

DOI: 10.7667/PSPC151403

# 有源滤波器故障诊断与容错控制改进策略的研究

汪玉凤<sup>1</sup>, 孟庆达<sup>1</sup>, 刘涛<sup>2</sup>, 李国华<sup>1</sup>

(1. 辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105;

2. 国网辽宁省电力有限公司阜新供电公司, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:** 为了能够改善并联型三相四开关有源电力滤波器的容错能力, 提高滤波器的可靠性, 针对 SAPF(Shunt Active Power Filter, SAPF)的故障诊断策略, 提出了一种能够快速反应故障类型和故障位置的混杂系统模型法。通过对系统输出电流残差演变规律判断, 识别故障源。再运用对应容错切换策略切除故障桥臂, 使 SAPF 在容错状态下继续工作。同时, 通过对 SAPF 补偿算法的研究, 得出了更适合 SAPF 容错切换的电源电流跟踪补偿策略。并在此基础上添加了前馈控制来消除容错状态下直流侧分裂电容中点电位不平衡的影响, 使补偿效果更好。实验和仿真验证了该方法的有效性。

**关键词:** 有源电力滤波器; 电流残差; 混杂系统; 电源电流跟踪补偿; 前馈控制

## Research of improved strategy for active power filter fault diagnosis and fault tolerant control

WANG Yufeng<sup>1</sup>, MENG Qingda<sup>1</sup>, LIU Tao<sup>2</sup>, LI Guohua<sup>1</sup>

(1. Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;

2. Fuxin Power Supply Company of Liaoning Power Co., Ltd., Fuxin 123000, China)

**Abstract:** In order to improve fault tolerance of three-phase four-switch shunt active power filter and increase the reliability of the filter, and for the troubleshooting of SAPF, this paper presents a fast response fault type and fault location by hybrid system dynamic model and identifying sources of error through its evolution of the residual of system output current. Fault-tolerant switching strategy is utilized to remove the corresponding fault arm, so SAPF under the circumstance of fault-tolerant model continues working. At the same time, this paper obtains the source current tracking compensation strategy, which is more suitable for fault-tolerant switching SAPF, through the study of SAPF compensation algorithm. Furthermore, feedforward control is added to eliminate influence of split capacitors unbalanced midpoint electrical potential of DC side under fault-tolerant state, the effect of compensation is more significant. Experiments and simulations verify the effectiveness of the method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307076).

**Key words:** active power filter; current residuals; hybrid system dynamic; source current tracking compensation; feedforward control

## 0 引言

并联型有源电力滤波器(Shunt Active Power Filter, SAPF)是一种新型谐波抑制、无功补偿电力电子装置<sup>[1]</sup>。SAPF 的核心组成部分是逆变器, 但是由于开关的频率较高, 且功率器件长时间工作在高温、高频状态, 是易损坏的器件, 一旦发生故障, SAPF 整个系统都不能正常工作, 严重时甚至可能导致灾

难性的后果<sup>[2-3]</sup>。近几年随着逆变器的不断发展, 出现了许多具有良好效果的 SAPF 容错控制策略, 但是其中也有不足之处<sup>[4-6]</sup>: 文献[4]所提出的容错策略虽然能够实现容错控制的运行, 但是无法分辨是短路还是开路故障, 且故障检测时间较长, 实际效果不明显; 文献[5]中所提出的新型故障诊断方法很实用, 但是其容错控制策略中没有考虑到直流中点电位不平衡的影响, 使得 SAPF 的补偿效果大大降低; 文献[6]中容错控制策略能够达到良好的补偿效果, 精度也比较高, 但控制方法繁琐, 矢量运算复杂,

基金项目: 国家自然科学基金项目(51307076)

实现起来较困难。

本文提出了一种基于三相四开关的容错型并联有源滤波器<sup>[8]</sup>。其故障诊断方法是运用混杂系统模型方法,通过对系统电流状态残差特征值的检测,能够准确而快速地判断出 SAPF 的故障类型与故障位置,为 SAPF 的维护节省了时间;容错控制策略采用电压前馈控制的电源电流跟踪方法,克服了分裂电容引起直流中点电位偏移对系统的影响,改善了系统的控制精度,避免了容错切换对系统的冲击,在保证良好的补偿效果的同时,提高了系统的可靠性。

### 1 容错型 SAPF 的拓扑及原理

容错型并联有源电力滤波器,其实质主要就是将桥臂冗余用串联的分裂电容代替<sup>[9-10]</sup>。如图 1 所示,当 SAPF 的逆变器工作在正常状态时,  $T_{R1}$ 、 $T_{R2}$ 、 $T_{R3}$  三个双向三端可控硅开关处在关断状态,快速熔断器  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  处在闭合状态,逆变器呈三相六开关状态稳定运行。一旦检测到有一桥臂出现开路或者短路(这里假设 C 相桥臂出现故障),  $F_3$  快速熔断将故障桥臂隔离,使双向可控硅开关  $T_{R3}$  导通,把故障桥臂 C 隔离,并且将故障相的输出直接接到直流侧分裂电容中点处,用容错的方式使 SAPF 在 三相四开关状态下维持运行。

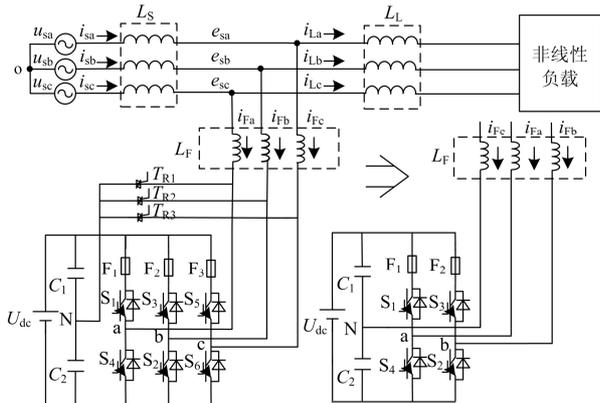


图 1 容错型三相四开关 SAPF 拓扑结构

Fig. 1 Fault-tolerant type three-phase four-switch SAPF topology

### 2 容错型 SAPF 故障诊断法

SAPF 的逆变器中绝缘栅双极型晶体管(IGBT)的最常见故障是短路和开路故障。考虑到短路的故障诊断时间很短(多以微秒为单位),难以实时检测,因此本设计中 SAPF 的逆变器的每一相桥臂都植入快熔 F,如果短路故障发生,快熔 F 迅速熔断把短路故障转化为开路故障,这样就可由熔断器的开断

来确定短路故障还是开路故障了,方便系统维修。

### 2.1 基于 HSD 模型的故障诊断原理

SAPF 中既包括开关信号等离散变量,也包括电流、电压等连续变量,是典型的混杂系统(Hybrid System Dynamic, HSD),通常可以根据状态参数变化趋势特征作为故障判断的依据,其诊断原理如图 2 所示。

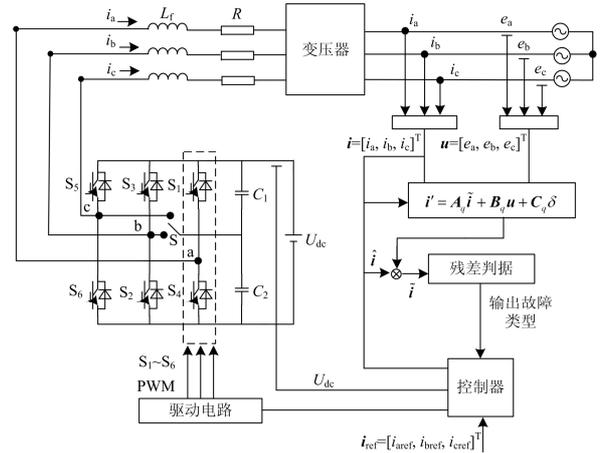


图 2 HSD 模型下的故障识别原理

Fig. 2 Fault recognition principle under HSD model

建立 SAPF 连续工作情况下,包含相应状态规律和开关信息的 HSD 模型:

$$i' = A_q i + B_q u + C_q \delta_1 \quad (1)$$

式中:  $A_q$  和  $B_q$  是故障事件  $q$  状态矩阵与控制矩阵;  $C_q$  是输出矩阵;  $i$  为输出电流向量;  $u$  为输出电压向量;  $\delta$  为离散开关控制信息与电路工作状态的逻辑描述。其次建立状态观测器:

$$i' = A_q \hat{i} + B_q u + C_q \delta_2 \quad (2)$$

综上两式,由于 SAPF 的三相输出电压状态稳定不变,可得电流的残差方程为

$$i' = A_q \tilde{i} + C_q (\delta_2 - \delta_1) \quad (3)$$

若能解得电流残差得到电流残差演变规律,就可判断 SAPF 潜在的故障类型和故障部位。

### 2.2 SAPF 的 HSD 模型

以下建立三相六开关 SAPF 的 HSD 模型,由图 1 和图 2 可得正常模式下三相六开关 SAPF 的连续模型为

$$\begin{cases} u_{a0} = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + \frac{e_a}{n_1} = u_{aN} - u_{oN} \\ u_{b0} = L_b \frac{di_b}{dt} + R_b i_b + \frac{e_b}{n_1} = u_{bN} - u_{oN} \\ u_{c0} = L_c \frac{di_c}{dt} + R_c i_c + \frac{e_c}{n_1} = u_{cN} - u_{oN} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $n_1$  为变压器变比;  $u_{0N}$  为电源中点与直流侧负载电位差。

由于 HSD 模型中, 影响 SAPF 输出变化因素除了开关组合外, 还有电路工作状态直接相关。在此引入  $\sigma$  来描述各桥臂的工作状态, 以 C 相为例:

$$\sigma_c = \begin{cases} 1, & i_c > 0 \\ 0, & i_c < 0 \end{cases} \quad (5)$$

设图 1 中所标注的电流方向为正, 定义状态量  $\mu_1 \sim \mu_6$ , 当值为 1 时表示所代表的 IGBT 导通, 为 0 表示关断。则 C 相状况可以表示为

当  $\sigma_c=1$  时

$$u_{cN} = \begin{cases} 0 & \mu_5 = 0, \mu_6 = 1 \\ U_{dc} & \mu_5 = 1, \mu_6 = 0 \\ 0 & \mu_5 = 0, \mu_6 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

当  $\sigma_c=0$  时

$$u_{cN} = \begin{cases} 0 & \mu_5 = 0, \mu_6 = 1 \\ U_{dc} & \mu_5 = 1, \mu_6 = 0 \\ U_{dc} & \mu_5 = 0, \mu_6 = 0 \end{cases} \quad (7)$$

由此, C 相输出电压可用电路状态和开关组合表示为

$$u_{cN} = U_{dc}(\mu_5 \bar{\mu}_6 \sigma_c + \mu_5 \bar{\mu}_6 \bar{\sigma}_c + \bar{\mu}_5 \bar{\mu}_6 \bar{\sigma}_c) = U_{dc}(\mu_5 \bar{\mu}_6 + \bar{\mu}_5 \bar{\mu}_6 \bar{\sigma}_c) \quad (8)$$

综合 A 相和 B 相的输出电压关系, 可得三相输出电压为

$$\begin{bmatrix} u_{aN} \\ u_{bN} \\ u_{cN} \end{bmatrix} = \frac{U_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_1 \bar{\mu}_4 + \bar{\mu}_1 \bar{\mu}_4 \bar{\sigma}_a \\ \mu_2 \bar{\mu}_3 + \bar{\mu}_2 \bar{\mu}_3 \bar{\sigma}_b \\ \mu_5 \bar{\mu}_6 + \bar{\mu}_5 \bar{\mu}_6 \bar{\sigma}_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

将上式代入式(4)中可得

$$i'_c = \frac{-R}{L} i_c - \frac{1}{L} u_{co} + \frac{U_{dc}}{3L} [-1 \ -1 \ 2] \begin{bmatrix} \mu_1 \bar{\mu}_4 + \bar{\mu}_1 \bar{\mu}_4 \bar{\sigma}_a \\ \mu_2 \bar{\mu}_3 + \bar{\mu}_2 \bar{\mu}_3 \bar{\sigma}_b \\ \mu_5 \bar{\mu}_6 + \bar{\mu}_5 \bar{\mu}_6 \bar{\sigma}_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

### 2.3 基于电流状态残差开路诊断方法

以 C 相故障为例, 若故障后  $S_5$ , 将其定义为一个故障事件; 则无论控制信号如何变化,  $\mu_1=0$ , 则此时故障向量为

$$\sigma_{c5} = \begin{bmatrix} \mu_1 \bar{\mu}_4 + \bar{\mu}_1 \bar{\mu}_4 \bar{\sigma}_a \\ \mu_2 \bar{\mu}_3 + \bar{\mu}_2 \bar{\mu}_3 \bar{\sigma}_b \\ \bar{\mu}_6 \bar{\sigma}_c \end{bmatrix} \quad (11)$$

则结合上式可得  $S_5$  开关故障后电流残差方程:

$$i' = A_q \tilde{i} + \frac{U_{dc}}{3L} (\mu_5 \bar{\mu}_6 + \bar{\mu}_5 \bar{\mu}_6 \bar{\sigma}_c - \bar{\mu}_6 \bar{\sigma}_c) [2 \ -1 \ -1]^T \quad (12)$$

同理可得  $S_6$  与  $S_5$ 、 $S_6$  共同开路的故障向量, 由此可得相应输出电流残差方程。

综合上述电流残差方程, 定义  $v$  为开路特征:

$$v = \begin{cases} \mu_5 \bar{\mu}_6 + \bar{\mu}_5 \bar{\mu}_6 \bar{\sigma}_c - \bar{\mu}_6 \bar{\sigma}_c, & S_5 \text{ open} \\ \mu_5 \bar{\mu}_6 + \bar{\mu}_5 \bar{\mu}_6 \bar{\sigma}_c - \mu_5 - \bar{\mu}_5 \bar{\sigma}_c, & S_6 \text{ open} \\ \mu_5 \bar{\mu}_6 + \bar{\mu}_5 \bar{\mu}_6 \bar{\sigma}_c - \bar{\sigma}_c, & S_5, S_6 \text{ open} \end{cases} \quad (13)$$

根据残差方程, 可以解得 C 相开路故障情况下 SAPF 的残差方程一般为

$$\begin{cases} \tilde{i}_a = -\frac{U_{dc} v}{3R} (1 - e^{-\frac{R}{L} t}) \\ \tilde{i}_b = -\frac{U_{dc} v}{3R} (1 - e^{-\frac{R}{L} t}) \\ \tilde{i}_c = \frac{2U_{dc} v}{3R} (1 - e^{-\frac{R}{L} t}) \end{cases} \quad (14)$$

所以可以看出, SAPF 在 C 相桥臂不同开路故障时, 三相电流残差主要取决于故障特征  $v$ , 而不同的故障模式有不同的故障特征值, 如表 1 所示。

表 1 不同故障下的故障特征值

$(\mu_5, \mu_6, \sigma_c)$	$v$		
	$S_5$ 开路	$S_6$ 开路	$S_5, S_6$ 开路
0 0 0	0	0	0
0 0 1	0	0	0
0 1 0	0	-1	-1
0 1 1	0	0	0
1 0 0	0	0	0
1 0 1	1	0	1

将表 1 代入式(14), 可得电流状态残差变换特征:

1) 若  $S_5$  所在的支路开路, 则 C 相电流状态残差均值大于 0, 且在 101 组合时满足

$$\tilde{i}_c = -2\tilde{i}_b = -2\tilde{i}_a > 0$$

2) 若  $S_6$  开路, 则 C 相电流残差均小于 0, 且在 010 组合时满足  $\tilde{i}_c = -2\tilde{i}_b = -2\tilde{i}_a < 0$ 。



值约为 1/6。这种方法不但可以将三相四开关 SAPF 的负载谐波电流侧所需的四个电流传感器降为两个, 而且还能够简化计算, 降低器件要求, 实现方法简单。

#### 4 仿真与实验

为了验证本文所提出的容错型 SAPF 的可行性, 本文利用 Matlab 软件进行仿真验证。假设以 C 相在 0.1 s 故障发生, 三相六开关 SAPF 逆变器通过故障诊断和容错切换, 短时间切换为三相四开关 SAPF 逆变器, 同时加入电压前馈补偿来抑制三相四开关 SAPF 中分裂电容的直流中点偏移, 可以达到的仿真波形如图 5 所示。

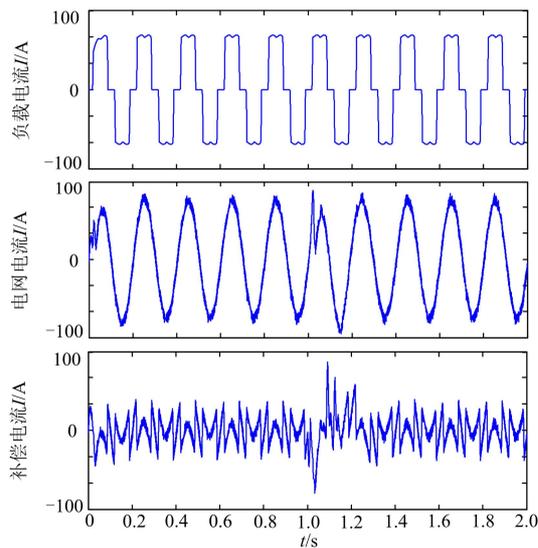


图 5 负载侧电流、网侧电流和补偿电流的仿真波形  
Fig. 5 Simulated waveforms of load current, grid current and compensation current

为了能够验证该方法的实践性, 搭建了容错型 SAPF 的实验样机, 通过对 C 相故障模拟, 来验证方法的可行性。样机电路参数如下: 电网线电压 380 V, 频率 50 Hz; 阻感负载中电阻为 10  $\Omega$ , 电感为 5 mH, 功率为 1 kW, 直流侧电容为 2 200  $\mu\text{F}$ ; 直流侧电压为 1 200 V, IGBT 的额定电压为 1 700 V, 额定电流为 100 A。

图 6 为 SAPF 直流侧电容  $C_1$  和  $C_2$  的电压  $U_{C1}$  和  $U_{C2}$  的实验波形, 达到稳态后两电容的电压值大致相等, 都约为 1 100 V 左右, 且  $\Delta U$  的幅值很小仅为 2 V 左右, 可以忽略不计, 可以认为直流中点电位平衡控制较好。

图 7 是故障容错策略的实验波形, 其中最后两图中上为正常模式下(六开关)的实验波形, 下为容

错模式(四开关)下的波形。

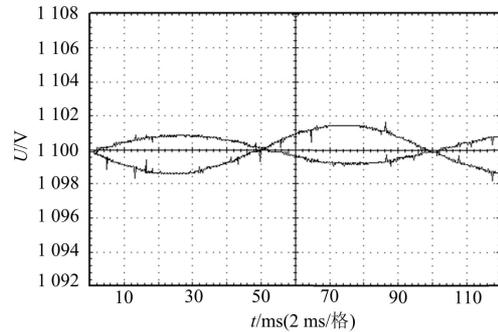


图 6 分裂电容  $C_1$  和  $C_2$  的电压值实验波形  
Fig. 6 Division capacitors  $C_1$  and  $C_2$  of the voltage waveform experiments

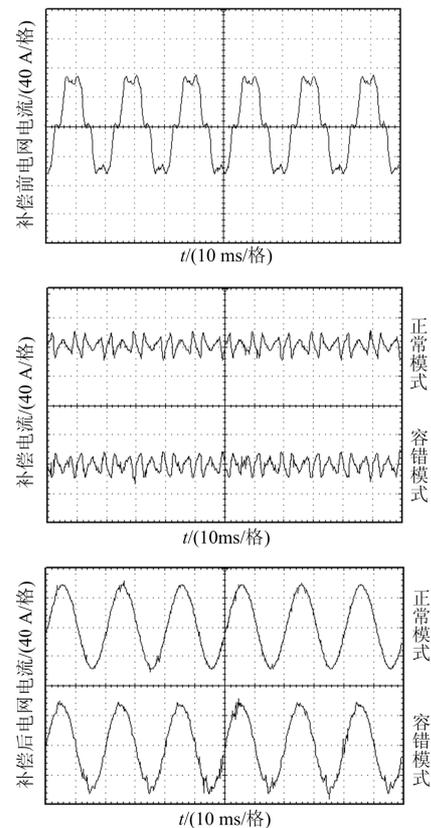


图 7 补偿前电流、补偿电流和补偿后电流的实验波形  
Fig. 7 Experimental waveforms of before compensation current, compensation current and compensated current

如图 8 所示, 正常模式和容错模式补偿完电网电流波形测得的 FFT 柱形图分别为 2.69% 和 7.23%。由以上几个图的对比, 可以得出正常模式下 SAPF 补偿效果更加优良, 这是由于容错切换过程会引起谐波的增加, 就作为容错控制技术的后备运行状态而言, 三相四开关 SAPF 也是具有一定的参考价值的。

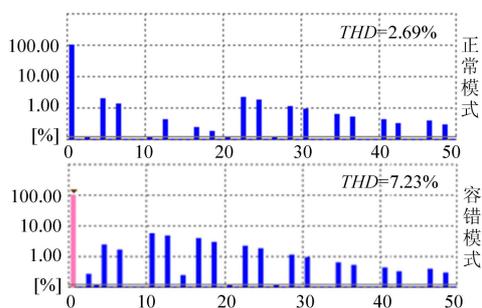


图 8 两种状态下的 THD 值对比

Fig. 8 THD value comparison of the two states

## 5 结论

本文提出了一种容错型并联有源滤波器，详细阐述了拓扑切换和运行原理。该滤波器故障诊断方法可以快速判断故障位置，方便系统维修故障。结合容错拓扑切换提出的电源电流跟踪补偿策略，不但保证了补偿效果，而且易于容错切换的实现。电压前馈控制抑制了直流中点电位不平衡，使容错状态下系统补偿效果更加稳定。

## 参考文献

- [1] 王伟, 周林, 徐明. 有源电力滤波器控制方法综述[J]. 继电器, 2006, 34(20): 81-86.  
WANG Wei, ZHOU Lin, XU Ming. Control method of active power filter[J]. Relay, 2006, 34(20): 81-86.
- [2] 时丽君, 赵建国. 有源电力滤波器在电能质量控制中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(1): 67-71.  
SHI Lijun, ZHAO Jianguo. Application of active power filter to improve power quality[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2002, 14(1): 67-71.
- [3] 王广柱. 并联型有源电力滤波器电流控制的等效原理[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(15): 40-45.  
WANG Guangzhu. Equivalence principle of current control for shunt active power filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(15): 40-45.
- [4] 李刚, 樊晓平, 彭劲杰. 三相四开关结构的容错型有源电力滤波器[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(2): 88-92.  
LI Gang, FAN Xiaoping, PENG Jinjie. Fault-tolerant active power filter based on 3-phase 4-switch structure[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(2): 88-92.
- [5] 董伟杰, 白晓民, 朱宁辉, 等. 电力有源滤波器故障诊断与容错控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(18): 65-72.  
DONG Weijie, BAI Xiaomin, ZHU Ninghui, et al.

- Research on fault diagnosis and fault tolerant control of active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(18): 65-72.
- [6] 刘宏超, 吕胜民, 张春晖. 三相四开关并联型有源电力滤波器的 SVPWM 调制算法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(4): 128-134.  
LIU Hongchao, LÜ Shengmin, ZHANG Chunhui. Space vector pulse width modulation of three-phase four-switch shunt active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(4): 128-134.
- [7] 谭兴国, 李庆民, 王辉. 电压不平衡情况下三相 4 开关有源电力滤波器电流参考值[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 3101-3108.  
TAN Xingguo, LI Qingmin, WANG Hui. Current reference generating strategy for three-phase four-switch active power filter under unbalanced voltage scenario[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 3101-3108.
- [8] 马草原, 孙富华, 朱蓓蓓, 等. 神经网络算法的改进及其在有源电力滤波器中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 142-148.  
MA Caoyuan, SUN Fuhua, ZHU Beibei, et al. Study on algorithm improvement of BP neural networks and its application in active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 142-148.
- [9] 李满, 钱平. 基于空间矢量控制策略实现的有源电力滤波器的建模与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 87-93.  
LI Man, QIAN Ping. Modeling and analysis of APF based on the strategy of SVPWM[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 87-93.
- [10] 杨天, 霍琳琳. 一种柔性直流输电系统 PID-ANFIS 优化控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 29-37.  
YANG Tian, HUO Linlin. A control method of PID-ANFIS controller for VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 29-37.

收稿日期: 2015-08-11

作者简介:

汪玉凤(1962-), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统及其自动化以及节能型电力传动技术;

孟庆达(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: 471195431@qq.com

刘涛(1981-), 男, 工程师, 从事电气自动化方面的研究。

(编辑 魏小丽)