

并联有源电力滤波器双滞环电流控制策略

叶小军¹, 曾江¹, 王克英¹, 徐大勇²

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 惠州供电局调度中心, 广东 惠州 516001)

摘要: 提出了一种基于最优电压矢量的并联有源电力滤波器双滞环电流控制策略, 用于快速控制三相有源电力滤波器的相间误差电流, 同时可减少高次谐波、加快响应速度。采用滞环比较器确定参考电压矢量所在的区域, 另根据误差电流矢量的越界情况及所在区域采用不同的控制策略来选择输出开关矢量, 同时, 引入当前开关状态信号和各相电流幅值信号, 来辅助开关矢量的选择。仿真结果证明了该方法的有效性和可行性。

关键词: 有源电力滤波器; 电流跟踪; 双滞环控制; 最优电压矢量; 谐波

Double hysteresis current control strategy for shunt active power filter

YE Xiao-jun¹, ZENG Jiang¹, WANG Ke-ying², XU Da-yong²

(1. Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Huizhou Power Supply Bureau, Huizhou 516001, China)

Abstract: A novel double hysteresis current control strategy based on optimal voltage vector is proposed for shunt active power filter (SAPF). This new strategy can well control inter-phase error current, decrease high-order harmonics and increase responding velocity. Hysteresis comparators are adopted to determine the location region of reference voltage vector, output switching vector is selected according to the location area of error current vector and whether the error current is beyond the mark. Meanwhile, the switching state and phase current signal is used to assist the output vector selection. Simulation results show that the proposed novel method is valid and feasible.

Key words: active power filter; current tracking; double hysteresis control; optimal voltage vector; harmonic

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)09-0060-05

0 引言

当前人们的生产、生活对电能质量的要求越来越高, 而与此同时, 以谐波污染为代表的电能质量问题正随着电网中电力电子器件的快速增加而越发严重, 对谐波的治理已成为电网的紧迫需求。

有源滤波技术是治理谐波污染的一种有效手段^[1-3], 而且有源电力滤波器 APF (Active Power Filter) 可以同时动态补偿谐波电流和无功功率, 所以自从 20 世纪 80 年代 APF 的概念被提出以来, 就一直受到人们的广泛关注。典型并联有源电力滤波器 (SAPF) 的基本原理框图如图 1 所示。

目前 SAPF 主要是以电压型逆变器来实现电流的补偿, 而对其电流控制方式的研究很多, 主要有单周控制、滞环电流控制、三角波控制、空间矢量控制、无差拍控制、滑模控制、重复控制、预测控制、无源性控制、人工神经网络控制等多种, 但目前采用较多的电流跟踪控制方法是三角波控制方法

和滞环电流控制方法^[4,5]。前者开关频率恒定, 装置安全性较高, 但响应较慢, 精度较低; 后者可以获得较好的控制性能, 精度较高且响应较快, 但开关频率波动可能较大, 不利于滤波的设计和装置的安全。引入电压空间矢量来改善滞环控制方法的性能, 已成为一种趋势^[6-11], 这种方法能有效降低开关频率波动范围, 提高直流电压利用率。

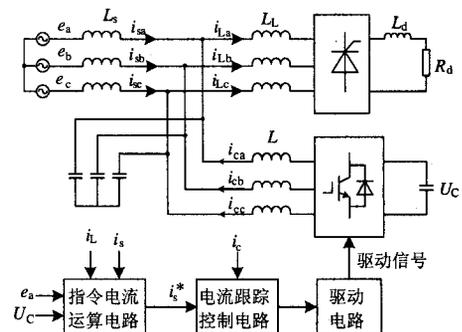


图 1 SAPF 原理图

Fig.1 Circuit diagram of SAPF

本文提出了一种基于最优电压矢量的 SAPF 双滞环电流控制方法。该方法以相间电流误差作为控制对象, 采用滞环比较器来确定参考电压矢量所在的区域, 另外根据误差电流越界情况及越界区域来确定相应的控制策略, 并结合当前开关信号和各相电流大小信号来优化选择输出矢量, 从而尽可能降低开关损耗。该方法具有较高的响应速度和控制精度, 且损耗较低, 故能有效限制误差电流, 改善电流跟踪性能, 且计算量小, 实现简单。

1 并联有源电力滤波器的矢量控制原理

图 2 为典型的基于电压源逆变器(VSI)的 SAPF 的等值电路, 逆变器直流侧电压为 U_C , 三相输出电压分别为 u_a 、 u_b 、 u_c , 经元件 R 、 L 与三相电压源 e 相连接, 其输出电流分别为 i_{ca} 、 i_{cb} 、 i_{cc} 。图中用理想开关代替了实际的开关器件, 并引入开关函数 s_a 、 s_b 、 s_c 。

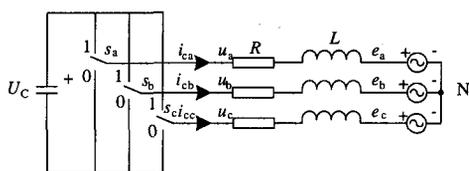


图 2 三相电压逆变器等值电路

Fig.2 Equivalent circuit of three phase VSI

假定直流侧电容电压为恒定值 U_C , 系统电压为 e , 则图 2 中三相电路瞬时值方程为:

$$u_w = Ri_{cw} + Ldi_{cw}/dt + e_w \quad (w \text{ 为 } a, b, c \text{ 之一}) \quad (1)$$

式中所有电压均以系统中性点 N 为参考点。

图 2 中逆变器共有 8 种开关模式, 相应的 SAPF 输出相电压如下:

$$\begin{cases} u_a = (2s_a - s_b - s_c)U_C/3 \\ u_b = (2s_b - s_c - s_a)U_C/3 \\ u_c = (2s_c - s_a - s_b)U_C/3 \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可以看出, SAPF 的每相输出电压都同时与三相桥臂的总体状态相关, 即三相桥臂之间存在相互干扰。

为消除相间影响, 可将 abc 相量转化到静止正交的 $\alpha\beta$ 坐标系中, 从而引入电压空间矢量。

当 α 轴与 a 轴重合时, 两坐标系的变换关系为:

$$f = f_\alpha + jf_\beta = \frac{2}{3}(f_a + f_b e^{j2\pi/3} + f_c e^{-j2\pi/3}) \quad (3)$$

式中: f 为电压或电流量。

由式(3)可知, 在采用 $\alpha\beta$ 坐标系之后, 对应不

同的 (s_a, s_b, s_c) 开关矢量 (见图 2), u_{abc} 相应的电压空间矢量可方便地表示为 $\alpha\beta$ 平面中的一个复数:

$$u(n) = \begin{cases} 2U_C e^{j(n-1)\pi/3}/3 & n=1\sim6 \\ 0 & n=0,7 \end{cases} \quad (4)$$

图 3 为开关矢量 $u(n)$ 的空间分布示意图。

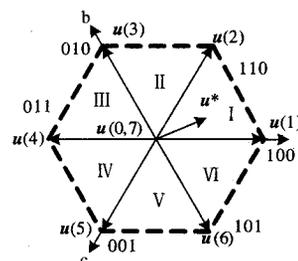


图 3 $u(n)$ 的空间分布

Fig.3 Space distribution of $u(n)$

由式(1)可得 APF 输出端电压矢量方程式^[10]:

$$u = Ldi_c/dt + Ri_c + e \quad (5)$$

式(5)中: i_c 表示 SAPF 输出的补偿电流矢量, 当输出电流为指令电流矢量 i_c^* 时, 则由式(5)有:

$$u^* = Ldi_c^*/dt + Ri_c^* + e \quad (6)$$

式(6)中: u^* 为指令电流矢量 i_c^* 对应的 APF 输出参考电压矢量, 由此式可知, u^* 是很难直接计算的, 不过在实际应用中, 一般不必计算其具体值, 而只需判定其所在的区域即可。

定义电流误差矢量 Δi 为指令电流矢量与补偿电流矢量之差, 即有:

$$\Delta i = i_c^* - i_c \quad (7)$$

由式(4)~(6)可得:

$$Ld\Delta i/dt = u^* - u \quad (8)$$

式(8)中忽略了 APF 交流侧的电阻, 从该式可以看出, 误差电流矢量 Δi 的变化率取决于参考电压矢量 u^* 与 APF 输出电压矢量 u 的偏差, 因此, 对于已判断出所在区域的参考电压矢量, 只要适当选择 APF 输出的电压矢量, 就可以控制电流误差矢量 Δi 的变化率 $d\Delta i/dt$, 从而控制电流误差矢量 Δi 。

2 基于电压空间矢量的双滞环控制新方法

2.1 电流控制原理

所提出的电流控制方法的控制原理如图 4 所示。将电流误差矢量 Δi 在三个坐标轴 ab, bc, ca 上的投影, 即相间误差电流 Δi_{ab} 、 Δi_{bc} 、 Δi_{ca} 分别通

过3个滞环比较器,输出相应的比较状态值 S_{ab} 、 S_{bc} 、 S_{ca} ,并据此来判断参考电压矢量 u^* 所在的三角形区域。然后采用双滞环电流控制策略来进行误差电流控制,通过判断误差电流所在的区域,以选取不同的控制策略;并且在形成 SAPF 最终输出的开关矢量 (s_a, s_b, s_c) 时,将当前开关状态以及各相电流的幅值考虑进来,尽量选择开关动作次数最少及电流值较小的那相开关动作,从而降低开关损耗。

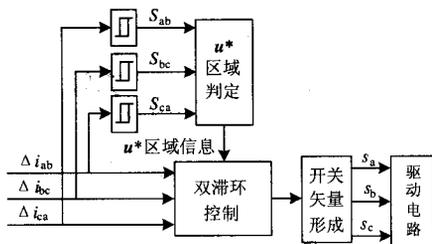


图4 电流控制原理

Fig.4 Principle of current control

2.2 双滞环控制策略

如图5所示,将相间误差电流 Δi 所在区域分为12个区域,区域1~6的下边界构成内环,宽度为 ϵ_1 ,上边界构成外环,环宽度为 ϵ_2 ,从而可以根据误差电流所在的区域来选取不同的控制策略。

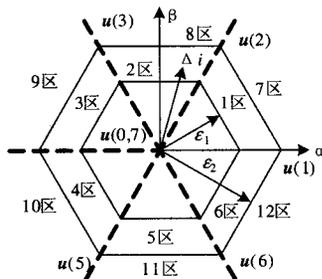


图5 双滞环电流控制策略示意图

Fig.5 Scheme plan of the double hysteresis current control strategy

显然,当误差电流处于内环以内时,为电流死区,无需控制, SAPF 不必动作。

2.2.1 外环控制

当误差电流处于外环时 ($\Delta i > \epsilon_2$),由于误差幅值较大, SAPF 需快速响应使 Δi 迅速减小。当 Δi 落入区域7~12时,应选择该区域两侧的电电压矢量作为控制矢量,此时 $u^* - u(n)$ 具有沿 Δi 反方向的最大分量,可使 Δi 快速减小,而且,其减小速度是所有选择中最快的。比如,若 Δi 落入图5中的区域7时,应立即选取区域7两侧的电电压矢量 $u(1)$ 或 $u(2)$,此时 $u^* - u(1)$ 或 $u^* - u(2)$ 沿 Δi 反方向的分量最大,均能快速控制住误差电流。

外环控制时电压矢量的选择如表1所示。

表1 外环控制 $u(n)$ 选择表

Tab.1 Outer-loop control switching table of $u(n)$

Δi 区域	7	8	9	10	11	12
$u(n)$ 选择	$u(1,2)$	$u(2,3)$	$u(3,4)$	$u(4,5)$	$u(5,6)$	$u(6,1)$

2.2.2 内环控制

当误差电流处于两环之间时 ($\epsilon_1 < \Delta i < \epsilon_2$),为了降低开关频率,减少开关损耗,应采用精确的控制。

当误差电流矢量处于环间时,需先判断参考电压矢量所在的三角形区域。

(1) u^* 所在区域的划分及判别

参考电压矢量 u^* 所在区域已按图3所示,分成6个三角形区域。本文将相间电流误差 Δi_{ab} 、 Δi_{bc} 、 Δi_{ca} 分别送入三个滞环比较器中,其输出分别为 S_{ab} 、 S_{bc} 、 S_{ca} ,其值均为0或1,假定 S_{ab} 、 S_{bc} 、 S_{ca} 的状态和参考电压矢量 u^* 所在区域的关系如表2所示。

表2 u^* 所在区域判别

Tab.2 Region determination table of u^*

S_{ab}	1	0	0	0	1	1
S_{bc}	1	1	1	0	0	0
S_{ca}	0	0	1	1	1	0
u^* 区域	I	II	III	IV	V	VI

根据表2可以确定 u^* 所在的区域,结合 Δi 所在区域即可确定最优电压空间矢量 $u(n)$ 。如果上述假定正确,则误差电流 Δi 就可以按照预期逐渐减小,最终回到内环以内;如果该假定错误,那么根据表2判定的参考电压矢量所在区域将是错误的,控制中选用的电压矢量也是错误的, Δi 不能按照预期减小,从而促使 S_{ab} 、 S_{bc} 、 S_{ca} 的状态发生变化。按照 S_{ab} 、 S_{bc} 、 S_{ca} 变化后的状态,根据表2可重新确定 u^* 所在区域,从而选择正确的电压矢量。这实际上是个“尝试-错误-校正-补偿”过程^[8]。

(2) 内环控制

当误差电流处于两环之间时,在判断出了参考电压矢量所在的三角形区域之后,可进行精确的电流控制。图3中参考电压矢量落入的小三角形区域顶点上的四个电压矢量(两个零矢量、两个非零矢量)均为最优电压矢量,其中至少有一个可使 $u^* - u(n)$ 具有 Δi 反方向的分量,因而可控制住 Δi ,且此时 $u^* - u(n)$ 的长度较其他的电压矢量(非最优矢量)为短,可控制误差电流缓慢变化,降低开关频率。

内环控制时电压矢量的选择如表3所示。

2.2.3 多个最优电压矢量时的取舍

在确定了参考电压矢量和误差电流矢量所在区域之后,往往有多个最优矢量可供选择来进行开关

控制, 为减少开关动作次数, 降低开关损耗, 本文将当前开关矢量和相电流幅值信号同时引入开关矢量的选择中。

表 3 内环控制 $u(n)$ 选择表

Tab.3 Inner-loop control switching table of $u(n)$

u^* 区域	Δi 区域					
	1	2	3	4	5	6
I	$u(1,2)$	$u(2)$	$u(2,0,7)$	$u(0,7)$	$u(0,7,1)$	$u(1)$
II	$u(2)$	$u(2,3)$	$u(3)$	$u(3,0,7)$	$u(0,7)$	$u(0,7,2)$
III	$u(0,7,3)$	$u(3)$	$u(3,4)$	$u(4)$	$u(4,0,7)$	$u(0,7)$
IV	$u(0,7)$	$u(0,7,4)$	$u(4)$	$u(4,5)$	$u(5)$	$u(5,0,7)$
V	$u(6,0,7)$	$u(0,7)$	$u(0,7,5)$	$u(5)$	$u(5,6)$	$u(6)$
VI	$u(1)$	$u(1,0,7)$	$u(0,7)$	$u(0,7,6)$	$u(6)$	$u(6,1)$

比如上述外环控制中在 $u(1)$ 和 $u(2)$ 均能良好控制电流误差时, 若当前开关矢量为 $u(3)$, 即 $(0,1,0)$, 则显然选择矢量 $u(2)$ 比 $u(1)$ 更有利, 因为前者的开关信号为 $(1,1,0)$ 而后者为 $(1,0,0)$, 选择 $u(2)$ 时将少动作一次开关, 从而降低开关损耗。

同理, 在某些场合, 若两相开关都可选择动作时, 考虑两相电流的值, 选择其中较小的那相动作, 也可大幅降低开关的损耗。

3 计算机仿真结果与分析

利用电磁暂态程序 PSCAD/EMTDC, 对图 1 中的有源滤波器系统进行了仿真, 其中 APF 用以补偿非线性负载直流电动机运行中产生的谐波电流。图 1 中的各参数为: 系统电压 $e=380\text{ V}$, $L=0.0125\text{ mH}$, $L_L=0.003\text{ H}$, $U_C=800\text{ V}$, $f=50\text{ Hz}$ 。

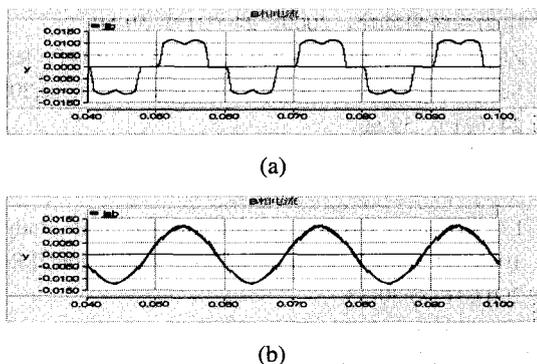


图 6 本文方法的仿真结果

Fig.6 Simulation results of the novel method

图 6 为三相 APF 系统的仿真波形, 其中(a)为补偿前的 B 相电流, (b)为补偿后的 B 相电流。图中横轴表示时间, 单位为秒(s), 纵轴表示电流, 单位为千安(kA)。由仿真波形可知, 补偿后的电网电流已校正为近似为正弦波形, 谐波含量大大降低。

图 7 为采用本文方法以及传统滞环方法时开关

动作次数的比较, 其中(a)为采用传统滞环方法时 B 相开关次数曲线, (b)为采用本文方法时 B 相的开关次数曲线。由图 7 的开关次数比较图可以看出, 本文方法的每相开关次数约减少了 16.7%, 也就是说开关损耗大约降低了 16.7%。同时, 采用本文方法后开关的动作曲线比传统滞环方法的开关动作曲线平滑得多, 也就是说起到了稳定开关频率的效果, 提高了装置的安全性。

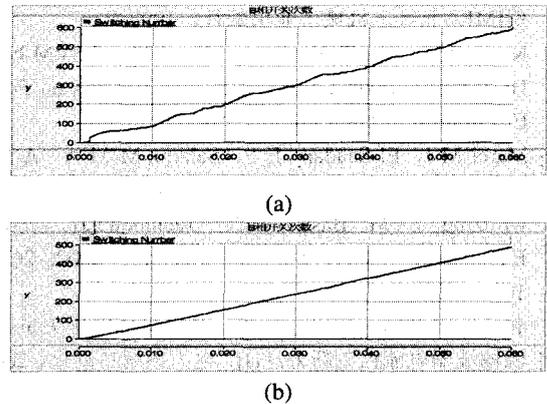


图 7 传统滞环方法与本文方法的开关次数比较

Fig.7 The comparison of switching number

4 结论

本文提出了一种能应用于三相并联有源电力滤波器的基于最优电压矢量的双滞环电流控制新方法。该方法以相间电流误差作为控制对象, 利用滞环比较器来判断参考电压矢量所在区域, 并根据相间误差电流的不同情况采用电流双滞环控制策略来控制误差电流, 以达到降低开关次数、减少高次谐波的目的, 同时引入当前开关信号及各相电流幅值信号, 来辅助选择电压矢量, 从而大大降低开关的损耗。

参考文献

[1] El-Habrouk M, Darwish M K, Mehta P. Active Power Filter: a Review[J]. IEE Proceeding-Electric Power Applications, 2000, 147(5): 403-413.

[2] 陈国柱, 吕征宇, 钱照明. 有源电力滤波器的一般原理及应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 17-21. CHEN Guo-zhu, Lü Zheng-yu, QIAN Zhao-ming. The General Principle of Active Power Filter and Its Application[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 17-21.

[3] 王群, 姚为正, 刘进军, 等. 谐波源与有源电力滤波器的补偿特性[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): 16-20. WANG Qun, YAO Wei-zheng, LIU Jin-jun, et

- al. Harmonic Source and Compensation Characteristics of Active Power Filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(2): 16-20.
- [4] 胡铭, 陈珩. 有源滤波技术及其应用[J]. 电力系统自动化, 2000, 25(10): 66-70.
HU Ming, CHEN Heng. Active Power Filter Technology and Its Application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(10): 66-70.
- [5] 王兆安, 杨君, 刘进军, 等. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [6] Kwon B H, Kim T W, Youm J H. A Novel SVM-based Hysteresis Current Controller[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1998, 13(2): 297-307.
- [7] Marei M I, El-Saadany E F, Salama M M A. A New Contribution Into Performance of Active Power Filter Utilizing SVM Based HCC Technique[J]. Power Engineering Society Summer Meeting, 2002, 2(2): 1022-1026.
- [8] 曾江, 刁勤华, 倪以信, 等. 基于最优电压矢量的有源滤波器电流控制新方法[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(6): 25-31.
ZENG Jiang, DIAO Qin-hua, NI Yi-xin, et al. A Novel Current Control Method for Active Power Filter Based on Optimal Voltage Vector[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(6): 25-31.
- [9] 姜俊峰, 刘会金, 陈允平, 等. 有源滤波器的电压空间矢量双滞环电流控制新方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 82-86.
JIANG Jun-feng, LIU Hui-jin, CHEN Yun-ping, et al. A Novel Double Hysteresis Current Control Method for Active Power Filter with Voltage Space Vector[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 82-86.
- [10] 曾国宏, 郝荣泰. 有源滤波器滞环电流控制的矢量方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(5): 31-40.
ZENG Guo-hong, HAO Rong-tai. A Novel Phase-correlating Hysteresis Current Control Method for Active Power Filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(5): 31-40.
- [11] 张兴, 张崇巍. PWM 可逆变流器空间电压矢量控制技术的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 102-105.
ZHANG Xing, ZHANG Chong-wei. Study on a New Space Voltage Vector Control Method About Reversible PWM Converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 102-105.

收稿日期: 2008-06-24; 修回日期: 2009-02-25

作者简介:

叶小军 (1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为有源电力滤波器控制; E-mail: epyex@163.com

曾江 (1972-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电能质量、有源电力滤波器控制、配网自动化等;

王克英 (1963-), 男, 博士, 教授, 研究方向为微型计算机在电力系统测量和控制中的应用。

(上接第 59 页 continued from page 59)

参考文献

- [1] 潘贞存, 王葵, 杜世双, 等. 中低压母线加装专用继电保护的必要性和几种方案的探讨[J]. 电网技术, 2002, 26(9): 75-77.
PAN Zhen-cun, WANG Kui, DU Shi-shuang, et al. On Necessity of Equipping Dedicate Protection Device to Busbar in Distribution Network and Several Implementing Projects[J]. Power System Technology, 2002, 26(9): 75-77.
- [2] 潘贞存, 丛伟, 丁磊, 等. 基于纵联比较原理的降压变压器及其中低压母线保护方案[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (1): 83-85.
PAN Zhen-cun, CONG Wei, DING Lei, et al. New Protection Scheme for Step-down Transformer and Crossponding Middle and Low Voltage Buses Based Longitudinal Comparison Principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (1): 83-85.
- [3] 赵京立, 马晓黎. 一种 10kV 至 35kV 母线保护方案 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (21): 59-60.
ZHAO Jing-li, MA Xiao-li. 10 kV to 35 kV Bus Protection Scheme[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (21): 59-60.
- [4] 李韶涛, 常胜. 高压变电站 10kV 母线保护的分析和研究[J]. 继电器, 2003, 31 (8): 30-33.
LI Shao-tao, CHANG Sheng. Analysis and Study on 10kV Busbar Protection of HV Substation[J]. Relay, 2003, 31 (8): 30-33.

收稿日期: 2008-06-05

作者简介:

朱革兰 (1968-), 女, 博士, 讲师, 主要从事电力系统故障分析与继电保护的教学与科研工作; E-mail: zgzelan@21cn.com

李海锋 (1976-), 男, 博士, 讲师, 主要从事电力系统故障分析与继电保护的教学与科研工作;

王钢 (1966-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统保护、控制及自动化领域的教学与科研工作。