

# 计及综合需求侧响应的能量枢纽优化配置

崔鹏程<sup>1</sup>, 史俊祎<sup>1</sup>, 文福拴<sup>1,2</sup>, 孙磊<sup>1</sup>, 董朝阳<sup>3</sup>, 郑宇<sup>3</sup>, 张睿<sup>3</sup>

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027;

2. 文莱科技大学 电机与电子工程系, 文莱 斯里巴加湾 BE1410; 3. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510080)

**摘要:** 能量枢纽是多能源系统的重要组成部分, 可容纳多种形式能源的输入和多元化的负荷类型。优化配置能量枢纽的设备类型和容量是保证能量枢纽安全经济运行的基础。同时, 需求侧响应机制和技术的不断发展对该优化配置问题提出了新的要求。在此背景下, 首先概述了能量枢纽中各类设备的模型, 并对冷热电负荷特性进行分析和分类建模。然后, 基于典型日负荷轮廓, 以初始安装成本、运行维护成本和能耗成本构成的年运行费用最低为优化目标, 考虑综合需求侧响应及能量枢纽运行约束, 建立了能量枢纽优化配置的 0-1 混合整数线性规划模型。算例结果表明, 所构建的优化配置模型可显著降低能量枢纽的年运行费用。

**关键词:** 多能源系统; 能量枢纽; 优化配置; 综合需求侧响应; 冷热电负荷

**中图分类号:** TM 72

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.06.014

## 0 引言

环境污染和能源危机促进了对电、天然气、热等多种能源协同规划运行的研究<sup>[1-3]</sup>。能量枢纽是一种用于描述多能源系统中能源供应、负荷需求、网络交换以及耦合关系的输入-输出双端口模型, 采用耦合矩阵可表述多种能源间的转化、分配和存储等耦合关系, 在多能源系统规划和运行分析中有着广泛应用<sup>[4-5]</sup>。通过对能量枢纽优化配置, 可提升其整体运行优化行为进而取得最大化的经济效益。

目前, 关于能量枢纽的优化配置问题已有一些研究报道<sup>[6-10]</sup>。文献[6]对热电联产(CHP)机组、燃气锅炉、吸收式制冷机及储能设备的容量进行了协同规划, 对实际系统的分析结果表明, 所提方法相较于各能源系统单独规划, 能够更有效地降低成本。文献[7]基于生命周期分析法, 对基于太阳能的冷热电联产系统中的燃气内燃机容量和系统运行策略进行了优化。文献[8]提出了包括蓄能设备的分布式联供系统的优化模型, 确定单台设备容量和设备台数。文献[9]以最小化年费用和最大化焓效率(exergy efficiency)为优化目标, 采用遗传算法优化冷热电联供系统中各设备的容量。文献[10]建立了双层优化规划与设计模型, 外层模型确定能量枢纽中能源转换设备及储能单元的投建与否和安装容量, 内层模型则优化典型日的运行工况。

上述文献均未考虑需求侧管理或需求侧响应(DR)的影响。据统计, 居民负荷具有巨大的可控潜力, 潜在可控居民负荷约占居民总负荷的 60%<sup>[11]</sup>。利用 DR 可以实现负荷的转移和削减, 平抑负荷曲线轮廓, 进而改善电力系统运行的安全性和经济性。随着需求侧管理的逐步推广实施, 可以预见其在多能源系统中也会逐步得到应用, 因此在能量枢纽的优化配置中也就需要考虑 DR。在分布式电源和微电网的优化配置和运行方面, 已有考虑需求侧管理的研究报道。例如, 文献[12]综合考虑了可控性负荷和分布式电源出力的不确定性, 建立了分布式电源双层优化规划模型; 文献[13]指出利用家用电器的可时移特性能够降低海岛微电网的储能成本; 文献[14]构建了能源互联微电网系统供需双侧多能协同优化模型, 借助 DR 利用峰谷价差减少系统运行成本。这些文献仅考虑了可时移的电负荷, 而在能量枢纽中, 负荷侧包括冷热电等多种能源形式, 因此有必要将传统电力 DR 拓展到综合需求侧响应(IDR)<sup>[15]</sup>。IDR 包括多类型负荷需求的转移以及负荷需求间的替代<sup>[16]</sup>, 能够充分挖掘需求侧调节负荷的潜力, 提高能量枢纽中设备的利用率, 减少用能成本。因此, 在能量枢纽优化配置时考虑 IDR 是一个值得研究的重要问题, 而目前尚未有这方面的系统研究报道。

在上述背景下, 本文首先概述了能量枢纽中各类设备的模型, 分析了用户电负荷和冷热负荷特性并分别建模, 进而以年运行费用最小化为优化目标, 构建了考虑 IDR 的能量枢纽优化配置模型, 并通过线性化处理将该优化模型转换为 0-1 混合整数线性规划问题, 在 MATLAB 环境下的 YALMIP<sup>[17]</sup>平台上采用 CPLEX 求解器求解。最后, 以某居民小区为例, 对本文提出的计及 IDR 的能量枢纽优化配置模型进行了验证。

收稿日期: 2017-03-07; 修回日期: 2017-05-24

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2013CB228202); 国家自然科学基金资助项目(51477151); 中国南方电网公司科技项目(WYKJ00000027)

Project supported by the National Key Basic Research Program of China(973 Program)(2013CB228202), the National Natural Science Foundation of China(51477151) and the Science & Technology Program of China Southern Power Grid(WYKJ-00000027)

## 1 能量枢纽系统架构设计

能量枢纽系统一般包括能量生产、转换和存储设备。本文所针对的能量枢纽系统架构如图 1 所示,采用“自发自用、余量上网”的运行机制,优先满足本地各类负荷需求,同时允许将富余电量输送到配电系统。本文将一天分为 48 个时段,并假定每个时段的状态参数保持不变,这样在时刻  $t$  某变量的取值即为在时段  $t$  中该变量的取值。

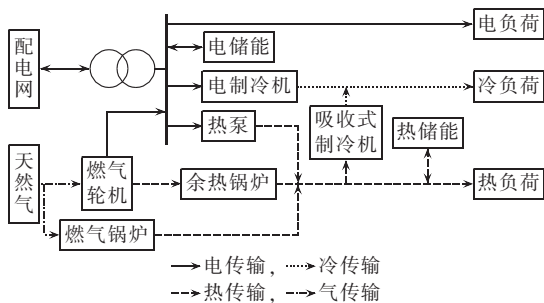


图 1 能量枢纽系统架构

Fig.1 Structure of energy hub

### 1.1 能量生产设备

#### a. 燃气轮机。

燃气轮机是能量枢纽最常用的发电机,以微型燃气轮机为核心的冷热电联供系统的能源利用率可达 70%~90%<sup>[18]</sup>。这里假设燃气轮机的效率在运行区间内保持不变,废热由余热锅炉回收利用,其输出的电功率和回收的热功率可以描述为<sup>[19]</sup>:

$$p_t^{\text{GT}} = \eta_e^{\text{GT}} \lambda_{\text{gas}} f_t^{\text{GT}} \quad (1)$$

$$h_t^{\text{GT}} = \eta_h^{\text{WH}} (1 - \eta_e^{\text{GT}}) \lambda_{\text{gas}} f_t^{\text{GT}} \quad (2)$$

其中,  $p_t^{\text{GT}}$ 、 $h_t^{\text{GT}}$  和  $f_t^{\text{GT}}$  分别为燃气轮机在时刻  $t$  输出的电功率、回收的热功率和燃气消耗速率;  $\lambda_{\text{gas}}$  为天然气热值;  $\eta_e^{\text{GT}}$  和  $\eta_h^{\text{WH}}$  分别为燃气轮机发电效率和余热锅炉热回收效率。

#### b. 燃气锅炉。

燃气锅炉是常用的热源设备,当燃气轮机提供的回收热量不能满足用户的热负荷时,则需燃气锅炉为部分热负荷提供热能。

$$h_t^{\text{GB}} = \eta_h^{\text{GB}} \lambda_{\text{gas}} f_t^{\text{GB}} \quad (3)$$

其中,  $h_t^{\text{GB}}$  和  $f_t^{\text{GB}}$  分别为燃气锅炉在时刻  $t$  输出的热功率和燃气消耗速率;  $\eta_h^{\text{GB}}$  为燃气锅炉的供热效率。

### 1.2 能量转换设备

能量转换设备包括溴化锂吸收式制冷机、热泵、电制冷机等。该类设备用于不同能量形式之间的转化,如电转热、热转冷等,仅涉及转换效率,因此可以对该类装置统一采用式(4)进行建模。

$$w_{t,s}^{\text{out}} = \eta_s w_{t,s}^{\text{in}} \quad (4)$$

其中,  $w_{t,s}^{\text{in}}$  和  $w_{t,s}^{\text{out}}$  分别为能量转换设备  $s$  在时刻  $t$  的输入和输出功率;  $\eta_s$  为能量转换设备  $s$  的能量转换效率。

### 1.3 储能设备

储能设备能够在时间上解耦能量的生产与消耗,主要包括热储能、电储能等。对于该类储能设备可统一采用式(5)进行建模。

$$W_{t+1,s} = (1 - g_s) W_{t,s} + \left( w_{t,s}^{\text{ch}} \eta_s^{\text{ch}} - \frac{w_{t,s}^{\text{dis}}}{\eta_s^{\text{dis}}} \right) \Delta T \quad (5)$$

其中,  $W_{t,s}$ 、 $w_{t,s}^{\text{ch}}$  和  $w_{t,s}^{\text{dis}}$  分别为储能设备  $s$  在时刻  $t$  具有的储能量、充能功率和放能功率;  $g_s$  为储能设备  $s$  的自损耗系数;  $\eta_s^{\text{ch}}$  和  $\eta_s^{\text{dis}}$  分别为储能设备  $s$  的充能效率和放能效率;  $\Delta T$  为单位时段长度。

## 2 IDR

传统 DR 仅对可控电力负荷进行了分类建模。在能量枢纽中,负荷可为冷、热、电等多种形式,对于采用集中采暖供冷的系统,其冷热负荷也具有可控潜力。IDR 包括负荷需求转移和负荷需求替代 2 个方面。其中,负荷需求替代体现在由于设备冗余,用户可选择消费不同能源种类以满足冷/热/电负荷需求,已涵盖在能源枢纽系统架构之中。所以本节着重对负荷需求转移进行建模。根据冷/热/电负荷用能特性,可将其分为基荷类负荷、可平移类负荷以及可转移类负荷 3 类。

### 2.1 基荷类负荷

基荷类负荷指用户对该类负荷的使用近似刚性,若不满足或对该类负荷进行调节,会对用户产生较大的影响。在电负荷方面,该类负荷主要包括基本照明类设备用电、娱乐类设备用电等;在冷/热负荷方面,该类负荷主要包括洗浴、清洁等用水负荷。可基于历史数据对基荷类负荷曲线的轮廓进行预测。

### 2.2 可平移类负荷

可平移类负荷指只需在某个时间段内满足该类负荷需求即可,一般具有固定的负荷持续时间及习惯使用时间,且一旦启动就不宜中断。在电负荷方面,该类负荷主要包括洗衣机、洗碗机等具有固定工作模式的电器设备;在冷/热负荷方面,该类负荷包括洗澡用水等。可对该类负荷用式(6)~(10)进行统一建模<sup>[20]</sup>。

$$w_{t,i,j} = w_i^N \varepsilon_{t,i,j} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{t,i,j} = 0 \quad \forall t \notin [t_i^{\text{start}}, t_i^{\text{end}}] \quad (7)$$

$$\sum_{v=t}^{v+H_i-1} \varepsilon_{t,i,j} \geq H_i (\varepsilon_{v,i,j} - \varepsilon_{v-1,i,j}) \quad \forall v \in [t_i^{\text{start}}, t_i^{\text{end}} - H_i + 1] \quad (8)$$

$$\sum_{t=t_i^{\text{start}}-H_i+1}^{t_i^{\text{end}}-H_i+1} \varepsilon_{t,i,j} \geq 1 \quad (9)$$

其中,式(8)表示负荷的不可中断性;式(9)表示必须在习惯使用时间内满足负荷要求;  $w_{t,i,j}$  和  $w_i^N$  分别为用户  $j$  的第  $i$  类可平移类负荷在时刻  $t$  的功率值和额定功率,对于电负荷其为电功率值,对于冷/热负荷则为冷/热功率值;  $\varepsilon_{t,i,j}$  为在时刻  $t$  用户  $j$  的第  $i$  类可平移类负荷启动状态的 0-1 变量,  $\varepsilon_{t,i,j}=1$  和  $\varepsilon_{t,i,j}=0$

分别表示启动和不启动;  $t_i^{\text{start}}$ 、 $t_i^{\text{end}}$  和  $H_i$  分别为第  $i$  类可平移类负荷习惯开始使用时间、结束使用时间和负荷持续时间。

### 2.3 可转移负荷

可转移负荷指该类负荷在规定时间内满足一定的负荷需求即可,具有一定的虚拟储能特性。对于电负荷,其主要包括电动汽车(EV)等;对于冷/热负荷,则主要包括采暖负荷、供冷负荷等。

对于 EV,采用下述模型<sup>[21]</sup>:

$$S_{t+1,k} = S_{t,k} + p_{t,EV,k}^{\text{ch}} \eta_{EV,k}^{\text{ch}} \Delta T / E_{EV,k} \quad (10)$$

$$S_{EV,k}^{\text{min}} \leq S_{t,k} \leq S_{EV,k}^{\text{max}} \quad (11)$$

$$S_{t,dep,k} \geq S_k^{\text{exp}} \quad (12)$$

$$p_{t,EV,k}^{\text{ch}} = 0 \quad t \notin [t_{\text{ari},k}, t_{\text{dep},k}] \quad (13)$$

$$0 \leq p_{t,EV,k}^{\text{ch}} \leq p_{EV,k}^{\text{max}} \quad (14)$$

其中,  $p_{t,EV,k}^{\text{ch}}$  和  $S_{t,k}$  分别为第  $k$  辆 EV 在时刻  $t$  的充电功率和荷电状态(SOC);  $\eta_{EV,k}^{\text{ch}}$  和  $E_{EV,k}$  分别为第  $k$  辆 EV 的充电效率和蓄电池容量;  $S_{EV,k}^{\text{min}}$  和  $S_{EV,k}^{\text{max}}$  分别为第  $k$  辆 EV 蓄电池所允许的最小和最大 SOC;  $S_{t,dep,k}$  和  $S_k^{\text{exp}}$  分别为第  $k$  辆 EV 在离网时的实际和期望达到的 SOC;  $t_{\text{ari},k}$  和  $t_{\text{dep},k}$  分别为第  $k$  辆 EV 接入和离开电力系统的时刻;  $p_{EV,k}^{\text{max}}$  为第  $k$  辆 EV 的最大充电功率。

室内温度升高或降低会影响用户舒适度。用户对于室内环境的舒适度要求可以通过热感觉平均温度预测 PMV (Predicted Mean Vote) 指标进行表述,该指标综合考虑了人体新陈代谢率、衣着情况、空气温度、空气流速、空气相对湿度等因素<sup>[22]</sup>。在不同季节,人体在室内活动的舒适度感观主要取决于室内温度、所穿着衣物以及人体新陈代谢率。文献[23]考虑了各影响因素对 PMV 指标的影响程度,得到了式(15)所示的 PMV 指标的简化公式。

$$\Gamma_t^{\text{PMV}} = 2.43 - 3.76 \times \frac{33.5 - T_t^{\text{in}}}{M(I_{\tau}^{\text{cl}} + 0.1)} \quad (15)$$

其中,  $\Gamma_t^{\text{PMV}}$  和  $T_t^{\text{in}}$  分别为时刻  $t$  的 PMV 指标值和室内温度;  $M$  为人体新陈代谢率,人体在住宅建筑内不进行剧烈运动时,  $M$  可取定值;  $I_{\tau}^{\text{cl}}$  为  $\tau$  季节时人体所着衣物服装热阻,  $\tau$  取 1、2 和 3 时分别表示春季、夏季和冬季。

ISO7730 标准推荐 PMV 指标范围为<sup>[22]</sup>:

$$-0.5 \leq \Gamma_t^{\text{PMV}} \leq 0.5 \quad (16)$$

在式(16)所给定的范围内,用户不会感觉到温度变化的明显差异,因此冷热负荷曲线可以转换为一个区间,在满足用户舒适度的前提下具备一定的弹性。

由于建筑墙体等围护结构具有隔热保暖效果,室内与室外的热交换过程较慢,当系统停止向用户供热或供冷时,室内温度以一定的时间常数逐渐降低或升高。在室内取暖器停止加热后,经过 30 min

平均室温降幅约为  $0.9^\circ\text{C}$ <sup>[24]</sup>,因此可通过提前升高或降低室内温度来调节负荷曲线轮廓。

室内温度与采暖供冷量间的关系可采用一阶等效热参数 ETP (Equivalent Thermal Parameters) 模型描述,其微分方程如下<sup>[25]</sup>:

$$dT_t^{\text{in}}/dt = q_t^{\text{air}}/C + (T_t^{\text{out}} - T_t^{\text{in}})/(RC) \quad (17)$$

其中,  $T_t^{\text{out}}$  为时刻  $t$  的室外温度;  $R$ 、 $C$  分别为建筑物的等效热阻、等效热容;  $q_t^{\text{air}}$  为采暖通风空调系统(HVAC)在时刻  $t$  输出的热功率或冷功率。

对式(17)的微分方程做离散化处理,可得到离散形式的热平衡方程如下:

$$T_{t+1}^{\text{in}} = T_t^{\text{in}} e^{-\Delta T/(RC)} + (Rq_t^{\text{air}} + T_t^{\text{out}})[1 - e^{-\Delta T/(RC)}] \quad (18)$$

采暖供冷负荷在各时刻具有弹性且在时间轴上具有可转移特性,因此为可转移负荷,可通过调节采暖供冷负荷来调整冷热负荷曲线。

## 3 数学模型与求解方法

### 3.1 优化目标

这里采用等年值法评估系统的经济性。可对一年内的冷热电负荷做统计分析,利用场景削减技术等进行模式聚类 and 归并,获得典型日场景。采用这种方法形成  $N$  个典型日,第  $n$  个典型日的持续天数为  $d_n$ 。

以由初始安装成本  $C_{\text{IN}}$ 、运行维护成本  $C_{\text{OM}}$  及能耗成本  $C_{\text{ES}}$  构成的年运行费用  $C_{\text{ATC}}$  最小为优化目标:

$$\min C_{\text{ATC}} = C_{\text{IN}} + C_{\text{OM}} + C_{\text{ES}} \quad (19)$$

#### a. 初始安装成本。

通过资金回收系数 CRF (Capital Recovery Factor) 可将设备的一次性投资成本折算到每年的费用支出:

$$C_{\text{IN}} = \sum_s \xi_s^{\text{cap}} C_s \frac{r(1+r)^l}{(1+r)^l - 1} \quad (20)$$

其中,  $C_s$  为设备  $s$  的安装容量;  $\xi_s^{\text{cap}}$  为设备  $s$  的单位容量安装成本;  $r$  为基准折现率;  $l_s$  为设备  $s$  的平均寿命。

#### b. 运行维护成本。

$$C_{\text{OM}} = \sum_n d_n \sum_s \xi_s^{\text{om}} w_{t,s}^{\text{out}} \Delta T \quad (21)$$

其中,  $\xi_s^{\text{om}}$  为设备  $s$  单位输出能量的运行维护费用。

#### c. 能耗成本。

$$C_{\text{ES}} = \sum_n d_n \sum_t \left( \sum_s f_{t,s} \xi_{t,s}^{\text{gas}} + p_t^{\text{buy}} \xi_t^{\text{buy}} - p_t^{\text{sell}} \xi_t^{\text{sell}} \right) \Delta T \quad (22)$$

其中,  $\xi_{t,s}^{\text{gas}}$ 、 $\xi_t^{\text{buy}}$  和  $\xi_t^{\text{sell}}$  分别为时刻  $t$  的购气价格、购电价格和售电价格;  $p_t^{\text{buy}}$  和  $p_t^{\text{sell}}$  分别为时刻  $t$  的购电功率和售电功率;  $f_{t,s}$  为设备  $s$  在时刻  $t$  的燃气消耗率。

### 3.2 约束条件

#### a. 功率平衡约束。

包括系统冷、热、电功率平衡约束:

$$p_t^{\text{buy}} - p_t^{\text{sell}} - \sum_s p_{t,s}^{\text{in}} + \sum_s p_{t,s}^{\text{out}} = p_t^{\text{h}} + \sum_j \sum_i p_{t,ij} + \sum_k p_{t,EV,k}^{\text{ch}} \quad (23)$$

$$\sum_s h_{t,s}^{\text{out}} - \sum_s h_{t,s}^{\text{in}} = h_t^{\text{h}} + \sum_j \sum_i h_{t,ij} + \sum_j h_{t,j}^{\text{air}} \quad (24)$$

$$\sum_s c_{ls}^{\text{out}} = \sum_j c_{lj}^{\text{air}} \quad (25)$$

其中,  $p_t^l$  和  $h_t^l$  分别为系统在时刻  $t$  的刚性电负荷和热负荷;  $p_{ls}^{\text{in}}$  和  $p_{ls}^{\text{out}}$  分别为设备  $s$  在时刻  $t$  消耗的电功率和输出的电功率;  $h_{ls}^{\text{in}}$  和  $h_{ls}^{\text{out}}$  分别为设备  $s$  在时刻  $t$  消耗的热功率和输出的热功率;  $c_{ls}^{\text{out}}$  为设备  $s$  在时刻  $t$  输出的冷功率;  $p_{t,i,j}$  和  $h_{t,i,j}$  分别为用户  $j$  第  $i$  类可平移负荷在时刻  $t$  消耗的电功率和热功率;  $h_{lj}^{\text{air}}$  和  $c_{lj}^{\text{air}}$  分别为在时刻  $t$  系统给用户  $j$  提供的热功率和冷功率。

#### b. 联络线功率约束与购售电状态约束。

$$0 \leq p_t^{\text{buy}} \leq \gamma_t^{\text{buy}} p^{\text{buy,max}} \quad (26)$$

$$0 \leq p_t^{\text{sell}} \leq \gamma_t^{\text{sell}} p^{\text{sell,max}} \quad (27)$$

$$0 \leq \gamma_t^{\text{sell}} + \gamma_t^{\text{buy}} \leq 1 \quad (28)$$

其中,  $p^{\text{buy,max}}$ 、 $p^{\text{sell,max}}$  分别为能量枢纽从配电系统购电、向配电系统售电功率上限;  $\gamma_t^{\text{buy}}$  和  $\gamma_t^{\text{sell}}$  分别为能量枢纽在时刻  $t$  处于购电和售电的 0-1 状态变量,  $\gamma_t^{\text{buy}}=1$  表示购电,  $\gamma_t^{\text{sell}}=1$  表示售电, 该约束限定能量枢纽不能同时购售电。

#### c. 安装容量约束。

$$\gamma_s C_s^{\text{min}} \leq C_s \leq \gamma_s C_s^{\text{max}} \quad (29)$$

其中,  $\gamma_s$  为 0-1 状态变量,  $\gamma_s=0$  和  $\gamma_s=1$  分别表示不安装和安装设备;  $C_s^{\text{min}}$  和  $C_s^{\text{max}}$  分别为设备  $s$  安装容量的下限和上限。

#### d. 能量生产/转换设备的运行约束。

$$\psi_{ts} \delta_s^{\text{min}} C_s \leq w_{ts} \leq \psi_{ts} \delta_s^{\text{max}} C_s \quad (30)$$

其中,  $\delta_s^{\text{min}}$  和  $\delta_s^{\text{max}}$  分别为能量生产设备  $s$  的最小和最大负荷率;  $\psi_{ts}$  为 0-1 状态变量,  $\psi_{ts}=0$  和  $\psi_{ts}=1$  分别表示能量生产设备  $s$  在时刻  $t$  不投入和投入运行; 对于能量生产设备,  $w_{ts}$  为设备  $s$  在时刻  $t$  的输出功率, 而对于能量转换设备  $w_{ts}$  则为设备  $s$  在时刻  $t$  的输入功率。

#### e. 储能设备约束。

储能设备需满足储能状态约束, 且为了保证调度的连续性, 给定储能设备调度的每日结束时刻  $T$  的状态  $W_{T,s}$  与初始时刻状态  $W_{1,s}$  一致。

$$S_s^{\text{min}} C_s \leq W_{ts} \leq S_s^{\text{max}} C_s \quad (31)$$

$$W_{1,s} = W_{T,s} \quad (32)$$

其中,  $S_s^{\text{min}}$  和  $S_s^{\text{max}}$  分别为储能设备最小和最大储存能量要求。

储能设备还应满足充放能功率约束, 其充放能功率与储能容量相关, 且不能同时充放能。

$$0 \leq w_{ts}^{\text{ch}} \leq \varepsilon_{ts}^{\text{ch}} \kappa_s^{\text{ch}} C_s \quad (33)$$

$$0 \leq w_{ts}^{\text{dis}} \leq \varepsilon_{ts}^{\text{dis}} \kappa_s^{\text{dis}} C_s \quad (34)$$

$$0 \leq \varepsilon_{ts}^{\text{ch}} + \varepsilon_{ts}^{\text{dis}} \leq 1 \quad (35)$$

其中, 式(35)保证储能设备不能同时充能和放能;  $\kappa_s^{\text{ch}}$  和  $\kappa_s^{\text{dis}}$  分别为储能设备的充能和放能倍率;  $\varepsilon_{ts}^{\text{ch}}$  和  $\varepsilon_{ts}^{\text{dis}}$  分别为储能设备在时刻  $t$  处于充能和放能的 0-1 状

态变量,  $\varepsilon_{ts}^{\text{ch}}=1$  表示充能,  $\varepsilon_{ts}^{\text{dis}}=1$  表示放能。

式(30)、(33)和(34)中存在二进制离散变量与连续变量的乘积, 成了混合非线性约束, 导致优化模型求解难度大。为改善求解效率, 可对这些非线性约束进行线性化。以式(30)为例进行线性化得到:

$$w_{ts} \leq \delta_s^{\text{max}} C_s \quad (36)$$

$$\delta_s^{\text{min}} C_s \leq w_{ts} + (1 - \psi_{ts}) C_s^{\text{max}} \quad (37)$$

$$0 \leq w_{ts} \leq \psi_{ts} \delta_s^{\text{max}} C_s^{\text{max}} \quad (38)$$

经过上述线性化处理, 即把所构造的优化模型转换为 0-1 混合整数线性规划问题, 这样就可 MATLAB 环境下的 YALMIP<sup>[17]</sup> 平台上, 采用商业化的高效求解器 CPLEX 求解。

## 4 算例分析

以包括 30 户居民用户的某小区为例, 对本文提出的能量枢纽优化配置方法进行验证。假设小区内居民用户户型一致, 面积均为 150 m<sup>2</sup>, 建筑物等效比热容为 1.2 kW·h/℃, 等效热阻为 6.8℃/kW。这些居民用户采用集中供暖供冷模式, 不计输送过程中的损耗, 对室内温度进行监测, 并统一调控。将全年分为 3 个典型季节, 分别为春秋过渡季(3—5 月、9—11 月)、夏季(6—8 月)和冬季(12 月至次年 2 月), 各典型日气温及刚性负荷曲线如图 2 所示。

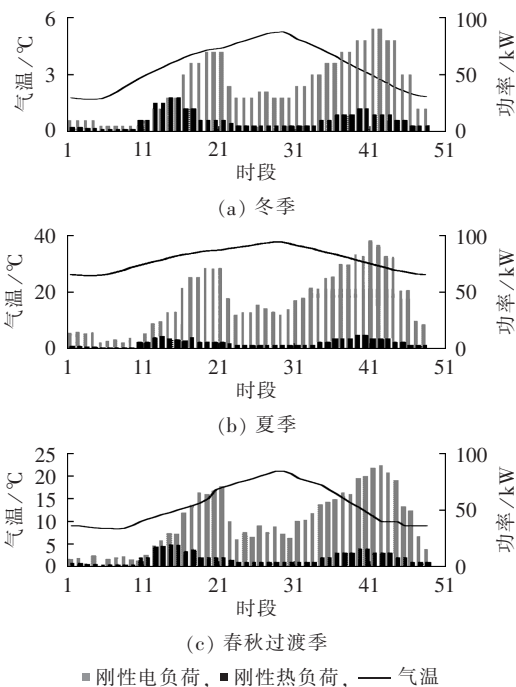


图 2 典型日负荷和气温

Fig.2 Loads and temperature of typical days

各设备的投资费用、效率等参数列于表 1、2 中<sup>[8,14,26-27]</sup>。燃气轮机的最小负荷率取 0.2, 其他设备取 0, 最大负荷率均取 1。可平移电负荷和热负荷分别以洗衣机、洗碗机和洗澡用水为例, 可转移负荷

以 EV、采暖供冷负荷为例,并假设每个居民用户对于上述负荷的需求均相同。IDR 的相关参数见表 3。

假设小区内所有用户采用相同型号的 EV,则 EV 出行开始时刻  $t_{\text{dep}}$ 、出行结束时刻  $t_{\text{ari}}$  和日行驶里程  $d$  的概率密度函数如式(39)—(41)所示<sup>[28]</sup>。

$$f_s(t_{\text{dep}}) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{(t_{\text{dep}}-\mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] & 0 < t_{\text{dep}} \leq \mu_s + 12 \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{(t_{\text{dep}}-24-\mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] & \mu_s + 12 < t_{\text{dep}} \leq 24 \end{cases} \quad (39)$$

$$f_e(t_{\text{ari}}) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_e} \exp\left[-\frac{(t_{\text{ari}}+24-\mu_e)^2}{2\sigma_e^2}\right] & 0 < t_{\text{ari}} \leq \mu_e - 12 \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_e} \exp\left[-\frac{(t_{\text{ari}}-\mu_e)^2}{2\sigma_e^2}\right] & \mu_e - 12 < t_{\text{ari}} \leq 24 \end{cases} \quad (40)$$

$$f_m(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_m d} \exp\left[-\frac{(\ln d - \mu_m)^2}{2\sigma_m^2}\right] \quad (41)$$

其中,  $\mu_s = 8.92$ ;  $\sigma_s = 3.24$ ;  $\mu_e = 17.47$ ;  $\sigma_e = 3.41$ ;  $\mu_m = 2.98$ ;  $\sigma_m = 1.14$ 。

采用的分时电价如图 3 所示。假设售电价格与购电价格相等,用户小区与电力系统连接线路的容量为 150 kW。给定天然气价格为 2.7 元/m<sup>3</sup>,热值取 9.7 kW·h/m<sup>3</sup>,基准折现率取 5%。

4.1 能量枢纽优化配置结果比较

针对 4 种场景进行优化配置:场景一为同时考虑冷热负荷的可控性和电负荷的可控性;场景二为仅考虑电负荷的可控性,洗澡热水负荷按照习惯用水时间采用均匀分布模拟,采暖供冷负荷则按满足用户最佳 PMV 指标要求进行控制;场景三为仅考虑热负荷的可控性,可平移电负荷按习惯用电时间用均匀分布模拟,EV 最后一次出行结束即接入系统并以额定电功率充电至期望电量后退出;场景四为不考虑 IDR 的基础场景。

所提方法在 Intel Core i5-6500 CPU @ 3.20 GHz、内存 8 GB 的计算机上实现,并对算例进行了测试。算例中的场景一考虑了电负荷的 DR 和热负荷的 DR,所求解的问题规模在 4 个场景中最大,共包括 2768

表 2 储能设备参数

| Table 2 Parameters of energy storage devices |       |                         |                        |                    |                    |
|----------------------------------------------|-------|-------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|
| 储能设备                                         | $g_s$ | $\kappa_s^{\text{dis}}$ | $\kappa_s^{\text{ch}}$ | $S_s^{\text{max}}$ | $S_s^{\text{min}}$ |
| 热储能                                          | 0.005 | 0.2                     | 0.2                    | 0.9                | 0.1                |
| 电储能                                          | 0.001 | 0.2                     | 0.2                    | 0.8                | 0.2                |

表 3 综合需求侧响应参数

| Table 3 Parameters of integrated demand response |            |                                                                                                                                                                                                                               |
|--------------------------------------------------|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 类型                                               | 设备         | 参数                                                                                                                                                                                                                            |
| 可平移电负荷                                           | 洗碗机        | $p_{\text{ws}}^{\text{N}} = 1.28 \text{ kW}$<br>使用时间:19:30—22:30<br>持续时间 1.5 h                                                                                                                                                |
|                                                  | 洗衣机        | $p_{\text{lw}}^{\text{N}} = 0.5 \text{ kW}$<br>使用时间:20:30—22:30<br>持续时间 1 h                                                                                                                                                   |
| 可平移热负荷                                           | 洗澡用水       | $h_{\text{sh}}^{\text{N}} = 3.5 \text{ kW}$<br>使用时间:18:00—23:00<br>持续时间 1 h                                                                                                                                                   |
| 可转移电负荷                                           | 电动汽车       | $p_{\text{EV}}^{\text{max}} = 3 \text{ kW}$ , $\eta_{\text{EV}}^{\text{ch}} = 0.8$<br>$E_{\text{EV}} = 18 \text{ kW}$ , $S_{\text{EV}}^{\text{min}} = 0.2$<br>$S_{\text{EV}}^{\text{max}} = 0.9$ , $S^{\text{cp}} = 0.8$      |
| 可转移热负荷                                           | 采暖<br>供冷负荷 | $I_1^{\text{t}} = 0.155 \text{ m}^2 \cdot \text{℃}/\text{W}$ , $I_2^{\text{t}} = 0.067 \text{ m}^2 \cdot \text{℃}/\text{W}$<br>$I_3^{\text{t}} = 0.251 \text{ m}^2 \cdot \text{℃}/\text{W}$ , $M = 58.2 \text{ W}/\text{m}^2$ |

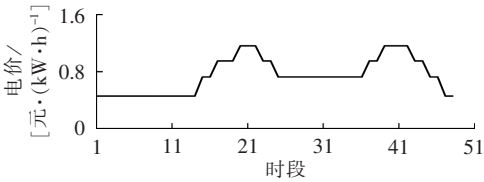


图 3 分时电价  
Fig.3 Time-of-use tariffs

个连续变量和 5411 个整型变量,求解耗时 9.31 s;求解场景二、三、四分别耗时 8.45 s、8.26 s、5.47 s。

这 4 种场景下的优化配置结果及相关各项费用分别如表 4 和表 5 所示。由于电储能及燃气锅炉的经济性较差,没有包括在优化配置结果之中。

场景一和场景二均考虑了电负荷的可控性,二者容量配置的差别主要体现在热储能设备。场景二比场景一的安装成本多 12.5%,运行维护费用多 17.7%,能耗成本增幅不明显,年运行费用多 3.2%。

场景三未考虑电负荷的可控性,但考虑了冷热负荷的可控性,因此在热储能设备配置方面与场景一差别不大。与场景一相比,场景三的燃气轮机安装容量略大,总安装成本多 6.2%,能耗成本多 6.1%,年运行费用多 6.2%。

表 1 设备经济参数  
Table 1 Economic parameters of devices

| 设备     | 电效率/%   | 热效率/%   | 能效比 | 单位价格         | 运行维护费用/[元·(kW·h) <sup>-1</sup> ] | 寿命/a |
|--------|---------|---------|-----|--------------|----------------------------------|------|
| 燃气轮机   | 30      | —       | —   | 6000 元/kW    | 0.06                             | 30   |
| 燃气锅炉   | —       | 93      | —   | 125 元/kW     | 0.004                            | 20   |
| 余热锅炉   | —       | 80      | —   | 340 元/kW     | 0.003                            | 15   |
| 电制冷机   | —       | —       | 4   | 971 元/kW     | 0.0097                           | 10   |
| 吸收式制冷机 | —       | —       | 0.7 | 1100 元/kW    | 0.008                            | 20   |
| 热泵     | —       | —       | 4.5 | 3000 元/kW    | 0.007                            | 20   |
| 电储能    | 95(充/放) | —       | —   | 870 元/(kW·h) | 0.005                            | 10   |
| 热储能    | —       | 90(充/放) | —   | 50 元/(kW·h)  | 0.002                            | 10   |

表 4 4 种场景下的设备容量优化配置结果  
Table 4 Optimal device capacity configuration for four scenarios

| 场景 | 配置容量/kW |      |       |        |    | 热储能/(kW·h) |
|----|---------|------|-------|--------|----|------------|
|    | 燃气轮机    | 余热锅炉 | 电动制冷机 | 吸收式制冷机 | 热泵 |            |
| 一  | 107     | 250  | 7     | 20     | 21 | 322        |
| 二  | 115     | 268  | 7     | 39     | 24 | 508        |
| 三  | 114     | 266  | 6     | 23     | 21 | 360        |
| 四  | 118     | 275  | 7     | 39     | 24 | 508        |

表 5 4 种场景下各项费用比较  
Table 5 Comparison of costs among four scenarios

| 场景 | 安装成本 | 运行维护成本 | 能耗成本  | 年运行费用 |
|----|------|--------|-------|-------|
| 一  | 5.57 | 1.24   | 34.29 | 41.10 |
| 二  | 6.27 | 1.46   | 34.71 | 42.44 |
| 三  | 5.92 | 1.35   | 36.39 | 43.66 |
| 四  | 6.41 | 1.86   | 37.08 | 45.35 |

场景四未考虑需求侧的综合响应,因此安装成本、运行维护成本以及能耗成本均比场景一高,年运行费用多 10.3%。

4.2 能量枢纽典型日运行工况分析

以典型日运行工况为例,分析 IDR 对容量配置的影响及其原因。

4.2.1 冬季典型日功率平衡

冬季典型日电功率平衡情况如图 4 所示,热功率平衡情况则如图 5 所示。利用热负荷的可控性,可以

根据需要改变热负荷大小,室内温度会在给定的用户舒适度范围内进行调节。在时段 1—14,电价较低,燃气轮机不工作,刚性热负荷和采暖负荷由热泵提供,通过容量优化配置,热泵输出热功率能较好地满足热负荷需求,仅有部分时段需要利用储能设备。

在时段 17—24,电价较高,燃气轮机工作,满足系统的电负荷需求,同时向配电系统出售富余电量。此时燃气轮机输出的热功率优先满足采暖负荷,富余热功率则由热储能设备储热。在时段 23—24,采暖负荷增加,室内温度升高到允许的上限以存储热量。在时段 25—26,采暖负荷为 0 kW,室内温度逐渐下降。当室温低于允许温度的下限后,热泵重新工作,维持室内温度,以满足 PMV 指标要求。

后续时段的情况类似。电价高时燃气轮机工作,产生的热量优先满足刚性热负荷和可平移热负荷需求,同时通过升高室内温度储存热量,减少对热储能设备的依赖。故利用热负荷的可控性可在满足热负荷需求的同时降低对热储能设备的容量配置要求。

4.2.2 夏季典型日功率平衡

考虑了 IDR 的夏季典型日的电功率平衡情况见图 6。在时段 1—14 和 47—48,电价较低,电负荷由电力系统提供。对于可转移电力负荷如 EV,在满足其出行要求的前提下,其充电一般安排在电价最低的时段;对于可平移电力负荷,安排在习惯使用时间段内的低电价时段。当电价为 0.9368 元/(kW·h)时,

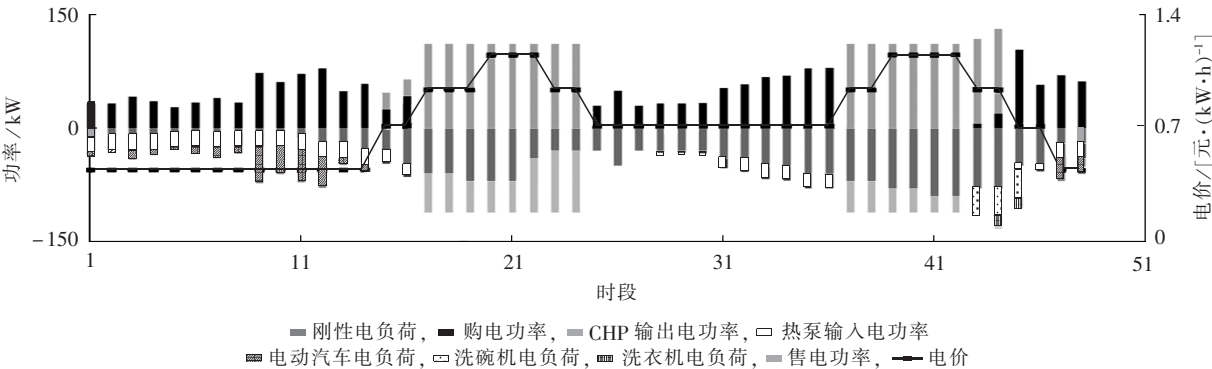


图 4 冬季典型日电功率平衡情况  
Fig.4 Power balance of typical winter day

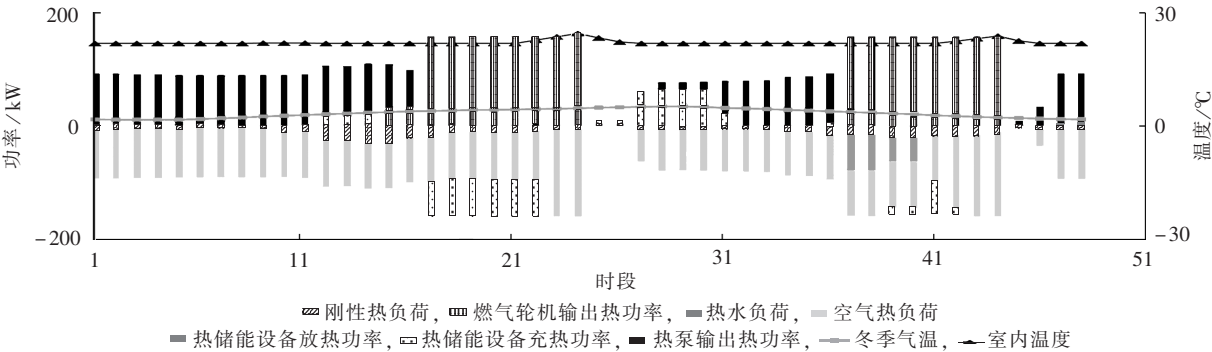


图 5 冬季典型日热功率平衡  
Fig.5 Heat power balance of typical winter day

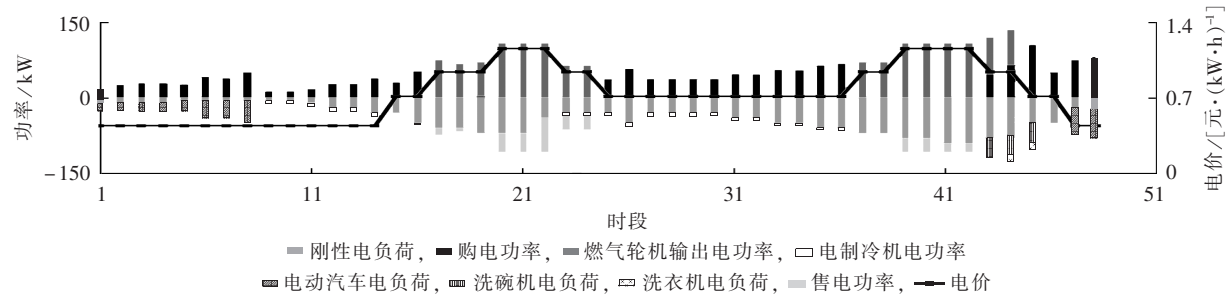


图 6 夏季典型日电功率平衡

Fig.6 Power balance of typical summer day

只有利用燃气轮机产生的废热,运行才具有经济性,即其售电收益低于纯发电成本,因此燃气轮机未满发。当电价为 1.1505 元/(kW·h)时,燃气轮机的售电收益高于其纯发电成本,故其满发,此时吸收式制冷机和热储能设备也处于最大负荷状态。

图 7 显示了夏季典型日的冷功率平衡,由于冷负荷具有可调性,而在时段 8—13,电价较低,电制冷机按最大功率出力,室温降低,这样就可以减少后续高电价时的出力。在时段 14—44,吸收式制冷机优先利用燃气轮机产生的热量制冷,减少热储能设备储热,当燃气轮机停止出力时由热储能设备供热,不足的冷功率由电动制冷机提供。

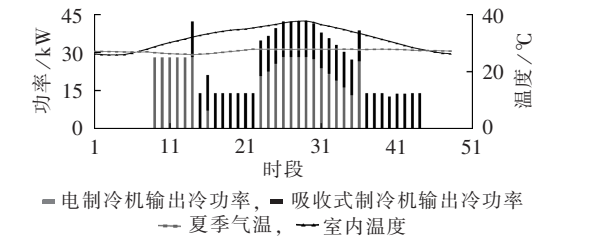


图 7 夏季典型日冷功率

Fig.7 Cooling power of typical summer day

4.3 灵敏度分析

定义可平移电负荷和可转移电负荷之和参与 IDR 的比例为可控电负荷参与度,本节分析 PMV 指标要求和可控电负荷参与度对能量枢纽年运行费用的影响。

a. PMV 指标。

PMV 指标反映用户对于温度舒适度的要求。图 8 展示了在不同 PMV 指标下系统配置方案较 PMV=0 场景下的各成本节约比例,具体成本分布情况见图 9。随着 PMV 指标允许波动范围增大,安装成本和运维成本的节约比例增大,其中安装成本最多下降了 17.3%,而能耗成本降幅不明显,总成本则略有下降。增大 PMV 的允许波动范围,就放宽了对室内温度的舒适度要求,室内温度的允许偏差增大,相当于居民楼冷热等效储能容量增大,可以更大程度地代替真实储能装置,因此可以降低对储能设备的需求。储能主体的改变对居民的用能情况和小区的购能情况影响较小,所以能耗成本变化不大。

b. 可控电负荷参与度。

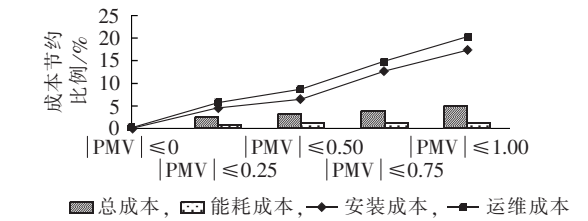


图 8 不同 PMV 指标下的成本对比

Fig.8 Comparison of costs among different PMVs

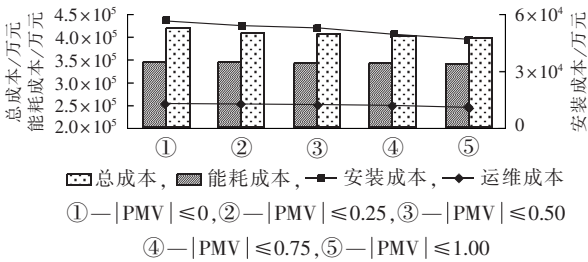


图 9 不同 PMV 指标下的成本分布

Fig.9 Cost distribution for different PMVs

图 10 展示了与电负荷不可控场景相比,在不同的可控电负荷参与度下各项成本节约的比例,具体成本分布情况见图 11。可控电负荷直接影响居民的

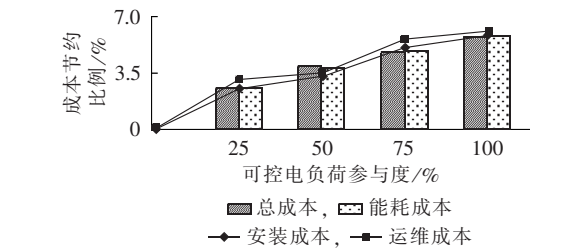


图 10 不同可控电负荷参与度下的成本对比

Fig.10 Comparison of costs among different participation degrees of controllable electrical loads

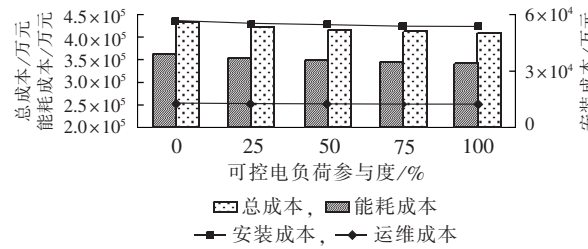


图 11 不同可控电负荷参与度下的成本分布

Fig.11 Cost distribution for different participation degrees of controllable electrical loads

用能情况和小区的购能情况,当其参与 DR 的比例增大时,各项相关费用均有所下降,且趋势一致。

## 5 结语

本文提出了一种计及 IDR 的能量枢纽优化配置模型,以系统等值年运行成本最低为优化目标,并考虑了功率平衡约束、联络线容量约束、安装容量约束、运行约束和储能设备约束。以典型日的运行工况为例,分析了 IDR 对优化配置的影响,同时对可调节冷热负荷及可控电负荷参与度对能量枢纽优化配置成本的影响做了灵敏度分析,计算结果表明冷热负荷的可控性主要影响安装成本和运维成本,而电负荷的可控性则对各类成本均有一定程度的影响。

在后续研究工作中,将考虑集中采暖供冷时传输管道损耗以及管网热惯性对能量枢纽优化配置的影响。

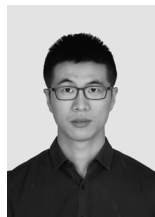
## 参考文献:

- [1] 董朝阳,赵俊华,文福拴,等. 从智能电网到能源互联网:基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化,2014,38(15):1-11.  
DONG Zhaoyang,ZHAO Junhua,WEN Fushuan,et al. From smart grid to energy internet:basic concept and research framework[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(15):1-11.
- [2] 孙宏斌,潘昭光,郭庆来. 多能流能量管理研究:挑战与展望[J]. 电力系统自动化,2016,40(15):1-8.  
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.
- [3] 邓建玲. 能源互联网的概念及发展模式[J]. 电力自动化设备,2016,36(3):1-5.  
DENG Jianling. Concept of energy internet and its development modes[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(3):1-5.
- [4] ZHANG Xiaping,SHAHIDEHPOUR M,ALABDULWAHAB A,et al. Optimal expansion planning of energy hub with multiple energy infrastructures[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2015,6(5):2302-2311.
- [5] 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.
- [6] BAHRAMI S,SAFE F. A financial approach to evaluate an optimized combined cooling,heat and power system[J]. Energy and Power Engineering,2013,5(5):352-362.
- [7] 荆有印,白鹤,张建良. 太阳能冷热电联供系统的多目标优化设计与运行策略分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(20):82-87.  
JING Youyin,BAI He,ZHANG Jianliang. Multi-objective optimization design and operation strategy analysis of a solar combined cooling heating and power system[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(20):82-87.
- [8] 肖小清,阚伟民,杨允,等. 有蓄能的联供系统超结构优化配置[J]. 中国电机工程学报,2012,32(32):8-14.  
XIAO Xiaoqing,KAN Weimin,YANG Yun,et al. Superstructure-based optimal planning of cogeneration systems with storage[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(32):8-14.
- [9] BENNEK J,BUHLIGEN U,ROTHE K,et al. Design and optimization of CCHP system incorporated into kraft process,using Pinch analysis with pressure drop consideration [J]. Applied Thermal Engineering,2013,61(1):88-97.
- [10] GUO Li,LIU Wenjia,CAI Jiejia,et al. A two-stage optimal planning and design method for combined cooling,heat and power microgrid system[J]. Energy Conversion and Management,2013,74(10):433-445.
- [11] 汤奕,邓克愚,孙华东,等. 智能家电参与低频减载协调配合方案研究[J]. 电网技术,2013,37(10):2861-2867.  
TANG Yi,DENG Keyu,SUN Huadong,et al. Research on coordination scheme for smart household appliances participating underfrequency load shedding[J]. Power System Technology,2013,37(10):2861-2867.
- [12] 林君豪,张焰,陈思,等. 考虑可控负荷影响的主动配电系统分布式电源优化配置[J]. 电力自动化设备,2016,36(9):46-53.  
LIN Junhao,ZHANG Yan,CHEN Si,et al. Optimal DG allocation considering effect of controllable load for active distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(9):46-53.
- [13] 荆朝霞,胡荣兴,袁灼新,等. 含风/光/抽水蓄能并计及负荷响应的海岛微网优化配置[J]. 电力系统自动化,2017,41(1):65-72,116.  
JING Zhaoxia,HU Rongxing,YUAN Zhuoxin,et al. Capacity configuration optimization for island microgrid with wind/solar/pumped storage considering demand response[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(1):65-72,116.
- [14] 曾鸣,韩旭,李冉,等. 能源互联微网系统供需双侧多能协同优化策略及其求解算法[J]. 电网技术,2017,41(2):409-417.  
ZENG Ming,HAN Xu,LI Ran,et al. Multi-energy synergistic optimization strategy of micro energy internet with supply and demand sides considered and its algorithm utilized[J]. Power System Technology,2017,41(2):409-417.
- [15] 曾鸣,武庚,李冉,等. 能源互联网中综合需求侧响应的关键问题及展望[J]. 电网技术,2016,40(11):3391-3398.  
ZENG Ming,WU Geng,LI Ran,et al. Key problems and prospects of integrated demand response in energy internet[J]. Power System Technology,2016,40(11):3391-3398.
- [16] 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.
- [17] 刘伟佳,吴秋伟,文福拴,等. 电动汽车和可控负荷参与配电系统阻塞管理的市场机制[J]. 电力系统自动化,2014,38(24):26-33.  
LIU Weijia,WU Qiuwei,WEN Fushuan,et al. A market mechanism for participation of electric vehicles and dispatchable loads in distribution system congestion management[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(24):26-33.
- [18] 张晓晖,陈钟顺. 热电冷联产系统的能耗特性[J]. 中国电机工程学报,2007,27(5):93-98.  
ZHANG Xiaohui,CHEN Zhongqi. Energy consumption performance of combined heat cooling and power system[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(5):93-98.
- [19] WANG J,JING Y,ZHANG C. Optimization of capacity and operation for CCHP system by genetic algorithm[J]. Applied Energy,2010,87(4):1325-1335.
- [20] 周磊,李扬. 分时电价环境下基于家居能量管理系统的家居负荷建模与优化运行[J]. 电网技术,2015,39(2):367-374.  
ZHOU Lei,LI Yang. Modeling and optimal dispatch for residential load based on home energy management system under

- time-of-use pricing[J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 367-374.
- [21] 苏海锋,梁志瑞. 基于峰谷电价的家用电动汽车居民小区有序充电控制方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 17-22.
- SU Haifeng, LIANG Zhirui. Orderly charging control based on peak valley electricity tariffs for household electric vehicles of residential quarter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 17-22.
- [22] International Organization for Standardization. Ergonomics of the thermal environment-analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria:ISO7730[S]. Geneva, Switzerland: ISO, 2005.
- [23] 曾光,田永铮,赵华,等. 环境因素及综合因素对PMV指标的影响分析[J]. 建筑节能, 2007, 35(3): 11-16.
- ZENG Guang, TIAN Yongzheng, ZHAO Hua, et al. Analysis on the environment and synthesis factors affecting the PMV index [J]. Building Energy Efficiency, 2007, 35(3): 11-16.
- [24] NOUREDINE H. 有源智能配电网[M]. 陶顺,肖湘宁,彭骋,译. 北京:中国电力出版社, 2012.
- [25] ZHANG W, LIAN J, CHANG C Y, et al. Aggregated modeling and control of air conditioning loads for demand response[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4655-4664.
- [26] MARNAY C, VENKATARAMANAN G, STADLER M, et al. Optimal technology selection and operation of commercial building microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 975-982.
- [27] ZHOU Z, LIU P, LI Z, et al. An engineering approach to the optimal design of distributed energy systems in China[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 53(2): 387-396.
- [28] 姚伟锋,赵俊华,文福拴,等. 基于双层优化的电动汽车充放电调度策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 30-37.

YAO Weifeng, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. A charging and discharging dispatching strategy for electric vehicles based on bi-level optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 30-37.

#### 作者简介:



崔鹏程

崔鹏程(1992—),男,浙江宁波人,硕士研究生,主要研究方向为能源互联网与需求侧管理(**E-mail**:daniel.cui.zju@qq.com);

史俊祎(1993—),女,重庆武隆人,硕士研究生,主要研究方向为电力经济与电力市场(**E-mail**:junyizju@foxmail.com);

文福拴(1965—),男,河南林州人,教授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方向为电力系统故障诊断与系统恢复、电力经济与电力市场、智能电网与电动汽车(**E-mail**:fushuan.wen@gmail.com);

孙磊(1989—),男,安徽宿州人,博士研究生,主要研究方向为电力系统恢复和智能电网(**E-mail**:sunleieee@gmail.com);

董朝阳(1971—),男,山西太原人,教授,“千人计划”特聘专家,博士,主要研究方向包括电力系统规划与稳定、智能电网、负荷建模、可再生能源、电力市场、计算方法(**E-mail**:joe.dong@sydney.edu.au);

郑宇(1986—),男,福建霞浦人,博士,主要研究方向为智能配电网规划与运行等(**E-mail**:zhengyu@csg.cn);

张睿(1983—),女,江苏丹阳人,副研究员,博士,主要研究方向为电力系统稳定性分析及控制、数据挖掘、智能电网和能源互联网(**E-mail**:rachelzhang.cn@outlook.com)。

## Optimal energy hub configuration considering integrated demand response

CUI Pengcheng<sup>1</sup>, SHI Junyi<sup>1</sup>, WEN Fushuan<sup>1,2</sup>, SUN Lei<sup>1</sup>, DONG Zhaoyang<sup>3</sup>, ZHENG Yu<sup>3</sup>, ZHANG Rui<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Department of Electrical & Electronic Engineering, Universiti Teknologi Brunei,

Bandar Seri Begawan BE1410, Brunei;

3. Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid, Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** Energy hub which accommodates various forms of energy source and different types of load is the important part of multi-energy system and the optimal configuration of the type and capacity of its devices is the basis for ensuring its safe and economic operation. Furthermore, the continuous development of demand response mechanism and technology imposes new requirements for this optimal configuration. Different device models of energy hub are introduced, the properties of cooling, heating and power loads are analyzed, and their models are built respectively. Based on the load curves of typical days, an 0-1 mixed-integer linear programming model is established, which considers the integrated demand response and the operating constraints of energy hub, and takes the minimum annual operational expense as its optimization objective, including installation cost, operation-maintenance cost and energy consumption cost. Case study demonstrates that, based on the proposed model, the annual operational expense of energy hub is significantly reduced.

**Key words:** multi-energy system; energy hub; optimal configuration; integrated demand response; cooling, heating and power loads