

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181339

## 考虑公平性的智能电网实时电价收益均衡模型

陆玉玉, 王波, 王晓飞, 李军祥

(上海理工大学管理学院, 上海 200093)

**摘要:** 传统福利最大化模型只极大化了用户效用, 电力供应商收益却很低。首先, 从公平性角度出发, 同时考虑这两个电力系统参与主体, 建立了智能电网实时电价收益均衡模型。然后, 在满足约束条件的情况下, 运用粒子群算法进行求解。仿真结果表明, 与传统福利最大化模型相比, 考虑公平性的收益均衡模型不仅平衡了二者的收益, 使社会资源分配更加合理, 而且同时也有效地降低了各时段的用电总负荷, 验证了该模型的有效性。

**关键词:** 智能电网; 实时电价; 粒子群算法; 仿真

### Real-time pricing revenue equilibrium model considering fairness in smart grid

LU Yuyu, WANG Bo, WANG Xiaofei, LI Junxiang

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** In view of the traditional welfare maximization model only maximizing the user utility, the electricity supplier's revenue is very low. From the perspective of fairness, this paper first considers the two power system participants, and establishes the real-time pricing revenue equilibrium model of smart grid. Then it uses the particle swarm optimization algorithm to solve the problem when meeting the constraints. The simulation results show that compared with the traditional welfare maximization model, the revenue equilibrium model considering fairness not only balances the benefits of the two, but also makes the social resource allocation more reasonable. At the same time, it effectively decreases the total load of electricity in each period, which all shows the model is effective.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 71572113).

**Key words:** smart grid; real-time pricing; particle swarm algorithm; simulation

## 0 引言

智能电网作为一种安全、高效、节能、经济的现代电网, 近年来受到社会的广泛关注。为了进一步降低高峰负荷, 提高电网利用率, 市场通过实行不同的电力价格引导用户合理用电<sup>[1]</sup>。目前, 关于智能电网的电力定价机制主要有: 固定电价、分时电价、阶梯电价、自适应电价和实时电价<sup>[2-3]</sup>。实时电价是指在不同时刻电力供应商制定不同的电价水平, 用户端则根据价格的涨落适当调整用电时间, 从而在实现自身效用最大化的同时, 达到削峰平谷、平稳用电的目的<sup>[4]</sup>。

在电力市场中, 实时电价是一种最理想的定价机制, 目前国内外关于智能电网实时电价的研究也有大量文献: 文献[5]以用户用电效用最大化为目标,

提出了实时电价下不同风险喜好的用户用电风险决策模型; 文献[6]将需求侧和供应侧统一起来, 用二次效用函数建立了社会效用最大的福利模型, 并进一步使用对偶分解法及拉格朗日乘子法予以求解; 文献[7]在上述工作的基础上讨论了两种不同的电力用户, 根据不同的效用函数建立了以社会福利最大化为目标的优化模型。为了使社会电力系统各参与主体利益最大化, 研究学者开始从博弈角度和优化算法方面对实时电价进行分析。文献[8]在博弈均衡理论的基础上设计了一种需求端与供应端的实时交互电价模型; 文献[9]提出通过合作博弈的方式来实现微电网利益最大; 文献[10]为了解决传统优化算法在求解智能电网实时电价模型容易陷入局部最优的不足, 引入了一种自适应光学优化算法; 文献[11]考虑到用户的时变功耗和发电成本, 设计了一种基于效用的智能电网通信系统实时最优电价机制。

可以看出, 对智能电网实时电价的研究多集中

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(71572113)

在提高某一独立主体收益或者社会总效用方面，而考虑到各参与主体公平性相关的研究并不多。文献[12]为了解决智能电网中不同用户用电效用不公平现象，提出了效用比例公平优化模型，结果表明所有用户在该模型下效用比例能够得到公平优化；文献[13]考虑了发电厂、电网公司和用户三个电力系统参与者，以提高电网公司利润为目标建立了实时电价下的多层互动模型，并验证了互动模型不仅可以显著提升电网公司收益，且可以更好地平衡各参与者之间的效用。

我国经济健康稳定的发展离不开社会公平合理性的分配<sup>[14]</sup>。在智能电网发展的过程中，提高用电效率的同时，各参与主体收益的公平问题也会越来越多地被关注。收益分配均衡旨在社会总效用最大的基础上使得供应侧和需求侧获益差距最小，即公平分配。这种情况下，不仅使各方参与者都共同受益，而且从长远来看也更有利于社会的健康发展。所以，将公平理论纳入智能电网实时电价研究的方向中具有非常重要的理论和实践意义。

因此，本文将从公平性角度出发，基于文献[7]的研究，考虑电力供应商和用户这两个社会电力系统参与主体，将用户的福利函数、用户与电力供应商效益之差的平方这两部分差值的最大化作为目标函数建立实时电价收益均衡模型，在满足约束条件的情况下，运用粒子群算法进行求解，并通过仿真试验与传统的社会总福利最大化模型对比，最终验证本文所提模型的合理性和有效性。

## 1 智能电网主体模型

智能电网是一种当下电力行业的新兴电网，它通过整合信息和通信技术来实现供电商和电力使用者之间能源效率与实时信息的交流<sup>[15]</sup>。在本文中，考虑存在一个由电力供应商和若干用户组成的智能电力系统。假设，在每户家庭都装有一只带有能耗控制器的智能电表。能耗控制器的作用不仅可以收集和控制用户的电力消耗，并且还能使不同用户之间以及用户与供电商之间进行相互联系。对电力供应商来说，用户总的用电量决定了供应商提供给用户的电力价格，用电量越高，价格就会越高；对用户来说，价格的高低会决定用户的耗电量，价格越高，用电意愿越低。一个基于需求响应的实时电价机制，在增加用户用电效用的同时还能减少总体峰值需求和峰均比，从而为电能供应商节省生产成本<sup>[16]</sup>。

与文献[17]相同，假设一个运行周期为一天中的 24 h，用户的用电时间分为  $k$  个时间间隔，其中  $K(k \in K)$  是所有时间间隔的集合，这主要基于用户

的用电行为和他们的用电需求模式：高峰用电、低谷用电及正常用电时隙，来进行具体划分。假设存在  $N$  个用户，对于每个用户  $i(i \in N)$ ，用  $x_i^k$  表示第  $i$  个用户在第  $k$  个时间间隔的用电量，且需要满足  $m_i^k \leq x_i^k \leq M_i^k$ ，其中  $m_i^k$  和  $M_i^k$  分别是用户  $i$  在  $k$  时刻最小和最大的功耗水平<sup>[18]</sup>。最小用电量是指用户必须使用的电器消耗的电能，而最大用电量是所有电器都在使用状态下消耗的电能。对于电力供应商，定义在第  $k$  个时段生产的最小生产电量和最大生产电量分别为  $L_k^{\min}$  和  $L_k^{\max}$ ，其中  $L_k^{\min}$  需要满足所有用户最小用电水平下的能耗总和，即  $L_k^{\min} \triangleq \sum_{i \in N} m_i^k$ 。同样， $L_k^{\max}$  需要满足所有用户最大用电水平时的电量总和。

### 1.1 用户

经济学中，效用是指消费者从某种商品或某项服务中获取的满意度。从电力系统角度来看，效用就是电力使用者在使用一定电量后获得满足的程度。虽然消费者的效用很难计算，但是可以采用消费者行为理论进行间接确定。该理论假设用户将最大化他们的效用。通过采用微观经济学中效用函数的概念，可以分析模拟不同用户对电力使用情况的满意度水平。

其中，用户效用函数应该满足：对所有的  $i \in N$ ，在不消耗电量时效用为 0。

根据文献[7]，采用以下二次函数来描述效用函数，如式(1)。

$$U(x, w) = \begin{cases} wx - \frac{\alpha}{2}x^2 & 0 \leq x < \frac{w}{\alpha} \\ \frac{w^2}{2\alpha} & x \geq \frac{w}{\alpha} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $U(x, w)$ 表示用户的用电效用； $x$ 表示用户的购电需求； $w$ 表示用户的购电意愿，不同的用户在不同的时间下， $w$ 也不相同； $\alpha$ 是固定参数。

在用电的同时，用户除了获得满意度外，还需要付出相应的经济成本。为此，最终用户的福利函数为

$$W(x, w) = U(x, w) - P \cdot x \quad (2)$$

式中： $W(x, w)$ 为消费者的福利函数； $U(x, w)$ 表示消费者的用电效用； $P$ 是购电期间的电力价格； $P \cdot x$ 表示用户的用电成本。

### 1.2 电力供应商

定义  $C(L_k)$ 为电力供应商的发电成本，表示在第  $k$  个时间段提供  $L_k$  电量时的成本，且需要满足两个假设：

- 1) 成本函数是严格递增的；

2) 成本函数是严格的凸函数。

因此, 满足上述条件的有分段线性函数以及二次函数。考虑到为了使目标函数求解更加简便, 这里采用二次函数作为电力供应商的成本函数, 即

$$C(L_k) = a \cdot L_k^2 + b \cdot L_k + c \quad (3)$$

式中,  $a$ 、 $b$ 、 $c$  是发电成本系数, 且  $a > 0$ ,  $b$ 、 $c \geq 0$ 。

电力供应商通过给用户电能来获得利润。由此, 在电价  $P$  下, 生产电量为  $L_k$  时, 电力供应商最终得到的收益为

$$R_f = P \cdot L_k - C(L_k) \quad (4)$$

## 2 实时电价收益均衡模型

### 2.1 模型构建

在文献[7]中, 社会整体福利最大化的目标是为了使得电力系统的参与主体所获收益的总和最大化。在这种情况下, 系统福利被定义为所有的用户效用函数之和与能源供应商的发电成本之间的差额, 并且满足所有用户用电需求总和小于等于能源供应商的最大发电能力, 即

$$\begin{cases} \max & \sum_{k \in K} \left( \sum_{i \in N} U(x, w) - C(L_k) \right) \\ \text{s.t.} & \sum_{i=1}^N x_i^k \leq L_k, \quad \forall k \in K \end{cases} \quad (5)$$

但是在该模型中, 目标主要是最大化了用户的效用, 而电力供应商的收益却很低。这反映了实时电价下, 消费者几乎享尽了智能电网带来的红利, 而生产商的收入却不尽如人意。所以, 从公平性角度出发, 应该让电力系统的参与主体都获得可观的收益, 这样才有利于社会的可持续发展。

目前的社会主义经济体制下, 公平主要是指获取收入或积累财产机会的公平, 也就是机会和结果的均等。它是衡量不同主体利益关系是否合理, 社会发展是否和谐的一种原则<sup>[19]</sup>。本文中, 在保证社会总效用最大化的基础上, 旨在缩小用户和电力供应商的利益差距, 尽量使得两大主体效用均衡。故, 这里的公平性主要侧重于结果的均等。

因此考虑将用户的福利函数、用户与电力供应商效益之差的平方这两部分差值的最大化作为目标函数, 建立实时电价收益均衡模型。即

$$\max \sum_{k \in K} \left\{ \sum_{i \in N} W(x, w) - \left( \sum_{i \in N} W(x, w) - R_f \right)^2 \right\} \quad (6)$$

式中:  $W(x, w)$  是消费者的福利函数;  $R_f$  是电力供应商的收益函数。

对每个时间段  $k$ , 假设所有用户的用电之和为

电力供应商的发电量, 即

$$\sum_{i=1}^N x_i^k = L_k \quad (7)$$

从式(6)可以看出, 最大化目标函数也就是最大化用户福利, 极小化用户与电力供应商之间的差距。换句话说, 目标函数寻优的过程就是用户与供应商收益寻优的过程, 同时也是两大主体均衡收益, 体现公平性的过程。

### 2.2 模型求解

对于上述建立的模型, 下面采用智能优化算法、粒子群算法对模型进行求解。

粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是一种优化计算技术, 源于对一群动物的社会行为和运动动态的模拟<sup>[20]</sup>。在本次讨论中, 将惯性因子按式(8)进行设置<sup>[21]</sup>。

$$\theta^{t+1} = \theta_{\max} - \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{T} \cdot t \quad (8)$$

式中:  $T$  表示最大迭代次数;  $\theta_{\max}$  和  $\theta_{\min}$  分别取 0.9 和 0.4。

粒子群算法中, 适应度值用来评价解的质量。在本模型中, 式(6)作为 PSO 算法的目标函数, 引导优化过程的不断进行。粒子群算法在求解本模型过程中的具体步骤如下所述, 其中算法关键步骤如图 1 所示。

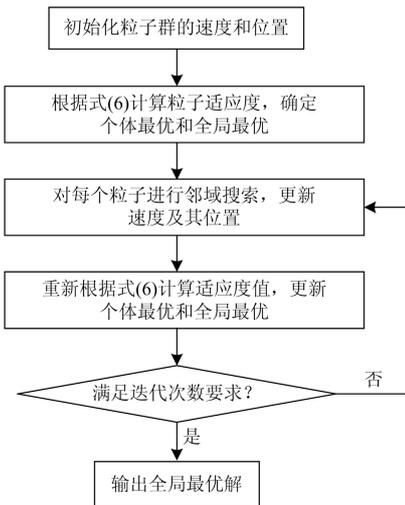


图 1 粒子群算法流程图

Fig. 1 Flowchart of PSO algorithm

- 1) 初始化粒子的速度和位置;
- 2) 根据式(6)计算每个粒子的适应度值, 并保存最优位置;
- 3) 更新粒子的速度及位置;
- 4) 再次根据式(6)计算目标函数值, 若此时适应

度较之前更优，则粒子当前的位置为最优位置；

5) 循环步骤 3)和 4)，直至算法到达最大迭代次数；

6) 更新粒子历史最佳位置及全局最佳位置；

7) 输出最优解，算法结束。

### 3 数值仿真

在实际生活中，消费者可以明确知道电力供应商的定价策略，但是对于消费者个人而言，其关注的重点是个人，即只会做出其理解范围内或者有限信息内的决策。而这里，消费者通过智能电表获得的信息仅仅是电价和用电量的多少，因此，消费者只能根据电价的高低去调节自己的用电量。

下面为了进一步验证本文所提模型的公平性原则，将使用 Matlab 软件对新模型进行数值仿真模拟。对涉及的相关参数做出以下设定：考虑  $N=5$  个用户，将一天 24 h 划分为  $K=24$  个时间段，用户的用电意愿参数  $w$  在  $[1,4]$  范围内做均匀随机波动。其他参数依次为： $\alpha = 0.5$ ， $c_1 = c_2 = 2$ ， $a = 0.01$ ， $b = 0$ ， $c = 0$ ， $r_1 = r_2 = 0.01$ ，最大迭代次数为 300 次。

首先检验 PSO 算法在一个时间段内对模型迭代的有效性，如图 2 所示。

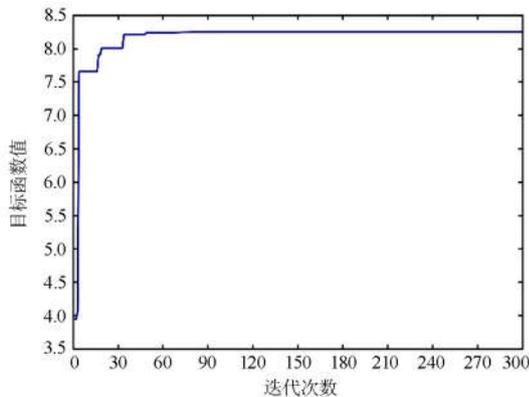


图 2 目标函数的迭代变化  
Fig. 2 Iterative change of the target function

从图 2 可以看出，PSO 算法收敛性很好，目标函数在 60 次迭代后就达到收敛。因此可见，PSO 算法在求解本模型时是有效且可行的。

下面考虑整个时间周期，即： $K=24$ 。考虑到消费者的用电行为特点与其生活习惯息息相关，在 7:00—18:00，用户活跃度高，用电意愿相对较高；1:00—6:00 和 19:00—24:00，用户多处于休息及夜生活状态，故此时间段内购电意愿相对较低。因此对用电意愿参数  $w$  做以下处理，如表 1 所示。

表 1 不同时段  $w$  的取值范围

时间	用电意愿 $w$
1:00—6:00	$w=\text{rand}[1,4]$
7:00—18:00	$w=\text{rand}[4,8]$
19:00—24:00	$w=\text{rand}[2,5]$

为了进一步验证提出的均衡模型的有效性，将该模型与社会总福利最大化模型，即式(5)进行仿真比较。

24 h 各时段的实时电价变化如图 3 所示。可以看出，在 1:00—6:00，7:00—18:00，19:00—24:00 这三个大的时间区间内，均衡模型下的电价波动比福利最大化模型更平稳，且 7:00—18:00 的价格相对较高，有利于用户将这部分的用电需求转移到另外两个低电价的区间内，充分地利用消费者对电力价格的弹性差异。

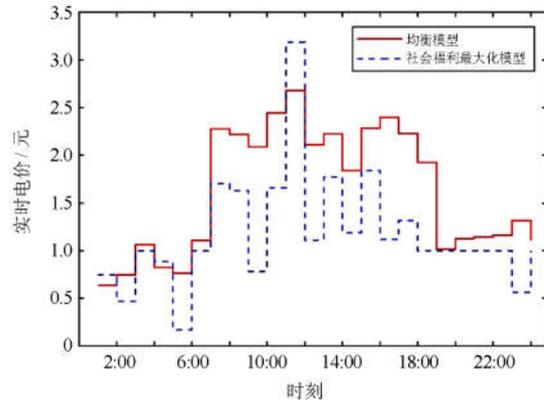


图 3 24 h 实时电价的变化  
Fig. 3 Real-time pricing of 24 hours

图 4、图 5、图 6 分别是传统福利模型下用户与供电商收益的对比，以及调整后的两种模型在用户效用和电力供应商收益方面的迭代变化。图 4 表明，传统的社会福利模型是把用户的效用极大化，而供电商的利润却很少，从长远来看，这样容易造成两大主体效用不均衡、分配不公平等社会问题。但是从图 5、图 6 中可以看出，本文均衡模型的提出，有效地平衡了二者的收益，减少了用户效用的同时增加了供电商的利润，可以使得社会各参与主体的利益分配更加具有公平性，更有利于社会长远健康发展。

图 7 显示了一天中社会总福利的迭代变化。显然，均衡模型与福利最大化模型在社会总福利的结果上并无明显变化。因此也说明了，新模型除了使用户和供应商收益更加均衡外，也在一定层面上确保社会总效益不变。

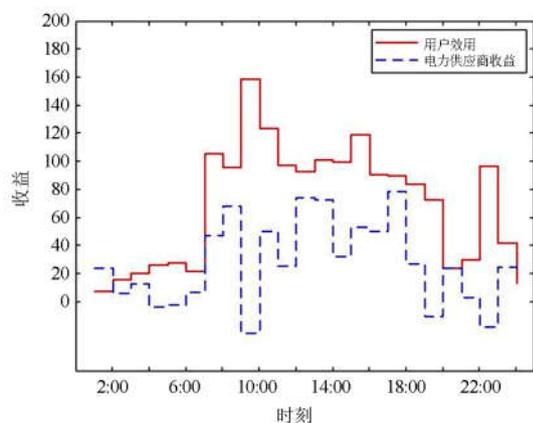


图 4 福利最大化模型用户与供电商收益对比

Fig. 4 Profit comparison between users and power supplier under the welfare maximization model

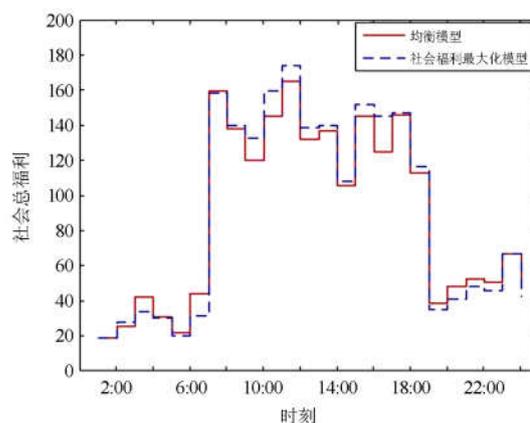


图 7 社会总福利变化

Fig. 7 Social welfare change

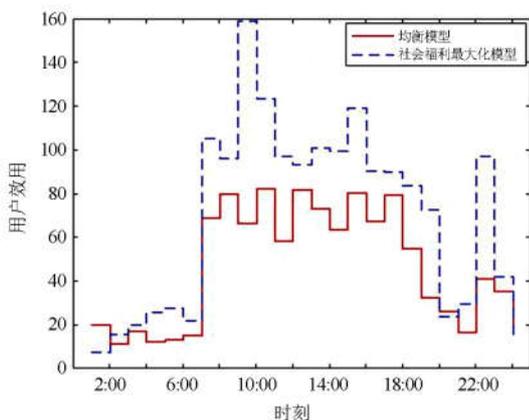


图 5 用户效用变化

Fig. 5 Utility change of users

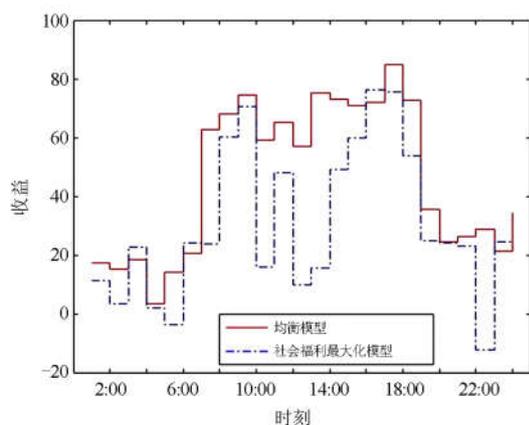


图 6 电力供应商收益变化

Fig. 6 Revenues change of power suppliers

综上所述, 本文提出的模型改善了传统福利模型只极大化消费者效用的不足, 在保证社会总福利不变的基础上, 合理分配两大参与主体的利益, 即在提高效率的同时也兼顾了公平。

## 4 结论

智能电网实时电价这一定价机制的出现不仅达到了节省电力、提高用电效率的作用, 而且其能够削峰平谷的特点还为电网的运行减少了用电压力。这种情况下, 面对传统福利最大化模型只极大化用户效用这一问题, 考虑到社会各主体收益应该具有公平性, 本文提出了考虑公平性的智能电网实时电价收益均衡模型。在求解过程中, 运用了粒子群算法, 其搜索速度快、算法简单、效率高的特点为数值模拟带来了方便。从最后的结果中可以看出, 电力供应商的收益相比传统的最大化模型有了显著提高, 同时也保证了用户的效用。因此, 本文提出的效益均衡模型是有效的、可行的、更优的。在智能电网的发展中, 将公平理论与实时电价相互结合, 可以更好地达到资源合理分配的目的, 实现智能电网的长远发展。

本文的不足之处是只单纯考虑了电力供应商和用户这两大参与主体, 并且对于电网的维护及其他成本没有考虑进去。因此, 在今后的研究中, 一方面可以根据实际情况对目标函数进行相应的补充和改进, 另一方面可以把电力系统更多的参与者考虑进来, 例如电力零售商、不同类型的电力用户等。

## 参考文献

- [1] 赵鸿图, 朱治中, 于尔铿. 电力市场需求响应市场与需求相应项目研究[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 146-153. ZHAO Hongtu, ZHU Zhizhong, YU Erkeng. Study on demand response markets and programs in electricity markets[J]. Power System Technology, 2010, 34(5): 146-153.
- [2] ZHANG Wang, LI Jueyou, CHEN Guo, et al. A comprehensive model with fast solver for optimal energy scheduling in RTP environment[J]. IEEE Transactions on

- Smart Grid, 2017, 8(5): 1-10.
- [3] KHAN A R, MAHMOOD A, SAFDAR A, et al. Load forecasting, dynamic pricing and DSM in smart grid: a review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 54: 1311-1322.
- [4] ALBADI M H, EL-SAADANY E F. A summary of demand response in electricity markets[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(11): 1989-1996.
- [5] 张钦, 王锡凡, 王秀丽, 等. 需求侧实时电价下用户购电风险决策[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(13): 16-20. ZHANG Qin, WANG Xifan, WANG Xiuli, et al. Customer's electricity purchasing risk decision integrating demand side real-time pricing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(13): 16-20.
- [6] SAMADI P, MOHSENIAN-RAD A H, SCHOBBER R, et al. Optimal real-time pricing algorithm based on utility maximization for smart grid[C] // Smart Grid Communications, October 4-6, 2010, Gaithersburg, MD, USA: 415-420.
- [7] ASADI G, GITIZADEH M, ROOSTA A. Welfare maximization under real-time pricing in smart grid using PSO algorithm[C] // 2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), May 14-16, 2013, Mashhad, Iran: 1-7.
- [8] MENG Fanlin, ZENG Xiaojun. An optimal real-time pricing for demand-side management: a stackelberg game and genetic algorithm approach[C] // 2014 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), July 6-11, 2014, Beijing, China: 1703-1710.
- [9] 王树东, 杜巍, 林莉, 等. 基于合作博弈的需求侧响应下光储微电网优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 129-137. WANG Shudong, DU Wei, LIN Li, et al. Optimal allocation of photovoltaic energy storage microgrid under the demand side response based on cooperative game[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 129-137.
- [10] 王金叶, 马良, 刘勇, 等. 智能电网实时定价的自适应光学优化算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 29-35. WANG Jinye, MA Liang, LIU Yong, et al. Self-adaptive optics inspired optimization for real-time pricing of smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 29-35.
- [11] AHMED K T, HASAN M N, HOSSAIN M F, et al. Demand management using utility based real time pricing for smart grid with a new cost function[C] // 2017 27th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC), November 22-24, 2017, Melbourne, VIC, Australia: 1-6.
- [12] 梁天猛, 俞晴里, 黄炯. 基于Matlab智能电网效用比例公平优化研究[J]. 工业控制计算机, 2012, 25(12): 49-50. LIANG Tianmeng, YU Qingli, HUANG Jiong. Research on utility proportional fairness in smart grid based on MATLAB[J]. Industrial Control Computer, 2012, 25(12): 49-50.
- [13] 李江波, 王波, 高岩, 等. 社会福利均衡的实时电价多层互动模型[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 56-63. LI Jiangbo, WANG Bo, GAO Yan, et al. Optimal real-time pricing for society welfare balance based on multi-layers model[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 56-63.
- [14] 倪姗. 从经济法视角下解析我国收入分配公平性改革[J]. 经济视角, 2014(7): 78-79. NI Shan. Analysis of China's income distribution equity reform from the perspective of economic law[J]. Economic Perspective, 2014(7): 78-79.
- [15] PARK C K, KIM H J, KIM Y S. A study of factors enhancing smart grid consumer engagement[J]. Energy Policy, 2014, 72(1): 211-218.
- [16] MAHMUD A, SANT P. Real-time price savings through price suggestions for the smart grid demand response model[C] // 2017 5th International Istanbul Smart Grid and Cities Congress and Fair (ICSG), April 19-21, 2017, Istanbul, Turkey: 65-69.
- [17] SONG Xin, QU Jiayu. An improved real-time pricing algorithm based on utility maximization for smart grid[C] // Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation, June 29-July 4, 2014, Shenyang, China: 2509-2513.
- [18] 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.
- [19] 王堃. 促进我国收入分配公平的政策取向研究[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2013. WANG Kun. Promote the fairness of income distribution policy orientation[D]. Shenyang: Shenyang Normal University, 2013.
- [20] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C] // Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks, November 27-December 1, 1995, Perth, WA, Australia: 1942-1948.
- [21] EBERHART R C, SHI Yuhui. Particle swarm optimization: developments, applications and resources[C] // Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation (IEEE Cat. No.01TH8546), May 27-30, 2001, Seoul, South Korea: 81-86.

收稿日期: 2018-10-28; 修回日期: 2019-05-11

作者简介:

陆玉玉(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为计算机仿真和智能优化; E-mail: 172581008@st.usst.edu.cn

王波(1960—), 男, 通信作者, 教授, 研究方向为系统工程、决策分析。E-mail: toddwang2000@126.com

(编辑 魏小丽)