文章编号：1008－8857(2026)01－0044－10 **DOI**: 10.13259/j.cnki.eri.2026.01.006

基于社会福利最大化方法的节点实时电价策略

阚雅兰，高 岩，王菁祺
（上海理工大学 管理学院，上海 200093）

摘 要：针对仅考虑供需平衡约束设计的实时定价机制存在诸多局限性的问题，对考虑新能源和储能装置并网情形下的多供电商多用户电力系统进行研究，提出将直流潮流中的潮流约束应用到实时定价策略中，并结合用户用电特点，建立以社会福利最大化为目标的节点实时电价模型。利用拉格朗日对偶法和拟牛顿法对该模型进行求解，得到最优电价。其中，节点电价包含效用、成本和拥堵三部分。以改进的 3 节点系统为例进行仿真计算，结果表明：该模型能够计算出各节点的最优用电量和电力价格；与其他模型相比，该模型社会福利值最优，从而验证了模型的有效性和可行性。

关键词：电力系统；新能源；社会福利；节点实时电价；拉格朗日对偶
中图分类号：TM73 **文献标志码**：A

Node real-time pricing strategy based on social welfare maximization

KAN Yalan，GAO Yan，WANG Jingqi
(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: To address the limitations of real-time pricing mechanisms that consider only supply-demand balance constraints, a multi-supplier multi-user power system integrating renewable energy and energy storage devices is investigated. A node real-time pricing model aimed at maximizing social welfare is established by incorporating power flow constraints from DC power flow into the real-time pricing strategy, combined with users' electricity consumption characteristics. The model is solved using the Lagrangian duality method and quasi-Newton method to obtain optimal prices. The node price consists of three components: utility, cost, and congestion. Finally, taking an improved 3-node system as an example, simulation results demonstrate that the model can optimally schedule electricity consumption and prices at each node. Comparative analysis with

收稿日期：2023－07－17
基金项目：国家自然科学基金资助项目 (72071130)
第一作者：阚雅兰(1998—)，女，硕士研究生。研究方向：智能电网实时定价，电力系统优化。
E-mail：1718623302@qq.com
通信作者：高 岩(1962—)，男，教授。研究方向：智能电网实时定价，非光滑优化。
E-mail：gaoyan@usst.edu.cn

other models shows that this model achieves the highest social welfare, verifying its effectiveness and feasibility.

Keywords: power system; renewable energy; social welfare; node real-time pricing; Lagrangian duality method

近年来，能源需求的不断增长和可再生能源的高比例并网使得电力市场愈发复杂[1]。传统的定价机制如固定电价和分时电价(TOU)均难以满足电力系统的供需平衡需求。为解决这些问题，实时电价(RTP)机制逐渐受到国内外学者广泛关注[2–5]。针对实时电价机制的研究主要从两个角度展开：一是从电力市场化的角度，利用层次化结构建立双层规划模型[6–7]，或将供给侧和用户侧作为博弈双方来建立博弈模型[8–10]，从而确定最优策略；二是从公共产品的角度，建立社会福利最大化模型，利用最优化理论来确定最优电价[11–13]。在智能电网的实时定价策略中，社会福利最大化方法可以同时保证用户效益最大化和供电商成本最小化，因而得到广泛应用。文献 [14] 最先提出了一种基于社会福利最大化方法的实时电价优化模型，并通过仿真实验验证了其可行性。社会福利最大化方法最初用于研究一个供电商和多个用户的基本电力系统结构。随着研究的深入，社会福利最大化方法及其推广模型也更加贴近实际情况。一类是从用户侧出发在基本的社会福利最大化方法中考虑用户用电特点，如文献 [15] 根据用户用电特点，将用户电器分为三类，并基于电力市场调度中心(PMSC)管理及奖惩机制建立了社会福利最大化模型。文献 [16] 在电器分类的基础上进一步将用户划分为商业用户和家庭用户，提出了基于多类用户电器分类的实时电价优化模型。仿真结果表明利用该模型可以实现削峰填谷的目的。文献 [17] 则针对商业用户和家庭用户效用函数不同，研究了两类用户的社会福利最大化模型。另一类是从能源的多样性出发，在基本的社会福利最大化方法中考虑新能源和储能装置的并网。如文献 [18] 考虑了用户具有多个电力存储设备，建立社会福利最大化模型，证实了用户储能充放电策略依赖于电价。文献 [19] 综合考虑了可再生能源发电与储能设备并网等因素，建立了社会福利最大化模型，并给出了电力系统复杂并网情形下的优化用电策略。文献 [20] 则探究了可再生能源消纳政策对社会福利的影响。

上述对社会福利最大化方法的研究进一步增强了实时电价的可应用性和可操作性，但未考虑供电商及用户之间的位置分布，进而忽略了线路传输等电网物理特性对电力系统的影响。节点边际电价则充分考虑了电网物理特性对电力系统的影响，能够更准确地反映电力市场中各节点在不同供需条件下的电力价格[21]。节点边际电价依赖于最优潮流模型[22]。基于直流最优潮流的节点边际电价一般由边际发电成本、边际拥堵成本两部分构成[23]，而基于交流最优潮流的节点边际电价一般由边际发电成本、边际拥堵成本和边际损耗成本三部分构成[24]。随着太阳能、风能等新能源的发展，有学者也在节点边际电价研究中将新能源纳入考量范畴。如文献 [25] 提出了含新能源参与的现货市场交易机制，从而提升了新能源的消纳率。然而，文献 [21–25] 对节点边际电价的研究都是基于固定的用电量，未体现用户用电特点对电价的影响。文献 [26] 基于节点边际电价的电–热–气一体化的系统提出了以采购成本最小化为目标的市场出清模型，证实了弹性用电量可以降低能源采购成本。文献 [27] 建立了基于用户购电成本–发电成本的社会福利最大化模型。但是，在节点边际电价对需求侧的影响研究中均没有考虑用户的效用函数，也没有综合考虑供需双方的收益。

在现有研究基础上，本文综合考虑了用户用电特点和多供电商电力系统的物理特性。首先，考虑到多供电商电力系统的物理特性，将潮流约束应用到实时定价策略中，并结合用户用电特点，以社会福利最大化为目标，建立基于直流潮流的节点实时电价模型。然后，利用拉格朗日对偶法和拟牛顿法对该模型进行求解，得到最优电价。其中，节点电价包含效用、成本、拥堵三部分。最后，以改进的三节点系统为例，进行多方

案对比分析，验证模型的有效性和可行性。

1 系统模型

1.1 系统概况

随着新能源大规模并网，电力供应来源日趋多样化。考虑一个含有多供电商多用户的电力系统，其中供电商和用户分布区域不同。本文将分布于不同区域的供电商和用户视为不同的节点，每个节点可包含化石能源供电商和新能源供电商，同时在含新能源发电的节点设有储能装置。每个节点之间传输的电量不可超过线路所允许的最大潮流限制。假设该系统有L条传输线路和N个节点，共包含G个化石能源供电商、R个新能源供电商、S个储能装置。将用户的用电周期划分为 24 个时段，用T表示时段集合，则T={1, 2,⋯,24}。系统概况如图 1 所示，其中：{N_1, N_2,⋯,N_N}为节点用户集合；{L_1,L_2,⋯,L_L}为传输线路集合。

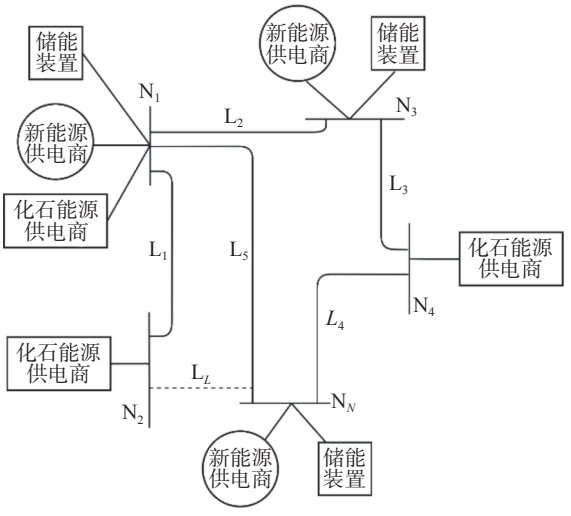

图 1 系统概况

Fig. 1 System overview

1.2 成本函数与效用函数

在实时电价模型中，化石能源供电商的发电成本 C 是严格单调递增的凸函数，普遍采用二次函数[11,14]表示，即

$$C_{g,t} = aP_{g,t}^2 + bP_{g,t} + c \tag{1}$$

式中：a、b、c为化石能源发电成本系数；$P_{g,t}$为化石能源g在时段t的发电量；$C_{g,t}$为化石能源g在时段t的发电成本。

新能源供电商的发电成本和清洁成本均较小，因此，可以认为新能源供电商的总成本就是其发电量乘以单位发电成本，即

$$C_{r,t} = mP_{r,t} \tag{2}$$

式中：m为新能源单位发电成本系数；$P_{r,t}$为新能源r在时段t的发电量；$C_{r,t}$为新能源r在时段t的发电成本。

在新能源发电节点配置储能装置(ESS)，以调节新能源发电产生的波动，维持系统稳定运行。储能装置在充电时产生成本，在放电时得到收益，因此储能装置的充放电成本用一次函数[28]表示，即

$$C_{s,t} = a_s(P_{c,s,t} - P_{d,s,t}) \tag{3}$$

式中：a_s为储能装置 s 的充放电成本系数；$P_{c,s,t}$和$P_{d,s,t}$分别为储能装置s在时段t的充、放电量；$C_{s,t}$为储能装置 s 在时段t的充放电成本。

为了提高新能源的利用率，增加了对新能源的惩罚成本[29]，即

$$\hat{C}_{r,t} = m_f(P_{r,\max} - P_{r,t}) \tag{4}$$

式中：m_f为惩罚成本系数；$P_{r,\max} - P_{r,t}$为新能源 r 供电商在时段t的弃电量；$P_{r,\max}$为新能源 r 供应商的最大发电量；$\hat{C}_{r,t}$为新能源 r 在时段t的惩罚成本。

经济学中利用效用函数来衡量消费商品获得的满足感。用户通过购买电力获得效用。一般而言，用户效用函数满足非递减性和边际效用递减两个基本假设。在电力市场中常采用二次函数[11,14,30]来表示用户的效用$U(x,\omega)$。

$$U(x,\omega) = \begin{cases} \omega x - \dfrac{\alpha}{2}x^2, & 0 \leqslant x \leqslant \dfrac{\omega}{\alpha} \\ \dfrac{\omega^2}{2\alpha}, & x \geqslant \dfrac{\omega}{\alpha} \end{cases} \tag{5}$$

式中：x为用户用电量；ω为用户用电意愿；α为常数。

以社会福利最大化为目标，建立节点实时电价模型，即目标函数为用户效用减去供电成本[11,14]。

$$\max W_t = \sum_{n\in N} U(x_{n,t},\omega_{n,t}) - \sum_{g\in G} C_{g,t} - \sum_{r\in R}(C_{r,t} + \hat{C}_{r,t}) - \sum_{s\in S} C_{s,t} \tag{6}$$

式中：W_t为在时段t的社会福利，$U(x_{n,t},\omega_{n,t})$为节点用户N_n在时段t的效用。

1.3 约束条件

为保证供电商节点和需求节点之间功率的稳定传输，模型除了需要满足系统功率平衡约束、机组相关功率约束还需要满足节点平衡、线路传输上下限等约束条件[23,31]。

(1)系统功率平衡约束

在系统运行中需满足供需平衡，即

$$\sum_{n\in N} I_{n,t}=0,\forall t\in T \tag{7}$$

式中：$I_{n,t}$为节点n在时段t的注入功率，且$I_{n,t}=\sum_g P_{g,t}+\sum_r P_{r,t}+\sum_s (P_{\mathrm{d},s,t}-P_{\mathrm{c},s,t})-x_{n,t}$；$x_{n,t}$为节点$n$在时段$t$的用电量；

(2)线路传输容量限制

线路l上的潮流在其所允许的潮流上、下限之间。

$$-P_{l,\max}\leqslant B_{l,n}I_{n,t}\leqslant P_{l,\max},\forall t\in T \tag{8}$$

式中：$B_{l,n}$为线路l节点n的功率转移分布因子；$P_{l,\max}$为线路l所允许的最大潮流。

(3)发电机的发电量不允许超过其发电量上限，即

$$\begin{aligned}&0\leqslant P_{g,t}\leqslant P_{g,\max},\forall g\in G,t\in T\\&0\leqslant P_{r,t}\leqslant P_{r,\max},\forall r\in R,t\in T\end{aligned} \tag{9}$$

式中：$P_{g,\max}$、$P_{r,\max}$分别为化石能源g发电量上限和新能源r发电量上限。

(4)节点需求约束

一般而言，用户的需求在一定时段内是在一定范围内变动的，即存在最大用电量和最小用电量。

$$x_{n,t,\min}\leqslant x_{n,t}\leqslant x_{n,t,\max},\forall n\in N,t\in T \tag{10}$$

式中：$x_{n,t,\min}$、$x_{n,t,\max}$分别为节点n在时段t的最小用电量和最大用电量。

(5)储能装置的充、放电限制

储能装置存储能量不能超过储能最大容量，且储能充、放电需满足功率约束。

$$\begin{aligned}&0\leqslant E_{s,t}\leqslant E_{s,\max},\forall s\in S,t\in T\\&E_{s,t}-E_{s,t-1}-P_{\mathrm{c},s,t}+P_{\mathrm{d},s,t}=0,\forall s\in S,t\in T\\&\begin{cases}0\leqslant P_{\mathrm{c},s,t}\leqslant P_{\mathrm{c},s,\max}\\0\leqslant P_{\mathrm{d},s,t}\leqslant P_{\mathrm{d},s,\max}\end{cases},\forall s\in S,t\in T\end{aligned} \tag{11}$$

式中：$E_{s,t}$为储能装置s在时段t的存储容量；$E_{s,\max}$为储能装置s的最大存储容量；$P_{\mathrm{c},s,\max}$、$P_{\mathrm{d},s,\max}$分别为储能装置s的最大充、放电量。

1.4 数学模型

基于上述对新能源和储能装置并网情形下的多供电商多用户系统的分析，节点实时电价的优化问题可以表示为

$$\max\sum_{n\in N}U(x_{n,t},\omega_{n,t})-\sum_{g\in G}C_{g,t}-\sum_{r\in R}(C_{r,t}+\hat{C}_{r,t})-\sum_{s\in S}C_{s,t}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}0\leqslant P_{g,t}\leqslant P_{g,\max},\forall g\in G,t\in T\\0\leqslant P_{r,t}\leqslant P_{r,\max},\forall r\in R,t\in T\\x_{n,t,\min}\leqslant x_{n,t}\leqslant x_{n,t,\max},\forall n\in N,t\in T\\0\leqslant E_{s,t}\leqslant E_{s,\max},\forall s\in S,t\in T\\0\leqslant P_{\mathrm{c},s,t}\leqslant P_{\mathrm{c},s,\max},\forall s\in S,t\in T\\0\leqslant P_{\mathrm{d},s,t}\leqslant P_{\mathrm{d},s,\max},\forall s\in S,t\in T\\E_{s,t}-E_{s,t-1}-P_{\mathrm{c},s,t}+P_{\mathrm{d},s,t}=0,\forall s\in S,t\in T\\\sum_{n\in N}I_{n,t}=0,\forall t\in T\\-P_{l,\max}\leqslant\sum_{n\in N}B_{l,n}I_{n,t}\leqslant P_{l,\max},\forall l\in L,t\in T\end{cases} \tag{12}$$

为简化模型式(12)，对用电量、能源发电量和储能充放电的上、下限约束定义为$X_{t,\min}\leqslant X_t\leqslant X_{t,\max}$，其中：$X_t=[P_{g,t},P_{r,t},E_{s,t},P_{\mathrm{c},s,t},P_{\mathrm{d},s,t}]$；$X_{t,\min}=[0,0,0,0,0]$；$X_{t,\max}=[P_{g,\max},P_{r,\max},E_{s,\max},P_{\mathrm{c},s,\max},P_{\mathrm{d},s,\max}]$。

在时段t节点n的供电商的总发电量$P_{n,t}$定义为

$$P_{n,t}=\sum_{g\in G}P_{g,t}+\sum_{r\in R}P_{r,t}+\sum_{s\in S}(P_{\mathrm{d},s,t}-P_{\mathrm{c},s,t})$$

供电商在时段t的总发电成本C定义为

$$C(P_t)=\sum_{g\in G}C_{g,t}-\sum_{r\in R}(C_{r,t}-\hat{C}_{r,t})-\sum_{s\in S}C_{s,t}=\sum_{n\in N}C(P_{n,t})$$

故式(12)可以简化为

$$\max_{\substack{x_{n,t,\min}\leqslant x_{n,t}\leqslant x_{n,t,\max}\\X_{\min}\leqslant X\leqslant X_{\max}\\E_{s,t}-E_{s,t-1}-P_{\mathrm{c},s,t}+P_{\mathrm{d},s,t}=0}}\ \sum_{n\in N}U(x_{n,t},\omega_{n,t})-C(P_t)$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}\sum_{n\in N}I_{n,t}=0,\forall t\in T\\-P_{l,\max}\leqslant\sum_{n\in N}B_{l,n}\cdot I_{n,t}\leqslant P_{l,\max},\forall l\in L,t\in T\end{cases} \tag{13}$$

可构造原问题式(13)的拉格朗日函数形式为

$$L_0=\sum_{n\in N}U(x_{n,t},\omega_{n,t})-C(P_t)+\lambda_t\cdot\sum_{n\in N}I_{n,t}+\mu_t\left(\sum_{n\in N}B_{l,n}I_{n,t}+U_{l,t}-P_{l,\max}\right)+\rho_t\left(K_{l,t}-\sum_{n\in N}B_{l,n}I_{n,t}-P_{l,\max}\right)\tag{14}$$

式中：λ_t、μ_t、ρ_t均属于$\mathbf{R}^+$，λ_t为系统功率平衡约束条件的拉格朗日乘子，μ_t为潮流上限约束的拉格朗日乘子，ρ_t为潮流下限的约束的拉格朗日乘子，$U_{l,t}$和$K_{l,t}$分别为线路 l 上的潮流上/下限约束的松弛变量。

将拉格朗日函数L_0对各节点处用电量$x_{n,t}$求偏导[32]，根据 KKT 最优条件可以得到

$$\frac{\partial L_0^*}{\partial x_{n,t}}=\frac{\partial U(x_{\mathrm{t}},\omega_{\mathrm{t}})^*}{\partial x_{n,t}}-\frac{\partial C_t^*}{\partial x_{n,t}}-\lambda_t^*-\mu_t^*B_{l,n}+\rho_t^*B_{l,n}\tag{15}$$

式中：“*”为问题的最优解标记；C_t^*为发电总成本，$C_t^*=C_{g,t}^*+C_{r,t}^*+C_{s,t}^*+\hat{C}_{r,t}^*$。

根据用户的用电特点可知

$$\frac{\partial U(x_{\mathrm{t}},\omega_{\mathrm{t}})^*}{\partial x_{n,t}}-\frac{\partial C_t^*}{\partial x_{n,t}}=p_{LM,n,t}$$

则时段 t 节点 n 的电价为

$$p_{LM,n,t}=\frac{\partial C_t^*}{\partial x_{n,t}}-\frac{\partial U(x_t,\omega_t)^*}{\partial x_{n,t}}=\lambda_t^*+(\mu_t^*-\rho_t^*)B_{l,n}\tag{16}$$

式中：λ_t^*为系统平衡约束的影子价格；μ_t^*和ρ_t^*分别为线路潮流上/下限约束的影子价格[33]。

传统的直流潮流模型中的节点电价由成本和拥堵两部分构成[32]，而考虑了用户用电特点的节点实时电价模型中的节点电价由效用、成本和拥堵三部分组成，如式(16)所示。

式(14)的对偶问题可表示为

$$\min_{\lambda_t,\mu_t,\rho_t}D(\lambda_t,\mu_t,\rho_t)\tag{17}$$

用其替代模型式(14)，可以求得λ_t^*、μ_t^*和ρ_t^*。

利用拟牛顿法可求得对偶问题的最优解，其算法归结为：

(1)步骤 1：输入初始点X_0，初始 Hessian 矩阵$\boldsymbol{H}_0$和参数$\varepsilon\geqslant0$。令$k=0$。

(2)步骤 2：计算$d_k=-H_kg_k$，其中$g_k=\left.\frac{\partial L_{0,t}}{\partial X}\right|_{X=X_k}$。令$X_{k+1}=X_k+\alpha^kd_k$，步长$\alpha^k$由线搜索产生，其中$X_k=x_n^t$。

(3)步骤 3：当$\|g_{k+1}\|\leqslant\varepsilon$时，停止计算，否则转入下一步。

(4)步骤 4：进行更新

$$H_{k+1}=H_k+\frac{(s_k-H_ky_k)(s_k-H_ky_k)^{\mathrm{T}}}{(s_k-H_ky_k)^{\mathrm{T}}y_k}\tag{18}$$

其中$y_k=g_{k+1}-g_k$，$s_k=X_{k+1}-X_k$，转到步骤(2)直至求出$X^*(\lambda_t,\mu_t,\rho_t)$。

将$X^*(\lambda_t,\mu_t,\rho_t)$代入对偶问题表达式式(17)可得到$D(\lambda_t,\mu_t,\rho_t)$，再次利用拟牛顿法可求出$\lambda_t$、$\mu_t$、$\rho_t$，进而求得$X^*$，此时模型的求解过程完成。

2 数值实验

2.1 参数设置

本文研究对象为由 3 个节点、4 台机组组成的电力系统模型。新能源主要考虑风能和光能。参照文献 [14，19，29，34−35] 预先设置模型中涉及的参数：化石能源供电商成本参数$a=0.1$，$b=0$，$c=0$；风光能源供电商成本参数$m=0.01$；惩罚成本参数$m_{\mathrm{f}}=0.05$。储能装置参数如表 1 所示。线路传输容量参数如表 2 所示。系统结构如图 2 所示。用户在不同时段的用电效益不同，故设用户用电弹性系数的取值为[2，7]，$\alpha=0.5$。

表 1 储能基本参数

Tab. 1 Basic parameters of energy storage

储能装置	存储成本/[元·(kW·h)$^{-1}$]	初始容量/kW	最大充放电功率/kW	最大容量/kW
储能1/2	0.03	5	5	8

表 2 线路传输容量参数

Tab. 2 Basic parameters of lines

线路	始点	终点	线路潮流上限/kW	阻抗/Ω
线路1	N_2	N_1	6	1
线路2	N_1	N_3	9	1
线路3	N_2	N_3	6	2

2.2 仿真结果及分析

通过对模型进行仿真求解可以得到各节点用户的最优用电量、储能的最优充、放电策略以及

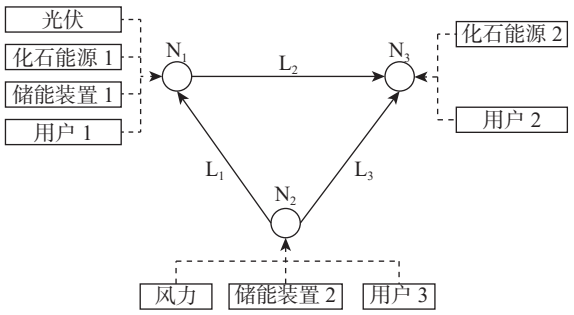

图 2　节点系统框架图

Fig. 2　Nodal system architecture diagram

能源的最优发电策略，结果分别如图 3～5 所示。

图 3 表明利用考虑了用户用电特性的节点实时电价模型优化调度出的每个节点的最优用电量始终在用电量上、下限之间。可以看出，在时段 11～15 时各节点用户用电量较大，在时段 1～5 和时段 22～24 时各节点用户用电量较小。在时段 47 之后节点 2 的用户用电量基本上保持在最小用电量水平。

如图 4 所示，风光能源发电量得到充分消纳，在时段 13～15 时光伏发电量较高，化石能源 1 和化石能源 2 的发电量明显减少。在时段 15 之后光伏发电量逐渐减少到 0，风力发电量也无法满足系统所有节点用户的用电需求，此时，对化石能源的调度量明显增高。这说明基于多能互补机制的节点实时电价策略可以优先使用可再生能源发电，从而减少对高成本的化石能源的调用。

图 5 表明每个储能装置在各时段的充、放电量均在允许范围内。在时段 1 时，节点 1 的光伏发电量为 0，因此可通过调度节点 2 的风力发电量来满足用户的用电需求，并将多余电量进行储能以备在用户过多时放电来保持系统电力平衡，而为了满足系统的最优调度，可利用风力能源节点的储能装置进行储能放电。在时段 13～16 时，光伏和风力发电量均较大。为了避免因弃电造成资源浪费，储能装置 1 和储能装置 2 均进行充电，并在时段 17 后进行储能放电，从而降低系统对化石能源的调度。

受电力系统的地理因素和线路传输容量的限制，各节点无法自由调配风光能源发电量。线路潮流趋势、节点实时电价分别如图 6～7 所示。

在时段 17 前，节点 2 的风力发电量较高，可在满足自身用电量需求后，将多余的发电量通过线路 1 和线路 3 输送到其他节点，以实现系统供需平衡，达到整体福利最大化。由图 7 可知，节点 3 始终最大限度地调用节点 2 的风力发电量，从而造成线路阻塞。为了保持节点用电的供需平

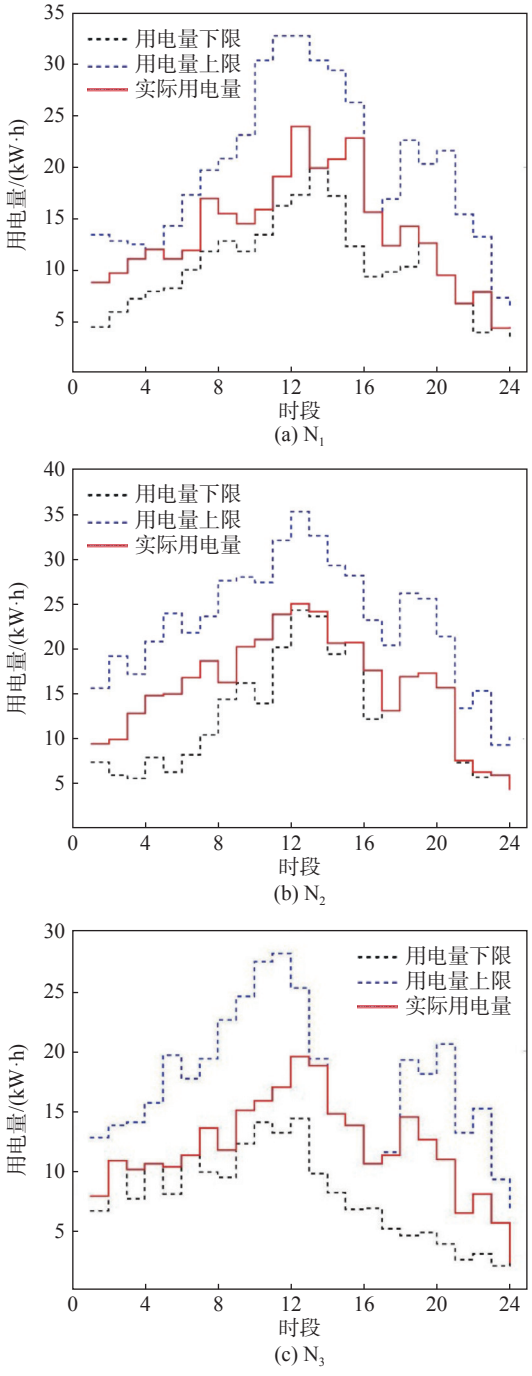

图 3　各节点用电趋势

Fig. 3　Power consumption trends of each node

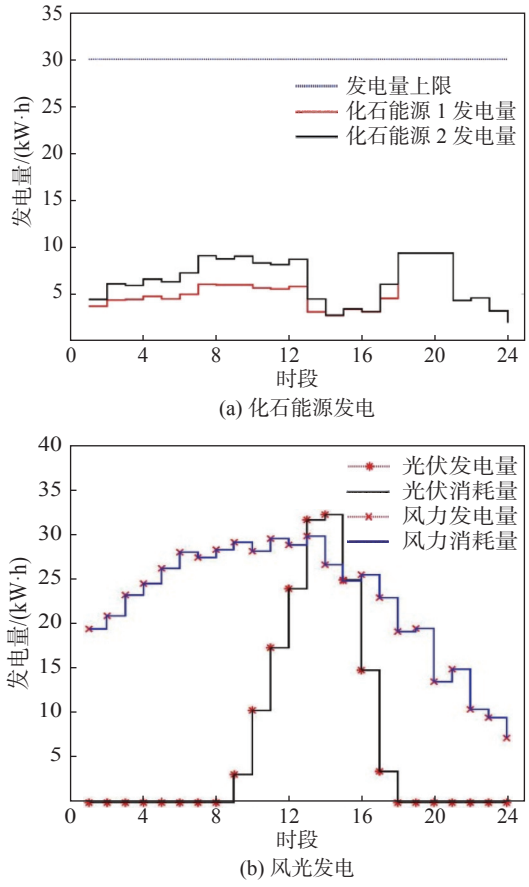

图 4 供电商发电趋势

Fig. 4 Power generation trends of the power supplier

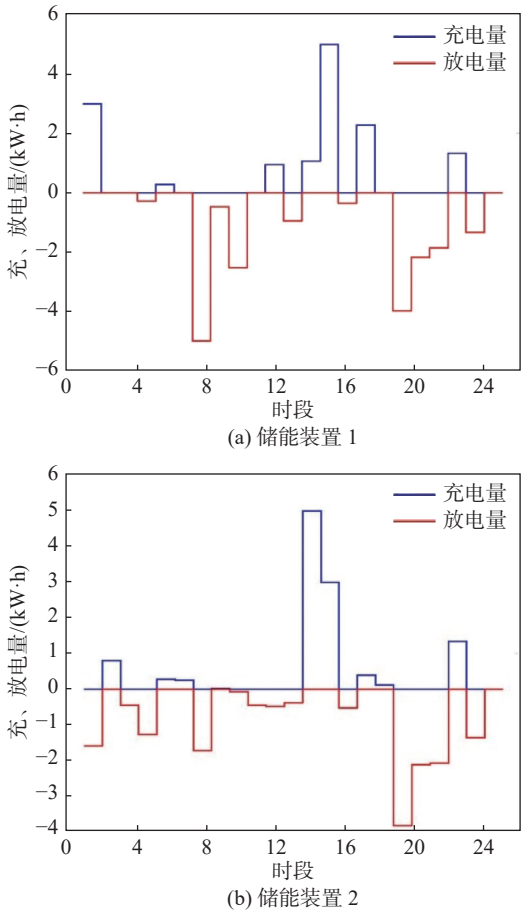

图 5 储能充、放电趋势

Fig. 5 Energy storage charging and discharging trends

衡，节点 3 仍需调用化石能源进行发电，故其用电价格普遍高于节点 1、2。在时段 10～15 时，光伏发电量较多，节点 3 通过线路 2 和线路 3 调度风光发电量来满足节点用户用电需求，因而化石能源发电量减少，发电成本低，节点电价降低。尤其是时段 13～15 时风光能源发电量较高，整体电价较低；在时段 18～20 时，节点用户用电量较多，但是光伏和风力发电量较低，因此需要调用更多的化石能源来满足用电需求，从而导致电价升高。图 7 的仿真结果表明，该模型可以准确地反映各节点在不同供需条件下的电力价格。

2.3 对比分析

为验证本文所提模型的有效性和可行性，进行了 4 种方案的对比分析。方案 1 为不考虑线路限制的实时电价模型；方案 2 为以成本最小化为目标的节点电价模型；方案 3 为固定电价下的社会福利；方案 4 为本文所提出的以社会福利最大化为目标的节点实时电价模型。不同方案下 24 h 社会福利对比如表 3 所示。

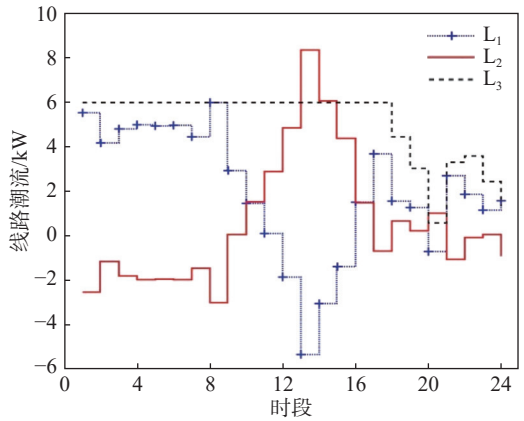

图 6 线路潮流趋势

Fig. 6 Line power flow trends

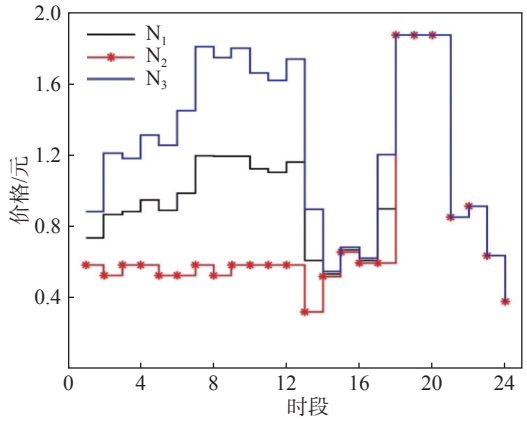

图 7　节点实时电价

Fig. 7　Real-time electricity prices at nodes

表 3　不同方案下的 24 h 社会福利对比

Tab. 3　Comparison of social welfare under different schemes

方案	1	2	3	4
24 h社会福利/元	2 763.61	2 134.86	1 941.63	2 880.97

结合表 3 与图 8 可见，方案 4 的社会福利明显高于方案 2 和方案 3 的，且略高于方案 1 的。虽然方案 1 的社会福利较高，但系统在运行中容易出现线路过载的现象。方案 1 的线路潮流如图 9 所示，线路 3 在时段 2～17 时基本上处于过载状态，不利于电力系统的安全运行。对比方案 2 和方案 4 的仿真结果可知，仅考虑供给侧的实时电价模型不能使社会福利达到最优。而方案 4 综合考虑了供需双方对电力系统的影响，在保障电力系统安全运行的情况下，可实现社会福利最大化，从而验证了本文所提模型的有效性和可行性。

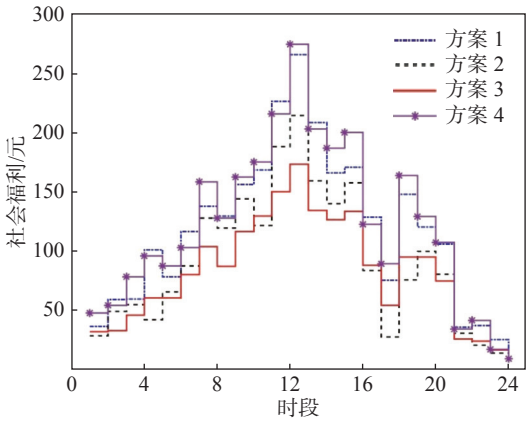

图 8　不同方案下的社会福利对比

Fig. 8　Social welfare curves under different schemes

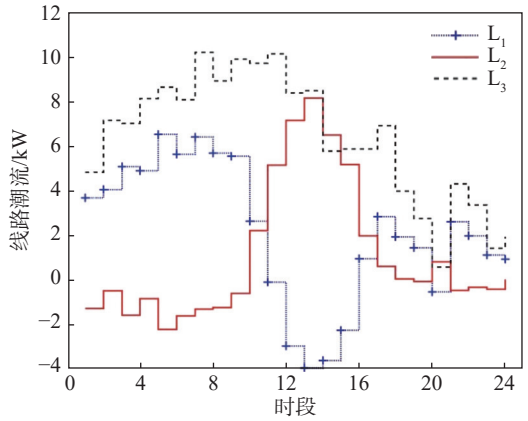

图 9　方案 1 的线路潮流

Fig. 9　Line power flow under scheme 1

3　结论

目前基于社会福利最大化方法的实时电价策略未考虑到供电商及用户的位置分布，进而忽略了线路传输对电力系统的影响。基于此，本文针对新能源和储能装置并网情形下多供电商多用户的电力系统进行实时定价策略研究。首先，考虑到供电商及用户之间线路传输能力受限和用户用电特点，提出将直流潮流中的潮流约束应用到实时定价方法中，建立以社会福利最大化为目标的节点实时电价模型。然后，利用拉格朗日对偶法和拟牛顿法进行求解，得到各节点的最优电价。最后，以改进的 3 节点系统为例进行仿真分析，并与多方案进行对比分析，得出以下结论：

(1)考虑用户用电特点的节点实时电价模型能够调度各节点用户最优的用电量，并能够准确反映各节点不同供需条件下的电力价格。

(2)经多方案对比分析可知，考虑用户用电特点的节点实时电价模型的社会福利要明显高于固定电价和以发电成本最小化为目标的节点实时电价模型的社会福利，且略高于不考虑线路传输能力受限的实时电价模型的社会福利。

参考文献：

[1]　成润婷, 张勇军, 李立涅, 等. 面向高比例可再生能源

消纳的电力市场建设及研究进展 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(2)：89 − 99.

[2] ZHANG L, GAO Y, ZHU H B, et al. A distributed real-time pricing strategy based on reinforcement learning approach for smart grid[J]. Expert Systems with Applications, 2022, 191：116285.

[3] MA J, VENKATESH B. New real-time demand response market co-optimized with conventional energy market[J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(4)：6381 − 6392.

[4] 高岩. 基于需求侧管理实时电价优化方法综述 [J]. 上海理工大学学报, 2022, 44(2)：103 − 111, 121.

[5] 赵雪琦, 高岩. 考虑多能供电差异的智能电网实时定价 [J]. 上海理工大学学报, 2024, 46(4)：431 − 439.

[6] YUAN G X, GAO Y, YE B, et al. A bilevel programming approach for real-time pricing strategy of smart grid considering multi-microgrids connection[J]. International Journal of Energy Research, 2021, 45(7)：10572 − 10589.

[7] 谭鸣骢, 王玲玲, 蒋传文, 等. 考虑负荷聚合商调节潜力的需求响应双层优化模型 [J]. 中国电力, 2022, 55(10)：32 − 44.

[8] MISHRA M K, PARIDA S K. A game theoretic approach for demand-side management using real-time variable peak pricing considering distributed energy resources[J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(1)：144 − 154.

[9] 邱革非, 何超, 骆钊, 等. 考虑新能源消纳及需求响应不确定性的配电网主从博弈经济调度 [J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6)：66 − 72.

[10] DONG J Y, SONG C H, LIU S, et al. Decentralized peer-to-peer energy trading strategy in energy blockchain environment: a game-theoretic approach[J]. Applied Energy, 2022, 325：119852.

[11] 高岩. 智能电网实时电价社会福利最大化模型的研究 [J]. 中国管理科学, 2020, 28(10)：201 − 209.

[12] YANG Y X, DU S Q, CHEN Y Y. Real-time pricing method for smart grid based on social welfare maximization model[J]. Journal of Industrial and Management Optimization, 2023, 19(3)：2206 − 2225.

[13] 陆玉玉, 王波, 王晓飞, 等. 考虑公平性的智能电网实时电价收益均衡模型 [J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21)：41 − 46.

[14] SAMADI P, MOHSENIAN-RAD A H, SCHOBER R, et al. Optimal real-time pricing algorithm based on utility maximization for smart grid[C]//Proceedings of the First IEEE International Conference on Smart Grid Communications. Gaithersburg: IEEE, 2010: 415 − 420.

[15] 代业明, 齐尧, 高红伟, 等. 基于 PMSC 管理及奖惩机制的智能电网实时定价研究 [J]. 中国管理科学, 2022, 30(7)：88 − 98.

[16] 李军祥, 张文财, 高岩. 基于用户电器分类的智能电网实时定价研究 [J]. 中国管理科学, 2019, 27(4)：210 − 216.

[17] 原冠秀, 高岩, 王宏杰. 基于效用分类的智能电网实时电价算法 [J]. 上海理工大学学报, 2020, 42(1)：29 − 35.

[18] 朱红波, 刘长平, 冯雪, 等. 具有电力存储设备的实时需求响应与能量调度 [J]. 中国管理科学, 2021, 29(9)：102 − 110.

[19] 陶莉, 高岩, 朱红波, 等. 有可再生能源和电力存储设施并网的智能电网优化用电策略 [J]. 中国管理科学, 2019, 27(2)：150 − 157.

[20] 武群丽, 席曼. 基于电力供应链博弈的可再生能源政策效应研究 [J]. 中国电力, 2022, 55(5)：12 − 20, 38.

[21] 张粒子, 丛野, 陶文斌, 等. 电力现货市场环境下提供位置信号电价机制的协同作用 [J]. 中国电力, 2020, 53(9)：9 − 18, 46.

[22] DASHTDAR M, NAJAFI M, ESMAEILBEIG M. Calculating the locational marginal price and solving optimal power flow problem based on congestion management using GA-GSF algorithm[J]. Electrical Engineering, 2020, 102(3)：1549 − 1566.

[23] 史新红, 郑亚先, 薛必克, 等. 机组运行约束对机组节点边际电价的影响分析 [J]. 电网技术, 2019, 43(8)：2658 − 2664.

[24] SARAIVA F O S, PAUCAR V L. Locational marginal price decomposition using a fully distributed slack bus model[J]. IEEE Access, 2022, 10：84913 − 84933.

[25] 陈艺华, 张炜, 张成刚, 等. 新型电力系统中促进新能源消纳的电力现货市场交易机制研究 [J]. 智慧电力, 2022, 50(2)：97 − 104.

[26] LV J, JIANG Y W. Research on generalized locational marginal price of integrated electricity-heat-gas market considering integrated demand response[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2022, 14(4)：045902.

[27] 李嫚, 李先锋, 边俐争, 等. 考虑需求响应和有功损耗的含可再生能源配网节点边际电价 [J]. 可再生能源, 2022, 40(1)：128 − 135.

[28] JIN H Y, TENG Y, ZHANG T Y, et al. A locational marginal price-based partition optimal economic dispatch model of multi-energy systems[J]. Frontiers in Energy Research, 2021, 9：694983.

[29] 王佳惠, 牛玉广, 陈玥, 等. 计及火电深度调峰的高比

例可再生能源电力系统日前优化调度研究 [J]. 太阳能学报, 2023, 44(1)：493 − 499.
[30] 刘暄, 李军祥, 洪珩. 区块链下考虑用户绿色偏好的新能源电力消纳策略 [J]. 能源研究与信息, 2023, 39(1)：14 − 19, 24.
[31] 王宣元, 高峰, 康重庆, 等. 扩展的节点电价算法研究 [J]. 电网技术, 2019, 43(10)：3587 − 3596.
[32] TAN Z F, CHENG T, LIU Y C, et al. Extensions of the locational marginal price theory in evolving power systems: a review[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2022, 16(7)：1277 − 1291.
[33] 陶杰, 高岩. 多拉格朗日乘子情形下影子价格的判别和计算 [J]. 管理科学学报, 2021, 24(3)：32 − 44.
[34] ÁNGELES L, CASTILLO J, SEBASTIÁN D. Comparison of locational marginal price calculation using five DCOPF algorithms[C]//Proceedings of the XXXI International Summer Meeting on Power and Industrial Applications. Acapulco, Mexico: IEEE, 2018: 104 − 110.
[35] 罗微, 蔡莹, 谭锡林, 等. 基于节点边际电价的市场过渡期日前出清策略 [J]. 电气应用, 2020, 39(3)：38 − 43.

信息

我国水深最深海上风电项目并网发电

1 月 7 日，华能山东半岛北 L 场址海上风电项目并网发电。这标志着我国商运海上风电在深远海领域实现新突破。该项目总装机 50.4 万 kW，安装 42 台 12 MW 风力发电机组，场址中心离岸约 70 km，水深 52～56 m，为我国水深最深的商运海上风电项目，年发电量约 17 亿 kW·h，每年可节约标准煤约 50 万 t。

该项目创新应用四桩导管架基础结构，最高可达 83.9 m，为国内同类型最高，可有效确保风机在深远海复杂地质环境下的安全稳定。该项目依托北斗系统研发了高精度定位技术，实现了海底沉桩的毫米级施工定位，结合智能辅助沉放技术，将深远海单台风机沉桩作业时间从 48 h 缩短至 29 h。借助无人机与人工磁场协同技术，该项目完成了 95.6 km 超长海缆铺设。

我国完成首个长输管道改输二氧化碳现场试验

2 月 5 日，国家管网集团国内首个长输管道改输二氧化碳现场试验在河南濮阳顺利完成。该试验在停输管道中开展，通过系统开展改输适应性评价和全面安全改造，将二氧化碳经 21 km 停输管道和 6 km 新建高压柔性复合管输送至中原油田实施驱油封存作业，顺利完成输油管道改输二氧化碳与驱油封存全流程现场验证。这标志着我国在存量长输管道资源化利用领域完成了从理论研究到工程实践的关键跨越，为碳捕集、利用与封存产业规模化推进提供了可复制、可推广的工程示范。

我国锂电池−34 ℃ 实现即插即用

2 月 10 日，中国科学院大连化学物理研究所陈忠伟院士团队在黑龙江漠河完成超低温锂电池实地测试。这标志着我国自主研发的电池技术已能支撑各类设备在极端低温下实现“即插即用”，破解了极寒地区电池能源供给难题。

该团队自主研发的超低温电池技术及配套人工智能电源管理系统通过创新性地设计耐低温电解液、开发准固态功能性隔膜，并融合先进的 AI 电池管理算法，解决了传统锂电池在低温下活性骤降、续航锐减甚至无法工作的行业痛点。该成果在−34 ℃ 的极寒环境中，无需任何外部保温措施，锂电池静置超过 8 h 后仍能保持超过 85% 的有效容量，并成功驱动工业级无人机完成长续航飞行与多项任务模拟。

（王　波）