

基于滑模控制理论的STATCOM无功补偿控制策略研究

单翀峰, 王奔, 陈丹, 钱碧甫, 张喜海

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator, STATCOM)能高效灵活地调节输电线路的无功传输,且不受电网电压的影响。考虑到STATCOM在dq坐标下是一个强耦合、非线性系统,采用逆系统方法将原系统进行线性化解耦,构造出其伪线性模型。运用滑模变结构控制理论,设计出伪线性系统的滑模控制律。建立STATCOM的仿真模型对其进行仿真试验并与其他控制方法进行对比,结果表明基于此控制策略设计出的控制器能使补偿器具有良好的效果。

关键词: STATCOM; 无功补偿; 滑模控制; 逆系统; 瞬时无功电流

Study of the reactive compensation of STATCOM based on the sliding mode control theory

SHAN Chong-hao, WANG Ben, CHEN Dan, QIAN Bi-fu, ZHANG Xi-hai

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

Abstract: STATCOM adjusts the reactive power in the transmission lines efficiently without the interference of power system voltage. Because the model of STATCOM is a coupling system in a synchronous rotating dq coordinate, the inverse system method based on nonlinear feedback linearization theory is applied to linearize original system and uncouple it. The inverse system model of STATCOM is deduced and a pseudo linear system is constructed. Then, by synthesizing the pseudo linear system, a sliding mode variable structure controller is designed. Finally, through building the system of STATCOM and simulating under MATLAB and comparing it with other control methods, the result proves that the compensator has a better result with this controller designed by the control algorithm.

Key words: STATCOM; reactive power compensation; sliding mode control; inverse system; instantaneous reactive current

中图分类号: TM761 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)18-0150-05

0 引言

STATCOM自问世以来,就引起各国电力科研和工业界的广泛重视,得到了迅速发展和应用,它是目前用于电力系统中性能最好的无功补偿装置,是柔性交流输电系统的核心。在提高输电系统传输容量、改善电力系统稳定性、抑制功率振荡等方面发挥着重要的作用^[1-2]。

对STATCOM的数学模型进行分析,可以看出在dq坐标系下它是一个强耦合、非线性系统。针对这样的非线性控制对象,控制策略的设计就变得相对复杂。文献[3-4]采用的是PI控制,文献[5]是非线性鲁棒控制,文献[6-7]的控制目的都是增强系统阻尼,抑制功角、频率振荡,但由于PI控制参数极难整定,对参数变化及扰动敏感,而非线性鲁棒控制等非线性控制方法理论上比较复杂,不便于工程设计人员掌握。因此,本文采用逆系统解耦加变结构

(Variable Structure Control)控制的方法设计STATCOM的无功补偿控制策略,希望能够为解决上述问题做出一些有益的探索。

逆系统法^[8]是被广泛采用的一种非线性反馈线性化方法。其基本思想是利用被控对象的逆系统将控制对象补偿成具有线性传递关系的系统,然后与其他控制方法结合,最终达到预期控制目标。逆系统方法的特点是:物理概念清晰,既直观又易于理解。

变结构控制方法本质上是一类特殊的非线性控制,其非线性表现为控制输入的不连续性,在动态过程中可以根据系统当前的状态,有目的且不断变化地控制输入量,迫使系统按照预定的滑动模态的状态轨迹运动^[9]。相比其他非线性控制方法,其控制规律更容易实现,且对模型参数的变化和外部扰动具有较强的鲁棒性;其缺点在于控制规律因高速切换而存在高频抖动。

本文首先采用逆系统方法将原系统线性化解耦成一个伪线性系统, 之后再行滑模控制策略的设计, 使整个设计过程变得简单。为消除变结构控制存在的高频抖动, 本文采用了饱和函数和指数趋近律相结合的方法, 即消除了抖振的不利影响又加快了系统的收敛速度。本文最后对所设计的控制器进行计算机仿真, 结果验证了所设计控制方法的正确性和高效性。

1 STATCOM数学模型

如图1所示为输电线路中装设STATCOM的电路结构图。

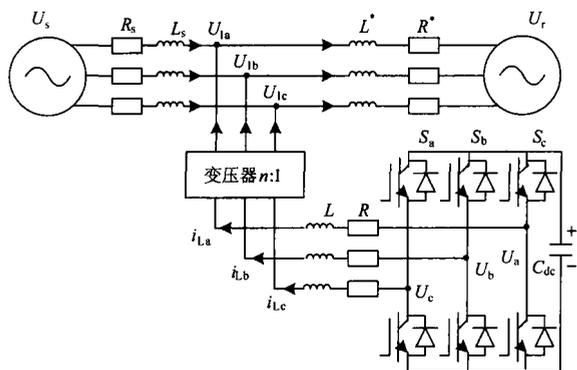


图1 STATCOM 系统仿真模型

Fig.1 System configuration of STATCOM for simulation

图中: 6个IGBT组成一个三相逆变器, 直流侧 \$C_{dc}\$ 是储能电容, 逆变出来的无功电流通过变压器向输电线路注入, 从而调节线路传输的电能, \$S_a, S_b, S_c\$ 是开关函数, \$i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}\$ 是三相无功补偿电流, \$U_a, U_b, U_c\$ 是逆变交流电压, \$U_{1a}, U_{1b}, U_{1c}\$ 是 STATCOM注入点电压, 由此电路结构可得到ABC坐标系下的动态时域数学模型式(1)。

$$\begin{cases} \frac{di_{La}}{dt} = \frac{U_a}{L} - \frac{Ri_{La}}{L} - \frac{U_{1a}}{L} \\ \frac{di_{Lb}}{dt} = \frac{U_b}{L} - \frac{Ri_{Lb}}{L} - \frac{U_{1b}}{L} \\ \frac{di_{Lc}}{dt} = \frac{U_c}{L} - \frac{Ri_{Lc}}{L} - \frac{U_{1c}}{L} \\ C_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = S_a i_{La} + S_b i_{Lb} + S_c i_{Lc} \end{cases} \quad (1)$$

由于比较复杂, 通过坐标变换将三相交流变成dq坐标下的表达式。其变换矩阵为式(2)。

$$T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \omega t & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

将其代入式(1)得到最终数学模型为式(3):

$$\begin{cases} \frac{di_{Ld}}{dt} = \frac{S_d U_{dc}}{L} - \frac{Ri_{Ld}}{L} - \frac{U_{1d}}{L} + \omega i_{Lq} \\ \frac{di_{Lq}}{dt} = \frac{S_q U_{dc}}{L} - \frac{Ri_{Lq}}{L} - \frac{U_{1q}}{L} - \omega i_{Ld} \\ C_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} (S_d i_{Ld} + S_q i_{Lq}) \end{cases} \quad (3)$$

其中, 下标d、q表示为dq坐标下的值。式(3)中状态变量为 \$i_{Ld}, i_{Lq}\$; 控制输入为 \$S_d, S_q\$。给出系统的控制输出为:

$$\begin{cases} y_1 = i_{Ld} - i_{Ld-ref} \\ y_2 = i_{Lq} - i_{Lq-ref} \end{cases} \quad (4)$$

式中, \$i_{Ld-ref}, i_{Lq-ref}\$ 是补偿无功电流的指令值。

2 无功补偿电流

本文设计的STATCOM通过注入无功电流来控制输电线的无功传输。由给定的补偿无功值, 在dq坐标下通过一个计算环节得出补偿无功电流的大小作为控制器的指令值, 如图2所示, 由瞬时无功检测理论^[10-11], 当PARK变换的初相角与注入点的电压相位相同时, STATCOM补偿的电流与补偿的无功有关系式(5):

$$Q = \frac{3}{2} U_{1d} i_{Lq} \quad (5)$$

式中: \$U_{1d}\$ 为STATCOM注入点电压d轴分量; \$i_{Lq}\$ 为STATCOM交流侧电流q轴分量。

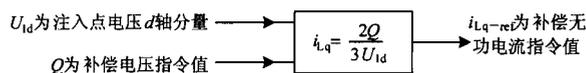


图2 瞬时无功电流的求取

Fig.2 Calculation of instantaneous reactive current

3 滑模控制设计

先运用逆系统方法将原系统线性化解耦, 构造出伪线性系统^[12]进行滑模控制策略的设计, 具体设计方法如图3。

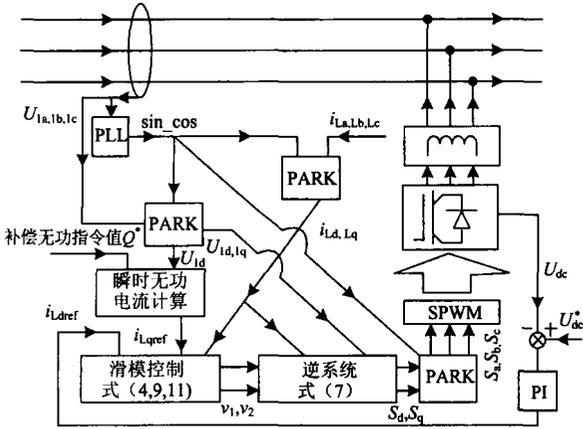


图3 STATCOM变结构控制原理图

Fig.3 Variable structure system of STATCOM

由于原系统的强耦合性，逆系统的方法能对其进行解耦和强制线性化，如图4所示。简单地说就是在原系统的控制输入 \$S_d, S_q\$ 前人为地串一个系统，并按照一定的规律构造控制输入 \$v_1, v_2\$，使其输出为原控制的输入。这样由原来的一个二阶耦合系统就化解成了两个一阶小系统，这样设计步骤大为简便。

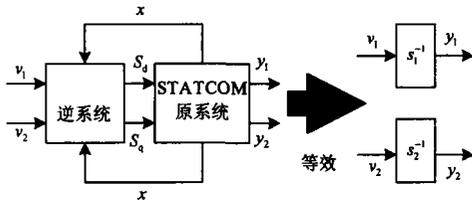


图4 线性化和解耦的STATCOM系统

Fig.4 Linearized and decoupled system of STATCOM

逆系统具体设计方法如下：对 \$y_1, y_2\$ 求 \$a\$ 阶导数，直到表达式中显含控制输入 \$S_d, S_q\$，并设 \$y_1^{(a)}, y_2^{(a)}\$ 为 \$v_1, v_2\$，可得到STATCOM数学模型的逆系统为式(6)：

$$\begin{cases} v_1 = \frac{S_d U_{dc}}{L} - \frac{Ri_{Ld}}{L} - \frac{U_{1d}}{L} + \omega i_{Lq} \\ v_2 = \frac{S_q U_{dc}}{L} - \frac{Ri_{Lq}}{L} - \frac{U_{1q}}{L} - \omega i_{Ld} \end{cases} \quad (6)$$

整理得到式(7)：

$$\begin{cases} S_d = (Lv_1 + Ri_{Ld} + U_{1d} - L\omega i_{Lq}) / U_{dc} \\ S_q = (Lv_2 - Ri_{Lq} - U_{1q} + L\omega i_{Ld}) / U_{dc} \end{cases} \quad (7)$$

又由逆系统的相对阶定义可知，上述系统的相对阶为 \$(1+1) = 2 < 3\$，伪线性系统存在一个隐动态^[13]，也就是式(3)中的第三式，即直流侧电容

电压的稳定问题，本文采用PI控制，保持它的稳定，如图5所示。

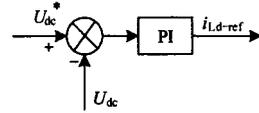


图5 直流侧PI控制图

Fig.5 PI controller configuration of DC

把得出的逆系统串在原系统之后，这样构造出的伪线性系统可解耦成两个独立的子线性系统如式(8)。

$$\begin{cases} \frac{di_{Ld}}{dt} = v_1 \\ y_1 = i_{Ld} - i_{Ld,ref} \end{cases} \quad \text{和} \quad \begin{cases} \frac{di_q}{dt} = v_2 \\ y_2 = i_{Lq} - i_{Lq,ref} \end{cases} \quad (8)$$

滑模控制具有很强的鲁棒性，采用指数趋近律^[14]的设计方法又具有很快的收敛性能，由滑模控制原理，取滑动面为式(9)：

$$\begin{cases} S_1 = y_1 \\ S_2 = y_2 \end{cases} \quad (9)$$

取滑模变结构控制指数趋近律^[15]并结合饱和函数得到式(10)：

$$\begin{cases} \dot{S}_1 = -\epsilon_1 \text{sat}(S_1) - kS_1 \\ \dot{S}_2 = -\epsilon_2 \text{sat}(S_2) - kS_2 \end{cases} \quad (10)$$

式中，\$\text{sat}(*)\$ 为饱和函数，采用指数趋近律的设计使系统有良好的控制效果，响应迅速，降低抖振的设计原则为：\$\epsilon\$ 取的较小，\$k\$ 值取较大。将式(10)与式(8)、式(9)联立可得子系统的控制律为：

$$\begin{cases} v_1 = -\epsilon_1 \text{sat}(S_1) - kS_1 \\ v_2 = -\epsilon_2 \text{sat}(S_2) - kS_2 \end{cases} \quad (11)$$

由式(4)可得最后的滑模控制律 \$S_d, S_q\$。

4 STATCOM滑模控制策略仿真验证

为检验本文中所设计的基于滑模控制的STATCOM无功补偿控制策略的有效性，在Matlab/Simulink软件中建立模型(如图1)进行仿真。在靠近 \$U_s\$ 处装设STATCOM，系统电压为380V，相位差为 \$30^\circ\$，频率 \$f = 50\$ Hz。其他仿真参数为 \$R^* = 0.2 \Omega\$，\$L = 0.01\$ H，\$U_s = U_r = 220\$ V，\$R = 0.01 \Omega\$，\$L = 0.02\$ H，直流侧电容 \$C_{dc} = 9400 \mu\text{F}\$，\$U_{dc} = 800\$ V，开关频率为5000 Hz。滑模控制参数为 \$\epsilon_1 = \epsilon_2 = 5\$，\$k = 5000\$，直流侧PI控制参数为 \$K_p = 1, K_i = 0.5\$。

图6为补偿无功3000 Var时的仿真图，从图6(b)

可见无功功率从原来的4 600 Var变化为补偿后的7 600 Var, 滑模控制的三相补偿无功电流图6 (a) 保持良好的波形, 畸变率(如图7)为1.08%, 而直流侧电容电压在0.04 s后就稳定在指定的800 V。由此可见本控制策略的有效性。

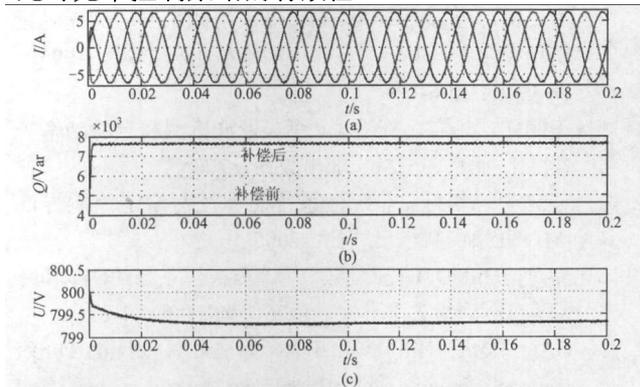


图6 补偿无功3 000 Var时的仿真波形

Fig.6 Simulation 3000 Var compensation reactive power

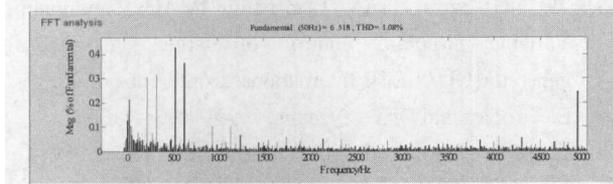


图7 补偿无功电流的畸变率

Fig.7 THD of reactive current

为了进一步说明基于滑模控制理论的 STATCOM无功补偿控制策略的高效性、稳定性和优越性, 针对补偿无功量快速变化的情况进行仿真。在0 s时, 线路上传送的无功功率约为4 600 Var, 0.1 s时, 对STATCOM发出补偿无功指令, 补偿无功量为8 000 Var, 0.2 s突变为补偿-3 000 Var, 0.3 s又变为补偿7 000 Var。将仿真结果与逆系统PI控制进行对比, 最终仿真如图8所示。图8 (a) 为在两种控制方式作用下, STATCOM的无功补偿电流波形 (a相)。可以观察到在两种控制方式作用下的无功补偿电流当补偿量发生快速变化的时候都可以很快地进入稳定状态, 且在稳定后都能够保持良好的波形, 但PI控制较滑模变结构控制要慢(约滞后两个周期)。这种情况在线路传输无功功率图8 (b) 和直流侧电压波形图8 (c) 上反映得更为明显。由滑模变结构控制的STATCOM在无功补偿量快速变化的时候, 能够迅速地做出响应并很快的进入稳定状态, 补偿准确、波形平稳, 超调量非常小; 而PI控制下的无功补偿量波形和直流侧电压波形, 进入稳定的时间则明显滞后, 超调量也较滑模控制要大。

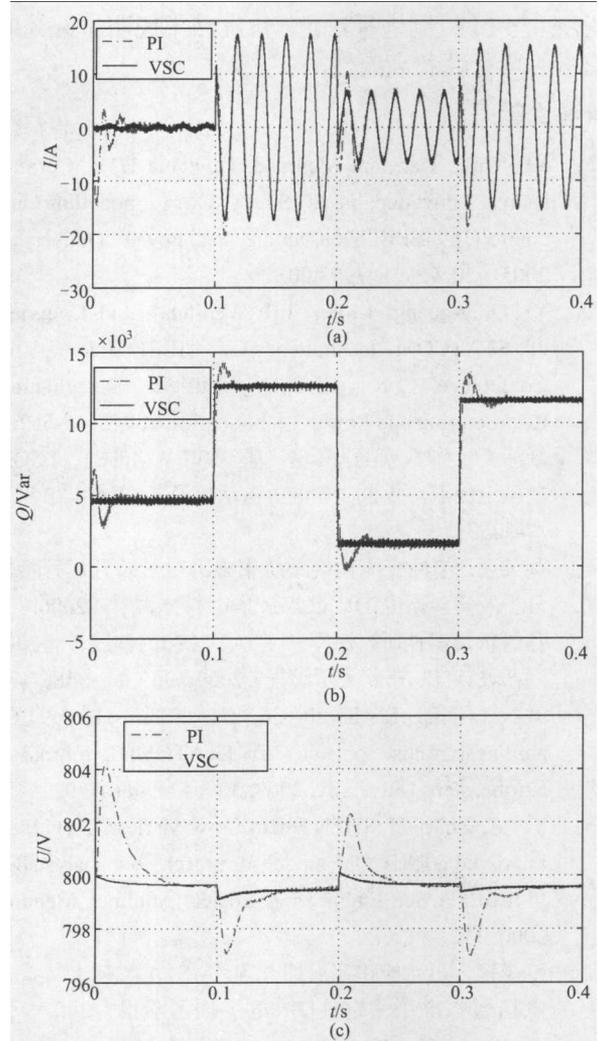


图8 快速改变补偿无功量的仿真波形

Fig.8 Simulation compensation reactive power in quick changing

以上仿真结果说明在无电量发生快速变化的时候两种控制方式都能够迅速、准确地做出响应, 达到快速补偿系统所需无功的要求。但就控制效果而言, 滑模控制在响应速度、稳定性等方面要优于PI控制。这得益于变结构控制本身特有的优越性: 变结构控制与控制对象的参数及扰动无关。这就使得变结构控制具有响应速度快、对参数变化及扰动不敏感等优点。

5 结论

本文对基于滑模控制的 STATCOM 无功补偿控制策略进行了研究。在对 STATCOM 数学模型派克变换后, 应用逆系统理论进行强制线性化, 之后采用滑模变结构控制方法设计 STATCOM 的控制器。最后运用 Matlab/Simulink 仿真平台对设计出的 STATCOM 无功补偿控制策略进行了充分的仿真验

证, 并与 PI 控制进行对比。仿真结果证明了此控制策略的可行性和高效性。

参考文献

[1] YE Yang, Kazerani Mehrdad, Quintana H V. Current-source converter based STATCOM: modelling and control[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20 (2): 795-800.

[2] YU Qing-guang, LI Pei, LIU Wen-hua, et al. Overview of STATCOM technologies[C]. //IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies. 2004: 647-652.

[3] 舒泽亮, 丁娜, 郭育华, 等. 基于SVPWM的STATCOM电压电流双环控制[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(9): 27-30.

[4] 刘黎明. 柔性交流输电系统中电力电子装置运行特性分析及实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.

[5] 孙丽颖, 冯佳昕, 赵军. STATCOM的非线性鲁棒控制器设计[J]. 东北大学学报, 2009, 30 (4): 466-470. SUN Li-ying, FENG Jia-xin, ZHAO Jun. Design of a nonlinear robust controller for STATCOM[J]. Journal of Northeastern University, 2009, 30 (4): 466-470.

[6] YANG Zhi-ping, SHEN Chen, Crow Mariesa L, et al. An improved STATCOM model for power flow analysis[C]. // IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. 2000: 1121-1126.

[7] 范高锋, 迟永宁, 赵海翔, 等. 用STATCOM 提高风电场暂态电压稳定性[J]. 电工技术学报, 2007, 22 (11): 158-162. FAN Gao-feng, CHI Yong-ning, ZHAO Hai-xiang, et al. Transient voltage stability enhancement of wind farm using STATCOM[J]. Transactions of China

Electrotechnical Society, 2007, 22 (11): 158-162.

[8] 李春文, 冯元焜. 多变量非线性控制的逆系统方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 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.

[10] 李庚银, 陈志业, 丁巧林, 等. 坐标系下广义瞬时无功功率定义及其补偿[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16 (3): 176-179.

[11] 王兆安, 杨君, 刘进军, 等. 谐波检测和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

[12] 戴先中. 多变量非线性系统的神经网络逆控制方法[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

[13] 高龙, Hill D J, 王幼毅, 等. 非线性系统的DFL和隐动态[J]. 清华大学学报, 1996, 36 (9): 1-8. GAO Long, Hill D J, WANG You-yi, et al. Direct feedback linearization of nonlinear control systems and the hidden dynamics[J]. Journal of Tsinghua University, 1996, 36 (9): 1-8.

[14] WANG Ben, TIAN Lian-fang, MAO Zong-yuan. Variable structure control of large synchronous generator[C]. // IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems. 1999: 1134-1139.

[15] 杜继伟. 含静止无功补偿器的电力系统非线性协调滑模控制研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.

收稿日期: 2009-09-11; 修回日期: 2009-11-09

作者简介:

单翀隼 (1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为非线性控制理论在FACTS技术中的应用; E-mail: shanchonghao@yahoo.com.cn

王奔 (1960-), 男, 博士后, 教授, 主要研究方向为电力系统非线性控制。

(上接第 149 页 continued from page 149)

[16] Van Riet M J M, Buesink D J W. The advantage of implementing corrective capacitors mounted directly on the low voltage side of a high voltage power transformer[C]. // Electricity Distribution, CIRED. 1993.

[17] 张海荣, 朱涤, 徐丹铮, 等. 4 000 t 起重船的中压电力系统设计[J]. 船舶, 2005 (6): 27-30. ZHANG Hai-rong, ZHU Di, XU Dan-zheng, et al. Design of the intermediate voltage power system for the 4 000 t crane ship[J]. SHIP & BOAT, 2005 (6): 27-30.

收稿日期: 2009-10-18; 修回日期: 2009-10-28

作者简介:

张琦兵 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要从事船舶电力系统、电力系统继电保护及稳定控制研究; E-mail: zqb_312@163.com

邵能灵 (1972-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统继电保护、电站自动化、稳定控制及电力市场方向的研究;

王鹏 (1978-), 男, 电气工程师, 主要从事船舶电气研究设计工作。