

基于遗传算法的原动机仿真系统 PI 参数快速寻优

陈明照¹, 刘觉民¹, 谭立新², 颜小君¹, 杜宗林¹, 蒋思东¹

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南信息职业技术学院, 湖南 长沙 410200)

摘要: 在原动机仿真系统中, 关于其速度电流综合调节器(实质为 PI 调节器)的参数一直以来都是依靠传统方法来确定的, 这种方法不但耗费较多的时间, 而且很难寻求到一组理想的参数。将遗传算法引入便可很好地解决这些问题, 通过具体的实例, 运用 Matlab 仿真试验, 在遗传算法和传统方法条件下, 进行了调节器阶跃响应特性的比较, 试验结果证明, 遗传算法具有快速确定和优化 PI 参数、且原动机仿真系统动态特性好的显著优点。

关键词: 原动机仿真; 传统方法; PI 调节; 遗传算法; Matlab 仿真; 阶跃响应; 动态特性

Fast seeking the superior PI parameters in prime mover simulation system based on genetic algorithm

CHEN Ming-zhao¹, LIU Jue-min¹, TAN Li-xin², YAN Xiao-jun¹, DU Zong-lin¹, JIANG Si-dong¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Hunan Information Vocational Technical College, Changsha 410200, China)

Abstract: In the prime mover simulation system, the parameters of the PI regulator are always confirmed in traditional method, but this method consume much time and is hard to get ideal parameters. Genetic algorithms will smoothly solve these problems. By an example, simulating with MATLAB between the additional method and genetic algorithm, it compares the step response characteristic, the result proves that genetic algorithm can fix the PI parameters quickly, and enable the prime mover simulation system have a better dynamic characteristic.

This project is supported by National Natural Science Foundation of Hunan Province(No.01JJY2106) and Hunan Province Key Scientific and Technological Project(No.05GK3507).

Key words: prime mover simulation; traditional method; PI regulation; genetic algorithms; Matlab simulation; step response; dynamic characteristic

中图分类号: TM743

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)02-0025-04

0 引言

原动系统仿真模型是电力系统动态模拟的重要设备之一, 其电流速度综合调节器实质上是一个 PI 调节器^[1,2] (以下简称调节器, 见图 1 虚线框内)。

要使原动机仿真系统具有良好动态性能和实现原动机自平衡特性的模拟^[2], 必须寻求一组合适的 PI 参数即比例系数 k_a 和积分时间常数 τ_L ^[2,3]。按照传统试凑的方法^[4,5,7], 比例系数 K_a 和时间常数 τ_L 最优值的选择须依靠经验和反复试验获得; 若模

拟不同容量机组、改变原动机的额定输出功率, 须重新调定 PI 参数才能保持原有动态特性不变^[6,15]。这不但耗费时间, 而且还须进行繁琐的现场试验。应用遗传算法程序, 可快速得到最优 PI 参数, 此 PI 参数即可直接用于现场运行; 即使改变原动机的额定输出功率, 只需输入新的相关参数, 计算机据此即可算出相应的最优 PI 参数, 系统运行时将保持原有动态特性不变^[8]。此方法既适于模拟调节器 PI 参数的离线计算; 又可用于微机原动机仿真系统 PI 参数在线计算。

以下介绍遗传算法及其在原动机仿真系统中的应用和仿真试验。

基金项目: 湖南省自然科学基金项目 (01JJY2106); 湖南省科技攻关项目 (05GK3507)

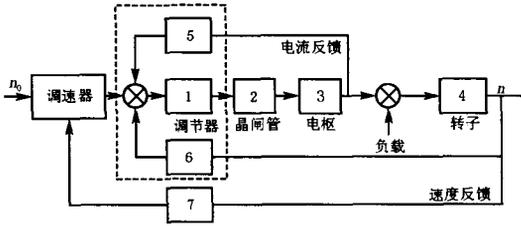
图1 原动机仿真系统原理框图^[2,14]

Fig.1 Principle of prime mover simulation system

图中: 1 为 $\frac{(\tau_I s + 1)k_0}{\tau_I s}$; 2 为 $\frac{k_{scr}}{\tau s + 1}$; 3 为 $\frac{1/R}{\tau_R s + 1}$; 4 为 $\frac{C_m}{J_n S}$; 5 为 $K_i = \beta / (1 + T_i S)$; 电流反馈; 6 为 k_n 转速反馈系数; 7 为 k_n' 转速反馈系数。

式中: k_0 为调节器比例系数; τ_I 为积分时间常数; τ_r, k_{sc} 为整流桥等效时间常数和电压放大倍数; τ_R, R 为电枢回路时间常数和等效电阻; C_m 为转子系数; J_n 为转动惯量; S 为微分算子; β 为电流反馈系数; T_i 为电流反馈的滤波时间常数。

1 遗传算法优化 PI 参数的原理^[9, 10, 11]

遗传算法是一种模拟自然选择和进化过程的寻优算法, 它应用于 PI 调节器参数整定的基本思想是: 先对 PI 参数进行编码, 按一定规模初始化一个种群, 种群中的每一个体代表一个可能的解。然后根据适应度函数, 计算每一个体的适应度并依此控制再生操作, 之后按一定的概率对种群进行交叉、变异操作。这样种群不断进化, 直至寻优结束^[10, 11]。

1) 参数的编码

对所寻优的参数集进行编码, 本控制问题的解为实数值, 可视为遗传算法的表现型形式, 故合适采用二进制编码。因是 2 个参数的组合优化问题, 可把 2 个参数先进行二值编码后得到 2 个子串, 再把这些子串连成一个完整的染色体, 即个体。 K_0 满足: $K_{0\min} < K_0 < K_{0\max}$, τ_I 满足: $\tau_{I\min} < \tau_I < \tau_{I\max}$, 根据精度要求, 确定子串的长度分别为 L_{K_0} 和 L_{τ_I} , 于是得到 2 个参数 K_0 、 τ_I 的编码精度分别为: $\delta_{K_0} = \frac{K_{0\max} - K_{0\min}}{2^{L_{K_0}} - 1}$, $\delta_{\tau_I} = \frac{\tau_{I\max} - \tau_{I\min}}{2^{L_{\tau_I}} - 1}$ 。根据经验,

设定 K_0 的参数范围为: (0, 10); τ_I 的参数范围为 (0, 1)。本文设定求解的 K_0 值精确到 2 位小数, 由于 K_0 取值范围的区间长度为 $10 - 0 = 10$, 必须将区间 (0, 10) 分为 10×10^2 等份, 又因为 $2^9 < 10 \times 10^2 < 2^{10}$, 所以 K_0 的编码的二进制串至少需要 10 位; 同理设定求解的 τ_I 值精确到 3 位小数, 可得 τ_I

编码的二进制串至少需要 10 位。

2) 选择控制参数^[9, 11]

选择控制参数要求既能保证搜索效率又能够找到最优解。一般地, 控制参数群体规模 M 取 20~100、交叉概率 P_c 取 0.4~0.9 和变异概率 P_m 取 0.0001~0.1。本文取 $M=50$, $P_c=0.5$, $P_m=0.01$ 。

3) 生成初始种群

先按照经验确定出 K_0 、 τ_I 两个参数的大概值, 然后在此两个数值附近生成初始种群, 此方法能使搜索空间缩小并迅速搜索到最优解。

4) 目标函数的确定和适应度值的计算^[11]

适应度函数表明个体对环境适应能力的强弱, 与所选取的目标函数有关。PI 参数优化是求目标函数的极小值问题, 即使性能指标 J 最小, J 采用了 ITAE (时间乘以绝对偏差乘积积分) 性能指标:

$J = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt$ 。遗传算法是寻找适应度最高的解, 因而要将目标函数进行改造, 将极小值问题转换为极大值问题。本文定义适应度函数 $f = 1/J$ 。这样, 当找到有最大适应度的解, 也就找到最小目标函数值的解, 寻优成功。 f 确定后, 计算出群体 M 中各个个体 n 的适应度值 f_n , 并计算出群体总适应度值

$$\sum_{n=1}^M f_n$$

5) 遗传运算

① 选择运算

通过从当前代群体中选择出一些比较优良的个体, 并将其复制到下一代群体中, 然后采用适应度比例法^[11]进行选择, 具体操作过程: 先计算出群体中所有个体的适应度的总和 $\sum_{n=1}^M f_n$, 再计算出各个个体被遗传到下一代群体中的概率 $p_n = f_n / \sum_{n=1}^M f_n$, $n=1, 2, \dots, M$; 最后再使用 0 到 1 之间的随机数来确定各个个体被选中的次数。

② 交叉运算

本文采用单点交叉法进行交叉运算。具体操作过程: 对种群中的个体进行两两随机配对, 则共有 $[M/2]=25$ 对相互配对的个体; 对每一对相互配对的个体, 随机设置某一基因座之后的位置为交叉点, 共有 $L-1=19$ 个可能的交叉点位置; 以设定的交叉概率 $P_c=0.5$ 对每一对相互配对的个体在其交叉点处相互交换两个个体的部分染色体, 从而产生出两个新的个体。

③ 变异

本文采用基本位变异方法进行变异运算。对个

体编码串以变异概率 $P_m=0.01$ 随机指定的某一位或某几位基因座上的基因值做变异运算。具体操作过程:以变异概率 $P_m=0.01$ 对个体的每一基因座指定其为变异点,然后对每一指定变异点处的基因值做取反运算,从而产生出一个新的个体。

6) 生成新一代种群

对产生的新一代种群进行评价,并计算新一代种群的适应度值。

7) 判断进化终止条件是否满足

初始种群通过复制、交叉及变异得到了新一代种群,该代种群经解码后代入适应度函数,观察是否满足结束条件,若满足,则获取最优化解,寻优结束;若不满足,则返回步骤(5)重复以上操作直到满足为止。

2 仿真试验与结论

采用 Matlab 的 m 语言编制了相应的软件^[12,13],其流程如图 2 所示。

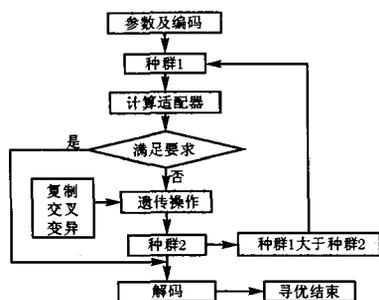


图 2 遗传算法流程图

Fig.2 Genetic algorithm flow chart

2.1 试验方法与步骤

将图 1 系统框图等效变换为图 3,由图 3 可知 PI 调节器的控制对象传递函数表达式为:

$$G(s) = \frac{k_{scr} \beta / R_a}{(\tau_s + 1)(\tau_R s + 1)(\tau_L s + 1)}$$

1) 试验条件

① 直流电动机额定值: $P_{N1}=38.5 \text{ kW}$, $U_N=220 \text{ V}$, $n_N=1000 \text{ r/min}$, 最大电枢电流 $150\%I_N$, 额定电流时,其反馈电压为 1 V 。晶闸管整流桥电压放大系数 $K_0=82.5$, 整流桥等效时间常数 $\tau=2 \text{ ms}$, 回路总电感 $L=2 \text{ mH}$, 电枢回路总电阻 $R_a=0.055 \Omega$ 。电流反馈滤波时间常数 $T_f=1 \text{ ms}$; ① 对应的调节器控制对象的传递函数:

$$G_1(s) = \frac{28.50}{0.0394s+1}$$

② $P_{N2}=22 \text{ kW}$, 其它参数同①;

$$G_2(s) = \frac{14.9985}{0.0394s+1}$$

通过 Matlab/Simulink 仿真试验,在图 3 的 U_i 处输入一阶跃信号,观察 U_o 处响应波形。

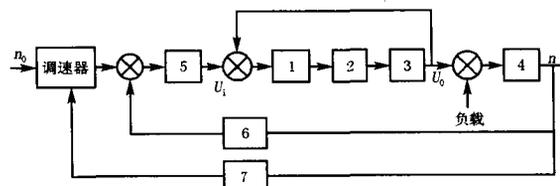


图 3 原动机仿真系统等效框图

Fig.3 Equivalent diagram of prime mover simulation system

图中: 1 为 $\frac{(\tau_L s + 1)k_a}{\tau_L s}$; 2 为 $\frac{k_{scr}}{\tau s + 1}$; 3 为 $\frac{k_i/R}{\tau_R s + 1}$; 4 为 $\frac{C_m}{J_n s}$; 5 为 $1/k_i$; 6 为 k_n ; 7 为 k_n

2) 试验内容

试验 I: 传统方法,比较不同负载水平 ($P_{N1}=38.5 \text{ kW}$, $P_{N2}=22 \text{ kW}$), 相同 PI 参数 ($K_a=0.10$, $\tau_L=0.02 \text{ s}$) 时,对应阶跃响应波形见图 4(a)、4(b)。

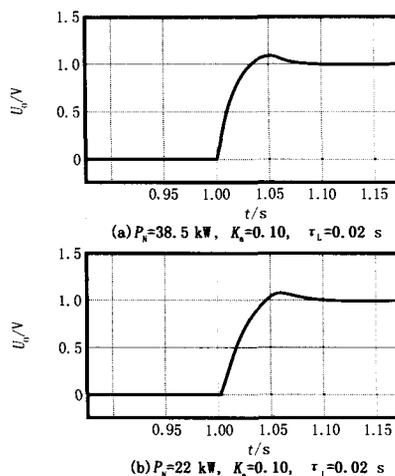


图 4 传统方法不同额定功率相同 PI 参数时阶跃响应曲线

Fig.4 Step response curve when different rated powers and same PI parameters with traditional method

试验 II 遗传算法,不同额定功率,不同 PI 参数时,对于 ① $K_a=0.21$, $\tau_L=0.0364 \text{ s}$, ② $K_a=0.404$, $\tau_L=0.0364 \text{ s}$ 。对应阶跃响应波形分别如图 5(a)、5(b) 所示。

试验 III 遗传算法,不同额定功率,相同 PI 参数 ($K_a=0.21$, $\tau_L=0.0364 \text{ s}$) 时,① 对应阶跃响应波形分别如图 5(a)、图 5(c) 所示。

上述试验结果列于表 1。

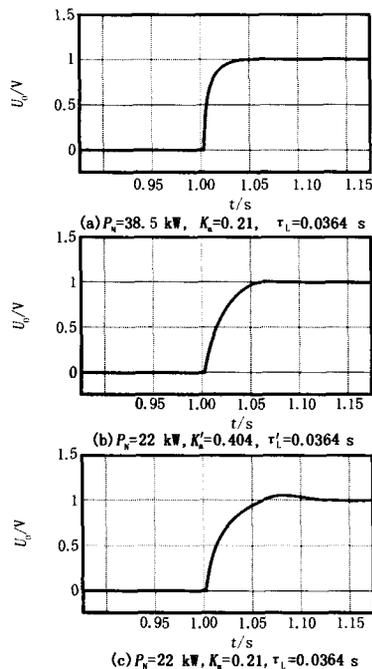


图5 遗传算法不同额定功率PI参数阶跃响应曲线
Fig.5 Step response curve when different rated powers and PI parameters with GA

表1 阶跃响应仿真试验动态性能

Tab.1 Result for step response simulation test

		超调量/%	上升时间/s	对应波形图	动态性能
相同额定功率	传统方法	8.5%	1.04	图4(a)	差
	遗传算法	0.1%	1.02	图5(a)	好
相同PI参数传统方法	$P_{n1}=38.5\text{ kW}$	8.5%	1.04	图4(a)	差
	$P_{n2}=22\text{ kW}$	7.6%	1.05	图4(b)	较好
相同PI参数遗传算法	$P_{n1}=38.5\text{ kW}$	0.1%	1.02	图5(a)	好
	$P_{n2}=22\text{ kW}$	8.9%	1.07	图5(c)	差
不同PI参数遗传算法	$P_{n1}=38.5\text{ kW}$	0.1%	1.02	图5(a)	好
	$P_{n2}=22\text{ kW}$	0.1%	1.03	图5(b)	好

2.2 结论

1) 遗传算法求调节器PI参数较传统方法,使调试更简便,且原动机仿真系统的动态性能(超调量、过渡过程时间等)更优。(见图4(a)、图5(a))

2) 原动机额定功率改变时,若不重新给出PI参数,系统不能维持原有动态特性(见图4(a)、图4(b)和图5(a)、图5(c);遗传算法可离线或在线快速优化和调整PI参数、维持系统原有动态特性。

3) 对模拟控制的原动机仿真系统,可采用遗传算法离线计算;对微机原动机仿真系统,采用遗传算法在线计算,则更加简便。

参考文献

- [1] 吴国瑜. 电力系统仿真[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.
WU Guo-yu. Power System Simulation[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1987.
- [2] 郑玉森. 模拟原动系统仿真[J]. 天津大学学报, 1985, (3): 94-99.
ZHENG Yu-sen. Simulation of Analogue Prime System[J]. Journal of Tianjin University, 1985, (3): 94-99
- [3] 刘觉民, 鲁文军, 等. 微机控制型原动机调速器的模型与设计[J]. 湖南大学学报, 1996, 23(3): 92-97.
LIU Jue-min, LU Wen-jun, et al. Model and Design of Governor of Generator Controlled by Microcomputer[J]. Journal of Hunan University, 1996, 23(3): 92-97.
- [4] IEEE Committee Report. Dynamic Model for Steam and Hydro Turbines in Power Studies[J]. IEEE Trans, 1974, 89(1): 1904-1915.
- [5] 覃平生, 刘觉民, 等. 基于80C196KC的原动机仿真系统设计[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(2): 41-45.
QIN Ping-sheng, LIU Jue-min, et al. Design of Prime Mover Simulation System Based on 80C196KC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(2): 41-45.
- [6] 孙元章, 黎雄, 卢强. 发电机调速系统的模糊逻辑控制器[J]. 控制理论与应用, 1996, 13(5): 621-625.
SUN Yuan-zhang, LI Xiong, LU Qiang. Fuzzy Logic Controller for Generator Governor[J]. Control Theory and Applications, 1996, 13(5): 621-625.
- [7] 周扬忠, 胡育文, 田蕉. 永磁同步电机控制系统中变比例系数转矩调节器设计研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 204-208.
ZHOU Yang-zhong, HU Yu-wen, TIAN Jiao. Research of Torque Controller with Variable Proportion in Permanent Magnet Synchronous Motor Drive[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(8): 145-149.
- [8] 于达仁, 毛志伟, 徐基豫. 汽轮发电机组的一次频调动态特性[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(4): 221-225.
YU Da-ren, MAO Zhi-wei, XU Ji-yu. Dynamic Characteristic of Primary Frequency Regulation of Turbo-generator [J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(4): 221-225.
- [9] 刘金琨. 先进PID控制及其MATLAB仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
LIU Jin-kun. Advanced PID Control and MATLAB Simulation[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.
- [10] 张思才, 张方晓. 一种遗传算法适应度函数的改进方法[J]. 计算机应用与软件, 2006, 23(2): 108-110.
ZHANG Si-cai, ZHANG Fang-xiao. A Modified Method to Fitness Function of Genetic Algorithms[J]. Computer Application and Software, 2006, 23(2): 108-110.

- Power Flow[J]. Power System Technology, 2003, 27(2): 41-44.
- [12] 李兵, 蒋慰孙. 混沌优化方法及其应用[J]. 控制理论与应用, 1997, 14(4): 613-615.
LI Bing, JIANG Wei-sun. Chaos Optimization Method and Its Application [J]. Control Theory and Application, 1997, 14(4): 613-615.
- [13] 张彤, 王宏伟, 王子才. 变尺度混沌优化方法及其应用[J]. 控制与决策, 1999, 14(3): 285-287.
ZHANG Tong, WANG Hong-wei, WANG Zi-cai. Mutative Scale Chaos Optimization Algorithm and Its Application[J]. Control and Decision, 1999, 14(3): 285-287.
- [14] 泰勒. 电力系统电压稳定[M]. 王伟胜, 译. 北京: 中国电力出版社, 2002.
Taylor C W. Voltage Stability in Power System[M]. WANG Wei-sheng, Trans. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [15] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖, 等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
ZHOU Shuang-xi, ZHU Ling-zhi, GUO Xi-jiu, et al. Voltage Stability and Its Control in Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [16] 封向东, 祖小涛, 刘俊勇, 等. 电力系统无功优化和电压调控方案的研究[J]. 成都科技大学学报, 1995, 84(3): 86-92.
FWNG Xiang-dong, ZU Xiao-tao, LIU Jun-yong, et al. Optimization of Reactive Power and Voltage Control in Electric Power Systems Schemes[J]. Journal of Chengdu University of Science and Technology, 1995, 84(3): 86-92.
- [17] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
ZHANG Bo-ming, CHEN Shou-sun. Advanced Power Network Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996.
- [18] 戴彦. 电力市场中的无功功率服务定价研究(博士学位论文)[D]. 杭州: 浙江大学, 2000.
DAI Yan. Reactive Power Pricing in Electricity Market, Doctoral Dissertation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2000.
- [19] 夏可青. 电力市场环境下的无功规划优化的研究(硕士学位论文)[D]. 南京: 东南大学, 2005.
XIA Ke-qing. Optimal Reactive Power Planning in Power Market, Thesis[D]. Nanjing: Southeast University, 2005.
- [20] 张鹏, 刘玉田. 配电系统电压控制和无功优化的简化动态规划法[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(4): 49-53.
ZHANG Peng, LIU Yu-tian. A Simplified Dynamic Programming Approach to Voltage Var Control in Distribution Systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 1999, 11(4): 49-53.

收稿日期: 2006-08-04; 修回日期: 2006-10-17

作者简介:

蒋志平(1969-), 男, 讲师, 博士研究生, 研究方向为电力系统电压稳定、人工智能、电力市场; E-mail: jiangzhiping91@sina.com

唐国庆(1937-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统稳定、故障诊断以及电力市场分析的研究。

(上接第 28 页 continued from page 28)

- [11] 李萌, 沈炯. 基于自适应遗传算法的过热汽温 PID 参数优化控制仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 145-149.
LI Meng, SHEN Jiong. Simulating Study of Adaptive GA-based PID Parameter Optimization for the Control of Superheated Steam Temperature[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(8): 145-149.
- [12] 太军君, 等. 全数字水轮机调速器电液随动系统的仿真研究[J]. 水力发电, 2003, 29(11): 41-43.
TAI Jun-jun, et al. Simulation Study on Electrohydraulic Servo System of Gnu-digital Speed Governor System of Turbine[J]. Water Power, 2003, 29(11): 41-43.
- [13] Goldberg D E. Generic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning[M]. MA: Addison-wesley, 1989.
- [14] 刘觉民, 付振宇, 等. 发电机原动系统仿真器程序设计[J]. 湖南大学学报, 2005, 32(1): 29-32.
LIU Jue-min, FU Zhen-yu, et al. Programming of the Prime System Emulator of Generators[J]. Journal of Hunan University, 2005, 32(1): 29-32.
- [15] 刘觉民. 原动机调速系统仿真模型动态特性研究[J]. 湖南大学学报, 1994, 21(2): 98-104.
LIU Jue-min. Study on Dynamic Characteristic of Emulation Model for Governing System of Prime Movers[J]. Journal of Hunan University, 1994, 21(2): 98-104.
- [16] LIU Jue-min, DIAO Xian-qiang, FU Zhen-yu. Study on Increasing the Reliability of Speeder System in Analogue Prime Movers[A]. In: Proceedings of the 1st International Conference on Reliability of Electrical Products and Electrical Contacts[C]. Suzhou: 2004.

收稿日期: 2006-08-02; 修回日期: 2006-09-13

作者简介:

陈明照(1982-), 男, 硕士研究生, 从事电力电子技术在电力系统应用方向研究; E-mail: powermzhchen@yahoo.com.cn

刘觉民(1950-), 男, 副教授, 主要从事电力电子技术和电力系统可靠性方向教学与科研;

谭立新(1971-), 男, 副教授, 从事电力电子技术及其应用的研究。