

# 基于 UPFC 的风电场稳定性动态仿真研究

顾 威, 李兴源, 魏 巍

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 异步风力机因风速变化的不规律会导致电网电压崩溃。UPFC 是 FACTS 元件中装置中功能最强大的元件, 可以维持风电场电压和系统稳定。运用 UPFC、风力机和异步发电机的数学模型, 在 Matlab/Simulink 中建立了带 UPFC 的风电场仿真模型, 通过研究风速骤变时带与不带 UPFC 的风电场功率、电压状况, 验证了 UPFC 对风电场电压的支持作用, 并能维持风电场及系统的稳定, 保证风力发电机的持续运行。

**关键词:** 系统稳定; UPFC; 异步风力发电机; Matlab/Simulink; 电压稳定

## Simulation study on wind farm stability with UPFC

GU Wei, LI Xing-yuan, WEI Wei

(School of Electrical and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Voltage of asynchronous wind generator may collapse because of irregular changing of wind speed. UPFC is the most useful component in FACTS devices. It can maintain voltage of wind farm and system stability. Using the mathematical models of UPFC, wind turbine and asynchronous generator can model the wind farm with UPFC simulation models on Matlab/Simulink simulation platform. Studying the power and voltage of wind farm with/without UPFC when irregular changing of wind speed verifies that UPFC can support the voltage of wind farm, maintain system stability and make wind farm operate continuously.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50577044).

**Key words:** system stability; UPFC; asynchronism wind-turbine generator; Matlab/Simulink; voltage stability

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)11-0070-05

## 0 引言

随着风能的利用, 现代风机的容量越来越大, 而风电场的稳定性问题也成为制约风电发展及风电并网的关键因素<sup>[1-2]</sup>。因风速随时变化使得分布式发电的运行规律不可控, 馈入电网的功率也时刻变化, 导致了终端电压的高度非线性化变化, 严重影响了电能质量。为防止风电电压因风速变化或发生短路而剧烈变化使得电网电压崩溃, 必须要降低风电场电压的波动, 即必须减小风电场与电网间的无功功率交换。

传统的无功补偿装置如固定电容器组, 补偿能力差、速度慢, 补偿不连续, 很难克服风场电压变化引起的消极动态影响。近年来, 电力电子器件的快速发展, 使得 FACTS 元件的应用越来越广泛,

统一潮流控制器 (UPFC) 作为功能最强大最全面的 FACTS 装置, 由串联侧与并联侧通过直流电容器相连接, 串联侧通过改变串连变压器两端的电压值来控制线路潮流, 并联侧通过改变发出的功率来控制结点电压<sup>[3-17]</sup>, 因而 UPFC 可将风电场视为无功负荷, 以提供持续的电压控制和无功补偿, 减少从系统吸收的无功功率, 维持系统稳定。

本文以异步风力发电机和 UPFC 的数学模型为基础, 在 Matlab/Simulink 下建立了带 UPFC 的风电场及系统模型, 验证了 UPFC 对风电场稳定性的影响。

## 1 UPFC 工作原理与结构模型

### 1.1 UPFC 的工作原理

图 1 给出了 UPFC 的基本结构。

UPFC 是由两个共用直流电容的电压源变换器组成。变换器 VSC1 通过变压器  $T_{sh}$  并联接入系统, 其作用相当于一个并联电流源, 以向连接点注入一

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (50577044); 高等学校博士学科点基金资助项目 (20070610109)

个幅值可调的无功电流, 控制与系统交换的无功功率从而控制电压  $V_1$  的幅值相位, 同时通过直流电容提供串联侧所需的有功功率, 保持 UPFC 内部有功平衡, 维持  $V_{dc}$  不变。变换器 VSC2 由变压器  $T_{se}$  串联接入系统, 相当于一个串联电压源, 向系统提供一个幅值和相位均可调的串联电压  $V_{se}$  以控制线路上的有功和无功。

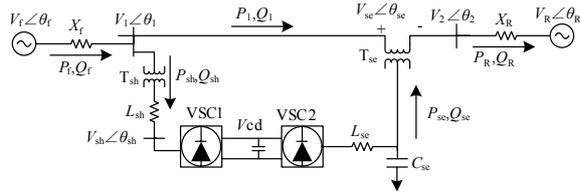


图 1 UPFC 结构

Fig.1 Configuration of UPFC

## 1.2 UPFC 的数学模型

(1) 根据图 1, 以  $V_1$  为参考, UPFC 的串联侧有:

$$P_R + jQ_R = (V_1 - V_{se} \angle -\theta_{se}) \left( \frac{V_1 - V_{se} \angle -\theta_{se} - V_R \angle -\theta_R}{jX_R} \right)^* \quad (1)$$

变换到 d-q 坐标系下有:

$$P_R = \frac{(V_1 - V_{sed})V_{Rq} + V_{Rd}V_{seq}}{X_R} \quad (2)$$

$$Q_R = \frac{V_1^2 + V_{se}^2 - (2V_1 - V_{Rd})V_{sed} - V_1V_{Rd} + V_{Rq}V_{seq}}{X_R} \quad (3)$$

式中:  $V_{sed}$  与  $V_{seq}$  分别为串联电压  $V_{se}$  的 d、q 轴分量;  $V_{Rd}$  与  $V_{Rq}$  为电压  $V_R$  的 d、q 轴分量。

为满足静态安全, 系统节点间的电压幅值和相位必须满足不等式约束,  $V_R$  与  $V_1$  间的相位差很小, 则  $V_{Rq} \ll V_{Rd}$ ,  $V_{seq}$  对  $P_R$  的影响远大于  $V_{sed}$ , 用  $V_{seq}$  来控制  $P_R$  将得到较好的效果。  $V_{Rq} \ll 2V_1 - V_{Rd}$ ,  $V_{sed}$  对  $Q_R$  的影响远大于  $V_{seq}$ , 用  $V_{sed}$  来控制  $Q_R$  将得到较好的效果。串联侧的控制框图如图 2 所示。

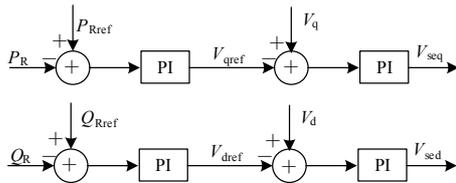


图 2 UPFC 串联侧控制框图

Fig.2 Control block of serial side of UPFC

(2) 对于 UPFC 并联侧有:

$$P_{sh} + jQ_{sh} = V_1 \cdot I_{sh}^* = V_1 \cdot (I_{shd} - jI_{shq}) \quad (4)$$

其中:

$$\begin{cases} I_{shd} = \frac{V_{sh} \sin \theta_{sh}}{X_{sh}} = \frac{V_{shq}}{X_{sh}} \\ I_{shq} = \frac{V_{sh} \cos \theta_{sh} - V_1}{X_{sh}} = \frac{V_{shd} - V_1}{X_{sh}} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $V_{shd}$  与  $V_{shq}$  分别为并联电压  $V_{sh}$  的 d、q 轴分量;  $I_{shd}$  与  $I_{shq}$  为并联侧注入电流  $I_{sh}$  的 d、q 轴分量。

由上式可知, 通过控制注入的电流能改变与系统交换的功率大小, 并以此来控制接入点的电压幅值和相位。

为使 UPFC 内部有功平衡即保持直流电压恒定, 必须满足:

$$P_{dc} = P_{sh} - P_{se} \quad (6)$$

式中:  $P_{dc}$  为 UPFC 内部的功率损耗, 通常较小, 可忽略。

根据图 1 中的潮流流向, 可以推出:

$$P_f = P_{sh} + P_l = P_{sh} + P_R - P_{se} = P_{dc} + P_R \quad (7)$$

有功的交换将影响  $P_{dc}$  的大小, 直流电容上电压值将随  $P_{dc}$  的改变而改变, 因而控制  $I_{shd}$  就能控制直流侧的电压。

并联侧与系统交换的无功功率主要由  $I_{shq}$  决定, 无功功率的交换将直接影响并联点电压。因此 UPFC 的并联侧可以通过改变  $I_{sh}$  来影响与系统交换功率的大小, 从而控制并联接入点电压  $V_1$  和直流侧电压  $V_{dc}$  的大小。

控制框图如图 3 所示。

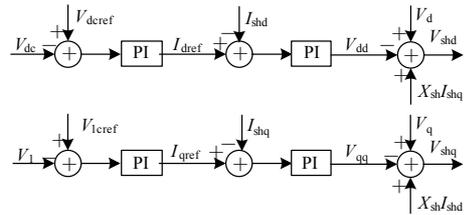


图 3 UPFC 并联侧控制框图

Fig.3 Control block of shunt side of UPFC

图 2、图 3 中所示的 PI 控制器, 为达到快速响应、保证系统稳定并直接起到有功、无功及电压最佳调节的目的, 其比例系数  $K_p$  的取值范围为 0.5~2, 积分系数  $K_i$  的取值范围为 1~2。

## 2 异步风力发电机的动态模型

### 2.1 风力机的动态数学模型

风力机吸收的机械功率和风速的关系如下<sup>[18]</sup>:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (8)$$

$$A = \pi R^2 \quad (9)$$

式中： $P_m$ 为风轮输出的功率； $C_p$ 为风轮的功率系数，是叶尖速比 $\lambda$  ( $\lambda = \omega_m R/v$ ,  $\omega_m$ 是风轮角速度,  $R$ 是风轮半径)和桨距角 $\theta_p$ 的函数 $C_p(\theta_p, \lambda)$ , 也称为风力机的利用系数； $A$ 为风轮扫掠面积； $\rho$ 为空气密度； $v$ 为风速； $R$ 为风轮半径。

风力机机械转矩为：

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{\rho A R v^2 C_p}{2\lambda} \quad (10)$$

### 2.2 异步发电机的动态数学模型

异步感应电机在 d-q 坐标系下的数学模型为：

$$\begin{cases} V_{sd} = \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_0 \psi_{sq} + R_s i_{sd} \\ V_{sq} = \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_0 \psi_{sd} + R_s i_{sq} \\ V_{rd} = \frac{d\psi_{rd}}{dt} - (\omega_0 - \omega_r) \psi_{rq} + R_r i_{rd} \\ V_{rq} = \frac{d\psi_{rq}}{dt} - (\omega_0 - \omega_r) \psi_{rd} + R_r i_{rq} \end{cases} \quad (11)$$

磁链方程：

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \\ \psi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \end{cases} \quad (12)$$

异步电机电磁转矩为：

$$T_{em} = (\psi_{rq} i_{rd} - \psi_{rd} i_{rq}) \quad (13)$$

对于异步发电机转子运动方程如下：

$$2H \frac{d\omega_r}{dt} = T_{em} - T_e \quad (14)$$

式中： $V_{sd}$ 、 $V_{sq}$ 、 $i_{sd}$ 、 $i_{sq}$ 、 $\psi_{sd}$ 、 $\psi_{sq}$  为定子侧的量； $V_{rd}$ 、 $V_{rq}$ 、 $i_{rd}$ 、 $i_{rq}$ 、 $\psi_{rd}$ 、 $\psi_{rq}$  为转子侧的量； $\omega_0$  为同步转速； $\omega_r$  为转子转速； $T_{em}$  为异步发电机的机械转矩； $T_e$  为发电机的电磁转矩。

## 3 仿真建模与结果分析

### 3.1 风电系统模型

在 Matlab/Simulink 下搭建的 UPFC 和风电场模型如图 4 所示，以验证 UPFC 对风电场无功和电压控制的作用。风电场为  $6 \times 1.5$  MW，通过一条 25 km 的线路连接到无穷大系统。UPFC 安装在风电场出口处，并联侧接在风电场出口母线上，以维持风电场母线电压为恒定值。

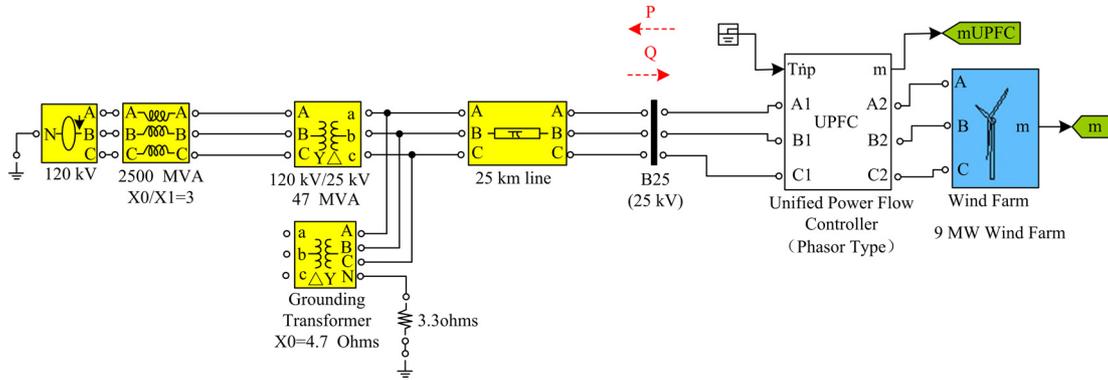


图 4 并网风电场接线图

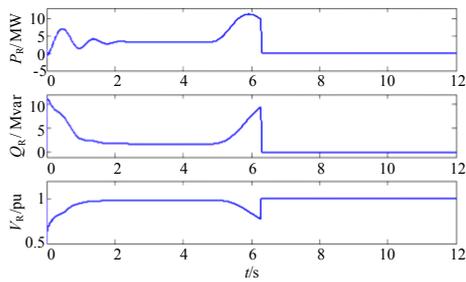
Fig.4 Wind farm connected to power system

发电机用鼠笼式的异步电机，转子直接接在电网上，并在连接处加上固定的并联电容器组。考虑风速变化过快时 UPFC 对风电场稳定性的提高作用。将风电场分为三组，每组两台风机，第一组风机风速从 4.7 s 开始变化，其后每组开始变化时间相隔 0.2 s，每组风机风速都从 7 m/s 上升到 11 m/s，变化斜率为 4。

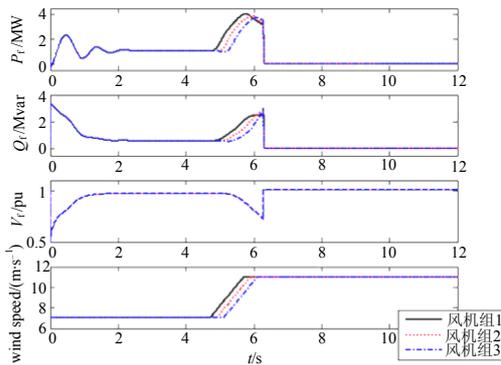
### 3.2 仿真结果分析

正常运行时，风电场输出有功功率的同时会向

系统吸收一定的无功功率，输出功率恒定，电压波动不大，靠固定并联电容器组就能维持风电场的稳定。当风速变化过大时，风电场的有功功率将不能输送出去，风电场为输送有功将向系统吸收更多的无功，仅靠并联电容器组已不能满足无功的需求，最终导致保护动作切除风电场。仿真结果如图5，(a)是线路 B25 处的潮流和电压，(b)是风机组发出的有功、吸收的无功和出口电压。



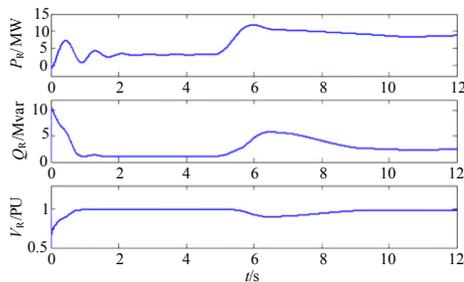
(a) 线路 B25 处的有功、无功和电压



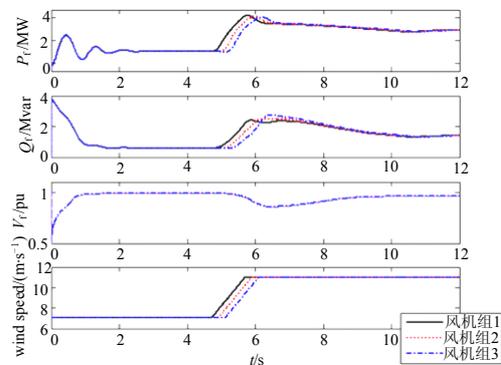
(b) 风电机组的有功、无功和电压

图 5 不含 UPFC 的仿真图

Fig.5 Simulation without UPFC



(a) 线路 B25 处的有功、无功和电压



(b) 风电机组的有功、无功和电压

图 6 含 UPFC 的仿真图

Fig.6 Simulation with UPFC

图 6 为加入 UPFC 后的仿真结果。对比图 5 与图 6 可以看出, UPFC 能稳定风电场电压, 补偿无功功率, 以减少系统与风电场间的无功交换。

在风速变化过程中, 没有 UPFC 对潮流的调节, 随风速变化风电场输送的有功增加, 电压降低, 从而系统输出的无功也增加, 最大约 10 Mvar。若风速继续上升, 输出的有功将持续增加, 交换的无功也将增加, 最终超过线路无功的安全约束, 导致保护动作。

加入 UPFC 后, 由 UPFC 对风电场出口的电压及系统的潮流进行控制, 随风速的增加, 系统与风电场间交换的无功功率减少, 系统输送的无功最大约 5 Mvar, 使得风电场输送有功极限提高, 电压也能维持在 1 p.u. 左右, 波动明显减小。在风速骤变之时, UPFC 将提供无功功率, 以使风电场的电压恢复到安全范围内。

UPFC 产生的无功功率如图 7 所示。

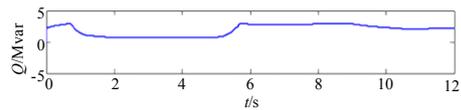


图 7 UPFC 发出的无功功率

Fig.7 Reactive power generated by UPFC

#### 4 结论与展望

通过在 Matlab/Simulink 下建立了带 UPFC 的风电系统仿真模型, 验证了 UPFC 对风电场稳定性的作用。仿真结果表明了以下几点:

(1) UPFC 有调节并联侧接入点电压的作用, 在风速骤变时, UPFC 能保持风场电压在 1 p.u. 附近。

(2) UPFC 能控制线路潮流, 在风电场急需大量无功功率时, UPFC 可提供一定的无功补偿。

(3) UPFC 使系统和风电场间的无功功率交换有所减少, 提高了风电场有功功率的输送极限, 维持了系统的稳定。

#### 参考文献

- [1] 廖萍, 李兴源. 风电场穿透功率极限计算方法综述[J]. 电网技术, 2008, 32 (10): 50-53.  
LIAO Ping, LI Xing-yuan. A survey on calculation methods of wind power penetration limit[J]. Power System Technology, 2008, 32 (10): 50-53.
- [2] 廖萍, 李兴源, 徐娇. 小型风力发电机模型及其接入系统研究[J]. 南方电网技术, 2008, 2 (1): 41-45.  
LIAO Ping, LI Xing-yuan, XU Jiao. Study on wind power generation models and connection systems[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2 (1): 41-45.

[3] 刘小园, 章勇高, 朱鹏程, 等. UPFC 并联侧控制器设计及仿真[J]. 华东交通大学学报, 2005, 22(1): 76-79. LIU Xiao-yuan, ZHANG Yong-gao, ZHU Peng-cheng, et al. Control design and simulation of shunt inverter of UPFC[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2005, 22(1): 76-79.

[4] 马凡, 谷双魁, 刘黎明, 等. UPFC 控制及动态特性实验研究[J]. 电网技术, 2007, 31(17): 64-69. MA Fan, GU Shuang-kui, LIU Li-ming, et al. Experimental study on control and dynamic characteristic of UPFC[J]. Power System Technology, 2007, 31(17): 64-69.

[5] Dizdarevic N, Majstrovic M, Andersson G. FACTS-based reactive power compensation of wind energy conversion system[J]. IEEE Tech Conference Proceedings, 2003, 6(2): 23-26.

[6] Papantoniou A, Coonick A. Simulation of FACTS for wind farm applications[J]. IEE Colloquium on Power Electronics for Renewable Energy, 1997, 6(16): 81-85.

[7] Papantoniou A, Coonick A. Fuzzy logic control of a unified power flow controller for wind farm applications[J]. IEE Colloquium on Power Electronics for Renewable Energy, 1997, 6(16): 91-96.

[8] LI Da-yi, TIAN Jun. A novel variable reactor with transformer and inverter control[J]. IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems, 2008, 10: 4440-4443.

[9] 朱鹏程, 刘黎明, 刘小元, 等. 统一潮流控制器的分析与控制策略[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 45-51. ZHU Peng-cheng, LIU Li-ming, LIU Xiao-yuan, et al. Analysis and study on control strategy for UPFC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 45-51.

[10] 姚尧, 邱昊, 陈柏超, 等. 一种新型统一潮流控制器[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(16): 78-82. YAO Yao, QIU Hao, CHEN Bai-chao, et al. A novel unified power flow controller[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(16): 78-82.

[11] Ba A O, Tao Peng, Lefebvre S. Rotary power-flow controller for dynamic performance evaluation—part I: RPF modeling[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2009, 24(3): 1406-1416.

[12] Ba A O, Tao Peng, Lefebvre S. Rotary power-flow controller for dynamic performance evaluation—part II: RPF application in a transmission corridor[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2009, 24(3): 1417-1425.

[13] Namin M H. Using UPFC in order to power flow control[J]. IEEE International Conference on Industrial Technology, 2006, 10: 1486-1491.

[14] LIU Li-ming, ZHU Peng-cheng, KANG Yong, et al. Unified power flow controller: comparison of two advanced control schemes and performance analysis for power flow control[C].//CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference. 2005.1-10.

[15] Kannan S, Jayaram S, Salama M M A. Real and reactive power coordination for a unified power flow controller [C].//IEEE/PES on Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific. 2008.1-5.

[16] 蔡松, 段善旭, 康勇. 统一潮流控制器在动态模拟系统中的应用[J]. 电网技术, 2007, 31(9): 64-69. CAI Song, DUAN Shan-xu, KONG Yong. Application of UPFC in dynamic simulation system[J]. Power System Technology, 2007, 31(9): 64-69.

[17] 刘天琪. 现代电力系统分析理论与方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

[18] Hagh M T, Lafzi A, Milani A R. Dynamic and stability improvement of a wind farm connected to grid using UPFC[J]. IEEE International Conference on Industrial Technology, 2008, 4: 1-5.

收稿日期: 2009-07-02; 修回日期: 2009-09-11

作者简介:

顾威(1986-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力系统稳定与控制及分布式发电; E-mail: xiaozhuzhiyi@163.com

李兴源(1945-), 男, 博士生导师, 中国电机工程学会理事, IEEE 高级会员, 主要研究方向: 电力系统稳定和控制;

魏巍(1984-), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 电力系统稳定与控制及分布式发电。

(上接第 69 页 continued from page 69)

YANG Yu, YAN Xiao-ling, HAN Fu-chun. Discussion on the improvement of substation reactive power compensation overvoltage protections[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2001, 32(4): 414-416.

[3] Bishop M, Day T, Chaudhary A. A primer on capacitor bank protection[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2001, 37(4).

[4] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.

[5] 李磊. ISA-359F 型分散式微机保护测控装置技术说明书 V2.20[Z]. 深圳: 深圳南京自动化研究所, 2003.

收稿日期: 2009-07-03; 修回日期: 2009-09-17

作者简介:

陈庆祺(1980-), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事变电设备运行维护工作; E-mail: king\_c@tom.cn

刘锦兰(1970-), 女, 本科, 助理工程师, 从事继电保护管理工作。