

# 基于协同进化遗传算法的微网经济环保调度

宋晓英, 王艳松

(中国石油大学信息与控制工程学院, 山东 青岛 266580)

**摘要:** 为合理调度分布式电源使微网经济和可靠运行, 提出一种基于协同进化遗传算法实现微网分布式电源出力调度的方法。建立了冷热电联产型的微网经济环保调度模型, 新增考虑热备用约束条件; 建立分阶段目标函数, 将蓄电池虚拟放电和充电价格计入群体寻优目标函数; 结合协同进化遗传算法, 使用群体寻优目标函数和精英寻优目标函数寻求分阶段经济调度最优解; 给出了孤网和并网运行方式下的调度策略。通过算例分析了并网和孤网两种运行方式下冬季的经济调度方案, 结果表明调度模型和算法是有效的。

**关键词:** 微电网; 目标函数; 分阶段经济调度; 协同进化遗传算法 (CGA)

## Economic and environmental dispatch of microgrid using co-evolutionary genetic algorithm

SONG Xiao-ying, WANG Yan-song

(College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

**Abstract:** Aiming at dispatching the distributed generation reasonably to make the microgrid operate economically and reliably, a method based on co-evolutionary genetic algorithm is proposed to dispatch the distributed generation in microgrid. A dispatching model of economic and environmental CCHP microgrid system is established. The new consideration of hot standby constraint is added. Multistage objective function is established, and the virtual charging and discharging price of the battery are included in the population optimization objective function. Combined with co-evolutionary genetic algorithm, the population optimization objective function and the elite optimization objective function are used to seek the best individuals from the population. The dispatching policies in grid-connected operation and isolated-connected operation are given. The analysis of the results of economic dispatch in winter in two modes of grid-connected operation and isolated-connected operation validates the effectiveness of proposed dispatching mode and the algorithm.

**Key words:** microgrid; objective function; multistage economic dispatch; co-evolutionary genetic algorithm (CGA)

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)05-0085-05

## 0 引言

近年来分布式电源<sup>[1]</sup>受到广泛关注, 但因其分散、随机变动等特点, 不能大规模接入电网。为解决不可控分布式单元的并网渗透率问题, 并充分发挥分布式电源的优势和效能, 微电网应运而生。为实现微网的经济、可靠运行, 动态地对各微电源进行全局优化分配极其重要。

目前, 微网的经济调度已成为国内外研究的热点。文献[2]提出了一种自治型微电网储能容量的配置方法, 分析了微网中累计的不平衡能量在微网允许最大连续孤岛运行时间和系统极端条件下期望系统稳定运行时间下的变化特性; 文献[3]建立了计及电动汽车接入的微电网经济调度数学模型, 分析了

不同充放电模式对微电网经济运行的影响; 文献[4]在考虑微源同时提供有功和无功功率的基础上, 建立了计及制热收益的热电联产型微网系统经济运行优化模型, 运用改进遗传算法优化了各微源的有功和无功出力。

微网调度中能量平衡控制是亟需解决的问题, 蓄电池的实时能量优化调度因此成为一个研究热点。文献[5]建立了包含蓄电池储能的微网多目标有功优化模型, 蓄电池基于先前制定好的规则进行逐次交替充放电; 文献[6]在目标函数中加入了蓄电池容量变量, 提出了基于经济调度的蓄电池容量优化模型; 文献[7]提出了并网和孤网运行方式下所需配置最小储能容量的定量分析方法。

本文建立了微电网经济环保调度模型, 给出了

运行维护费用计算方法,新增考虑热备用约束条件,建立分阶段寻优目标函数,将蓄电池虚拟放电和充电价格计入群体寻优目标函数,并将群体寻优目标函数和精英寻优目标函数与协同进化遗传算法相结合,进行微电网分阶段经济调度。

## 1 微网系统调度优化模型

### 1.1 微网结构

微网基本结构如图 1 所示<sup>[8]</sup>。整个微网相对外网来说是一个整体,通过一条联络线和外网相联系。微网内包括光伏发电(PV, 10 kW)、风力发电(WT, 10 kW)、微型燃气轮机(MT, 70 kW)、燃料电池(FC, 40 kW)等微电源以及作为储能元件的蓄电池(BS, 30 kW)。由微型燃气轮机构成的冷热电联产系统向用户同时供热(冷)能和电能,提高利用效率。

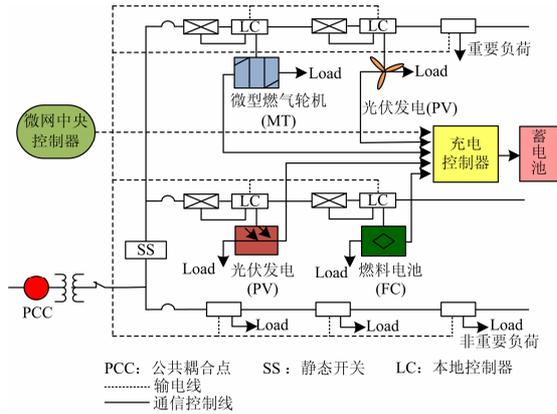


图 1 微网基本结构

Fig. 1 Basic construction of microgrid

其中, MT 采用文献[5]中的发电模型, PV、WT 和 FC 采用文献[9]中的发电模型, BS 采用文献[10]中的发电模型。

### 1.2 微网环保经济调度数学模型

本文提出分阶段寻优目标函数,分别使用精英寻优和群体寻优两种目标函数进行优化调度。群体寻优阶段重在寻找较优种群应具有的模式,力求能均衡蓄电池的充放电并满足约束条件;精英寻优阶段则从群体寻优所得精英群中挑选最优精英。

#### 1.2.1 精英寻优目标函数

本文应用的优化目标函数考虑使微网一天内由发电费用、用户停电损失费用,污染排放物的治理费用,热电联产系统的制冷、制热收益以及可再生能源的发电补贴所构成的综合成本最低,建立精英寻优目标函数为

$$\min F(x) = C_F + C_{DEP} + C_{OM} + C_{Grid} + C_L + C_E - C_{CCHP} - C_{AL} \quad (1)$$

式中:  $C_F$ 、 $C_{DEP}$ 、 $C_{OM}$ 、 $C_{Grid}$  分别为  $t$  时刻各微源的燃料费用、投资折旧费用、运行维护费用、微网与外网的交互费用,都属于发电费用;  $C_L$ 、 $C_E$ 、 $C_{CCHP}$ 、 $C_{AL}$  分别为用户停电损失费用,热电联产系统的制冷、制热收益以及可再生能源的发电补贴。

其中,本文提出的运行维护费用  $C_{DEP}$  的计算如式(2)所示,其他费用的计算公式参照文献[6,11]。

$$C_{DEP} = \sum_{i=1}^m \left( \frac{C_i}{8760} \cdot \frac{\varepsilon(1+\varepsilon)^{year}}{(1+\varepsilon)^{year} - 1} \cdot P_{iN} \right) \quad (2)$$

式中:  $C_i$  是第  $i$  个 DG 的单位容量安装成本;  $\varepsilon$  是年利率;  $year$  为折旧年限;  $P_{iN}$  是第  $i$  个 DG 的额定功率。

#### 1.2.2 群体寻优目标函数

针对微网在峰、平、谷时段的购、售电价格,给蓄电池虚拟一个充、放电价格,即虚拟放电费用和充电利润,建立计及放电惩罚和充电奖励的群体寻优目标函数,应用于从群体中寻找最优个体过程中。

$$\min F'(x) = \min F(x) + C_{BS} P'_{BS} \quad (3)$$

其中:  $C_{BS}$  为虚拟充放电价格;  $P'_{BS}$  为蓄电池的充放电功率,其值大于 0 表示放电,小于 0 表示充电。

由于峰时段电价高,平、谷时段电价相对低。若令峰时段从外网购电的费用大于蓄电池虚拟放电费用,且向外网售电的利润大于给蓄电池充电的虚拟利润,则可保证在峰时段蓄电池放电,微网优先向外网售电。平、谷时段的原理相同。本文采用的购/售电电价和虚拟充/放电电价如表 1 所示。

表 1 购/售电电价和虚拟充/放电电价

Table 1 Purchasing/selling price and virtual charging/discharging price

外网价格/(元/kWh)			蓄电池虚拟价格/(元/kWh)		
项目	峰	平	项目	峰	平
购电	1.56	0.70	虚拟放电	0.50	1.40
售电	1.28	0.54	虚拟充电	0.30	0.80

蓄电池的储能有限,此方法能让微网在平、谷时段优先给蓄电池充电,在峰时段优先选择蓄电池放电并售电给外网,且能缓冲蓄电池完全放电的时间,使其尽可能保持一定的储能量。既利用微网对外网进行“削峰填谷”,又能实现微网经济调度最优化,使微网与外网达到双赢。

#### 1.2.3 约束条件

本文首先考虑功率平衡约束、功率上下限约束、联络线传输功率约束、蓄电池的储能上下限约束<sup>[12]</sup>,其次新增了一种热备用约束,以减小负荷波动,提高供电的冗余度,从而提高供电的可靠性。具体计算公式为

$$\sum P_{DGi,max} - \sum P_{DGi} + \sum P_{Grid,max} - \sum P_{Grid} \geq 5\% \cdot \sum P_{Load} \quad (4)$$

其中:  $P_{DGi}$ 、 $P_{DGi,max}$  分别为各微源出力和最大出力;  $P_{Grid}$ 、 $P_{Grid,max}$  分别为联络线传输功率和最大传输功率;  $P_{Load}$  为负荷功率。

### 1.3 经济调度的控制策略

并网运行下的微网与外网间有电能交换, 其经济调度策略如图 2 所示。

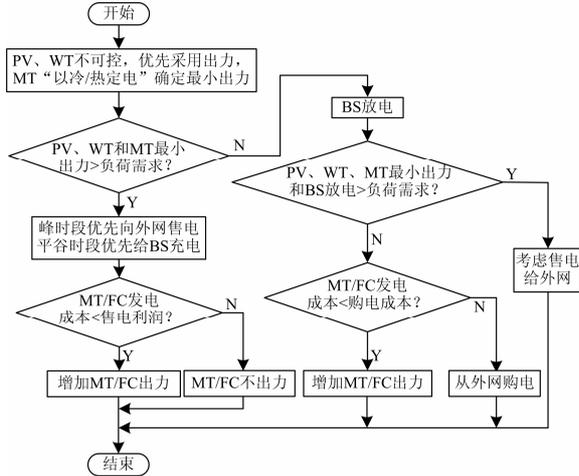


图 2 并网运行调度策略

Fig. 2 Dispatching strategy in grid-connected operation

微网在孤网运行时与外网将不再进行电能交换, 其经济调度策略如图 3 所示。

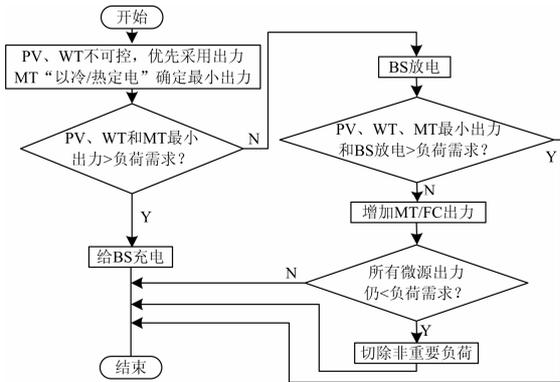


图 3 孤网运行调度策略

Fig. 3 Dispatching strategy in isolated-connected operation

## 2 基于协同进化遗传算法的微网经济调度

协同进化遗传算法(CGA)<sup>[13]</sup>是把决策种群分为同时进化的  $I_1$  个决策子种群  $X_i = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_{I_2}\}$ , 并增加罚种群  $Y = \{y_1, \dots, y_i, \dots, y_{I_2}\}$ , 其中每个  $y_i = (w_{1i}, w_{2i})$  代表一组罚因子。其中, 罚种群  $Y$  中每个个体  $y_i$  对应一个决策子种群  $X_i$ 。

### 2.1 个体和罚因子的评价函数

本文应用综合考虑违反约束数量和违反约束程度的罚函数。

评价决策子种群  $X_i$  中个体  $x_i$  的适应度函数为

$$adapt(x) = \begin{cases} 1/[\min F'(x) + sum \cdot w_1 + num \cdot w_2] & \text{群体寻优} \\ 1/[\min F(x) + sum \cdot w_1 + num \cdot w_2] & \text{精英寻优} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\min F'(x)$ 、 $\min F(x)$  分别为群体寻优和精英寻优目标函数;  $sum$ 、 $num$  分别表示该个体违反约束的程度和个数;  $w_1$  和  $w_2$  是  $y_i$  所对应的罚因子。

罚种群  $Y$  中个体  $y_i$  的适应度函数分两种情况计算。当  $X_i$  中至少有一个可行解时,  $y_i$  的适应度函数为

$$P(y_i) = 1 / [num_{fit} + \sum adapt_{fit}(x)] \quad (6)$$

当  $X_i$  中没有可行解时,  $y_i$  的适应度函数为

$$P(y_i) = adapt_{max}(x) + \sum sum / \sum num + \sum num \quad (7)$$

式中:  $num_{fit}$ 、 $adapt_{fit}(x)$  分别为  $X_i$  中可行解的个数和适应度;  $adapt_{max}(x)$ 、 $\sum sum$  和  $\sum num$  分别表示  $X_i$  中所有个体的最大适应度、违反约束的总量和约束的个体总数;  $\sum sum = \sum [G(x_i) / G_{max}(x_i)]$ , 计算时对每个约束的违反量统一化处理, 以体现所有约束的违反程度。  $P(y_i)$  越小, 越利于  $X_i$  朝着违反约束数目少和程度小的方向进化。

### 2.2 基于 CGA 的分阶段经济调度

首先是群体寻优阶段。决策种群采用遗传算子(选择、交叉、变异)进化, 使用式(5)利用罚种群  $Y$  中个体  $y_i$  计算每个决策子种群  $X_i$  中个体  $x_i$  的适应度, 记录适应度最大的前 3 个较优个体; 然后使用式(6)和式(7)利用决策子种群  $X_i$  的信息计算对应  $y_i$  的适应度; 再利用新的罚种群  $Y$  对决策子种群  $X_i$  进化更新, 并不断更新记录的较优个体, 如此往复进化, 最终得到由许多较优个体组成的精英群。

其次是精英寻优阶段。对精英群中储存的较优个体应用式(5)计算适应度, 求得的适应度最高的精英个体作为当前时刻分阶段经济调度的最优解。

## 3 算例分析

本文应用图 1 所示微网结构, 算例实行分时电价政策, 峰时段为 10:00~14:00 和 18:00~20:00, 平时段为 07:00~9:00、15:00~17:00 和 21:0~22:00, 谷时段为 23:00~06:00。选取某地冬季典型日负荷数据进行分析, PV 和 WT 的出力不可控, 模型基础数据参照文献[11,14]设定, 冬季热负荷、MT 满足热负荷需求时的最小出力以及 PV 和 WT 的功率如图 4 所示。

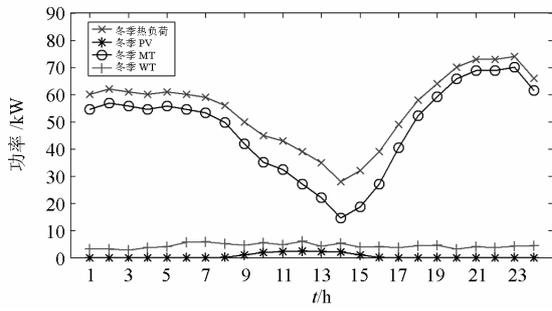


图4 热负荷以及PV、WT和MT功率

Fig. 4 Heating loads and power of PV, WT and MT

应用本文所提出的算法对冬季典型日进行优化调度, 并网时的出力调度结果如图5所示, 并网时采用不同目标函数所得综合成本如图6所示。

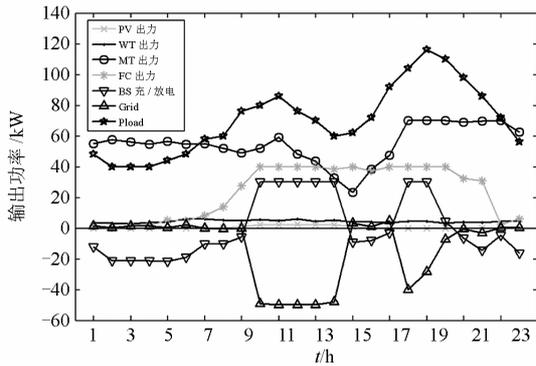


图5 并网运行的出力调度结果

Fig. 5 Dispatching results in grid-connected operation

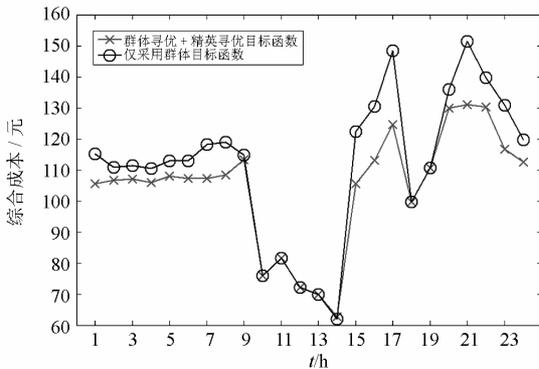


图6 并网运行的综合成本

Fig. 6 Comprehensive cost in grid-connected operation

从图5中可以看出: 平、谷时段蓄电池处于充电状态, 有功功率缺额时, 微网从外网购电来满足负荷需求; 峰时段蓄电池放电, 微网向外网售电。在5:00~9:00时段FC出力增加, 在9:00~20:00时段FC出力达到最大。在9:00~20:00时段MT在满足热负荷基础上增加出力, 实现电力功率平衡。

从图6中可看出, 与仅采用群体寻优目标函数相比, 并网下应用群体寻优和精英寻优目标函数相结合的分阶段目标函数进行微网经济调度时, 优化出力的综合成本更小。由此证明了本文提出的分阶段目标函数方法在并网时的优越性。

孤网时的出力调度结果如图7所示, 孤网时应用不同目标函数的综合成本比较如图8所示。

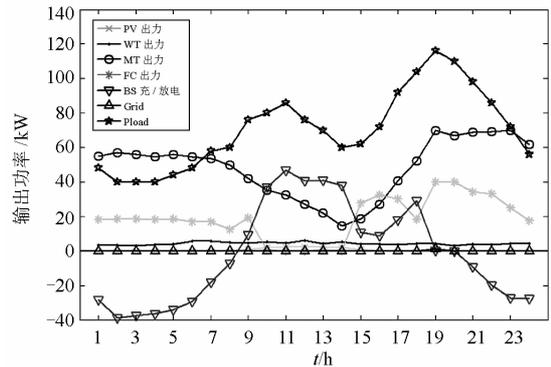


图7 孤网运行的出力调度结果

Fig. 7 Dispatching results in isolated-connected operation

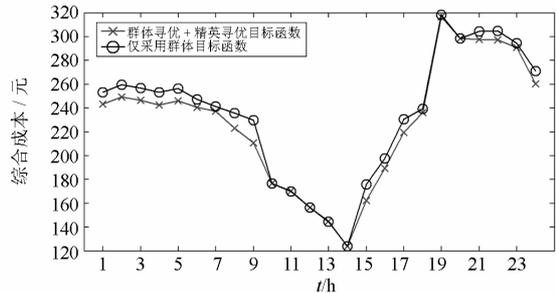


图8 孤网运行的综合成本

Fig. 8 Comprehensive cost in isolated-connected operation

从图7中可以看出: 峰时段蓄电池放电, 谷时段蓄电池充电, 平时段中9:00和15:00~17:00时刻蓄电池放电, 其他时刻充电。在19:00~20:00时刻蓄电池内存储能量几乎完全放电, MT在满足热负荷需求基础上增加出力, FC的出力也达到最大值。在19:00时各微源出力都达到上限, 蓄电池充分放电, 仍不能平衡负荷, 因此进行切负荷操作, 切除1.37 kW的非重要负荷。

从图8中可看出, 与仅采用群体寻优目标函数相比, 孤网下应用群体寻优和精英寻优目标函数相结合的分阶段目标函数进行微网经济调度时, 优化出力的综合成本更小。由此证明了本文提出的分阶段目标函数方法在孤网时的优越性。

#### 4 结论

算例中并网和孤网运行下的出力调度结果表

明, 本文应用的微网经济环保调度模型和采用分时段寻优目标函数与协同进化遗传算法相结合的方法是有效的; 与仅采用群体寻优目标函数方法对比分析表明, 本文提出的使用群体寻优目标函数和精英寻优目标函数与协同进化遗传算法相结合的方法进行分阶段经济调度时, 优化出力的综合成本更小, 证明了该方法的优越性。

## 参考文献

- [1] 谢东, 张兴, 李善寿, 等. 基于逆变器的分布式发电系统反孤岛控制的小信号建模与分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 232-237.  
XIE Dong, ZHANG Xing, LI Shan-shou, et al. Small-signal modeling and analysis of anti-islanding control for inverter-based distributed generator system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 232-237.
- [2] 田培根, 肖曦, 黄秀琼, 等. 一种自治型微电网储能容量的配置方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(增刊 1): 36-42.  
TIAN Pei-gen, XIAO Xi, HUANG Xiu-qiong, et al. Determination methodology for energy storage system capacity in autonomous microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(S1): 36-42.
- [3] 陈昌松, 段善旭, 蔡涛, 等. 计及电动汽车接入的微电网经济调度[J]. 电工技术学报, 2013, 28(增刊 1): 62-67.  
CHEN Chang-song, DUAN Shan-xu, CAI Tao, et al. Microgrid economic dispatch considering electric vehicles integration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(S1): 62-67.
- [4] 陈洁, 杨秀, 朱兰, 等. 基于遗传算法的热电联产型微网经济运行优化[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 7-15.  
CHEN Jie, YANG Xiu, ZHU Lan, et al. Genetic algorithm based economic operation optimization of a combined heat and power microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 7-15.
- [5] 李乐. 微网的经济运行研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [6] 许丹, 丁强, 潘毅, 等. 基于经济调度的微电网蓄电池容量优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 55-59.  
XU Dan, DING Qiang, PAN Yi, et al. Study on optimizing capacity of storage battery in microgrid system based on economic dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 55-59.
- [7] 杨秀, 陈洁, 朱兰, 等. 基于经济调度的微网储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 53-60.  
YANG Xiu, CHEN Jie, ZHU Lan, et al. Optimization allocation of energy storage for microgrid based on economic dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 53-60.
- [8] LIAO Gwo-ching. The optimal economic dispatch of smart microgrid including distributed generation[C] // 2013 IEEE International Symposium, Next-Generation Electronics (ISNE), 2013: 473-477.
- [9] 牛铭, 黄伟, 郭佳欢, 等. 微网并网时的经济运行研究[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 38-42.  
NIU Ming, HUANG Wei, GUO Jia-huan, et al. Research on economic operation of grid-connected microgrid[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 38-42.
- [10] CHEN C, DUAN S, CAI T, et al. Smart energy management system for optimal microgrid economic operation[J]. IET Renew Power Generation, 2011, 5(3): 258-267.
- [11] 杨为. 分布式电源的优化调度[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- [12] 白峪豪. 含分布式电源的微电网经济调度模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [13] 万芳, 黄强, 原文林, 等. 基于协同进化遗传算法的水库群供水优化调度研究[J]. 西安理工大学学报, 2011, 27(2): 139-144.  
WAN Fang, HUANG Qiang, YUAN Wen-lin, et al. Research on co-evolutionary genetic algorithm for reservoir optimization water supply dispatching[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2011, 27(2): 139-144.
- [14] 艾欣, 崔明勇, 雷之力. 基于混沌蚁群算法的微网环保经济调度[J]. 华北电力大学学报: 自然科学版, 2009, 36(5): 1-6.  
AI Xin, CUI Ming-yong, LEI Zhi-li. Environmental and economic dispatch of microgrid using chaotic ant swarm algorithms[J]. Journal of North China Electric Power University: Natural Science Edition, 2009, 36(5): 1-6.

收稿日期: 2013-08-29; 修回日期: 2013-12-13

作者简介:

宋晓英(1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电网的优化规划与节能技术; E-mail: songxiaoying.happy@163.com

王艳松(1965-), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电网故障诊断与配电自动化, 电力负荷预测, 电能质量分析与谐波治理, 电网的优化规划与节能技术。