

文章编号: 2095-2163(2021)09-0085-09

中图分类号: F407.61; TM734

文献标志码: A

基于 ADMM-GBS 的智能电网多供电商多用户实时定价策略

杨楚越

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 多供电商是智能电网未来发展趋势之一。考虑为有多供电商多用户的智能电网系统构建社会福利最大化模型, 在用户配备蓄电池和可再生能源发电装置条件下, 为用户的分类电器, 设置影响启停状态的心理电价, 同时增加每日总电费约束, 对实时定价策略进行了研究, 提出了一种基于 ADMM-GBS 的分布式实时定价算法。将原问题进行两次解耦, 通过求解底层子问题, 进而实现外层目标函数的优化。系统仿真结果, 验证了所构建模型合理性, 并证实了所提实时定价算法在多供电商多用户情形下的可行性与有效性。

关键词: 智能电网; 实时电价; 多供应商; ADMM-GBS 算法; 蓄电池; 可再生能源

Real-time pricing strategy in multi-supplier and multi-user smart grid based on ADMM-GBS

YANG Chuyue

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

[Abstract] Multi-supplier system is one of the future trends of smart power grid. A social welfare maximization model is constructed for a smart grid system with multiple power suppliers and multiple users. Under the condition that users are equipped with energy storage and renewable energy sources generation devices, we set the psychological price for the users' different kinds of electrical appliances which affects the start-up and stop status, and increase the daily total electricity cost constraint to study the real-time pricing strategy. A distributed real-time pricing algorithm based on ADMM-GBS is proposed, which decouples the original problem twice and optimizes the outer objective function by solving the bottom subproblems. System simulation results verify the rationality of the model, and prove the feasibility and effectiveness of the proposed real-time pricing algorithm in the case of multi-supplier and multi-user.

[Key words] smart grid; real-time pricing; multi-supplier; ADMM-GBS algorithm; energy storage; renewable energy sources

0 引言

随着日益增长的用电需求、设备老化、不可再生能源的浪费与减少等一系列亟待解决的问题, 都在迫切推动着传统电网改进^[1]。智能电网采用自动化信息与通信技术, 有效提高电力生产和传输效率, 较传统电网更高效、更可靠、更经济、更具可持续性^[2-3]。需求响应是智能电网的主要管理手段之一, 有助于电力市场供需平衡, 为需求侧提供低成本、高质量、个性化的服务^[4-5]。实时电价是一种根据实际供需情况, 连续反映电力边际值的定价机制, 理论上是最合理的定价机制。在需求侧安装智能电表, 能够代表用户参与到电力市场竞争中, 在各定价时段给出及时的反馈信息^[6]。

基于需求响应的用电优化策略研究, 按研究对象可分为用户侧和供电商侧两类; 按照研究目的又可分为以社会福利最大化、社会福利均衡、用户或供电商成本最小化等多种目标。

文献[7]针对社会福利最大化模型, 研究了模型中最小发电量的作用, 得到了去掉最小发电量约束的等价模型。文献[8]在将用户分为家庭、工业、和商业 3 类的基础上, 使用多类效用函数, 模拟不同用户的用电偏好, 打破了以往仅考虑单一效用函数的局限。文献[9]以最小化电网峰谷差为目标, 考虑在线电量波动, 利用同步扰动随机逼近算法, 求解实时定价问题。文献[10]用马尔可夫决策过程表示电器与可再生能源的发电量, 引入权重因子作未知变量, 平滑用户用电效用与支付成本, 构建了用户福利最大化模型。文献[11]考虑用户新能源发电的不确定性, 同时定义用户用电量在相邻时段的联系, 以社会福利最大化模型为目标, 进行实时定价问题的求解。

文献[12]基于传统单供电商多用户情形下拉格朗日对偶及分布算法, 考虑多供应商多用户系统中用户侧的电器分类具有时间耦合性, 将原问题分解为单一时段单一供电商情况下的多个子问题。在

作者简介: 杨楚越(1994-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 智能电网实时定价。

收稿日期: 2021-07-21

此基础上,文献[13]将用户家用电器细分为3类,建立多供电商多用户的社会福利最大化模型,但事实上该模型并未实现不同供电商不同电价,不属于严格意义上多供电商问题。

交替方向乘子法(alternating direction method of multipliers, ADMM)^[14]综合了乘子法的良好收敛性与对偶上升法的可分解性,在解决分布式凸优化问题上简单有效。算法在智能电网中的研究与应用多集中于解决电网优化调度问题。

现有文献中,鲜有将ADMM算法应用于解决多供电商的电网调度及定价等问题中,对于电力系统,也未考虑用户侧在每日用电中的心理电价限制与每日总电费限制。为此,本文考虑电网系统的多供电商情况,将ADMM-GBS算法应用于实时定价中。模型考虑将家用电器分为必运行电器、弹性电器以及半弹性电器3类,并对电器添加根据用户心理电价变化的启停变量;同时考虑用户的每日总电费限制;在用户配备蓄电池与可再生能源装置发电的情况下,构建以全天多时段的社会福利最大化为目标的模型。通过对原问题的3层分解,将原问题分解为各用户与各供电商各自需求解的子问题。在单个时隙,用户与供电商之间仅需传递电价、用户侧总购电需求信息;在求得各时隙最优供电商发电量、电价、用户用电策略的同时,有效地保证了供需两侧的信息安全性、隐私性,达到了降低电网负载、平滑负载曲线、削峰填谷的目的。

1 系统模型

1.1 用户电器分类

将用户家用电器依据使用时间与电价敏感性分为必运行电器、弹性电器与半弹性电器。

必运行电器为日常生活必须的设备。这种电器必须在某一时间使用,开始使用时间与使用总时长不受电价影响。用户*i*的所有必运行电器 $a \in A_{i,1}$ 在时隙*t*所需的电量固定不变。令 $x'_{i,a}$ 为用户*i*在时隙*t*时某一电器用电量, E'_{i,A_1} 为其所有必运行电器在时隙*t*的总用电量,则有:

$$\sum_{a \in A_{i,1}} x'_{i,a} = E'_{i,A_1}, \quad \forall i \in N, \forall t \in T$$

弹性电器为用户提高生活品质的电器。这类电器的启停时间受电价影响最大,没有固定的启动时间和使用时长。当电价低于用户心理价位,且在用户考虑使用的时间段内,用户才会使用;启动后可能随时被关停,因此耗电量不固定。为保证生活品质,

用户一天使用弹性电器必须满足最低需求。若电器 $a \in A_{i,2}$ 属于弹性电器, p'_j 为供电商*j*在时隙*t*的电价, $t \in T_{A_2}$, T_{A_2} 为弹性电器期望使用时间段; PE_i 为用户*i*的心理价位; E_{i,A_2}^{\max} 、 E_{i,A_2}^{\min} 分别为用户*i*的弹性电器在一个时隙内的耗电量上下限; y'_{i,A_2} 为用户*i*的弹性电器在时隙*t*的启停状态变量(1为启动,0为停止); E_{i,A_2} 为用户*i*的弹性电器的一天耗电量最低需求。令 $x'_{i,a}$ 为用户*i*在时隙*t*时某一电器用电量,则用户*i*的弹性电器 $a \in A_{i,2}$ 有如下约束:

$$y'_{i,A_2} E_{i,A_2}^{\min} \leq x'_{i,a} \leq y'_{i,A_2} E_{i,A_2}^{\max} \quad \forall i \in N, \forall t \in T, \forall a \in A_{i,2} \quad (1)$$

$$y'_{i,A_2} = \begin{cases} 1, & \exists j \in M, p'_j \leq PE_i, t \in T_{A_2} \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{a \in A_{i,2}} x'_{i,a} \geq E_{i,A_2}, \quad \forall i \in N \quad (2)$$

半弹性电器为功能辅助型电器,这类电器的启停时间如弹性电器,受电价影响,使用时长固定且连续。即半弹性电器一旦开启,耗电量固定不变,并且用户的半弹性电器一天的耗电量不会超过一个上限。若电器 $a \in A_{i,3}$ 属于弹性电器, p'_j 为供电商*j*在时隙*t*的电价; $\{t, \dots, t + t_{a3}\} \in T_{A_3}$, t_{a3} 为该电器的持续使用时间; T_{A_3} 为该电器期望使用时间段; PE_i 为用户*i*的心理价位。 y'_{i,A_3} 为用户*i*的该电器在时隙*t*的启停状态量(1为启动,0为停止); e_{i,A_3} 为用户*i*的该电器在启动状态时一个时隙内耗电量, E_{i,A_3}^{\max} 为该用户所有半弹性电器一天总耗电量上限; $x'_{i,a}$ 为用户*i*在时隙*t*时电器用电量,则对于用户*i*的半弹性电器 $a \in A_{i,3}$ 有如下约束:

$$x'_{i,a} = y'_{i,A_3} e_{i,A_3}, \quad \forall i \in N, \forall t \in T \quad (3)$$

$$y'_{i,A_3} = \begin{cases} 1, & \exists j \in M, p'_j \leq PE_i, \{t, \dots, t + t_{a3}\} \in T_{A_3} \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{a \in A_{i,3}} y'_{i,A_3} e_{i,A_3} \leq E_{i,A_3}^{\max}, \quad \forall i \in N \quad (4)$$

1.2 用户蓄电池与可再生能源发电

用户配备家用蓄电池,供自行进行电力存储。若 S'_i 为用户*i*在时隙*t*结束时电池电量, S_i^0 表示电池初始电量; $s'_{ic} \geq 0$ 、 $s'_{id} \geq 0$ 分别表示电池在时隙*t*的充电量和放电电量,分别满足最大充电量 s_{ic}^{\max} 和最大放电量 s_{id}^{\max} 约束; $\zeta_{i,c}$ 和 $\zeta_{i,d}$ 是电池充放电效率,电池最大容量限制 S_i^{\max} 。用户蓄电池状态单一,即同一时段只能选择充电或放电,不能充放电同时进行。设置变量 $y'_{i,ch}$ 与 $y'_{i,de}$,对电池充放电状态进行约束。对于用户*i*,其蓄电池满足以下约束:

$$S_i^t = S_i^0 + \sum_{h=1}^t (y_{i,ch}^h \zeta_{i,c}^h s_{ic}^h - y_{i,de}^h \zeta_{i,d}^h s_{id}^h), \forall i \in N, \forall t \in T \quad (5)$$

$$0 \leq S_i^t \leq S_i^{\max}, \quad \forall i \in N, \forall t \in T \quad (6)$$

$$0 \leq s_{ic}^t \leq s_{ic}^{\max}, \quad \forall i \in N, \forall t \in T$$

$$0 \leq s_{id}^t \leq s_{id}^{\max}, \quad \forall i \in N, \forall t \in T$$

其中, $y_{i,ch}^t + y_{i,de}^t \leq 1, y_{i,ch}^t, y_{i,de}^t \in \{0,1\}$ 。

式(1)与式(2)合并可得:

$$-S_i^0 \leq \sum_{h=1}^t (y_{i,ch}^h \zeta_{i,c}^h s_{ic}^h - y_{i,de}^h \zeta_{i,d}^h s_{id}^h) \leq S_i^{\max} - S_i^0, \quad \forall i \in N, \forall t \in T \quad (7)$$

用户配备可再生能源发电设备,仅为自身供电使用,不具备存储功能,发电不并入电网。假设:该设备发电成本与维护费用忽略不计,一天的发电量不足以覆盖用户一天所需电量;用户优先使用可再生能源发电电量;发电不并入电网,即各用户可再生能源发电量相互独立。各时段发电量与能源种类、气候等因素有关且具有随机性,考虑采用正态分布来描述可再生能源发电量。 φ_i^t 为用户 i 在时隙 t 的可再生能源发电量,服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$, μ 和 σ^2 为设备实际参数,且均为正数。

1.3 用户每日预期电费

用户对每天的总购电费用,具有心理预期范围,希望该费用不超过一个最大值。设: x_{ij}^t 为时隙 t 时,用户 i 在供电商 j 处的购电量; p_j^t 为供电商 j 在时隙 t 的电价; B_i 为用户 i 日预期电费的上限值。

$$\sum_{t \in T} \sum_{j \in M} x_{ij}^t p_j^t \leq B_i, \quad \forall i \in N \quad (8)$$

用户 i 在时隙 t 需从各供电商处购买的总电量与自身用电需求之间的关系如式(9):

$$\sum_{j \in M} x_{ij}^t = E_{i,A1}^t + \sum_{a \in A_{i,2}} x_{i,a}^t + \sum_{a \in A_{i,3}} y_{i,A3}^t e_{i,A3} + y_{i,ch}^t s_{ic}^t - y_{i,de}^t s_{id}^t - \varphi_i^t \quad \forall i \in N, \forall t \in T \quad (9)$$

1.4 简化约束条件

约束条件(1)、(2)、(9)可合并。同时注意到约束(9)中含有随机变量 $\varphi_i^t, \varphi_i^t \sim N(\mu, \sigma^2)$, 引入概率约束,简化上述约束条件。以约束(1)右侧不等式为例,令 $X_{ij}^t = \sum_{j \in M} x_{ij}^t - E_{i,A1}^t - \sum_{a \in A_{i,3}} y_{i,A3}^t e_{i,A3} - y_{i,ch}^t s_{ic}^t + y_{i,de}^t s_{id}^t$, 原不等式可转化为:

$$P(X_{ij}^t + \varphi_i^t - \sum_{a \in A_{i,2}} y_{i,A2}^t E_{i,A2}^{\max} \geq \eta) \leq \varepsilon, \quad \forall i \in N,$$

$\forall t \in T$

其中, η 与 ε 为极小的正数,表明用户 i 在时隙 t 时,弹性电器的用电量大于上限的概率极小。带入

切比雪夫不等式推导可得:

$$\sum_{j \in M} x_{ij}^t - y_{i,ch}^t s_{ic}^t + y_{i,de}^t s_{id}^t \leq Y_i^{\max}, \quad \forall i \in N, \forall t \in T$$

$$\text{其中, } Y_i^{\max} = \sum_{a \in A_{i,2}} y_{i,A2}^t E_{i,A2}^{\max} + E_{i,A1}^t + \sum_{a \in A_{i,3}} y_{i,A3}^t e_{i,A3} +$$

$\eta - \mu - \frac{\sigma}{\sqrt{2\varepsilon}}$ 。同理,约束(1)、(2)和(9)可以合并

简化表示为:

$$E_{i,A2} - \sum_{t \in T} X_{ij}^t - \eta - T\mu + \sqrt{\frac{T}{2\varepsilon}}\sigma \leq 0, \quad \forall i \in N \quad (10)$$

$$Y_i^{\min} \leq \sum_{j \in M} x_{ij}^t - y_{i,ch}^t s_{ic}^t + y_{i,de}^t s_{id}^t \leq Y_i^{\max}, \quad \forall i \in N,$$

$\forall t \in T \quad (11)$

其中:

$$X_{ij}^t = \sum_{j \in M} x_{ij}^t - E_{i,A1}^t - \sum_{a \in A_{i,3}} y_{i,A3}^t e_{i,A3} - y_{i,ch}^t s_{ic}^t + y_{i,de}^t s_{id}^t$$

$$Y_i^{\max} = \sum_{a \in A_{i,2}} y_{i,A2}^t E_{i,A2}^{\max} + E_{i,A1}^t + \sum_{a \in A_{i,3}} y_{i,A3}^t e_{i,A3} +$$

$$\eta - \mu - \frac{\sigma}{\sqrt{2\varepsilon}}$$

$$Y_i^{\min} = \sum_{a \in A_{i,2}} y_{i,A2}^t E_{i,A2}^{\min} + E_{i,A1}^t + \sum_{a \in A_{i,3}} y_{i,A3}^t e_{i,A3} -$$

$$\eta - \mu - \frac{\sigma}{\sqrt{1-2\varepsilon}}$$

2 社会福利最大化模型

采用二次效用函数来描述用户用电满意度与用电量的关系。

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

用户效用函数 $U(x, \omega)$ 是非减函数,且边际效用时非增函数。其中, x 表示用户的用电量水平,参数 ω 表示用户不同时刻的用电偏好。

对于供电商, $C(L)$ 为其成本函数,其中 L 是供电商的供电量。 $C(L)$ 成本函数是增函数且为严格凸函数。不考虑供电商发电有功平衡、爬坡速率、运营成本等约束,供电商成本函数用二次函数表示为:

$$C(L) = aL^2 + bL + c$$

其中, $a > 0, b, c \geq 0$ 为预设参数。

考虑多供电商环境,对供电商存在统一调度管理,其供电商之间不存在竞争关系。将一天多时段的社会总福利值表示为用户总效用与供电商总成本的差值,以最大化社会福利值为目标函数:

$$\max \sum_{t \in T} \left[\sum_{i \in N} U_i(x_i^t) - \sum_{j \in M} C_j^t(l_j^t) \right]$$

其中, $U_i^t(x_i^t) = \sum_{j \in M} U_i^t(x_{ij}^t)$, 即时隙 t 时用户 i 在各供电商处购电效用总和。 $U_i^t(x_{ij}^t)$ 和 $C_j^t(l_j^t)$ 符合效用函数与成本函数设置。 l_j^t 为供电商 j 在时隙 t 的发电量。对于供电商 j , 在时隙 t 的发电量必须满足所有用户在该供电商处的购电需求, 因此有如下供需平衡约束:

$$\sum_{i \in N} x_{ij}^t \leq l_j^t, \forall j \in M, \forall t \in T \quad (12)$$

$$0 \leq l_j^t \leq l_{j,\max}^t, \forall j \in M, \forall t \in T$$

社会福利最大化模型可表示为:

$$\max \sum_{i \in N} \left[\sum_{t \in T} U_i^t(x_i^t) - \sum_{j \in M} C_j^t(l_j^t) \right] \quad (13)$$

s.t. (7) (8) (10) (11) (12)

其中, 约束(7)描述了用户蓄电池从初始状态至时隙 t 的总充放电电量与电池容量、初始电量的关系; 约束(8)描述了用户的每日总电费不超过一个上限; 约束(10)和(11)确保用户每天购买电量, 能够满足家用电器、蓄电池的最低需求, 并限制了用户各时隙总购电、充放电范围; 约束(12)为用户购电量与供电商发电量供需平衡约束, 是该优化问题的主要约束。约束(7)、(8)、(10)均为关于时间耦合的约束, 体现了变量随时间累计的特点。

对于上述优化问题, 其目标函数(13)为连续可微的严格凹函数。根据约束条件, 其可行域为非空闭凸集, 该优化问题为严格凸规划问题, 存在唯一全局最优解。

3 分布式实时定价算法

3.1 松弛时间耦合

对于约束(7)、(8)、(10), 引入拉格朗日乘子 $\gamma_{1i} > 0$, $\gamma_{2i} > 0$ 和 $\gamma_{3i}^t > 0$, $\gamma_{4i}^t > 0$ 进行松弛。又

$$\sum_{t \in T} \gamma_{3i}^t \left(\sum_{l=1}^t \Delta^h \right) = \sum_{t \in T} \left(\Delta^t \sum_{l=1}^t \gamma_{3i}^l \right), \text{原优化问题(13)}$$

转化为:

$$\max \sum_{i \in N} \left[\sum_{t \in T} \tilde{U}_i^t(x_i^t) - \sum_{j \in M} C_j^t(l_j^t) \right] + \sum_{i \in N} \gamma_{1i} B_i - \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} \gamma_{2i} (E_{i,A1}^t + \sum_{a \in A_{i,3}} \gamma_{i,A3}^t e_{i,A3}) - \sum_{i \in N} \gamma_{2i} (E_{i,A2} -$$

$$\eta - T\mu + \sqrt{\frac{T}{2\mathcal{E}}} \sigma) +$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{t \in T} \gamma_{3i}^t S_i^0 + \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} \gamma_{4i}^t (S_i^{\max} - S_i^0) \quad (14)$$

s.t. (11), (12)

$$\text{其中, } \tilde{U}_i^t(x_i^t) = U_i^t(x_i^t) - \sum_{j \in M} \gamma_{1i} x_{ij}^t p_j^t + \sum_{j \in M} \gamma_{2i} x_{ij}^t$$

$$- \gamma_{2i} (y_{i, ch}^t s_{ic}^t - y_{i, de}^t s_{id}^t) + \Delta^t \sum_{l=1}^t (\gamma_{3i}^l - \gamma_{4i}^l), \Delta^h = y_{i, ch}^h - \gamma_{i, c}^h s_{ic}^h - y_{i, de}^h \zeta_{i, d}^h s_{id}^h$$

拉格朗日乘子按如下迭代式进行更新:

$$\gamma_{1i}^{k+1} = [\gamma_{1i}^k + \eta_1 \left(\sum_{t \in T} \sum_{j \in M} x_{ij}^t p_j^t - B_i \right)]^+ \quad (15)$$

$$\gamma_{2i}^{k+1} = \frac{\partial \tilde{U}_i^t(x_i^t)}{\partial E_{i,A1}^t} + \eta_2 \frac{\partial E_{i,A2}^t}{\partial E_{i,A1}^t} - \sum_{t \in T} X_{ij}^t - \eta - T\mu + \sqrt{\frac{T}{2\mathcal{E}}} \sigma \quad (16)$$

$$\gamma_{3i}^{t,k+1} = [\gamma_{3i}^{t,k} - \eta_3 (S_i^0 + \sum_{l=1}^t \Delta^h)]^+ \quad (17)$$

$$\gamma_{4i}^{t,k+1} = [\gamma_{4i}^{t,k} + \eta_4 \left(\sum_{l=1}^t \Delta^h - S_i^{\max} + S_i^0 \right)]^+ \quad (18)$$

其中, $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4 > 0$ 为迭代步长。在优化问题(14)中, $B_i, E_{i,A1}^t, e_{i,A3}, E_{i,A2}, \mu, \sigma$ 均为预设常量。

给定乘子 $\gamma_{1i}, \gamma_{2i}, \gamma_{3i}^t, \gamma_{4i}^t$, 优化问题(14)可相应转化为各时隙 t 上的子问题:

$$\max \sum_{i \in N} \tilde{U}_i^t(x_i^t) - \sum_{j \in M} C_j^t(l_j^t) \quad (19)$$

s.t. (11), (12)

是一个单时隙上的多用户多供应商问题。

3.2 松弛供电商耦合

优化问题(19)中, 约束条件(11)是关于供电商的耦合。引入拉格朗日乘子 $\gamma_{5i}^t, \gamma_{6i}^t > 0$ 对约束(11)进行松弛, 问题(19)可转化为:

$$\max \sum_{i \in N} \tilde{U}_i^t(x_i^t) - \sum_{j \in M} C_j^t(l_j^t) - \sum_{i \in N} \gamma_{5i}^t \left(\sum_{j \in M} x_{ij}^t - y_{i, ch}^t s_{ic}^t + y_{i, de}^t s_{id}^t - Y_i^{\max} \right) - \sum_{i \in N} \gamma_{6i}^t \left(Y_i^{\min} - \sum_{j \in M} x_{ij}^t + y_{i, ch}^t s_{ic}^t - y_{i, de}^t s_{id}^t \right)$$

$$= \sum_{j \in M} Q_j(\gamma_{1i}, \gamma_{2i}) + \sum_{i \in N} K_i(\gamma_{2i}, \gamma_{3i}^t, \gamma_{4i}^t) + \sum_{i \in N} \gamma_{5i}^t$$

$$Y_i^{\max} - \sum_{i \in N} \gamma_{6i}^t Y_i^{\min}$$

s.t. (12)

其中:

$$Q_j(\gamma_{1i}, \gamma_{2i}, \gamma_{5i}^t, \gamma_{6i}^t) = \max_{x_{ij}^t} \left[U_i^t(x_{ij}^t) + (\gamma_{2i} - \gamma_{1i} p_j^t - \gamma_{5i}^t + \gamma_{6i}^t) x_{ij}^t \right] - C_j^t(l_j^t) \quad (20)$$

$$K_i(\gamma_{2i}, \gamma_{3i}^t, \gamma_{4i}^t, \gamma_{5i}^t, \gamma_{6i}^t) = \max_{\Delta^h} \Delta^t \sum_{l=1}^t (\gamma_{3i}^l - \gamma_{4i}^l) + (\gamma_{5i}^t - \gamma_{6i}^t - \gamma_{2i}) (y_{i, ch}^t s_{ic}^t - y_{i, de}^t s_{id}^t) \quad (21)$$

拉格朗日乘子按如下迭代式进行更新:

$$\gamma_{5i}^{t,k+1} = [\gamma_{5i}^{t,k} + \eta_5 \left(\sum_{j \in M} x_{ij}^t - y_{i, ch}^t s_{ic}^t + y_{i, de}^t s_{id}^t - Y_i^{\max} \right)]^+ \quad (22)$$

$$q_i^t = \lambda_j^{t,k} - \rho \left(l_j^{t,k} - \sum_{h=1}^{t-1} \tilde{x}_{hj}^{t,k} - \sum_{h=i}^N x_{hj}^{t,k} \right) \quad (30)$$

$$q_{N+1}^t = \lambda_j^{t,k} - \rho \left(l_j^{t,k} - \sum_{h=1}^N \tilde{x}_{hj}^{t,k} \right) \quad (31)$$

3.3.2 修正

按下式对预测过程的输出结果 $\tilde{\theta}_j^{t,k}$ 进行修正, 并产生新迭代 $\theta_j^{t,k+1}$:

$$H^{-1} M^T (\theta_j^{t,k+1} - \theta_j^{t,k}) = \vartheta (\tilde{\theta}_j^{t,k} - \theta_j^{t,k}) \quad (32)$$

ϑ 为步长。给定乘子 $\gamma_{2i}^t, \gamma_{3i}^t, \gamma_{4i}^t, \gamma_{5i}^t, \gamma_{6i}^t$, 用户充放电电量由子问题(21)可得:

$$s_{ic}^t, s_{id}^t = \underset{j}{\operatorname{argmax}} \sum_{x_{ij}^t - Y_{i,\max}^{\max} \leq s_{ic}^t \leq x_{ij}^t - Y_{i,\min}^{\min}} \Delta^t \sum_t (\gamma_{3i}^h - \gamma_{4i}^h) + Y_{i,\min}^{\min} - \sum_j x_{ij}^t \leq s_{id}^t \leq Y_{i,\max}^{\max} - \sum_j x_{ij}^t$$

$$(\gamma_{5i}^t - \gamma_{6i}^t - \gamma_{2i}^t) (y_{i, ch}^t s_{ic}^t - y_{i, de}^t s_{id}^t) \quad (33)$$

当每个用户与供电商的子问题找到其各局部最优解, 乘子 $\gamma_{1i}, \gamma_{2i}, \gamma_{3i}, \gamma_{4i}, \gamma_{5i}, \gamma_{6i}$ 分别按照(15)~(18)、(22)、(23)进行更新。

通过对问题(20)的求解, 得到用户侧与供电商侧各自单次迭代最优解, 进而对用户侧其它变量及乘子进行更新。若用户在供电商 j 处总购电需求 $\sum_{i \in N} x_{ij}^t$, 超过供电商发电量 l_j^t , 根据(29), 该供电商将会提高电价 λ_j^t , 进而使所有用户相应减少从供电商 j 处购买电量; 同时供电商 j 将增加发电量。直到供需逐渐达到平衡。反之亦然。

参数 γ_{5i}^t 和 γ_{6i}^t 协调用户 i 在各供应商处的购电量。除可再生能源发电与蓄电池存电, 若用户 i 总购电量 $\sum_{j \in M} x_{ij}^t$ 依然无法覆盖自身各类电器使用所需最低电量, 根据(22)、(23)协调参数 γ_{5i}^t 将减小、 γ_{6i}^t 将增大, 促使用户增加从各供电商处的购电需求 x_{ij}^t ; 根据(33), 用户将有可能选择使用蓄电池存电量, 应对自身用电需求。

参数 $\gamma_{1i}, \gamma_{2i}, \gamma_{3i}, \gamma_{4i}^t$ 协调用户在不同时隙间的消耗电量。由于实时电价机制特殊性, 在时隙 t , 用户无法获得自己在 $t+1, \dots, T$ 时隙的实际耗电量, 以及供电商在 $t+1, \dots, T$ 时隙具体电价。因此参数 γ_{1i}, γ_{2i} 的迭代更新考虑用下式代替:

$$\gamma_{1i}^{k+1} = [\gamma_{1i}^k + \eta_1 \left(\sum_{h=1}^{t-1} \sum_{j \in M} x_{ij}^{h*} p_j^{h*} + \sum_{j \in M} x_{ij}^{t,k} p_j^{t,k} + \sum_{h=t+1}^T \sum_{j \in M} \hat{x}_{ij}^{h*} \hat{p}_j^{h*} - B_i \right)]^+ \quad (34)$$

$$\gamma_{2i}^{k+1} = [\gamma_{2i}^k + \eta_2 (E_{i,A2} - \sum_{h=1}^{t-1} X_{ij}^{h*} - X_{ij}^{t,k} - \sum_{h=t+1}^T \hat{X}_{ij}^{h*} -$$

$$\eta - T\mu + \sqrt{\frac{T}{2\varepsilon}} \sigma)]^+ \quad (35)$$

其中, x_{ij}^{h*} 和 p_j^{h*} 分别为时隙 $h=1, \dots, t-1$ 时利用上文算法所求用户最优购电量及供电商最优电价。 \hat{x}_{ij}^{h*} 和 \hat{p}_j^{h*} 分别为 $h=t+1, \dots, T$ 时, 用户购电量与供电商电价估计值。

分别用(34)、(35)代替(15)、(16), 若用户 i 在时隙 t 购电总花费为 $\sum_{j \in M} x_{ij}^{t,k+1} p_j^{t,k+1}$, 使其当天总电费高于预期电费上限 B_i , 根据(34), γ_{1i}^{k+1} 将增加, 迫使用户降低其总购电量、或增加其从低电价供电商处的购电比重。

3.4 分布式算法

算法1 用户侧

初始化充放电电量 s_{ic}^t, s_{id}^t 与状态参数 $y_{i, ch}^t, y_{i, de}^t$; 初始化在各供电商处的购电量 $x_{ij}^{t,k}$;

(1) 第 k 次循环开始, 用户获得各供电商在该时隙该次迭代的电价 $\lambda_j^{t,k}$;

(2) 用户判断供电商电价与心理价位的高低, 判断自身弹性电器与半弹性电器的使用参数 $y_{i, A2}^t$ 与 $y_{i, A3}^t$;

(3) 根据(30)更新用户 i 的参数 q_i^t ;

(4) 根据(27)计算用户 i 的预测购电量 $\tilde{x}_{ij}^{t,k}$;

(5) 发送预测购电量 $\tilde{x}_{ij}^{t,k}$ 信息给下一用户的智能电表, 并发送给控制中心;

(6) 解决用户侧子问题(33), 更新蓄电池充放电状态 s_{ic}^t, s_{id}^t ;

(7) 根据(17)、(18)、(22)、(23)、(34)、(35)更新用户侧的协调参数;

(8) 终止条件: 各协调参数 $\Gamma_i = (\gamma_{1i}, \gamma_{2i}, \gamma_{3i}, \gamma_{4i}, \gamma_{5i}, \gamma_{6i})$ 满足 $|\Gamma_i^{k+1} - \Gamma_i^k| < \varepsilon$ 。

算法2 供电商侧

(1) 第 k 次循环开始, 供电商从控制中心获得所有用户在已处的购电需求预测量之和 $\sum_{i \in N} \tilde{x}_{ij}^{t,k}$;

(2) 根据(31)更新供电商 j 的参数 q_{N+1}^t ;

(3) 根据(28)计算预测发电量 $\tilde{l}_j^{t,k}$;

(4) 根据(29)更新预测电价 $\tilde{\lambda}_j^{t,k}$;

(5) 将预测发电量与预测电价发送至控制中心;

(6) 终止条件: 电价 λ_j^t 满足 $|\lambda_j^{t,k+1} - \lambda_j^{t,k}| < \varepsilon$ 。

算法3 控制中心

(1) 接受用户 i 和供电商 j 的预测结果 $\tilde{\theta}_j^{t,k} =$

$(\tilde{x}_{ij}^{t,k}, \dots, \tilde{x}_{Nj}^{t,k}, \tilde{l}_j^{t,k}, \tilde{\lambda}_j^{t,k})$;

(2) 根据 (32) 对进行修正得到新迭代 $\theta_j^{t,k+1}$;

(3) 分别发送 $\theta_j^{t,k+1}$ 中 $x_{ij}^{t,k+1}$ 和 $\lambda_j^{t,k+1}$ 给用户 i , $l_j^{t,k+1}$ 和 $\lambda_j^{t,k+1}$ 给供电商 j ;

(4) 终止条件: $|\theta_j^{t,k+1} - \theta_j^{t,k}| < \epsilon$ 。

时隙 t 第 k 次迭代开始, 各供电商向各用户公布其该时隙电价, 用户将根据已知电价决定是否开启弹性电器与半弹性电器。如有任一供电商电价 $\lambda_j^{t,k}$ 低于用户 i 的心理价位 PE_i , 且时隙 t 在用户 i 弹性电器使用时间周期内, 用户将开启弹性电器; 反之, 用户将不使用弹性电器。用户更新参数 q_i^t 并安排购电需求 $\tilde{x}_{ij}^{t,k}$ 、蓄电池充放电需求。控制中心将所有用户总购电需求反馈给对应供电商, 用户更新协调参数; 供电商根据用户总购电总量更新电价及发电量, 新电价由控制中心公布给用户。

算法 4 在线需求响应

(1) 在一天所有时隙中, 对于当前及过去时隙 $h=1, \dots, t$, 采取实时电价计算社会福利之和; 对于未来时隙 $h=t+1, \dots, T$ 采取前一天同一时刻的对应数据代替计算社会福利之和;

(2) 在时隙 $h=t$ 时, 用算法 1~3 求解下列在线需求响应问题:

$$\begin{aligned} \max & \sum_{h=1}^t \left[\sum_{i \in N} U_i^h(x_i^h) - \sum_{j \in M} C_j^h(l_j^h) \right] + \\ & \sum_{h=t+1}^T \left[\sum_{i \in N} \hat{U}_i^h(\hat{x}_i^h) - \sum_{j \in M} \hat{C}_j^h(\hat{l}_j^h) \right] \\ \text{s.t.} & (7) (8) (10) (11) (12) \\ & x_i^h = x_i^{h*} \quad \forall i \in N, h = 1, \dots, t-1 \\ & l_j^h = l_j^{h*} \quad \forall j \in M, h = 1, \dots, t-1 \end{aligned}$$

(3) 上述问题的解为 $[x_i^{1*}, l_i^{1*}, \dots, x_i^{t-1*}, l_i^{t-1*}, \hat{x}_i^t, \hat{l}_j^t, \dots, \hat{x}_i^T, \hat{l}_j^T]$, 当前时隙的实时购电量与供电量更新为 $(\hat{x}_i^t, \hat{l}_j^t) = (x_i^{t*}, l_j^{t*})$;

(4) 令 $h=t+1$;

(5) 终止条件: $h > T$ 。

对于外层目标函数多时隙社会福利模型, 未来时隙变量采用前一天相应时隙相应变量值替代, 遵循前文算法依次求解单时隙上子问题, 进而更新最外层模型, 直到更新遍历一天所有时隙, 得到一天多个时隙的社会总福利值。

4 仿真模拟

将一天分为 $T=24$ 个时隙, 考虑系统中有 $M=2$ 供电商, $N=5$ 家庭用户, 每个用户配有家用蓄电池

(48V, 50Ah, 充电效率 0.8, 放电效率 0.8) 及可再生能源发电装置 ($\mu=0.2, \sigma=0.05$)。用户所有必运行电器在各时段耗电量小于 0.2 kWh; 除用户 4 有 1 弹性电器与 1 半弹性电器外, 其余用户均配有 2 弹性电器与 2 半弹性电器。用户电器启停的心理电价分别为 $[0.45, 0.43, 0.55, 0.35, 0.60]$, 每天总电费心理上限为 $[4.00, 4.50, 5.00, 3.58, 5.50]$ 。

使用 Matlab R2018b 进行仿真, 所得数据结果由 Origin2018 绘制。

如图 1、2 所示, 迭代开始, 供电商 1 处的电价远低于供电商 2 所提供的电价, 用户倾向于从供电商 1 处购买自身大部分所需电量, 以用作蓄电池充电与必运行电器使用 (由于此时电价均高于用户的心理价位, 用户不选择启用弹性或半弹性电器)。由图 2 可以看到, 供电商 1 处的发电量迭代, 在此时出现了一个高峰。随后随着供电商 2 处电价迅速下调, 用户将部分用电需求转移至供电商 2, 供电商 2 分担了 1 处部分发电负担, 供电商 1 处的发电量逐渐与用户在该处的总购电量收敛至相当水平, 达到供需平衡状态。

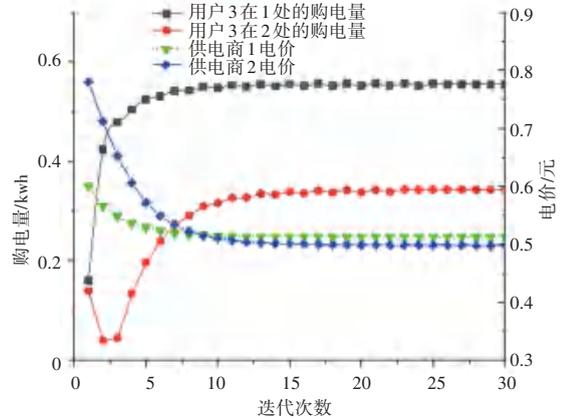


图 1 用户 3 购电量与供电商电价迭代

Fig. 1 Iteration of the power purchase and power price of user3

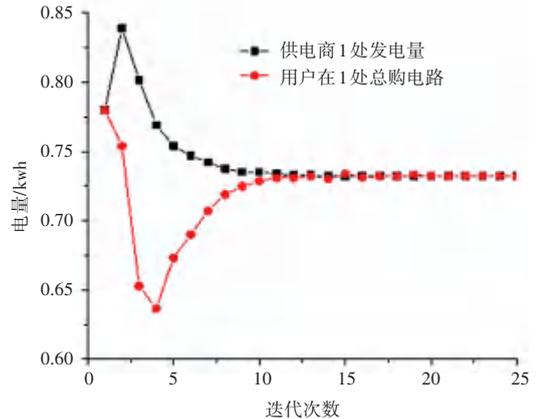


图 2 供电商 1 处发电量与用户在该处总购电量迭代

Fig. 2 Iteration of the electricity generation and the total power purchase of supplier1

图3展示了两个供应商一天各时隙的发电情况与电价情况。通过实时电价的调控,可以有效使用户转移峰时用电至谷时,进而平滑发电端的发电曲线。结合图4、5、6、7、8可以看出,实时电价与用户的用电行为密切相关。电价低时,用户倾向于选择在此时对蓄电池进行充电,同时若电价低于心理价位,且在电器使用时段内,用户会选择在此时开启弹性电器与半弹性电器。待系统中总负载增加,电价升高,用户使用蓄电池电量应对部分电器所需,很大程度上降低了用户的购电需求,减少了供电商在用电高峰时期的发电量。由图4可以看到,用户的蓄电池与可再生能源发电,有效地承担了用户生活所需部分负载,减少了用户的购电需求,进而降低了用户购电成本。

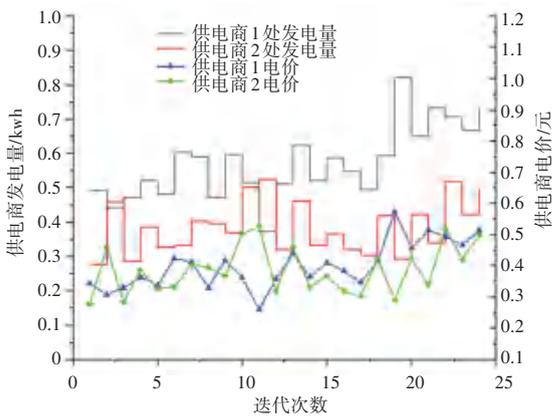


图3 供电商1一天发电量与电价

Fig. 3 The power generation and price of supplier1

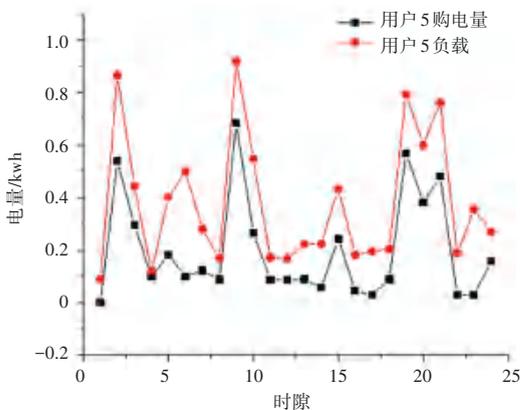


图4 用户5一天各时隙购电量与负载

Fig. 4 The power purchase and load in a day of user5

表1中3种情形分别为:情形一为本文所提模型与算法;情形二为用户未配备4.80 蓄电池与可再生能源装备,所有用电需求从电网购电来满足,采用本文提出的实时定价算法;情形三为不考虑用户蓄电池与可再生能源,同时采用分时定价(峰时:8:00-21:00,电价0.558 3元/kwh;谷时:21:00-次日

8:00,电价0.358 3元/kwh)。分别计算这3种情形下,各用户的当日总电费,并与当日总电费上限作比较。由表1中结果可以看出:本文所提出的实时定价算法相较分时定价,能明显降低用户的当日总电费;同时当用户配备有家用蓄电池与可再生能源发电装置时,也能承担一部分家庭用电消耗,从而进一步降低用户当日从电网中购买电力所需花费。

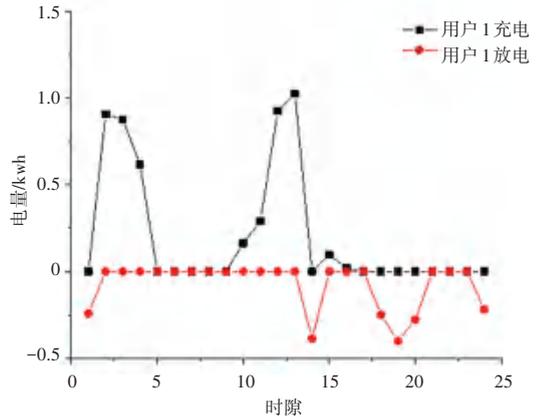


图5 用户1 蓄电池充放电情况

Fig. 5 The battery charging and discharging of user1

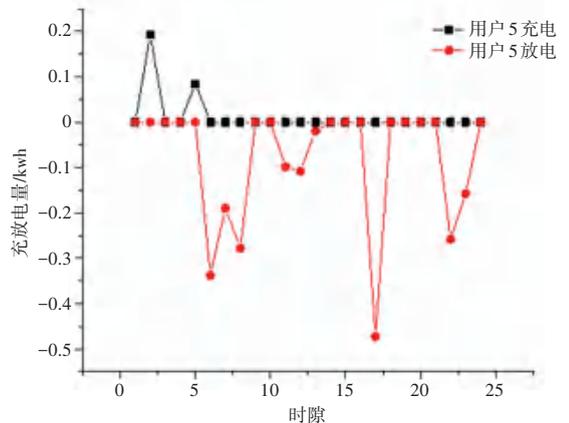


图6 用户5 蓄电池充放电情况

Fig. 6 The battery charging and discharging of user5

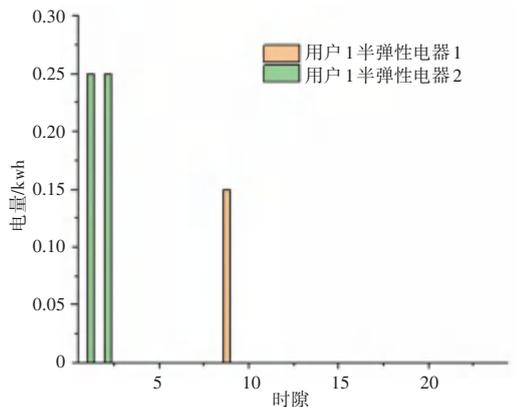


图7 用户1半弹性电器使用策略

Fig. 7 The consumption strategy of semi-controllable application of user1

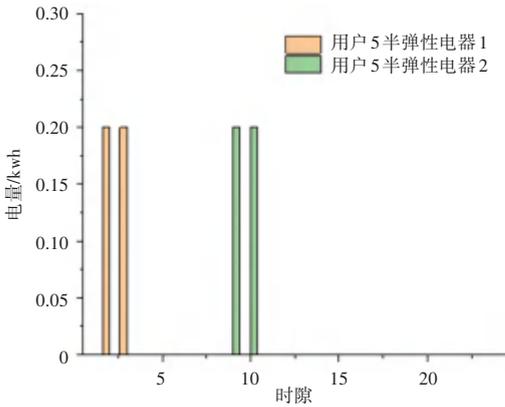


图8 用户5半弹性电器使用策略

Fig. 8 The consumption strategy of semi-controllable application of user5

表1 3种情形下用户的当日总电费

Tab. 1 Total electricity charge in three cases

	用户1	用户2	用户3	用户4	用户5
每日总电费上限	4.00	4.50	5.00	3.58	5.50
情形一	2.07	2.18	3.72	1.73	3.11
情形二	3.55	4.05	4.43	3.29	4.23
情形三	4.07	5.08	4.87	3.66	

5 结束语

本文在多供电商多用户的背景下,以社会总福利最大化为目标,建立智能电网实时定价策略模型。主要创新有:

(1)在构建模型时,将用户电器分为3类,为弹性电器与半弹性电器的启停增加用户心理价位限制;为每位用户增加当日总电费上限限制,使得模型更贴合用户日常实际用电心理与日常用电情况,有利于协助用户更合理地进行用电策略安排。

(2)针对多供电商多用户的社会福利最大化模型,提出一种基于 ADMM-GBS 的分布式实时定价算法,目的在于充分利用 ADMM 算法收敛快、且由于惩罚项的存在对目标函数可微限制温和的优点。

(3)在对时间耦合约束对应乘子迭代时,对迭代式中未来时隙的变量,选取前一天相同时段的相应变量值替代,以实现模型在线实时定价的目的。

仿真结果表明:本文所构建模型,贴合家庭用户实际用电心理与用电情况,所提算法能够有效地为用户规划实时电价用电策略,在满足用户需求的同时,减少用户购电成本。算法仅需供需双方交换少量的用电信息(所有用户在该供电商处的购电需求

与供电商提供的电价信息),避免个人及公共用电习惯等隐私的泄露。同时蓄电池与可再生能源的加入,有效改善电网系统中的资源分配,减少用户对不可再生能源的需求,降低系统中不可再生能源发电量,削峰填谷,平滑发电曲线,对节约能源、优化资源配置有所贡献。

参考文献

[1] YENGINER H, CETIZ C, DURSUN E. A review of energy management systems for smart grids[C]//2015 3rd International Istanbul Smart Grid Congress and Fair (ICSG). IEEE, 2015: 1-4.

[2] MA Z, ZHOU X, SHANG Y, et al. Form and development trend of future distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1289-1298.

[3] ZHANG S, JIAO Y, CHEN W. Demand-side management (DSM) in the context of China's on-going power sector reform [J]. Energy Policy, 2017, 100: 1-8.

[4] SHEN B, GHATIKAR G, LEI Z, et al. The role of regulatory reforms, market changes, and technology development to make demand response a viable resource in meeting energy challenges [J]. Applied Energy, 2014, 130: 814-823.

[5] YANG C, MENG C, ZHOU K. Residential electricity pricing in China: The context of price-based demand response [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 2870-2878.

[6] PECORARO G, FAVUZZA S, IPPOLITO M G, et al. Optimal pricing strategies in real-time electricity pricing environments: An Italian case study [C]//2015 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP). IEEE, 2015: 376-381.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 陶莉, 高岩, 朱红波. 以极小化峰谷差为目标的智能电网实时定价[J]. 系统工程学报, 2020, 35(3): 315-324.

[10] 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.

[11] 张莉, 高岩, 朱红波, 刘松涛. 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.

[12] DENG R, YANG Z, HOU F, et al. Distributed real-time demand response in multiseller-multibuyer smart distribution grid [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 30(5): 2364-2374.

[13] 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.

[14] BOYD S, PARIKH N, CHU E, et al. Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multiplier [J]. Foundations and Trends in Math, 2010, 3(1): 1-122.

[15] HE B, TAO M, YUAN X. Alternating direction method with Gaussian back substitution for separable convex programming [J]. SIAM Journal on Optimization, 2012, 22(2): 313-340.