

并联有源电力滤波器新型控制策略仿真研究

黄崇鑫, 王奔, 邹超, 鲍鹏

(西南交通大学电气学院, 四川 成都 610031)

摘要: 三相三线并联有源电力滤波器(APF)能够实时地补偿谐波电流和无功电流。控制器作为 APF 的核心部件, 它的性能好坏直接影响到 APF 的补偿效果。而影响控制器动态性能的关键因素是控制算法。考虑到 APF 的数学模型在 dq 坐标系下, 是一个非线性耦合系统, 首先采用逆系统方法将原系统线性化解耦, 构造出伪线性系统。然后, 再运用变结构控制, 设计出这个伪线性系统的变结构控制律。最后, 建立了 APF 的仿真模型对其进行仿真试验。试验结果表明, 基于此控制策略设计出 APF 的控制器能使有源滤波器具备良好的补偿效果。

关键词: 有源电力滤波器; 逆系统方法; 变结构控制; 伪线性系统; 谐波抑制

Simulation research on shunt active power filter with a novel control method

HUANG Chong-xin, WANG Ben, ZOU Chao, BAO Peng

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Three-phase three-line shunt Active Power Filter (APF) can be used to restrain harmonic current and compensate reactive power current on-line. The controller of APF is a core. Its performances play a key role in APF with excellent functions, and a control method is a critical point for designing the controller. Considering that APF is a coupling nonlinear system in synchronous rotating dq coordinate system, this paper proposes a novel control method: firstly the original system model of APF is linearized and decoupled to be a pseudo-linear system which is made up of original system and inverse system. Then it adopts Variable Structure Control Theory (VSC), and designs the variable structure control laws of this pseudo-linear system to control the system of APF. Finally, through establishing the system of APF and making simulations under the support of MATLAB soft, the excellent performances of APF to compensate harmonics and reactive power current have been verified sufficiently from the simulation results. The control method for APF presented in this paper is proved feasible and effective.

Key words: active power filter; inverse-system method; variable structure control; pseudo-linear system; harmonic suppressing

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)05-0052-04

0 引言

严格地说, 在电力系统中, 所有的负荷都是非线性的, 非线性负荷会给电力系统带来谐波污染^[1]。近二十年来, 各种电力电子装置的迅速普及, 使得电网的谐波污染日趋严重, 由谐波引起的事故频繁发生, 谐波危害的严重性已引起人们的高度重视^[2,3]。

三相三线 APF 能够分别或同时补偿三相三线电网的谐波电流和无功电流。在 APF 的控制系统中, 检测环节和设计控制算法环节是设计整个 APF 控制器的关键^[4]。在检测环节, 本文采用的是基于瞬时无功功率理论的 $i_p - i_q$ 电流检测方法。该检测方法是目前使用得最多的谐波和无功电流检测方法, 它具有简单直观, 检测准确的优点^[5]。控制器算法

设计的最终目标是使 APF 的补偿电流跟踪检测出的谐波和无功指令电流, 而谐波电流变化速度快, 且不平滑, 要使 APF 补偿的电流要跟踪上谐波指令电流, 要求设计的控制策略能使 APF 具备良好的动态响应特性。滞环控制方法、三角波比较方法都具有其本身的缺点^[6]。文献[7]用变结构控制直接设计出了 APF 的控制律, 其算法跟滞环控制方法相同, 同样存在滞环控制的优缺点。模糊控制方法应用于 APF 可以获得较好的性能, 但模糊控制的规则是基于手动的, 通过经验分析整理而得, 需要人们在控制操作中具备丰富的经验和技能, 不利于被一般工程人员所接受^[7]。

基于以上考虑, 本文采用逆系统方法将原系统线性化解耦, 构造出伪线性系统。这样, 能够使随后的设计控制策略过程变得简单。考虑到变结构控

制具有良好的鲁棒性和快速跟踪的动态品质, 而且用变结构控制来设计线性系统简单易行, 文中运用变结构控制中的趋近律设计方法, 设计出伪线性系统的控制律。整个设计过程, 思路明晰简单。最后, 通过仿真手段, 验证了此方法的可行性和有效性。

1 APF 的工作原理及数学模型

1.1 工作原理

三相三线 APF 的电路原理图^[5], 如图 1 所示, 它是由全控器件(IGBT, MOSFET 等)构成的不带负荷的三相电压型变流器。它工作的基本原理: 通过产生与指令电流具有相同幅值而相位相反的补偿电流来达到防止谐波流入系统的目的。从以下式子可以清晰的表达出三相三线 APF 的工作原理。

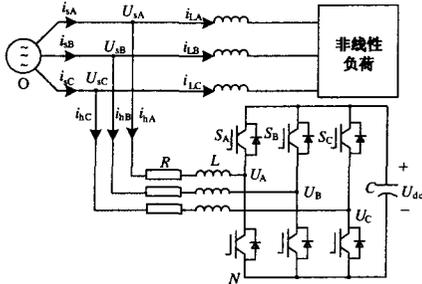


图 1 有源电力滤波器电路图

Fig.1 Circuit of active power filter

如图 1 所示, 取三相系统的 A 相, 列写接入点的节点电流方程得:

$$i_{sA} = i_{LA} + i_{hA} \quad (1)$$

而负荷电流又可以写成:

$$i_{LA} = i_{LAp} + i_{LAq} + i_{LhA} \quad (2)$$

把式(2)代入式(1)得:

$$i_{sA} = i_{LAp} + i_{LAq} + i_{LhA} + i_{hA} \quad (3)$$

在式(3)中, i_{LAp} 是 A 相负荷的基波有功电流分量, i_{LAq} 是基波无功分量, i_{LhA} 是谐波分量。若有源滤波器补偿电流: $i_{hA} = -i_{LhA}$, 那么由式(3)可看出, 此时系统电流只含有基波分量, 达到补偿谐波的目的。若有源滤波器补偿电流: $i_{hA} = -(i_{LhA} + i_{LAq})$, 那么此时系统电流只含有基波分量有功电流, 起到既补偿谐波又补偿无功电流的作用。

1.2 数学模型

由图 1, 可得到 APF 在三相静止坐标系下的数学模型^[5]如下:

$$\begin{cases} L di_{hA}/dt = U_{sA} - Ri_{hA} - S_A U_{dc} - U_{NO} \\ L di_{hB}/dt = U_{sB} - Ri_{hB} - S_B U_{dc} - U_{NO} \\ L di_{hC}/dt = U_{sC} - Ri_{hC} - S_C U_{dc} - U_{NO} \\ C dU_{dc}/dt = S_A i_A + S_B i_B + S_C i_C \end{cases} \quad (4)$$

在式(4)中, $U_s = (U_{sA}, U_{sB}, U_{sC})$ 是 APF 接入点三相电网电压; $I_s = (i_{sA}, i_{sB}, i_{sC})$ 是三相电网电流; $I_h = (i_{hA}, i_{hB}, i_{hC})$ 是 APF 补偿的三相电流; $S = (S_A, S_B, S_C)$ 是全控器件的三相开关函数; U_{dc} 为直流侧电容 C 上的直流电压; L, R 是变流器交流侧的接入电感和等效损耗电阻。

式(4)经 2/3 派克变换后, 得到同步旋转 dq 坐标系下的数学模型如下:

$$\begin{cases} L di_{hd}/dt = L\omega i_{hq} - Ri_{hd} - S_d U_{dc} + U_{sd} \\ L di_{hq}/dt = -L\omega i_{hd} - Ri_{hq} - S_q U_{dc} + U_{sq} \\ C dU_{dc}/dt = 3/2(S_d i_{hd} + S_q i_{hq}) \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, 变量下标末尾含 d 的是经派克变换后的 d 轴分量, 含有 q 的为 q 轴分量。为书写和表达方便, 令

$$[x_1, x_2, x_3] = [i_{hd}, i_{hq}, U_{dc}], [u_1, u_2] = [S_d, S_q],$$

$[y_1, y_2] = [x_1, x_2]$, 那么把式(5)写成状态变量的表达式如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = (L\omega x_2 - Rx_1 - u_1 x_3 + U_{sd})/L \\ \dot{x}_2 = (-L\omega x_1 - Rx_2 - u_2 x_3 + U_{sq})/L \\ \dot{x}_3 = [3/2(u_1 x_1 + u_2 x_2)]/C \\ y_1 = x_1, y_2 = x_2 \end{cases} \quad (6)$$

式(6)反应出, APF 系统是一个两输入两输出的非线性耦合三阶系统。

2 谐波电流和无功电流检测

考虑到实际系统中, 三相电网电压可能不是理想的电压源, 为获得精确的谐波和无功参考电流, 采用基于瞬时无功理论的 $i_d - i_q$ 检测方法, 实际上是基于派克变换的瞬时检测电流的方法^[5], 检测的原理框图, 如图 2 所示。

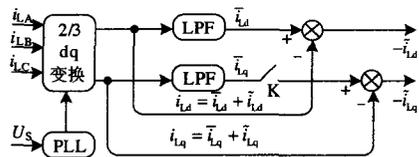


图 2 补偿电流检测原理图

Fig.2 Configuration of compensating current detection

通过锁相环对电网电压同步锁相后, 构造出派

克变换矩阵,对负荷电流做派克变换,得到d轴的有功电流分量 $\tilde{i}_{d,d}$ 、谐波分量 $\tilde{i}_{d,h}$ 和q轴的无功电流分量 $\tilde{i}_{q,d}$ 、谐波分量 $\tilde{i}_{q,h}$,经低通滤波器滤波后,得到基波的d轴的有功电流分量和q轴的无功电流分量,然后与未经低通滤波的d轴,q轴分量相减,即可得到谐波电流的d轴、q轴分量。图2中,若开关K闭合,则检测出的电流参考值不含无功电流,只含谐波电流;若K打开,检测出来的参考电流包含无功电流和谐波电流。

3 设计 APF 控制策略

基于 APF 系统模型是一个多输入多输出、耦合的非线性系统,这里采用逆系统方法,利用被控对象的逆系统将原系统补偿成具有线性传递关系的线性系统,构造出伪线性系统。这个伪线性系统,便于设计控制器。考虑到 APF 输出的补偿电流是谐波电流和无功电流,做派克变换后仍然是快速的、周期性变化的交流量,这要求设计出的控制器具有快速跟踪的性能。而变结构控制具有较强的鲁棒性,其指数趋近律设计方法又具有快速的收敛性能,用变结构控制来设计 APF 的控制能够满足上述要求,且其设计方法简便。

根据系统求逆的方法^[8],APF 的逆系统求取如下:

对 APF 的系统输出 $[y_1, y_2]$ 分别求导得:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = \dot{x}_1 = (L\omega x_2 - Rx_1 - u_1 x_3 + U_{sd})/L \\ \dot{y}_2 = \dot{x}_2 = (-L\omega x_1 - Rx_2 - u_2 x_3 + U_{sq})/L \end{cases} \quad (7)$$

式(7)已经显含输入,由式(7)可求得 APF 的逆系统如下:

$$\begin{cases} u_1 = (-L\dot{y}_1 + L\omega x_2 - Rx_1 + U_{sd})/x_3 \\ u_2 = (-L\dot{y}_2 - L\omega x_1 - Rx_2 + U_{sq})/x_3 \end{cases} \quad (8)$$

在式(8)中取 $v_1 = \dot{y}_1, v_2 = \dot{y}_2$,把构造出逆系统串联在原系统之后,如图3所示,原系统和逆系统就构成了一个伪线性系统。

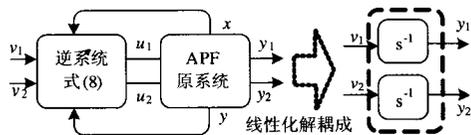


图3 线性化和解耦的 APF 系统

Fig.3 Linearized and decoupled system of APF

由逆系统相对阶的定义^[8]可知,系统的相对阶为 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2) = (1, 1)$,相对阶数为2,小于原系统阶数3。这样,这个伪线性系统存在一个隐动态,也就是式(6)中第三式。这个隐动态方程的稳定与否将

会影响到整个系统的稳定。这里,针对这个隐动态的特性,采用了PI控制策略,来使这个隐动态稳定。PI控制的实现方法如图4所示。

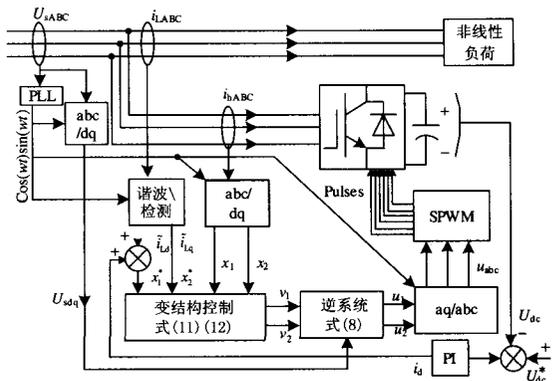


图4 APF 控制系统框图

Fig.4 Control system diagram of APF

由图3可得,运用逆系统方法把构造出的伪线性系统可解耦成两独立的子线性系统如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = v_1 \\ y_1 = x_1 \end{cases} \quad (9), \quad \begin{cases} \dot{x}_2 = v_2 \\ y_2 = x_2 \end{cases} \quad (10)$$

针对以上(9)、(10)两线性系统,采用变结构控制的指数趋近律设计方法^[9],设计其控制器。

子系统(9)控制器设计目标: $x_1 \rightarrow x_1^*$,根据变结构控制理论^[9],取切换面 $s_1 = x_1 - x_1^*$,采用趋近律设计方法,令 $\dot{s}_1 = -k_1 s_1 - \epsilon_1 \text{sgn}(s_1)$,则可以得到子系统(9)的变结构控制律如下:

$$v_1 = k_1(x_1^* - x_1) + \epsilon_1 \text{sgn}(x_1^* - x_1) + \dot{x}_1^* \quad (11)$$

其中 $\text{sgn}(\cdot)$ 是符号函数。

同理,可设计出子系统(10)的变结构控制律:

$$v_2 = k_2(x_2^* - x_2) + \epsilon_2 \text{sgn}(x_2^* - x_2) + \dot{x}_2^* \quad (12)$$

以上各式中, x_1^* 是检测出的指令电流d轴分量和为维持直流电压稳定的PI控制器反馈有功电流分量之和, x_2^* 分别是指令电流的q轴分量。在得出的变结构控制律中,存在导数计算,仿真中用低噪声微分器近似,其传递函数为 $s/(1+0.001s)$ 。这样可以得出 APF 的整体控制框图,如图4所示。

4 APF 系统仿真验证

为验证采用的逆系统线性化解耦后,运用变结构控制来设计 APF 的控制算法的正确性和有效性,本文在 Matlab/Simulink 环境下建立了 APF 系统仿

真模型进行试验。系统仿真模型参数如表 1。

表 1 系统仿真参数

系统仿真参数	符号	数值
网侧电压	U_s	220 V / 50 Hz
APF 接入电感	L	0.6 mH
APF 等效损耗电阻	R	0.1 Ohm
直流侧电容	C	4700 μ F
直流侧电压参考值	U_{dc}	800 V
开关频率	f	10k Hz
变结构控制律参数	k_1 & k_2	10^4 & 10^4
	ε_1 & ε_2	5 & 5
PI 控制器参数	k_p & k_i	1.0 & 0.1

仿真系统模型中, 非线性负荷是由二极管整流电路来模拟的。若无 APF 对电网进行谐波补偿, 负荷侧的电流就是电网侧的电流, 大量的负荷谐波直接流入电网, 会造成电网谐波污染, 如图 5(a)所示。在 APF 投入电网进行补偿后, 如图 5(b)所示。可见, 电网侧电流已被补偿成具有较高正弦度的基波电流。APF 有效地抑制了负荷端的谐波电流流入电网。

比较图 5 中负荷侧电流和电网侧电流的谐波含量和谐波畸变率, 如表 2 所示。负荷侧电流谐波畸变率达到 26.56%, 经 APF 补偿后, 电网侧的电流畸变率为 2.29%, 符合电网电流畸变率的标准。

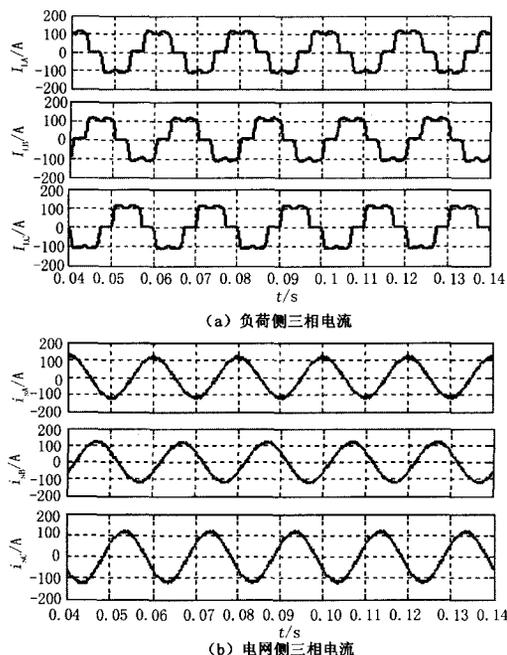


图 5 APF 的补偿性能

Fig.5 Performances of APF

表 2 负荷侧和电网侧谐波电流含量比较

Tab.2 Harmonic contents comparison between load side and grid side

负荷侧电流 (THD=26.56%)					
h	1	5	7	11	13
I_{Lnm}	100	25.56	4.52	4.83	3.06
h	17	19	23	25	29
I_{Lnm}	0.98	1.46	0.38	0.44	0.53
系统侧电流 (THD=2.29%)					
h	1	5	7	11	13
I_{Shm}	100	1.74	0.88	0.84	0.53
h	17	19	23	25	29
I_{Shm}	0.28	0.35	0.17	0.15	0.29

5 结论

本文对三相三线 APF 控制策略进行了研究。在基于 APF 在 dq 坐标系下三阶模型, 运用逆系统方法并结合直流电压环 PI 控制的策略, 实现了原非线性耦合系统的线性化解耦。然后, 运用变结构控制设计出了 APF 的变结构控制律, 得出了 APF 控制系统的控制算法。通过建立系统仿真试验, 试验的结果充分地体现了这一设计思路的正确性和有效性。

参考文献

- [1] Hender R D, Rose P J. Harmonics: The Effects on Power Quality and Transformers[J]. IEEE Trans on Industrial Applications, 1994:528-532.
- [2] Wu C J, Chiang J C, Yen S S, et al. Investigation and Mitigation of Harmonic Amplification Problems Caused by Single-tuned Filters[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998. 800-806.
- [3] 魏学良, 戴珂, 方昕, 等. 三相并联型有源电力滤波器补偿电流性能分析与改进[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(28):113-119.
WEI Xue-liang, DAI Ke, FANG Xin, et al. Performance Analysis and Improvement of Output for Three Phase Shunt Active Power Filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(28):113-119.
- [4] 赵怀军, 庞亚飞, 邱宗明, 等. 改进的单位功率因数谐波电流实时检测方法[J]. 电网技术, 2007, 31(9):38-42.
ZHAO Huai-jun, PANG Ya-fei, QIU Zong-ming, et al. Modified Unity Power Factor Harmonic Current Real-time Detection Method[J]. Power System Technology, 2007, 31(9): 38-42.
- [5] 姜齐荣, 赵东元, 陈建业. 有源电力滤波器[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

(下转第 70 页 continued on page 70)

- 2006, 26(13): 26-30.
DAI Jian-feng, WANG Hai-chao, ZHOU Shuang-xi, et al. A Study on Probability of Voltage Instability Based on the Stochastic Characteristic of Load Margin Index[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(13): 26-30.
- [10] 李兴源, 王秀英. 基于静态等值和奇异值分解的快速电压稳定性分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 1-5.
LI Xing-yuan, WANG Xiu-ying. Fast Voltage Stability Analysis Methods Based on Static Equivalence and Singular Value Resolution[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 1-5.
- [11] 潘雄, 徐国禹. 基于最优潮流并计及静态电压稳定性约束的区域间可用输电能力计算[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 86-91.
PAN Xiong, XU Guo-yu. OPF Based ATC Calculation with Static Voltage Stability Constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 86-91.
- [12] 赵晋泉, 江晓东, 张伯明. 一种在线电力系统静态稳定增强控制算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 7-12.
ZHAO Jin-quan, JIANG Xiao-dong, ZHANG Bo-ming. An On-line Enhancement Control Algorithm for Static Stability in Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 7-12.
- [13] 邱晓燕, 李兴源, 林伟. 在线电压稳定性评估中事故筛选和排序方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 50-55.
QIU Xiao-yan, LI Xing-yuan, LIN Wei. Method for Contingency Screening and Ranking for On-line Voltage Stability Assessment [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 50-55.
- [14] 郭瑞鹏, 韩祯祥. 电压崩溃临界点计算的改进零特征根法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 63-66.
GUO Rui-peng, HAN Zhen-xiang. An Improved Zeor Eigen Value Method for Point of Collapse[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(5): 63-66
- [15] 冯志鸿, 周双喜. 大规模电力系统失稳区的确定方法[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(3): 152-156.
FENG Zhi-hong, ZHOU Shuang-xi. Determination of Voltag Collapse Areas in Large Scale Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(3): 152-156.
- [16] Canizares C A, Mithulananthan N, Berizzi A, et al. On the Linear Profile of Indices for the Prediction of Saddle-node and Limit-included Bifurcation Points in Power Systems[J]. IEEE Trans on Circuits and System-I: Fundamental Theory and Applications, 2003, 50(12): 1588-1595.
- [17] Flueck A J, Dondeti J R. A New Continuation Power Flow Tool for Investigating the Nonlinear Effects of Transmission Branch Parameter Variations[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1): 223-227.
- [18] 李钦, 孙宏斌, 赵晋泉, 等. 静态电压稳定分析模块在江苏电网的在线应用[J]. 电网技术, 2006, 30(6): 11-17.
LI Qin, SUN Hong-bin, ZHAO Jin-quan, et al. On-line Application of Static Voltage Stability Analysis Module in Jiangsu Power System[J]. Power System Technology, 2006, 30(6): 11-17.
- [19] PSASP电压稳定用户手册[Z]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
- [20] 廊坊供电公司调度所. 2007年度廊坊电网运行方式分析报告[Z]. 2006.
- [21] 张东霞, 汤涌, 张红斌, 等. 负荷模型应用和研究调查报告[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2004.
- [22] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖, 等. 电力系统电压稳定性与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

收稿日期: 2008-09-18; 修回日期: 2008-10-09

作者简介:

张建华(1952-), 男, 教授, 博士生导师, 输配电系统研究所所长, 主要研究方向为电力系统安全和可靠性分析;
张国华(1979-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统安全和可靠性分析. E-mail:tigerzhang2000@126.com

(上接第 55 页 continued from page 55)

- [6] 王伟, 周林, 徐明. 有源电力滤波器控制方法综述[J]. 继电器, 2006, 30(2):81-85.
WANG Wei, ZHOU Lin, XU Ming. Control Methods of Active Power Filter[J]. Relay, 2006, 30(2):81-85.
- [7] 钟金亮. 有源电力滤波器的变结构控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1998.
- [8] 戴先中. 多变量非线性系统的神经网络逆系统控制方法[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [9] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M].北京: 科学出版社, 1996.

收稿日期: 2008-04-23; 修回日期: 2008-06-05

作者简介:

黄崇鑫(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为现代电力电子技术在电力系统中的应用; E-mail:huangchongxin128@126.com

王奔(1960-), 男, 教授, 研究方向为电力系统非线性和变结构控制;

邹超(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为新型直流输电以及电力系统稳定。