

考虑多能供电差异的智能电网实时定价

赵雪琦, 高岩

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 可再生能源和传统能源联合发电是未来电网的发展趋势, 不同类型能源发电的定价机制是智能电网研究中的一个重要问题。考虑供电侧同时包含传统能源和可再生能源发电、用户配备电力存储设备, 为兼顾供需双方的利益和碳减排, 提出了一种基于社会福利最大化模型的实时定价机制。鉴于传统能源和可再生能源的发电方式和发电成本等存在较大差异, 在利用拉格朗日对偶算法求解时, 引入两个全局拉格朗日乘子作为相应的影子价格, 即最优实时电价。数值仿真结果表明, 与固定分时定价相比, 所提实时定价机制能够有效地削峰填谷、提高社会福利, 在经济性方面取得了良好的效果。

关键词: 实时定价; 可再生能源发电; 社会福利最大化; 对偶优化方法; 碳减排

中图分类号: TM 73 **文献标志码:** A

Real-time pricing mechanism for smart grid considering the difference of multi-energy generation

ZHAO Xueqi, GAO Yan

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

Abstract: The combined generation of renewable energy and traditional energy is the development trend of the future power grid. The pricing mechanism for different types of energy generation is an important issue in the research of smart grid. Considering multi-energy generation on supply side and power storage devices for users, a real-time pricing mechanism based on the social welfare maximization model was proposed, which took the interests of both supply and demand sides as well as carbon emission reduction into account. Lagrange dual algorithm was adopted to solve this problem and two global Lagrange multipliers were introduced as the corresponding shadow price, namely the optimal

收稿日期: 2023-02-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72071130)

第一作者: 赵雪琦(1998-), 女, 硕士研究生。研究方向: 电力系统定价机制、需求侧管理。E-mail: 2969874952@qq.com

通信作者: 高岩(1962-), 男, 教授。研究方向: 电力系统定价机制、需求侧管理、非光滑优化。E-mail: gaoyan@usst.edu.cn

引文格式: 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.

DOI: 10.13255/j.cnki.jusst.20230212001

Citation: ZHAO Xueqi, GAO Yan. Real-time pricing mechanism for smart grid considering the difference of multi-energy generation[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2024, 46(4): 431-439.

real-time electricity prices. Compared with fixed time-dependent pricing, the simulation results demonstrate that the proposed real-time pricing mechanism has a good performance in cutting peak and filling valley and improves social welfare, achieving good economic results.

Keywords: *real-time pricing; renewable energy generation; social welfare maximization; dual optimization method; carbon emission reduction*

在“双碳”背景下，各国大力倡导发展清洁能源，使用清洁能源代替传统化石燃料燃烧发电可以减少碳排放对环境造成的污染，是一种节能环保的发电方式^[1-5]。然而可再生能源并网给电网带来一定的不确定性，同时人们生活水平的提高导致用电量增加，因此仅依靠供电侧的调节难以实现供需平衡，从而催生了智能电网环境下的新型管理问题：需求侧管理。需求响应是需求侧管理的解决方案之一，其核心是价格响应^[6]。目前，关于电力产品的定价机制主要有固定定价、分时定价、尖峰定价和实时定价等^[7-9]。其中，实时定价被广泛认为是电力市场最理想的定价机制^[10-14]。智能电网环境下，利用智能电表的双向通信功能可以实现供电侧和用户的信息互动，使得实时定价成为可能^[15-16]。其原理是供电侧在每个时段开始时公布该时段的电价，用户根据价格信号主动调节自身用电行为，从而达到合理高效用电的目的。例如，用户可以通过适当降低空调温度或延迟洗衣机的启动时间等方式减少高峰期用电量，从而在保证自身效益最大化的同时，实现削峰填谷、缓解电网供电压力的目的^[17]。

社会福利最大化模型可以在兼顾供需双方利益的同时保证供需平衡，是制定实时电价策略的有效方法之一。文献[18]最早将社会福利最大化方法应用于智能电网实时定价，该基础模型以用户效益最大化和供电商成本最小化为目标，并将二者的差作为目标函数，将供需平衡作为约束，利用对偶优化方法求解，不仅求得了最优供用电量，还得到了拉格朗日乘子的值，也就是最优电价。后来，专家学者在此模型基础上，针对效用函数的形式、求解方法以及更加复杂的情形等方面进行了一系列推广和改进。现有研究中，用户效用函数的形式主要为二次函数和对数函数^[1-11]，文献[12]和[19]分别选取 Logistic 函数和分片线性函数的形式作为效用函数，也取得了良好的效果。在求解社会福利最大化模型时，主要采用对

偶优化方法、交替方向乘法(ADMM)和基于 KKT 系统的优化方法等^[16]，可以同时求得供用电策略和影子价格，也就是最优实时电价。对偶优化方法旨在通过将原优化问题转化为对偶问题来等价地求解原问题。交替方向乘法是一种迭代算法，该方法将原问题转化为一系列子问题，并且通过不断交替求解这些子问题来逼近原问题的最优解，具有良好的收敛性和鲁棒性。在基于 KKT 系统的优化方法中，使用 KKT 条件来表达约束条件，并且通过求解这些条件来获得原问题的最优解。这种方法通常需要对 KKT 条件进行线性化，然后使用线性规划或者二次规划等求解方法进行求解。以上都是求解社会福利最大化问题的有效方法，在实际应用中，应当根据具体问题的特点合理地选取相应的方法。此外，随着研究的深入，越来越多的文献考虑了更加复杂并且符合实际情况的情形，例如考虑储能装置、隐私保护、双碳目标、可再生能源发电等^[1-2,13-14]。文献[13]兼顾供需双方的隐私保护和利益均衡，对用户效用函数和供电商的成本函数进行改进，建立了基于区块链应用程度的社会福利最大化模型。文献[14]提出了一种带有电力存储设备的家庭能耗调度方案，该策略能够在减少用户购电成本的同时实现削峰填谷，有利于电网的稳定性。文献[1]中用户侧既配备可再生能源发电装置又配备电力存储设施，建立了计及碳减排收益的社会福利最大化模型，提出了一种复杂情形下的实时定价机制。文献[2]将新能源发电分为私人新能源发电和公共新能源发电，设计了优先消耗新能源的用电策略，在减少新能源并网不确定性方面取得了良好的效果。

太阳能、风能等可再生能源发电的成本低，但是受自然环境的影响，存在一定的不确定性，对于用户而言，可再生能源发电不稳定，有停电的可能性。而传统能源发电是可控的，稳定性良好，但是发电成本较高且会造成较大程度的环境

污染,特别是在“双碳”背景下,要支付很大的社会成本。因而在考虑多能发电时,单一电价已经不再适用。文献[3]最先对传统能源和可再生能源发电进行差别定价,建立了基于马尔可夫决策过程的双层随机模型,采用分布式在线多智能体强化学习算法求解,数值模拟结果表明制定的实时电价策略可以有效地削峰填谷。但是现有考虑传统能源和可再生能源供电差异的文献都是从市场经济的角度制定实时电价策略,社会效益不一定达到最优。

为兼顾供需双方的利益,本文从公共产品的角度考虑,建立了以供电侧成本最小化和需求侧效益最大化为目标的社会福利最大化模型。给出了一种考虑传统能源和可再生能源供电差异且用户配备电力存储设施的实时定价策略。首先,将原优化问题分解为各个时段独立求解的子问题,并且对目标函数中的分片线性函数做光滑化处理。然后,根据对偶理论设计分布式算法求解,引入两个全局拉格朗日乘子作为两类能源发电的影子价格,得到最优供电量、用电量和实时定价。最后,数值仿真结果验证了本文所提模型和算法的合理性和有效性。

1 系统模型

考虑一个现代电力系统,包含传统能源发电、可再生能源发电以及多个配备电力存储设施的用户。假设系统中有 N 个用户,每个用户 $i \in \mathcal{N}$, $\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$ 为用户的集合。将用户的用电周期划分为 K 个时间段, $\mathcal{K}$ 为时间段的集合,即 $\mathcal{K} = \{1, 2, \dots, K\}$ 。

1.1 供给侧

1.1.1 供电成本

传统能源供电的成本函数是单调递增的凸函数,目前普遍采用如下二次函数^[3-9]:

$$\begin{cases} C_T^k(L_T^k) = a_1 (L_T^k)^2 + b_1 L_T^k + c_1 \\ \text{s.t. } L_T^{k,\min} \leq L_T^k \leq L_T^{k,\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中: L_T^k 为 k 时段传统能源供电量; $L_T^{k,\min}$ 和 $L_T^{k,\max}$ 分别为传统能源供电量的上下限; $a_1 > 0$, $b_1 \geq 0$, $c_1 \geq 0$ 为预设的参数。

可再生能源发电包含风力发电和光伏发电,构成比较复杂且具有随机性,其供电成本难以用一个简单的二次函数来描述。分片线性函数具有

局部线性的优良特性,在数学上可以近似任意函数,适用于描述实际问题。因此,选取分片线性函数来描述可再生能源供电成本,表达式如下:

$$\begin{cases} C_{WP}^k(L_{WP}^k) = \begin{cases} p_1 L_{WP}^k, & 0 \leq L_{WP}^k \leq l_1 \\ p_2 L_{WP}^k + (p_1 - p_2) l_1, & l_1 < L_{WP}^k \leq l_2 \\ \dots \\ p_n L_{WP}^k + (p_1 - p_2) l_1 + \dots + (p_{n-1} - p_n) l_{n-1}, & l_{n-1} < L_{WP}^k \leq l_n \end{cases} \\ \text{s.t. } 0 \leq L_{WP}^k \leq L_{WP}^{k,\max} \end{cases} \quad (2)$$

式中: L_{WP}^k 为 k 时段可再生能源供电量; $L_{WP}^{k,\max}$ 为可再生能源供电量的上限; p_i 为预设的参数且满足 $p_i < p_{i+1}$ ($i = 1, 2, \dots, n-1$), 以保证 $C_{WP}^k(L_{WP}^k)$ 是一个凸函数; l_i ($i = 1, 2, \dots, n$)为分段点。

1.1.2 碳交易

供电侧引入碳交易机制可以促进清洁能源代替传统化石燃料燃烧发电,从而减少碳排放。碳交易的原理是监管部门事先给每个供电商分配一定的碳排放权配额,当供电商的实际碳排放量小于该配额时,剩余配额可以拿到市场上出售,反之需要购买超出部分的配额^[20-21]。

k 时段传统能源供电商和可再生能源供电商的碳排放配额^[20]为

$$E_{T,D}^k = \chi_T L_T^k \quad (3)$$

$$E_{WP,D}^k = \chi_{WP} L_{WP}^k \quad (4)$$

式中, χ_T 和 χ_{WP} 分别为 k 时段传统能源和可再生能源发电的单位电量无偿碳排放配额。

可再生能源发电产生的碳排放量忽略不计,传统能源发电的实际碳排放量^[21]为

$$E_{T,A}^k = a_2 (L_T^k)^2 + b_2 L_T^k + c_2 \quad (5)$$

式中, a_2 , b_2 , c_2 为传统能源发电的实际碳排放系数。

因此, k 时段传统能源供电商的碳交易成本以及可再生能源供电商的碳减排收益可表述为

$$C_{CO_2}^k = p_{CO_2} (E_{T,A}^k - E_{T,D}^k) \quad (6)$$

$$H_{CO_2}^k = p_{CO_2} E_{WP,D}^k \quad (7)$$

式中, p_{CO_2} 是碳交易价格。

1.2 需求侧

用户 i 在 k 时段内所有家用电器的总耗电量记为 x_i^k , 电力消耗区间为 $[m_i^k, M_i^k]$, 即 $x_i^k \in [m_i^k, M_i^k]$, 其中区间的下界表示最低耗电水平, 也就是只有必须运行的电器(如电冰箱)工作时的耗电量, 区间

的上界表示全部电器开启时的耗电量。依据微观经济学理论,效用函数可以用来描述用户用电的满意程度。在现有的实时定价模型中,最常用的就是如下二次效用函数^[1-4]:

$$U(x, \omega) = \begin{cases} \omega x - \frac{\alpha}{2} x^2, & 0 < x < \frac{\omega}{\alpha} \\ \frac{\omega^2}{2\alpha}, & x \geq \frac{\omega}{\alpha} \end{cases} \quad (8)$$

式中: x 代表用户的用电量; ω 为用电弹性系数,反映用电偏好,不同用户和时段取值一般不同; α 是预设的参数。

考虑部分用户配备电力存储设施,用户在各个时段根据其实际用电需求以及电价合理地进行充放电。为书写方便,此处统一建立模型,未配备电力存储设施的用户的初始电量和最大存储容量均取为0。用户 i 在 k 时段的充/放电量记为 g_i^k ,当 $g_i^k > 0$ 时,存储设备充电;当 $g_i^k < 0$ 时,存储设备放电;当 $g_i^k = 0$ 时,存储设备既不充电也不放电。电力存储设备的充放电功率为 $g_i^{\max}$,即 $g_i^k \in [-g_i^{\max}, g_i^{\max}]$ 。假设用户 i 的存储设备的最大容量为 $C_i^{\max}$,用电周期初始时刻剩余电量为 C_i^0 ,则用户 i 的存储设备在 k 时段开始时刻的电量 C_i^k 可以表示为

$$C_i^k = C_i^0 + \sum_{t=1}^{k-1} g_i^t \quad (9)$$

用户 i 的存储设备在 k 时段的充电量不能超过其剩余容量,放电量不能超过其当前存储电量,即

$$\begin{aligned} & \max_{\substack{x_i^k \in [m_i^k, M_i^k] \\ g_i^k \in [-g_i^{\max}, g_i^{\max}] \\ L_T^k \in [L_T^{\min}, L_T^{\max}] \\ L_{WP}^k \in [0, L_{WP}^{\max}]} \\ \text{s.t.} \quad & C_i^k = C_i^0 + \sum_{t=1}^{k-1} g_i^t, i \in \mathcal{N}, k \in \mathcal{K} \end{aligned} \quad (13(a))$$

$$-C_i^k \leq g_i^k \leq C_i^{\max} - C_i^k, i \in \mathcal{N}, k \in \mathcal{K} \quad (13(b))$$

$$x_i^k + g_i^k = s_{i,T}^k + s_{i,WP}^k, i \in \mathcal{N}, k \in \mathcal{K} \quad (13(c))$$

$$\sum_{i=1}^N s_{i,T}^k \leq L_T^k, k \in \mathcal{K} \quad (13(d))$$

$$\sum_{i=1}^N s_{i,WP}^k \leq L_{WP}^k, k \in \mathcal{K} \quad (13(e))$$

式中: x_i^k 为用户 i 在 k 时段的用电量; g_i^k 为用户 i 的存储设备在 k 时段的充/放电量; $s_{i,T}^k$ 为用户 i 在 k 时段从传统能源供电商购得的电量; $s_{i,WP}^k$ 为用户 i 在

$$\begin{cases} g_i^k \geq 0 \\ g_i^k \leq C_i^{\max} - C_i^k \end{cases} \quad \begin{cases} g_i^k < 0 \\ -g_i^k \leq C_i^k \end{cases}$$

等价于

$$-C_i^k \leq g_i^k \leq C_i^{\max} - C_i^k$$

电力存储设施的成本主要取决于充放电的速率和深度,包含运维成本和折旧成本^[1,22],分别用二次函数和一次函数表示,如下所示:

$$C_{E,i}^k(g_i^k) = C_{E,i}^{k,1}(g_i^k) + C_{E,i}^{k,2}(g_i^k) \quad (10)$$

$$C_{E,i}^{k,1}(g_i^k) = \delta_i^k (g_i^k)^2 \quad (11)$$

$$C_{E,i}^{k,2}(g_i^k) = \psi_i^k |g_i^k| \quad (12)$$

式中, $\delta_i^k > 0$, $\psi_i^k > 0$ 为预设的参数。

因此,用户 i 在 k 时段的实际购电量为 $s_i^k = x_i^k + g_i^k$,并且有传统能源和可再生能源两个购电来源,即 $s_i^k = s_{i,T}^k + s_{i,WP}^k$,用户根据各时段不同能源电价合理制定购电方案。

2 社会福利最大化模型的构建

以供电成本最小和用户效益最大为目标,考虑电力存储设备和碳减排,建立如下社会福利最大化模型P1:

$$\sum_{k=1}^K \left[\sum_{i=1}^N [U_i(x_i^k, \omega_i^k) - C_{E,i}^k(g_i^k)] - C_T^k(L_T^k) - C_{WP}^k(L_{WP}^k) - C_{CO_2}^k(L_T^k) + H_{CO_2}^k(L_{WP}^k) \right]$$

k 时段从可再生能源供电商购得的电量; L_T^k 为 k 时段传统能源供电量; L_{WP}^k 为 k 时段可再生能源供电量,以上变量为本模型的决策变量。用户 i 的存储设备在第 k 个时段开始时存储的电量 C_i^k 为中间变量,表达式由式(13(a))给出。约束(13(b))保证了存储设备在合理范围内进行充电或放电,存储设备在每一时刻储存的电量不会超过其最大存储容量。约束(13(c))说明用户有两个购电来源,即传统能源和可再生能源。由于风、光等自然资源具有随机性,因此在一定概率下,可再生能源供电存在停电的风险,而传统能源供电更加稳定,且不同能源的发电成本也有较大差异,因此二者不

可统一定价。约束 (13(c)) 和 (13(e)) 保证了用户总用电量不超过相应的供电量, 也就是供大于求。

社会福利最大化模型 P1 中, 用户 i 的存储设备在第 k 个时段开始时存储的电量 C_i^k 的值是由初始电

$$\begin{aligned} & \max_{\substack{x_i^k \in [m_i^k, M_i^k] \\ g_i^k \in [-g_i^{\max}, g_i^{\max}] \\ L_T^k \in [L_T^{\min}, L_T^{\max}] \\ L_{WP}^k \in [0, L_{WP}^{\max}]} \sum_{i=1}^N [U_i(x_i^k, \omega_i^k) - C_{E,i}^k(g_i^k)] - C_T^k(L_T^k) - C_{WP}^k(L_{WP}^k) - C_{CO_2}^k(L_T^k) + H_{CO_2}^k(L_{WP}^k) \\ \text{s.t.} \quad & -C_i^k \leq g_i^k \leq C_i^{\max} - C_i^k, i \in N \quad (14(a)) \\ & x_i^k + g_i^k = s_{i,T}^k + s_{i,WP}^k, i \in N \quad (14(b)) \\ & \sum_{i=1}^N s_{i,T}^k \leq L_T^k \quad (14(c)) \\ & \sum_{i=1}^N s_{i,WP}^k \leq L_{WP}^k \quad (14(d)) \end{aligned}$$

由于优化问题 P2 的目标函数中包含两个非光滑项 (即电力存储设备的折旧成本和可再生能源供电的成本), 所以无法应用经典的优化算法求解。电力存储设备的折旧成本为绝对值函数, 可以写成分段函数的形式, 即

$$C_{E,i}^{k,2}(g_i^k) = \begin{cases} \psi_i^k g_i^k, & g_i^k \geq 0 \\ -\psi_i^k g_i^k, & g_i^k < 0 \end{cases} \quad (15)$$

同时, 可再生能源供电成本也为分片线性函数, 此处引入一种全局光滑化方法^[19,23], 构造可以无限逼近分片线性函数的光滑函数。具体方法如下:

首先给出只有一个分点的分片线性函数的光滑化方法,

$$f(x) = \begin{cases} f_0(x), & x \in (-\infty, a_1] \\ f_1(x), & x \in (a_1, +\infty) \end{cases} \quad (16)$$

$f(x)$ 是在分点 $x = a_1$ 处不光滑的分片光滑函数, 引入光滑参数 $\varepsilon > 0$, 构造光滑逼近函数如下:

$$f_\varepsilon(x) = \frac{f_0(x) + f_1(x)}{2} + \frac{(x - a_1)(f_1(x) - f_0(x)) + \varepsilon}{2\sqrt{(x - a_1)^2 + \varepsilon}} \quad (17)$$

$$L(X^k, G^k, S_T^k, S_{WP}^k, L_T^k, L_{WP}^k, \mu^{k,1}, \mu^{k,2}, v^k, \lambda_T^k, \lambda_{WP}^k) =$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^N [U_i(x_i^k, \omega_i^k) - C_{E,i}^k(g_i^k)] - C_T^k(L_T^k) - C_{WP}^k(L_{WP}^k) - C_{CO_2}^k(L_T^k) + H_{CO_2}^k(L_{WP}^k) + \\ & \sum_{i=1}^N [\mu_i^{k,1}(g_i^k + C_i^k) - \mu_i^{k,2}(g_i^k + C_i^k - C_i^{\max}) + v_i^k(x_i^k + g_i^k - s_{i,T}^k - s_{i,WP}^k)] - \\ & \lambda_T^k \left(\sum_{i=1}^N s_{i,T}^k - L_T^k \right) - \lambda_{WP}^k \left(\sum_{i=1}^N s_{i,WP}^k - L_{WP}^k \right) \end{aligned} \quad (19)$$

量以及该时段之前的充/放电量决定的, 因此在每个时段开始时, C_i^k 是已知的。所以模型 P1 可以分解为 K 个独立求解的子问题, 对于每个确定的时段 $k \in \mathcal{K}$, 有如下优化问题 P2:

可以证明, 对于任意的 $\varepsilon > 0$, $f_\varepsilon(x)$ 在其定义域内都是光滑的, 且对于确定的 x , 满足 $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} f_\varepsilon(x) = f(x)$ 。然后可以很容易地推广到多个分点的情形, 即

$$F(x) = \begin{cases} f_0(x), & x \in (-\infty, a_1] \\ f_1(x), & x \in (a_1, a_2] \\ \dots & \dots \\ f_m(x), & x \in (a_m, +\infty) \end{cases} \quad (18)$$

其中 $a_1 < a_2 < \dots < a_m$, $f_n(x) (n = 0, 1, \dots, m)$ 在其定义域内连续可微, $F(x)$ 是在分点 $x = a_i (1 \leq i \leq m)$ 处不光滑的分片光滑函数。

应用以上方法可以构造出可再生能源成本的光滑逼近函数, 并用以代替优化问题 P2 中的原成本函数。由此, 问题 P2 的目标函数转换成一个连续可微的严格凹函数。因为约束条件都是仿射的, 保证了该问题的可行域是一个非空闭凸集, 所以问题 P2 是一个严格凸规划。又因为可行域存在内点, 即满足 Slater 条件^[24], 因此优化问题 P2 存在唯一的全局最优解。

3 模型求解

经光滑化处理, 优化问题 P2 转化为一个光滑的严格凸规划, 满足强对偶性条件, 可以采用拉格朗日对偶方法求解。问题 P2 的拉格朗日函数为

式中: $\mu_i^{k,1}$, $\mu_i^{k,2}$, v_i^k , λ_T^k , $\lambda_{WP}^k \geq 0$, $i \in N$, $k \in \mathcal{K}$ 为拉格朗日乘子, 且 λ_T^k 和 λ_{WP}^k 为全局拉格朗日乘子, 在经济学中被定义为影子价格^[6], 能够反映社会劳动的消耗、资源的稀缺程度和最终的产品需求情况, 此处表示 k 时段传统能源和可再生能源发

电的电价; 其余拉格朗日乘子为局部拉格朗日乘子, 无实际意义。定义拉格朗日乘子向量 $\mu^{k,1} \triangleq [\mu_i^{k,1}]_{i \in N}$, $\mu^{k,2} \triangleq [\mu_i^{k,2}]_{i \in N}$, $v^k \triangleq [v_i^k]_{i \in N}$; 定义变量 $X^k \triangleq [x_i^k]_{i \in N}$, $G^k \triangleq [g_i^k]_{i \in N}$, $S_T^k \triangleq [s_{i,T}^k]_{i \in N}$, $S_{i,WP}^k \triangleq [s_{i,WP}^k]_{i \in N}$ 。

对偶问题的目标函数是

$$D(\mu^{k,1}, \mu^{k,2}, v^k, \lambda_T^k, \lambda_{WP}^k) = \max_{X^k, G^k, S_T^k, S_{WP}^k, L_T^k, L_{WP}^k} L(X^k, G^k, S_T^k, S_{WP}^k, L_T^k, L_{WP}^k, \mu^{k,1}, \mu^{k,2}, v^k, \lambda_T^k, \lambda_{WP}^k) = \sum_{i=1}^N B_i^k(\mu^{k,1}, \mu^{k,2}, v^k, \lambda_T^k, \lambda_{WP}^k) + R^k(\mu^{k,1}, \mu^{k,2}, v^k, \lambda_T^k, \lambda_{WP}^k) + Y_k(\mu^{k,1}, \mu^{k,2}, v^k, \lambda_T^k, \lambda_{WP}^k) \quad (20)$$

其中

$$B_i^k(\mu^{k,1}, \mu^{k,2}, v^k, \lambda_T^k, \lambda_{WP}^k) = \max_{X^k, G^k, S_T^k, S_{WP}^k, L_T^k, L_{WP}^k} [U_i(x_i^k, \omega_i^k) - C_{E,i}^k(g_i^k) + \mu_i^{k,1}(g_i^k + C_i^k) - \mu_i^{k,2}(g_i^k + C_i^k - C_i^{\max}) + v_i^k(x_i^k + g_i^k - s_{i,T}^k - s_{i,WP}^k) - \lambda_T^k s_{i,T}^k - \lambda_{WP}^k s_{i,WP}^k] \quad (21)$$

$$R^k(\mu^{k,1}, \mu^{k,2}, v^k, \lambda_T^k, \lambda_{WP}^k) = \max_{X^k, G^k, S_T^k, S_{WP}^k, L_T^k, L_{WP}^k} [\lambda_T^k L_T^k - C_T^k(L_T^k) - C_{CO_2}^k(L_T^k)] \quad (22)$$

$$Y_k(\mu^{k,1}, \mu^{k,2}, v^k, \lambda_T^k, \lambda_{WP}^k) = \max_{X^k, G^k, S_T^k, S_{WP}^k, L_T^k, L_{WP}^k} [\lambda_{WP}^k L_{WP}^k - C_{WP}^k(L_{WP}^k) + H_{CO_2}^k(L_{WP}^k)] \quad (23)$$

对偶问题 P3 为

$$\min_{\mu^{k,1}, \mu^{k,2}, v^k, \lambda_T^k, \lambda_{WP}^k \geq 0} D(\mu^{k,1}, \mu^{k,2}, v^k, \lambda_T^k, \lambda_{WP}^k) \quad (24)$$

结合以上分析, 采用分布式算法求解对偶问题 P3, 即将问题 P3 分解为需求侧、传统能源供电侧和可再生能源供电侧独立求解的三类子问题。用户从供电侧获得电价 λ_T^k 和 λ_{WP}^k 后, 求解式 (21) 得到拟最优购电量 $x_{i,T,t}^{k*}$ 和 $s_{i,WP,t}^{k*}$ 并传给供电侧。传统能源供电侧通过求解式 (22) 得到拟最优供电量 $L_{T,t}^{k*}$, 可再生能源供电侧通过求解式 (8) 得到最优拟供电量 $L_{WP,t}^{k*}$ 。根据拟最优用电量和供电量更新拉格朗日乘子 $\mu_{i,t}^{k,1}$, $\mu_{i,t}^{k,2}$, $v_{i,t}^k$ 和电价 $\lambda_{T,t}^k$, $\lambda_{WP,t}^k$, 迭代公式如下:

$$\mu_{i,t+1}^{k,1} = \left[\mu_{i,t}^{k,1} - \beta_1 \frac{\partial \mathcal{D}(\mu^{k,1}, \mu^{k,2}, v^k, \lambda_T^k, \lambda_{WP}^k)}{\partial \mu_{i,t}^{k,1}} \right]^+ = \left[\mu_{i,t}^{k,c} - \beta_1 (C_i^k + g_i^k) \right]^+ \quad (25)$$

$$\mu_{i,t+1}^{k,2} = \left[\mu_{i,t}^{k,2} - \beta_2 \frac{\partial \mathcal{D}(\mu^{k,1}, \mu^{k,2}, v^k, \lambda_T^k, \lambda_{WP}^k)}{\partial \mu_{i,t}^{k,2}} \right]^+ = \left[\mu_{i,t}^{k,c} - \beta_2 (C_i^{\max} - C_i^k - g_i^k) \right]^+ \quad (26)$$

$$v_{i,t+1}^k = \left[v_{i,t}^k - \beta_3 \frac{\partial \mathcal{D}(\mu^{k,1}, \mu^{k,2}, v^k, \lambda_T^k, \lambda_{WP}^k)}{\partial v_{i,t}^k} \right]^+ = \left[v_{i,t}^k - \beta_3 (s_{i,T}^k + s_{i,WP}^k - x_i^k - g_i^k) \right]^+ \quad (27)$$

$$\lambda_{T,t+1}^k = \left[\lambda_{T,t}^k - \beta_4 \frac{\partial \mathcal{D}(\mu^{k,1}, \mu^{k,2}, v^k, \lambda_T^k, \lambda_{WP}^k)}{\partial \lambda_{T,t}^k} \right]^+ = \left[\lambda_{T,t}^k - \beta_4 \left(L_T^k - \sum_{i=1}^N s_{i,T}^k \right) \right]^+ \quad (28)$$

$$\lambda_{WP,t+1}^k = \left[\lambda_{WP,t}^k - \beta_5 \frac{\partial \mathcal{D}(\mu^{k,1}, \mu^{k,2}, v^k, \lambda_T^k, \lambda_{WP}^k)}{\partial \lambda_{WP,t}^k} \right]^+ = \left[\lambda_{WP,t}^k - \beta_4 \left(L_{WP}^k - \sum_{i=1}^N s_{i,WP}^k \right) \right]^+ \quad (29)$$

其中 t 为迭代次数, $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ 为步长, $[x]^+ = \max\{x, 0\}$ 。传统能源供电侧、可再生能源供电侧和用户侧通过智能电表信息实时交互, 不断更新拟最优解和拉格朗日乘子, 直到得到最优解。详细算法如下。

算法 1: 由每个用户 i , $i \in N$ 执行。

a. 初始化: 设定用电弹性系数 ω_i^k , $k \in \mathcal{K}$, 存储设备初始时刻剩余容量 C_i^0 ; 设定初始 $x_{i,0}^k$, $g_{i,0}^k$, $s_{i,T,0}^k$ 和 $s_{i,WP,0}^k$, $k \in \mathcal{K}$; 设定步长 β_1, β_2 和 β_3 ; 给定 $\mu_{i,t}^{k,1}$, $\mu_{i,t}^{k,2}$ 和 $v_{i,t}^k$ 初始值, $k \in \mathcal{K}$; 给定终止误差 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 和 ε_3 , 令 $t = 0$ 。

b. 从供电侧获取电价 λ_T^k 和 λ_{WP}^k , $k \in \mathcal{K}$ 。

c. 求解式 (21), 得到解 $x_{i,t}^{k*}$, $g_{i,t}^{k*}$, $s_{i,T,t}^{k*}$ 和 $s_{i,WP,t}^{k*}$, $k \in \mathcal{K}$ 。

d. 将新的购电量信息 $s_{i,T,t}^{k*}$ 和 $s_{i,WP,t}^{k*}$ 传给供电侧。

e. 利用式 (25), (26), (27) 对 $\mu_{i,t}^{k,1}$, $\mu_{i,t}^{k,2}$ 和 $v_{i,t}^k$ 进行更新, 将新的值记为 $\mu_{i,t+1}^{k,1}$, $\mu_{i,t+1}^{k,2}$ 和 $v_{i,t}^k$, $k \in \mathcal{K}$ 。

f. 若 $\left| \mu_{i,t+1}^{k,1} - \mu_{i,t}^{k,1} \right| \leq \varepsilon_1$, $\left| \mu_{i,t+1}^{k,2} - \mu_{i,t}^{k,2} \right| \leq \varepsilon_2$, $\left| v_{i,t+1}^k - v_{i,t}^k \right| \leq \varepsilon_3$, $\left| \lambda_{T,t+1}^k - \lambda_{T,t}^k \right| \leq \varepsilon_4$, $\left| \lambda_{WP,t+1}^k - \lambda_{WP,t}^k \right| \leq \varepsilon_5$ 同时成立, 算法结束, 最优解 $x_{i,t}^{k*} = x_{i,t}^k$, $g_{i,t}^{k*} = g_{i,t}^k$, $s_{i,T,t}^{k*} = s_{i,T,t}^k$, $s_{i,WP,t}^{k*} = s_{i,WP,t}^k$; 否则, $t = t + 1$, 转步骤 b。

算法 2: 由传统能源供电侧执行。

a. 初始化: 给出初始供电量 L_T^k ; 设定步长 β_4 , 给定终止误差 ε_4 和 $\lambda_{T,t}^k$ 初始值, $k \in \mathcal{K}$, 令 $t = 0$ 。

b. 通过智能电表接受用户购电信息 $s_{i,T,t}^{k*}$ 。

c. 求解式 (22), 得到解 $L_{T,t}^{k*}$, $k \in \mathcal{K}$ 。

d. 利用式 (28) 更新电价, 更新后的电价记为 $\lambda_{T,t+1}^k$, $k \in \mathcal{K}$ 。

e. 公布更新后的实时电价 $\lambda_{T,t+1}^k$ 给用户。

f. 若 $\left| \mu_{i,t+1}^{k,1} - \mu_{i,t}^{k,1} \right| \leq \varepsilon_1$, $\left| \mu_{i,t+1}^{k,2} - \mu_{i,t}^{k,2} \right| \leq \varepsilon_2$, $\left| v_{i,t+1}^k - v_{i,t}^k \right| \leq \varepsilon_3$, $\left| \lambda_{T,t+1}^k - \lambda_{T,t}^k \right| \leq \varepsilon_4$, $\left| \lambda_{WP,t+1}^k - \lambda_{WP,t}^k \right| \leq \varepsilon_5$ 同时成立, 算法结束, 最优解 $L_T^{k*} = L_{T,t}^{k*}$; 否则, $t = t + 1$, 转步骤 b。

算法 3: 由可再生能源供电侧执行。

a. 初始化: 给出初始供电量 L_{WP}^k , 初始电价 λ_{WP}^k ; 设定步长 β_5 , 给定终止误差 ε_5 和 $\lambda_{WP,t}^k$ 初始值, $k \in \mathcal{K}$, 令 $t = 0$ 。

b. 通过智能电表接受用户购电信息 $s_{i,WP,t}^{k*}$ 。

c. 求解式 (23), 得到解 $L_{WP,t}^{k*}$, $k \in \mathcal{K}$ 。

d. 利用式 (29) 更新电价, 更新后的电价记为 $\lambda_{WP,t+1}^k$, $k \in \mathcal{K}$ 。

e. 公布更新后的实时电价 $\lambda_{WP,t+1}^k$ 给用户。

f. 若 $\left| \mu_{i,t+1}^{k,1} - \mu_{i,t}^{k,1} \right| \leq \varepsilon_1$, $\left| \mu_{i,t+1}^{k,2} - \mu_{i,t}^{k,2} \right| \leq \varepsilon_2$, $\left| v_{i,t+1}^k - v_{i,t}^k \right| \leq \varepsilon_3$, $\left| \lambda_{T,t+1}^k - \lambda_{T,t}^k \right| \leq \varepsilon_4$, $\left| \lambda_{WP,t+1}^k - \lambda_{WP,t}^k \right| \leq \varepsilon_5$ 同时成立, 算法结束, 最优解 $L_{WP}^{k*} = L_{WP,t}^{k*}$; 否则, $t = t + 1$, 转步骤 b。

4 数值仿真

4.1 参数设置

考虑一个需求侧有 30 个电力用户 (其中包括 27 个居民用户和 3 个非居民用户)、供给侧包含传统能源和可再生能源发电的智能电力系统, 用电周期为一天, 分为 24 个调度时段。不同类型用户在同一时段的用电偏好以及同一类型用户在不同

时段的用电偏好 ω_i^k 的值均有一定差异, 具体设置见表 1。非居民用户以及部分居民用户配备电力存储设施, 电力存储容量设置见表 2, 运维成本系数 δ_i^k 取为 0.1, 折旧成本系数 ψ_i^k 为 0.15。传统能源供电商供电成本系数 $a_1 = 0.01$, $b_1 = c_1 = 0$ 。碳交易价格 p_{CO_2} 取为 0.267 元/(kW·h), 传统能源供电商和可再生能源供电商的碳排放配额分别为 0.798 kg/(kW·h) 和 0.075 kg/(kW·h), 传统能源发电的实际碳排放参数 $a_2 = 0.0034$, $b_2 = 0.38$, $c_2 = 36$ 。可再生能源发电成本系数 $p_i = \frac{2i-1}{6}$, ($i = 1, 2, \dots, 10$), 分点 $l_j = 20j$, ($j = 1, 2, \dots, 10$)。设置步长 $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = 0.01$, 停止准则 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = \varepsilon_5 = 0.001$ 。

表 1 不同时段下用户的用电弹性系数

Tab.1 Values of users' preference in different time slots

时段	居民用户	非居民用户
10:00—14:00, 19:00—22:00(高峰)	[4,6]	[7,9]
8:00—11:00, 15:00—19:00(平峰)	[2,5]	[6,8]
23:00—7:00(低谷)	[1,3]	[4,5]

表 2 电力存储设施参数

Tab.2 Parameters of power storage facility

参数	居民用户	非居民用户
初始时刻剩余容量 C_i^0 /(kW·h)	[0.5,1.5]	[5,10]
最大存储容量 $C_i^{\max}$ /(kW·h)	5	30
最大充放电功率/kW	2	10

4.2 结果分析

图 1 给出了分布式对偶算法下各时段最优实时电价, 包含传统能源电价和可再生能源电价。图 2 为实时电价下的供需匹配情况, 当各时段总供电量等于总用电量时, 实时电价取得最优值。即所提实时定价机制使得电网达到了供需平衡的状态, 保证了电网的稳定性。

用电量的峰均比指的是在一个用电周期内, 用电量的最大值与平均值之比, 可以反映用电波动情况和实时定价机制的削峰填谷效果。峰均比越小, 用电波动越小, 削峰填谷效果越好。图 3 给出了实时电价下未考虑电力存储设备时的总供电量和总用电量关系, 其峰均比为 1.3229, 而考虑电力存储设备时的峰均比为 1.2980。图 4 比较了有无电力存储设备时的总用户福利, 可以看出, 在每个时段, 配备电力存储设备时的总用户福利均高于未配备电力存储设备时的情形。这是

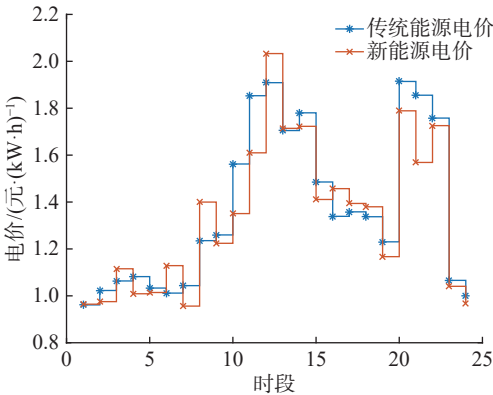


图 1 最优实时电价

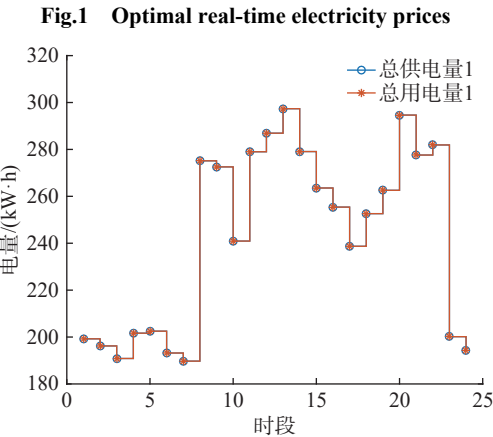


图 2 实时电价下各时段的供-用电量

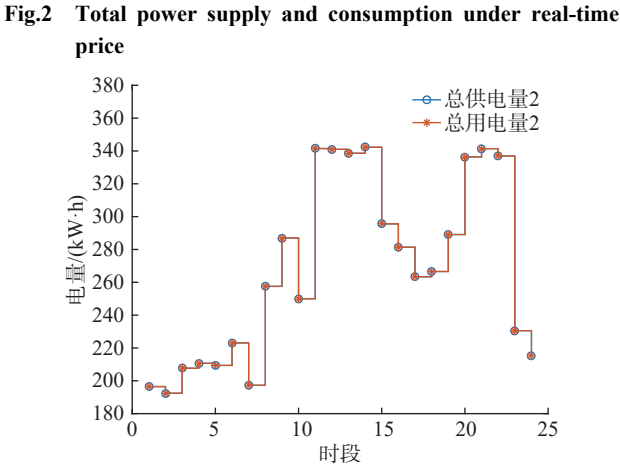


图 3 实时电价下未考虑电力存储设备时的供-用电量

Fig.3 Total power supply and consumption without considering power storage devices

因为电力存储设备具有调节作用，用户在电力价格较低的时段存储适当的电量，在用电高峰并且电力价格较高的时段优先消耗自身存储的电量，从而减少从外界购电，降低用电成本的同时能够起到削峰填谷、平抑负荷波动的作用。

图 5 为分时电价下的供求关系，各时段的供电量均大于总用电量，虽然满足了用户的用电需

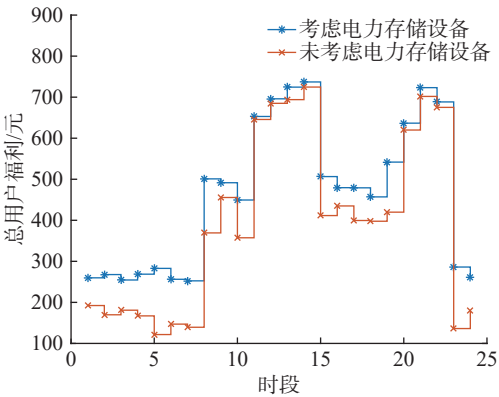


图 4 有无电力存储设备时的总用户福利

Fig.4 Total user welfare with or without power storage devices

求，但是也造成了能源浪费问题，同时供需不平衡不利于电网的稳定性。经计算，实时电价下的峰均比为 1.2980，分时电价下的峰均比为 1.3425，因此所提实时定价机制可以有效地削峰填谷。从社会福利的角度出发比较实时定价和分时定价，如图 6 所示。实时电价下的社会福利在每个时段

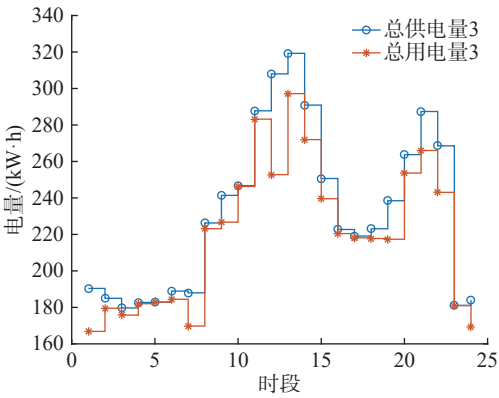


图 5 分时电价下各时段的供-用电量

Fig.5 Total power supply and consumption under fixed time-dependent pricing

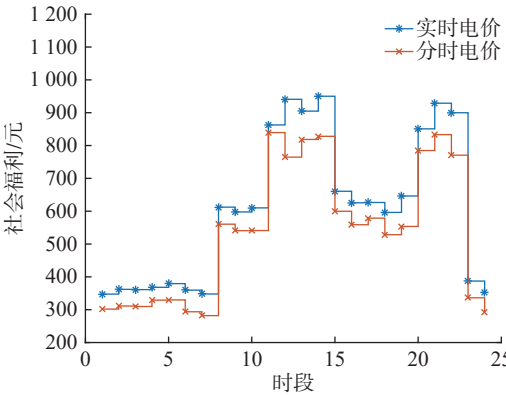


图 6 实时电价和分时电价的社会福利对比

Fig.6 Social welfare under real-time pricing and fixed time-dependent pricing

均大于分时电价,说明实时定价机制能够综合供需双方的利益,提高社会福利。

5 结 论

在现有对不同能源发电差别定价的研究中,都是通过建立双层优化模型来制定实时电价策略。本文兼顾供需双方的利益,考虑用户配备电力存储设施,供电侧同时包含传统能源发电和可再生能源发电,建立了计及充放电成本和碳交易成本的社会福利最大化模型。求解过程中,将原问题转化为光滑的凸规划,根据拉格朗日对偶理论设计分布式算法得到最优实时电价以及最优供电和用电策略。数值仿真结果表明,所提实时定价机制可以激励用户合理高效用电,实现削峰填谷、提高社会福利的目的。

参考文献:

- [1] CHIU T C, SHIH Y Y, PANG A C, et al. Optimized day-ahead pricing with renewable energy demand-side management for smart grids[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2017, 4(2): 374–383.
- [2] 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.
- [3] ZHANG L, GAO Y, ZHU H B, et al. Bi-level stochastic real-time pricing model in multi-energy generation system: A reinforcement learning approach[J]. *Energy*, 2022, 239: 121926.
- [4] DAI Y M, SUN X L, QI Y, et al. A real-time, personalized consumption-based pricing scheme for the consumptions of traditional and renewable energies[J]. *Renewable Energy*, 2021, 180: 452–466.
- [5] QU D Q, LI J X, YONG M. Real-time pricing for smart grid considering energy complementarity of a microgrid interacting with the large grid[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, 141: 108217.
- [6] 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.
- [7] KOK A G, SHANG K, YÜCEL S. Impact of electricity pricing policies on renewable energy investments and carbon emissions[J]. *Management Science*, 2018, 64(1): 131–148.
- [8] 吴志强,王菁祺,高岩.实时电价的社会福利解析[J].*中国管理科学*, 2024, 32(3): 218–227.
- [9] 张莉,高岩,朱红波,等.考虑用电量不确定性的智能电网实时定价策略[J].*电网技术*, 2019, 43(10): 3622–3631.
- [10] 罗艺灵,高岩.智能电网连续型社会福利最大化实时定价方法[J].*智慧电力*, 2022, 50(11): 62–68.
- [11] 张莉,高岩,刘松涛,等.具有时间耦合约束的多时段智能电网实时电价[J].*系统工程理论与实践*, 2019, 39(10): 2599–2609.
- [12] LI Y Y, LI J X, HE J J, et al. The real-time pricing optimization model of smart grid based on the utility function of the logistic function[J]. *Energy*, 2021, 224: 120172.
- [13] 李军祥,张同辉,屈德强,等.基于区块链隐私保护的智能电网实时定价[J].*上海理工大学学报*, 2022, 44(2): 122–130.
- [14] SHARIFI A H, MAGHOULI P. Energy management of smart homes equipped with energy storage systems considering the PAR index based on real-time pricing[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 45: 579–587.
- [15] 周继儒,李军祥,何建佳,等.基于区块链的微网与大电网合作博弈研究[J].*系统工程理论与实践*, 2021, 41(8): 2090–2100.
- [16] 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.
- [17] 许志宏,高岩,程潘红.马尔科夫决策过程下含可再生能源的实时电价策略[J].*上海理工大学学报*, 2020, 42(5): 467–478.
- [18] SAMADI P, MOHSENIAN-RAD A H, SCHÖBER R, et al. Optimal real-time pricing algorithm based on utility maximization for smart grid[C]//2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications. Gaithersburg: IEEE, 2010: 415–420.
- [19] XU Z H, GUO L Y, GAO Y, et al. Real-time pricing of smart grid based on piece-wise linear functions[J]. *Journal of Systems Science and Information*, 2019, 7(4): 295–316.
- [20] 陈志,胡志坚,翁菡宏,等.基于阶梯碳交易机制的园区综合能源系统多阶段规划[J].*电力自动化设备*, 2021, 41(9): 148–155.
- [21] 陈锦鹏,胡志坚,陈嘉滨,等.考虑阶梯式碳交易与供需灵活双响应的综合能源系统优化调度[J].*高电压技术*, 2021, 47(9): 3094–3104.
- [22] 魏震波,张海涛,魏平桢,等.考虑动态激励型需求响应的微电网两阶段优化调度[J].*电力系统保护与控制*, 2021, 49(19): 1–10.
- [23] WU H, ZHANG P, LIN G H. Smoothing approximations for some piecewise smooth functions[J]. *Journal of the Operations Research Society of China*, 2015, 3(3): 317–329.
- [24] 王宜举,修乃华.非线性最优化理论与方法[M].2版.北京:科学出版社,2016.