

文章编号: 2095-2163(2020)05-0098-07

中图分类号: TM715; F426; F224

文献标志码: A

# 基于智能电网的需求侧新能源并入电网

李翠

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

**摘要:** 本文提出了在需求侧增加能源设备,并通过智能电表实时交互用电量、电量存储等情况,分析三种并网模式下的总效益,鼓励用户将私人能源并入电网,缓解电网压力增大效用。本文根据电网实时电量生产量、电量存储以及用电量,给予价格补偿刺激用户将能源并入电网,以所有用户效用最大化,成本最小化为目标函数,建立优化模型,给出兼顾多能互补系统,存储设备和用户能源并网下的最优能源使用方式。该模型运用对偶分解成几个独立原始的子问题,提出一种分布式实时算法求解这些子问题。

**关键词:** 实时电价; 能源收集设备; 多能互补; 存储设备; 对偶算法

## The Model of Demand Side New Energy Merging into Grid Based on Smart Grid

LI Cui

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

**[Abstract]** This article proposes adding energy equipment on the demand side, and real-time interaction of electricity consumption and electricity storage through smart meters, analyzing the total benefits of the three grid-connection modes, encouraging users to merge private energy into the grid, and relieve grid pressure and increase utility. Based on the real-time power production, storage and consumption of the power grid, this article gives users price compensation to stimulate users to integrate energy into the power grid, maximizes the utility of all users, minimizes costs as the objective function, establishes an optimization model. The optimal energy use mode considering multi-energy complementary system, storage equipment and user energy grid connection is given. The model uses dual decomposition into several independent original sub-problems, and proposes a distributed real-time algorithm to solve these sub-problems.

**[Key words]** energy collection equipment; grid pattern; multi-energy complementarity; storage equipment; dual algorithm

### 0 引言

目前,全球存在能源结构不合理、资源利用率较低和资源需求量较大等问题。面对这种状况,要大力发展在自然界中可以不断再生、永续利用的可再生能源,主要包括光伏、太阳能、风能、水能和生物质能等,关于可再生能源发电的研究越来越多<sup>[1-5]</sup>。但新能源发电也具有不稳定性、间歇性、随机性的缺点,若单独采用某单一能源进行发电则存在较多障碍,因此,构建多能互补分布式能源系统架构,实现能源结构的转型升级已经成为目前新能源发电的主要发展方向。将燃气、风电、光伏、储能等技术进行融合,实现多种能源的协同优化。借助风光蓄协作效应,提出了含大规模风电的电力调度<sup>[6]</sup>;提出了风、光、蓄一体化出力的调度策略,该策略不仅减少火电机组启停次数,降低火电经济成本,还起到了提高间歇性能源的利用率和削峰填谷的效果<sup>[7]</sup>;研究了海岛风、光、海水蓄联合发电系统的调度策略,提出了联合发电系统的3种调度方法<sup>[8]</sup>。目前,主要

从电力系统规划、调度、控制、仿真角度讨论了大规模新能源发电对电力系统影响<sup>[9]</sup>,对含可再生能源的电力系统主要采用多种能源相互协调策略,以达到电网优化和能源调度的目标<sup>[10]</sup>。

随着新能源发电的快速发展,仅靠供应侧的能源互补或传统火力机组来协调可再生能源发电的不稳定性与间歇性,不仅难以控制且成本高<sup>[6]</sup>。需求响应<sup>[11-13]</sup>是一种有效的调整方法,用户根据电力市场价格信号(分时电价、实时电价<sup>[19]</sup>、尖峰电价)或激励机制主动改变能源使用行为<sup>[14]</sup>。电力系统引入需求响应可以促进用户合理用电并优化含可再生能源电力系统的调度,国内外已有很多将需求响应考虑到含新能源电力系统中的研究。例如:集成光伏、风电、燃气轮机、储能系统和激励型需求响应为虚拟电厂(VPP),价格型需求响应能够平缓用电负荷曲线,储能系统和激励型需求响应能够增加VPP运营收益<sup>[15]</sup>;借助电价的需求响应来增加对负荷的调控能力,以减少光伏的不稳定性对发电调度优化

**作者简介:** 李翠(1996-),女,硕士研究生,主要研究方向:电力需求预测分析。

**通讯作者:** 李翠 Email: 2550234543@qq.com

**收稿日期:** 2020-03-04

结果造成的影响,新能源发电对电力市场的电价制定提出更高的要求<sup>[16]</sup>;光伏用户集群实现电能共享办法,通过建立内部价格模型,实现有序的电能交易<sup>[17]</sup>;考虑到电价和风电的不确定性,建立了风险规避主动分配网络(ADN)模型,风险规避(ADN)的目标函数考虑了在集成和不集成储能风电的情况下,相同电力系统之间发电成本净减少的条件期望<sup>[18]</sup>;公用事业公司与多个住宅用户之间的实时双向通信,将每个用户视为一个智能家居管理系统<sup>[20]</sup>,提出了一种分布式实时算法,为每个用户和公共事业公司寻找最优的能源管理调度方案,使社会福利最大化。对家用电器进行了细致的分类,以所有用户收益最大化,成本最小化为目标函数,建立优化模型,给出了一种既有可存储设备又有可再生资源并网情况下用户优化用电策略<sup>[21]</sup>。

本文在现有研究基础上,研究智能电网环境下的用户私人新能源并入电网模式。将家用电器分为必须运行电器、弹性电器和半弹性电器;存储设施是既可以充电又可以放电的电动汽车、电池等;供电公司改善发电模式,除了传统的火力发电,还开发可再生能源发电,促进能源结构向更安全、更高效、更环保的方向发展,从而形成多能互补系统。为了缓解供电方压力,充分调动用户侧资源,本文假设用户侧安装新能源设备,如屋顶太阳能、光伏设备等。用户侧的新能源设备具有发电功能还可以储能,这样用户私人新能源可以直接发电供用户自己使用也可以储存下来。供电公司可以给予一定价格,刺激用户将新能源并入电网。即在供电公司和用户之间搭建一个能源交易平台。在上述复杂条件下,以所有用户效益最大化,成本最小化为目标函数,建立模型,给出一种兼顾新能源发电、存储设施和能源交易模型的优化用电策略。对模型进行分析,用拉格朗日对偶算法计算出模型的解。该策略能确保新能源得到优先、充分利用,就地消纳,存储设备合理使用,将其成本降到最低,避免新能源并网对电网的稳定性造成影响。利用 MATLAB 仿真验证模型的合理性和算法的实效性。

## 1 系统模型

考虑一个供电公司向多个用户  $N = \{1, \dots, N\}$  供电的系统模型,每个用户被视为一个智能家居管理系统,用家庭负荷、智能电表、储能电池和能源收集设备组成。每个智能电表都假定嵌入一个能源消耗控制器(ECC)。ECC 可以控制每个家电的操作时间和模式,充放电量和记录用户的用电量。它还

可以与供电公司实时双向通信:用户向供电公司提供用户的用电情况;供电公司根据用户用电情况提供在自动化上和经济上最优能源管理调度方案。

### 1.1 家用电器分类

将用户的电器分为三类:  $A_i, B_i, C_i$  分别表示用户  $i (i \in N)$  的三类电器。 $a$  表示用户  $i$  的某一电器,  $x_{i,a}^h$  表示在  $h$  时段用户  $i$  正在运行电器  $a$  的用电量,  $E_a$  表示电器  $a$  所需的总用电量,  $\sum_{h \in H} x_{i,a}^h = E_a$ 。

(1) 必须运行的电器  $A_i (a \in A_i)$ , 这种电器运行时间长短不受价格限制,如冰箱、照明用电等。运行时间和用电量都是固定,且运行时间可以是连续的或者是间断时间构成。 $M$  表示  $i$  用户必须运行电器数量,  $E_{i,a}^h$  表示  $i$  用户在  $h$  时段所有必须运行电器的总用电量,即

$$E_{i,a}^h = \sum_{a=1}^M x_{i,a}^h, \quad \forall i \in N, \forall h \in H. \quad (1)$$

(2) 弹性电器  $B_i (a \in B_i)$ , 这种电器运行时间受价格影响最大,如空调等;电价高时用电量下降,电价低时用电量增加。弹性电器使用时间可以根据电价灵活选择,一般要求该类电器在每个时段用电量有一个上限阈值。 $\gamma_{i,a}^{hB}$  为  $i$  用户的弹性电器在第  $h$  时段最大用电量,即  $0 \leq x_{i,a}^h \leq \gamma_{i,a}^{hB}, \quad \forall i \in N, \forall h \in H$ 。

(3) 半弹性电器  $C_i (a \in C_i)$ , 这种电器运行时间也受价格影响,如洗衣机、洗碗机等。这种电器完成任务所有电量是固定的,而且一旦开始就无法停止,因此它们的运行具有连续性。半弹性电器需要在特定时间内完成运行,不然影响用户的满意度。 $\gamma_{i,a}^{hC}$  为用户  $i$  的半弹性电器在第  $h$  时段最大用电量。 $E_a$  表示电器  $a$  所需的总用电量。

$$0 \leq x_{i,a}^h \leq \gamma_{i,a}^{hC}, \quad \forall i \in N, \forall h \in H.$$

通过以上讨论,用户  $i$  在  $h$  时段 3 类电器用电量  $x_i^h$  可表示为:

$$x_i^h = E_{i,a}^h + \sum_{a \in B_i} x_{i,a}^h + \sum_{a \in C_i} x_{i,a}^h, \quad \forall i \in N, \forall h \in H, \\ \underline{x}_i^h \leq x_i^h \leq \bar{x}_i^h, \quad \forall i \in N, \forall h \in H. \quad (2)$$

其中,  $\underline{x}_i^h$  和  $\bar{x}_i^h$  分别表示家庭负荷能耗水平的下界和上界。特别是,  $\underline{x}_i^h$  表示从“必须运行用电器的“基线”需求,  $\bar{x}_i^h$  表示所有家用电器在其最大能耗水平上的总能耗水平。

### 1.2 储能设施

由于可再生能源的间歇性、波动性和不可准确预测性,其产生的电力若直接输送给电网中,会造成浪费,且影响电网正常稳定运行。因此,存储设施在

处理新能源发电中发挥着重要作用,以补充间歇性新能源发电的波动性和不可准确预测性。存储设施既可以放电也可以充电。

对于电池模型,让  $B_i^h$  表示用户  $i$  在时隙  $h$  结束时的电池电量,  $b_{i,c}^h$  表示用户  $i$  在时隙  $h$  的电池充电量,  $b_{i,d}^h$  表示用户  $i$  在时隙  $h$  的电池放电量。  $b_{i,c}^h > 0$  表示电池充电,相反,  $b_{i,d}^h > 0$  表示电池放电,  $b_{i,c}^h = 0, b_{i,d}^h = 0$  代表启动电池的空闲状态。  $\eta_{i,c}$  表示用户  $i$  的电池充电效率,  $\eta_{i,d}$  表示用户的电池放电效率。假设电池漏电是不明显的,电池电量的动态可以被建模为

$$B_i^h = B_i^0 + \sum_{\tau=1}^h \frac{\alpha}{e} \eta_{i,c} b_{i,c}^\tau - \frac{b_{i,d}^\tau \ddot{\alpha}}{\eta_{i,d} \varnothing}, \quad \forall i \in N, \forall h \in H. \quad (3)$$

其中,  $B_i^0$  表示用户  $i$  的初始电池水平。电池充电量受到以下条件的约束:  $0 \leq b_{i,c}^h \leq b_{i,c}^{\max}, \forall i \in N, \forall h \in H, b_{i,c}^{\max}$  表示最大充电速率。电池的放电量取决于:  $0 \leq b_{i,d}^h \leq b_{i,d}^{\max}, \forall i \in N, \forall h \in H, b_{i,d}^{\max}$  表示最大放电率。此外,电池电量满足以下条件:  $B_i^{\min} \leq B_i^h \leq B_i^{\max}, \forall i \in N, \forall h \in H. B_i^{\min}, B_i^{\max}$  分别表示电池电量下限和上限值。

$$B_i^{\min} \leq B_i^h = B_i^0 + \sum_{\tau=1}^h \frac{\alpha}{e} \eta_{i,c} b_{i,c}^\tau - \frac{b_{i,d}^\tau \ddot{\alpha}}{\eta_{i,d} \varnothing} \leq B_i^{\max}, \quad \forall i \in N, \forall h \in H. \quad (4)$$

### 1.3 新能源发电

在供电方改善供电系统,增加了新能源发电,扩大能源来源途径,协调了传统火力发电的局限性,为克服多种能源发电的间歇性以及不确定性,形成依据互联网上的各种信息进行规划建设和运行的能源互补系统。全面优化能源的生产、分配、转化、存储后形成产供销一体化,极大程度上满足用户对能源的需求,提升能源利用率,利用能源互补管理系统解决目前能源短缺和能源质量较差问题。多能互补发电系统是由火力发电技术、分布式发电技术、储能技术和太阳能发电技术结合的整体发电系统。

从供电公司的角度出发,  $s^h$  表示供电公司在时隙  $h$  的能源供应,包括多能互补系统提供的新能源。供电公司的能源供应受以下条件:  $0 \leq s^h \leq c^h, \forall h \in H.$  其中  $c^h$  表示电力公司在时隙  $h$  的供电能力,供电能力受电力基础设施的限制,如输电线路和输电线路的热限。用户方安装能源设备且收集到的能源可以通过能源交易平台并入电网中。

用户新能源属于用户的私人能源,用户可以选

择并入电网也可以选择自用,这取决于供电公司给予用户的刺激。这种刺激起到去峰填谷的功效,缓解电网的压力,同时又可以满足所有用电的电量需求。

$$E_u = E_p + E_r. \quad (5)$$

$E_u \geq 0$  用户能源收集设备总能源,  $0 \leq E_p \leq E_p^{\max}$  系统中辅助设备所耗的电量,  $E_r \geq 0$  能源收集设备中可供用户使用的能源。

每个时隙的每个用户的总能量需求与在相同时隙的其它用户的能量需求具有空间耦合的关系,约束条件如下所示:

$$\sum_{i \in N} (x_i^h - b_{i,d}^h + b_{i,c}^h) = s^h + E_r, \quad \forall i \in N, \forall h \in H. \quad (6)$$

### 1.4 用户的效用函数

电力系统中的每个单独的用户都是可以独立运行的实体。每个用户的能量需求可以基于不同的参数而变化。通过采用微观经济学的效用函数概念,可以对不同用户对各种价格场景的不同响应进行解析建模。对于所有用户,我们将相应的实用程序函数表示为  $U(x, \omega), \omega > 0$  是可以在用户之间以及在一天内的不同时间内变化的参数。更正式地说,对于每个用户,效用函数表示用户作为其功耗的函数所获得的满意程度。我们假设实用程序函数满足以下属性:

**性质 1** 效用函数是不递减的,即  $\frac{\partial U(x, \omega)}{\partial x} \geq 0.$

**性质 2** 效用函数是凹的,边际效用递减。

$$\frac{\partial^2 U(x, \omega)}{\partial x^2} \leq 0.$$

本文考虑了线性递减边际效益的二次效用函数:

$$U(x, \omega) = \begin{cases} \omega x - \frac{\alpha}{2} x^2, & 0 \leq x \leq \frac{\omega}{\alpha}; \\ \frac{\omega^2}{2\alpha}, & x \geq \frac{\omega}{\alpha}. \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $\alpha > 0$  是一个预先确定的参数。

### 1.5 成本函数

供电公司在每个时隙提供给所有用户用电量的成本,用函数  $C^h(s^h)$  表示,函数是单调递增凸函数,且普遍采用二次函数:

$$C^h = a^h (s^h)^2 + b^h (s^h) + \chi^h. \quad (8)$$

其中,  $a^h > 0, b^h, \chi^h \geq 0$  为预先设置的常数。

## 2 模型建立

一天被认为是一个周期,它被平均地分为  $H =$

$\{1, \dots, H\}$  的时间段,  $H = 24$ , 时间尺度为一个小时。对于给定的供电公司公布的售卖电价  $P_1^h = \{p_1^1, p_1^2, \dots, p_1^{24}\}$  和供电公司购买用户私人新能源的电价  $P_2^h = \{p_2^1, p_2^2, \dots, p_2^{24}\}$ , 寻找一种最优用电策略, 使整个系统成本最低, 所有用户效用最大同时新能源可以得到充分利用。

供电公司改变了资源结构, 大力开发可再生能源, 多种新能源与传统的发电模式合并形成多能互补系统。在多能互补系统中, 供电方的新能源直接并入电网, 新能源还来源用户侧新能源设备, 用户私人新能源是否并入电网、并入电网的电量以及并入电网时刻由用户自己决定, 而用户的并网行为取决于供电方给予的刺激。以所有用户最大化, 成本最小化为目标, 建立目标函数为:

$$\max_{x,b,y} \sum_{h \in H} \left\{ \sum_{i \in N} \left[ U_i^h(x_i^h) - P_1^h(x_i^h + \sum_{\tau=1}^h (\eta_{i,c} b_{i,c}^\tau - \frac{b_{i,d}^\tau}{\eta_{i,d}})) - \varphi_i^h \right] + P_2^h y_i^h \right\} - C^h(s^h) \quad (9)$$

s. t.

$$x_i^h = E_{i,a}^h + \sum_{a \in B_i} x_{i,a}^h + \sum_{a \in C_i} x_{i,a}^h, \quad \forall i \in N, \forall h \in H. \quad (9-1)$$

$$L_i^{\min} \leq \sum_{\tau=1}^h \frac{\partial}{\partial \eta_{i,c}} \eta_{i,c} b_{i,c}^\tau - \frac{b_{i,d}^\tau}{\eta_{i,d}} \leq L_i^{\max}, \quad \forall i \in N, \forall h \in H. \quad (9-2)$$

$$\underline{x}_i^h \leq x_i^h \leq \bar{x}_i^h, \quad \forall i \in N, \forall h \in H. \quad (9-3)$$

$$\sum_{h \in H} x_i^h \geq r_i, \quad \forall i \in N, \forall h \in H. \quad (9-4)$$

$$\sum_{i \in N} (x_i^h - b_{i,d}^h + b_{i,c}^h) = s^h + E_r, \quad \forall i \in N, \forall h \in H. \quad (9-5)$$

$$0 \leq y_i^h P_2 \leq E_r P_2, \quad \forall i \in N, \forall h \in H. \quad (9-6)$$

$$\sum_{h \in H} (\varphi_i^h + y_i^h) = E_r, \quad \forall h \in H. \quad (9-7)$$

其中,  $U_i^h(x_i^h)$  表示用户  $i$  在  $h$  时段的效用函数,  $\sum_{\tau=1}^h \frac{\partial}{\partial \eta_{i,c}} \eta_{i,c} b_{i,c}^\tau - \frac{b_{i,d}^\tau}{\eta_{i,d}}$  表示用户  $i$  在  $h$  时段的充放电电量,  $\varphi_i^h$  表示用户  $i$  在  $h$  时段使用自己的新能源量, 是变量, 用户不但可以使用自己的新能源也可以将新能源并入到电网里。  $P_1^h, P_2^h$  分别表示售卖电价和购买电价, 是常量。  $L_i^{\min} = B_i^{\min} - B_i^0, L_i^{\max} = B_i^{\max} - B_i^0 X$ , 分别为电池能约束的上、下界。  $y_i^h$  每时段每用户卖给供电公司的用户新能源的电量。  $r_i$  表示“所需”需求, 即“弹性”需求和“基准”的阈值之和, 它使得家

庭负荷在各个时隙的能量需求与其它时隙的能量需求具有时间耦合关系, 以满足“所需”的能量需求, 即时间耦合的能量需求。

模型(9)是凸规划, 解存在且唯一, 其实质是使所有用户效用最大化、成本最小化, 且能源优先使用并充分利用, 减少能源的弃废率。约束条件(9-2)限制电池电量的边界, 防止电池充放电超过电池边界, 造成电池损坏。约束条件(9-3)和(9-4)防止家庭负荷过重, 峰谷转移, 造成电网的不稳定, 确保在每个时隙的用电量在电网最大承受范围内。约束条件(9-5)和(9-6)使得电网中的新能源发电被充分、优先利用。

模型(9)考虑能源供应, 能源需求和电池储能, 能源供应不只在供应方, 模型考虑用户侧的资源, 缓解供应方的供电压力; 模型(9)不仅考虑优化可再生能源和存储设施, 对于多余能源并入电网进行研究, 对新能源的并网方式进行分析, 通过供需双方实时互动, 利用电价刺激用户, 从而实现用户效用最大化。

### 2.1 模型求解

能量需求约束和电池能量约束是时间上耦合的约束, 供需约束是空间耦合的约束, 这些约束无法直接解决原始问题, 可以利用拉格朗日对偶算法处理这个复杂的优化问题。因为原始问题是凸问题, 利用对偶分解方法, 将原问题解耦成一系列独立的子问题。

$$\begin{aligned} \lambda(x, b, y, \lambda, \mu, v, \sigma, \theta) = & \sum_{h \in H} \left\{ \sum_{i \in N} [U_i^h(x_i^h) - P_1^h x_i^h + \sum_{\tau=1}^h \frac{\partial}{\partial \eta_{i,c}} \eta_{i,c} b_{i,c}^\tau - \frac{b_{i,d}^\tau}{\eta_{i,d}} - \varphi_i^h + P_2^h y_i^h] - C^h(s^h) \right\} \\ & + \sum_{h \in H} \lambda^h [(s^h + E_r) - \sum_{i \in N} (x_i^h - b_{i,d}^h + b_{i,c}^h)] \\ & + \sum_{h \in H} \sum_{i \in N} \mu_i^h \left[ \sum_{\tau=1}^h \frac{\partial}{\partial \eta_{i,c}} \eta_{i,c} b_{i,c}^\tau - \frac{b_{i,d}^\tau}{\eta_{i,d}} - L_i^{\min} \right] \\ & + \sum_{h \in H} \sum_{i \in N} v_i^h \left[ L_i^{\max} - \sum_{\tau=1}^h \frac{\partial}{\partial \eta_{i,c}} \eta_{i,c} b_{i,c}^\tau - \frac{b_{i,d}^\tau}{\eta_{i,d}} \right] \\ & + \sum_{h \in H} \sum_{i \in N} \sigma_i^h P_2 (E_r - y_i^h) + \sum_{i \in N} \theta_i \left( \sum_{h \in H} x_i^h - r_i \right). \end{aligned} \quad (10)$$

$\lambda^h, \mu_i^h, v_i^h, \sigma_i^h, \theta_i \geq 0$  是拉格朗日乘数,  $\lambda = [\lambda^h]_{h \in H}, \mu = [\mu_i^h]_{i \in N, h \in H}, v = [v_i^h]_{i \in N, h \in H}, \sigma = [\sigma_i^h]_{i \in N, h \in H}, \theta = [\theta_i]_{i \in N}$  表示引入的拉格朗日乘数矩阵来缓和时间和空间上耦合的约束。

对偶优化问题中的目标函数为:

$$D(\lambda, \mu, v, \sigma, \theta) = \max_{x, b, y} \lambda(x_i^h, b_{i,c}^h, b_{i,d}^h, y_i^h, \lambda, \mu, v, \sigma, \theta), \quad (11)$$

$$\underline{x}_i^h \leq x_i^h \leq \bar{x}_i^h, 0 \leq b_{i,c}^h \leq b_{i,c}^{\max}, 0 \leq b_{i,d}^h \leq b_{i,d}^{\max}, 0 \leq y_i^h \leq E_r, \forall i \in N, \forall h \in H.$$

对偶问题:

$$\min_{\lambda, \mu, v, \sigma, \theta} D(\lambda, \mu, v, \sigma, \theta) \quad (12)$$

$$\lambda^h, \mu_i^h, v_i^h, \sigma_i^h, \theta_i \geq 0, \quad \forall i \in N, \forall h \in H.$$

利用次梯度投影法,对偶问题可以随着对偶目标函数的负次梯度中的拉格朗日乘子的更新而迭代求解:

可将对偶问题分解成以下几个子问题:

$$\begin{aligned} F_i^h(\lambda, \sigma, \theta) &\equiv \max_{\substack{x_i^h \leq \bar{x}_i^h \\ 0 \leq y_i^h \leq E_r}} [U_i^h(x_i^h) + (\theta_i - \lambda^h - P_1^h)x_i^h - P_2^h y_i^h], \\ G_i^h(\lambda, \mu, v) &\equiv \max_{\substack{0 \leq b_{i,c}^h \leq b_{i,c}^{\max} \\ 0 \leq b_{i,d}^h \leq b_{i,d}^{\max}}} [\lambda^h(b_{i,d}^h - b_{i,c}^h) + (\mu_i^h - v_i^h - P_1^h) \sum_{\tau=1}^h \frac{\partial \eta_{i,c}^\tau}{\partial b_{i,c}^\tau} b_{i,c}^\tau - \frac{b_{i,d}^\tau}{\eta_{i,d}^\tau} \frac{\partial \eta_{i,d}^\tau}{\partial b_{i,d}^\tau} b_{i,d}^\tau], \\ R_i^h(\lambda) &\equiv \max_{0 \leq s^h \leq E_r} [\lambda^h(s^h + E_r) - C^h(s^h)]. \end{aligned} \quad (13)$$

为了解决该对偶问题,采用梯度投影迭代法进行求解。迭代公式如下:

$$\begin{aligned} \lambda^{h,k+1} &= \left\{ \lambda^{h,k} - \gamma_\lambda \left[ s^h - \sum_{i \in N} (x_i^h - \tilde{b}_{i,d}^h + \tilde{b}_{i,c}^h) \right] \right\}^+, \\ \mu_i^{h,k+1} &= \left\{ \mu_i^{h,k} - \gamma_\mu \sum_{\tau=1}^h \frac{\partial \eta_{i,c}^\tau}{\partial b_{i,c}^\tau} \tilde{b}_{i,c}^\tau - \frac{\tilde{b}_{i,d}^\tau}{\eta_{i,d}^\tau} \frac{\partial \eta_{i,d}^\tau}{\partial b_{i,d}^\tau} - L_i^{\min} \right\}^+, \\ v_i^{h,k+1} &= \left\{ v_i^{h,k} - \gamma_v \sum_{\tau=1}^h \frac{\partial \eta_{i,c}^\tau}{\partial b_{i,c}^\tau} \tilde{b}_{i,c}^\tau - \frac{\tilde{b}_{i,d}^\tau}{\eta_{i,d}^\tau} \frac{\partial \eta_{i,d}^\tau}{\partial b_{i,d}^\tau} \right\}^+, \\ \sigma_i^{h,k+1} &= \left\{ \sigma_i^{h,k} - \gamma_\sigma [P_2^h(E_r - y_i^h)] \right\}^+, \\ \theta_i^{k+1} &= \left\{ \theta_i^k - \gamma_\theta \left[ \sum_{h \in H} \tilde{x}_i^h - r_i \right] \right\}^+. \end{aligned} \quad (14)$$

$k \in N^+$  表示迭代指数,  $\gamma_\lambda, \gamma_\mu, \gamma_v, \gamma_\sigma, \gamma_\theta > 0$  分别是调整收敛速度  $\lambda^h, \mu_i^h, v_i^h, \sigma_i^h, \theta_i$  的步长,  $\tilde{x}_i^h, \tilde{b}_{i,c}^h, \tilde{b}_{i,d}^h, \tilde{y}_i^h$  是局部最优解。

### 2.2 算法步骤

输入 能耗水平的下限、上限,电池的最大充放电速率,所需需求,初始电池电量,电池的充放电效率,供电能力等参数。

算法

**Step 1** 初始化(用户方);

**Step 2** 对于每个用户  $\forall i \in N$ ,从供电公司接收新的电价  $P_1^{h,k-1}$ :

(1)对每个时隙  $h = 1, \dots, H$ ,更新用户能源需求  $\tilde{x}_i^{h,k}$ , 电池充放电能量  $\tilde{b}_{i,c}^{h,k}$  和  $\tilde{b}_{i,d}^{h,k}$  和用户新能源  $\tilde{E}_i$ ;

(2)将总需求  $\{\tilde{x}_i^{h,k} - \tilde{b}_{i,d}^{h,k} + \tilde{b}_{i,c}^{h,k}\}_{h \in H}$  发送给供电公司;

**Step 3** 结束;

**Step 4** 初始化(供应方);

**Step 5** 对于供电公司,对每个时隙  $h = 1, \dots, H$ ,从每个用户接受总需求  $\{\tilde{x}_i^{h,k} - \tilde{b}_{i,d}^{h,k} + \tilde{b}_{i,c}^{h,k}\}_{h \in H}$ ,更新供应量  $s^{h,k}$ ;

**Step 6** 将电价  $\{P_1^{h,k}, P_2^{h,k}\}$  发送给每个用户,用户选择是否将用户私人新能源并入电网、并入量以及并入电网时刻;

**Step 7** 结束;

**Step 8**  $k = k + 1$ ,直到  $\lambda, \mu, v, \sigma, \theta$  在小范围  $\varepsilon_\lambda, \varepsilon_\mu, \varepsilon_v, \varepsilon_\sigma, \varepsilon_\theta$  内收敛,结束。

输出 能量需求  $x^*$ , 电池充放电能量  $b^*$  和用户并入电网的新能量并网  $y^*$ 。

### 3 数值仿真

假设电网中每一用户均有 11 个电器,具体如下:

(1)  $A_i$  类电器有 4 个,用户  $i$  的该类电器在运行时总用电量于  $[1 \ 2.5]$  随机选取且固定不变;

(2)  $B_i$  类电器有 3 个,该类电器在每一时段总用电量的上限为 4;

(3)  $C_i$  类电器有 4 个,设它们一天内的总用电量分别为 4、3.2、7、4.5,每一时段的最大用电量分别为 1.5、1、2、1,这类电器工作时间是连续时段,设它们的工作时间分别在时段内:  $\{1, 2, \dots, 7\}$ 、 $\{6, 7, \dots, 14\}$ 、 $\{11, 12, \dots, 18\}$  和  $\{16, 17, \dots, 22\}$  内。

图 1 给出了各时段某一用户的 3 类电器用电量。

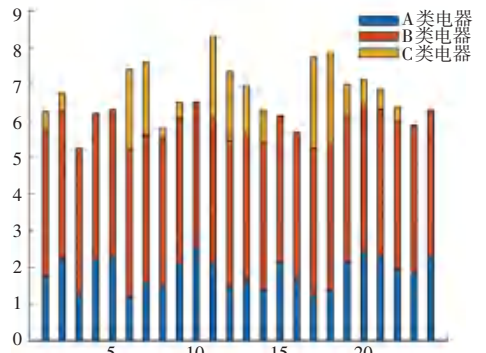


图 1 给出了各时段某一用户的 3 类电器用电量  
**Fig. 1** The electricity consumption of three types of electrical appliances of a user in each period

24-11 时段购买电价  $P_2^h = 0.35 \text{ cent/kwh}$ , 12-14 时段购买电价  $P_2^h = 0.4 \text{ cent/kwh}$ , 15-17 时段购买电价  $P_2^h = 0.38 \text{ cent/kwh}$ , 18-23 时段购买电价  $P_2^h = 0.5 \text{ cent/kwh}$ 。

由图 2、图 3 可知：(1) 用户在电价低时选择对电池充电，而在电价高时选择对电池放电以提供家庭负荷。(2) 用户新能源收集主要集中在白天，正午时分，夜间能源收集可以忽略不计。

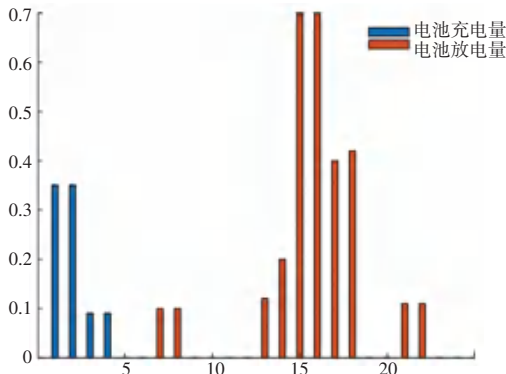


图 2 用户 24 时段充放电电量图

Fig. 2 The user's 24-hour charge and discharge volume chart

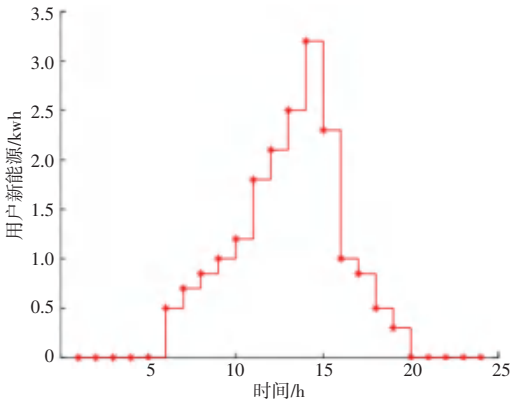


图 3 用户 24 时段收集到的新能源

Fig. 3 New energy collected by users in 24 hours

表 1 三种并网模式下的总效益与总成本的差值

Tab. 1 The difference between the total benefit and the total cost under the three grid connection modes

	完全自用	自发自用余电并网	全部并网
总效益与总成本的差	-115.1	-107.60	-99.60

图 4 表示全部并网、自发自用余电并网、完全自发自用三种模式下，各时刻所有用户最大总效用。由表 1 可以看出，自发自用余电并网和全部并网的并网模式下的需求响应都增加了用户效用。因此，充分利用用户侧新能源，并鼓励用户安装能源设备

且将能源并入电网。

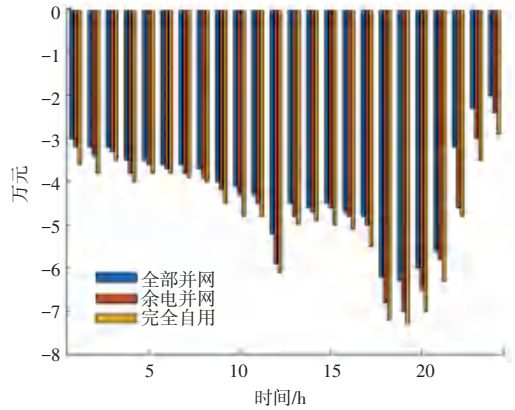


图 4 三种并网模式下的各时刻最大的总效益

Fig. 4 The maximum total benefit at each moment under the three grid-connected modes

#### 4 结束语

本文阐述了智能电网中，用户私人新能源三种并网模式，以所有用户效用最大化为目标。供电公司不断更新供电量、用电量和存电量，分析了全部并网、自发自用余电并网和完全自由的三种并网模式下总效益，得到自发自用余电并网和全部并网模式下的总效益增加的结论，鼓励用户安装新能源设备并根据自己需求选择并网模式。数值模拟结果表明，用户新能源的并网有助于供需平衡，提高用户总福利、维护新能源发电的智能电网稳定性和波动性、促进社会新能源合理利用，优先使用，就近消纳等。

但是由于参数的设置都是在理想状态下的，未考虑一些不确定因素（如气候，季节等）的参与。在后续研究中，应考虑到新能源发电和用户能源收集设备维修保养等不确定因素，并对用户负荷更进一步细化、讨论。

#### 参考文献

- [1] 吴志明. 含高渗透率光伏电场的联合发电系统优化运行研究[J]. 电工电气, 2018(1): 23-26, 59.
- [2] 秦鹏, 崔国柱, 郭昌林, 等. 光伏接入对配电网电能质量的影响及最大接入容量分析[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(11): 145-150.
- [3] HE Miao, MURUGESAN S, ZHANG Junshan. A multi-timescale scheduling approach for stochastic reliability in smart grid with generation and opportunistic demand [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(1): 521-529.
- [4] NUNNA H K, DOOLLA S. Demand response in smart distribution system with multiple microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1641-1649.
- [5] GUERRERO J M, BLAABJERG F, ZHELEV T, et al. Distributed generation: Toward a new energy paradigm [J]. Industrial Electronics Magazine IEEE, 2010, 4(1): 52-64.