

# 计及需求价格弹性的区域能源中心建模与日前优化调度

陈泽兴, 张勇军, 许志恒, 蔡泽祥, Thanh tung HA

(广东省绿色能源技术重点实验室, 华南理工大学电力学院, 广东省广州市 510640)

**摘要:** 能源市场管制放松的背景下, 将能源价格作为一种可控资源, 有望进一步推进区域能源中心 (DEC) 内电、气、冷/热等多种能源的优化运行。文中以能量枢纽为基础模型, 提出了 DEC 功率平衡方程的通用线性化建模方法; 同时, 计及能源需求的价格弹性, 对其进行分段线性化建模, 并引入 0-1 变量及线性约束将分段线性函数的描述统一化。进一步, 以 DEC 净收益最大化为目标, 计及能源价格可控性, 建立了 DEC 日前优化调度的混合整数二次规划模型, 通过 GAMS 调用 CPLEX 进行求解。最后, 以微网型 DEC 为例, 验证了所提建模方法的有效性, 分析了能源价格是否参与调控、不同价格弹性及新能源预测误差对调度结果的影响。结果表明, 充分利用负荷的价格弹性, 在最大化 DEC 净收益之余, 有利于减小负荷方差和峰谷差, 深度挖掘 DEC 的优化潜力。

**关键词:** 价格弹性; 区域能源中心; 分段线性化; GAMS; 优化调度

## 0 引言

以能源的分布式开发、多能互补综合利用为核心, 加强需求侧管理, 实现用户真正参与, 推进能源系统削峰填谷、低碳高效, 是能源系统发展的必由之路<sup>[1-3]</sup>。在此背景下, 打破现有各供能系统独立规划、设计、运行的模式, 实现能源市场化, 构建多能流耦合的综合能源系统 (integrated energy system, IES) 备受关注<sup>[4-6]</sup>。

IES 可抽象看成由多种能源网络实现多个区域能源中心 (district energy centre, DEC) 的连接<sup>[7]</sup>。DEC 是多能源耦合的区域分布式能源系统, 它通过各类能源转换器实现区域内电、热、冷、气等能源之间的交互, 供能对象包括商务区、产业园区、微能源网、工业园区、智能楼宇等, 具小地块特征。为统一描述 DEC 中多能流耦合的关系, 苏黎世联邦理工学院于 2007 年首次提出了能量枢纽 (energy hub, EH) 的建模方法<sup>[8]</sup>, 该方法通过耦合矩阵描述 DEC 的能量分配与转化关系, 实现对 DEC 中多能流的耦合联系的数学建模, 并在解决 DEC 规划、优化运行问题中发挥了重要作用, 已成为研究热点<sup>[9-10]</sup>。

在规划层面, 文献<sup>[11-13]</sup>分别将 EH 建模方法应用于医院、酒店和居民用户这几类 DEC 的热电能

源供应问题上, 并对能源供应/存储设备 (如热电联产 (CHP)、热锅炉、电池等) 的容量进行了优化选择; 文献<sup>[14]</sup>则通过建立含 0-1 变量的模型, 用以确定 EH 中设备的最优组合; 在优化运行层面, 文献<sup>[15-16]</sup>以居民的电热冷供应系统进行 EH 建模, 在满足相应运行约束的条件下, 优化各式能源之间的分配转化关系, 实现用能成本最小化; 文献<sup>[17]</sup>对 EH 内设备响应需求侧的灵活性进行分析, 在 EH 优化调度模型中计及了需求侧响应; 文献<sup>[18-19]</sup>还分别增加了新能源、电动汽车等元素, 统一于 EH 建模, 并考虑了系统不确定因素对运行的影响。类似基于 EH 建模的 DEC 规划、运行方法的研究仍有不少<sup>[20-22]</sup>, 但总体看来:

1) 基于 EH 的建模方法, 主要用来描述 DEC 中多能源耦合功率的稳态平衡关系, 但大部分文献针对不同 DEC 的建模需要具体分析, 缺乏通用的建模方法, 增加了复杂系统的建模难度; 文献<sup>[7]</sup>在研究 DEC 稳态优化调度时, 对 DEC 通用性建模进行了初探, 但由于能量分配系数的引入, 使得原本可用线性描述的 DEC 功率平衡方程非线性化, 增加了问题的复杂性。

2) DEC 日前优化调度方面, 尽管有部分文献考虑负荷的需求侧响应, 但需求侧响应的表现形式多反映为可平移负荷、可控负荷等<sup>[17, 23-25]</sup>, 价格特性反映不明显。能源市场管制放松的背景下<sup>[26-27]</sup>, 能源价格将发展成为一种控制资源, 计及需求价格弹性并以实时/分时能源价格的制定引导需求侧参

收稿日期: 2017-05-24; 修回日期: 2017-08-18。

上网日期: 2017-10-20。

国家自然科学基金资助项目 (51777077); 广东省自然科学基金资助项目 (2017A030313304)。

与系统决策将成为趋势。

基于此,本文首先在 EH 模型的基础上,以 DEC 内各设备的连接关系矩阵描述为关键表征量,提出了 DEC 稳态功率平衡方程通用性建模方法,将 DEC 功率平衡方程描述为待求变量的线性表达;再者,计及能源负荷需求的价格弹性,提出能源负荷需求的分段线性化建模方法;进一步,考虑能源价格作为一种控制手段,以最大化 DEC 净收益为目标,建立了 DEC 日前优化调度模型;最后,通过一个微网型 DEC 对所提模型进行了验证和算例仿真。

## 1 DEC 稳态功率平衡方程通用线性化建模

基于 EH 模型的 DEC 抽象结构如图 1 所示,描述为输入-输出的二端口网络<sup>[8]</sup>。本节提出 DEC 稳态功率平衡方程通用线性化建模,主要反映多能流功率的稳态/准稳态的有功平衡关系,适于 DEC 日前计划,其“通用性”体现在该建模方法可基于 DEC 内设备连接关系矩阵的描述获得功率平衡方程,适用于任一 DEC,便于计算机编程实现。

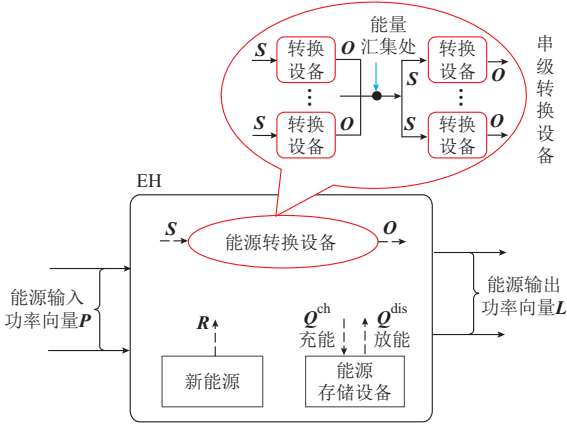


图 1 基于 EH 模型的 DEC 示意图  
Fig.1 Diagram of DEC based on EH model

具体地,DEC 中  $M$  个能源输入功率向量  $\mathbf{P} = [P_1, P_2, \dots, P_m, \dots, P_M]^T$  ( $m = 1, 2, \dots, M$ ) 表征 DEC 与上级能源系统的功率交换,  $N$  个能源输出功率向量  $\mathbf{L} = [L_1, L_2, \dots, L_n, \dots, L_N]^T$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ) 表示 DEC 的负荷。DEC 内部包含了能源转换设备(可能组成串级转换设备,具体定义见下文)、能源存储设备、新能源设备等。

定义 DEC 内  $K$  个新能源出力的功率列向量为  $\mathbf{R} = [R_1, R_2, \dots, R_k, \dots, R_K]^T$  ( $k = 1, 2, \dots, K$ );  $H$  个能源存储设备充能功率和放能功率分别为  $\mathbf{Q}^{\text{ch}} = [Q_1^{\text{ch}}, Q_2^{\text{ch}}, \dots, Q_h^{\text{ch}}, \dots, Q_H^{\text{ch}}]^T$ ,  $\mathbf{Q}^{\text{dis}} = [Q_1^{\text{dis}}, Q_2^{\text{dis}}, \dots, Q_h^{\text{dis}}, \dots, Q_H^{\text{dis}}]^T$  ( $h = 1, 2, \dots, H$ ); 所有的能源转换设备共有  $J$  个输入端,功率列向量为  $\mathbf{S} =$

$[S_1, S_2, \dots, S_j, \dots, S_J]^T$  ( $j = 1, 2, \dots, J$ ), 对应的  $I$  个输出端的功率列向量为  $\mathbf{O} = [O_1, O_2, \dots, O_i, \dots, O_I]^T$  ( $i = 1, 2, \dots, I$ )。  $\mathbf{P}, \mathbf{L}, \mathbf{O}, \mathbf{S}, \mathbf{R}, \mathbf{Q}^{\text{ch}}, \mathbf{Q}^{\text{dis}}$  功率正方向定义如图 1 所示。对于  $\mathbf{O}$  和  $\mathbf{S}$  有

$$\mathbf{O} = \boldsymbol{\eta} \mathbf{S} \quad (1)$$

式中:  $\boldsymbol{\eta} = (\eta_{ij})_{I \times J}$  为  $I$  行  $J$  列矩阵,其中  $\eta_{ij}$  为能源转换设备输入端  $j$  至输出端  $i$  的稳态转换效率<sup>[7,9]</sup>。

从设备连接关系看,DEC 内新能源、能源存储设备可连接于 DEC 的输入/输出端或各能源转换设备的输入/输出端。因此,当存在新能源及能源存储设备的功率向量  $\mathbf{R}, \mathbf{Q}^{\text{ch}}, \mathbf{Q}^{\text{dis}}$  时,可认为是对  $\mathbf{P}, \mathbf{L}, \mathbf{O}, \mathbf{S}$  的修正。基于此,先对仅含能源转换设备的 DEC 进行数学建模。

### 1) 端口关联矩阵 $\mathbf{C}$

该建模方法中,能量从 DEC 的输入端到输出端的任一通路都需经过至少一种能源转换设备,若存在某一通路不经过能源转换设备,需自行增加虚拟能源转换设备,并认为转化效率为 100%。定义端口关联矩阵  $\mathbf{C}$  为  $M+N$  行  $I+J$  列矩阵,表征 DEC 输入/输出端口与能源转换设备输入/输出端口的连接关系,且  $\mathbf{C}$  与  $\mathbf{P}, \mathbf{L}, \mathbf{O}, \mathbf{S}$  的关系为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{L} \end{bmatrix} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} \mathbf{O} \\ \mathbf{S} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{\text{PO}} & \mathbf{C}_{\text{PS}} \\ \mathbf{C}_{\text{LO}} & \mathbf{C}_{\text{LS}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{O} \\ \mathbf{S} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{C}_{\text{PO}} = (c_{mi})_{M \times I}$ ,  $\mathbf{C}_{\text{PS}} = (c_{mj})_{M \times J}$ ,  $\mathbf{C}_{\text{LO}} = (c_{ni})_{N \times I}$ ,  $\mathbf{C}_{\text{LS}} = (c_{nj})_{N \times J}$  为  $\mathbf{C}$  的分块矩阵,并且

$$\begin{cases} c_{mi} = \begin{cases} -1 & m \text{ 端与 } i \text{ 端相连} \\ 0 & m \text{ 端与 } i \text{ 端不相连} \end{cases} \\ c_{mj} = \begin{cases} 1 & m \text{ 端与 } j \text{ 端相连} \\ 0 & m \text{ 端与 } j \text{ 端不相连} \end{cases} \\ c_{ni} = \begin{cases} 1 & n \text{ 端与 } i \text{ 端相连} \\ 0 & n \text{ 端与 } i \text{ 端不相连} \end{cases} \\ c_{nj} = \begin{cases} -1 & n \text{ 端与 } j \text{ 端相连} \\ 0 & n \text{ 端与 } j \text{ 端不相连} \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $m$  端和  $n$  端分别指能源输入端口  $P_m$  和能源输出端口  $L_n$ ;  $i$  端和  $j$  端分别指能源转换设备输出端口  $O_i$  及输入端口  $S_j$ 。

### 2) 串级转换设备端口位置矩阵 $\mathbf{D}$

串级转换设备(见图 1)由多个能源转换设备组成,是指 DEC 中的能量经过一个(多个)能源转换设备输出后,汇集输入另一个(多个)能源转换设备中,且在能量汇集处不与 DEC 输入输出端相连。

假设 DEC 中有  $G$  个串级转换设备,  $g$  为其计数变量( $g = 1, 2, \dots, G$ ),定义  $G \times (I+J)$  阶矩阵  $\mathbf{D}$  为串级转换设备端口位置矩阵,且

$$\mathbf{D} = [\mathbf{D}_O \mid \mathbf{D}_S] \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{D}_O = (D_{gi})_{G \times I}$  和  $\mathbf{D}_S = (D_{gj})_{G \times J}$  为  $\mathbf{D}$  的分块

矩阵。

对于某串级转换设备  $g$ ,若在能量汇集处与能源转换设备输出、输入端口  $i$  和  $j$  相连接,则对应的  $D_{gi}$  和  $D_{gj}$  取 1,否则取 0,则  $\mathbf{D}$  与  $\mathbf{O}$  和  $\mathbf{S}$  的关系为:

$$\mathbf{D}_O \mathbf{O} = \mathbf{D}_S \mathbf{S} \quad (5)$$

因此,不考虑 DEC 内新能源和储能时,联立式(1)、式(2)和式(5),消去矩阵  $\mathbf{O}$ ,可得 DEC 稳态功率平衡方程如式(6)所示。

$$\mathbf{Z}_A \begin{bmatrix} \mathbf{S} \\ \mathbf{P} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{L} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{Z}_A = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{PO}\boldsymbol{\eta} + \mathbf{C}_{PS} & -\mathbf{I} \\ \mathbf{C}_{LO}\boldsymbol{\eta} + \mathbf{C}_{LS} & \mathbf{0} \\ \mathbf{D}_O\boldsymbol{\eta} - \mathbf{D}_S & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{I}$  为  $M$  阶单位矩阵。

3) 计及新能源、储能的 DEC 稳态功率平衡方程

定义新能源设备位置矩阵  $\mathbf{A}$  为  $I+J+M+N$  行  $K$  列矩阵,储能设备位置矩阵  $\mathbf{B}$  为  $I+J+M+N$  行  $H$  列矩阵。将矩阵  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{B}$  按  $I, J, M, N$  维度进行分块,有

$$\begin{cases} \mathbf{A} = [\mathbf{A}_O^T \mid \mathbf{A}_S^T \mid \mathbf{A}_P^T \mid \mathbf{A}_L^T]^T \\ \mathbf{B} = [\mathbf{B}_O^T \mid \mathbf{B}_S^T \mid \mathbf{B}_P^T \mid \mathbf{B}_L^T]^T \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{A}_O = (A_{ik})_{I \times K}$  和  $\mathbf{B}_O = (B_{ih})_{I \times H}$  分别表示新能源设备、储能设备与 DEC 内部各能源转换设备输出端口的关系,若新能源设备  $k$  或储能设备  $h$  存储/补充能源转换设备输出端口  $i$  的能量,对应元素  $A_{ik}$  和  $B_{ih}$  取值 1,否则为 0;  $\mathbf{A}_S = (A_{jk})_{J \times K}$ ,  $\mathbf{A}_P = (A_{mk})_{M \times K}$ ,  $\mathbf{A}_L = (A_{nk})_{N \times K}$  分别表示新能源设备与各能源转换设备输入端口、DEC 输入端、DEC 输出端的能量承接关系;  $\mathbf{B}_S = (B_{jh})_{J \times H}$ ,  $\mathbf{B}_P = (B_{mh})_{M \times H}$ ,  $\mathbf{B}_L = (B_{nh})_{N \times H}$  分别表示储能设备与各能源转换设备输入端口、DEC 输入端、DEC 输出端的能量承接关系。  $\mathbf{A}_S, \mathbf{A}_P, \mathbf{A}_L, \mathbf{B}_S, \mathbf{B}_P, \mathbf{B}_L$  矩阵内元素的取值方式与  $\mathbf{A}_O$  和  $\mathbf{B}_O$  相同。

表 1 给出了计及新能源、储能设备时,对式(2)和式(5)中的  $\mathbf{P}, \mathbf{L}, \mathbf{O}, \mathbf{S}$  的修正公式。

表 1  $\mathbf{P}, \mathbf{L}, \mathbf{O}, \mathbf{S}$  的修正公式  
Table 1 Revised formulas of  $\mathbf{P}, \mathbf{L}, \mathbf{O}, \mathbf{S}$

原矩阵	修正后矩阵
$\mathbf{P}$	$\mathbf{P} - \mathbf{B}_P(\mathbf{Q}^{\text{ch}} - \mathbf{Q}^{\text{dis}}) + \mathbf{A}_P \mathbf{R}$
$\mathbf{L}$	$\mathbf{L} + \mathbf{B}_L(\mathbf{Q}^{\text{ch}} - \mathbf{Q}^{\text{dis}}) - \mathbf{A}_L \mathbf{R}$
$\mathbf{O}$	$\mathbf{O} - \mathbf{B}_O(\mathbf{Q}^{\text{ch}} - \mathbf{Q}^{\text{dis}}) + \mathbf{A}_O \mathbf{R}$
$\mathbf{S}$	$\mathbf{S} + \mathbf{B}_S(\mathbf{Q}^{\text{ch}} - \mathbf{Q}^{\text{dis}}) - \mathbf{A}_S \mathbf{R}$

因此,考虑新能源和储能设备时,基于表 1 对式(2)和式(5)的修正,并联立式(1)、式(2)和式(5),可得 DEC 功率平衡方程如式(9)所示。

$$[\mathbf{Z}_A \mid \mathbf{Z}_B] \begin{bmatrix} \mathbf{S} \\ \mathbf{P} \\ \mathbf{Q}^{\text{ch}} - \mathbf{Q}^{\text{dis}} \\ \mathbf{R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{L} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$\mathbf{Z}_B =$

$$\begin{bmatrix} -(\mathbf{C}_{PO}\mathbf{B}_O - \mathbf{C}_{PS}\mathbf{B}_S - \mathbf{B}_P) & \mathbf{C}_{PO}\mathbf{A}_O - \mathbf{C}_{PS}\mathbf{A}_S - \mathbf{A}_P \\ -(\mathbf{C}_{LO}\mathbf{B}_O - \mathbf{C}_{LS}\mathbf{B}_S + \mathbf{B}_L) & \mathbf{C}_{LO}\mathbf{A}_O - \mathbf{C}_{LS}\mathbf{A}_S + \mathbf{A}_L \\ -(\mathbf{D}_O\mathbf{B}_O + \mathbf{D}_S\mathbf{B}_S) & \mathbf{D}_O\mathbf{A}_O + \mathbf{D}_S\mathbf{A}_S \end{bmatrix} \quad (10)$$

综上,通过对 DEC 内设备连接关系矩阵进行描述,即矩阵  $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$ ,基于式(9)即可列写 DEC 稳态功率平衡方程,且表达式为线性。该做法简明、清晰且具通用性,当 DEC 内设备增添删减时只需对  $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$  进行修正。

## 2 需求价格弹性与分段线性化建模

能源负荷需求的价格弹性可表示为能源价格-需求曲线上任一点的切线的斜率<sup>[28-30]</sup>。能源价格-需求曲线建立在对用户的深入调研之上,以获得用户对能源价格的响应特性为目的,开展数据收集、统计并进行函数拟合<sup>[31-33]</sup>。本文不对用户需求特性测算方面展开研究,而基于微积分中“以直代曲”的思想,认为所获得的能源价格-需求响应特性数据均可采用分段线性化进行拟合,具体为:由调研分析获得一系列能源价格-需求的有序数对,根据有序数对的变化趋势分成若干组,对每组有序数对用 MATLAB 中的 Curve Fitting 工具箱进行线性拟合<sup>[34]</sup>,获得多段分段线性函数,随后判断残差平方和是否满足预设精度,若不满足,则人为调整或增加有序数对分组数,重新进行分段线性拟合,直到残差平方和满足预设精度要求。

能源负荷需求分段线性化的数学模型可统一表示为:对于 DEC 中第  $n$  个能源负荷,在时段  $t$ ,有

$$L_{n,t} = \sum_{\omega=1}^W \delta_{n,t,\omega} (\alpha_{n,t,\omega} \rho_{n,t,\omega} + \beta_{n,t,\omega}) \quad (11)$$

式中:  $\omega (\omega = 1, 2, \dots, W)$  表示第  $\omega$  段线性函数;  $W$  为总分段数;  $\alpha$  和  $\beta$  表示线性化拟合参数,为常数,且  $\alpha$  即为能源负荷需求的价格弹性;  $\rho$  表示能源价格,为变量;  $\delta$  表示 0-1 逻辑变量,若  $\delta_{n,t,\omega}$  取 1,则表示能源负荷需求位于第  $\omega$  段线性函数上,反之,若  $\delta_{n,t,\omega}$  取 0 则表示能源负荷需求不在第  $\omega$  段线性函数上。对应的分段线性化建模示意图见附录 A 图 A1。

由于能源负荷需求仅可能在某一段分段线性函数上,因此  $W$  个逻辑变量  $\delta$  仅一个取值为 1,其余为 0。并且,当  $\delta_{n,t,\omega}$  取 0 时,对应变量  $\rho_{n,t,\omega}$  也可钳制



为 0 而与式(11)保持等价。因此,变量  $\delta$  和  $\rho$  满足:

$$\begin{cases} \delta_{n,t,w} \rho_{n,t,w} \leq \rho_{n,t,w} \leq \delta_{n,t,w} \bar{\rho}_{n,t,w} \\ \sum_{w=1}^W \delta_{n,t,w} = 1 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\bar{\rho}_{n,t,w}$  和  $\rho_{n,t,w}$  分别为第  $w$  段线性函数中能源价格的上下限值。

进一步,由式(12)可知:

当  $\delta_{n,t,w} = 0$  时,可得:

$$\begin{aligned} 0 = \delta_{n,t,w} \rho_{n,t,w} \leq \rho_{n,t,w} \leq \delta_{n,t,w} \bar{\rho}_{n,t,w} = 0 \Rightarrow \\ \rho_{n,t,w} = 0 \Rightarrow \alpha_{n,t,w} \rho_{n,t,w} \delta_{n,t,w} = \alpha_{n,t,w} \rho_{n,t,w} = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

当  $\delta_{n,t,w} = 1$  时,可得:

$$\begin{aligned} \rho_{n,t,w} \leq \rho_{n,t,w} \leq \bar{\rho}_{n,t,w} \Rightarrow \\ \alpha_{n,t,w} \rho_{n,t,w} \delta_{n,t,w} = \alpha_{n,t,w} \rho_{n,t,w} \end{aligned} \quad (14)$$

综合式(13)和式(14),则有

$$\alpha_{n,t,w} \rho_{n,t,w} \delta_{n,t,w} = \alpha_{n,t,w} \rho_{n,t,w} \quad (15)$$

同理可得:

$$\beta_{n,t,w} \rho_{n,t,w} \delta_{n,t,w} = \beta_{n,t,w} \rho_{n,t,w} \quad (16)$$

基于式(15),可将式(11)关于  $\rho$  和  $\delta$  的非线性函数转化为关于  $\rho$  和  $\delta$  的线性表达,如式(17)所示,从而保持功率平衡方程的表达式为线性,进而简化模型。

$$L_{n,t} = \sum_{w=1}^W (\alpha_{n,t,w} \rho_{n,t,w} + \beta_{n,t,w} \delta_{n,t,w}) \quad (17)$$

综上,能源负荷需求的分段线性化建模由式(17)的线性表达式及式(12)的线性约束构成。

此外,从需求法则看,能源负荷需求一般与价格成反向变动<sup>[29,33]</sup>,因此  $\alpha$  一般为负值。习惯上研究其绝对值,并认为  $|\alpha|$  越小,能源负荷需求的价格弹性越低,反之,则越大。

### 3 DEC 日前优化调度模型

以 DEC 净收益最大化为目标,计及能源负荷需求的价格弹性,建立 DEC 日前优化调度模型。模型的决策变量包括:DEC 能源输入端功率向量  $\mathbf{P}$ 、DEC 内设备功率向量  $\mathbf{S}, \mathbf{R}, \mathbf{Q}^{\text{ch}}, \mathbf{Q}^{\text{dis}}$  以及式(12)和式(17)中负荷模型涉及的变量  $\rho_{n,t,w}$  和  $\delta_{n,t,w}$ 。

#### 3.1 目标函数

目标函数如下:

$$\max \sum_{t=1}^T \left[ \sum_{n=1}^N \rho_{n,t} L_{n,t} - \sum_{m=1}^M \theta_{m,t}^A P_{m,t} - \sum_{k=1}^K \theta_{k,t}^B R_{k,t} - \Omega_t \right] \quad (18)$$

式中: $T$  为日前调度周期总时段数,以 1 h 为 1 个调度时段,则  $T=24$ ;  $\theta_{m,t}^A$  和  $\theta_{k,t}^B$  分别为  $t$  时段第  $m$  个

能源输入端和第  $k$  个新能源设备的能源购入价,为常量; $\Omega_t$  为 DEC 在  $t$  时段的运行成本,可表示为 DEC 内设备功率的一次函数,如式(19)所示。

$$\begin{aligned} \Omega_t = \sum_{j=1}^J (\lambda_{Sj} S_{j,t} + \mu_{Sj}) + \sum_{k=1}^K (\lambda_{Rk} R_{k,t} + \mu_{Rk}) + \\ \sum_{h=1}^H [\lambda_{Qh} (Q_{h,t}^{\text{dis}} + Q_{h,t}^{\text{ch}}) + \mu_{Qh}] \end{aligned} \quad (19)$$

式中: $\lambda_S$  和  $\mu_S$  表示能源转换设备的运行成本系数; $\lambda_R$  和  $\mu_R$  表示新能源运行成本系数; $\lambda_Q$  和  $\mu_Q$  表示储能设备的运行成本系数。

将式(12)和式(17)所表示的能源负荷需求模型代入式(18),并结合式(16),则目标函数可表示为决策变量的二次式,即

$$\begin{aligned} \max \sum_{t=1}^T \left[ \sum_{n=1}^N \sum_{w=1}^W (\alpha_{n,t,w} \rho_{n,t,w}^2 + \beta_{n,t,w} \rho_{n,t,w}) - \sum_{m=1}^M \theta_{m,t}^A P_{m,t} - \sum_{k=1}^K \theta_{k,t}^B R_{k,t} - \Omega_t \right] \end{aligned} \quad (20)$$

#### 3.2 约束条件

DEC 运行的约束条件主要包括:式(9)的功率平衡约束、式(12)的能源负荷价格及逻辑变量约束以及能源转换设备、储能设备、新能源设备的运行约束,与上级能源系统交换功率的约束,阐述如下。

##### 1) 能源转换设备运行约束

能源转换设备主要实现不同能源形式之间的转化和耦合,如电解槽、燃气轮机、电锅炉等;其运行约束主要为设备的出力约束和爬坡约束。对于任一能源转换设备功率,均有

$$S_j^{\min} \leq S_{j,t} \leq S_j^{\max} \quad (21)$$

$$-S_j^{\text{down}} \leq S_{j,t} - S_{j,t-1} \leq S_j^{\text{up}} \quad (22)$$

式中:上标  $\max$  和  $\min$  分别表示对应变量的上、下限,下同; $S^{\text{up}}$  和  $S^{\text{down}}$  分别表示设备爬坡上升、下降出力限值。

##### 2) 储能设备运行约束

DEC 常见储能设备包括电池、储热装置等。作为能量存储装置,储能设备除需满足功率约束外,还需满足能量约束。并且,由于储能设备无法同时处于充、放两种状态,即  $Q_h^{\text{dis}}$  和  $Q_h^{\text{ch}}$  中至少一个为 0,引入 0-1 逻辑变量  $\zeta$  进行处理,则储能设备所涉及约束条件如下(对于任意  $h$ ):

$$\begin{cases} E_h(t+1) = E_h(t) + Q_h^{\text{ch}}(t) - Q_h^{\text{dis}}(t) - e_h \\ E_h^{\min}(t) \leq E_h(t) \leq E_h^{\max}(t) \\ E_h(0) = E_h(T) \\ 0 \leq Q_h^{\text{ch}}(t) \leq \zeta^{\text{ch}}(t) Q_h^{\text{ch},\max}(t) \\ 0 \leq Q_h^{\text{dis}}(t) \leq \zeta^{\text{dis}}(t) Q_h^{\text{dis},\max}(t) \\ \zeta^{\text{ch}}(t) + \zeta^{\text{dis}}(t) \leq 1 \end{cases} \quad (23)$$

式中: $E$ 表示储能设备所存能量, $E(0)$ 为初始能量值,设为0; $e$ 表示储能设备的耗散能量; $\zeta_h^{\text{ch}}(t)$ 和 $\zeta_h^{\text{dis}}(t)$ 分别为第 $h$ 个储能设备在 $t$ 时段充、放状态的逻辑变量。

### 3) 新能源设备运行约束

新能源,如风电、光伏发电等,其调度主要结合预测出力,满足下述约束:

$$0 \leq R_{k,t} \leq R_{k,t}^* \quad (24)$$

式中: $R_{k,t}^*$ 为新能源 $k$ 在 $t$ 时段的预测出力。

新能源调度出力 $R_{k,t}$ 主要评估系统新能源接入的能力,调度结果 $R_{k,t}$ 越接近预测值,则表示新能源接纳能力越强。考虑新能源预测误差对新能源接入能力评估的影响,将 $R_{k,t}^*$ 表示成区间的形式,即 $[R_{k,t}^{\text{min}}, R_{k,t}^{\text{max}}]$ , $R_{k,t}^{\text{min}}$ 和 $R_{k,t}^{\text{max}}$ 分别指新能源预测出力下、上限,则式(24)可表示为:

$$0 \leq R_{k,t} \leq [R_{k,t}^{\text{min}}, R_{k,t}^{\text{max}}] \quad (25)$$

式(25)为带区间数约束条件,引入置信水平 $\chi$ 将其转化为一般的实数约束条件,见式(26)<sup>[35-36]</sup>。

$$0 \leq R_{k,t} \leq \chi R_{k,t}^{\text{min}} + (1-\chi)R_{k,t}^{\text{max}} \quad (26)$$

其中,置信水平 $\chi$ 表征区间约束的满意程度,即区间约束式(25)的可能度,取值 $[0,1]$ 。

### 4) 与上级能源系统功率交换约束

$$0 \leq P_m \leq P_m^{\text{max}} \quad (27)$$

综上,所建立的计及需求价格弹性的DEC日前优化调度模型为混合整数二次规划模型,本文采用GAMS调用CPLEX进行求解<sup>[37]</sup>。

## 4 算例分析

本文基于文献[25]的微网型能源集线器,对其

$$[\mathbf{Z}_A \vdots \mathbf{Z}_B] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -\eta_{\text{mc}} & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \eta_{\text{fce}} & \eta_{\text{che1}} & 0 & \eta_{\text{v1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \eta_{\text{fct}} & \eta_{\text{cht1}} & \eta_{\text{gf}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \eta_{\text{che2}} & \eta_{\text{che3}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \eta_{\text{cht2}} & \eta_{\text{cht3}} & \eta_{\text{ef}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \eta_{\text{H2}} & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{S} = [S_{\text{H2}} \quad S_{\text{CH4}} \quad S_{\text{FC}} \quad S_{\text{CHP1}} \quad S_{\text{GF}} \quad S_{\text{V1}} \quad S_{\text{V2}} \quad S_{\text{CHP2}} \quad S_{\text{CHP3}} \quad S_{\text{ef}}]^T \quad \mathbf{Q}^{\text{ch}} = [Q_{\text{sh}}^{\text{ch}} \quad Q_{\text{sh}}^{\text{ch}} \quad Q_{\text{se}}^{\text{ch}}]^T$$

$$\mathbf{Q}^{\text{dis}} = [Q_{\text{sh}}^{\text{dis}} \quad Q_{\text{sh}}^{\text{dis}} \quad Q_{\text{se}}^{\text{dis}}]^T \quad \mathbf{R} = (R_{\text{wind}})$$

上述矩阵中, $\eta_{\text{H2}}$ , $\eta_{\text{mc}}$ , $\eta_{\text{fce}}$ , $\eta_{\text{fct}}$ 分别为电转氢、甲烷化、燃料电池转电及转热效率; $\eta_{\text{che1}}$ , $\eta_{\text{che2}}$ , $\eta_{\text{che3}}$ 及 $\eta_{\text{cht1}}$ , $\eta_{\text{cht2}}$ , $\eta_{\text{cht3}}$ 分别为第1,2,3台燃气轮机气转电效率及气转热效率; $\eta_{\text{gf}}$ 和 $\eta_{\text{ef}}$ 分别为燃气锅炉和电锅炉效率,设备效率取值详见附录C表C1; $\eta_{\text{v1}}$ 和 $\eta_{\text{v2}}$ 分

进行适当拓展,构建多种能源形式(电、气、热等)的微网型DEC模型如图2所示。

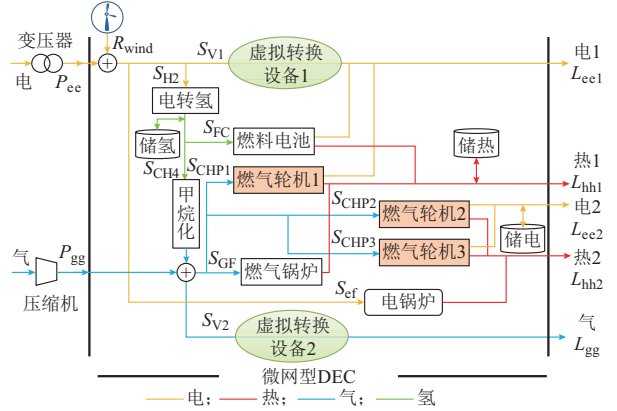


图2 微网型DEC模型图  
Fig.2 Structure of microgrid-type DEC

基于第1节所提的功率平衡方程通用性建模方法,DEC输入、输出端口主要变量表示如下: $\mathbf{P} = [P_{\text{ee}}, P_{\text{gg}}]^T$ , $\mathbf{L} = [L_{\text{ee1}}, L_{\text{hh1}}, L_{\text{ee2}}, L_{\text{hh2}}, L_{\text{gg}}]^T$ ,其中下标ee表示电能,hh分别表示热能,gg表示天然气能。且由拓扑结构可知,电能从DEC输入端到 $L_{\text{ee1}}$ 、天然气DEC输入端到 $L_{\text{gg}}$ 均存在一通路不经过能源转换器,故增加虚拟转换设备。如图2所示。进一步,通过确定端口关联矩阵 $\mathbf{C}$ ,串级转换设备端口位置矩阵 $\mathbf{D}$ (图2含一个串级转换设备,由电转氢设备、甲烷化设备及燃料电池组成),以及在含新能源、储能设备的情况下进行矩阵修正,可细化式(9)相关矩阵为(具体推导过程见附录B):

别为两个虚拟转换设备的转换效率,取100%。而 $\mathbf{S}$ 的下标中,H2,CH4,FC,CHP,GF,ef,V分别指电转氢设备、甲烷化设备、燃料电池、燃气轮机、燃气锅炉、电锅炉、虚拟转换设备。 $\mathbf{Q}^{\text{ch}}$ 与 $\mathbf{Q}^{\text{dis}}$ 的下标sh,sh,se分别指储氢、储热、储电设备; $R_{\text{wind}}$ 为风力

发电机出力。

附录 C 表 C2 至 C4 给出了 DEC 内设备的相关运行参数。附录 D 图 D1 给出了参考价格 100 美元/(MW·h) 下的电负荷  $L_{ee1}$  和  $L_{ee2}$ , 热负荷  $L_{hh1}$  和  $L_{hh2}$ , 参考价格 80 美元/(MW·h) 下的气负荷  $L_{gg}$  及风电预测曲线; 图 D2 给出了 DEC 从外部购入的电和天然气价格曲线。本文考虑风机归 DEC 调度运行者所有, 故风电购入成本取 0, 风电预测区间取预测值的  $\pm 20\%$ 。

#### 4.1 需求价格弹性下的 DEC 优化调度结果

基于图 2 的微网型 DEC 模型, 取  $\lambda = 0.5$ , 进行日前优化调度计算。能源价格-需求特性取某城区的统计分析结果, 并预设残差平方和精度为小于 0.1 进行分段线性拟合, 拟合后弹性系数如附录 D 表 D1。

结合图 2 的拓扑图及 DEC 内各设备优化调度结果表明(设备出力如附录 D 图 D3 所示), 在电负荷  $L_{ee1}$  处于低谷、风电富余时(如 1~8 h, 21~24 h),  $L_{ee1}$  由风电满足; 同时, 电转氢、储氢、甲烷化设备动作以吸收富余且廉价的风电, 储存备用或以天然气形式传输。而在  $L_{ee1}$  高峰时段, 风电、释放氢气用以燃料电池发电仍不满足  $L_{ee1}$  的需求, 此时, 由于购气价相比购电价便宜, 则燃气轮机 1 工作供电。由于燃气轮机容量约束的存在, 在  $L_{ee1}$  较高的某些时段(如 17~19 h), 仍需通过外购较高电价的电力用以满足  $L_{ee1}$  的需求。

而热负荷  $L_{hh1}$  主要由燃气轮机 1 和燃气锅炉提供并形成互补, 而受容量约束影响, 燃料电池仅为  $L_{hh1}$  提供少量热。与燃气轮机 1 相比, 燃气锅炉产热效率高, 故热负荷本应主要由燃气锅炉提供, 但当  $L_{ee1}$  需燃气轮机 1 供给时, 可将余热供给  $L_{hh1}$  或储存起来备用, 受此约束则无须开燃气锅炉; 而当燃气轮机 1 停机或供热不足时, 燃气锅炉启动供热。气负荷  $L_{gg}$  的来源途径有: 外购天然气或电转氢并甲烷化。而当风电不足(如 9~20 h)时, 电转氢及甲烷化设备停止运行,  $L_{gg}$  由外购天然气满足。这一方面是因为此时风电用以满足  $L_{ee1}$  的部分需求, 而不经电转氢并甲烷化带来额外的损耗; 另一方面是因为外购天然气相比外购电便宜。

此外, 燃气轮机 2 和 3、电储能及电锅炉三者互补满足  $L_{ee2}$  和  $L_{hh2}$  的需求, 由于大部分时段购气比购电便宜, 则燃气轮机 2 和 3 出力较大, 若燃气轮机所产的余热不满足  $L_{hh2}$ , 则需开启电锅炉供热。

上述基于仿真结果阐述了在既定负荷需求下, 如何充分利用 DEC 内的设备, 实现能源购置成本最小化以实现净收益的最大化。而图 3 给出了能源负

荷的最优定价策略, 是从负荷侧的角度进一步挖掘系统的优化潜力来最大化 DEC 净收益。

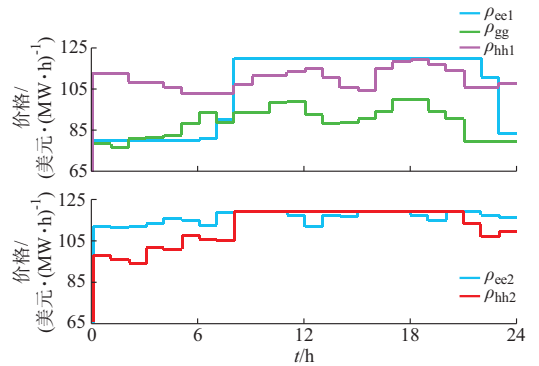


图 3 最优实时能源价格  
Fig.3 Optimal price of real-time purchasing energy

由价格弹性的特性可知, 抬高能源售价会使负荷需求降低, 反之, 降低能源售价将增加负荷需求。由于售能收益为售价与需求量的乘积, 在售价与需求量成反比的关系下, 售能收益最大化是售价与需求量相互作用的结果。从图 3 的结果看, 当能源售价未逼近上限时, 能源售价的变化趋势与参考负荷(即附录 D 图 D1)变化趋势相同, 即当负荷需求较低时, 可通过降低能源售价, 提升需求以获得更大售能收益; 反之, 当负荷需求较高, 适当提升能源售价, 降低需求, 也有利于售能收益的提高。

#### 4.2 不同需求价格弹性对负荷特性的影响

为分析不同需求价格弹性对最优定价及负荷曲线的影响, 本节设置 5 个具有不同需求价格弹性的场景进行对比分析。其中, Case 1 取 4.1 节中所用的需求价格弹性; Case 2 和 Case 3 的需求价格弹性分别较 Case 1 低、高; Case 4 的需求价格弹性设为 0; Case 5 不考虑能源价格的调控。各场景的具体参数详见附录 D 表 D2。本节中  $\lambda$  均取 0.5。

表 2 给出了不同场景下各能源负荷方差、峰谷差、DEC 收益及风电消纳比例, 用以反映价格对负荷特性的影响。由数据可知, 相比不考虑价格调控 (Case 5), 将负荷能源作为一种可控资源后 (Case 1 至 3), DEC 的净收益将有所提高, 同时有利于减少负荷方差、峰谷差, 并提高风电消纳比例。Case 4 为特例, 该场景的价格弹性系数为 0, 因此其尽管考虑价格调控, 但仍未能改变负荷特性, 进而其负荷方差、峰谷差、风电消纳比例与 Case 5 相同, 此时, DEC 制定的能源价格逼近上限以实现净收益最大化。

而随着价格弹性的增大 (Case 4 → Case 2 → Case 1 → Case 3), 通过能源价格改变负荷特性的能力也随之增大, 即随着价格弹性的增大, 负荷方差及峰谷差随之减少。并且, 在价格弹性的驱动下, 风电

富余而电负荷低谷时段,还可通过价格调控推进廉 价风电的消纳,提升新能源消纳比例。

表 2 不同场景的优化结果对比  
Table 2 Comparison of optimization results in different cases

场景	负荷方差					峰谷差/MW					DEC 净收益/美元	风电消纳比/%
	$L_{ee1}$	$L_{ee2}$	$L_{hh1}$	$L_{hh2}$	$L_{gg}$	$L_{ee1}$	$L_{ee2}$	$L_{hh1}$	$L_{hh2}$	$L_{gg}$		
Case 1	0.88	1.14	0.09	0.70	0.13	3.19	2.93	1.23	2.70	1.51	24 817	100.0
Case 2	1.99	1.37	0.16	1.35	0.32	4.52	3.41	1.59	3.71	2.21	26 290	100.0
Case 3	0.51	0.54	0.06	0.25	0.10	2.39	2.49	1.06	1.84	1.07	23 958	100.0
Case 4	5.69	1.37	0.18	1.43	0.56	6.59	3.41	1.62	3.99	2.94	30 070	97.2
Case 5	5.69	1.37	0.18	1.43	0.56	6.59	3.41	1.62	3.99	2.94	21 029	97.2

#### 4.3 风电预测区间置信水平 $\chi$ 对优化结果的影响

本文将新能源(风电)的预测值的不确定性以区间的形式表示,并通过引入置信水平  $\chi$  表征区间约束的满意程度,如式(25)和式(26)所示,为分析置信水平  $\chi$  对优化结果的影响,以 4.2 节中 Case 1 和 Case 5 为例,分别代表有无计及能源负荷价格调控,考察  $\chi$  在 0~1 变化时对优化结果的影响。

仿真结果表明(具体数据见附录 D 表 D3),随着  $\chi$  的增加,DEC 从上级能源系统购入的能量(电/气)随之增加,而 DEC 净收益则随之减少。实际上, $\chi$  值从工程实际意义可表示为调度者对风电预测区间所持的态度。 $\chi$  值越大,区间约束的可能度越大,此时,调度者持保守态度,从风电出力最坏(最小)的情况出发,进行日前计划,需从外部购置更多的能源,这将使得调度净收益减少并可能造成风电利用率下降,但调度风险小,负荷需求在极端情况下仍能满足。而随着  $\chi$  值变小,在日前调度净收益增大之余,也增大了调度的风险,在日前计划实施的过程中可能造成负荷需求无法满足进而需上层能源网络提供支撑以实现供需平衡。实际决策中,调度者可以根据实际偏好做出乐观或保守的估计,进行调度方案求解。

## 5 结语

本文立足能源市场管制放松的背景,考虑能源负荷价格参与调控,计及负荷需求的价格弹性,开展了 DEC 的建模与日前优化调度方法研究,主要结论如下。

1) 基于各设备连接关系矩阵描述的 DEC 稳态功率平衡方程建模方法,简明、清晰,对复杂系统的建模具有通用性,便于计算机编程实现。

2) 基于“以直代曲”的思想,所建立的考虑价格弹性的负荷需求分段线性化模型具有通用性;而以 0-1 变量的引入及线性约束的构建将分段线性化模型统一描述,保持了负荷模型的线性表达,降低了模

型复杂性。

3) 能源负荷价格参与调控下,DEC 可充分利用负荷需求的价格弹性,在最大化其净收益之余,也有利于负荷特性的改善,如减少负荷方差和峰谷差等,且价格弹性越高,负荷特性的改善程度越好;此外,利用负荷的价格弹性特性引导负荷参与调控,还有助于新能源消纳能力的提升,实现系统优化潜力的进一步挖掘。

4) 引入新能源预测区间置信水平  $\chi$  衡量调度的经济性与风险程度。 $\chi$  越大,调度风险越小但经济性差;反之, $\chi$  越小,调度风险越大但经济性好,调度者可根据实际偏好做出乐观或保守的估计,进行 DEC 日前优化调度,增加系统决策的柔性。

5) 本文对 DEC 的建模主要反映多能流功率的稳态/准稳态的有功平衡关系,适用于 DEC 做日前计划。下一步可针对 DEC 内多能源不同时间尺度动态特性建模及非稳态运行优化问题开展研究。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

## 参考文献

- [1] HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 133-148.
- [2] 李立涅,张勇军,陈泽兴,等.智能电网与能源网融合的模式及其发展前景[J].电力系统自动化,2016,40(11):1-9.DOI:10.7500/AEPS20150912002.  
LI Licheng, ZHANG Yongjun, CHEN Zexing, et al. Merger between smart grid and energy-net: mode and development prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 1-9. DOI: 10.7500/AEPS20150912002.
- [3] KRAUSE T, ANDERSSON G, FROELICH K, et al. Multiple-energy carriers: modeling of production, delivery, and consumption[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 15-27.
- [4] WU J, YAN J, JIA H, et al. Integrated energy systems[J]. Applied Energy, 2016, 167: 155-157.



- [5] 李洋, 吴鸣, 周海明, 等. 基于全能流模型的区域多能源系统若干问题探讨[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2230-2237.  
LI Yang, WU Ming, ZHOU Haiming, et al. Study on some key problems related to regional multi energy system based on universal flow model[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2230-2237.
- [6] 贾宏杰, 王丹, 徐宪东, 等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 198-207. DOI: 10.7500/AEPS20141009011.  
JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 198-207. DOI: 10.7500/AEPS20141009011.
- [7] 王业磊, 赵俊华, 文福拴, 等. 具有电转气功能的多能源系统的市场均衡分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 1-10. DOI: 10.7500/AEPS20150623001.  
WANG Yelei, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. Market equilibrium of multi-energy system with power-to-gas functions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 1-10. DOI: 10.7500/AEPS20150623001.
- [8] GEIDL M, KOEPEL G, FAVRE-PERROD P, et al. Energy hubs for the future[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2006, 5(1): 24-30.
- [9] 王毅, 张宁, 康重庆. 能源互联网中能量枢纽的优化规划与运行研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5669-5681.  
WANG Yi, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Review and prospect of optimal planning and operation of energy hub in energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5669-5681.
- [10] ZHANG Xiaping, SHAHIDEHPOUR M, ALABDULWAHAB A A. Optimal expansion planning of energy hub with multiple energy infrastructures[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2302-2311.
- [11] BAHRAMI S, SAFE F. A financial approach to evaluate an optimized combined cooling, heat and power system[J]. Energy & Power Engineering, 2013, 5(5): 352-362.
- [12] SHEIKHI A, RANJBAR A M, SAFE F. A novel method to determine the best size of CHP for an energy hub system[C]// International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, November 15-17, 2011, Sharjah, United Arab Emirates: 1-7.
- [13] REN Hongbo, GAO Weijun, RUAN Yingjun. Optimal sizing for residential CHP system[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(5/6): 514-523.
- [14] GEIDL M, ANDERSSON G. Optimal coupling of energy infrastructures[C]// 2007 IEEE Lausanne Power Tech, July 1-5, 2007, Lausanne, Switzerland: 1398-1403.
- [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] MOGHADDAM I G, SANIEI M, MASHHOUR E. A comprehensive model for self-scheduling an energy hub to supply cooling, heating and electrical demands of a building[J]. Energy, 2016, 94: 157-170.
- [17] MANCARELLA P, CHICCO G. Real-time demand response from energy shifting in distributed multi-generation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4): 1928-1938.
- [18] PAZOUKI S, HAGHIFAM M R, MOSER A. Uncertainty modeling in optimal operation of energy hub in presence of wind, storage and demand response[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 61: 335-345.
- [19] RASTEGAR M, FOTUHI-FIRUZABAD M, LEHTONEN M. Home load management in a residential energy hub[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 119: 322-328.
- [20] SALIMI M, GHASEMI H, ADELPOUR M A. Optimal planning of energy hubs in interconnected energy systems: a case study for natural gas and electricity[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2015, 9(8): 695-707.
- [21] 王珺, 顾伟, 张成龙, 等. 智能社区综合能源优化管理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 89-97.  
WANG Jun, GU Wei, ZHANG Chenglong, et al. Research on integrated energy management for smart community[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 89-97.
- [22] HA T, ZHANG Y, THANG V V, et al. Energy hub modeling to minimize residential energy costs considering solar energy and BESS[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(3): 389-399.
- [23] BAHRAMI S, SHEIKHI A. From demand response in smart grid toward integrated demand response in smart energy hub[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 650-658.
- [24] 李东东, 徐连连, 刘翔, 等. 考虑可削减负荷参与的含风光储微网经济优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 35-41.  
LI Dongdong, XU Lianlian, LIU Xiang, et al. Optimal dispatching of microgrid considering the participation of reducible loads, distributed generators (DG) and energy storage units[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 35-41.
- [25] 陈沼宇, 王丹, 贾宏杰, 等. 考虑 P2G 多源储能型微网日前最优经济调度策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3067-3077.  
CHEN Zhaoyu, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Research on optimal day-ahead economic dispatching strategy for micro-grid considering P2G and multi-source energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3067-3077.
- [26] 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. DOI: 10.7500/AEPS20150701007.  
SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang. Energy Internet: concept, architecture and frontier outlook[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 1-8. DOI: 10.7500/AEPS20150701007.



- [27] KARTHIKEYAN S P, RAGLEND I J, KOTHARI D P. A review on market power in deregulated electricity market[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 48: 139-147.
- [28] KIRSCHEN D S, STRBAC G, CUMPERAYOT P, et al. Factoring the elasticity of demand in electricity prices[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 612-617.
- [29] FAN Shu, HYNDMAN R J. The price elasticity of electricity demand in South Australia[J]. Energy Policy, 2011, 39(6): 3709-3719.
- [30] 黄永皓,康重庆,李晖,等.用电需求曲线建模及其应用[J].电工电能新技术,2004,23(1):29-33.  
HUANG Yonghao, KANG Chongqing, LI Hui, et al. The model of electricity demand curve and its applications[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2004, 23(1): 29-33.
- [31] BJØRNER T B, TOGEBY M, JENSEN H H. Industrial companies' demand for electricity: evidence from a micropanel [J]. Energy Economics, 2001, 23(5): 595-617.
- [32] BOOGEN N, DATTA S, FILIPPINI M. Going beyond tradition: estimating residential electricity demand using an appliance index and energy services [J]. SSRN Electronic Journal, 2014, 61: 381-386.
- [33] POURAZARM E, COORAY A. Estimating and forecasting residential electricity demand in Iran[J]. Economic Modelling, 2013, 35(5): 546-558.
- [34] 田垌,刘宗田.最小二乘法分段直线拟合[J].计算机科学,2012, 39(增刊1):482-484.
- TIAN Long, LIU Zongtian. Least-squares method piecewise linear fitting[J]. Computer Science, 2012, 39(Supplement 1): 482-484.
- [35] 刘志涛,李炜.区间线性规划的最优解[J].杭州电子科技大学学报,2012,32(2):70-72.  
LIU Zhitao, LI Wei. The optimal solution of interval linear programming[J]. Journal of Hangzhou Dianzi University, 2012, 32(2): 70-72.
- [36] 达庆利,刘新旺.区间数线性规划及其满意解[J].系统工程理论与实践,1999,19(4):3-7.  
DA Qingli, LIU Xinwang. Interval number linear programming and its satisfactory solution[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 1999, 19(4): 3-7.
- [37] SURHONE L M, TENNOE M T, HENSSONOW S F. CPLEX[M]. Betascript Publishing: Saarbrücken, Germany, 2010.

陈泽兴(1992—),男,博士研究生,主要研究方向:能源互联网优化运行、电网无功电压控制。E-mail: 690726374@qq.com

张勇军(1973—),男,通信作者,教授,博士生导师,主要研究方向:主动配电网、无功电压控制、可靠性与规划、能源互联网运行控制。E-mail: zhangjun@scut.edu.cn

许志恒(1993—),男,硕士研究生,主要研究方向:能源互联网优化运行。E-mail: 13570311293@163.com

(编辑 蔡静雯)

## Modelling and Optimal Day-ahead Dispatch of District Energy Centre Considering Price Elasticity of Energy Load Demand

CHEN Zexing, ZHANG Yongjun, XU Zhiheng, CAI Zexiang, Thanhtung HA  
(Guangdong Key Laboratory of Green Energy Technology, School of Electric Power,  
South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** As the energy market is being deregulated, the energy price, as a controllable resource, is expected to promote the optimized operation of multi-energy (such as electricity, gas, heat/cool) in the district energy centre (DEC). Based on the energy hub modelling method, the general linear modelling method of power balance equation in DEC is presented. In addition, after taking into account the price elasticity of energy load demand, piecewise linearization modeling of energy load demand is conducted, and the description of piecewise linear function is unified by introducing a 0-1 logic variable and several linear constraints. Further, aiming at DEC net revenue maximization, the mixed integral quadratic programming model for optimal day-ahead dispatch of DEC is developed, in which the controllability of energy price is taken into consideration, and CPLEX called from GAMS is used for solution. Finally, with a case study on microgrid-type DEC, the proposed modeling method is verified, and the influences of control of energy price, different price elasticity and prediction error of new energy on the dispatch results are analyzed. The results show that full use of load price elasticity will help reduce load variance and peak-valley difference, and deep the optimization potential of DEC, while maximize the DEC revenue.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777077) and Guangdong Provincial Natural Science Foundation of China (No. 2017A030313304).

**Key words:** price elasticity; district energy centre (DEC); piecewise linearization; GAMS; optimal dispatch