成都 610021)

摘要: 为了有效地抑制谐波和补偿无功, 提出一种新型并联混合型有源电力滤波器拓扑结构, 通过加入基波并联谐振电路和旁路电感, 使得混合有源滤波器在保证无功补偿容量的同时, APF 不再承受基波电压, 减小了 APF 容量, 并对其工作原理进行了详细的分析。采用 Matlab 和电力系统暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 进行仿真实验, 实验结果证明了设计方案的有效性和正确性。

关键词: 混合有源滤波器; 并联谐振; PSCAD/EMTDC; 模糊控制

Research on a novel hybrid active power filter based on shunt resonance

MU Long-hua¹, ZHANG Da-wei², ZHOU Wei¹

(1. Department of Electrical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Chengdu Electric Power Bureau Dispatch Communication & Monitoring Center, Chengdu 610021, China)

Abstract: In order to satisfy the requirement of reactive compensation and harmonic suppression, a new topology of shunt hybrid active power filter is proposed. In the new topology, a fundamental frequency shunt resonance circuit and bypass inductor are introduced so as to reduce the capacity of APF while remains the capacity of reactive compensation. The working principle of the new topology is described. At last, simulation experiments are done with Matlab and PSCAD / EMTDC software and the results verify the effectiveness and validity of the new topology.

Key words: hybrid active power filter; shunt resonance; PSCAD / EMTDC; fuzzy control

中图分类号: TM76; TN713.8 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)18-0162-05

0 引言

电力电子装置的广泛应用, 电网中的谐波污染日趋严重。同时, 各种电气设备以及电力用户对电能质量的要求越来越高, 愈发严重的谐波污染与越来越高的电能质量要求形成了一对尖锐的矛盾。混合有源电力滤波器^[1]兼具无功补偿和谐波治理的功能, 近年来, 混合有源电力滤波器的研究得到了快速发展, 目前学术界已提出多种拓扑结构和控制算法^[2-12], 并逐步投入工业应用。文献[2]提出的注入式混合有源滤波器, 采用新颖的注入式电路, APF 仍起谐波补偿的目的, 无源部分分担大部分谐波和无功补偿, 减小了有源部分的容量。文献[3]提出的串联有源电力滤波器, 其有源部分仅需对注入电网系统的高次谐波进行补偿, 有效地降低了有源部分的容量。文献[4]提出了一种在传统并联混合有源滤波器变压器侧并

联小电感的拓扑结构, 该结构能有效地降低有源部分的容量, 是提高装置容量、降低装置成本的一种良好选择。但如何提高无功补偿容量, 并进一步减小有源部分容量, 提高装置性能, 降低装置成本, 是目前亟待解决的难题。本文在对传统 HAPF 原理分析的基础上, 提出一种新型混合有源滤波器拓扑结构, 有效降低 APF 容量, 提高滤波性能, 并通过仿真实验得到验证。

1 并联混合有源滤波器结构与原理

传统并联混合有源滤波器 (Shunt Hybrid Active Power Filter, SHAPF) 结构^[6]中, 有源电力滤波器通过变压器耦合之后与无源滤波器组串联再与电网并联。有源部分不但要进行谐波抑制, 还要承担一定的基波无功补偿, 从而使得有源部分的容量增大, 提高了装置的成本与控制复杂程度。为了进一步降低 APF 容量、提高无功补偿容量, 本文在对传统 SHAPF 分析的基础上, 提出一种基于并联谐振的混合有源电力滤波器 (Shunt Resonance Type Hybrid

基金项目: 浙江省科技计划项目 (2007C16034); 国家火炬计划项目 (2008GH040894)

Active Power Filter, SRHAPF) 拓扑结构, 如图 1 所示。无源滤波器组采用单调谐结构, C_3 、 L_3 、 C_5 、 L_5 、 C_7 、 L_7 分别针对 3、5、7 次电网特征谐波进行滤除, 能够将谐波完全或大部分吸收, 使系统电压的畸变减小。而对于基波频率, 滤波电容器组可向系统提供无功功率以提高功率因数, 达到无功补偿的效果。 R_n 与 L_n 并联后再与 C_n 串联构成高通滤波器, 高通滤波回路在高于某个频率之后有很宽的频带范围, 用来吸收若干较高频率的高次谐波, 达到滤波效果, 同时补偿无功功率、减少电压畸变。 L 、 C 并联谐振电路调谐于工频, 使得 APF 不承受基波电压; 变压器侧并联小电感 L_a 、 L_b 、 L_c , 使得大部分谐波电流流过电感, 从而有源部分的容量进一步减小。而与 L 、 C 谐振电路并联的小电感 L_1 保证了系统的无功补偿容量不会受到影响。

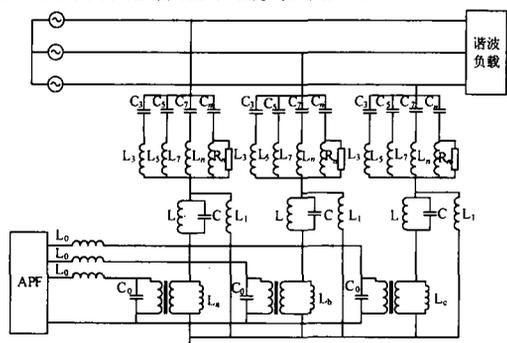


图 1 Novel SRHAPF topology
Fig.1 Novel SRHAPF topology

2 滤波补偿原理分析

如图 2 所示为新型 SRHAPF 拓扑结构的单相等效电路, 其中 U_s 为系统电源, i_s 为系统电流, Z_s 为系统等效阻抗, Z_{PF} 为无源滤波器组等效阻抗, Z_a 为 L 、 C 并联谐振电路等效阻抗, Z_b 为并联电感 L_1 的等效阻抗, U_a 为 APF 等效电压源, I_L 为等效谐波负载电流源, U_n 为谐振阻抗点的对地电压, U_L 为谐波负载两端的电压, 流过 APF 与 Z_b 支路的电流分别为 i_a 和 i_b 。

由文献[6]有:

$$U_a = Ki_s \quad (1)$$

对图 2, 由基尔霍夫定律可得:

$$\begin{cases} U_s = Z_s i_s + U_n - Z_{PF} i_c \\ U_n = Z_b i_b \\ Z_b i_b = Z_a i_a + U_a \\ i_L = i_s + i_c \\ i_c = -(i_a + i_b) \end{cases} \quad (2)$$

由式 (1)、(2) 可以得到:

$$i_s = \frac{Z_{PF} + Z_1}{Z_{PF} + Z_s + \frac{ZK}{Z_a} + Z_1} i_L + \frac{1}{Z_{PF} + Z_s + \frac{ZK}{Z_a} + Z_1} U_s \quad (3)$$

其中, $Z_1 = Z_a // Z_b$ 。

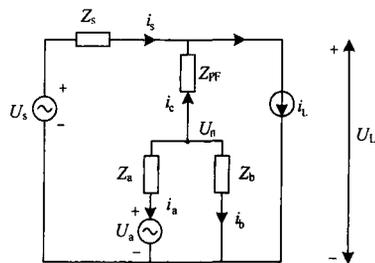


图 2 单相等效电路图

Fig.2 Single phase equivalent circuit

从式 (3) 可以看出, 在 i_L 和 U_s 为定值时, 增大 K 值, 可以减小系统电流 i_s , 从而降低有源滤波器承受的电压。对比文献[6]可得出, 增大 K 可迫使谐波电流流入无源滤波器, 当 K 足够大时, 系统的无功电流将全部流过无源滤波器组, 减小了有源部分的容量。本拓扑结构由于 LC 滤波器并联谐振于基频分量, 有源部分不承受基波电压; 同时, 并联小电感 L_1 提供基波通路, 使得装置在减小有源部分容量的同时, 保证了无功补偿容量。

3 滤波器容量分析

定义有源滤波器容量为:

$$S_{apf} = U_a \times i_a = \frac{Ki_s [Z_b(i_s - i_L) - Ki_s]}{Z_a + Z_b} \quad (4)$$

有源部分容量与需补偿负载容量间的关系为:

$$\left| \frac{S_{apf}}{S_L} \right| = \left| \frac{Ki_s [Z_b(i_s - i_L) - Ki_s]}{(Z_a + Z_b)(U_s - Z_s i_s) i_L} \right| \quad (5)$$

从式 (5) 中可以看出, 工频时, Z_a 为并联谐振等效阻抗, 且 $Z_a \rightarrow \infty$, 可以得出, 工频时:

$$S_{apf}/S_L \rightarrow 0 \quad (6)$$

从式 (6) 可知, 工频时, 有源部分不承担基波电压, 有源部分与负载容量之比趋于 0; 当为谐波电流时, 由于变压器侧并联了小电感 L_a 、 L_b 、 L_c , 使得 APF 只承受小部分谐波电流, 从而有源部分与负载容量之比很小。

4 并联电感设计

只考虑并联电感时的系统单相等效电路如图 3

所示。其中， $Z_{PF} = Z_3 // Z_5 // Z_7 // Z_n$ ，并联电感 L_1 为基波无功补偿提供通路。因此，工频时流过并联电容器组支路的电流越大，则无功补偿容量越大。

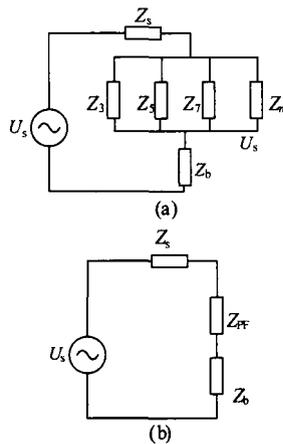


图3 只考虑并联电感 L_1 时的单相等效电路
Fig.3 Equivalent circuit of L_1

$$\text{令: } \begin{cases} Z_{PF} = R_r + \frac{1}{j\omega C_m} \\ Z_b = j\omega L_1 \end{cases} \quad (7)$$

其中： Z_{PF} 等效为阻容阻抗； ω 为系统角频率。显然，当 Z_{PF} 与 Z_b 发生串联谐振时，无功补偿支路阻抗最小，电流最大，由此可以得出：

$$L_1 = 1/\omega^2 C_m \quad (8)$$

由式 (7) 可知， Z_{PF} 与 Z_b 串联后的阻抗为：

$$Z_q = R_r + j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_m}) \quad (9)$$

显然，若：

$$\omega L_1 > 1/\omega C_m \quad (10)$$

则 Z_q 呈感性，无功补偿容量将为负，因此 L_1 取值必须满足：

$$\omega L_1 < 1/\omega C_m \quad (11)$$

L_1 取值不同时对无功补偿容量的影响如图 4 所示，图中 $C_m=6\ 000\ \mu\text{F}$ ，当 $L_1 \approx 5.3\ \text{mH}$ 时，无功补偿容量最大，超过 $5.3\ \text{mH}$ ，无功补偿容量随着 L_1 的增加而减小。当 L_1 增大到 $5.38\ \text{mH}$ 后，无功容量呈现负值。考虑实际运用中电感参数的偏差，本设计中旁路电感支路取 $5.1\ \text{mH}$ 。

对比文献[4]，由图 4 可得 L_1 取不同值时无功补偿容量 Q 如表 1 所示。其中 Q_1 为新型拓扑结构的无功补偿容量， Q_2 为文献[4]对应拓扑结构的无功补偿容量，其中 L_2 表示文献[4]拓扑结构中变压器两端的并联电感。

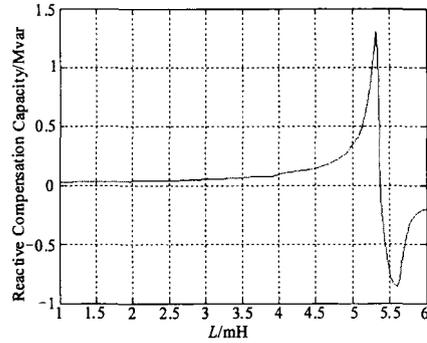


图4 L_1 取值对无功补偿容量的影响

Fig.4 Effect on reactive compensation capacity with different L_1

表 1 L_1 取值与无功补偿容量
Tab.1 L_1 and reactive compensation capacity

L_1 / mH	0	1	4.5	5.1	5.3	5.4
Q_1 / MVar	0.022	0.029	0.145	0.452	1.295	-0.575
Q_2 / MVar	0.022	0.028	0.103	0.151	0.168	-0.137

从表 1 数据可以看出，当 $L_1=0\ \text{mH}$ ，即与传统拓扑结构相同时，无功补偿容量为 $0.022\ \text{MVar}$ ；而当 $L_1=5.3\ \text{mH}$ 时，新型拓扑结构无功补偿容量为 $1.295\ \text{MVar}$ 。可见新型并联谐振型混合有源滤波器极大程度地提高了整个装置的补偿容量，适合大功率应用场合。

5 控制策略及其实现

5.1 控制系统原理分析

APF 的控制方法主要分为开环控制和闭环控制两大类，开环控制器由于未将控制效果反馈给控制器，在系统参数不精确或者系统受到干扰时，存在稳态误差，因此补偿效果较差；闭环控制器可以持续地采集控制误差，增强了实际系统的快速性。为此本文采用双闭环控制方法，采用了模糊 (Takagi-Sugeno, T-S) 自适应控制策略^[8]。模糊 T-S 自适应控制不需要构建具体的数学模型，并且不需要经过清晰化过程就可以直接用于推动控制机构，具有良好的稳定性和系统鲁棒性。

控制系统示意图如图 5 所示，外环是模糊电流控制器，内环是滞环电流控制器^[11]。APF 采用电流源型逆变器，其输出电流 i_a^* 与参考电流 i_{aref} 的比较值作为模糊 T-S 控制器的输入，根据功率平衡原理获取参考电源电流幅值 I_s ，锁相环电路 PLL 获得基波频率，构建一个不含谐波电流信号，与系统实际电流 i_{sa} 相减，由此产生的参考电流信号 i_{aref}^* 经过滞环比较器，从而产生 PWM 脉冲，控制 IPM 模块输出补偿电流。

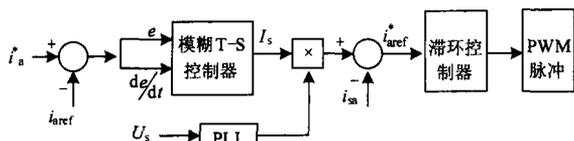


图 5 控制系统示意图

Fig.5 Control system configuration

5.2 模糊控制器算法设计

由图 5 可得, 模糊 T-S 控制器的输入为:

$$\begin{cases} z_1(t) = e(t) = i_a^* - i_{\text{aref}} \\ z_2(t) = \dot{e}(t) = \frac{d}{dt}(i_a^* - i_{\text{aref}}) \end{cases} \quad (12)$$

其中: i_a^* 为 APF 输出电流; i_{aref} 为参考电流。用一个正负相互对应的模糊集来对模糊 T-S 控制器的输入电流偏差进行模糊化。

正的模糊隶属函数为:

$$\mu_p(z_j) = \begin{cases} 0, & z_j < -H \\ \frac{-z_j + H}{2H}, & -H < z_j < H \\ 1, & z_j > H \end{cases} \quad (13)$$

负的模糊隶属函数为:

$$\mu_N(z_j) = \begin{cases} 1, & z_j < -H \\ \frac{-z_j + H}{2H}, & -H < z_j < H \\ 0, & z_j > H \end{cases} \quad (14)$$

如图 6 所示为输入变量隶属度函数示意图, H_1 、 H_2 分别为 z_1 、 z_2 的最大值。

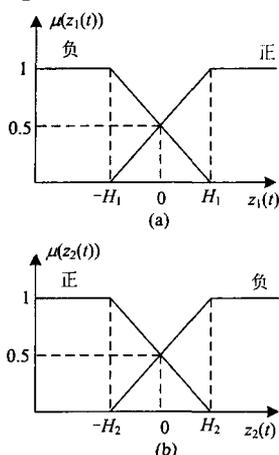


图 6 输入变量隶属函数

Fig.6 Input variable membership function

模糊 T-S 控制器运用下列四条模糊推理规则:

R1) 如果 $z_1(t)$ 为正, 且 $z_2(t)$ 为正, 则

$$u_1(t) = \alpha_1 \Delta x(t) + \beta_1 \Delta u(t) \quad (15)$$

R2) 如果 $z_1(t)$ 为正, 且 $z_2(t)$ 为负, 则

$$u_2(t) = \alpha_2 \Delta x(t) + \beta_2 \Delta u(t) \quad (16)$$

R3) 如果 $z_1(t)$ 为负, 且 $z_2(t)$ 为正, 则

$$u_3(t) = \alpha_3 \Delta x(t) + \beta_3 \Delta u(t) \quad (17)$$

R4) 如果 $z_1(t)$ 为负, 且 $z_2(t)$ 为负, 则

$$u_4(t) = \alpha_4 \Delta x(t) + \beta_4 \Delta u(t) \quad (18)$$

其中, $\Delta x(t)$ 、 $\Delta u(t)$ 为系统输入变量在 t 时刻对平衡点的偏差。由单点模糊化、乘积推理和平均加权反模糊化可得, 模糊控制器的输出为:

$$f(x, u) = \frac{\sum_{i=1}^4 \prod_{j=1}^2 \mu_{ij}(z_j(t)) (\alpha_i x + \beta_i u)}{\sum_{i=1}^4 \prod_{j=1}^2 \mu_{ij}(z_j(t))} \quad (19)$$

其中, $\mu_{ij}(z_j(t))$ 是 $z_j(t)$ 相对于模糊集合 $Z_j(t)$ 的隶属函数。将式 (19) 改写为:

$$f(x, u) = \phi(\bar{\varphi}x + \bar{\sigma}u) \quad (20)$$

其中: $\bar{\varphi} = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4]^T$; $\bar{\sigma} = [\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4]^T$;

$$\phi_j = \frac{1}{\sum_{i=1}^4 \prod_{j=1}^2 \mu_{ij}(z(t))} [\mu_{11}(z(t)), \dots, \mu_{42}(z(t))]$$

式 (20) 为模糊控制器的模糊逼近函数。

6 仿真与实验结果

为了验证本设计的有效性, 采用 PSCAD/EMTDC 与 Matlab 软件进行了仿真实验。PSCAD/EMTDC 具有非常精确的电力系统模型, 但缺少强大的函数和计算功能。因此本文采用 PSCAD/EMTDC 建模, Matlab 执行算法, 集两者的优点为一体。

无源滤波器组主要参数如表 2 所示。

表 2 无源滤波器组主要参数

Tab.2 Main parameters of passive power filters			
滤波次数	R / Ω	L / mH	$C / \mu\text{F}$
3 次	/	1.2	939.0
5 次	/	1.2	338.0
7 次	/	1.2	172.0
高通	3.0	0.26	300

LC 并联谐振参数为 $L=190 \text{ mH}$, $C=53.3 \mu\text{F}$; 旁路电感为 5.1 mH ; 变压器侧并联电感为 4 mH 。仿真实验波形如图 7~10 所示。

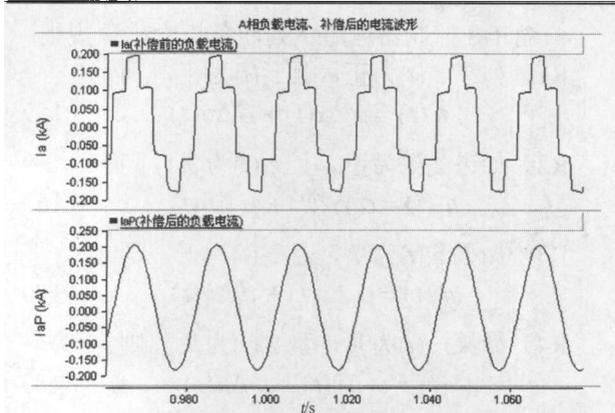


图 7 补偿前和补偿后的负载电流波形

Fig.7 Load current before and after compensation

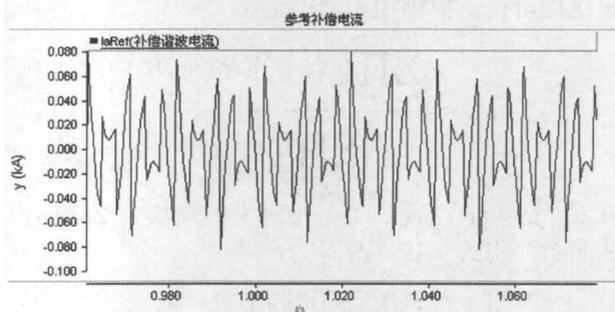


图 8 参考补偿电流

Fig.8 Reference compensation current

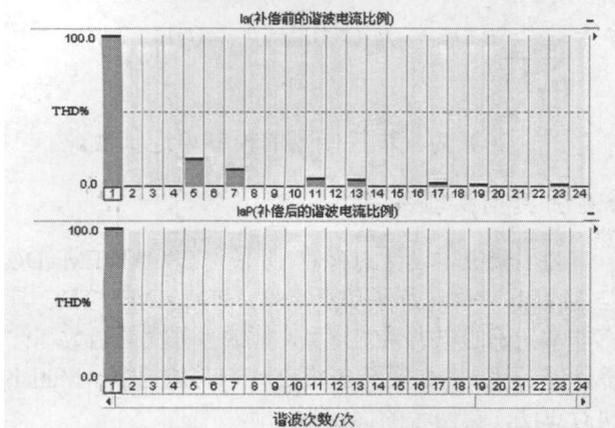


图 9 补偿前后的谐波电流比例

Fig.9 Harmonic current proportion before and after compensation

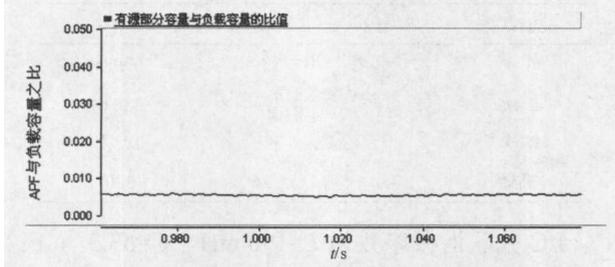


图 10 有源部分与负载的容量比

Fig.10 Capacity ratio between APF and load

从图 7、图 8 可以看出，投入新型混合有源滤波器之后，系统电流波形得到了较大改善，谐波电流比例从 27.51%降低到了 1.46%。从图 9 中可以看出，投入新型 SRHAPF 后，系统谐波得到了较好的抑制，除了少量 5、7（5 次谐波含量为 1.37%，7 次谐波含量为 0.39%）次谐波外，其他次谐波得到了较好的补偿，对电网供电环境进行了有效的改善。从图 10 中可以看出，有源部分与负载容量之比很小，为 0.52%，表明本文的设计有效地减小了有源部分的容量，降低了装置成本。

7 结论

在对传统并联混合有源滤波器研究分析的基础上，提出了一种基于并联谐振的新型混合有源滤波器拓扑结构。与无源滤波器组串联的并联谐振电路调谐于工频，使有源部分不承受基波电压；同时，旁路电感为基波无功的补偿提供通路，保证了无功补偿的容量。该新拓扑结构有效地降低了有源部分的容量，提高了滤波性能，降低了整个装置的成本。仿真实验表明此新型混合有源滤波器具有良好的谐波抑制与无功补偿性能。

参考文献

- [1] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制与无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [2] 涂春鸣, 罗安, 谭甜源. 一种新型并联混合有源滤波器的研制[J]. 电力电子技术, 2004, 38 (2): 45-47. TU Chun-ming, LUO An, TAN Tian-yuan. A novel shunt hybrid active power filter[J]. Power Electronics, 2004, 38 (2): 45-47.
- [3] 吴卫民, 童立青, 钱照明, 等. 一种高性能串联混合有源电力滤波器拓扑的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (12): 108-112. WU Wei-min, TONG Li-qing, QIAN Zhao-ming, et al. Analysis of a novel hybrid series active power filter topology[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (12): 108-112.
- [4] 杨君, 王跃, 王兆安, 等. 一种新型混合电力滤波器及其并联电感设计[J]. 电气传动, 2004, 34 (S1): 166-169. YANG Jun, WANG Yue, WANG Zhao-an, et al. A novel hybrid active power filter and design of its shunt inductor[J]. Electric Drive, 2004, 34 (S1): 166-169.
- [5] 唐杰, 罗安, 汤赐, 等. 注入式混合型有源滤波器的复合型滞环控制方法研究[J]. 电力自动化设备, 2007, 27 (10): 51-55. TANG Jie, LUO An, TANG Ci, et al. Synthesized hysteretic control of injection-type hybrid APF[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27 (10): 51-55.

(下转第 173 页 continued on page 173)

- 化, 2007, 31 (13): 77-82.
- XIE Jun, SHI Dong-yuan, YANG Zeng-li, et al. An on-line verification of relay settings and early warning system of protective relaying based on MAS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(13): 77-82.
- [13] 范玉顺, 曹军威. 多代理系统理论、方法与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- FAN Yu-shun, CAO Jun-wei. Multi-agent systems theory, method and applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [14] 何炎祥, 陈莘萌. Agent 和多 Agent 系统的设计与应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2001.
- [15] 盛万兴, 杨旭升. 多 Agent 系统及其在电力系统中的应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [16] 张士杰, 郭宏伟. 多代理系统的通信技术及其应用[J]. 计算机应用研究, 2002 (6): 15-17.
- ZHANG Shi-jie, GUO Hong-wei. The application of communication technology in the multi-agent system[J]. Application Research of Computers, 2002 (6): 15-17.
- [17] 曹国臣, 蔡伟国, 王海军. 继电保护整定计算方法存在的问题与解决对策[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (10): 51-56.
- CAO Guo-chen, CAI Wei-guo, WANG Hai-jun. Problems and solutions in relay setting and coordination[J]. Proceeding of the CSEE, 2003, 23 (10): 51-56.
- [18] 辛耀中, 卢长燕. 电力系统数据网络技术体制分析[J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (21): 1-6.
- XIN Yao-zhong, LU Chang-yan. Analysis of data network technology architecture for power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(21): 1-6.

收稿日期: 2009-09-23; 修回日期: 2010-01-20

作者简介:

陈新(1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: chenxin_sc@sina.com

吕飞鹏(1968-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统继电保护和故障信息处理智能系统;

蒋科(1983-), 男, 硕士, 从事电力调度工作。

(上接第 166 页 continued from page 166)

- [6] Peng F Z, Akagi H, Nabae A. Compensation characteristics of the combined system of shunt passive and series active filters[J]. IEEE Trans on Industry Application, 1993, 29 (1): 114-152.
- [7] 张长征, 陈乔夫, 李达义, 等. 一种高压大容量有源电力滤波器研究[J]. 电力自动化设备, 2006, 26 (1): 17-20.
- ZHANG Chang-zheng, CHEN Qiao-fu, LI Da-yi, et al. Research on high voltage large capacity active power filter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26 (1): 17-20.
- [8] Bhende C N, Mishra S, Jain S K. TS-fuzzy-controlled active power filter for load compensation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21 (3): 1459-1465.
- [9] 陈艳, 王赛英. 混合型有源滤波器在衡钢供电系统的应用研究及参数设计[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (24): 51-57.
- CHEN Yan, WANG Sai-ying. Application research and design parameters of hybrid active power filter on the Hengyang steel electric power system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (24): 51-57.
- [10] Shyu Kuo-kai, Yang Ming-ji, Chen Yen-mo. Model reference adaptive control design for a shunt active-power-filter system[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2008, 55 (1): 97-106.
- [11] Krzysztof Sozafiski, Marcin Jamut. Three-phase active power filter using the sliding DFT control algorithm[C]. // Power Electronics and Applications, 2005 European Conference. 2005: 1-10.
- [12] Hideaki Fujita, Hirohmi Akagi. A practical approach to harmonic compensation in power systems-series connection of passive and active filters[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1991, 27 (6): 1020-1025.

收稿日期: 2009-09-15; 修回日期: 2009-11-03

作者简介:

牟龙华(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统微机保护与电能质量;

张大伟(1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统谐波治理与无功补偿技术; E-mail: zdw_1@126.com

周伟(1977-), 男, 讲师, 博士研究生, 研究方向为电力系统谐波治理与无功补偿技术。