

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.06.013

# 综合能源系统综合需求响应行为研究

陈宇沁<sup>1</sup>, 曹晓冬<sup>1</sup>, 王俊<sup>2</sup>, 邵赞凡<sup>2</sup>, 窦迅<sup>2</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司营销服务中心, 江苏 南京 210024;

2. 南京工业大学电气工程与控制科学学院, 江苏 南京 211816)

**摘要:**面向耦合电、气、冷、热等多种形态能源的综合能源系统,研究柔性负荷、储能和电动汽车等需求侧资源的综合需求响应(IDR),有利于挖掘多能负荷的响应潜力,激发综合能源系统的灵活性,提升能源利用效率。首先以区域电-气互联综合能源系统为基础,构建园区级冷-热-电-气综合能源系统;其次,建立综合能源系统调度模型,通过节点能量平衡方程分析节点能源价格,明确系统调度-能源价格-IDR的传递关系;然后,基于节点能源价格建立考虑柔性负荷、储能、电动汽车为参与主体的IDR模型;最后,通过算例分析柔性负荷、储能、电动汽车的响应情况,基于节点能源价格对不同位置多能用户IDR前后的负荷曲线进行分析。结果表明,充分利用柔性负荷特性不仅可以提升用户效用,还可以有效降低运行成本。

**关键词:**综合能源系统;综合需求响应(IDR);节点能源价格;多能用户;行为分析

**中图分类号:**TM73;TK01

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2020)06-0089-09

## 0 引言

近年来,为提高能源利用效率、应对生态环境恶化,亟需构建面向能源互联网络的综合能源系统<sup>[1-3]</sup>。利用不同能源间的相互转换实现能源协同互补已成为世界各国研究的热点<sup>[4-8]</sup>。

综合需求响应(integrated demand response, IDR)是实现综合能源系统供需双方双向互动的重要手段。在终端消费时,用户可以选择不同种类的能源达到同样的效果,拓宽了用户短期、中期乃至长期的用能方式。IDR对多能负荷形态、综合能源系统规划的影响越来越大,因此,研究面向综合能源系统的IDR具有重要意义。基于多能协同管理的综合能源网络,Aras Sheikhi和Shahab Bahrami于2015年首次提出了IDR概念,将IDR定义为需求侧在综合能源网络中传统电力DR的衍生和扩展<sup>[9]</sup>。针对IDR,已有研究从系统运行层面考虑IDR的响应类型、参与设备、参与方式<sup>[10-13]</sup>,基于削减负荷、转移负荷、替代负荷<sup>[14]</sup>,分析IDR资源对系统整体运行成本或者综合能源利用效率的影响。在系统规划层面,已有研究综合考虑热-电联产机组和电转气等设备协同运行的削峰填谷作用,但更侧重于IDR对设备容量及典型负荷的影响,即从电力系统角度出发,分析能源供给形式对电力负荷的影

响<sup>[15-16]</sup>。目前,已有研究基于典型负荷日或随机场景建立IDR模型并分析其对规划、运行的影响,但大多仍从系统层面出发,侧重于特定激励条件下需求侧资源调控研究,或是典型价格条件下需求侧资源响应研究,鲜有综合能源系统节点能源价格直接作用的IDR方面的研究。

针对上述问题,文中在现有研究基础上,以区域电-气互联综合能源系统为基础,通过冷-热-电联供,构建园区级冷-热-电-气综合能源系统。建立综合能源系统调度优化模型,通过节点能量平衡方程分析节点能源价格。其次,基于节点能源价格,以用户市场消费剩余来量化节点用户能源消费的估值,建立考虑柔性负荷、储能、电动汽车为参与主体的IDR模型。最后,通过算例分析柔性负荷、储能、电动汽车的响应情况,基于节点能源价格对不同位置节点多能用户IDR前后的负荷曲线进行分析。

## 1 综合能源系统IDR建模原理

以区域电-气互联综合能源系统网络为基础,在耦合节点通过冷-热-电联供(combined cooling, heat and power, CCHP)联结园区级热网,构建园区级冷-热-电-气综合能源系统。区域级电-气互联网络作为园区级综合能源系统中CCHP的输入/输出,为联结园区级综合能源系统提供网络架构。首先,建立综合能源系统调度模型,基于系统内多能负荷消耗和供给侧配置,优化系统运行;其次,通过节点能源价格将系统运行信息以能价的方式输出给用户;然后,以能源网络节点多能负荷用户为对象,考虑柔

收稿日期:2020-05-31;修回日期:2020-07-07

基金项目:国家电网有限公司科技项目“面向多能源协同的用户侧综合需求响应关键技术研究与应用”(5210EF19-001P)

性负荷、电气热多类型储能、电动汽车等参与主体,建立 IDR 模型;最后,用户响应后将能源消耗反馈给系统侧,由此构成综合能源系统下系统调度-节点能源价格-IDR 间的传递关系。建模原理见图 1。

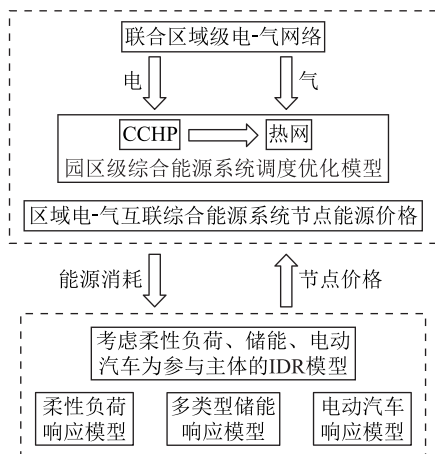


图 1 建模原理

Fig.1 Modeling principle

### 1.1 综合能源系统调度模型

文中耦合节点上的耦合设备主要包括热电联产机组、燃气锅炉、电制冷机、吸收式制冷机,相关建模可参考文献[17—18],此处不再赘述。CCHP 将区域级电-气网络与园区级热网联结起来,为热用户供热的时候,进行供电和供冷。综合能源系统结构如图 2 所示。

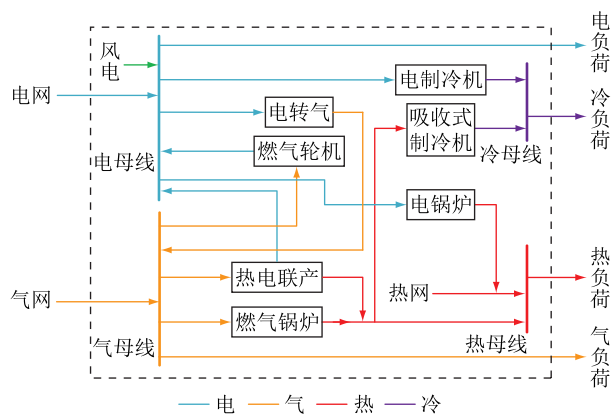


图 2 综合能源系统结构

Fig.2 Integrated energy system structure

### 1.2 热网模型

主要考虑节点流量平衡、节点功率融合、负荷取用特性、供回水温度约束以及管段传热特性<sup>[19]</sup>。

(1) 节点流量平衡。对于热网中任一节点,流入的热水量之和等于流出的流量之和,即:

$$\sum_{j,j \in S_i^{\text{pipe}^+}} Q_{j,t}^g = \sum_{k,k \in S_i^{\text{pipe}^-}} Q_{k,t}^g \quad (1)$$

式中:  $S_i^{\text{pipe}^+}$ ,  $S_i^{\text{pipe}^-}$  分别为与节点  $i$  相连并从节点  $i$

起始和结束管道的集合;  $Q_{j,t}^g$  为时段  $t$  管道  $j$  中的热水流量;  $Q_{k,t}^g$  为时段  $t$  管道  $k$  中的热水流量。

(2) 节点温度融合。不同温度的热水从不同管道流向相同节点后进行混合,混合后从同一节点流入不同管道的热水温度相同,即:

$$\sum_{j,j \in S_i^{\text{pipe}^+}} T_{j,t}^0 Q_{j,t}^g = T_{k,t}^1 \sum_{k,k \in S_i^{\text{pipe}^-}} Q_{k,t}^g \quad (2)$$

式中:  $T_{j,t}^0$  为时段  $t$  管道  $j$  中热水出口温度;  $T_{k,t}^1$  为时段  $t$  管道  $k$  中热水入口温度。

(3) 负荷取用特性。对于包含热用户的热网支路,负荷节点  $i$  在时段  $t$  消耗热量为  $h_{i,t}^l$ ,流经负荷节点流量为  $Q_{i,t}^g$  的水由供水温度  $T_{i,t}^g$  降至回水温度  $T_{i,t}^h$ ,即:

$$h_{i,t}^l = C Q_{i,t}^g (T_{i,t}^g - T_{i,t}^h) \quad (3)$$

式中:  $C$  为热水比热容,取值为  $4.2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

(4) 变供回水温度约束。为了保证热源和热用户的供热质量,需要对热源和热用户的供、回水温度进行限制,即:

$$T_{\min}^g \leq T_{i,t}^g \leq T_{\max}^g \quad (4)$$

$$T_{\min}^h \leq T_{i,t}^h \leq T_{\max}^h \quad (5)$$

(5) 管段传热特性。根据文献[20]对传热特性的建模,稳态传热特性为:

$$T_x = (T_a - T_s) \frac{x}{RC\rho f} + T_s \quad (6)$$

式中:  $x$  为管段上某点与管段首端的距离;  $R$  为管段单位长度的热阻;  $\rho$  为热媒密度;  $T_s, T_x, T_a$  分别为为一根管段首端,  $x$  处和外界的温度;  $f$  为热水流量。

### 1.3 气网模型

主要包括管道流量约束、气源点约束、流量平衡约束、压缩机约束以及节点压力约束<sup>[21]</sup>。

(1) 管道流量约束。对于理想绝热输气管道,考虑天然气双向流动,其流量为:

$$\tilde{Q}_{ij,t} | \tilde{Q}_{ij,t} | = C_{ij}^2 (p_{i,t}^2 - p_{j,t}^2) \quad (7)$$

其中:

$$\tilde{Q}_{ij,t} = (Q_{ij,t}^{\text{in}} + Q_{ij,t}^{\text{out}}) / 2 \quad (8)$$

式中:  $\tilde{Q}_{ij,t}$  为时段  $t$  流过管道  $ij$  的平均流量;  $Q_{ij,t}^{\text{in}}$ ,  $Q_{ij,t}^{\text{out}}$  分别为时段  $t$  管道  $ij$  的首端天然气注入流量和末端天然气输出流量;  $C_{ij}$  为与管道  $ij$  效率、温度、长度、内径、压缩因子等有关的常数;  $p_{i,t}, p_{j,t}$  分别为时段  $t$  首末节点  $i, j$  的压力值。

(2) 气源点约束。

$$Q_{n,\min}^N \leq Q_{n,t}^N \leq Q_{n,\max}^N \quad (9)$$

式中:  $Q_{n,\max}^N, Q_{n,\min}^N$  分别为气源点  $n$  的天然气供应量上、下限;  $Q_{n,t}^N$  为气源时段  $t$  的出力。

(3) 流量平衡约束。

$$Q_{i,t}^N + \sum_{i \in \Omega_j} Q_{ij,t} + Q_{i,t}^{P2G} - Q_{i,t}^{G2P} - Q_{i,t}^L - Q_{i,t}^{CCHP} = 0 \quad (10)$$

式中:  $Q_{ij,t}$  为时段  $t$  流过管道  $ij$  的流量;  $Q_{i,t}^N$  为时段  $t$  节点  $i$  上的气源供气流量;  $Q_{i,t}^{P2G}$  为时段  $t$  节点  $i$  上的电转气供气流量;  $Q_{i,t}^{G2P}$  为时段  $t$  节点  $i$  上燃气轮机消耗的天然气流量;  $Q_{i,t}^L$  为时段  $t$  节点  $i$  上的天然气负荷;  $Q_{i,t}^{CCHP}$  为时段  $t$  节点  $i$  上 CCHP 消耗的天然气流量。

(4) 压缩机约束。采用简化压缩机模型<sup>[19]</sup>为:

$$p_{l,t} \leq \beta_{\text{com}} p_{i,t} \quad (11)$$

式中:  $\beta_{\text{com}}$  为压缩机的压缩系数;  $p_{l,t}, p_{i,t}$  分别为节点  $l, i$  时段  $t$  的压力值。

(5) 节点压力约束。

$$p_{i,\min} \leq p_{i,t} \leq p_{i,\max} \quad (12)$$

式中:  $p_{i,\max}, p_{i,\min}$  分别为节点  $i$  压力值的上、下限。

#### 1.4 电网模型

电力系统的节点功率平衡、机组出力约束、爬坡约束、支路潮流约束及电转气和燃气轮机相关模型约束,可参考文献[22—23],此处不再赘述。

#### 1.5 目标函数

园区级热网通过 CCHP 设备耦合到区域级电气互联综合能源系统网络上,热负荷由 CCHP 消耗电能和天然气供给,因此将其看作是电气网络耦合节点的负荷。在调度时,仅需考虑系统对电和天然气的调度成本,主要包括火电机组发电成本、天然气气源供气成本及电转气运行成本,即:

$$\min F = \sum_{t,t \in T} \left[ \sum_{g,g \in \Omega_G} f_1(P_{g,t}^G) + \sum_{n,n \in \Omega_N} f_2(Q_{n,t}^N) + \sum_{l,l \in \Omega_{P2G}} f_3(P_{l,t}^{P2G}) \right] \quad (13)$$

式中:  $F$  为系统综合运行成本;  $T$  为时间断面数;  $\Omega_G$  为火电机组集合;  $\Omega_N$  为气源点集合;  $\Omega_{P2G}$  为电转气集合。

$f_1(P_{g,t}^G)$  为时段  $t$  火电机组  $g$  的发电成本函数,表示为:

$$f_1(P_{g,t}^G) = a_g (P_{g,t}^G)^2 + b_g P_{g,t}^G + c_g \quad (14)$$

式中:  $a_g, b_g, c_g$  为火电机组  $g$  耗量特性曲线参数;  $P_{g,t}^G$  为时段  $t$  火电机组  $g$  的有功出力。

$f_2(Q_{n,t}^N)$  为时段  $t$  气源点  $n$  的供气成本函数,表示为:

$$f_2(Q_{n,t}^N) = C_{n,t}^N Q_{n,t}^N \quad (15)$$

式中:  $C_{n,t}^N$  为时段  $t$  气源点  $n$  的供气成本系数;  $Q_{n,t}^N$

为时段  $t$  气源点  $n$  的天然气供应流量。

$f_3(P_{l,t}^{P2G})$  为时段  $t$  电转气  $l$  的运行成本函数,表示为:

$$f_3(P_{l,t}^{P2G}) = C_{l,t}^{P2G} P_{l,t}^{P2G} \quad (16)$$

式中:  $C_{l,t}^{P2G}$  为时段  $t$  电转气  $l$  的运行成本系数;  $P_{l,t}^{P2G}$  为时段  $t$  电转气  $l$  转化的有功功率。

## 2 考虑柔性负荷和储能及电动汽车等参与主体的 IDR 模型

综合能源系统的多能协同特性拓展了用户参与 IDR 的形式,基于能源价格差异,用户可以选择不同的用能方式使自身的用能效用最大化。文中将用户侧可参与需求响应的主体分为柔性负荷、储能及电动汽车。在电力需求响应中,柔性负荷的响应方式主要有可中断型、平移型、转移型等。由于文中主要从节点能源价格反映多能用户 IDR 的变化,因此主要考虑多能源间的耦合替代关系。根据用能替代方式的不同,建立气-电替代负荷和热-电替代负荷模型。对于储能,除了考虑传统的电储能,还需针对储气和储热系统建立模型。对于电动汽车,则考虑用户电动汽车行驶特性,建立电动汽车的充、放电模型。

### 2.1 节点能源价格

首先根据综合能源系统调度模型的节点能量平衡约束确定节点能源价格。

$$P_{i,t}^G + P_{i,t}^W + P_{i,t}^{CCHP} + P_{i,t}^{G2P} - P_{i,t}^{P2G} - \sum_{j,j \in \Omega_j} P_{ij,t} = P_{i,t}^L \quad (17)$$

$$Q_{i,t}^N + \sum_{i,i \in \Omega_i} Q_{ij,t} + Q_{i,t}^{P2G} - Q_{i,t}^{G2P} - Q_{i,t}^{CCHP} = Q_{i,t}^L \quad (18)$$

式中:  $P_{i,t}^L, Q_{i,t}^L$  分别为节点  $i$  时段  $t$  的节点电力负荷和天然气负荷。

当节点电力负荷  $P_{i,t}^L$  增加 1,目标函数值系统运行成本  $F$  对应产生一个与电力网络节点对应的边际值,用该值来表示节点电价,记为:

$$p_{i,t}^e = \partial F / \partial P_{i,t}^L \quad (19)$$

同样的,当节点天然气负荷  $Q_{i,t}^L$  增加 1,目标函数值对应产生一个与天然气网络节点对应的边际值,用该值来表示节点天然气价格,记为:

$$p_{i,t}^g = \partial F / \partial Q_{i,t}^L \quad (20)$$

### 2.2 柔性负荷响应模型

对于节点  $i$  上的用户,在时段  $t$ ,经用能替代项目调节后的电负荷为:

$$q_{i,t}^e = \bar{q}_{i,t}^e - L_{i,t}^{eg} - L_{i,t}^{eh} \quad (21)$$

调节后的天然气负荷为:

$$q_{i,t}^g = \bar{q}_{i,t}^g + p_{eg} L_{i,t}^{eg} \quad (22)$$

调节后的热负荷为:

$$q_{i,t}^h = \bar{q}_{i,t}^h + \rho_{eh} L_{i,t}^{eh} \quad (23)$$

式中:  $L_{i,t}^{eg}$  为时段  $t$  用户用气替代电的负荷;  $L_{i,t}^{eh}$  为时段  $t$  用户用热替代电的负荷;  $\bar{q}_{i,t}^e$  为参与用能替代项目目前的用户电力负荷值;  $\bar{q}_{i,t}^g$  为参与用能替代项目目前的用户天然气负荷值;  $\bar{q}_{i,t}^h$  为参与用能替代项目目前的用户热负荷值;  $\rho_{eg}$  为气-电替代系数;  $\rho_{eh}$  为热-电替代系数。

### 2.3 多类型储能响应模型

电储能、储气以及储热系统均可参与 IDR, 可通过切换充放模式来实现响应<sup>[24]</sup>。电储能动态数学模型为:

$$E_t^{ESS} = (1 - \mu_e) E_{t-1}^{ESS} + \left( P_t^{ESS,in} \eta_{ech} - \frac{P_t^{ESS,dis}}{\eta_{edis}} \right) \Delta t \quad (24)$$

式中:  $E_t^{ESS}$  为时段  $t$  电储能的储电容量;  $\mu_e$  为电储能的损耗率;  $P_t^{ESS,in}$ ,  $P_t^{ESS,dis}$  分别为时段  $t$  内储电充、放电功率;  $\eta_{ech}$ ,  $\eta_{edis}$  分别为充、放电效率。

储气动态数学模型为:

$$E_t^{GS} = (1 - \mu_g) E_{t-1}^{GS} + \left( F_t^{GS,in} \eta_{gch} - \frac{F_t^{GS,dis}}{\eta_{gdis}} \right) \Delta t \quad (25)$$

式中:  $E_t^{GS}$  为时段  $t$  的储气容量;  $\mu_g$  为储气的损耗率;  $F_t^{GS,in}$ ,  $F_t^{GS,dis}$  分别为时段  $t$  储气设施注入、提取流量;  $\eta_{gch}$ ,  $\eta_{gdis}$  分别为注入、提取效率。

储热动态数学模型为:

$$H_t^{HS} = (1 - \mu_h) H_{t-1}^{HS} + \left( Q_t^{HS,in} \eta_{hch} - \frac{Q_t^{HS,dis}}{\eta_{hdis}} \right) \Delta t \quad (26)$$

式中:  $H_t^{HS}$  为时段  $t$  的储热容量;  $\mu_h$  为储热的散热损耗率;  $Q_t^{HS,in}$ ,  $Q_t^{HS,dis}$  分别为时段  $t$  内储热吸、放热功率;  $\eta_{hch}$ ,  $\eta_{hdis}$  分别为吸、放热效率。

### 2.4 电动汽车响应模型

电动汽车可作为移动式储能参与 IDR, 其响应情况与出行规律、行驶里程密切相关, 在实现储能的同时, 满足用户的出行要求。电池频繁的放电会对电动汽车的电池寿命造成损耗, 为减缓电池寿命的衰减, 应尽量减少电池的充、放电切换次数<sup>[24]</sup>。假设 1 a 电动汽车只进行 1 次放电行为, 电动汽车充放电极限时间  $t_{lim}$  为:

$$t_{lim} = \frac{P_d t_n + P_c t_1 - (1 - S_n) C_s}{P_c + P_d} \quad (27)$$

式中:  $P_d$ ,  $P_c$ ,  $C_s$  分别为电动汽车的充、放电功率及额定容量;  $t_n$ ,  $t_1$ ,  $S_n$  分别为当前时间、离网时间和当前时间的荷电状态。

前时间的荷电状态。

电动汽车离开时的荷电状态满足:

$$S_n \geq \frac{d_{next} W + Q_{min}}{C_s} \quad (28)$$

式中:  $d_{next}$  为电动汽车的下次行驶里程;  $W$  为每千米消耗的电量;  $Q_{min}$  为电动汽车的最低电量。

电动汽车可放电容量  $P_d^{EV}$  为:

$$P_d^{EV} = \frac{P_d}{P_c + P_d} [(t_1 - t_n) P_c - (1 - S_n) C_s] \quad (29)$$

电动汽车的充电容量  $P_c^{EV}$  为:

$$P_c^{EV} = C_s (S_n + S_1 - S_a - S_{min}) \quad (30)$$

式中:  $S_1$ ,  $S_a$ ,  $S_{min}$  分别为离网时的荷电状态、接入时的荷电状态以及最低荷电状态。

### 2.5 目标函数

基于微观经济学理论, 用户用电、用气、用热满意度为<sup>[25]</sup>:

$$v_{i,t}^e = \int_{q_{i,t}^{ne}}^{q_{i,t}^{ee}} \left( \frac{q}{a} \right)^{\frac{1}{\varepsilon_e}} dq \quad (31)$$

$$v_{i,t}^g = \int_{q_{i,t}^{ng}}^{q_{i,t}^{gg}} \left( \frac{q}{a} \right)^{\frac{1}{\varepsilon_g}} dq \quad (32)$$

$$v_{i,t}^h = \int_{q_{i,t}^{nh}}^{q_{i,t}^{hh}} \left( \frac{q}{a} \right)^{\frac{1}{\varepsilon_h}} dq \quad (33)$$

式中:  $v_{i,t}^e$ ,  $v_{i,t}^g$ ,  $v_{i,t}^h$  分别为节点  $i$  在时段  $t$  用户的用电、用气及用热满意度;  $q_{i,t}^e$ ,  $q_{i,t}^g$ ,  $q_{i,t}^h$  分别为节点  $i$  在时段  $t$  用户的纯用电、纯用气、纯用热负荷;  $q_{i,t}^{ne}$ ,  $q_{i,t}^{ng}$ ,  $q_{i,t}^{nh}$  分别为节点  $i$  在时段  $t$  用户的电力、天然气、热力刚性负荷;  $a$  为满意度常数;  $\varepsilon_e$ ,  $\varepsilon_g$ ,  $\varepsilon_h$  分别为用户用电、用气、用热需求-价格弹性系数。

最大化节点用户效用为:

$$\begin{aligned} \max U_i = & \sum_{t=1}^T \{ \lambda_e [v_{i,t}^e(q_{i,t}^e + \Delta q_{i,t}^e) - (q_{i,t}^e + \Delta q_{i,t}^e) p_t^e] + \\ & \lambda_g [v_{i,t}^g(q_{i,t}^g + \Delta q_{i,t}^g) - (q_{i,t}^g + \Delta q_{i,t}^g) p_t^g] + \\ & \lambda_h [v_{i,t}^h(q_{i,t}^h + \Delta q_{i,t}^h) - (q_{i,t}^h + \Delta q_{i,t}^h) p_t^h] \} \end{aligned} \quad (34)$$

式中:  $U_i$  为节点  $i$  的综合用能效用;  $\Delta q_{i,t}^e$ ,  $\Delta q_{i,t}^g$ ,  $\Delta q_{i,t}^h$  为节点  $i$  在时段  $t$  用户参与需求响应的部分, 对于柔性负荷用户, 表示负荷的响应量, 减少负荷消耗时为负, 增加负荷消耗时为正, 对于储能用户, 表示响应的充、放能容量, 释放能量为负, 吸收能量为正, 对于电动汽车用户, 仅  $\Delta q_{i,t}^e$  有意义, 表示电动汽车充放电容量, 放电时为负, 充电时为正;  $\lambda_e$ ,  $\lambda_g$ ,  $\lambda_h$  分别为用户用电、用气以及用热效用的权重系数;  $q_{i,t}^{he}$ ,  $q_{i,t}^{hg}$  分别为供给用户纯热负荷所消耗的电能和天然气;  $p_t^e$ ,  $p_t^g$  分别为由综合能源系统调度模型求得的

节点电价和节点气价。

### 2.6 求解流程

由式(1)一式(20)构成的上层模型向由式(21)一式(34)构成的下层模型提供系统调度结果与各节点能源价格,下层模型向上层模型提供用户用能决策结果。文中建立了综合能源系统 IDR 行为研究的双层优化模型,其行为求解流程见图 3。

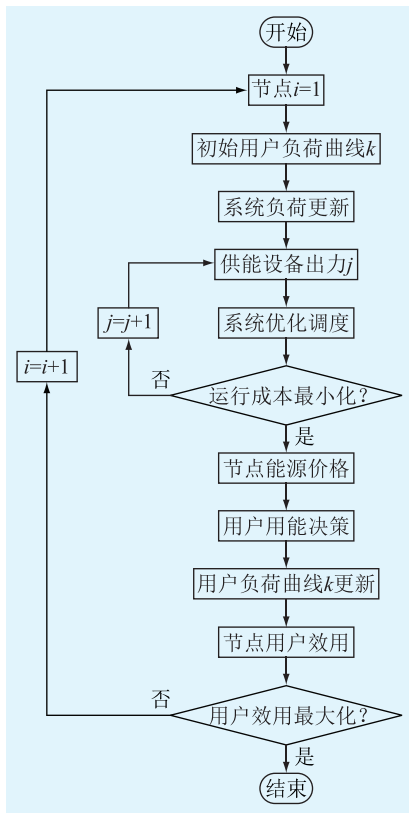


图 3 综合能源系统 IDR 行为求解

Fig.3 IDR behavior of integrated energy system

## 3 算例分析

### 3.1 算例数据

底层综合能源系统调度网络中,将改进的 IEEE 24 节点电网和比利时 20 节点气网通过电转气、燃气轮机等设备耦合形成上层电-气互联网络,将根据文献[26]改进的园区级热网通过 CCHP 联结到电气网络上,构成如图 4 所示的园区级冷-热-电-气综合能源系统。

图 4 中,IEEE 24 节点系统有 8 台发电机组,其中节点 2,22 为燃气轮机,分别与天然气网络中的 Anderlues 和 Mons 节点相连;节点 13,18 为 CCHP 机组,节点 13 与天然气网络的 Liège、热力网络 I 的节点 8 相连,节点 18 与天然气网络的 Zomergem 节点、热力网络 II 的节点 8 相连;节点 8,19,21 各接入 1 台额定出力为 100 MW 的风电机组,为最大限度

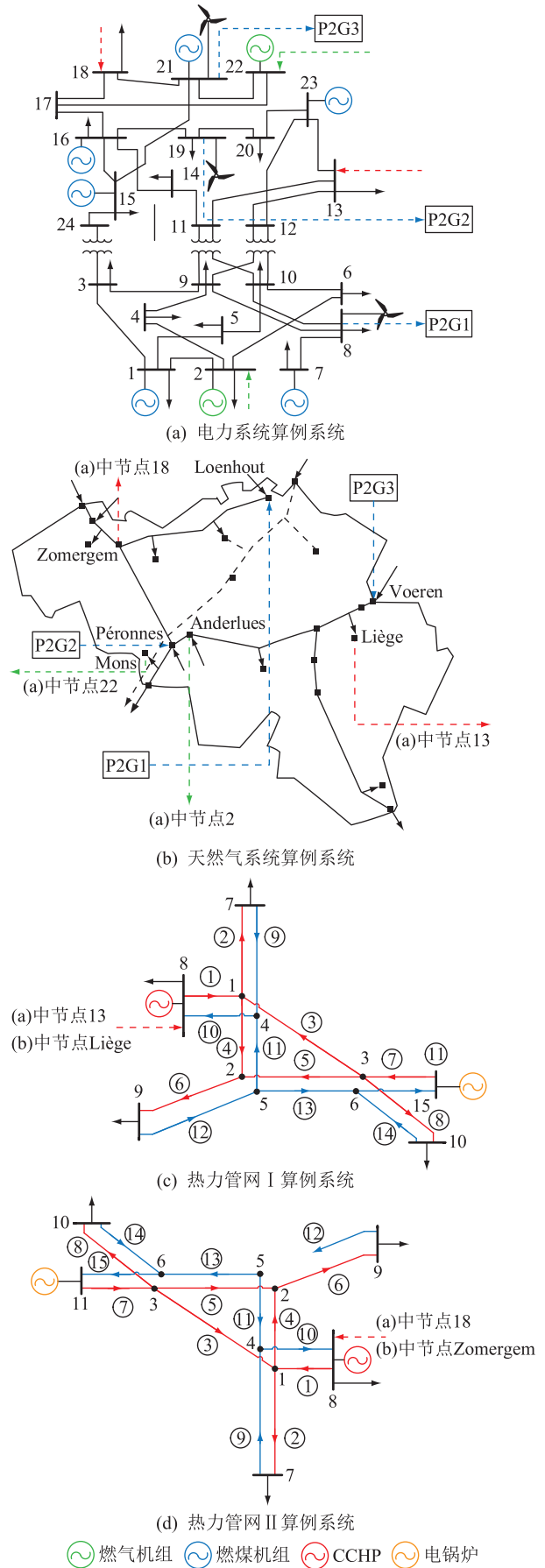


图 4 综合能源系统算例

Fig.4 Integrated energy system example



消纳风电和避免天然气网络线路阻塞,电转气的输入端也接在节点 8,19,21,输出端与天然气网络中节点 Loenhout、Péronnes 和 Voeren 相连。比利时 20 节点天然气系统包括 21 条输气管道,2 个加压站和 2 个气源点。热力网络 I 和 II 分别在节点 11 接有 1 台电锅炉,出力上、下限分别为 300 MW 和 40 MW,效率为 0.95。 $\lambda_e, \lambda_g, \lambda_h$  分别为 0.4,0.3,0.3。

根据文献[27],文中  $\varepsilon_e$  取-1,由于国内外针对天然气负荷与冷、热负荷参与需求响应的研究较少,文中类比了用电需求-价格弹性系数, $\varepsilon_g, \varepsilon_h$  均取为-1。

### 3.1.1 设备相关参数

燃气轮机的相关参数如表 1 所示。电转气相关参数如表 2 所示。热网 I 和热网 II 上的 CCHP 具有相同的配置参数,如表 3 所示。取 IEEE 24 节点电网中的耦合节点 13,18 作对比分析,假设 2 个节点在响应前负荷相同,分别对应用户 1 和用户 2,其用能偏好以及对 IDR 的期望响应收益不同。

表 1 燃气轮机相关参数

Table 1 Gas turbine related parameters

机组	IEEE 网络节点	气网节点	有功上限/MW	有功下限/MW	转化效率/%
GT1	2	Anderlues	104	0	43
GT2	22	Mons	80	0	43

表 2 电转气相关参数

Table 2 P2G related parameters

机组	IEEE 网络节点	气网节点	输入上限/MW	输入下限/MW	转甲烷效率/%	运行成本/(美元·MW <sup>-1</sup> )
P2G1	8	Loenhout	88	0	60	1.5
P2G2	19	Péronnes	88	0	60	1.6
P2G3	21	Voeren	66	0	60	1.5

表 3 CCHP 相关参数

Table 3 CCHP related parameters

名称	出力上限/MW	出力下限/MW	效率/%
电制冷机	200	0	400
吸收式制冷	200	0	110
热-电联产	350	0	75
燃气锅炉	500	0	90
换热器	10 000	0	90

### 3.1.2 负荷参数

假设耦合节点 13,18 具有相同的多能负荷用户,且具有相同的初始负荷曲线,如图 5 所示。

### 3.1.3 储能参数

假设耦合节点 13,18 都存在多类型储能用户,其电、气和热储能分别接入系统,假设 2 个节点的储能参数相同,如表 4 所示。

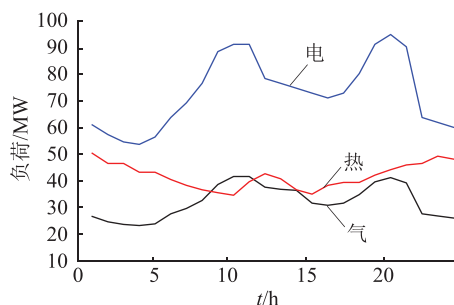


图 5 响应前初始负荷

Fig.5 Initial load before response

表 4 多类型储能相关参数

Table 4 Multi-type energy storage related parameters

名称	容量/MW	出力下限/MW	损耗率/%	效率/%
电	20	0	1	95
气	20	0	2	90
热	20	0	5	90

## 3.2 结果分析

### 3.2.1 节点能源价格

经过系统侧和需求侧的调度和 IDR 优化后,算例系统中的节点能源价格如图 6 所示。在此价格下,系统侧和需求侧的优化达到均衡状态。系统调度成本为 3 546 201.36 美元;耦合节点 13,18 的用户效用分别为 26 931.45 美元,28 427.64 美元。

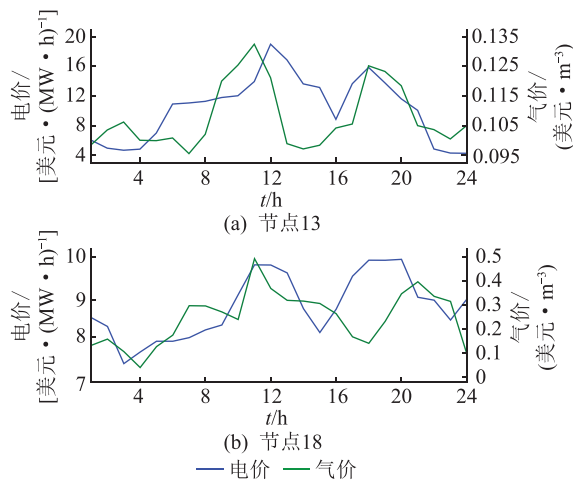


图 6 节点能源价格

Fig.6 Node energy prices

由图 6 可知,受节点内多能负荷的峰谷影响,耦合节点 13,18 的能源价格呈现明显的峰谷状。节点 13 的气价相对节点 18 来说较低,原因为节点 21 接入的风电和 P2G3 机组使得相连的天然气网络节点 Voeren 的天然气单位供给成本降低,进而使相邻节点 Liège 的天然气单位供给成本降低。节点 18 的电价相对节点 13 较低,原因为与节点 18 相邻的节点 21 接有风电机组,降低了火电机组出力,电力单位供给成本降低,因此节点电价相对较低。

### 3.2.2 柔性负荷用户响应情况分析

对比耦合节点 13,18 的柔性负荷响应量,结果如图 7 所示。图 7 中正值为增加的用能,负值为减少的用能。可以看出,耦合节点 13 上的电能减少较多,这是因为节点 13 的电价相对较高,用户通过消耗天然气和热来替代部分电的需求。耦合节点 18 的电能增加较多,热能减少较多,这是因为节点 18 的天然气价格相对较高,用户通过消耗电能来满足部分用热、用气需求。根据节点电价和气价来调整电、气、热的消耗,在满足生产生活的基础上,提高用户用能的满意度。

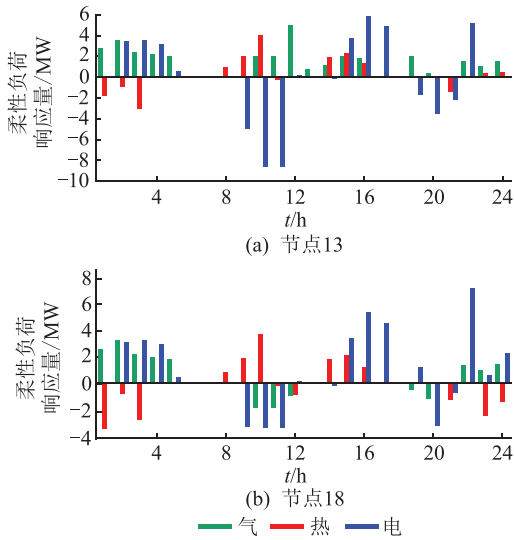


图 7 柔性负荷响应量

Fig.7 Response of flexible load

### 3.2.3 储能用户响应情况分析

耦合节点 13,18 的储能响应情况见图 8。图 8 中正值为储能消耗能量,负值为释放能量。可以看出,受节点能源价格影响,2 个节点在储能的能量时移效果上具有“谷充峰放”特征。同时,由于节点 13 电价更高,节点 18 气价更高,则耦合节点 13 更多地释放电能,耦合节点 18 更多地释放热和天然气。

### 3.2.4 电动汽车用户响应情况分析

假设耦合节点 13,18 分别含 1 000 个电动汽车充电桩,用户可在各自节点充、放电,将其聚合为整体参与需求响应。耦合节点 13,18 的电动汽车响应情况如图 9 所示。由于文中设置电动汽车 1 a 只进行 1 次放电,根据图 9,电动汽车在午间电价高峰时段进行放电,在夜间电价低谷时段进行充电。该电动汽车响应行为保证了充、放电的连续性,有利于延长电动汽车电池使用寿命,提高经济性。

### 3.2.5 多能用户负荷变化情况分析

耦合节点 13,18 的响应后多能负荷和原始负荷如图 10 所示。

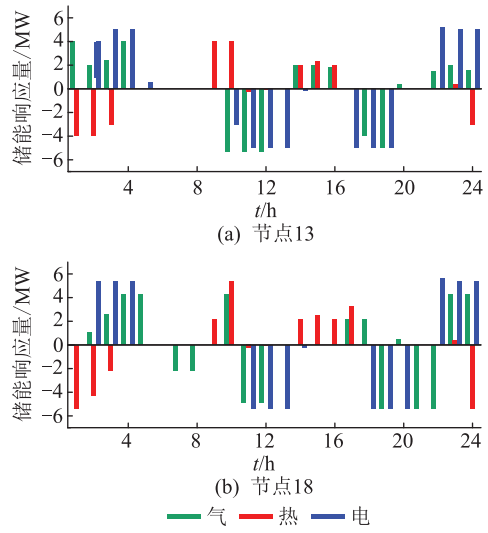


图 8 储能响应量

Fig.8 Response of energy storage

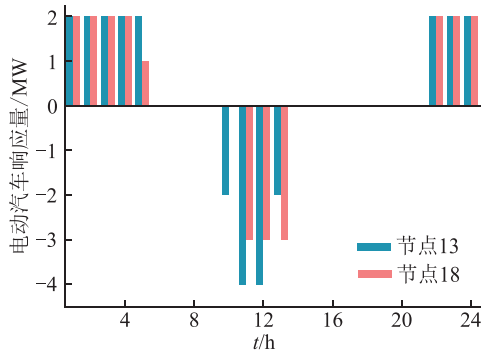


图 9 电动汽车响应量

Fig.9 Response of electric vehicle

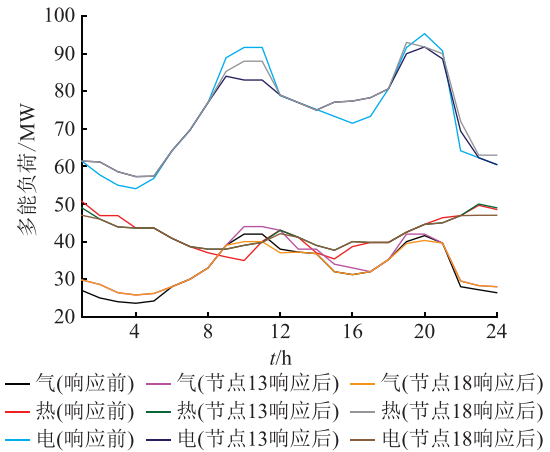


图 10 响应前后多能负荷

Fig.10 Multi-energy load before and after response

由图 10 可知,2 个节点响应后的多能负荷曲线更平滑,且与节点能源价格趋势相近,但仍存在明显的峰谷趋势。可见,考虑 IDR 后,需求侧的多能用户负荷曲线得以改善,有利于提高系统调度、规划的经济性和合理性。

## 4 结语

文中以区域电-气互联综合能源系统为基础,通过 CCHP,构建了园区级冷-热-电-气综合能源系统。建立了综合能源系统调度优化模型,通过节点能量平衡方程分析了节点能源价格,建立了考虑柔性负荷、储能、电动汽车为参与主体的 IDR 模型。算例基于系统内不同位置节点的多能用户,分析了柔性负荷、储能、电动汽车的响应情况,阐述了节点能源价格和响应前后多能负荷的关系。文中关于综合能源系统 IDR 行为的研究表明,在提升用户效用的同时,充分利用柔性负荷特性,可以有效降低运行成本。后续可以考虑用户响应的不确定性,在用户用能行为方面继续深入研究。

### 参考文献:

[1] 国家能源局. 国家关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见[EB/OL]. [2020-05-30]. <http://rench.smesd.gov.cn/ecdomain/jnrc/index/gmbgegiiejafbbodjlocigkedbdjccbo/201603-08130440106.html>.  
National Energy Administration. State guidance on promoting the development of "internet+" smart energy[EB/OL]. [2020-05-30]. <http://rench.smesd.gov.cn/ecdomain/jnrc/index/gmbgegiiejafbbodjlocigkedbdjccbo/20160308130440106.html>.

[2] 王伟亮,王丹,贾宏杰,等. 能源互联网背景下的典型区域综合能源系统稳态分析研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016,36(12):3292-3305.  
WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Review of steady-state analysis of typical regional integrated energy system under the background of energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2016,36(12):3292-3305.

[3] 王伟亮,王丹,贾宏杰,等. 考虑天然气网络状态的电力-天然气区域综合能源系统稳态分析[J]. 中国电机工程学报, 2017,37(5):1293-1304.  
WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Steady state analysis of electricity-gas regional integrated energy system with consideration of NGS network status[J]. Proceedings of the CSEE, 2017,37(5):1293-1304.

[4] 孙宏斌,郭庆来,潘昭光. 能源互联网:理念、架构与前沿展望[J]. 电力系统自动化,2015,39(19):1-8.  
SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang. Energy Internet: concept, architecture and frontier outlook[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015,39(19):1-8.

[5] 孙宏斌,潘昭光,郭庆来. 综合能源能量管理研究:挑战与展望[J]. 电力系统自动化,2016,40(15):1-8,16.  
SUN Hongbin, PAN Zhaoguang, GUO Qinglai. Energy management for multi-energy flow: challenges and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016,40(15):1-8,16.

[6] MOGHADDAS T S M, SALIMINIA L A. Long-term market equilibrium in smart grid paradigm with introducing demand response provider in competition[J]. IEEE Transactions on Smart

Grid, 2015,6(6):2794-2806.

[7] WANG D, WANG C, LEI Y, et al. Prospects for key technologies of new-type urban integrated energy system[J]. Global Energy Interconnection, 2019,2(5):403-413.

[8] WU D, MA H, MAO J, et al. A unified model for diagnosing energy usage abnormalities in regional integrated energy service systems[J]. Global Energy Interconnection, 2019,2(4):361-367.

[9] 徐笋,孙宏斌,郭庆来. 综合需求响应研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2018,38(24):7194-7205.  
XU Zheng, SUN Hongbing, GUO Qinglai. Review and prospect of integrated demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2018,38(24):7197-7205.

[10] 吴建中. 欧洲综合能源系统发展的驱动与现状[J]. 电力系统自动化, 2016,40(5):1-7.  
WU Jianzhong. Drivers and state-of-the-art of integrated energy systems in Europe[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016,40(5):1-7.

[11] FRAGAKI A, ANDERSEN A N. Conditions for aggregation of CHP plants in the UK electricity market and exploration of plant size[J]. Applied Energy, 2011,88(39):30-40.

[12] FRAGAKI A, ANDERSEN A N, TOKE D. Exploration of economical sizing of gas engine and thermal store for combined heat and power plants in the UK[J]. Energy, 2008,33(16):59-70.

[13] BUBER T, ROON S V, GRUBER A, et al. Demand response potential of electrical heat pumps and electric storage heaters[C]//Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IECON, 2013:8028-8032.

[14] 高滢,王芃,薛友,等. 计及需求侧管理的电-气集成能源系统协同规划[J]. 电力系统自动化, 2018,42(13):3-11.  
GAO Ying, WANG Peng, XUE You, et al. Collaborative planning of integrated electricity-gas energy systems considering demand side management[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018,42(13):3-11.

[15] BOZCHALUI M C, HASHMI S A, HASSEN H, et al. Optimal operation of residential energy hubs in smart grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012,3(4):1755-1766.

[16] BRAHMAN F, HONARMAND M, JADID S. Optimal electrical and thermal energy management of a residential energy hub, integrating demand response and energy storage system[J]. Energy and Buildings, 2015,90(3):65-75.

[17] 王珺,顾伟,陆帅,等. 结合热网模型的多区域综合能源系统协同规划[J]. 电力系统自动化, 2016,40(15):17-24.  
WANG Jun, GU Wei, LU Shuai, et al. Coordinated planning of multi-district integrated energy system combining heating network model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016,40(15):17-24.

[18] 王成山,洪博文,郭力,等. 冷热电联供微网优化调度通用建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2013,33(31):26-33.  
WANG Chengshan, HONG Bowen, GUO Li, et al. A general modeling method for optimal dispatching of combined cooling,



- heating and power microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013,33(31):26-33.
- [19] 姚帅,顾伟,张雪松,等. 热网特性对于综合能源系统超短期调度的影响[J]. 电力系统自动化,2018,42(14):89-96.  
YAO Shuai, GU Wei, ZHANG Xuesong, et al. Effect of heating network characteristics on ultra-short-term scheduling of integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018,42(14):89-96.
- [20] 董帅,王成福,徐士杰,等. 计及网络动态特性的电-气-热综合能源系统日前优化调度[J]. 电力系统自动化,2018,42(13):12-29.  
DONG Shuai, WANG Chengfu, XU Shijie, et al. Day-ahead optimal scheduling of electricity-gas-heat integrated energy system considering dynamic characteristics of network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018,42(13):12-19.
- [21] 卫志农,张思德,孙国强,等. 计及电转气的电气互联综合能源系统削峰填谷研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(16):4601-4609.  
WEI Zhinong, ZHANG Side, SUN Guoqiang, et al. Power-to-gas considered peak load shifting research for integrated electricity and natural-gas energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017,37(16):4601-4609.
- [22] CORREA-POSADA C M, SÁNCHEZ-MARTÍN P. Integrated power and natural gas model for energy adequacy in short-term operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015,30(6):3347-3355.
- [23] 杨晓东,张有兵,卢俊杰,等. 基于区块链技术的能源局域网储能系统自动需求响应[J]. 中国电机工程学报,2017,37(13):3703-3716.  
YANG Xiaodong, ZHANG Youbing, LU Junjie, et al. Blockchain-based automated demand response method for energy storage system in an energy local network[J]. Proceedings of CSEE, 2017,37(13):3703-3716.
- [24] 李志伟,赵书强,刘应梅. 电动汽车分布式储能控制策略及应用[J]. 电网技术,2016,40(2):442-450.  
LI Zhiwei, ZHAO Shuqiang, LIU Yingmei. Control strategy and application of distributed electric vehicle energy storage[J]. Power System Technology, 2016,40(2):442-450.
- [25] 任艺,周明,李庚银. 考虑用户需求响应的售电公司购售电决策双层模型[J]. 电力系统自动化,2017,41(14):30-36.  
REN Yi, ZHOU Ming, LI Gengyin. Bi-level model of electricity procurement and sale strategies for electricity retailers considering users' demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017,41(14):30-36.
- [26] THIMMAPURAM P R, KIM J. Consumers' price elasticity of demand modeling with economic effects onelectricity markets using an agent-based model[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013,4(1):390-397.
- [27] BRADLEY P, LEACH M, TORRITI J. Review of the costs and benefits of demand response for electricity in the UK[J]. Energy Policy, 2013,52(3):312-327.

#### 作者简介:



陈宇沁

陈宇沁(1991),男,硕士,工程师,从事电力需求侧管理、智能用电技术相关工作(E-mail:493749521@qq.com);

曹晓冬(1990),男,博士,工程师,从事电力需求侧管理、智能用电技术相关工作;

王俊(1995),男,硕士在读,研究方向为综合能源系统、电力市场与电力经济。

## Integrated demand response behavior of integrated energy system

CHEN Yuqin<sup>1</sup>, CAO Xiaodong<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>2</sup>, SHAO Yunfan<sup>2</sup>, DOU Xun<sup>2</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Marketing Service Center, Nanjing 210024, China;

2. College of Electrical Engineering and Control Science, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

**Abstract:** For integrated energy systems that couple multiple forms of energy such as electricity, gas, cold and heat. Integrated demand response (IDR) of demand-side resources such as flexible loads, energy storage, and electric vehicles is conducive to tapping the response potential of multi-energy loads, stimulating integrated energy flexibility of the system and improving energy efficiency. Firstly, based on the regional electric-gas integrated energy system, a park-level cold-heat-electric-gas integrated energy system is constructed. Then, an integrated energy system scheduling model is established. The node energy balance equation is used to analyze the node energy price and clarify the dispatch-energy price-integrated demand response transfer relationship of the system. Based on the nodal energy price, the IDR model considering flexible loads, energy storage and electric vehicles as participants is established. Finally, the flexible load, energy storage, and electric power are analyzed through examples. The response of the electric vehicle is analyzed based on the energy prices of the nodes, and the load curves before and after IDR of the multi-energy users in different locations are analyzed. Ther analysis shows that while improving user utility, making full use of flexible load characteristics can effectively reduce operating costs.

**Keywords:** integrated energy systems; integrated demand response (IDR); nodal energy price; multiple energy user; behavior analysis

(编辑 吴楠)