

基于析因试验的固体氧化物燃料电池 热电联供系统设计参数研究

赵玺灵, 张兴梅, 段常贵, 邹平华

(哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 黑龙江省 哈尔滨市 150090)

Research on Design Parameters of Solid Oxide Fuel Cell Combined Heat and Power System Based on Factorial Experiment

ZHAO Xi-ling, ZHANG Xing-mei, DUAN Chang-gui, ZOU Ping-hua

(School of Municipal & Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, Heilongjiang Province, China)

ABSTRACT: The authors research the design parameters of solid oxide fuel cell combined heat and power (SOFC-CHP) system constituted by a pre-reformer, a SOFC stack, an afterburner, two heat exchangers and other assistant facilities, and build the mathematical model of this system. Taking a SOFC-CHP system with generation scale of 70 kWe as research subject and using the design method of factorial experiment, the computer simulation experiment is carried out and the factorial analysis on part of parameters of SOFC-CHP system is conducted. Analysis results show that the fuel utilization and excess air ratio are main design parameters impacting the power generation of this system; the main design variables impacting heat recovery of the system and electricity to heat ratio are fuel utilization and the steam to carbon ratio, and the influence of interaction between the two parameters on SOFC-CHP system is more evident than that of excess air ratio; the influence of cathode exhaust gas recirculation ratio on heat and electric power of the system is slight, so it is not regarded as the main design parameter of the system. The presented research is available for reference to rational design of SOFC-CHP system.

KEY WORDS: factorial experiment; solid oxide fuel cell (SOFC); combined heat and power (CHP) system; interaction

摘要: 对固体氧化物燃料电池热电联供(solid oxide fuel cell combined heat and power, SOFC-CHP)系统的设计参数进行了研究, 该系统由重整器、燃料电池电堆、燃烧室、2个热交换器及其它辅助设备组成。建立了系统的数学模型, 以发电规模为70 kWe的系统为研究对象, 运用析因试验的设计方法进行了计算机模拟试验, 对系统的部分设计参数进行了析因分析。分析结果表明: 影响系统发电功率的主要设计参

数是燃料利用率和过量空气比率; 影响系统热回收和电热比的主要设计变量是燃料利用率和水蒸汽与碳的比率, 且这2个参数的交互作用较过量空气比率对系统影响显著; 阴极排气再循环比率对系统热、电功率的影响甚微, 不是系统的主要设计参数。整个研究作为SOFC-CHP系统的合理设计提供了指导。

关键词: 析因试验; 固体氧化物燃料电池; 热电联供系统; 交互作用

0 引言

固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC)发电技术是一种高效的能量转换技术, 它将燃料的化学能直接转化为电能, 与常规电池不同之处在于其燃料和氧化剂不是储存在电池内部, 而是来自外部供给, 只要不断地提供燃料和氧化剂, 燃料电池就可以连续不断地发电^[1-2], 其电化学效率高且废热品质较高, 可以实现热电联供(combined heat and power, CHP), 通过对系统参数的合理设计, 可以使系统达到较高的热、电效率。

在以往的研究工作中^[3-6], 对发电系统的性能分析常采用单因素的参数分析法, 即通过变化某单一变量, 分析其对系统另一个性能参数的影响趋势。而燃料电池发电系统具有多变量(电堆操作温度、压力、电流密度、燃料利用率、过量空气比率等)的特点, 采用单因素分析方法难于比较几个单因素的影响程度, 更不能分析多个因素交互作用的影响。本文设计了SOFC-CHP系统, 建立了系统各组件的数学模型, 并以规模为70 kWe的系统为研究对象,

采用多因素析因试验^[7]的设计方法,从系统的角度对部分设计参数进行了研究。

1 系统描述

以天然气蒸汽重整 SOFC-CHP 系统的概念性设计如图 1 所示。

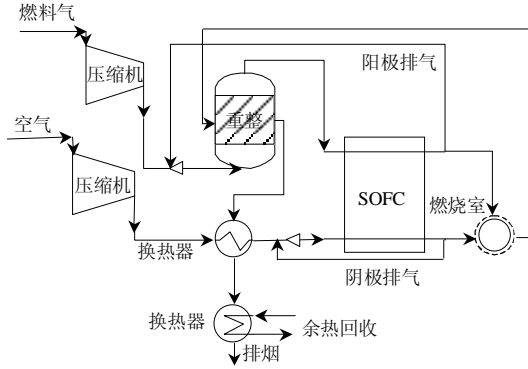


图 1 SOFC-CHP 系统流程图

Fig. 1 The flow chart of SOFC-CHP system

燃料气体经压缩机压缩与阳极排气中的水蒸汽混合后进入预重整器中,在重整器中部分燃料实现蒸汽重整过程,产生的富氢气体进入 SOFC 的阳极;系统的冷却空气经压缩机压缩、预热器预热后进入 SOFC 的阴极;在 SOFC 电堆中,燃料气与空气进行电化学反应,电子通过外电路形成回路,产生的电流经 DC/AC 转换向用电设备供电;SOFC 出口的阴、阳极排气进入燃烧室,在燃烧室内催化燃烧,产生高温烟气,高温的余热依次为重整器、空气预热器、余热换热器等部件提供热能。系统中采用了阳极排气再循环和阴极排气再循环的流程结构,阳极排气提供了重整需要的水蒸汽,避免了使用蒸汽发生设备^[8];阴极排气再循环与入口空汽混合,可以减少空气预热器的热负荷,合理利用了系统的能量^[9]。

2 系统模型

2.1 预重整器模型

预重整器中主要完成甲烷蒸汽重整反应和一氧化碳的水汽转换反应^[10-11],在研究中,假设反应达到平衡态,甲烷的蒸汽重整反应可用式(1)表示,水汽转换反应可用式(2)表示,以上 2 种反应的平衡常数都可通过热力学计算式(3)来确定。

$$K_{p,\text{reform}} = \frac{P_{\text{H}_2}^3 P_{\text{CO}}}{P_{\text{CH}_4} P_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (1)$$

$$K_{p,\text{shift}} = \frac{P_{\text{CO}_2} P_{\text{H}_2}}{P_{\text{CO}} P_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (2)$$

$$\ln(K_p) = -\frac{\Delta G^0}{RT} \quad (3)$$

式中: $K_{p,\text{reform}}$ 为甲烷蒸汽重整反应的平衡常数; $K_{p,\text{shift}}$ 为水汽转换反应的平衡常数; P_{H_2} 、 P_{CO} 、 P_{CH_4} 、 $P_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 P_{CO_2} 分别为 H_2 、 CO 、 CH_4 、 H_2O 和 CO_2 的分压力; K_p 为任意反应的平衡常数; ΔG^0 为反应的吉布斯自由能的变化量(kJ/mol); R 为通用气体常数(kJ/(mol·K)); T 为化学反应温度(K)。

2.2 SOFC 电堆模型

在电堆内部,部分燃料仍需进行重整反应,还需建立电堆的质量平衡方程(4)、能量平衡方程(5)和电学方程(6):

$$N_{i,\text{out}} = N_{i,\text{in}} + \sum_k v_{i,k} R_k, \quad k=1,2,3 \quad (4)$$

$$\sum_i Q_{i,\text{out}} = \sum_i Q_{i,\text{in}} + \sum_k R_k (-\Delta H_k) - W_{\text{el}} \quad (5)$$

$$U = -\frac{\Delta G^0}{n_e F} - \frac{RT}{n_e F} \ln \left[\frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{H}_2} (P_{\text{O}_2})^{1/2}} \right] - h \quad (6)$$

式中: $N_{i,\text{out}}$ 和 $N_{i,\text{in}}$ 为组分 i 的出、入口摩尔流率(mol/s); $v_{i,k}$ 为组分 i 在化学反应 k 中的化学计量系数; R_k 为反应率(mol/s); $Q_{i,\text{out}}$ 和 $Q_{i,\text{in}}$ 分别为组分 i 的出、入口的能量流率(kJ/s); ΔH_k 为反应 k 的摩尔焓变(kJ/mol); W_{el} 为电功率(kW); P_{O_2} 为氧气的分压力; U 为操作电压(V); n_e 为反应的电子数; F 为法拉第常数(96 485 C/mol); h 为电阻损失(V)。

其中,电流密度与反应率的关系为式(7),电阻损失的计算采用式(8),更为详细的模型说明及模型的验证参见文献[12-13]。

$$R_3 = \frac{j}{n_e F} A \quad (7)$$

$$h = j \left(\frac{t_a}{s_a} + \frac{t_e}{s_e} + \frac{t_c}{s_c} \right) \quad (8)$$

式中: A 为活性电极的面积(m^2); j 为电流密度(A/m^2); t_a 、 t_e 、 t_c 为阳极层、电解液层、阴极层的厚度(m); s_a 、 s_e 、 s_c 为阳极层、阴极层的电导率和电解液层电导($\Omega \cdot \text{m}$)⁻¹。

2.3 系统其它组件模型

后燃烧室模型可通过燃烧反应组分计算和热平衡原理来描述:

$$Q_{i,\text{in-psi}} + Q_{i,\text{in-chem}} - Q_{\text{lost}} = Q_{i,\text{comb-out}} \quad (9)$$

式中: $Q_{i,in-psi}$ 为进入燃烧室组分的物理热; $Q_{i,in-chem}$ 为进入燃烧室组分的化学热; Q_{lost} 为散热损失; $Q_{i,comb-out}$ 为燃烧室出口能量(kW)。

系统中的水、汽介质所需的输送设备要消耗的功率由式(10)确定:

$$W_{in} = \frac{V \Delta P}{h_s} \quad (10)$$

式中: V 为介质的体积流量(m^3/s); ΔP 为介质流经设备后的压力升高值(kPa); h_s 为设备的等熵效率(%)。

系统中的热交换设备模型为

$$Q_{hot} = e Q_{cold} \quad (11)$$

式中: Q_{hot} 为热流体侧的放热量(kW); e 为热交换器效率(%); Q_{cold} 为冷流体侧的吸热量(kW)。

模拟中取燃气和空气压缩机效率为 70%, 燃烧室、预重整器、热交换器等设备保温良好, 散热损失占各自输入能量的 2%, DC/AC 转换效率为 93%^[14]。在常温条件下, 系统入口燃料气的摩尔成分如下: CH_4 为 97%, CO_2 为 1%, N_2 为 2%, 流量为 0.2 mol/s。入口空气组分如下: O_2 为 21%, N_2 为 79%。在设计工况下, 系统的主要性能参数见表 1, 其中定义进入电堆的氧气的摩尔流量与按照化学计量比计算的反应需要的摩尔流量的比值为过量空气比率 I , 电化学反应消耗的燃料量与供给的燃料量的比值为燃料利用率 U_f , 阴、阳极排气循环量与阴、阳极排气总量的比值为阴、阳极循环比率, 分别表示为 r_{AGR} (anode gas recycled)和 r_{CGR} (cathode gas recycled), 重整需要的蒸汽与碳的比率表示为 r_{STCR} (steam to carbon ratio)。

表 1 系统主要性能参数

Tab. 1 Parameters of SOFC-CHP system			
电堆性能参数	数值	系统设计参数	数值
电堆电压/V	0.78	蒸汽与碳的比率	2.5
电极面积/ m^2	52.4	燃料利用率	0.8
电流密度/(A/m^2)	2 000	过量空气比率	7.0
操作温度/ $^{\circ}C$	800	阳极循环比率	0.87
升温梯度/ $^{\circ}C$	100	阴极循环比率	0.6

设计工况的模拟结果表明, 系统的发电效率可达 47.9%, 热电联供效率可达 73.4%。

3 析因试验设计

选择独立的设计变量 r_{STCR} (r_{STCR} 决定 r_{AGR})、 r_{CGR} 、 I 和 U_f 4 个因素作为试验对象, 分析每个因素的取值范围, 在其取值范围内取高、低 2 个水平, 共有 16 种组合($i=16$), 取高低水平的 $\pm 1\%$ 作 2 次重

复试验, 即采用 4 因素 2 水平 2 次重复计算机试验方法进行试验, 共进行的试验次数为 $2^4 \times 2 = 32$, 系统输出为发电功率、热功率、电热比和联供效率 4 个响应, 这 4 个量可以体现出系统的性能。析因试验参数设计见表 2。

表 2 析因试验参数设计情况
Tab. 2 Parameters design of factorial experiment

因素	描述	低水平值	高水平值
a	r_{STCR}	2.0	2.5
b	r_{CGR}	0.3	0.6
c	I	6.0	7.0
d	U_f	0.7	0.8

对 2^4 个因子组合(a,b,ab,c,abc,...)进行 2 次重复试验, 每个因子组合的效应 E 可通过式(12)来计算^[15]:

$$E = \frac{H - L}{R \cdot 2^{(k-1)}} \quad (12)$$

式中: H 为该因子组合高水平响应之和; L 为因子组合低水平响应之和; R 为重复试验次数; k 为因子数。

4 试验结果和讨论

4.1 对发电功率的影响分析

各种因素组合对发电功率的影响如图 2 所示。

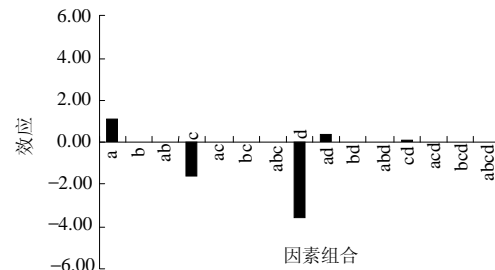


图 2 各种组合因素对电功率的效应

Fig. 2 Effects of factors' on electric power

从对发电功率的影响分析中可以得出, 因素 b 对发电功率几乎没有影响, 且各因素的交互作用对发电功率的影响也很微弱, 影响系统发电效率的主要设计变量是燃料利用率和过量空气比率。影响最为显著的是因素 d, 且为负向效应, 即随着燃料利用率的增大, 发电功率下降。这是因为在固定的电流密度条件下, 燃料利用率增大, 入口所需燃料量减小, 电化学反应后剩余氢气量减小, 分压力下降, 能斯特电势下降。其次是因素 c, 亦为负向效应, 即过量空气比率降低, 系统所需空气量减小, 电堆的操作温度升高, 欧姆过电势减小, 导致电池的电压升高, 功率增大。

因素 a 对电功率的影响为正向效应, 随着 r_{STCR}

的增大,重整器入口水蒸汽的比率增大,有利于重整反应的进行,重整产生的氢气增多,在燃料利用率不变的情况下,电堆出口氢气的分压力会有所增大,导致电势增加,功率增大。

4.2 对热回收的影响分析

各种因素组合对回收热的影响如图 3 所示。

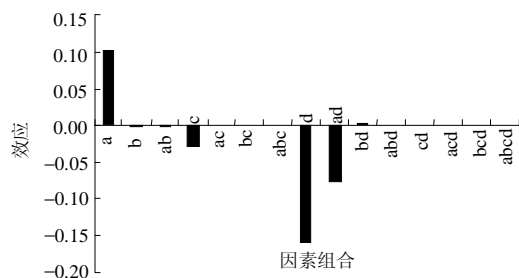


图 3 各种组合因素对回收热的效应

Fig. 3 Effects of factors' on heat recovered

影响最为显著的仍是因素 d, 且为负向效应, 即随着燃料利用率的增大, 参加电化学反应的燃料量增加, 进入后燃室的燃料量相对减少, 燃烧温度降低, 排烟可回收热量减少。其次, 对排烟热回收影响较为显著的是因素 a, 为正向效应, 随着 r_{STCR} 的增大, 高温阳极排气与入口燃料混合进入重整器, 减少了重整器的需热量, 最终导致排烟可回收热量增加。

从图 3 中还可以看出, 因素 a 和因素 d 的交互作用对系统回收热的综合影响为负向影响, 且较因素 c 显著。

从对系统回收热的影响分析中可以得出, 因素 b 对热回收功率的影响甚微, 影响热回收功率的主要设计参数是燃料利用率和水蒸汽与碳的比率。

4.3 对系统电热比的影响分析

各种因素组合对电热比的影响如图 4 所示。

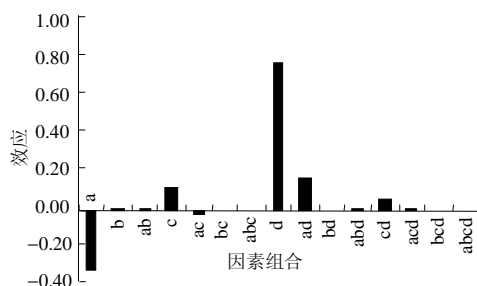


图 4 各种组合因素对电热比的效应

Fig. 4 Effects of factors' on electric to heat ratio

从图中可以看出, 影响系统电热比的因素分别为因素 d, 因素 a, 因素 a、d 的交互作用, 因素 c, 因素 c、d 的交互作用和因素 a、c 的交互作用, 根

据图中因素的正、负向效应, 选择有显著影响的因素, 调节主要设计变量就可以合理设计系统所需的热电比。

综合以上分析可以发现, r_{CGR} 对系统性能参数的影响程度甚微, 分析其原因在于: r_{CGR} 的使用虽然可以使空气预热器的热负荷减小, 但大量的阴极排气循环进入电堆中, 使电堆的排气温度降低, 后燃室排烟温度降低, 系统可利用热能的减小抵消了空预器热负荷的减小, 因此 r_{CGR} 对系统的热、电影响可以不予考虑。在今后的系统流程设计中, 若在后燃烧室材料允许的温度约束条件下, 可以避免使用阴极排气再循环的流程结构。

5 结论

(1) 对系统发电功率影响显著的设计变量是燃料利用率和过量空气比率, 且各个设计变量的交互影响对发电功率的影响可以不予考虑。

(2) 对系统热回收影响显著的主要设计变量是燃料利用率和水蒸汽与碳的比率, 且这 2 个参数的交互作用较过量空气比率对系统热回收的影响显著。

(3) 对系统电热比影响较为显著的因素是燃料利用率和水蒸汽与碳的比率, 且这 2 个参数的交互作用较过量空气比率对系统电热比的影响显著。

(4) 阴极排气再循环比率对系统热电功率的影响甚微, 不是系统的主要设计参数, 在系统设计过程中, 若在后燃烧室材料允许的燃烧温度约束条件下, 可将此设计参数设计为定值, 标定在系统设计手册中, 或避免使用阴极排气再循环的流程结构。

参考文献

- 衣宝廉. 燃料电池——高效、环境友好的发电方式[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- 张颖颖, 曹广益, 朱新坚. 燃料电池——有前途的分布式发电技术[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 57-61.
Zhang Yingying, Cao Guangyi, Zhu Xinjian. Fuel cell—a promising distributed generation technique[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 57-61(in Chinese).
- Massardo A, F, Lubelli F. Internal reforming solid oxide fuel cell—gas turbine combined cycles (IRSOFC—GT): Part A—cell model and cycle thermodynamic analysis[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2000, (122): 27-35.
- Zhang W, Croiset E, Douglas P L, et al. Simulation of a tubular solid oxide fuel cell stack using aspen plus unit operation models [J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46(2): 181-196.
- Chan S H, Ding O L. Simulation of a solid oxide fuel cell power system fed by methane[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2005, 30(2): 167-169.

- [6] 陈启梅, 翁一武, 翁史烈, 等. 燃料电池-燃气轮机混合发电系统性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(4): 31-35.
Chen Qimei, Weng Yiwu, Weng Shilie, et al. Performance analysis of a hybrid system based on a fuel cell and a gas turbine [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(4): 31-35(in Chinese).
- [7] 张志贤, 张瑞镐. 两水平析因试验[J]. 化工标准化与质量监督, 2000, (3): 21-23.
Zhang Zhixian, Zhang Ruihao. Two level factorial experimental design[J]. Chemical Industry Standardiation & Quality Supervision, 2000, (3): 21-23(in Chinese).
- [8] Marsano F, Magistri L, Massardo A F. Ejector performance influence on a solid oxide fuel cell anodic recirculation system[J]. Journal of Power Sources, 2004, 129(2): 216-228.
- [9] Riensche E, Meusinger J, Stimming U, et al. Optimization of 200kW SOFC cogeneration power plant[J]. Journal of Power Sources, 1998, 71(2): 306-314.
- [10] Ahmed K, Foger K. Kinetics of internal steam reforming of methane on Ni/YSZ-based anodes for solid oxide fuel cells[J]. Catalysis Today, 2000, 63(2-4): 479-487.
- [11] Ota T, Koyama M, Wen C, et al. Object-based modeling of SOFC system: dynamic behavior of micro-tube SOFC[J]. Journal of Power Sources, 2003, 118(1-2): 430-439.
- [12] 赵玺灵, 张兴梅, 段常贵. 燃料电池与传统发电方式的热力学分析[J]. 煤气与热力, 2007, 27(4): 41-43.
Zhao Xiling, Zhang Xingmei, Duan Changgui. Thermodynamic analysis of fuel cell and conventional power generation mode [J]. Journal of Gas & Heat, 2007, 27(4): 41-43(in Chinese).
- [13] Zhao Xiling, Zhang Xingmei, Duan Changgui. The performance research of high efficiency prime motor DIR-SOFC for decentralized energy system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology (New Series), 2007, (14): 501-504.
- [14] Ulleberg O. Stand-alone power system for the future: optimal design, operation, and control of solar-hydrogen energy systems[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 1998.
- [15] 王武义. 误差原理与数据处理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001.

收稿日期: 2007-04-25。

作者简介:

赵玺灵(1980—), 女, 博士, 主要从事城市燃气、燃料电池热电联供应用相关技术的研究工作, E-mail: zhaoxiling@126.com;

张兴梅(1963—), 女, 博士研究生, 副教授, 从事城市燃气、燃料电池应用技术的研究工作;

段常贵(1937—), 男, 教授, 博士生导师, 从事城市燃气、新能源的研究和教学工作;

邹平华(1944—), 女, 教授, 博士生导师, 从事集中供热技术的研究和教学工作。

(责任编辑 沈杰)

(上接第 72 页 continued from page 72)

- [7] Lee K Y, Bai X M, Young M P. Optimization method for reactive power planning by using a modified simple genetic algorithm [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(4): 1843-1850.
- [8] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]. IEEE International Conference on Neural Networks, Perth (Australia), 1995.
- [9] Storn R, Price K. Minimizing the real functions of the ICEC'96 contest by differential evolution[C]. 1996 IEEE Evolutionary Computation Conference, Nayoya, Japan, 1996.
- [10] Qing A Y. Dynamic differential evolution strategy and applications in electromagnetic inverse scattering problems[J]. IEEE Trans on Geosciences and Remote Sensing, 2006, 44(1): 116-125.
- [11] Chiou J, Chang Ch, Su C Z. Ant direction hybrid differential evolution for solving large capacitor placement problems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(4): 1794-1800.
- [12] Storn R, Price K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous space[J]. Global Optimization, 1997, 11(4): 341-359.
- [13] Liu J, Lampine J N. A fuzzy adaptive differential evolution algorithm[C]. Proceedings 2002 IEEE Region 10 Conference on Computers, Communications, Control and Power Engineering, Beijing, China, 2002.
- [14] 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 Weisun. Chaos optimization method and its applications[J]. Control Theory and Application, 1997, 14(4): 613-615(in Chinese).
- [15] Zhang H B, Zhang L Z, Meng F L. Reactive power optimization based on genetic algorithm[C]. 1998 International Conference on Power System Technology, Beijing, China, 1998.
- [16] 刘明波, 李健, 吴捷. 求解无功优化的非线性同伦内点法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 1-7.
Liu Mingbo, Li Jian, Wu Jie. Nonlinear homotopy interior-point algorithms for reactive power optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 1-7(in Chinese).
- [17] Yan W, Lu S, Yu D C. A novel optimal reactive power dispatch method based on an improved Hybrid evolutionary programming technique[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(2): 913-918.

收稿日期: 2007-02-06。

作者简介:

刘自发(1973—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统规划和运行;

闫景信(1982—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划和仿真;

张建华(1952—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制, 输配电自动化技术。

(实习编辑 王晔)