

# 计及户用分布式电源的合作博弈智能用电技术

陈 彬

(国网福建省电力有限公司电力科学研究院,福建 福州 350007)

**摘要:**在智能电网环境下,参与需求侧管理的居民用户可以根据发布的实时电价进行合适的家庭负荷用电安排。文中考虑分布式电源作为居民用户电力自发自用的一种方式,提出基于合作博弈的居民用户智能用电技术。在建立用户电力消耗模型、用电成本模型和负荷控制模型的基础上,将需求侧居民智能用电技术描述为一个合作博弈模型,模型中以多个用户作为博弈参与者,以用户的日负荷用电安排作为参与者的策略。该合作博弈模型在纳什均衡解处,各用户的能源消费最小。算例仿真结果表明,用户参与合作博弈的负荷用电安排可有效降低其电费,且当用户配有分布式电源时,电费将进一步降低。

**关键词:**需求侧管理;合作博弈;能源消耗调度;户用分布式电源

**中图分类号:**TM73

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2017)05-0029-06

## 0 引言

为了解决化石能源逐渐枯竭、环境污染日益严重的问题,同时为了满足负荷增长需求以及更有效地利用能源,以太阳能、风能等可再生清洁能源发电的分布式发电技术应运而生<sup>[1,2]</sup>。为了充分发挥分布式电源在电网中的作用,智能电网终端智能配用电侧广泛考虑了需求侧管理(demand side management, DSM)技术<sup>[3]</sup>。DSM是指在政府法规和政策的支持下,采取有效的激励和引导措施,改善居民用户用电方式,在满足同样用电功能的同时减少电量消耗和电力需求,提高终端用电效率<sup>[4,5]</sup>。它可以降低负荷曲线的峰均比,平衡电力供需以及减少用户的电力成本。智能电网下的DSM具有更高的负荷监控技术、智能控制技术和终端节能效率,能实现实时的用户响应,并且支持分布式电源的自由接入。

为了实现DSM调节作用,往往采用智能电价机制,包括尖峰电价、分时电价和实时定价<sup>[6,7]</sup>。电力公司通过给予用户一定的电价激励机制,鼓励用户安排其负荷从用电高峰时段向低谷时段转移,这样不仅减少用户的电费,而且能够缓解电网的压力。此外,智能电表和智能家电是居民家庭智能用电系统的重要组成部分<sup>[8]</sup>,智能电表的引入以及双向通信的实现是智能电网进行负荷用电安排的主要技术驱动,也为电力公司和居民用户等利益主体进行优化博弈决策提供了可能<sup>[9]</sup>。

迄今为止,国内外已有不少学者对博弈论用于

解决智能电网中负荷用电安排问题进行了研究并取得重要进展。文献[10]研究了电力公司实施的分时电价政策,提出了成本函数模型,并描述了一种基于博弈论的方法,优化分时定价策略。文献[11]针对电力公司和终端用户之间的信息交互建立了斯坦克尔伯格博弈模型,电力公司作为博弈中的主导者,而用户作为跟随者。文献[12]考虑了多个电力公司和多个用户之间的相互关系,建立了一个双层博弈模型,其中将电力公司之间的竞争阐述为非合作博弈,把用户之间的交互阐述为演化博弈。文献[13-15]研究了利用贝叶斯博弈解决信息不完全情况下的DSM问题。文献[13]针对用户不能及时知道其他用户用电信息的情况,通过建立贝叶斯博弈模型优化用户用电策略。文献[14]研究了信息传递过程中信息缺失时用户和电力公司之间的博弈行为。然而上述文献都没有把分布式电源考虑到博弈模型中,并未对家庭含有分布式电源情况下用户用电行为的博弈模型作过详细讨论。

文中在智能电网环境下,考虑了户用分布式电源存在情况下,居民用户可用其发出的电能供负荷使用,并可将剩余电能回售给电网。在分时电价的基础上,配有智能电表的各用户参与能源消耗调度(energy consumption schedule, ECS),适当安排可转移负荷的使用时段以降低电费。基于上述分析,文中基于合作博弈思想建立了居民用户关于负荷智能用电的优化模型,通过利用该模型对用户的日负荷进行优化安排,在该模型中居民用户为博弈参与者,用户的日负荷用电安排为博弈策略,博弈的目标是使得用户的能源消耗费用最小。仿真结果表明,当用户参与ECS时其电费大大减少,且当部分

用户配有分布式电源以自发自用时,这些用户的电费将进一步降低。

## 1 系统建模

以微网作为研究对象进行建模,如图1所示,该微网中有 $N$ 个居民用户和1个电力公司,其中电力公司主要负责信息收集和负荷调度,而 $N$ 个居民用户则以相互合作的关系共同参与需求响应。用户家庭负荷包括可转移负荷和不可转移负荷,所有用户均装设智能电表。部分居民用户家中安装有分布式电源(光伏电源),这些用户可以通过从电力公司购电满足家庭负荷需求,也可以通过光伏电源发电满足家庭电力需求,并且可将光伏多余电量回售给电网。另外,电力公司制定、发布合适的电价并售电给用户,通过电价激励机制促使用户适当地安排家庭可转移负荷的使用。用户与电力公司通过信息网络线进行电价信息和负荷需求的交互,从而完成合作博弈达到优化目的。

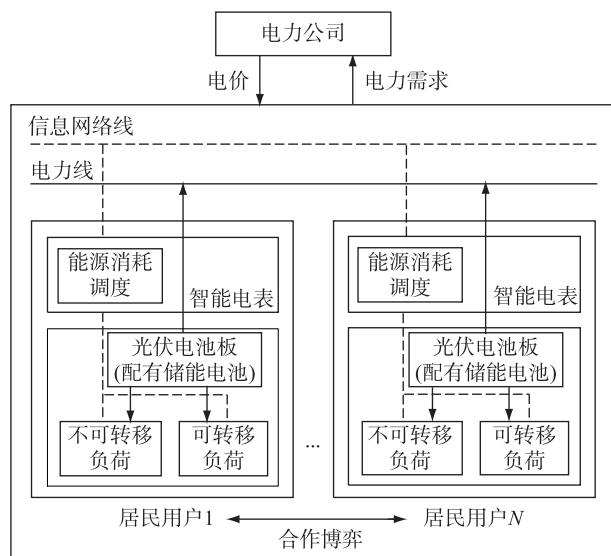


图1 微网需求侧管理场景

Fig.1 DSM scenario of micro-grid

### 1.1 电力消耗模型

将一天划分为 $H = \{1, 2, \dots, 24\}$ 共24个等长时间段。对于系统中每个用户 $n \in N$ ,用 $l_n^h$ 表示用户 $n$ 在第 $h \in H$ 小时内的用电量。由此,系统中所有用户在第 $h$ 时段内总的负荷耗电量可表示为:

$$L_h \triangleq \sum_{n \in N} l_n^h \quad (1)$$

根据用户日峰荷和平均负荷可计算出需求侧负荷的峰值与平均值的比值 $PAR$ 为<sup>[16]</sup>:

$$PAR = \frac{L_{\text{peak}}}{L_{\text{avg}}} = \frac{\max_{h \in H} L_h}{\sum_{h \in H} L_h / H} \quad (2)$$

其中, $L_{\text{peak}}$ 表示一天内负荷最大值; $L_{\text{avg}}$ 表示一天内负荷平均值。

### 1.2 电能成本模型

为了促使用户合理的消费电力资源,需定义具有激励性质的用户电价。定义 $C_h(L_h)$ 为电力成本函数的基本形式,其包含了每小时的发电或配电成本,因而直接反映了发电厂的能源成本或用户在第 $h \in H$ 小时内消耗电能对应的成本。对于上述成本函数,需满足如下条件。

(1) 成本函数关于 $h \in H$ 时刻总的负荷耗电量是单调递增的,即:

$$C_h(L_h) < C_h(\hat{L}_h) \quad \forall L_h < \hat{L}_h \quad (3)$$

(2) 成本函数是严格凸函数,即对于任意的 $0 < \theta < 1$ ,都有:

$$C_h(\theta L_h + (1 - \theta)\hat{L}_h) < \theta C_h(L_h) + (1 - \theta)C_h(\hat{L}_h) \quad (4)$$

(3) 当居民用户向电力公司购电时,有 $L_h > 0$ 且 $C_h(L_h) > 0$ ;当居民用户利用光伏电池板发电有多余电量回售时,对于 $L_h < 0$ 的部分,有 $C_h(L_h) < 0$ 。

基于上述3个条件,可选择如下二次函数形式作为成本函数:

$$C_h(L_h) = a_h L_h^2 + b_h L_h \quad (5)$$

其中, $a_h > 0$ , $b_h \geq 0$ ,且 $a_h$ 和 $b_h$ 都为固定的参数。

### 1.3 家庭负荷控制

对于用户 $n$ ,用 $A_n$ 来表示其家庭所有负荷集合,其中包括冰箱、照明、洗衣机等。对于装有分布式电源的居民用户而言,其负荷既可以使用从电网购得的电能,也可以使用光伏电池板发出的电能。对于该类用户任一负荷 $a \in A_n$ ,定义其消耗从电网购得的外部电量的调度向量为:

$$\mathbf{x}_{n,a} \triangleq [x_{n,a}^1, \dots, x_{n,a}^h, \dots, x_{n,a}^H] \quad (6)$$

其中, $x_{n,a}^h$ 为用户 $n$ 的负荷 $a$ 在第 $h$ 小时消耗的外部电量。类似地定义其消耗光伏电池板发出的内部电量的调度向量为:

$$\mathbf{y}_{n,a} \triangleq [y_{n,a}^1, \dots, y_{n,a}^h, \dots, y_{n,a}^H] \quad (7)$$

其中, $y_{n,a}^h$ 为用户 $n$ 的负荷 $a$ 在第 $h$ 小时消耗的内部电量。经过家庭负荷消耗后,光伏所发电量如果仍有剩余,可将其回售给电网,则相应的售电量调度向量为:

$$\mathbf{z}_n \triangleq [z_n^1, \dots, z_n^h, \dots, z_n^H] \quad (8)$$

其中, $z_n^h$ 为用户 $n$ 的光伏电池板在第 $h$ 小时向电网的售电量。令 $o_{n,a}^h = x_{n,a}^h + y_{n,a}^h$ 表示用户 $n$ 负荷 $a$ 在

第  $h$  小时内实际消耗的电量,  $\mathbf{o}_{n,a} \triangleq [o_{n,a}^1, \dots, o_{n,a}^h, \dots, o_{n,a}^H]$  为其调度向量。因此,用户  $n$  在第  $h$  小时所有负荷总的电力消耗计算如下:

$$l_n^h = \sum_{a \in A_n} o_{n,a}^h \quad \forall h \in H \quad (9)$$

根据图 1 所示,用户负荷分为不可转移负荷和可转移负荷。假定所有负荷一天总用电量保持不变,对于不可转移负荷来说,它们只能固定在一定的时间段内使用,因此在用户参与 ECS 时,只需系统地管理可转移负荷的电力消耗时段即可。但无论是不可转移负荷或可转移负荷,其电力消耗都满足下式:

$$\begin{cases} \sum_{h=\alpha_{n,a}}^{\beta_{n,a}} o_{n,a}^h = E_{n,a} \\ o_{n,a}^h = 0 \end{cases} \quad \forall h \in H \setminus H_{n,a} \quad (10)$$

其中,  $\alpha_{n,a}$  为用户  $n$  的负荷  $a$  工作起始时刻,  $\beta_{n,a}$  为负荷  $a$  工作结束时刻,  $\alpha_{n,a} < \beta_{n,a}$ ;  $H_{n,a}$  为负荷  $a$  的工作时段;  $E_{n,a}$  为用户  $n$  的负荷  $a$  在工作时段内的耗电量。当负荷  $a$  为不可转移负荷时,则  $\alpha_{n,a} = 1$ ,  $\beta_{n,a} = 24$ 。从而,所有用户一天内全部负荷总的用电量为:

$$\sum_{h \in H} L_h = \sum_{n \in N} \sum_{a \in A_n} E_{n,a} \quad (11)$$

另外,假设用户  $n$  的负荷  $a$  的最低耗电量为  $\gamma_{n,a}^{\min}$ ,最高耗电量为  $\gamma_{n,a}^{\max}$ ,最低耗电量是指负荷处于关闭或待机状态,则:

$$\gamma_{n,a}^{\min} \leq o_{n,a}^h \leq \gamma_{n,a}^{\max} \quad \forall h \in H_{n,a} \quad (12)$$

引入变量向量  $\mathbf{o}_n$  来表示用户  $n$  的所有负荷  $A_n$  的用电安排  $\mathbf{o}_{n,a}$ 。因此,对于用户  $n$  来说,其可行的能源消耗调度集  $\mathcal{O}_n$  表示如下:

$$\mathcal{O}_n = \{ \mathbf{o}_n \mid \sum_{h=\alpha_{n,a}}^{\beta_{n,a}} o_{n,a}^h = E_{n,a}, o_{n,a}^h = 0 \quad \forall h \in H \setminus H_{n,a}, \gamma_{n,a}^{\min} \leq o_{n,a}^h \leq \gamma_{n,a}^{\max} \quad \forall h \in H_{n,a} \} \quad (13)$$

## 2 基于合作博弈的能源消耗调度

根据设定的电价,每个用户将根据智能电表之间的信息交流调整其负荷的能源消耗,以降低能量消耗成本。本节基于合作博弈论的方法给出一种按照用户实际用电需求的能源消耗调度。

### 2.1 能源成本最小化

对于居民用户而言,参与能源消耗调度的目的是减少消耗的能源成本。要找到一种高效的能源消耗调度,使得所有用户的能源成本最小化,因此可以描述成以下的最优问题:

$$\min_{\mathbf{o}_n \in \mathcal{O}_n} \sum_{h \in H} C_h \left[ \sum_{n \in N} \sum_{a \in A_n} (o_{n,a}^h - y_{n,a}^h) \right] \quad (14)$$

根据前文假设,成本函数  $C_h$  是严格凸函数,所以式(14)属于严格凸优化问题,可以用凸函数的规划方法求解,比如内点法<sup>[15]</sup>。

### 2.2 电力消耗费用

假设  $b_n$  表示用户  $n$  一天所需支付的电力消耗费用,则所有用户总电费为:

$$\sum_{n \in N} b_n = \sum_{h \in H} C_h \left[ \sum_{n \in N} (o_{n,a}^h - y_{n,a}^h) \right] \quad (15)$$

即所有用户共需支付费用  $\sum_{n \in N} b_n$ ,而每个用户所支付费用和该用户总日用负荷成正比关系。因此对于任意用户  $n$  和  $m$ ,有如下关系式:

$$\frac{b_n}{b_m} = \frac{\sum_{h \in H} l_n^h}{\sum_{h \in H} l_m^h} \quad \forall n, m \in N \quad (16)$$

进一步有:

$$\sum_{m \in N} b_m = \sum_{m \in N} \left( b_n \frac{\sum_{h \in H} l_m^h}{\sum_{h \in H} l_n^h} \right) = b_n \frac{\sum_{m \in N} \sum_{h \in H} l_m^h}{\sum_{h \in H} l_n^h} \quad (17)$$

由此,用户  $n$  的电费计算得:

$$b_n = \Omega_n \sum_{h \in H} C_h \left[ \sum_{m \in N} \sum_{a \in A_m} (o_{m,a}^h - y_{m,a}^h) \right] \quad (18)$$

其中,

$$\Omega_n = \frac{\sum_{a \in A_n} E_{n,a}}{\sum_{m \in N} \sum_{a \in A_m} E_{m,a}} \quad (19)$$

$\Omega_n$  表示用户  $n$  消耗的电量相对于所有用户所消耗的总电量的比例。上式说明:在智能需求侧管理中,当各用户之间以合作模式进行博弈时,每个用户支付的电费不仅取决于该用户自身的用电量,也与其他用户的用电量有关。

当用户  $n$  在第  $h$  时段内光伏电池板所发电量满足家用负荷后,可将剩余电量  $z_n^h$  反馈给电网以获得一定收益。在本文中,光伏反向售给电网的单价设为:

$$c_h^d = a_h^d \sum_{n \in N} z_n^h + b_h^d \quad (20)$$

其中,  $a_h^d < 0$ ,  $b_h^d > 0$  为售电单价参数。则用户  $n$  售电收益为:

$$S_n = \Phi_n \sum_{h=\alpha_n}^{\beta_n} c_h^d \left( \sum_{n \in N} z_n^h \right) \quad (21)$$

其中,  $\Phi_n = \sum_{h=\alpha_n}^{\beta_n} z_n^h / \sum_{m \in N} \sum_{h=\alpha_m}^{\beta_m} z_m^h$ ,  $\alpha_n$  和  $\beta_n$  分别为用户  $n$  光伏电池板工作的起始时刻和结束时刻,将其记为  $H' = \{t \mid \alpha_n \leq t \leq \beta_n\}$ ,因此,式(18)中用户  $n$  支付的电费转化为:

$$b_n = \Omega_n \sum_{h \in H} C_h \left[ \sum_{m \in N} \sum_{a \in A_m} (o_{m,a}^h - y_{n,a}^h) \right] - S_n \quad (22)$$

### 2.3 博弈模型

居民用户之间的智能用电博弈模型建立如下:

- (1) 博弈参与者,集合  $N$  中所有的居民用户;
- (2) 策略空间,居民用户的负荷用电安排;
- (3) 收益函数,用户  $n$  的收益函数  $P_n(o_n; o_{-n})$

定义为:

$$P_n(o_n; o_{-n}) = -b_n \quad (23)$$

其中,  $o_{-n} \triangleq [o_1, \dots, o_{n-1}, o_{n+1}, \dots, o_N]$  为用户  $n$  以外的其他用户的负荷用电安排。

基于上述博弈模型中策略和收益函数的定义,所有用户将参与负荷调度以减少电费支出,直到该博弈达到纳什均衡点:

$$P_n(o_n^*; o_{-n}^*) \geq P_n(o_n; o_{-n}^*) \quad \forall n \in N \quad (24)$$

其中,  $[o_n^*, o_{-n}^*]$  为纳什均衡点。上式表明:一旦上述博弈达到均衡点,当任意一个用户再改变其负荷用电安排时,该用户不会从中获得更大收益。

### 3 算例仿真

算例中,考虑包含 1 个电力公司和 50 个居民用户的小型智能电网系统,并且每个用户都愿意参与 ECS。假设系统中用户有不可转移负荷(冰箱、照明等)和可转移负荷(洗衣机、电动汽车等)。由于每个用户家中不可转移负荷的类型和数目各不相同,因此假设每个用户不可转移负荷总量在一定范围内波动,如图 2 所示:每个用户不可转移负荷总量在上下限内随机产生,随机函数形式为  $x_u - (x_u - x_l) \times \text{rand}(1)$ ,其中  $x_u$  和  $x_l$  分别为用户不可转移负荷总量的上下限,  $\text{rand}(1)$  表示在  $[0, 1]$  间随机产生一个数。另外,假设用户均装有小型光伏电池板,既可以将发出的电能直接供负荷用,又可以将多余的电能反售给电网,光伏电池板工作时段为 6:00—17:00,其光伏典型出力根据文献[17]中预测数据所得。

根据图 2 用户不可转移负荷特性,将电价设置为峰谷平三个时段,成本函数中的参数设置为:0:00—6:00 时段:  $a_h$  为  $0.003 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})^2$ ,  $b_h$  为  $0.356 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})^2$ ;6:00—17:00 时段:  $a_h$  为  $0.004 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})^2$ ,  $b_h$  为  $0.744 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})^2$ ;17:00—22:00 时段:  $a_h$  为  $0.005 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})^2$ ,  $b_h$  为  $1.197 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})^2$ ;22:00—24:00 时段:  $a_h$  为  $0.004 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})^2$ ,  $b_h$  为  $0.744 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})^2$ 。分布式上网电价除了上网标杆电价外,政府还会给予新能源补贴。现阶段,光伏上网标杆电价一般取  $0.95 \text{ 元}/$

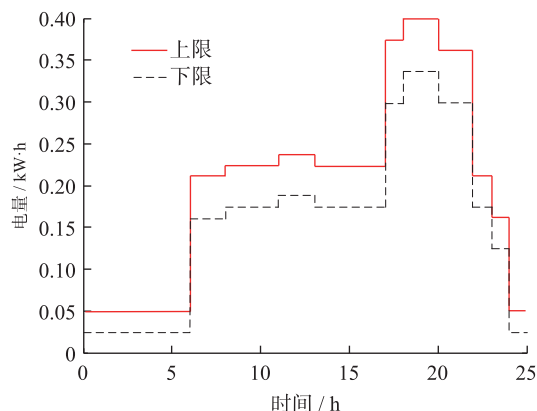


图 2 用户不可转移负荷

Fig.2 un-shiftable loads of users

( $\text{kW} \cdot \text{h}$ ),政府补贴电价为  $0.42 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ,因此  $b_h^d$  为  $1.37 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})^2$ ,  $a_h^d$  为  $-0.005 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})^2$ 。另外,假设每个用户家庭拥有洗衣机、洗碗机、热水器、电动汽车 4 种可转移负荷。其中,洗衣机可转移时段为 18:00—23:00 时段,日耗电  $0.45 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,持续时间 1 h;洗碗机可转移时段为 18:00—23:00,日耗电  $0.25 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,持续时间 0.5 h;热水器可转移时段为 18:00—22:00 以外的时段,用户使用时段为 18:00—22:00,日耗电  $2.75 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ;电动汽车可转移时段为 0:00—6:00 和 18:00—24:00,日耗电  $8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。基于上述数据,对所建模型进行仿真,对用户参与 ECS 前后情况进行分析。

图 3 为 50 个用户参与 ECS 后总费用随着迭代次数增加的变化趋势,经过 50 次迭代后费用稳定在 629.5 元,从而用户总费用从未优化前的 708.0 元逐渐降至 629.5 元。

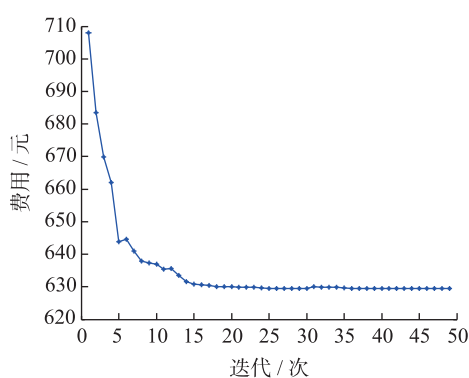


图 3 用户总费用收敛趋势

Fig.3 Convergence trend of users' total cost

图 4 为用户参与 ECS 前后总负荷的分布情况,其中负值表示用户反向卖给电网的电量。用户未参与优化时,用户负荷基本集中在 17:00—24:00 时段,而 0:00—6:00 负荷较少。用户参与优化后,可以在时段 6:00—17:00 工作的可转移负荷基本上都集中在 10:00—14:00 进行工作,因为该时段光伏出

力达到峰值,用户可以最大限度的使用其所发电能;可以在时段 17:00—24:00 和 0:00—6:00 工作的可转移负荷基本上都集中在 0:00—6:00 进行工作,因为该时段处于用电低谷,电价较其他时段便宜。用户在参与优化时通过光伏向电网所售电量明显高于用户未参与优化的售电量。另外,根据  $PAR$  计算可知,在未参与 ECS 时, $PAR$  为 2.48,而参与 ECS 时, $PAR$  为 2.10。因此,用户参与 ECS 不仅能够降低用户的用电费用还可以降低系统的  $PAR$ ,从而有利于电力网络系统的稳定运行。

用户负荷经过优化后,可以得到各用户可转移负荷的具体用电时段,本文以用户 1 的负荷安排为例,详见表 1。其中,数字 1 表示负荷处于开通状态,数字 0 表示负荷处于关闭状态。图 4 为用户参与 ECS 前后每小时负荷的分布情况,其中负值表示用户反向售电给电网。对应于图 4 用户的时用电量,图 5 为所有用户的时用电费用。从图中可以看出用户在峰时段费用最高,而在时段 10:00—15:00 由于光伏发电量满足家用负荷后仍存在剩余电量,从而通过售电获得一定的收益。50 个用户每天的用电费用如图 6 所示,从图 5 中可以看出用户未参与 ECS 优化前的平均费用约为 14.26 元,而参与优化后平均费用约为 12.59 元,因此用户人均费用降低约 12%。

表 1 用户 1 的负荷安排

Table 1 Energy consumption schedule of user 1

时段	洗衣机	洗碗机	热水器	电动汽车
1—6	0	0	0	1
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0
9—10	0	0	0	0
11—13	0	0	1	0
14—15	0	0	1	0
16—19	0	0	0	0
20	0	1	0	0
21—22	0	0	0	0
23	1	0	0	0
24	0	0	0	0

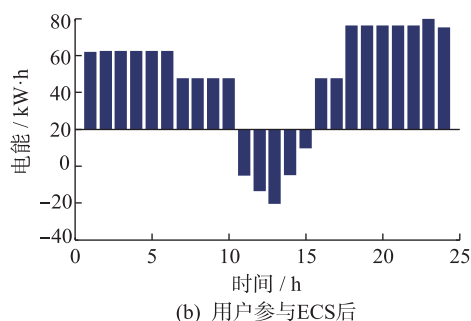
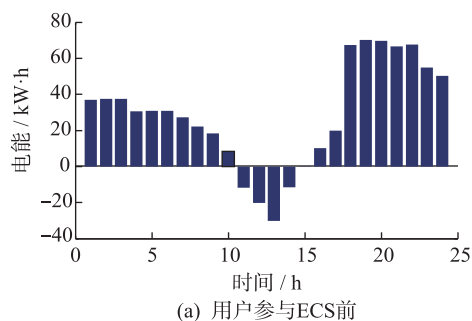


图 4 用户参与 ECS 前后每小时总负荷量

Fig.4 Users' energy consumption without/with ECS

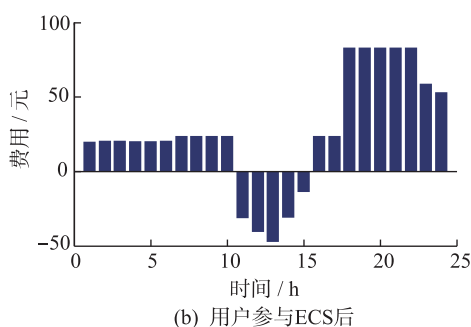
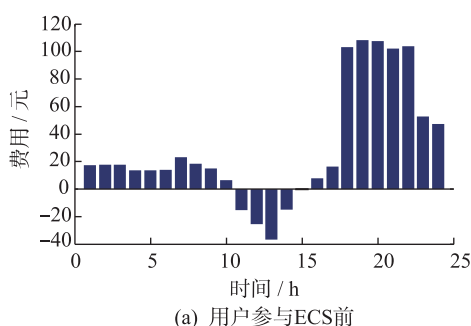


图 5 用户参与 ECS 前后每小时总费用

Fig.5 Users' energy cost without/with ECS

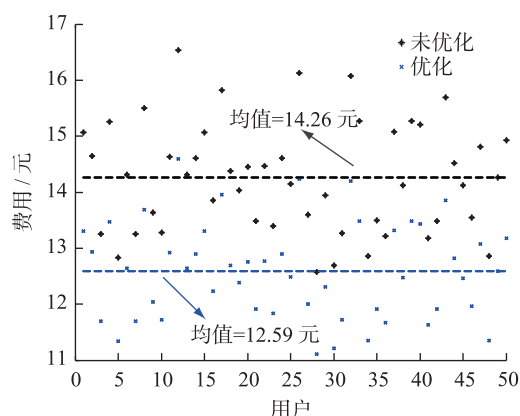


图 6 用户参与 ECS 前后日能源费用

Fig. 6 Users' daily energy cost without/with ECS

#### 4 结语

基于居民用户的负荷用电安排提出了一种合作博弈模型,并将光伏电池板以用户电能自发自用

的方式引入到博弈模型中。利用一个小型智能电网系统对所提博弈模型进行验证,分析了用户参与负荷调度的合作博弈对用户本身和电力公司的影响。仿真结果表明,当用户参与能源消耗调度后,不仅用户电费减少,总负荷的  $PAR$  也降低,负荷分布趋于平缓。此外,当用户利用光伏电池板所发电量的剩余部分回售时,由于其获得售电收益,支付的电费将进一步减少。

本文暂未结合用户的用电行为特征对可转移负荷进行调度安排,因此,在后续研究中将重点研究用户行为习惯对可转移负荷优化调度的影响。

#### 参考文献:

- [1] 申展, 胡辉勇, 雷金勇, 等. 分布式电源接入用户及用户侧微电网双向电能计量问题[J]. 南方电网技术, 2015, 9(4): 14-21.  
SHEN Zhan, HU Huiyong, LEI Jinyong, et al. Bidirectional metering issues of user-side microgrid and user with distributed generation [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(4): 14-21.
- [2] 张沈习, 李珂, 程浩忠, 等. 考虑相关性的间歇性分布式电源选址定容规划[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 53-58.  
ZHANG Shenxi, LI Ke, CHENG Haozhong, et al. Optimal siting and sizing of intermittent distributed generator considering correlations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 53-58.
- [3] 吴桥, 卢树峰, 杨世海, 等. 需求侧响应条件下的家庭用电管理研究[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(05): 28-31.  
WU Qiao, LU Shufeng, YANG Shihai, et al. Research on home energy management under the condition of demand-side response [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(05): 28-31.
- [4] SAMADI P, MOHSENIAN-RAD H, SCHOBER R, et al. Advanced demand side management for the future smart grid using mechanism design [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1170-1180.
- [5] 梁甜甜, 高赐威, 王蓓蓓, 等. 智能电网下电力需求侧管理应用[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 81-85.  
LIANG Tiantian, GAO Ciwei, WANG Beibei, et al. Applications of demand side management in smart grid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 81-85.
- [6] ZHANG X. Optimal scheduling of critical peak pricing considering wind commitment [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(2): 637-645.
- [7] DENG R, YANG Z, CHEN J, et al. Residential energy consumption scheduling: A coupled-constraint game approach [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(3): 1340-1350.
- [8] 何永秀, 王冰, 熊威, 等. 基于模糊综合评价的居民智能用电行为分析与互动机制设计[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 247-252.  
HE Yongxiu, WANG Bing, XIONG Wei, et al. Analysis of residents' smart electricity consumption behavior based on fuzzy synthetic evaluation and the design of interactive mechanism [J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 247-252.
- [9] 卢强, 陈来军, 梅生伟, 等. 博弈论在电力系统中典型应用及若干展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5009-5017.  
LU Qiang, CHEN Laijun, MEI Shengwei, et al. Typical applications and prospects of game theory in power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5009-5017.
- [10] YANG P, TANG G, NEHORIA A. A game-theoretic approach for optimal time-of-use electricity pricing [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 884-892.
- [11] MAHARJAN S, ZHU Q, ZHANG Y, 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.
- [12] CHAI B, CHEN J, YANG Z, et al. Demand response management with multiple utility companies: A two-level game approach [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 722-731.
- [13] SOLA M, VITETTAG M. Demand-side management in a smart microgrid: A distributed approach based on Bayesian game theory [C] // 2014 IEEE International Conference on Smart Grid Communications, Venice, Italy, November 3-6, 2014: 656-661.
- [14] MISRA S, BERA S, OJHA T, et al. ENTICE: Agent-based energy trading with incomplete information in the smart grid [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2015, 55: 202-212.
- [15] EKSIN C, DELIC H, RIBEIRO A, et al. Demand response management in smart grids with heterogeneous consumer preferences [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(6): 3082-3094.
- [16] GAO B, ZHANG W, TANG Y, et al. Game-theoretic energy management for the residential users with dischargeable plug-in electric Vehicles [J]. Energies, 2014, 7(11): 7499-7518.
- [17] KALLEL R, BOUKETTAYA G, KRICHEN L. Demand side management of household appliances in stand-alone hybrid photovoltaic system [J]. Renewable Energy, 2015, 81: 123-135.

#### 作者简介:



陈彬

陈彬(1982—),男,福建福州人,高级工程师,主要从事配电自动化、配电网运行状态在线评估、分布式能源在配电网中的应用、电力市场工作(E-mail: chenbin350007@163.com)。

(下转第 65 页)

## Combined Optimization Dispatching of Multi-source Hybrid Power Bases Considering the Time-space Complementary Characteristics

XIA Xinhua<sup>1</sup>, GAO Zonghe<sup>2</sup>, LI Hengqiang<sup>3</sup>, XU Fan<sup>2</sup>, WANG Gang<sup>2</sup>

(1. Power Economic Research Institute, State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310008, China;

2.NARI Group Corporation, Nanjing 211106, China;

3. State Grid Sichuan Province Power Company Maintenance Branch, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** In order to promote the power generation absorption of new energy like wind/light energy, and realize the maximization of pitch peak benefit, economic benefit and environmental protection benefit of combined optimization dispatching of multi-source hybrid power bases, based on the analysis of time-space characteristics of multi-source hybrid power, we put forward a combined optimization dispatching model of multi-source hybrid power that takes the minimum of operating cost, wind curtailment volume, light curtailment volume and water curtailment volume of thermal power unit as the optimization goal, and provide a reference method for the sending system combined optimization dispatching of multi-source hybrid power bases under the background of ultra-high voltage power transmission. The example takes multi-source hybrid power bases in the Xinjiang region and in the eastern part of a region as study object, which have significant temporal and spatial differences. Through the calculation and analysis of practical examples, the model is verified theoretically can promote the absorption of new energy and reduce the operation cost of thermal power units.

**Key words:** multi-source hybrid power bases; time-space complementary characteristics; renewable integration; combined dispatching; mixed-integer programming

(编辑 方 晶)

(上接第 34 页)

## Cooperative Game-based Energy Consumption Technology Considering Household Distributed Generators

CHEN Bin

(Electric Power Research Institute, Fujian Electric Power Company Limited, Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** In smart grid, residential users who participate in demand side management can schedule household energy consumption appropriately according to the real-time energy price. This paper proposes a kind of energy consumption technology based on cooperative game by considering the participation of household distributed generators. Based on the presented power consumption model, energy cost model, and household load control model, energy consumption among residential users is formulated as a cooperative game; where players are residential users and strategies are their daily consumption schedule. The energy cost of all users is minimized at Nash equilibrium solution. Simulation result shows that users' cost is decreased and further decreased with distributed generators when users participate in energy consumption scheduling with game approach.

**Key words:** demand side management; cooperative game; energy consumption scheduling; household distributed generators

(编辑 方 晶)