

DOI: 10.7667/PSPC161988

智能电网实时定价的自适应光学优化算法

王金叶¹, 马良¹, 刘勇¹, 杨微元²

(1. 上海理工大学管理学院, 上海 200093; 2. 河南淮滨二高, 河南 淮滨 464400)

摘要: 为了解决传统优化算法在求解智能电网的实时电价模型过程中易陷入局部最优的不足, 引入光学优化算法对实时电价模型进行求解。采用可变适应度的方法对光学优化算法求解模型过程中的不变适应度进行改进, 提出自适应光学优化(Self-adaptive Optics Inspired Optimization, SAOIO)算法。根据迭代次数的变动, 自适应地变动适应度从而提升收敛速度, 提高求解精度。针对智能电网实时电价模型, 对拉格朗日对偶算法和自适应光学优化算法进行同步仿真。结果表明自适应光学优化算法能够更好地寻得全局最优电价, 提高结果精度, 具有更好的实用性。
关键词: 智能电网; 实时电价; 自适应光学优化算法; 拉格朗日; 仿真

Self-adaptive optics inspired optimization for real-time pricing of smart grid

WANG Jinye¹, MA Liang¹, LIU Yong¹, YANG Weiyuan²

(1. School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Second High School of Huaibin, Huaibin 464400, China)

Abstract: In order to solve the shortage of local optimum in the process of solving the real time price model of smart grid by using traditional optimization algorithm, the Optics Inspired Optimization (OIO) is introduced to solve it. The variable fitness method is used to improve the constant fitness of the optics inspired optimization in the process of solving the model. The new algorithm is named Self-adaptive Optics Inspired Optimization (SAOIO) algorithm. According to the changes of the number of iterations, the adaptive degree can be changed by itself to improve the convergence speed and improve the accuracy of the solution. In the real-time pricing model of smart grid, the Lagrange dual algorithm and SAOIO are synchronously simulated. The results show that the SAOIO can better find the global optimal price, improve the accuracy, and have better practicability.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 71401106), and Humanities and Social Sciences of Ministry of Education Planning Fund (No. 16YJA630037), and Shanghai College Young Teachers Training Program (No. ZZs115018) and Doctoral Scientific Research Foundation of USST (No. 1D-15-303-005).

Key words: smart grid; real-time pricing; self-adaptive optics inspired optimization algorithm; Lagrange; simulation

0 引言

随着高压电网的建设和电力体制改革的不断深化, 电力能源中的智能电网建设成为我国电网发展的一个新方向^[1]。期望通过一些优化策略的设计将电能的开发、输送、存储以及服务(用电)建立一个优化模型系统, 通过智能化控制实现精确供能。将电力能源利用效率和电能供应安全提高到全新的水平, 使用户成本和投资效益达到一种合理的状态,

这就需要对电网的实时定价投入更多的关注^[2-3]。

目前, 国内外关于智能电网实时定价的研究仍处于起步阶段^[4-6], 实时电价求解模型也刚刚处于完善阶段。用电模型的求解一般要用到智能优化算法, 如分布式算法、粒子群算法、遗传算法等都已应用到智能电网的模型求解中了。Samadi 等人对所建立的社会福利最大化的实时电价模型采用了拉格朗日对偶算法进行求解, 在小模型的模拟中能够得到很好的求解效果^[7]; Xing He 等人求解实时电价优化模型时, 对效用函数进行非光滑分析, 应用递归神经网络模型对问题求解, 并将其与已有的实时电价算法进行了比较, 结果表明该算法能够更为快速有效地求得实时电价的价格点^[8]; Gh.Asadi 等人则

基金项目: 国家自然科学基金项目(71401106); 教育部人文社科规划基金项目(16YJA630037); 上海高校青年教师培养资助计划项目(ZZs115018); 上海理工大学博士科研启动经费项目(1D-15-303-005)

通过粒子群算法对实时电价模型进行求解, 同样很好地得到了实时电价各时段电力价格^[9]; 曲家余在拉格朗日算法的基础上进行了改进, 通过梯度投影法来解决大规模用户求解问题, 得到了可行的结果^[10]。但在这些现有的实时定价模型的算法求解中, 存在模型不够精细简洁, 效用电价优化精度不高等问题, 尤其是智能优化算法本身所具有的缺陷使得求解过程易陷入局部最优解。为克服这些问题, 本文将一种新的优化策略即自适应光学优化算法 (Self- adaptive Optics Inspired Optimization, SAOIO) 应用到基于社会总福利最大的实时电价模型中^[11-12]。对每位用户的用电负荷进行编码, 通过多次迭代寻优, 对模型求解得到最优实时电价。将仿真的结果与拉格朗日对偶算法进行对比分析, 以此来比较用户效用优化效果、用电量和实时电价。

1 智能电网模型

智能电网的实时电价是在已有的基础上提高社会总福利。为保证社会总福利最大化, 首先要对电力系统结构和参与者进行研究分析^[13]。在整个电力系统中, 发电商生产出电力能源, 并通过一定的价格将电能传输到电网公司的电网上。而后用户从智能终端上得到电网公司发布的实时电价^[14], 产生一定的电力需求。电网公司通过完善电力网络和先进的电力配送器将电网上的电能配送给有需求的用户。电网公司根据用户的电力需求量来及时调整电力价格, 并将其信息发送给发电商, 使得发电商能够及时有效地调整自己各时段的发电量。

本文将整个研究时段划分为 T ($T \in Z$) 个独立的时间段, 对于发电商来说, 其存在每个时间段的最大电力生产量与最小电力生产量, 那么, 发电商的电力供应能力为 $L_T^{\min} \leq L_T \leq L_T^{\max}$, L_T 表示时间段 T 内, 发电商的供电量, L_T^{\min} 和 L_T^{\max} 分别表示发电商的最小供电量和最大供电量。通过竞价上网, 发电商在时间段 T 的经济收入为^[15]

$$I_T = P_s \cdot L_T \quad (1)$$

式中: I_T 为发电商在时间段 T 内的经济收入; P_s 为发电商竞价上网的电力价格。

除了发电的经济收入外, 发电商还有不断变动的发电成本, 成本函数^[16]为发电量的二次函数形式:

$$C(L_T) = a_T \cdot L_T^2 + b_T \cdot L_T + c_T \quad (2)$$

式中, a_T 、 b_T 和 c_T 为发电成本参数, 且 $a_T > 0$ 而 $b_T, c_T \geq 0$ 。由此, 得到发电商在时间段 T 内的经济收益为

$$R_T^f = I_T - C(L_T) = P_s \cdot L_T - (a_T \cdot L_T^2 + b_T \cdot L_T + c_T) \quad (3)$$

电网公司于时间段 T 内的经济收益为

$$R_T^c = L_T \cdot P_T - L_T \cdot P_s \quad (4)$$

式中, P_T 为电网公司制定的实时电价。对于每个用户 m 来说, 每个时间段 T 内的用电需求是 x_T^m , 且 x_T^m 要满足 $f_T^{\min} \leq x_T^m \leq F_T^{\max}$, 其中, f_T^{\min} 、 F_T^{\max} 分别为用户 m 在时间段 T 内的最小用电量和最大用电量^[17-18]。

对于时间段 T 来说, 所有用户的用电需求要小于等于发电商所生产的电能, 即

$$\sum_{m=1}^M x_T^m \leq L_T \quad (5)$$

式中, M 为电力市场中用户总数。

在电力系统中, 每一类型用户用电效用函数为

$$U(x, \omega) = \begin{cases} \omega x - \frac{\alpha}{2} x^2 & 0 \leq x \leq \frac{\omega}{\alpha} \\ \frac{\omega^2}{2\alpha} & x \geq \frac{\omega}{\alpha} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $U(x, \omega)$ 为用户的用电效用; x 为用户的用电需求; ω 表示用户的购电意愿参数, 不同用户、不同时间点, ω 的数值也不尽相同; α 为常数参数。

其效用函数例图如图 1 所示。从图中可以看出, 购电意愿参数 ω 越小, 效用峰值越小, 越容易收敛至一定数值。

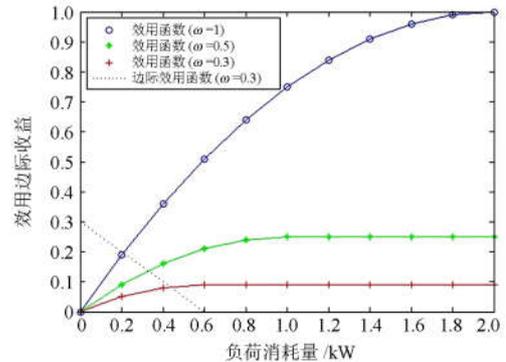


图 1 用户效用函数示例图

Fig. 1 Picture of user utility function

用户在用电过程中除了获得效用外, 还需要为获得这些电能而付出一定的经济成本, 即

$$O_T = x \cdot P_T \quad (7)$$

由此, 可以得到用户在用电过程中的效益为

$$W(x, \omega) = U(x, \omega) - P_T \cdot x \quad (8)$$

式中: $W(x, \omega)$ 为用户的效益函数; $U(x, \omega)$ 为用户的效用函数; P_T 为时间段 T 内的电力价格; $P_T \cdot x$ 为用户的购电成本。

综上所述, 为了使得社会总福利最大化, 只需要让发电商、电网公司和用户三者收益总和最大即

$$a = \max \left[0.5, \frac{|\max f_i - f_i^*|}{30} \right] \quad (14)$$

镜面反射偏差与第 j 个电价光源点第 t 次迭代的反射中镜面函数为

$$\kappa_{j,i_k}^t = \frac{(r_{i_k}^t)}{\sqrt[2]{(r_{i_k}^t)^2 - (HO_{j,i_k}^t)^2}} - \frac{|r_{i_k}^t|}{2} \quad (15)$$

当 κ_{j,i_k}^t 大于给定阈值时, 将出现横向像差, 依照上式进行修复操作。

2.2 算法的流程

Step1: 参数初始化, 随机生成 NO 个初始电价光源点, 求出初始最优点 \bar{G} 以及初始最差解, 令最差解等于 d_∞ 。

Step2: 用轮盘赌选择方法从当前解中选择一个异于 \bar{O}_j^t 的镜面函数顶点 \bar{F}_j^t , 确定镜面函数类型。

Step3: 若 $\left(\frac{(r_{i_k}^t)^2}{\sqrt[2]{(r_{i_k}^t)^2 - (HO_{j,i_k}^t)^2}} - \frac{|r_{i_k}^t|}{2} > 0.01 \right)$ 或

$(HO_{j,i_k}^t > |r_{i_k}^t|)$ 时, 有 $d_\infty = 2d_\infty$, 修正镜面函数偏差。

Step4: 求出第 j 个电价光源点各个方向的电价

$$\bar{I}_{j,i_k}^t = \bar{F}_{i_k}^t - \frac{q_{j,i_k}^t}{p_{j,i_k}^t} (\bar{O}_j^t - \bar{F}_{i_k}^t)。$$

Step5: 若 $k=K$ 成立, 则有 $\bar{I}_j^t = \sum_{k=1}^K w_k^t \bar{I}_{j,i_k}^t$,

$\sum_{k=1}^K w_k^t = 1, 0 < w_k^t \leq 1$, 同时, 令 $\bar{U}_j^t = \bar{O}_j^t$, 求出全局

最优值 \bar{I}_j^t 。

Step6: 将全局最优解 \bar{I}_j^t 中的 c 个变量对应赋值于 \bar{U}_j^t 中, 若 $f(\bar{U}_j^t) < f(\bar{O}_j^t)$, 则将第 j 个电价光源点用 \bar{U}_j^t 代替; 若 $f(\bar{U}_j^t) < f(\bar{G})$, 则 $\bar{G} = \bar{U}_j^t$; 若 $k=K$ 不成立, 则转第二步。

Step7: 如停止条件满足, 则 \bar{G} 即为所求最优解 $\min Q$, 对应的电价光源点即为所求的电价, 再以此求解出对应的用电量与用电效用。

详细步骤如图 3 所示。

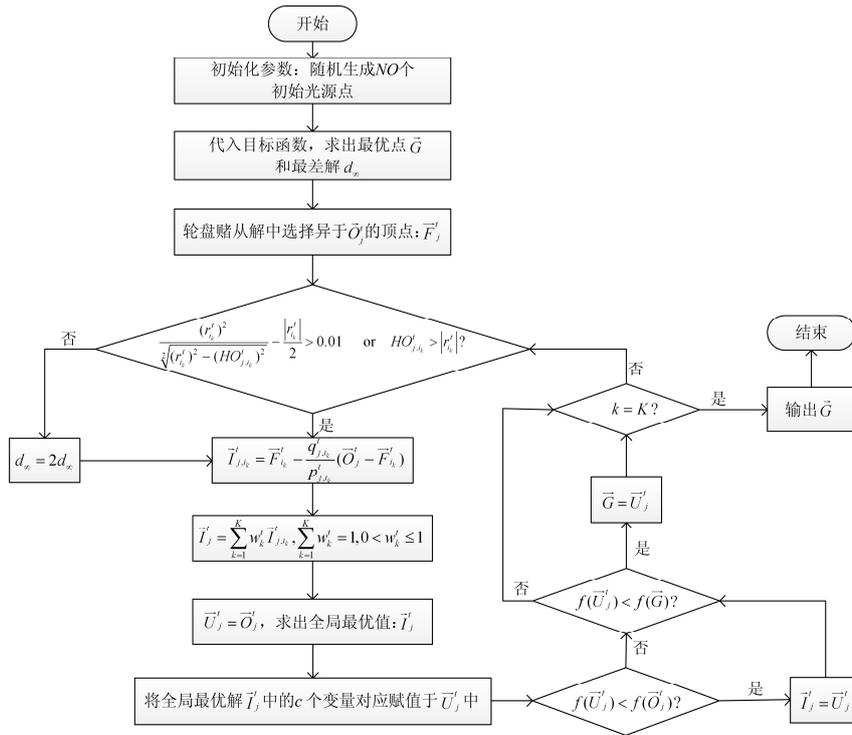


图 3 SAOIO 算法流程图

Fig. 3 Flowchart of SAOIO algorithm

3 模型的求解

为进一步去验证 SAOIO 算法对求解社会福利

最大化的实时电价优化模型的有效性, 设定电力系统中拥有用户数目 $n=5$, 智能电表等智能终端能耗费用极低, 忽略不计。将研究时段设为一整天, 并

分为 $t=24$ 个时段, 即每个小时为一个实时电价变动时段。同时假设, 现有水平下电力供应商的发电能力能够有效支持所有用户的用电需求。每个用户的用电需求不同, 即 ω 因人因时而异。其他参数取值为: 成本参数 $a_T=0.05$ 、 $b_T=0$ 、 $c_T=0$; 效用参数 $\alpha=0.5$; 迭代次数为 $N=40$ 。在操作环境为: Intel i3 处理器, Win 7 操作系统, Matlab2010 软件。求解出图 4—图 12 的结果。

由图 4—图 6 的寻优迭代结果可知, 在用拉格朗日对偶算法和光学优化算法同时对实时定价模型求解的过程中, 拉格朗日对偶算法优化的精确性不高, 容易陷入局部最优解; 而 SAOIO 算法提高了优化的精确度, 可以在更大范围内寻找全局最优点, 从而避免陷入局部最优, 使得优化的结果更为理想。图 7—图 9 分别是拉格朗日对偶算法求解得到的总效用、总电量和实时电价仿真结果图。图 10—图 12 分别是 SAOIO 算法求解得到的总效用、总电量和实时电价仿真结果图。通过对比分析, 可知光学优化算法的实时定价模型更符合实际逻辑, 对用户的反应描述也更加细致化, 更加合理有效。

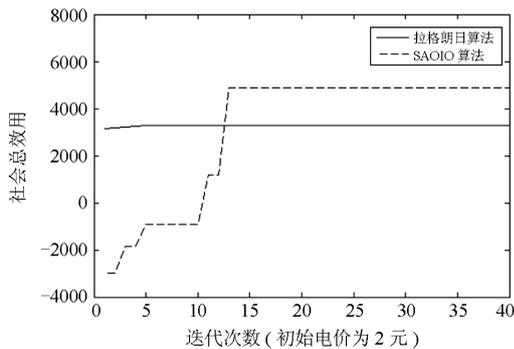


图 4 初始电价为 2 元时寻优结果

Fig. 4 Optimal result of initial price of 2 Yuan

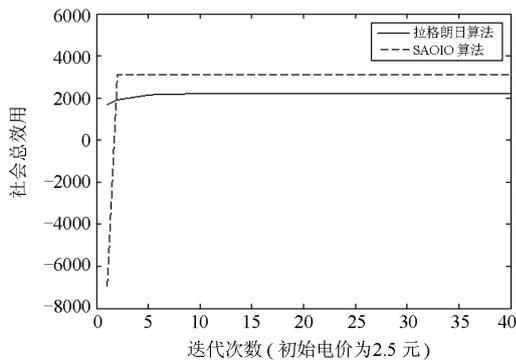


图 5 初始电价为 2.5 元时寻优结果

Fig. 5 Optimal result of initial price of 2.5 Yuan

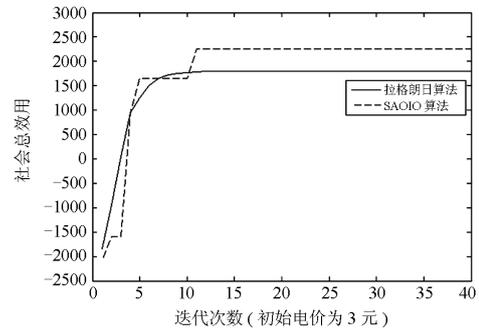


图 6 初始电价为 3 元时寻优结果

Fig. 6 Optimal result of initial price of 3 Yuan

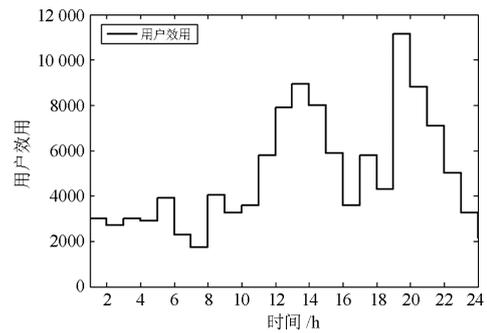


图 7 拉格朗日乘子的用户总效用

Fig. 7 Users' total utility of Lagrange multiplier

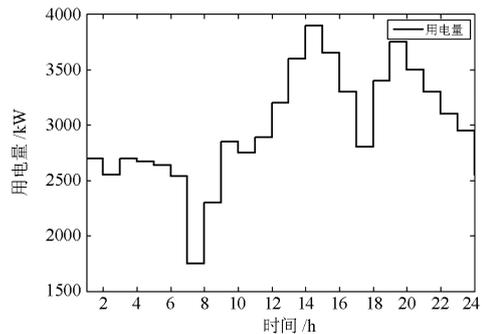


图 8 拉格朗日乘子的用户总用电量

Fig. 8 Users' total consumption of Lagrange multiplier

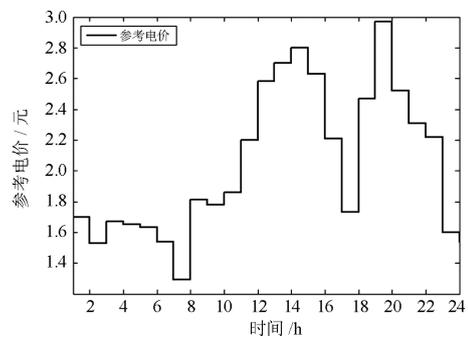


图 9 拉格朗日乘子的参考电价

Fig. 9 Real-time price of Lagrange multiplier

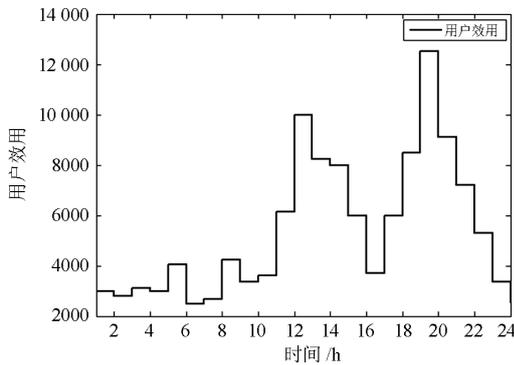


图 10 光学优化算法的用户总效用

Fig. 10 Users' total utility of SAOIO algorithm

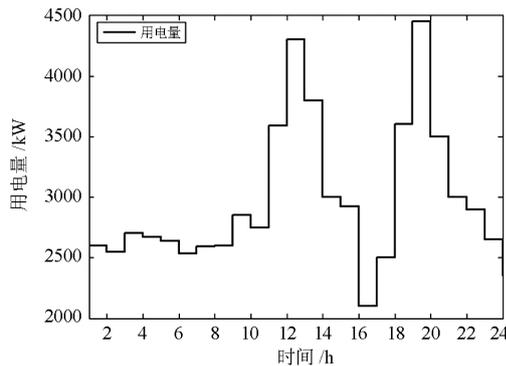


图 11 光学优化算法的用户总用电量

Fig. 11 Users' total utility of SAOIO algorithm

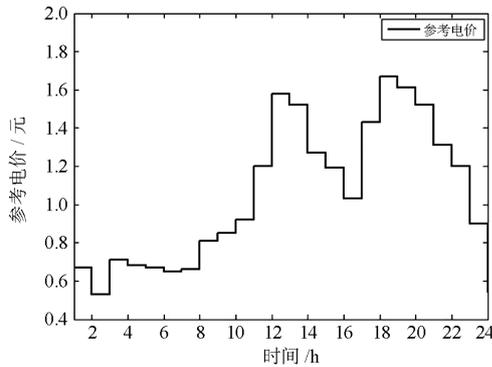


图 12 光学优化算法的参考电价

Fig. 12 Reference price of SAOIO algorithm

4 结论

实时电价的优化方面主要是通过价格来控制用户用电需求进而提高供电商、电网公司和用户的整体效用。实时电价的优化模型是目前研究最为广泛、也是引入模型与理论最多的一个研究方向。本文将一种新的优化算法应用到智能电网实时定价模型中，为智能电网模型的优化求解提供了一种便捷的求解方法，并进行了仿真模拟。结果表明，光学

优化算法在求解实时电价模型中能够很好地弥补拉格朗日对偶算法易陷入局部最优的缺点，更好地找到最优的实时电价。在后续工作中，将会进一步完善 SAOIO 算法在实时电价的优化模型中的应用研究，并通过改善优化算法的模型使其在智能电网中的优化结果更合理，应用更加广泛。

参考文献

- [1] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 1-7.
CHEN Shuyong, SONG Shufang, LI Lanxin, et al. Survey on smart grid technology[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 1-7.
- [2] 周雅. 智能化电力调度数据专网建设方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 133-137.
ZHOU Ya. Analysis on intelligent construction scheme for power dispatching data network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 133-137.
- [3] MOHSENIAN-RAD A H, LEON-GAECIA A. Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(2): 120-133.
- [4] FORMATO R A. Central force optimization: a new deterministic gradient-like optimization metaheuristic[J]. Opsearch, 2009, 46(1): 25-51.
- [5] KASHAN A H. A new metaheuristic for optimization: Optics inspired optimization (OIO)[J]. Computers & Operations Research, 2015, 55(3): 99-125.
- [6] KONKAR R. Analyzing spherical aberration in concave mirrors[J]. Resonance Journal of Science Education, 2012, 17(8): 779-790.
- [7] SAMADI P, MOHSENIAN-RAD AH, SCHOBBER R, et al. Optimal real-time pricing algorithm based on utility maximization for smart grid[J]. First IEEE International Conference on Smart Grid Communications, 2010, 54(1): 415-420.
- [8] HE X, HUANG T, LI C, et al. A recurrent neural network for optimal real-time price in smart grid[J]. Neurocomputing, 2014, 8(14): 608-612.
- [9] ASADI G, GITIZADEH M, ROOSTA A. Welfare maximization under real-time pricing in smart grid using PSO algorithm[C] // 21st Iranian Conference on Electrical Engineering, Mashhad: IEEE, 2013: 1-7.
- [10] 曲家余. 面向智能电网的基于梯度投影法的实时电价算法研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
QU Jiayu. Study of real-time pricing algorithm based on gradient projection method for smart grid[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.

- [11] KARABOGA D, BASTURK B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm[J]. *Journal of Global Optimization*, 2007, 39(3): 459-471.
- [12] 张逸, 林焱, 吴丹岳. 电能质量监测系统研究现状及发展趋势[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(2): 138-147.
ZHANG Yi, LIN Yan, WU Danyue. Current status and development trend of power quality monitoring system[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(2): 138-147.
- [13] 李鹏, 李存斌, 祁之强. 智能电网下考虑风险的供电企业购电优化模型[J]. *运筹与管理*, 2014(1): 108-115.
LI Peng, LI Cunbin, QI Zhiqiang. Power supply enterprises purchase' optimization model considering risk in smart grid[J]. *Operations Research and Management Science*, 2014(1): 108-115.
- [14] MENG F L, ZENG X J. An optimal real-time pricing for demand-side management: a Stackelberg game and genetic algorithm approach[C] // 2014 International Joint Conference on Neural Networks, Beijing, July 6-11, 2014: 1703-1710.
- [15] 牛丽仙, 苑津莎, 张英慧. 基于粗糙集和支持向量机的电力系统短期负荷预测[J]. *电力科学与工程*, 2010, 26(2): 32-35.
NIU Lixian, YUAN Jinsha, ZHANG Yinghui. Short-term load forecasting based on algorithms of rough sets and support vector machine[J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2010, 26(2): 32-35.
- [16] 葛少云, 贾鸥莎, 刘洪. 基于遗传灰色神经网络模型的实时电价条件下短期电力负荷预测[J]. *电网技术*, 2012, 36(1): 224-229.
GE Shaoyun, JIA Ousha, LIU Hong. A gray neural network model improved by genetic algorithm for short-term load forecasting in price-sensitive environment[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(1): 224-229.
- [17] 李中豪, 黄屹俊, 张沛超, 等. 大型风燃协调等效电厂的自动发电控制策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(4): 44-50.
LI Zhonghao, HUANG Yijun, ZHANG Peichao, et al. A study about the automatic generation control strategy of large scale wind-gas coordinating equivalent power plant[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(4): 44-50.
- [18] ALTMAN E, SPIEKSMAN F. The linear program approach in multi-chain Markov decision processes revisited[J]. *Mathematical Methods of Operational Research*, 1995, 42(2): 169-188.
- [19] 王晶, 陈骏宇, 蓝恺. 基于实时电价的微网 PSO 最优潮流算法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(16): 34-40.
WANG Jing, CHEN Junyu, LAN Kai. PSO optimal power flow algorithm for a microgrid based on spot power prices[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(16): 34-40.
- [20] KARABOGA D, BASTURK B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm[J]. *Journal of Global Optimization*, 2007, 39(3): 459-471.
- [21] KASHAN A H. League championship algorithm (LCA): An algorithm for global optimization inspired by sport championships[J]. *Applied Soft Computing*, 2014, 16(3): 171-200.
- [22] 王金叶, 马良, 刘勇. 改进光学优化算法及其在函数优化中的应用[J/OL]. *计算机工程与应用*, <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20160708.2020.058.html>
WANG Jinye, MA Liang, LIU Yong. Modified optics inspired optimization and its application in function optimization[J/OL]. *Computer Engineering and Applications*, <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20160708.2020.058.html>

收稿日期: 2016-12-01; 修回日期: 2017-02-07

作者简介:

王金叶(1991—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为系统工程和智能优化。 E-mail: jinye_w@163.com

(编辑 魏小丽)