

从用户角度出发的开放微网资源规划及效益分析

陈洋洋, 陆宁, 侯慧, 屈守江
(武汉理工大学 自动化学院, 湖北 武汉 430070)

摘要:为打破传统微网的垄断,提出开放微网能源调度模型,以给予用户在任一时刻选择任一能源商品运营商的权利;为更好地分析用户用能行为的改变,基于用户消费心理研究其消费行为,创建不同类型用户响应模型,以满足不同用户的用能需求;根据系统调度等约束条件,以开放微网收益最大和用户用能成本最小为目标,建立开放微网多目标资源规划模型,并采用非支配排序遗传算法进行求解。算例仿真结果表明所提模型可有效提升开放微网的收益,降低用户用能成本。

关键词:开放微网;用户角度;选择偏向;价格敏感度;非支配排序遗传算法

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202205044

0 引言

近年来,随着全球生态环境的不断恶化和不可再生能源的日益枯竭,微网因能吸纳并最大化利用风能、太阳能等可再生能源发电而得到了快速发展^[1-2]。同时,随着我国电力市场改革进程的不断推进,在售电侧引入竞争机制后,电价体系亟需完善^[3]。在竞争日益激烈的环境中,如何提升微网经济效益、调动和提升用户参与的积极性以及扩大在用户商品市场中的占有率,已成为行业内关注的焦点问题。

在提升微网经济效益方面:文献[4]从规划和运行2个层面梳理影响微网经济效益的主要因素,并将各种影响因素的重要程度通过影响因子进行量化,建立微网的经济效益优化模型;文献[5]基于消费者需求和供电成本异质性,构造负荷率分档用户的用电消费细分市场,应用边际成本定价理论构建计及负荷率分档的峰谷分时电价模型,以提升微网经济效益;文献[6]致力于电价套餐的设计,针对各电力用户因用电差异性而需要不同的电价套餐,采用K-means算法对电力用户日负荷曲线的负荷特征进行聚类,通过嫡权法计算用户效用,并在此基础上应用演化博弈理论计算用户的套餐选择比例,建立微网的经济效益优化模型;文献[7]在文献[6]的基础上设计考虑淡旺季用户效用的居民用电套餐,通过对用户淡旺季平均用电量建立效用函数,选择效用最大的套餐,得到用户选择各种套餐的概率,实现零售商收益最大。虽然文献[4-7]的商品售卖策略是基于大部分用户在大部分时刻满意,但仍有部分用户不满意某些时刻的定价,而不得不使用其商品,形成了一定程度的商品垄断。

需求响应DR(Demand Response)技术能够充分

调动用户侧资源,引导用户主动参与电力市场的运营与调控,且其能够增加可再生能源的消纳量^[8-9]。文献[10]对常见居民用户负荷的DR特性进行分类,提出利用家庭能量管理系统响应实时电价的方法。文献[11]提出利用分段线性函数来表征削减负荷量所需的成本,根据特定时段内各种能源用量对应的边际成本确定鼓励用户参与DR的价格。文献[12]使具有能耗高、工作时间灵活的工业用户签订协议来参与电网优化调度,在可再生能源出力较大且系统负荷低谷时段,通过负荷控制中心向签订协议的工业用户发出调度指令,调配用户的负荷转移量并向用户提供相应的补偿,但其并未考虑用户是否会参与DR策略这个不确定性因素。文献[13]针对DR策略中用户参与的不确定性因素,通过将用户参与度和电网侧激励间的关系用不确定性模型来表征,构建计及用户参与不确定性的DR策略优化方法。文献[10-13]均只考虑价格型DR或激励型DR单独对优化调度的影响,而未考虑两者对调度产生的共同影响。文献[14]在微网优化调度问题中同时引入价格型DR和激励型DR,基于虚拟电厂成本函数的负荷削减量函数,建立价格型DR和激励型DR的等效模型,在价格型DR满足削减量约束和削减爬坡约束,激励型DR满足削减量约束、削减爬坡约束、削减次数约束和削减时间约束等约束条件下,构建DR参与的微网优化调度模型,以提升微网的经济性。然而,居民用户的用能行为与其意愿和生活品质紧密相连,DR通过聚合用户负荷引导用户参与微网调度运行,会在很大程度上违背用户意愿,使其生活品质下降。

上述研究均是从微网角度进行资源规划及优化调度,而本文则从用户角度出发,针对如何给予用户在任一时刻选择任一能源商品运营商的权力,并且在不改变用户意愿和生活品质的前提下提升微网的收益以及降低用户的用能成本,提出充分给予用户

选择权的开放微网能源调度模型,基于用户消费心理研究其消费行为,建立不同类型用户响应模型,在此基础上,构建以微网收益最大和用户用能成本最小为目标的开放微网多目标资源规划模型,并通过算例对所建模型进行验证。

1 开放微网能源调度模型

1.1 调度模型

微网以可再生能源为主,其终端输出电力、氢气、天然气等多种形式能源,是实现多种能源利用、存储及相互转换的小型综合能源互联系统^[15]。但传统微网在售卖商品以及市场运营与调控方面存在不足,为此,本文从用户角度出发,考虑用户自身的利益需求和选择倾向,提出开放微网能源调度模型,充分给予用户在任一时刻选择任一能源商品运营商的权力,以完善市场竞争机制。模型拓扑结构如图1所示。

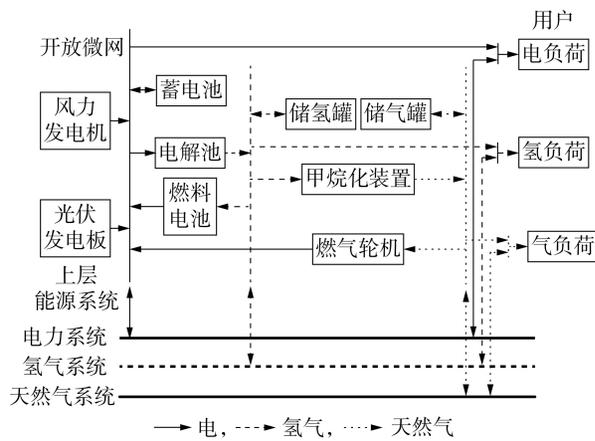


图1 开放微网能源调度模型

Fig.1 Energy scheduling model of open microgrid

在开放微网能源调度模型中,用户根据不同能源商品运营商的能源商品价格,考虑自身选择倾向和价格敏感度,可在任一时刻选择任一能源商品运营商,在保证自身意愿和生活品质的前提下,降低用能成本,满足自身利益诉求。用户自由选择模型如式(1)所示。

$$u_i(t) = \begin{cases} 1 & t=1, 2, \dots, 24; i \in \{\text{电力, 氢气, 天然气}\} \\ 0 & \end{cases} \quad (1)$$

式中: $u_i(t)$ 表示 t 时刻用户选择的能源商品 i 的运营商是开放微网还是上层能源系统,其值为1时,表示选择开放微网,其值为0时,表示选择上层能源系统。

开放微网在充分考虑用户利益诉求和选择倾向的前提下,通过制定分时电力、氢气、天然气价格调整用户负荷,根据上层能源系统的分时电力、氢气、天然气价格,优化与上层能源系统的能源交互,使得自身收益最大,同时,通过调整自身储能状态以及优

化各设备的容量和功率,使得自身成本最小,以满足自身利益诉求。开放微网和用户的利益诉求模型图如附录A图A1所示。

1.2 具体实施方法

随着5G移动通信技术和智能计量设备的不断完善,用户主动参与用电调度优化对微网的运行和发展意义重大。本文中开放微网收集用户实时选择的能源商品运营商信息,集卖方和服务方为一体,方便用户用能及降低用能成本。以电力商品为例,为节省铺设线路的成本,同时为方便用户使用,减少用户操作步骤,在用户与开放微网之间只需铺设1条线路,在线路末端安装2个开关端口,其中一个与开放微网连接,另一个与上层电力系统连接,用户在任一时刻可通过手机APP对电力商品的运营商进行选择,开放微网实时收集用户选择的电力商品运营商信息,并根据信息实时切换供电端口,用户用电线路实施示意图如附录A图A2所示。同时,为方便用户缴费,用户可直接在开放微网处缴纳使用开放微网能源商品的费用和使用上层电力系统能源商品的费用,开放微网通过收集用户选择的能源商品运营商信息,分别计算用户使用开放微网和上层电力系统能源商品的份额,每隔一定时间与上层电力系统结算用户使用上层电力系统能源商品份额产生的费用。

2 用户分类和DR模型

电力、氢气、天然气是能源商品,能源商品交换依靠价格,要推进能源市场健康发展须充分发挥能源商品价格的调控作用^[16],这就需要有一个科学的微网需求价格关系模型来研究用户对能源商品价格的响应,因此,研究一种准确、精细的用户类型及DR特征的计算方法是十分必要的^[17]。

2.1 用户分类

在开放微网能源调度模型中给予用户自由选择能源商品运营商的权利后,用户的消费心理将发生变化,用户开始注重能源商品的运营商及其价格。为了更好地分析用户用能行为的改变,本文从用户角度出发,根据用户对能源商品运营商的选择偏向和对能源商品价格敏感度的不同,将用户划分为第I类型、第II类型、第III类型和第IV类型这4类,以满足不同用户的用能需求。用户分类如表1所示。

表1 用户分类

Table 1 Classification of users

价格敏感度	用户类型		
	偏向上层能源	无偏向	偏向开放微网
较高	第I类型	第I类型	第I类型
较低	第IV类型	第III类型	第II类型

为了便于对选择偏向、价格敏感度进行模糊处理,本文先对选择偏向、价格敏感度的模拟数值进行归一化处理,如式(2)所示。

$$\begin{cases} f_{\text{Bias}} = \frac{b - b_{\min}}{b_{\max} - b_{\min}} \\ f_{\text{Sens}} = \frac{s - s_{\min}}{s_{\max} - s_{\min}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_{Bias} 、 f_{Sens} 分别为选择偏向、价格敏感度归一化之后的相对值; b 、 s 分别为选择偏向、价格敏感度的模拟值; b_{\max} 、 s_{\max} 和 b_{\min} 、 s_{\min} 分别为选择偏向、价格敏感度模拟值的最大值和最小值。

模糊理论常用于解决不确定性问题,本文选取如图 2 所示的梯形模糊隶属度函数作为选择偏向、价格敏感度的模糊隶属度函数。图中: $f_{\text{Bias}1}$ 、 $f_{\text{Bias}3}$ 分别为用户中无偏向、偏向开放微网的最小相对值; $f_{\text{Bias}2}$ 、 $f_{\text{Bias}4}$ 分别为用户中偏向上层能源系统、无偏向的最大相对值; $f_{\text{Sens}1}$ 、 $f_{\text{Sens}2}$ 分别为用户中较高价格敏感度的最小相对值、较低价格敏感度的最大相对值。

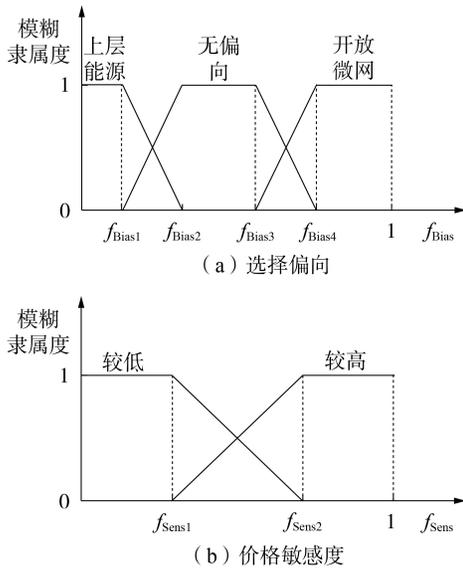


图 2 选择偏向、价格敏感度的模糊隶属度函数
Fig.2 Fuzzy membership function of selection bias and price sensitivity

2.2 用户的 DR 模型

1) 第 I 类型用户。

当用户对能源商品的价格敏感度较高时,为降低自身成本,其在选择能源商品运营商会优先使用价格低廉的能源商品,因此,第 I 类型用户在选择能源商品运营商会仅考虑能源商品价格的高低,而不考虑自身对能源商品运营商的偏向。

t 时刻第 I 类型用户选择能源商品运营商的模型为:

$$u_I(t) = \begin{cases} 1 & p_{\text{OM}}(t) < p_{\text{UES}}(t) \\ 0 & p_{\text{OM}}(t) \geq p_{\text{UES}}(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $u_I(t)$ 表示 t 时刻第 I 类型用户选择的能源商品运营商是开放微网还是上层能源系统,其值为 1 时,表示选择开放微网,其值为 0 时,表示选择上层能源系统; $p_{\text{OM}}(t)$ 、 $p_{\text{UES}}(t)$ 分别为 t 时刻开放微网、上层能源系统给出的能源商品价格。

t 时刻开放微网从第 I 类型用户获得的能源商品份额为:

$$S_{\text{OM-I}}(t) = u_I(t) \int_0^1 \int_{f_{\text{Sens}1}}^1 p(f_{\text{Bias}}, f_{\text{Sens}}) F_{\text{SensH}} df_{\text{Bias}} df_{\text{Sens}} \quad (4)$$

$$F_{\text{SensH}} = \begin{cases} 0 & 0 \leq f_{\text{Sens}} \leq f_{\text{Sens}1} \\ \frac{f_{\text{Sens}} - f_{\text{Sens}1}}{f_{\text{Sens}2} - f_{\text{Sens}1}} & f_{\text{Sens}1} < f_{\text{Sens}} \leq f_{\text{Sens}2} \\ 1 & f_{\text{Sens}2} < f_{\text{Sens}} \leq 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $S_{\text{OM-I}}(t)$ 为 t 时刻开放微网从第 I 类型用户获得的能源商品份额; $p(f_{\text{Bias}}, f_{\text{Sens}})$ 为选择偏向相对值为 f_{Bias} 、价格敏感度相对值为 f_{Sens} 时的概率; F_{SensH} 为较高价格敏感度的模糊隶属度函数。

2) 第 II 类型用户。

由于在多数情况下开放微网的能源商品价格低于上层能源系统,因此,部分用户在选择能源商品的运营商时会偏向于开放微网。同时,由于电力、氢气、天然气是用户生产生活的重要基础性资源,第 II 类型用户仅能够容忍一定程度的能源商品价格变动,而不希望能源商品价格波动过大以及变化过于频繁。

t 时刻第 II 类型用户选择能源商品运营商的模型为:

$$u_{II}(t) = \begin{cases} 1 & \bar{p}_{\text{OM}} \leq \bar{p}_{\text{UES}} \text{ 且 } d_{\text{OM}}(t) \leq d_{\text{OM-UES}}(t) \\ 0 & \bar{p}_{\text{OM}} > \bar{p}_{\text{UES}} \text{ 或 } d_{\text{OM}}(t) > d_{\text{OM-UES}}(t) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \bar{p}_{\text{OM}} = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} p_{\text{OM}}(t) \\ \bar{p}_{\text{UES}} = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} p_{\text{UES}}(t) \\ d_{\text{OM}}(t) = \max(p_{\text{OM}}(t) - \bar{p}_{\text{OM}}, 0) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $u_{II}(t)$ 表示 t 时刻第 II 类型用户选择的能源商品运营商是开放微网还是上层能源系统,其值为 1 时,表示在多数情况下开放微网的能源商品价格低于上层能源系统且其价格波动低于第 II 类型用户可接受的价格波动上限,用户选择开放微网,其值为 0 时,表示在多数情况下开放微网的能源商品价格不低于上层能源系统或其价格波动高于第 II 类型用户可接受的价格波动上限,用户选择上层能源系统; \bar{p}_{OM} 为 1 d 内开放微网能源商品价格的平均值; \bar{p}_{UES}

为1 d内上层能源系统能源商品价格的平均值; $d_{OM}(t)$ 为 t 时刻开放微网能源商品价格的波动; $d_{OM-Uers}(t)$ 为 t 时刻第II类型用户可接受的能源商品价格波动,是各时刻取值之和为1的分布函数,其示意图如附录A图A3所示。

t 时刻开放微网从第II类型用户获得的能源商品份额为:

$$S_{OM-II}(t) = u_{II}(t) \int_{f_{Bias3}}^1 \int_{f_{Sens2}}^{f_{Sens1}} p(f_{Bias}, f_{Sens}) \times F_{BiasOM} F_{SensL} df_{Bias} df_{Sens} \quad (8)$$

$$F_{SensL} = \begin{cases} 1 & 0 \leq f_{Sens} \leq f_{Sens1} \\ \frac{f_{Sens} - f_{Sens2}}{f_{Sens1} - f_{Sens2}} & f_{Sens1} < f_{Sens} \leq f_{Sens2} \\ 0 & f_{Sens2} < f_{Sens} \leq 1 \end{cases} \quad (9)$$

$$F_{BiasOM} = \begin{cases} 0 & 0 \leq f_{Bias} \leq f_{Bias3} \\ \frac{f_{Bias} - f_{Bias3}}{f_{Bias4} - f_{Bias3}} & f_{Bias3} < f_{Bias} \leq f_{Bias4} \\ 1 & f_{Bias4} < f_{Bias} \leq 1 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $S_{OM-II}(t)$ 为在 t 时刻开放微网从第II类型用户获得的能源商品份额; d_{OMmin} 、 d_{OMmax} 分别为1 d内开放微网能源商品价格的最小、最大波动,分别如式(11)、(12)所示; F_{SensL} 为较高价格敏感度的模糊隶属度函数; F_{BiasOM} 为用户中偏向开放微网的模糊隶属度函数。

$$d_{OMmin} = \min d_{OM}(t) \quad (11)$$

$$d_{OMmax} = \max d_{OM}(t) \quad (12)$$

3) 第III类型用户。

第III类型用户选择的能源商品运营商较为固定,不会频繁更改,此时,决定开放微网能源商品份额的因素是其能源商品对用户的吸引力,吸引力越大则其能源商品份额越大。

t 时刻第III类型用户选择能源商品运营商的模型为:

$$u_{III}(t) = \begin{cases} 1 & A_{OM}(t) \geq A_{UES}(t) \\ 0 & A_{OM}(t) < A_{UES}(t) \end{cases} \quad (13)$$

式中: $u_{III}(t)$ 表示 t 时刻第III类型用户选择的能源商品运营商是开放微网还是上层能源系统,其值为1时,表示 t 时刻开放微网能源商品的吸引力高于上层能源系统能源商品的吸引力,用户选择开放微网,其值为0时,表示在 t 时刻开放微网能源商品的吸引力低于上层能源系统能源商品的吸引力,用户选择上层能源系统; $A_{OM}(t)$ 、 $A_{UES}(t)$ 分别为 t 时刻开放微网、上层能源系统同类能源商品的吸引力。

根据吸引力模型, t 时刻开放微网从第III类型用户获得的能源商品份额为:

$$S_{OM-III}(t) = \frac{A_{OM}(t)}{A_{OM}(t) + A_{UES}(t)} \times \int_{f_{Bias1}}^{f_{Bias4}} \int_0^{f_{Sens2}} p(f_{Bias}, f_{Sens}) F_{BiasUn} F_{SensL} df_{Bias} df_{Sens} \quad (14)$$

$$F_{BiasUn} = \begin{cases} 0 & 0 \leq f_{Bias} \leq f_{Bias1}, f_{Bias4} < f_{Bias} \leq 1 \\ \frac{f_{Bias} - f_{Bias1}}{f_{Bias2} - f_{Bias1}} & f_{Bias1} < f_{Bias} \leq f_{Bias2} \\ 1 & f_{Bias2} < f_{Bias} \leq f_{Bias3} \\ \frac{f_{Bias} - f_{Bias4}}{f_{Bias3} - f_{Bias4}} & f_{Bias3} < f_{Bias} \leq f_{Bias4} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $S_{OM-III}(t)$ 为 t 时刻开放微网从第III类型用户获得的能源商品份额; F_{BiasUn} 为用户中无偏向的模糊隶属度函数。

在满足逻辑一致性的多种能源商品份额模型中,乘法竞争互动模型相对比较合理^[16],如式(16)所示。

$$A(t) = e^{\varepsilon_0} \prod_{t=1}^{24} (1 + \mu(t)) p^{\varepsilon(t)}(t) \quad (16)$$

式中, $A(t)$ 为 t 时刻能源商品对用户的吸引力; $\varepsilon(t)$ 、 ε_0 分别为 t 时刻能源商品对用户吸引力的影响系数、固定影响系数; $p(t)$ 、 $\mu(t)$ 分别为 t 时刻能源商品的价格、价格误差项。将式(16)代入式(14)可得附录A式(A1)。

在现实生活中, t 时刻能源商品对于用户的吸引力不仅与该时刻能源商品价格有关,还与相邻时刻 $t - \Delta t$ (Δt 为2个调度时刻之间的时间间隔)能源商品的价格有关,因此, t 时刻能源商品对用户的吸引力可表示为:

$$\varepsilon_{OM}(t) = \alpha \frac{p_{UES}(t) - p_{OM}(t)}{p_{UES}(t)} + \beta \frac{p_{OM}(t - \Delta t) - p_{OM}(t)}{p_{OM}(t - \Delta t)} \quad (17)$$

$$\alpha + \beta = 1 \quad (18)$$

式中: α 、 β 分别为能源商品的价格权重、价格变动权重。

4) 第IV类型用户。

可再生能源的随机性、波动性及不确定性,可能导致电压波动和闪变、频率偏差、谐波、供应不足等问题,这导致第IV类型用户对开放微网的能源商品质量信任度较低,其在选择能源商品运营商时倾向于上层能源系统,但第IV类型用户也会在能源商品的低廉价格和质量之间权衡,若要争取该类型用户的能源商品份额,则开放微网需给出更低的价格。

t 时刻第IV类型用户选择能源商品运营商的模型为:

$$u_{IV}(t) = \begin{cases} 1 & p_{OM}(t) \leq p_{UES}(t) \\ 0 & p_{OM}(t) > p_{UES}(t) \end{cases} \quad (19)$$

式中: $u_{IV}(t)$ 表示 t 时刻第IV类型用户选择的能源商

品运营商是开放微网还是上层能源系统,其值为 1 时,表示 t 时刻开放微网的能源商品价格低于第 IV 类型用户可接受的价格上限,用户选择开放微网,其值为 0 时,表示 t 时刻开放微网的能源商品价格高于第 IV 类型用户可接受的价格上限,用户选择上层能源系统; $p_{\text{Uers}}(t)$ 为 t 时刻第 IV 类型用户可接受的能源商品价格上限,是各时刻取值之和为 1 的分布函数,其示意图如附录 A 图 A4 所示。

t 时刻开放微网从第 IV 类型用户获得的能源商品份额为:

$$S_{\text{OM-IV}}(t) = u_{\text{IV}}(t) \kappa_{\text{IV}}(t) \int_0^{f_{\text{Bias2}}} \int_0^{f_{\text{Sens2}}} p(f_{\text{Bias}}, f_{\text{Sens}}) \times F_{\text{BiasUES}} F_{\text{SensL}} d f_{\text{Bias}} d f_{\text{Sens}} \quad (20)$$

$$\kappa_{\text{IV}}(t) = \int_{\frac{p_{\text{OM}}(t) - \min p_{\text{OM}}}{\max p_{\text{OM}} - \min p_{\text{OM}}}}^1 d p_{\text{IV}} \quad (21)$$

$$F_{\text{BiasUES}} = \begin{cases} 1 & 0 \leq f_{\text{Bias}} \leq f_{\text{Bias1}} \\ \frac{f_{\text{Bias}} - f_{\text{Bias2}}}{f_{\text{Bias1}} - f_{\text{Bias2}}} & f_{\text{Bias1}} < f_{\text{Bias}} \leq f_{\text{Bias2}} \\ 0 & f_{\text{Bias2}} < f_{\text{Bias}} \leq 1 \end{cases} \quad (22)$$

式中: $S_{\text{OM-IV}}(t)$ 为 t 时刻开放微网从第 IV 类型用户获得的能源商品份额; $\kappa_{\text{IV}}(t)$ 为 t 时刻开放微网的价格能够吸引第 IV 类型用户的占比; p_{IV} 为第 IV 类型用户选择开放微网时能源商品的价格; F_{BiasUES} 为用户中偏向上层能源系统的模糊隶属度函数。

综合第 I—IV 类型用户的 DR 模型, t 时刻开放微网获得的市场份额为:

$$S_{\text{OM}}(t) = S_{\text{OM-I}}(t) + S_{\text{OM-II}}(t) + S_{\text{OM-III}}(t) + S_{\text{OM-IV}}(t) \quad (23)$$

式中: $S_{\text{OM}}(t)$ 为 t 时刻开放微网获得的能源商品份额。

t 时刻上层能源系统获得的能源商品份额 $S_{\text{UES}}(t)$ 为:

$$S_{\text{UES}}(t) = 1 - S_{\text{OM}}(t) \quad (24)$$

3 开放微网多目标资源规划及效益模型

3.1 目标函数

开放微网能源调度模型以开放微网的收益最大化以及用户的用能成本最小化为目标,如式(25)、(26)所示。

$$R_1 = \max(R_e + R_h + R_g - C_{\text{OM}}) \quad (25)$$

$$C_{\text{Uers}} = \min(C_{e-\text{Uers}} + C_{h-\text{Uers}} + C_{g-\text{Uers}}) \quad (26)$$

式中: R_1 、 R_e 、 R_h 、 R_g 分别为开放微网的总收益、售电力收益、售氢气收益、售天然气收益; C_{OM} 为开放微网的总成本; C_{Uers} 、 $C_{e-\text{Uers}}$ 、 $C_{h-\text{Uers}}$ 、 $C_{g-\text{Uers}}$ 分别为用户的总用能成本、购电力成本、购氢气成本、购天然气成本。

1) 开放微网的收益。

开放微网售卖电力、氢气、天然气能源商品的收

益 R (R 为 R_e 、 R_h 、 R_g 的通用表达式) 为开放微网售卖给用户得到的收益 R_{User} 和售卖给上层能源系统得到的收益 R_{UES} 之和,如式(27)所示。

$$R = R_{\text{User}} + R_{\text{UES}} \quad (27)$$

$$R_{\text{User}} = \sum_{t=1}^{24} p_{\text{OM}}(t) S_{\text{OM}}(t) P_L(t) \quad (28)$$

$$R_{\text{UES}} = \sum_{t=1}^{24} p_{\text{OM-UES}}(t) \max(P_{\text{UES}}(t), 0) - \sum_{t=1}^{24} |p_{\text{UES}}(t) \min(P_{\text{UES}}(t), 0)| \quad (29)$$

式中: $P_L(t)$ 为 t 时刻用户使用能源商品的总量; $p_{\text{OM-UES}}(t)$ 为 t 时刻开放微网的能源商品并网价格; $P_{\text{UES}}(t)$ 为 t 时刻开放微网与上层能源系统能源商品的交互功率(或流量)。

2) 开放微网的总成本。

开放微网的总成本 C_{OM} 包括设备成本 C_{Equ} 和运维成本 C_{Ope} ,如式(30)所示。

$$C_{\text{OM}} = C_{\text{Equ}} + C_{\text{Ope}} \quad (30)$$

3) 用户的用能成本。

t 时刻用户可自由选择电力、氢气、天然气能源商品的运营商为开放微网或上层能源系统, $C_{e-\text{Uers}}$ 、 $C_{h-\text{Uers}}$ 、 $C_{g-\text{Uers}}$ 的通用表达式 C 如式(31)所示。

$$C = \sum_{t=1}^{24} (S_{\text{OM}}(t) P_L(t) p_{\text{OM}}(t) + S_{\text{UES}}(t) P_L(t) p_{\text{UES}}(t)) \quad (31)$$

3.2 约束条件

在图 1 所示系统中,开放微网通过上层电力系统、可再生能源发电设备(主要为风力发电机和光伏发电板)、蓄电池、燃料电池以及燃气轮机发电为用户提供电负荷,通过上层氢气系统、电力制氢以及储氢罐等设备为用户提供氢负荷,通过上层天然气系统、甲烷化装置、储气罐等设备为用户提供气负荷,电力、氢气、天然气的能量守恒约束如附录 A 式(A2)—(A4)所示。

3.3 求解过程

非支配排序遗传算法 NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II) 是一种建立在帕累托最优解理论上的多目标智能优化算法,具有运行速度快和解集收敛性好的优点^[17],本文利用该算法实现从用户角度出发的开放微网资源规划及效益分析问题的求解,求解流程图如附录 A 图 A5 所示。

在利用 NSGA-II 获得非劣解集之后,本文参考文献[18]中的满意度,帮助开放微网做出最终决策。开放微网对第 i 个非劣解 x_i 中第 j 个目标函数的满意度 $\mu_i(j)$ 为:

$$\mu_i(j) = \frac{f_j^i - f_{j\min}^i}{f_{j\max}^i - f_{j\min}^i} \quad (32)$$

式中: f_j^i 、 $f_{j\max}^i$ 、 $f_{j\min}^i$ 分别为第 i 个非劣解 x_i 中第 j 个目

标函数的值及其最大值、最小值。

开放微网对第*i*个非劣解 x_i 的综合满意度 μ_i 为:

$$\mu_i = \frac{\sum_{j=1}^m \mu_i(j)}{\sum_{l=1}^n \sum_{j=1}^m \mu_l(j)} \quad (33)$$

式中: m 、 n 分别为非劣解、目标函数的个数。 μ_i 的值越大,第*i*个非劣解 x_i 越优。

开放微网能源调度模型、不同类型用户DR模型、开放微网多目标资源规划模型这3种模型之间的传递关系如附录A图A6所示。

4 仿真算例与结果分析

4.1 参数设置

算例分析使用江苏省大丰市的相关数据,以验证本文所提给予用户选择的开放微网能源调度模型和基于用户消费心理的不同类型用户DR模型的有效性和优越性。仿真中将1d划分为24个时段,即时间间隔 $\Delta t=1$ h。该区域某日的风速、光照强度以及基础电力、氢气、天然气负荷数据分别如附录B图B1、B2所示。开放微网中各设备成本、寿命和运维费用如附录B表B1所示^[19]。上层能源系统的电力、氢气、天然气能源商品的分时价格机制如附录B图B3所示。用户消费心理(对能源商品运营商的选择偏向和对能源商品的价格敏感度)的概率密度二维热图如附录B图B4—B6所示。

4.2 结果分析

为验证本文所提模型的有效性和合理性,设置如下3种方案进行对比分析:方案1,用户不能进行电力、氢气、天然气能源商品运营商的选择,传统微网获得用户的全部电力、氢气、天然气负荷;方案2,用户能够对电力、氢气、天然气能源商品的运营商进行选择,使用离散吸引力模型作为用户DR模型;方案3,用户能够对电力、氢气、天然气能源商品的运营商进行选择,使用基于用户消费心理研究用户消费行为的不同类型用户响应模型作为用户DR模型。

1)各方受益。

3种方案下的各方受益结果如表2所示。由表可知:相较于方案1,虽然方案2和方案3的开放微网收益要低,但用户用能成本也要低,且满意度要

表2 3种方案下的各方受益结果

Table 2 Benefit results of all parties under three schemes

方案	开放微网收益/元	开放微网成本/元	用户用能成本/元	用户用能成本减少量/元	满意度
1	16841.10	1721.01	24246.10	0	0.2711
2	3723.96	1622.37	23031.71	1214.39	0.3042
3	3870.33	1760.19	18734.83	5511.27	0.4247

高,这验证了给予用户选择的开放微网能源调度模型的优越性;方案3优于方案2,这验证了基于用户消费心理研究用户消费行为的不同类型用户DR模型能够提升开放微网收益以及降低用户用能成本。

2)能源商品价格及市场份额。

3种方案下开放微网的能源商品价格优化结果如图3和附录C图C1、C2所示。

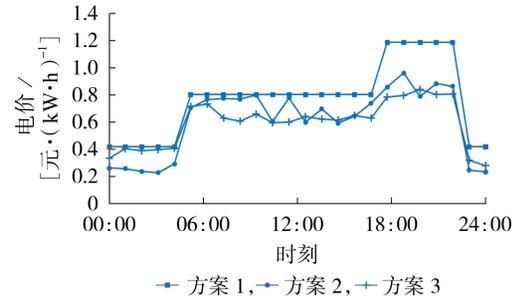


图3 3种方案下开放微网的电价优化结果

Fig.3 Optimization results of electricity price for open microgrid under three schemes

结合表2、图3和附录C图C1、C2可知,方案2和方案3下的能源商品价格低于方案1,从社会效益角度而言,开放微网能源调度和实施DR市场机制可显著增强消费者的能源商品消费权力和意识。给予用户自由选择能源商品运营商的权利为用户提供了选择,进一步完善了市场竞争机制,且为了获得足够的能源商品份额,开放微网必须以低廉的价格赢得更大的用户市场,这大幅降低了用户用能成本。

3种方案下各运营商获得的各能源商品份额如图4和附录C图C3、C4所示。

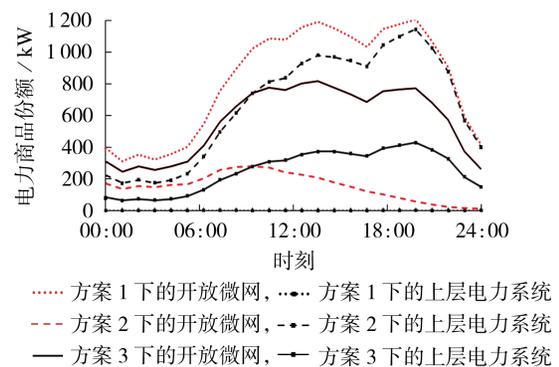


图4 3种方案下各运营商获得的电力商品份额

Fig.4 Share of electricity commodities obtained by each operator under three schemes

结合图3、4和附录C图C3、C4可知,方案3下开放微网的各能源商品价格普遍低于方案2,且方案3下开放微网获得的各能源商品份额均高于方案2,这表明不同类型用户DR模型不仅能够使得开放微网给予用户更多的优惠,而且能够更精确地描述不同用户的消费心理以及消费行为,提高开放微网从

用户市场获得的能源商品份额。

3)方案 3 下的能源商品份额。

方案 3 下开放微网从各类型用户获得的能源商品份额如图 5 和附录 C 图 C5、C6 所示。

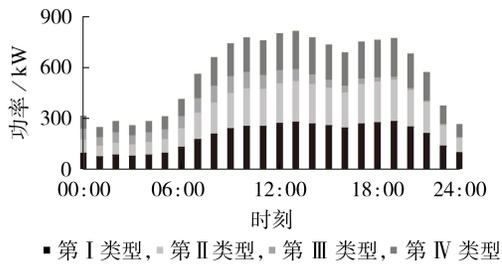


图 5 开放微网从各类型用户获得的电力商品份额
Fig.5 Share of electricity commodities obtained by open microgrid from each type of users

结合图 3—5 和附录 C 图 C1—C6 可知:开放微网通过实时改变价格来改变从用户市场获得的能源商品份额,并且控制来自用户的负荷,以配合可再生能源的波动性、随机性;开放微网主要获得来自第 I、II 类型用户的能源商品份额,这是由于开放微网的能源商品价格普遍低于上层能源系统的能源商品价格。

4)设备容量和功率。

3 种方案下开放微网的设备容量和功率优化结果如附录 C 表 C1 所示,3 种方案下可再生能源的出力曲线如附录 C 图 C7 所示。

结合表 2 和附录 C 图 C7—C14 可知,方案 1 下传统微网主要通过储存氢气、天然气能源商品,并将其转换成电力商品以增加发电规模来获得收益,而方案 2 和方案 3 下开放微网则是通过增加自身的能源转化和储能设备规模来调整各设备的功率和储能状态,而非单纯地增加发电规模。

5)与上层能源系统的交互。

根据电力、氢气、天然气负荷的平衡约束,可得到微网与上层电力系统、上层氢气系统、上层天然气系统的交互,分别如附录 C 图 C15—C17 所示。方案 2 和方案 3 下开放微网与上层能源系统的交互力度低于方案 1 下传统微网与上层能源系统的交互力度,这说明开放微网能源调度模型能够减少微网对上层能源系统的依赖和影响,有利于上层能源系统的安全稳定运行。

5 结论

本文提出一种从用户角度出发的开放微网多目标资源规划模型,该模型提高了开放微网收益并降低了用户用能成本,实现了双方受益。通过算例分析可以得出如下结论。

1)本文所提开放微网能源调度模型和基于用户

消费心理研究用户消费行为的不同类型用户 DR 模型可显著增强消费者的能源商品消费权力和意识,打破传统微网的商品垄断。为获得足够的能源商品份额,微网必须以低廉的价格赢得更多的用户市场,这大幅降低了用户用能成本。

2)开放微网中通过不同类型用户 DR 模型,更精确地描述了不同用户的消费心理以及消费行为,提高了开放微网从用户市场获得的能源商品份额。开放微网通过调整来自用户的负荷来配合可再生能源的波动性、随机性。同时,开放微网应把握第 I、II 类型用户的负荷,以获得基本利润。

3)开放微网通过增加自身的能源转化和储能设备规模来调整各设备的功率和储能状态,而非单纯地增加其发电规模,在满足用户用能需求的同时,降低了与上层能源系统的交互力度,有利于上层能源系统的安全稳定运行。

需要指出的是,本文未考虑多微网,如何综合考虑多微网带来的影响,将是下一步的研究重点。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] KROPSKI B, JOHNSON B, ZHANG Y C, et al. Achieving a 100% renewable grid: operating electric power systems with extremely high levels of variable renewable energy[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2017, 15(2): 61-73.
- [2] 杨贺钧, 时瑞廷, 马英浩, 等. 考虑多重分时电价和效益潜力的电力储能系统调度策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 130-137.
YANG Hejun, SHI Ruiting, MA Yinghao, et al. Scheduling strategy of electric energy storage system considering multiple time-of-use electricity prices and potential benefit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 130-137.
- [3] DU E S, ZHANG N, HODGE B M, et al. The role of concentrating solar power toward high renewable energy penetrated power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6630-6641.
- [4] 谢桦, 滕晓斐, 张艳杰, 等. 风/光/储微网规划经济性影响因素分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(6): 70-76, 115.
XIE Hua, TENG Xiaofei, ZHANG Yanjie, et al. Analysis of economic influence factors in wind-photovoltaic-storage micro-grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(6): 70-76, 115.
- [5] 肖白, 崔涵淇, 姜卓, 等. 基于有限理性用户选择行为的定制化电价套餐设计[J]. 电网技术, 2021, 45(3): 1050-1058.
XIAO Bai, CUI Hanqi, JIANG Zhuo, et al. Customized electricity price package design based on limited rational user selection behavior[J]. Power System Technology, 2021, 45(3): 1050-1058.
- [6] 黄海涛, 吴洁晶, 顾丹珍, 等. 计及负荷率分档的峰谷分时电价定价模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 122-129.
HUANG Haitao, WU Jiejing, GU Danzhen, et al. Pricing model of time-of-use electricity tariff considering customers classified by load factor[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 122-129.
- [7] 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):66-74.
 QIU Gefei, HE Chao, LUO Zhao, et al. Economic dispatch of Stackelberg game in distribution network considering new energy consumption and uncertainty of demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6):66-74.
- [8] MCPHERSON M, STOLL B. Demand response for variable renewable energy integration: a proposed approach and its impacts[J]. Energy, 2020, 197:117205.
- [9] PFEIFER A, DOBRAVEC V, PAVLINEK L, et al. Integration of renewable energy and demand response technologies in interconnected energy systems[J]. Energy, 2018, 161:447-455.
- [10] TSUI K M, CHAN S C. Demand response optimization for smart home scheduling under real-time pricing[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4):1812-1821.
- [11] ZHANG X P, SHAHIDEHPOUR M, ALABDULWAHAB A, et al. Hourly electricity demand response in the stochastic day-ahead scheduling of coordinated electricity and natural gas networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1):592-601.
- [12] 许汉平, 李姚旺, 苗世洪, 等. 考虑可再生能源消纳效益的电力系统“源-荷-储”协调互动优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17):18-25.
 XU Hanping, LI Yaowang, MIAO Shihong, et al. Optimization dispatch strategy considering renewable energy consumptive benefits based on “source-load-energy storage” coordination in power system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17):18-25.
- [13] 彭文昊, 陆俊, 冯勇军, 等. 计及用户参与不确定性的需求响应策略优化方法[J]. 电网技术, 2018, 42(5):1588-1594.
 PENG Wenhao, LU Jun, FENG Yongjun, et al. A demand response strategy optimization considering user participation uncertainty[J]. Power System Technology, 2018, 42(5):1588-1594.
- [14] 邓逸天, 王宇辉, 黄景光, 等. 考虑需求响应的含P2G电-气综合能源系统优化调度[J]. 智慧电力, 2020, 48(12):8-13, 32.
 DENG Yitian, WANG Yuhui, HUANG Jingguang, et al. Optimal dispatch of integrated electricity-gas system with power to gas considering demand response[J]. Smart Power, 2020, 48(12):8-13, 32.
- [15] 杨世博, 孙亮, 陈立东, 等. 计及分时电价的含冷热电联供型微网的配电网系统协调优化调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4):15-23.
 YANG Shibo, SUN Liang, CHEN Lidong, et al. Coordinated optimal scheduling of distribution network with CCHP-based microgrid considering time-of-use electricity price[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4):15-23.
- [16] 高亚静, 吕孟扩, 梁海峰, 等. 基于离散吸引力模型的用电需求价格弹性矩阵[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13):103-107, 144.
 GAO Yajing, LÜ Mengkuo, LIANG Haifeng, et al. Power demand price elasticity matrix based on discrete attraction model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13):103-107, 144.
- [17] 程杉, 陈梓铭, 王瑞, 等. 基于混合博弈的多微电网双层协调优化调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(8):41-46.
 CHENG Shan, CHEN Ziming, WANG Rui, et al. Double-layer coordinated optimal dispatching of multi-microgrid based on mixed game[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(8):41-46.
- [18] ZHAO B P, XUE Y, XU B, et al. Multi-objective classification based on NSGA-II[J]. International Journal of Computing Science and Mathematics, 2018, 9(6):539.
- [19] BROWN T, SCHLACHTBERGER D, KIES A, et al. Synergies of sector coupling and transmission reinforcement in a cost-optimised, highly renewable European energy system[J]. Energy, 2018, 160:720-739.

作者简介:



陈洋洋

陈洋洋(1994—),男,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为能源互联网调度与规划等(**E-mail**:cyy_luck@126.com);

陆宁(1980—),女,副教授,博士,主要研究方向为智能电网、分布式发电、能源互联网调度与规划等(**E-mail**:susanln@163.com);

侯慧(1981—),女,副教授,博士,主要研究方向为泛在能源互联网规划、运行和保护以及电力系统安全(**E-mail**:houhui@whut.edu.cn)。

(编辑 王锦秀)

Resource planning and benefit analysis of open microgrid from perspective of users

CHEN Yangyang, LU Ning, HOU Hui, QU Shoujiang

(School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to break the monopoly of traditional microgrid, an energy scheduling model of open microgrid is proposed to give users the right of choosing any energy commodity operator at any moment. In order to better analyze the changes of users' energy consumption behavior, the users' consumption behavior based on their consumption psychology is researched, and different types of user response models are created to satisfy the energy consumption demand of different users. According to the constraints such as system scheduling, a multi-objective resource planning model of open microgrid is built, which takes the maximum income of open microgrid and the minimum users' energy consumption cost as its objectives, and is solved by NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II). The results of case simulation show that the proposed model can effectively improve the income of open microgrid and reduce users' energy consumption cost.

Key words: open microgrid; perspective of users; selection bias; price sensitivity; NSGA-II

附录 A:

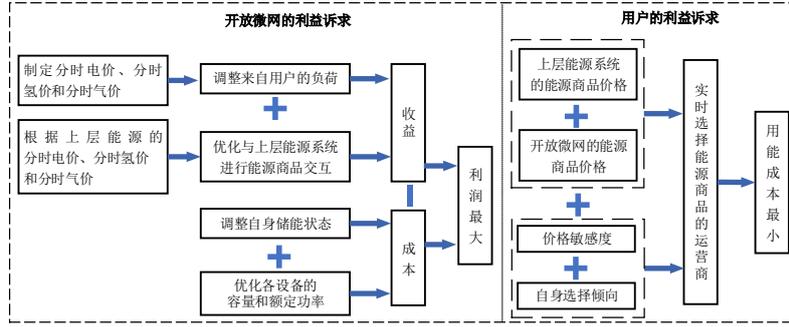


图 A1 利益诉求模型图

Fig.A1 Interest demand model

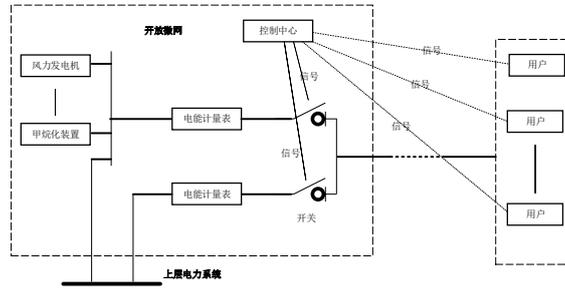


图 A2 用户用电线路实施示意图

Fig.A2 Schematic diagram of implementation of power lines for users

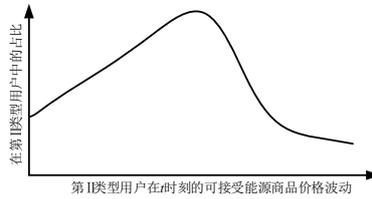


图 A3 第 II 类型用户在 t 时刻的可接受能源商品价格波动分布函数

Fig.A3 Distribution function of acceptable energy commodity price fluctuation for users of Type II at moment t

$$S_{OM-III}(t) = \frac{e^{\varepsilon_{0-OM}} \prod_{t=1}^{24} (1 + \mu_{OM}(t)) (p_{OM}(t))^{\varepsilon_{OM}(t)}}{e^{\alpha_{0-OM}} \prod_{t=1}^{24} (1 + \mu_{OM}(t)) p_{OM}^{\varepsilon_{OM}(t)}(t) + e^{\varepsilon_{0-UES}} \prod_{t=1}^{24} (1 + \mu_{UES}(t)) p_{UES}^{\varepsilon_{UES}(t)}(t)} \times \int_{f_{Bias1}}^{f_{Bias4}} \int_0^{f_{Sens2}} p(f_{Bias}, f_{Sens}) F_{BiasUn} F_{SensL} df_{Bias} df_{Sens} \quad (A1)$$

式中： $\varepsilon_{OM}(t)$ 、 $\varepsilon_{UES}(t)$ 分别为开放微网、上层能源系统在 t 时刻同类能源商品的价格对第 III 类型用户吸引力的影响系数； ε_{0-OM} 、 ε_{0-UES} 分别为开放微网、上层能源系统的同类能源商品对第 III 类型用户吸引力的固定影响系数； $\mu_{OM}(t)$ 、 $\mu_{UES}(t)$ 分别为开放微网、上层能源系统在 t 时刻同类能源商品价格的误差项。

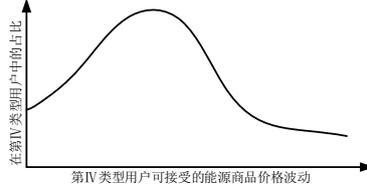


图 A4 第IV类型用户在 t 时刻的可接受能源商品价格分布函数
Fig.A4 Distribution function of acceptable energy commodity price for users of Type IV at moment t

$$P_W(t)+P_{PV}(t)+P_{PS}(t)-P_B(t)-P_{EC}(t)+P_{FC}(t)+P_{GT}(t)=S_{e-OM}(t)P_L(t)+S_{e-UES}(t)P_L(t)=P_L(t) \quad (A2)$$

式中： $P_W(t)$ 、 $P_{PV}(t)$ 、 $P_{FC}(t)$ 、 $P_{GT}(t)$ 分别为在 t 时刻风力发电机、光伏发电板、燃料电池、燃气轮机的输出电功率； $P_{PS}(t)$ 、 $P_B(t)$ 分别为开放微网与上层电力系统、蓄电池在 t 时刻的交互电功率； $P_{EC}(t)$ 为在 t 时刻电解池的输入电功率； $h_{EC}(t)$ 为在 t 时刻电解池的输出氢流量； $S_{e-OM}(t)$ 、 $S_{e-UES}(t)$ 分别为在 t 时刻开放微网、上层电力系统获得的电力市场份额。

$$h_{EC}(t)+h_{HS}(t)-h_S(t)-h_{MP}(t)-h_{FC}(t)=S_{h-OM}(t)h_L(t)+S_{h-UES}(t)h_L(t)=h_L(t) \quad (A3)$$

式中： $h_{HS}(t)$ 、 $h_S(t)$ 分别为开放微网与上层氢气系统、储氢罐在 t 时刻的交互氢流量； $h_{MP}(t)$ 、 $h_{FC}(t)$ 分别为在 t 时刻甲烷化装置、燃料电池的输入氢流量； $S_{h-OM}(t)$ 、 $S_{h-UES}(t)$ 分别为在 t 时刻开放微网、上层电力系统获得的氢气市场份额。

$$g_{MP}(t)+g_{NGS}(t)-g_S(t)-g_{GT}(t)=S_{g-OM}(t)g_L(t)+S_{g-UES}(t)g_L(t)=g_L(t) \quad (A4)$$

式中： $g_{GT}(t)$ 为在 t 时刻燃气轮机的输入气流量； $g_{NGS}(t)$ 、 $g_S(t)$ 分别为开放微网与上层天然气系统、储气罐在 t 时刻的交互气流量； $g_{MP}(t)$ 为在 t 时刻甲烷化装置的输出气流量； $S_{g-OM}(t)$ 、 $S_{g-UES}(t)$ 分别为在 t 时刻开放微网、上层电力系统获得的天然气市场份额。

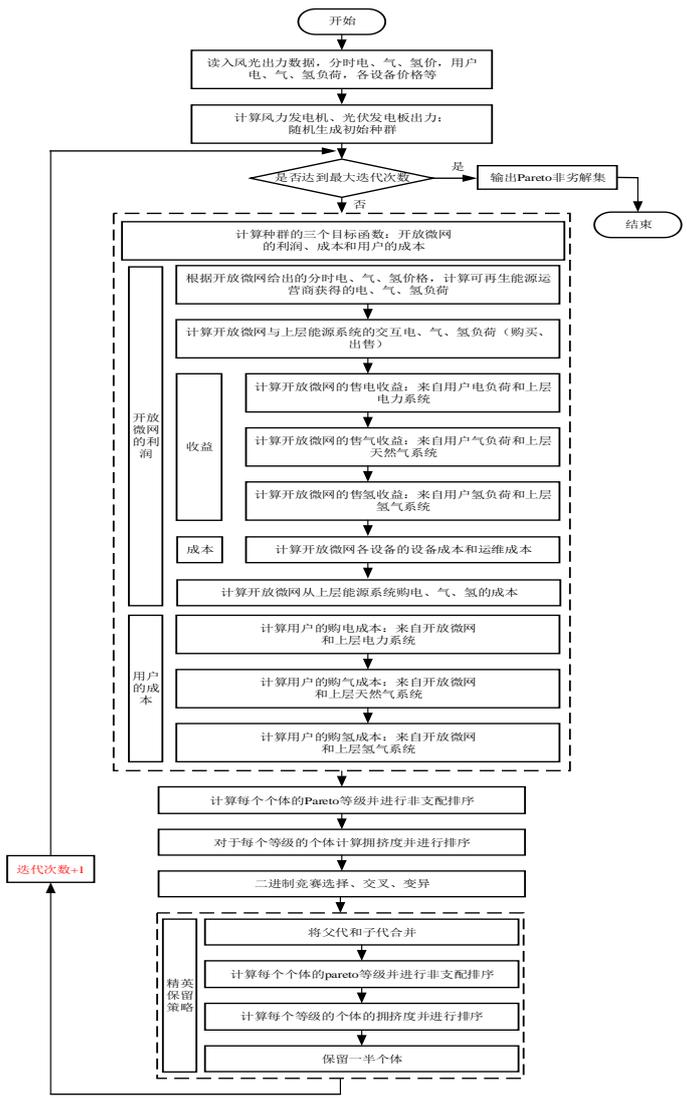


图 A5 求解过程流程图
Fig.A5 Flowchart of solution process

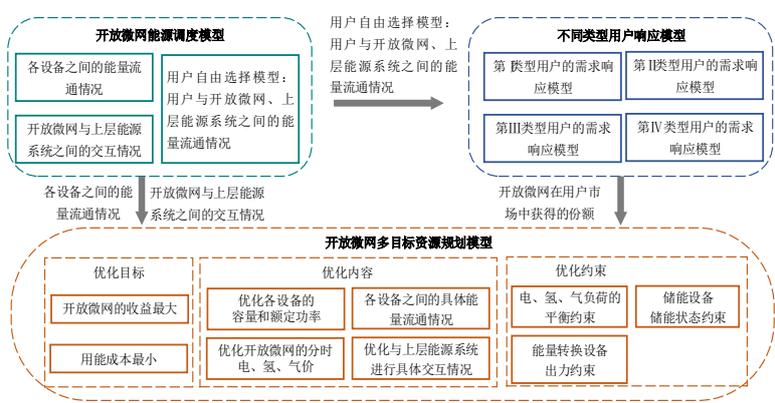


图 A6 3种模型之间的传递关系
Fig.A6 Transfer relation among three models

附录 B:

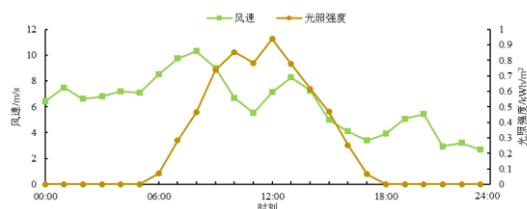


图 B1 某日风速、光照强度曲线

Fig.B1 Wind speed and light intensity curves within a certain day

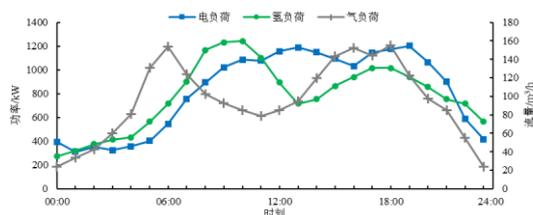


图 B2 用户某日的基础电力、氢气、天然气负荷

Fig.B2 Basic electricity, hydrogen and natural gas load of users within a certain day

表 B1 设备参数

Table B1 Equipment parameters

设备	成本	寿命/a	运维费用/%
风力发电机	9 337.80 元/kW	25	3
光伏发电板	3 381.20 元/m ²	25	3
蓄电池容量	1 142.34 元/(kW·h)	18	3
蓄电池功率	2 449 元/kW		
电解池	2 765 元/kW	18	4
燃料电池	2 678.10 元/kW	20	3
储氢罐	66.36 元/m ³	20	1
储气罐	66.36 元/m ³	20	1
燃气轮机	1 181.51 元/kW	25	1
甲烷化装置+CO ₂ 直接空气捕捉	7 900.00 元/kW	25	3

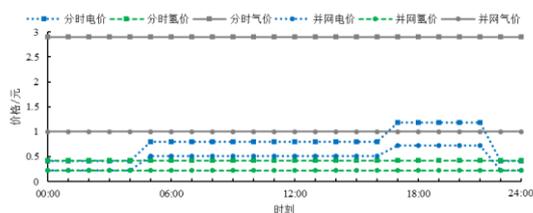


图 B3 上层能源系统的电力、氢气、天然气能源商品分时价格机制

Fig.B3 Time sharing pricing mechanism of electricity, hydrogen and natural gas in upper energy system

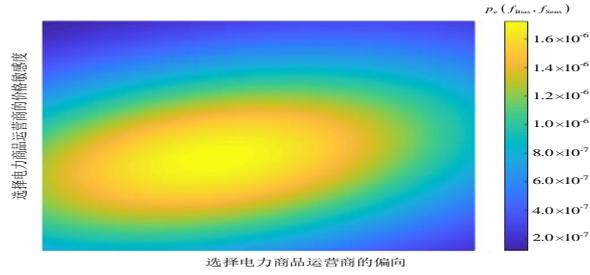


图 B4 用户用电力时消费心理的概率密度二维热图

Fig.B4 Two dimensional heat map of consumer psychology when using electricity

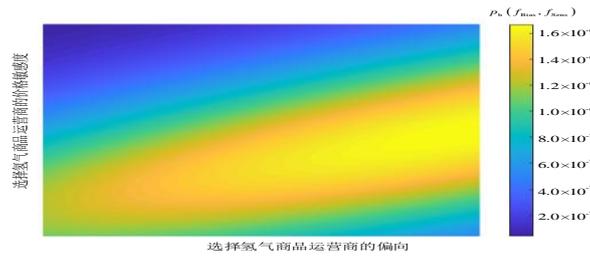


图 B5 用户用氢气时消费心理的概率密度二维热图

Fig.B5 Two dimensional heat map of consumer psychology when using hydrogen

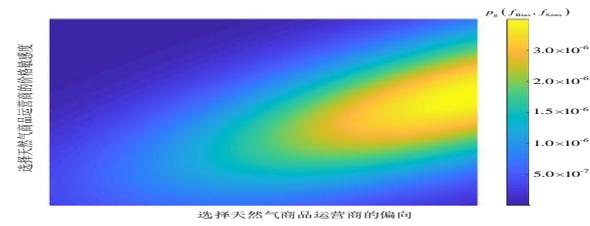


图 B6 用户用天然气时消费心理的概率密度二维热图

Fig.B6 Two dimensional heat map of consumer psychology when using natural gas

附录 C:

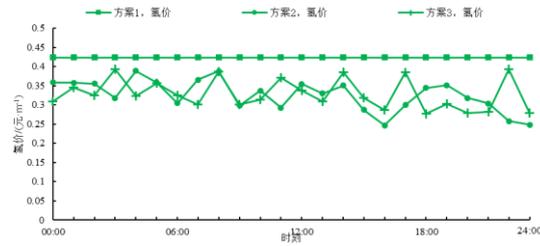


图 C1 3种方案下开放微网的氢气价格优化结果

Fig.C1 Hydrogen commodity price optimization results of r open microgrid under three schemes

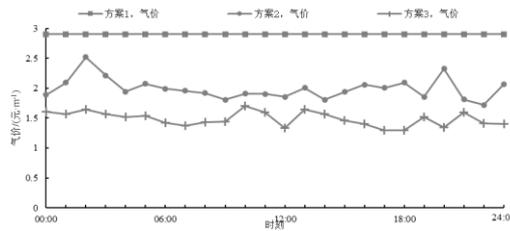


图 C2 3种方案下开放微网的天然气价格优化结果

Fig.C2 Natural gas commodity price optimization results of open microgrid under three schemes

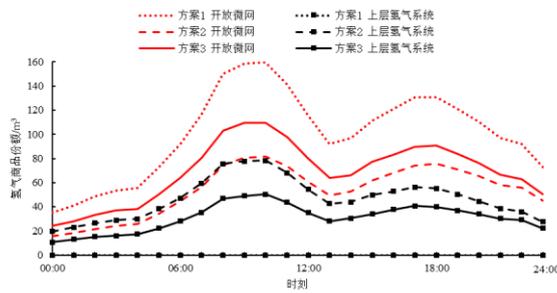


图 C3 3种方案下各运营商获得的氢气商品份额

Fig.C3 Share of hydrogen commodities obtained by each operator under three schemes

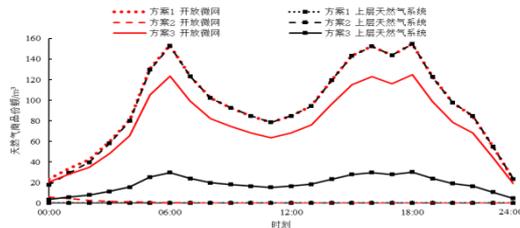


图 C4 3种方案下各运营商获得的天然气商品份额

Fig.C4 Share of natural gas commodities obtained by each operator under three schemes

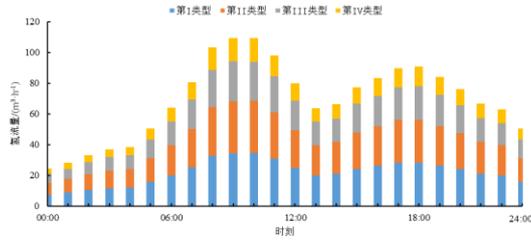


图 C5 开放微网在各类型用户中获得的氢气商品份额

Fig.C5 Share of hydrogen commodities obtain by open microgrid among various types of users

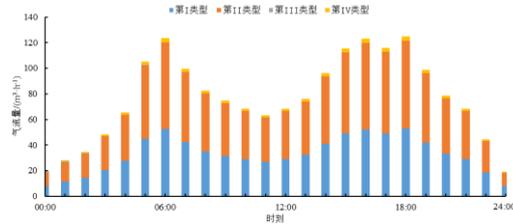


图 C6 开放微网在各类型用户中获得的天然气商品份额

Fig.C6 Share of natural gas commodities obtain by open microgrid among various types of users

表 C1 设备容量和功率优化结果

Table C1 Optimization results of equipment capacity and power

参数	方案 1	方案 2	方案 3
风力发电机额定功率/ kW	999.99	509.09	869.19
光伏发电板额定面积/m ²	999.79	693.53	720.40
蓄电池额定容量/ (kW·h)	200	774.29	328.94
蓄电池额定功率/ kW	9.55	126.38	185.93
电解池额定功率/ kW	0.68	206.70	107.28
燃料电池额定功率/ kW	744.73	546.46	509.72
储氢罐额定容量/m ³	54.41	940.05	360.09
储气罐额定容量/m ³	55.01	755.90	379.23
燃气轮机额定功率/ kW	942.10	670.33	506.46
甲烷化装置+CO ₂ 直接空气捕捉额定功率/ kW	60.89	494.81	389.44

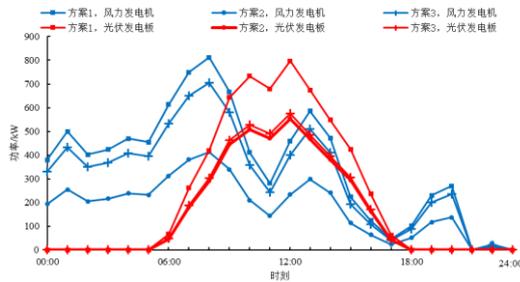


图 C7 3 种方案下可再生能源的出力曲线

Fig.C7 Output curves of renewable energy under three schemes

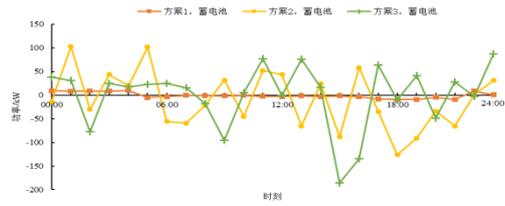


图 C8 3 种方案下蓄电池的功率波动曲线

Fig.C8 Power fluctuation curves of battery under three schemes

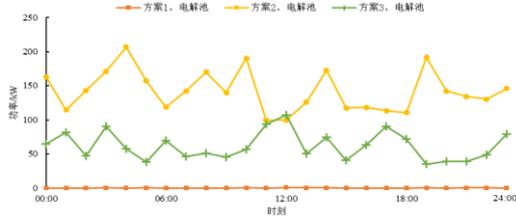


图 C9 3 种方案下电解池输入功率波动曲线

Fig.C9 Input power fluctuation curves of electrolytic cell under three schemes

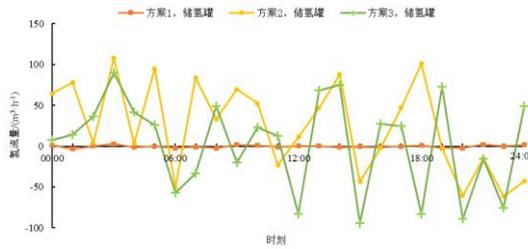


图 C10 3 种方案下储氢罐的氢流量波动曲线

Fig.C10 Hydrogen flow fluctuation curves of hydrogen storage tank under three schemes

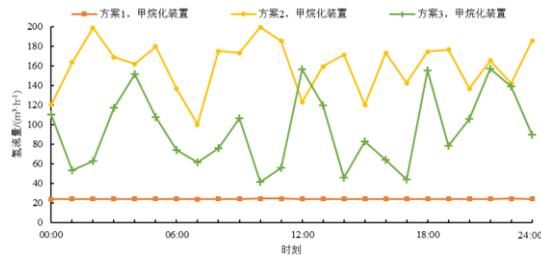


图 C11 3 种方案下甲烷化装置输入氢气流量波动曲线

Fig.C11 Input hydrogen flow fluctuation curves of methanation unit under three schemes

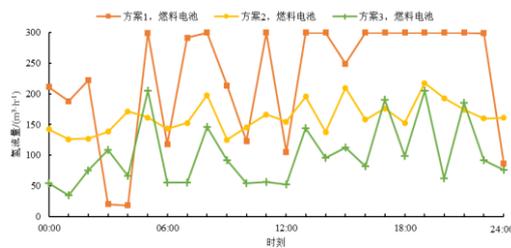


图 C12 3 种方案下燃料电池输入氢气流量波动曲线

Fig.C12 Input hydrogen flow fluctuation curves of fuel cell under three schemes

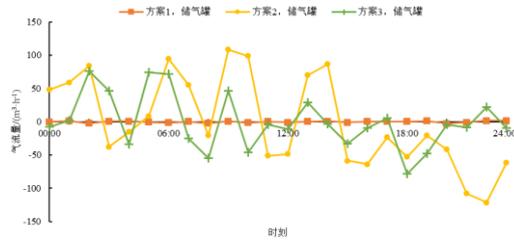


图 C13 3 种方案下储气罐的天然气流量波动曲线

Fig.C13 Natural gas flow fluctuation curves of gas storage tank under three schemes

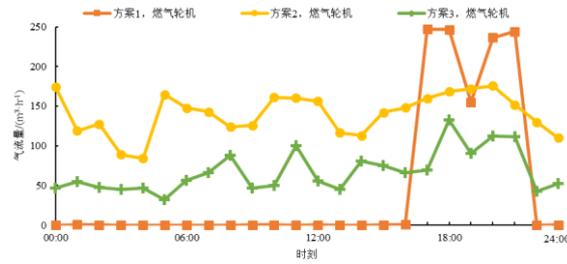


图 C14 3 种方案下燃气轮机输入天然气流量波动曲线

Fig.C14 Input natural gas flow fluctuation curves of gas turbine under three schemes

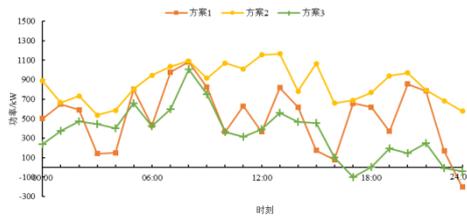


图 C15 3 种方案下微网与上层电力系统的电力交互

Fig.C15 Power interaction between microgrid and upper power system under three schemes

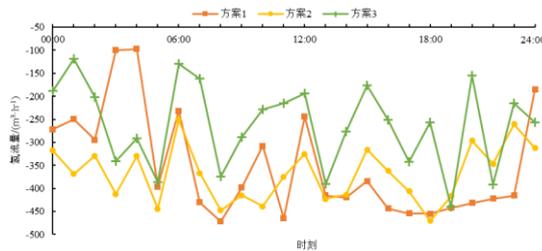


图 C16 3 种方案下微网与上层氢气系统的氢气交互

Fig.C16 Hydrogen interaction between microgrid and upper hydrogen system under three schemes

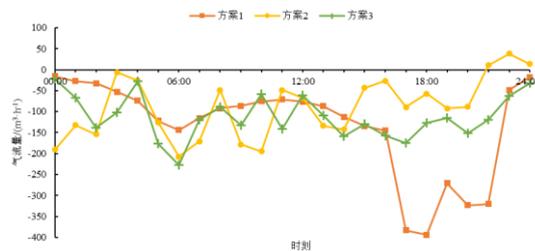


图 C17 3 种方案下微网与上层天然气系统的天然气交互

Fig.C17 Gas interaction between microgrid and upper natural gas system under three schemes