

DOI: 10.7667/PSPC160320

社会福利均衡的实时电价多层互动模型

李江波, 王波, 高岩, 张惠珍

(上海理工大学管理学院, 上海 200093)

摘要: 为提升智能电网需求侧管理的实时电价所提升的社会福利普及到电力系统每位参与者, 给出了一种更为关注收益均衡的建模方法。根据现有的电力系统运行机制, 将发电厂、电网公司和用户纳入其中, 以电网公司收益提升为目标, 建立实时电价多层互动模型, 并与现有的社会总福利最大化模型进行了比较分析。仿真结果表明, 互动模型较之社会总福利最大化模型, 更好地平衡了各参与者间的收益, 并且电网公司的收益具有显著提升, 各时段用电负荷也呈现减少趋势, 进一步说明了互动模型的有效性。

关键词: 智能电网; 实时电价; 收益; 均衡; 多层互动模型

Optimal real-time pricing for society welfare balance based on multi-layers model

LI Jiangbo, WANG Bo, GAO Yan, ZHANG Huizhen

(College of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to improve the balance of social welfare given by real-time pricing of smart grid, a modeling method to pay more attention to balance of revenues is provided. According to present operating mechanism of electric system, including power plant, grid company and customers, an optimal real-time pricing multi-layers model is founded to improve the revenues of grid company. Moreover, comparative analysis is given between our model and social welfare maximization model. The results of simulation show that the proposed model is better to balance the revenues among all actors. The revenues of grid company are increased significantly and loads in every period are significantly decreased, which shows the model is effective.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 11171221 and No. 71401106) and IBM Shared University Research (SUR).

Key words: smart grid; real-time pricing; revenues; balance; multi-layer model

0 引言

作为两次被 IBM 公司预测为未来十年最有前景的研究方向, 智能电网已经从最初的理论阶段开始进入了试验阶段。同时随着智能电网的发展, 实时电价已经成为一种需求侧管理的有效手段, 借助信息和数据在供应侧与需求侧的双向互动来达到电力能源合理使用、电力负荷合理转移的目的^[1-7]。

本文着力研究的正是智能电网中的最优实时电价问题。实时电价是针对不同时刻点上的电网负荷制定不同的用电价格, 用户依据电价的不同将自身用电需求合理分配至不同时段, 从而实现削峰填谷、

合理用电的目的^[8-13]。在目前研究中, 研究者们多是将三者统一起来, 建立实时电价效用最大化模型, 使得需求侧、供应侧和电网公司总的效用最大, 即社会福利最大^[14]。P Samad 应用二次效用函数建立效用最大化模型, 并通过对偶分解法和拉格朗日乘子法对模型进行求解^[15]; Tarasak P 在上述工作的基础上讨论了用电负荷不确定的情况, 推导出不同类型的负荷不确定性条件下的最优价格, 并进一步分析了实时电价是如何影响用电负荷和发电量的^[16]; He Xing 等人则着眼于实时电价优化模型的求解, 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^[17]。

从已有的研究中可以发现现有研究都是将社会总福利作为最终落脚点, 而并未考虑将发电公司、电网公司和用户三者独立开来, 这三者并非利益统

一体, 社会总福利的最大也并非意味着三者各自都达到收益或者效用最大, 因此开始有研究者从博弈角度对实时电价进行分析, 以更好地兼顾各方的利益平衡。Meng Fanlin 等人运用博弈论均衡理论建立了需求侧与供应侧的最优电价模型, 并采用了遗传算法对问题进行了求解^[18]; S Maharjan 同时考虑了多个供电网络和多个用户之间的互动关系, 通过博弈模型建构了供电网络间、用户间、供电网络和用户间三方互动关系模型, 运用启发式算法对模型进行了求解^[19]; 代业明, 高岩则将效用最大化与用户差异结合, 从博弈论角度对多类资源多类用户的实时定价策略进行了分析^[20]。

显然, 博弈角度的分析更多的是将供应侧作为一个主体, 把发电商与电网公司看成一个整体来与用户之间进行博弈, 以此来达到供应侧与需求侧的收益均衡。而在实际生活中, 3 个主体之间都是相互影响的, 发电商的利益与电网公司的利益并非利益统一体, 为了让智能电网的使用所带来的红利普及到每一个参与者, 有必要将 3 个主体都进行独立研究。

本文正是从这一角度出发, 尝试了以电网公司为落脚点, 电网公司通过制定更为合理的实时电价使得其自身收益最大化, 同时兼顾发电公司和用户在理性决策下的效用最大化, 在 GH.Asadi 等人研究的基础上^[21], 建立实时电价的多层互动模型, 并通过粒子群算法对模型予以求解, 最后通过数值仿真模拟试验验证本文所建模型的高效性、可行性和更优性。

1 智能电网概况

本章介绍智能电网系统的基本结构, 智能电网系统是由发电公司、电网公司和用户 3 个主体组成, 辅之以输电网、配电网、智能电表等硬件设备^[22]。依据电力系统的实际情况, 发电公司通过竞价上网将自身所发电能输送到电网公司的电网之上, 而电网公司依照竞价合同采购一定量的电能, 并制定电力的市场价格将所采购的电能输送给有需求的用户, 且某一时段市场价格一旦确定则不可更改^[23-25]。当用户的总用电需求达不到电网公司合同采购电量时, 电网公司则会将多余电能通过能量转换的方式储存起来, 比如将多余电能输入到充电桩进行存储, 而当用户的总用电需求超过了合同采购电量时, 为避免停电, 电网公司必须要以比竞价合同的采购价更高的价格从发电公司购买电能, 整个过程如图 1 所示。

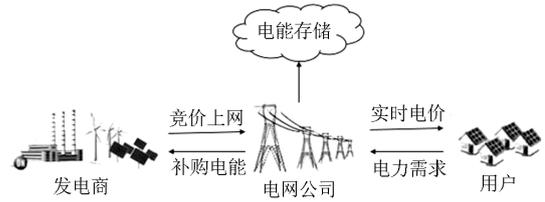


图 1 智能电网系统结构

Fig. 1 Structure of smart grid

2 智能电网各主体模型

2.1 发电商

发电商是智能电网的始端, 考虑到多种发电方式的非一致性, 这里假设将发电端简化为一类, 即在发电端所有发电商视作一家发电商, 发电成本是随发电量变化的函数^[26], 其成本函数为

$$C_t(L) = a_t \times L^2 + b_t \times L + c_t$$

式中: $C_t(L)$ 为第 t 时段内供给 L 度电所需成本; a_t 、 b_t 和 c_t 为成本系数, 且 $a_t > 0$, 而 $b_t \geq 0$, $c_t \geq 0$ 。

发电商收益包括两个部分, 一个是竞价上网所获收益, 一个是电网公司补购电量所获收益。

$$\begin{cases} R_t^c = P_c \times Q_c, & L \leq Q_c \\ R_t^e = P_e \times (L - Q_c), & L > Q_c \end{cases}$$

式中: R_t^c 为第 t 时段的竞价上网所获收益; P_c 为采购合同所定价格; Q_c 为采购合同的采购电量; R_t^e 为第 t 时段的因电网公司补购电量所获收益; L 为用户总需求电量; P_e 为补购电量的补购价格。

补购价格往往要远高于合同电价, 其一方面要起到尽可能提高发电公司收益的目的, 另一方面也要起到控制电网公司补购电量进而控制用户端总用电负荷的作用, 并最终达到让用户节约用电合理用电的目的。故其也一定是关于补购电量的函数, 函数形式为

$$P_e = P_c + k \times (L - Q_c)$$

式中, k 为系数常量, 且 $0 < k < a_t$ 。

因此, 发电商在 t 时段内的总收益为

$$R_f(t) = \begin{cases} R_t^c - C_t(Q_c), & L \leq Q_c \\ R_t^c + R_t^e - C_t(L), & L > Q_c \end{cases}$$

2.2 电网公司

电网公司是整个智能电网系统的中心环节, 维系着发电商与用户两方的信息交流, 通过制定合理的实时电价以保证发电端的发电稳定性, 需求侧的用电合理性。这里同样假设电网公司是一个集合, 视为一家电网公司, 且不考虑电网公司在整个过程

中的维护费用等费用, 其所有收益、成本均来自于买、卖电力市场, 当合同采购电量有剩余时, 该部分电能视为流失, 无任何经济收益。

显然, 由于用户电力需求的不确定性, 电网公司的收益也是一个分段函数

$$R_g(t) = \begin{cases} P_t \times L - P_c \times Q_c, & L \leq Q_c \\ P_t \times L - P_c \times Q_c - P_e \times (L - Q_c), & L > Q_c \end{cases}$$

式中: $R_g(t)$ 为电网公司在时段 t 内的总收益; P_t 为电网公司制定的时段 t 内的电力市场价格。当用户总用电量 L 小于合同采购电量时, 电网公司为争取自身收益最大, 会降低市场电力价格, 鼓励用户用电; 而当用户总用电量 L 大于合同采购电量时, 电网公司同样为保证自身收益最大, 会提高电力市场价格, 控制用户用电。

2.3 用户

用户是智能电网的终端, 无论是发电公司还是电网公司都是为用户服务的, 用户通过用电来满足自己的需求, 是一个心理满足过程, 一般通过效用函数来予以衡量, 这里用 $U(\omega_q, x_t^q)$ 效用函数来计算用户的用电效用, ω_q 表示用户的购电意愿, 且每个用户的每个时段的购电意愿都不一样, x_t^q 表示第 q 个用户在时段 t 内的用电负荷^[27]。效用函数要满足凹和非减的性质, 同时还必须满足以下两个条件, 对于所有的 $\omega_q > 0$

$$\begin{cases} \frac{\partial U(\omega_q, x_t^q)}{\partial \omega_q} > 0 \\ U(\omega_q, 0) = 0 \end{cases}$$

一般效用函数多采用二次函数进行量化, 函数形式为

$$U(\omega_q, x_t^q) = \begin{cases} \omega_q \cdot x_t^q - \frac{\alpha}{2} \cdot (x_t^q)^2, & 0 \leq x_t^q \leq \frac{\omega_q}{\alpha} \\ \frac{\omega_q^2}{2\alpha}, & x_t^q > \frac{\omega_q}{\alpha} \end{cases}$$

式中, α 为常数。

这里所有用户用电负荷的总和即为总用电量 L , 即

$$L = \sum_{q=1}^n x_t^q$$

式中, n 为用户数量。

而用户在用电过程中所付出的经济成本为

$$f_t^q = P_t \cdot x_t^q$$

其中, f_t^q 为时段 t 内第 q 个用户的用电消费成本。

因此, 每个用户在时段 t 内的总效用为

$$R_c^q(t) = U(\omega_q, x_t^q) - P_t \cdot x_t^q$$

式中, $R_c^q(t)$ 为在时段 t 时, 用户 q 的总效用值。

3 实时电价多层互动模型

3.1 模型构建

本文是以电网公司为立足点, 因此, 构造以电网公司收益最大化的最优实时电价多层互动模型^[28]。

上层: 发电商收益最大化

$$R_f = \max \sum_{t=1}^T R_f(t)$$

$$\text{s.t. } L > 0, Q_c > 0$$

式中, R_f 为发电商一共 T 时间段内的最大收益。

中层: 电网公司收益最大化

$$R = \max \sum_{t=1}^T R_g(t)$$

$$\text{s.t. } P_t > 0, x_t^q > 0, Q_c > 0$$

式中, R 为电网公司一共 T 时间段内的最大收益。

下层: 用户效用最大化

$$R_c = \max \sum_{t=1}^T \sum_{q=1}^n R_c^q(t)$$

$$\text{s.t. } P_t > 0, x_t^q > 0$$

式中: n 为用户数量; R_c 为用户一共 T 时间段内的最大效用。

3.2 模型求解

显然, 上述模型是个 NP-难问题, 中层电网公司的实时电价影响了下层用户用电量的改变, 而用户用电量的改变直接影响了发电商的收益和电网公司的收益, 而发电商竞价上网的合同电量又对电网公司和自身收益产生了影响, 三者之间相互影响、相互互动。

但可以发现三者互动都是以中层电网公司为核心的, 故而可以将多层互动模型简化为两个二层规划模型进行求解, 第一个是以电网公司作为上层模型, 发电商为下层模型的二层规划模型, 第二个则是将电网公司作为上层模型, 用户作为下层模型的二层规划模型。如此就可通过 KKT 条件将两个二层规划模型的下层所得最优解反馈回上层模型, 再采用粒子群算法对上层模型求解^[29]。

首先需要对发电商模型进行分析, R_f 是发电公司的总收益, 由于其每一时间段为独立时间段, 故可仅针对一个时间段进行分析, 即分析 $R_f(t)$, 它是一个分段函数, 因变量是竞价上网电量 Q_c 。

当 $Q_c \geq L$ 时, $R_f(t)$ 是 Q_c 的二次函数, 开口向下, 通过 KKT 条件知其在如下情况取最优解:

$$Q_c = \frac{P_c - b_i}{2a_i}$$

当 $Q_c < L$ 时, $R_f(t)$ 是个关于因变量 Q_c 的二次函数, 同样通过 KKT 条件知其最大值点在如下情况取得:

$$L = Q_c$$

然后对用户模型进行分析, R_c 是用户的用电效用, 同样, 因各时段各用户互相独立, 故可只研究任一时段任一用户即可。作为一个分段函数, 将所有参数代入 $R_c^q(t)$ 中得

$$R_c^q(t) = \begin{cases} \omega_q \cdot x_t^q - \frac{\alpha}{2} \cdot (x_t^q)^2 - P_t \cdot x_t^q, & 0 \leq x_t^q \leq \frac{\omega_q}{\alpha} \\ \frac{\omega_q^2}{2\alpha} - P_t \cdot x_t^q, & x_t^q > \frac{\omega_q}{\alpha} \end{cases}$$

当 $0 \leq x_t^q \leq \frac{\omega_q}{\alpha}$ 时, 效用函数为二次函数, 开口

向下, $x_t^q = \frac{\omega_q - P_t}{\alpha}$ 时效用取最大值, 而当 $x_t^q > \frac{\omega_q}{\alpha}$ 时, 效用函数单调递减, 故用户效用最大化模型在 $x_t^q = \frac{\omega_q - P_t}{\alpha}$ 时最优。

对两模型分析可知, 可将两模型所得的最优解反代回电网公司模型中而将多层互动模型转化为如下单层模型:

$$R = \max \sum_{t=1}^T \begin{cases} P_t \cdot L - P_c \cdot Q_c, & L \leq Q_c \\ P_t \cdot L - P_c \cdot Q_c - [P_c + k \cdot (L - Q_c)] \cdot (L - Q_c), & L > Q_c \end{cases}$$

$$\text{s.t. } P_t > 0, x_t^q > 0, Q_c > 0$$

所得模型是个分段函数, 可以采用智能优化算法进行求解, 因此本文采用粒子群算法对模型求解。

粒子群算法是一种启发式算法, 通过适应度低的粒子向适应度高的粒子移动而寻到全局最优点, 其具有搜索速度快、效率高, 算法简单, 适合于实值型处理等优点, 尤其在处理分段函数时也具有极佳的效果^[30]。

这里不赘述粒子群算法, 一个时段的粒子群算法的步骤如下:

PSO Algorithm

1. Initialization

2. For iteration $g \in G$

3. For each $i \in N$

4. Calculate the value of R.

5. Find the best value of R and find the best value of R in each i .

6. Update the position and speed as follows:

$$R_{k+1} = R_k + V_k$$

$$V_{k+1} = wV_k + C_1\gamma_1(R_{i_best} - R_k) + C_2\gamma_2(R_{best} - R_k)$$

7. Save the maximum of R

8. End

4 数值仿真

根据本文所提出的模型, 利用计算机对本文模型进行数值仿真试验以检验本文模型的可行性和有效性。这里考虑 $n=5$ 个用户, 竞价上网合同采购电量为: $Q_c=25$ kWh, 采购价格为: $P_c=0.5$ 元/kWh, 补购电价系数 $k=0.05$, 用户的购电意愿 ω_q 为 $[4, 8]$ 内的均匀随机分布, 其他参数: $\alpha=0.5$, $a_i=0.01$, $b_i=0$, $c_i=0$ 。

首先检验粒子群算法对单个时间段的模型进行迭代求解的有效性, 如图 2 所示。

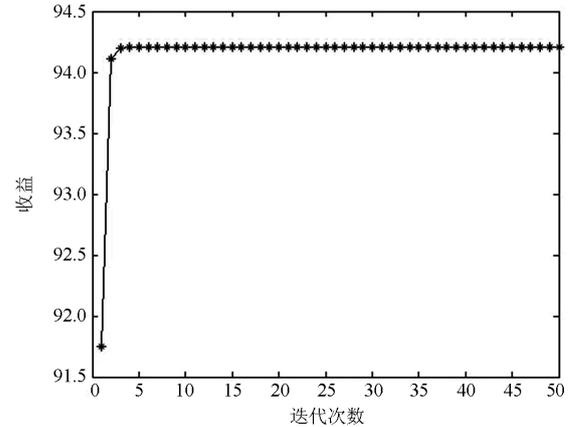


图 2 一个时间段内电网公司收益的迭代变化

Fig. 2 Convergence of revenues for grid company

从图2中可以看出粒子群算法的收敛速度很快, 目标函数电网公司收益在 5 次迭代过程中进入收敛状态, 因此粒子群算法在处理本文模型时具有可行性与有效性。

将整个时段设定为一天 24 小时, 即: $T=24$ 。根据用户的用电行为特点, 用户在一天时段中, 1 点到 6 点是凌晨时分, 用户多处于睡眠状态, 故为用电低谷期, 用电意愿低; 而 7 点到傍晚 18 点则正是工作高峰时段, 用户活跃度高, 这个时段也往往为用电高峰期, 用户用电意愿高; 19 点至 24 点则

为夜生活，相对高峰时段要相对低，相对凌晨时分也要高出一些，故这个时段的用户用电意愿相对处于中等状态，本文将用户各时段用电状态处理如表 1 所示。

表 1 用户各时段用电意愿分布

时段	用户用电意愿
1:00—6:00	$\omega_q = \text{rand}[2,4]$
7:00—18:00	$\omega_q = \text{rand}[4,8]$
19:00—24:00	$\omega_q = \text{rand}[3,6]$

为进一步展现本模型的优势，将本文模型的模拟结果与传统的社会福利最大化模型结果进行比较，传统社会福利最大化模型即为将上述三者进行加总所得结果最大化，数学模型为

$$Welfare = \max \sum_{t=1}^T [R_f(t) + \sum_{q=1}^n R_c^q(t) + R_g(t)]$$

$$\text{s.t. } P_i > 0, x_i^q > 0, Q_c > 0$$

式中，*Welfare* 为社会总福利。

分别对一天 24 小时各时段时行了仿真分析比较，实时电价比较如图 3 所示，用电总负荷的变化如图 4 所示，各时段电网公司的采购电量变化如图 5 所示，电网公司、发电厂和用户的收益变化分别如图 6、图 7 和图 8 所示，最后比较了各时段社会总福利的趋势，如图 9 所示。

图 3 是 24 小时的实时电价变化情况，从图中可以看出 1 点到 6 点的凌晨时分，电价低廉，鼓励用户将用户负荷转移至该用电低谷时段；而 7 点到 18 点则电网公司提高电价，以控制该时段用户用电；19 点到 24 点则为相对平缓的中等电力价格，价格波动上本文方法要更大于传统的方法，同时相对价格也更高，这就充分利用了用户的用电对价格的弹性。

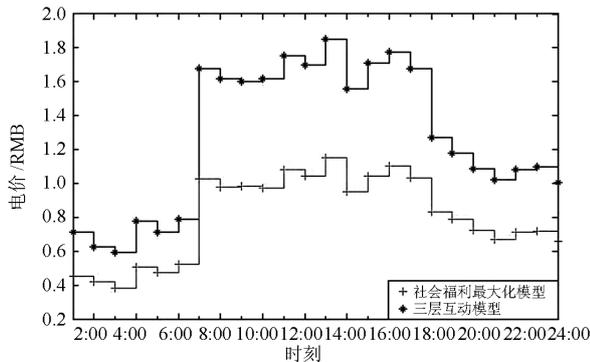


图 3 24 小时的实时电价

Fig. 3 Real-time price under different schemes

图 4 显示了 24 小时的用电负荷变化情况，从图中可以看出，本文模型所得用电负荷不但在总量上远低于传统模型，而且在用电负荷的波动上也更为平稳，并未出现明显的峰谷情况，因此更为有效实现了削峰填谷的目的。

图 5 显示了 24 小时用电总负荷的变化，图中看出本文模型所得到的采购电量较之传统模型更为平稳，对于电网公司而言稳定的采购量具有更强的操作性，而对于发电公司而言，稳定的采购电量也更有利得保证了发电量的稳定性，同时更高的采购量也有助于提高发电商的基础收益。

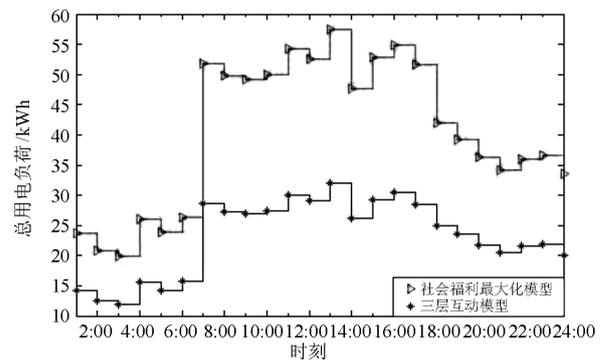


图 4 24 小时用电总负荷的变化

Fig. 4 Power demand under different schemes

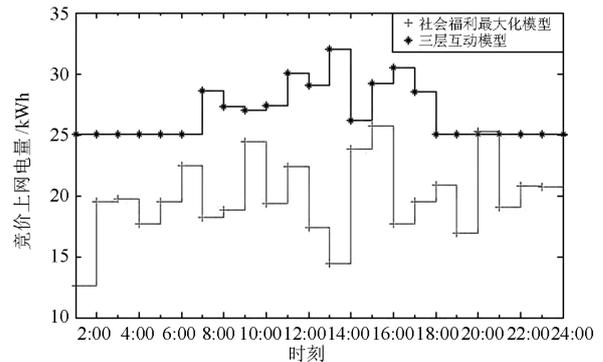


图 5 24 小时电网公司采购电量变化

Fig. 5 Bidding loads under different schemes

图 6、图 7、图 8 分别显示了 24 小时电网公司收益、发电商收益和用户用电效用的变动情况，用 3 张图中可以看出本文模型电网公司和发电商的收益较之传统模型要大的多，尤其是电网公司的收益增加更为显著，相反，本文模型的用户用电效用则要远小于传统方法，这也说明传统模型是极大化了用户用电效用，而本文模型则立足电网公司收益，兼顾了发电商和用户用电效用。

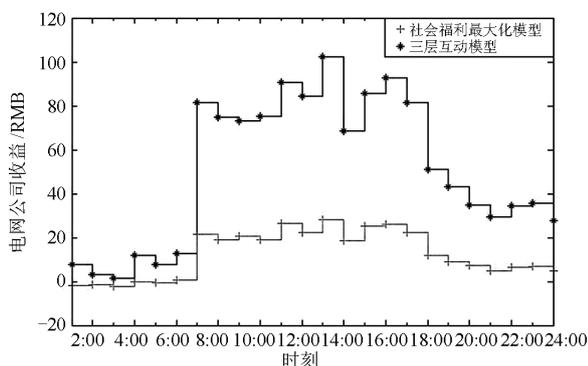


图 6 24 小时电网公司收益变化

Fig. 6 Revenues of grid company under different schemes

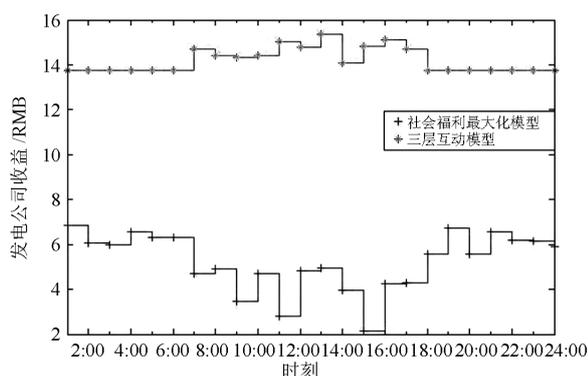


图 7 24 小时发电公司收益变化

Fig. 7 Revenues of power plant under different schemes

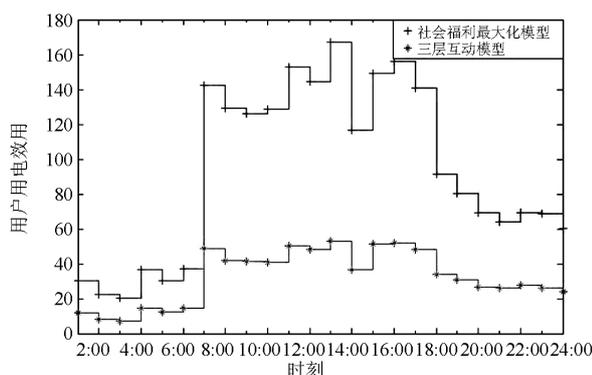


图 8 24 小时用户用电效用变化

Fig. 8 Utility of users under different schemes

图 9 显示了 24 小时社会总福利的变化情况, 很显然本文模型所得之总福利结果与传统模型相差不多, 个别时段要略微小一点, 这也说明了本文模型并非只是保证了电网公司收益最大, 也在一定方面保证了社会总福利不变。

综上所述, 本文模型较之传统模型达到了控制用电、削峰填谷和使得电网公司收益最大化的目的, 同时还兼顾了发电公司收益和用户用电效用以及社会总福利。

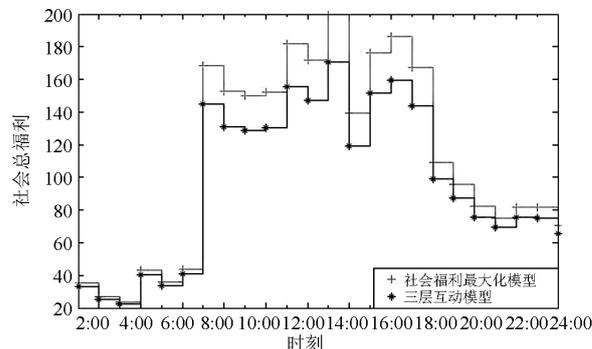


图 9 24 小时社会总福利变化

Fig. 9 Social welfare under different schemes

5 结论

智能电网中的实时电价是节约用电、削峰填谷的有效方式, 无论是发电公司、电网公司还是需求侧都是实时电价的受益者。为更清晰地表述三方的收益情况, 让智能电网所带来的红利普及到每个参与主体, 本文立足于电网公司, 将三者独立开来考虑, 以电网公司收益、发电公司收益和用户用电效用最大化为目标建立了实时电价多层互动模型, 通过对各层模型的分析, 借用二层规划的求解方法, 将上、下层模型最优解代入中层模型从而转化为单层规划模型, 并通过粒子群算法对单层模型进行求解。为验证本文模型的可行性与有效性, 运用了数值仿真实验, 并将其与传统的社会总福利最大化模型进行比较, 结果显示本文模型所得的实时电价结果不但达到了控制用电、削峰填谷的目的, 而且使得电网公司的收益最大, 同时又保证了发电公司收益、用户用电效用的均衡, 另外所得的社会总福利与传统社会总福利最大化模型相差无几, 验证了本文实时电价多层互动模型的巨大优势。

但本文研究也存在一定的不足, 首先是简单考虑了整个电力过程, 对于电力过程中的其他成本和维修损耗并未考虑在内; 其次对于各方参与都统一为某一类群体, 收益均衡考虑的是各类群体的均衡性。因此, 未来研究可以纳入更多的实际性, 同时更有效地利用公平理论在福利与收益均衡间进行合理分配, 更全面地发挥实时电价的特点。

参考文献

- [1] Editorials of Nature. The greener grid: governments need to back an overhaul to get the electricity grid ready for renewable energy[J]. Nature, 2008, 454(7204): 551-552.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 张根周. 大数据在智能电网领域的应用[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(6): 114-117.
ZHANG Genzhou. Applications of big data in the field of smart grid[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(6): 114-117.
- [5] 王中阳, 田涛, 乔新辉, 等. 陕西智能电网建设技术支持平台设计与应用[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(11): 87-90.
WANG Zhongyang, TIAN Tao, QIAO Xinhui, et al. Design and implementation of the Shaanxi smart grid construction technology support platform[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(11): 87-90.
- [6] 朱城香, 杨俊华, 陈思哲, 等. 智能电网背景下基于人工智能理论的需求响应技术[J]. 陕西电力, 2015, 43(7): 63-69.
ZHU Chengxiang, YANG Junhua, CHEN Sizhe, et al. Demand response technologies based on artificial intelligence theories in smart grid[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(7): 63-69.
- [7] 梁姗姗, 吴军, 刘涤尘, 等. 智能电网技术体系与发展趋势研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(10): 1-5.
LIANG Shanshan, WU Jun, LIU Dichen, et al. Technology system and development trend of smart grid[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(10): 1-5.
- [8] GUNGOR V C, SAHIN D, KOCAK T, et al. Smart grid technologies: communication technologies and standards[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2011, 7(4): 529-539.
- [9] 赵鸿图, 朱治中, 于尔铿. 电力市场中需求响应市场与需求响应项目研究[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.
- [10] 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.
- [11] 王建华, 张国钢, 耿英三, 等. 智能电器最新技术研究及应用发展前景[J]. 电工技术学报, 2015, 30(9): 1-11.
WANG Jianhua, ZHANG Guogang, GENG Yingsan, et al. The latest technology research and application prospects of the intelligent electrical apparatus[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(9): 1-11.
- [12] 沙琳, 师五喜. 智能电网服务器动态缓存调度算法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 434-438.
SHA Lin, SHI Wuxi. Dynamic cache scheduling algorithm in the smart grid server[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 434-438.
- [13] 赵海, 蔡巍, 王进法, 等. 能源互联网架构设计与拓扑模型[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 30-36.
ZHAO Hai, CAI Wei, WANG Jinfa, et al. An architecture design and topological model of inter grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11): 30-36.
- [14] 冯兆丽, 茅佳佳, 温书胜, 等. 智能电网实时电价研究综述: 模型与优化方法[J]. 工业控制计算机, 2012, 25(2): 87-88, 90.
FENG Zhaoli, MAO Jijia, WEN Shusheng, et al. Review on real-time pricing for smart grid: models and optimization methods[J]. Industrial Control Computer, 2012, 25(2): 87-88, 90.
- [15] SAMADI P, MOHSENIAN-RAD A H, SCHOBER R, et al. Optimal real-time pricing algorithm based on utility maximization for smart grid[C] // Smart Grid Communications, Gaithersburg MD, 4-6 Oct, 2010: 415-420.
- [16] TARASAK P. Optimal real-time pricing under load uncertainty based on utility maximization for smart grid[C] // Smart Grid Communications, Brussels, 17-20 Oct, 2011: 321-326.
- [17] HE Xing, HUANG Tingwen, LI Chuandong, et al. A recurrent neural network for optimal real-time price in smart grid[J]. Neurocomputing, 2015, 149(PB): 608-612.
- [18] MENG Fanlin, ZENG Xiaojun. An optimal real-time pricing for demand-side management: a Stackelberg game and genetic algorithm approach[C] // Neural Networks, Beijing, 6-11 July, 2014: 1703-1710.
- [19] MAHARJAN S, ZHU Quanyan, ZHANG Yan, et al. Dependable demand response management in the smart grid: a Stackelberg game approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(1): 120-132.
- [20] 代业明, 高岩. 具有多类资源多类用户智能电网实时

- 定价决策[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(9): 2315-2323.
- DAI Yeming, GAO Yan. Real-time pricing decision-making in smart grid with multi-type users and multi-type power sources[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2015, 35(9): 2315-2323.
- [21] ASADI G, GITIZADEH M, ROOSTA A. Welfare maximization under real-time pricing in smart grid using PSO algorithm[C] // Electrical Engineering, Mashhad, 14-16 May, 2013: 1-7.
- [22] 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.
- [23] 曹军威, 万宇鑫, 涂国煜, 等. 智能电网信息系统体系结构研究[J]. 计算机学报, 2013, 36(1): 143-167.
- CAO Junwei, WAN Yuxin, TU Guoyu, et al. Information system architecture for smart grids[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(1): 143-167.
- [24] 张毅威, 丁超杰, 闵勇, 等. 欧洲智能电网项目的发展与经验[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1717-1723.
- ZHANG Yiwei, DING Chaojie, MIN Yong, et al. Development and experiences of smart grid projects in Europe[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1717-1723.
- [25] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网述评[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 1-8.
- YU Yixin, LUAN Wenpeng. Smart grid and its implementations[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 1-8.
- [26] TANAKA M. Real-time pricing with ramping costs: a new approach to managing a steep change in electricity demand[J]. Energy Policy, 2006, 34(18): 3634-3643.
- [27] ZHANG Qin, WANG Xifan, WANG Xuejian. Electricity purchasing and selling risk decision for power supplier under real-time pricing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(3): 22-43.
- [28] LIN Shuo, LUAN Fangjun, HAN Zhonghua, et al. Genetic algorithm based on duality principle for bilevel programming problem in steel-making production[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2014, 22(7): 742-747.
- [29] FAN Chengli, XING Qinghua, FU Qiang, et al. A hybrid intelligent algorithm by combining particle swarm optimization with variable neighborhood search for solving nonlinear bilevel programming problems[J]. Systems Engineering — Theory and Practice, 2015, 35(2): 473-480.
- [30] WANG Hongbo, ZHAO Xiaoqi, WANG Kezhen, et al. Cooperative velocity updating model based particle swarm optimization[J]. Applied Intelligence, 2014, 40(2): 322-342.

收稿日期: 2016-03-20; 修回日期: 2016-05-01

作者简介:

李江波(1991-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为智能电网的实时电价策略和科技管理; E-mail: jiangbo_lee@163.com

王波(1960-), 男, 教授, 研究方向为生产运营系统管理、环境管理、金融衍生产品风险管理、决策分析;

高岩(1962-), 男, 教授, 研究方向为系统分析与优化。

(编辑 张爱琴)