文章编号: 2096-5125 (2020) 03-0291-10 DOI: 10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2020.03.010 中图分类号: TK01; TM73

考虑室内体感舒适度的城市楼宇型能量枢纽优化配置 与定容应用分析

范成围¹,陈刚¹,熊哲浩²,靳旦¹,刘洋³,杜新伟³,李海波²,雷一^{2*} (1.国网四川省电力公司电力科学研究院,四川省 成都市 610213; 2.清华四川能源互联网研究院,四川省 成都市 610213;

3. 国网四川省电力公司,四川省 成都市 610213)

Optimal Configuration and Capacity Settings for Urban Building Energy Hub Considering Indoor Somatosensory Comfort

FAN Chengwei¹, CHEN Gang¹, XIONG Zhehao², JIN Dan¹, LIU Yang³, DU Xinwei³, LI Haibo², LEI Yi^{2*}

State Grid Sichuan Electric Power Company Electric Power Research Institute, Chengdu 610213, Sichuan Province, China;
 Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610213, Sichuan Province, China;

3. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610213, Sichuan Province, China)

Abstract: Building energy constitutes the main portion of urban energy consumption. One of the main considerations of building energy systems design is the ideal comfortable human body temperature with respect to the season. Based on this temperature, we establish a building and energy hub optimization model that calculates the cooling and heating loads needed to maintain the best body temperature in a building. Based on external energy factors, internal power balance, and other constraints, an optimal method to allocate capacity for energy conversion and storage equipment in a building is proposed for the business model of energy-use deposition. This method is used to optimize the comprehensive economic cost of a building energy hub, which is then verified by practical examples. The results show that focusing on the complementary characteristics of various energy conversion equipment plays a key role in the total cost of an energy hub. The high-economy operation method is as follows: the gas engine meets the electric and thermal base loads, and the power grid and the heat pump supplement the rest of the loads. The price of gas, the gap between peak and valley electricity price, and the ratio of heat and power of gas engine are important factors for the overall economy.

Keywords: energy hub; buildings; optimal configuration; somatosensory temperature

摘 要: 楼宇用能是城市能耗的重要组成部分。基于楼宇室 内人体在各个季节的舒适体感温度,建立建筑和能量枢纽优 化模型,据此计算维持楼宇最佳体感温度所需的冷热负荷, 并基于外部能源要素价格、内部功率平衡等约束条件,面向 用能托管的商业模式,提出楼宇冷热电气能量转换和存储设 备的优化配置方法,以实现楼宇能量枢纽综合经济成本最 优,并通过实际算例进行了验证。结果表明,充分发挥各类 能量转换设备的互补特性,对于降低能量枢纽的综合成本起 着关键作用。燃气内燃机满足电、热基荷,电网购电和热泵 予以补充的方式具有较高的经济性。气价、峰谷电价差和燃 气机热电比是影响整体经济性的重要因素。

关键词:能量枢纽;楼宇;优化配置;体感温度

0 引言

近年来,高度耦合电、热、气、冷等多种能源的 高效、清洁的能量枢纽或综合能源系统逐渐成为学术 研究和工程项目的焦点^[1-3]。能量枢纽(energy hub, EH)是一种由能源转换设备和储能设备构成的多源 输入一输出端口模型,可以通过耦合矩阵描述两者的 耦合关系^[4],从而实现多能优化配置和经济运行。当 前国内外针对多能源规划问题已有大量研究。文献[5]

基金项目:国家重点研发计划(2018YFB0905200);国网 四川省电力公司科技项目(521997180021)。

National Key Research and Development Program of China (2018YFB0905200); Science and Technology Project of State Grid Sichuan Electric Power Company (521997180021).

提出考虑下层能量枢纽初始规划和上层能源网络扩展 规划的双层规划方法。文献[6]归纳总结了协同规划 相关的建模理论、仿真理论、优化方法,并探讨了接 口等效方法、电路热路等效理论。文献[7-8]针对能量 枢纽的设备定容问题提出了基于混沌采样算法改进型 Kriging和强化学习求解规划模型的方法。文献[9-10] 针对电一气耦合的能量枢纽,采用冷热电联产系统 (combined cooling heating and power, CCHP)进行多 阶段场景分析,并规划配电网、燃气管网的选址定 容。文献[11-12]以经济性指标为目标,建立0-1混合 整数线性规划模型,结合实际案例验证其规划方法的 可靠性。文献[13-14]针对热电联供系统规划模型,提 出了基于经济性、可靠性、碳排放以及能源利用效率 等指标下的多目标规划方法。

当前的研究主要集中在多能处理、多目标优化运行和模型算法优化等方面,针对室内活动为主导的商业中心、住宅区以及写字楼等楼宇式EH建筑群特征和需求的配置理论研究较少;在基于室内体感最佳舒适度的冷、热功率实时需求建模方面更罕有研究。在综合能源服务新模式下,越来越多的楼宇采取用能托管模式,能源服务商针对楼宇面积收费并提供冷热供应服务,通过运营优化获取收益。

本文针对以室内活动为主的城市楼宇式建筑群, 提出一种考虑人体温度舒适度的楼宇能量枢纽优化配 置方法。通过温度舒适度评价指标获取冷、热调节功 率,建立楼宇能量枢纽0-1状态变量描述设备配置及 其运行状况,以楼宇能量枢纽经济性为优化目标求解 全局最优的配置结果,重点探讨电网购电与分布式发 电互补优化、燃气发电余热供热与热泵制热互补优 化,分析能源要素价格和热电比的影响。

1 楼宇型能量枢纽建模

EH系统网络拓扑如图1所示,由输入端、输出端和 能源网络3部分组成。输入端包括电网购电、光伏、风 能、天然气与热网等不同形式能源的输入;输出端包括 用户热负荷、冷负荷、向电网售电与电负荷等输出;能 源网络包含各种能源转换、存储和传输管网设备。

热负荷主要分为刚性负荷和温度调节负荷2种。 刚性负荷为生活热水、用电照明等长期稳定且易通过 聚类方法预测的刚性需求。温度调节负荷为夏冬季冷 暖气等不稳定弹性需求,室内温度升高或降低受季 节、人体体感、建筑物材料等多种不确定因素影响,



建模难度较大。本文采用根据Fanger研究成果制定的 用户温度舒适度评价指标PMV(predicted mean vote) 模型求解楼宇室内温度调节热负荷^[15-16],这是一种描 述人体和建筑物环境之间冷/热量和质量交换、人体被 动接受外界热刺激的热平衡模型。PMV指标的简化公 式为^[17]:

$$\phi_t^{\text{PMV}} = 2.43 - 3.76 \times \frac{T_c - T_t^{\text{in}}}{M(Cl_\tau + 0.1)} \tag{1}$$

式中: ϕ_t^{PMV} 为时刻t的PMV指标值; T_c 和 T_t^{in} 分别表示 人体皮肤体表温度和室内温度, T_c 取33.5°C; M为人 体能量代谢率,与活动量相关,不考虑室内剧烈运动 场景,取定值; Cl_t 为季节 τ 人体穿着服装热阻。根据 ISO7730标准,满足最佳人体温度舒适度PMV指标范 围如下:

$$-0.5 \leq \phi_t^{\text{PMV}} \leq 0.5 \tag{2}$$

当 ϕ_t^{PMV} 取值在式(2)给定的范围内,温度舒适度 达到最佳,用户不会感觉到明显的温度变化差异。此 时室内温度转化为一个数学约束区间,在此区间内满 足用户最佳舒适度温度需求且具备一定的弹性,室内 温度 T_t^{in} 弹性约束区间如图2所示。



Fig. 2 Indoor temperature constraints in different seasons

室内温度与室内冷、热功率间的关系可采用一阶 等效热参数模型,其微分方程为式(3),离散化处理 后为式(4)^[18]:

$$\frac{\mathrm{d}T_t^{\mathrm{in}}}{\mathrm{d}t} = \frac{q_t^{\mathrm{air}}}{C} + \frac{T_t^{\mathrm{out}} - T_t^{\mathrm{in}}}{RC} \tag{3}$$

$$T_{t+1}^{\text{in}} = T_t^{\text{in}} e^{\frac{\Delta T}{RC}} + \left(R q_t^{\text{air}} + T_t^{\text{out}} \right) \left(1 - e^{\frac{\Delta T}{RC}} \right)$$
(4)

式中: *T*^{out}为时刻*t*的室外温度; *R*为建筑物的等效热阻; *C*为考虑建筑物保温被动储热效应的等效热容; Δ*T*为 功率调节时间间隔; *q*^{air}为采暖通风空调系统在时刻*t* 输出的冷、热功率,用于室内温度调节。考虑用户最 佳舒适度,室内温度在式(2)中存在约束条件,为保 持楼宇内部最佳体感温度,可根据约束条件求取所需 的温度调节功率*q*^{air}。

2 优化目标与约束条件

2.1 优化目标

对规划时期内的楼宇能量枢纽冷热电负荷曲线进 行统计分析,采用聚类技术或场景削减技术得到典 型日的冷热电负荷曲线。假设聚类得到N个典型日场 景,其中第n个典型日的总天数为 d_n ,即 Σd_n 为规划 期的总天数,典型日筛选方法可参考文献[19]。本文 以经济性最优作为能量枢纽规划模型的目标函数,采 用综合年运行成本作为衡量经济性的指标,主要包括 设备投资成本、年度运行维护成本及年度能耗成本, 如式(5)所示^[20]:

$$\min C_{\text{ATC}} = C_{\text{IN}} + C_{\text{OM}} + C_{\text{ES}}$$
(5)

式中: C_{ATC}为系统年综合运行成本; C_{IN}、C_{OM}、C_{ES}分别代表初始安装成本等年值、年运行维护成本和年能耗成本。

1) 初始安装成本。

采用等年值法,通过资金回收系数(capital recovery factor, CRF),可将各类设备的初始投资成本 折算为每年的成本支出,如式(6)所示:

$$C_{\rm IN} = \sum_{s} \xi_s^{\rm cap} C_s \frac{r(1+r)^{l_s}}{(1+r)^{l_s} - 1} \tag{6}$$

式中: C_s 为设备s的规划安装容量; ζ_s^{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。

2) 运行维护成本。

根据实际工程经验,设备运行维护成本一般取初 始安装成本的百分比:

$$C_{\rm OM} = C_{\rm IN} \times a \tag{7}$$

式中: a为设备的运行维护费用系数。

3) 能耗成本。

能耗成本主要包括能源生产设备所消耗的天然气 等燃料成本、向电网购电与售电差值等:

$$C_{\rm ES} = \sum_{n} d_n \sum_{t} \left(\sum_{s} f_{s,t} \xi_t^{\rm gas} + p_t^{\rm buy} \xi_t^{\rm buy} - p_t^{\rm sell} \xi_t^{\rm sell} \right) \Delta T \quad (8)$$

式中: ζ_t^{buy} 、 ζ_t^{sell} 和 ζ_t^{sell} 分别为t时刻从电网购电价格、向 电网售电价格和购气价格; p_t^{buy} 和 p_t^{sell} 分别为t时刻系统 从电网购电功率和向电网售电功率; f_{st} 为设备s在时刻 t的燃气消耗率; ΔT 为功率调节时间间隔。

2.2 约束条件

各典型日下综合能源系统的运行约束主要包括系 统功率平衡约束(含冷、热、电功率平衡)、各类型 设备的输入-输出耦合约束(能量枢纽模型)、设备出 力限制、电网联络线功率限制等。

2.2.1 功率平衡约束

式(9)-(11)分别为系统电功率平衡、热功率 平衡及冷功率平衡约束。

$$p_{t}^{\text{buy}} - p_{t}^{\text{sell}} - \sum_{s} p_{s,t}^{\text{in}} + \sum_{s} p_{s,t}^{\text{out}} = p_{t}^{\text{L}}$$
 (9)

$$\sum_{s} h_{s,t}^{\text{out}} - \sum_{s} h_{s,t}^{\text{in}} = h_t^{\text{L}}$$
(10)

$$\sum_{s} c_{s,t}^{\text{out}} = c_t^{\text{L}} \tag{11}$$

式中: p_t^{L} 、 h_t^{L} 、 c_t^{L} 分别为系统在时刻t的电负荷需求、 热负荷需求与冷负荷需求; $p_{s,t}^{in}$ 和 $p_{s,t}^{out}$ 分别为设备s在时 刻t的输入电功率和输出电功率; $h_{s,t}^{in}$ 和 $h_{s,t}^{out}$ 分别表示设 备s在时刻t消耗的输入热功率和输出热功率; $c_{s,t}^{out}$ 表示 设备s在时刻t的输出冷功率。

2.2.2 能量枢纽模型

能量枢纽主要包括能量生产、存储及转换3种类型的设备。能量生产设备主要包括CHP机组、燃气锅炉、光伏与风机,能量存储设备主要包括电储能和热储能设备,能量转换设备主要包括热泵和电制冷机,下面分别介绍其运行约束模型。

1) CHP机组。

热电联产机组(combined heat and power, CHP) 包括燃气轮机和余热锅炉。以天然气作为输入能源, 输出高温高压蒸汽推动汽轮机发电,燃气余热可由余 热锅炉回收后提供热水为用户供暖,也可进入吸收式 制冷机为用户供冷。本文假设燃气轮机的运行效率 在运行区间内保持不变,其输入-输出函数关系如式

$$p_{\mathrm{MT},t}^{\mathrm{out}} = \eta_{\mathrm{MT},\mathrm{e}} \lambda_{\mathrm{gas}} f_{\mathrm{MT},t} \tag{12}$$

$$h_{\mathrm{MT},t}^{\mathrm{out}} = \eta_{\mathrm{WH,h}} \left(1 - \eta_{\mathrm{MT,e}} \right) \lambda_{\mathrm{gas}} f_{\mathrm{MT},t}$$
(13)

式中: $p_{MT,t}^{out}$ 、 $h_{MT,t}^{out}$ 分别为燃气轮机t时刻的输出电功率 与输出热功率; $\eta_{MT,e}$ 、 $\eta_{WH,h}$ 分别为CHP机组的发电效 率和热回收效率; λ_{gas} 、 $f_{MT,t}$ 分别为天然气热值与燃气 消耗速率。

2) 吸收式制冷机。

吸收式制冷机将余热锅炉或热泵产生的热能转化 为供冷用户所需的冷能,其输入-输出函数关系为

$$c_{\mathrm{AC},t}^{\mathrm{out}} = COP_{\mathrm{AC}}h_{\mathrm{AC},t}^{\mathrm{out}}$$
(14)

式中: COP_{AC} 为吸收式制冷机的热力系数; $c_{AC,t}^{out}$, $h_{AC,t}^{out}$ 分别为其输出的冷功率和输入的热功率。

3) 燃气锅炉。

燃气锅炉以天然气作为输入能源,输出热能供给 用户,其输入-输出函数关系为

$$h_{\text{GB},t}^{\text{out}} = \eta_{\text{GB},e} \lambda_{\text{gas}} f_{\text{GB},t}$$
(15)

式中: $h_{GB,}^{\text{out}}$ 为燃气锅炉在时刻t的输出热功率; $f_{GB,}$ 为锅 炉燃气消耗速率; $\eta_{GB,}$ 为燃气锅炉效率。

4) 储能设备。

储能设备包括电储能和热储能设备2种类型,其 数学模型分别为

$$E_{\mathrm{ES},t+1} = (1 - \theta_{\mathrm{ES}}) E_{\mathrm{ES},t} + \left(p_{\mathrm{ES},t}^{\mathrm{ch}} \eta_{\mathrm{ES}}^{\mathrm{ch}} - \frac{p_{\mathrm{ES},t}^{\mathrm{dis}}}{\eta_{\mathrm{ES}}^{\mathrm{dis}}} \right) \Delta T \quad (16)$$

$$Q_{\mathrm{HS},t+1} = (1 - \theta_{\mathrm{HS}})Q_{\mathrm{HS},t} + \left(h_{\mathrm{HS},t}^{\mathrm{ch}}\eta_{\mathrm{HS}}^{\mathrm{ch}} - \frac{h_{\mathrm{HS},t}^{\mathrm{dis}}}{\eta_{\mathrm{HS}}^{\mathrm{dis}}}\right)\Delta T \quad (17)$$

式中: $E_{ES,t+1}$ 为电储能设备在时刻t+1的存储电量, $E_{ES,t}$ 、 $p_{ES,t}^{dis}$, $p_{ES,t}^{dis}$ 分别为电储能设备在时刻t的存储电量、充电功率和放电功率; η_{ES}^{ch} 、 η_{ES}^{dis} 分别为电储能设备的充电效率和放电效率; $Q_{HS,t+1}$ 为热储能设备在时刻t+1的存储热量; $Q_{HS,t}$ 、 $h_{HS,t}^{dis}$,分别为热储能设备在时刻t的存储热量、吸热功率和放热功率; η_{HS}^{ch} 、 η_{HS}^{dis} 分别为热储能设备的吸热效率和放热效率; θ_{ES} 、 θ_{HS} 分别为电储能和热储能设备的自放电系数和散热损失系数。

5) 热泵。

热泵包括空气源热泵、地源热泵和水源热泵等, 其功能是将空气中、土壤中或水中的低品质热能,通 过电力转化为高品质热能供给用户。一般采用制热系 数*COP*_{HP}表征热泵的性能,热泵的输入-输出函数关 系为

$$h_{\mathrm{HP},t}^{\mathrm{out}} = COP_{\mathrm{HP}} p_{\mathrm{HP},t}^{\mathrm{in}}$$
(18)

式中: *h*^{out}_{HP,t}、*p*ⁱⁿ_{HP,t}分别为热泵输出热功率和输入电 功率。

6) 电制冷机。

电制冷机将电能转化为冷能,可在供冷需求较大 且电力富余(如夜间低谷电价)期间使用,定义输出 冷量与输出电量的比值为制冷系数*COP*_{EC},其输入-输 出函数关系为

$$c_{\text{EC},t}^{\text{out}} = COP_{\text{EC}} p_{\text{EC},t}^{\text{in}}$$
(19)

式中: $c_{\text{EC},t}^{\text{out}}$, $p_{\text{EC},t}^{\text{in}}$ 分别为输出冷功率和输入电功率。

7) 电网联络线功率约束。

考虑综合能源系统与电网间联络线功率限制,建 立约束方程:

$$0 \leqslant p_t^{\text{buy}} \leqslant \gamma_t^{\text{buy}} p^{\text{buy,max}} \tag{20}$$

$$0 \le p_t^{\text{sell}} \le \gamma_t^{\text{sell}} p^{\text{sell.max}}$$
(21)

$$0 \le \gamma_t^{\text{sell}} + \gamma_t^{\text{buy}} \le 1 \tag{22}$$

式中: $p^{\text{buy.max}}$ 、 $p^{\text{sell.max}}$ 为能量枢纽从电网购电或售电的 功率上限; γ_t^{buy} 、 γ_t^{sell} 为0-1变量,分别表征能量枢纽向 电网售电或购电的状态,其中 γ_t^{buy} =1表示购电, γ_t^{sell} =1 表示售电;约束(22)限定了综合能源系统不能在同 一时刻购电和售电。

8) 设备安装容量约束。

各类设备规划容量不能超过允许安装容量的上 下限:

$$\gamma_s C_s^{\min} \le C_s \le \gamma_s C_s^{\max} \tag{23}$$

式中: γ_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^{\min} 和 C_s^{\max} 分别为设备s安装容量的下限和上限。

9) 能量生产 / 转换设备的运行约束。

能量生产/转换设备出力不能超过允许的上下限:

$$\Psi_{s,t}\delta_s^{\min}C_s \leqslant W_{s,t} \leqslant \Psi_{s,t}\delta_s^{\max}C_s$$
 (24)

式中: $\delta_{s}^{\min} \pi \delta_{s}^{\max}$ 分别为能量生产/转换设备s的最小出 力比例和最大出力比例; $\psi_{s,t}$ 为0-1状态变量, $\psi_{s,t} = 0$ 表示设备s在时刻t不投入运行, $\psi_{s,t} = 1$ 表示运行;对于 能量转换设备, $w_{s,t}$ 表示设备s在时刻t的输入功率;对 于能量生产设备, $w_{s,t}$ 表示设备s在时刻t的输出功率。

10) 储能设备约束。

储能设备存储能量应满足上下限约束,如式(25) 所示。为了保证各调度日之间储能状态的连续性,本 文假设储能设备在每个调度周期最后时刻的状态*W_{s.r}* 与开始时刻的状态*W_{s.1}相同,如式(26)所示。*

$$S_s^{\min}C_s \leq W_{s,t} \leq S_s^{\max}C_s \tag{25}$$

$$W_{s.1} = W_{s.T} \tag{26}$$

式中: $S_s^{max} n S_s^{min}$ 分别表示储能设备能量存储的上下限; $W_{s,t}$ 为储能设备s在时刻t具有的储能量。此外,储能设备的充放功率与其存储容量有关:

$$0 \leq w_{s,t}^{ch} \leq \varepsilon_{s,t}^{ch} K_s^{ch} C_s \tag{27}$$

$$0 \leq w_{s,t}^{\text{dis}} \leq \mathcal{E}_{s,t}^{\text{dis}} \mathcal{K}_{s}^{\text{dis}} C_{s} \tag{28}$$

$$0 \leq \varepsilon_{s,t}^{\rm ch} + \varepsilon_{s,t}^{\rm dis} \leq 1 \tag{29}$$

式中: $w_{s,t}^{ch} \pi w_{s,t}^{dis}$ 分别为储能设备s在时刻t的充能功率和 放能功率; $\kappa_{s}^{ch} \pi \kappa_{s}^{dis}$ 分别为储能设备s的充能和放能倍 率; $\mathcal{E}_{s,t}^{ch} \pi \mathcal{E}_{s,t}^{dis}$ 分别为表征储能设备s在时刻t状态的0-1 变量, $\mathcal{E}_{s,t}^{ch} = 1$ 表示充能, $\mathcal{E}_{s,t}^{dis} = 1$ 表示放能,式(29) 保证了储能设备不能同时充能和放能。

由于楼宇型能量枢纽供能半径较小(一般在300 m 内),且为能耗终端,可忽略能源网络的传输约束。

2.3 模型求解

以上优化模型在数学上属于混合整数非线性优化 问题,难以直接求解,但可经过一定的数学变换将 其转化为0-1混合整数线性规划问题。本文模型中非 线性约束的不等式一侧为连续变量与0-1变量的乘积, 即*k*₁·*u*·*x*≤*z*≤*k*₂·*u*·*y*的约束形式,其中*x*、*y*、*z*为 连续变量,*u*为0-1变量,*k*₁<*k*₂为给定常数。可以证明, 上述约束与下述式(30)等效:

$$z \leq k_2 \cdot y$$

$$k_1 \cdot x \leq z + (1 - u) \cdot k_2 \qquad (30)$$

$$0 \leq z \leq k_2 \cdot y^{\max} \cdot u$$

式中, y^{max}为变量y的最大取值。采用上述变换方法, 可将本文提出的优化模型转化为0-1混合整数线性优 化模型,基于MATLAB软件中的Yalmip工具箱进行建 模,调用CPLEX软件得到全局最优解。

3 算例分析

3.1 算例设置

以西南某一商住裙楼作为楼宇式的能量枢纽规划 对象,规划目的在于通过确定设备种类和容量,在满 足功率能量平衡的前提下实现经济运营。该楼宇有公 寓200户(每户面积120 m²),同时有10 000 m²的写字 楼和5000 m²的酒店,采用集中供冷供暖方式,不考 虑传输过程中的能量损耗。该楼宇采取用能托管的 方式,能源运营商按照每m²固定单价向各个业主收 取年供冷取暖费用,同时保证按照图2的室内温度限 定提供冷热供应,在此前提下将供能优化运营作为收 益。通过场景聚类方法,将全年分成春秋季、夏季和 冬季3类典型工作日(春秋2季负荷与气温相似度高, 将其合并处理)。当地天然气价格2.7元/m³,热值取 9.7 kWh/m³。设备价格参数、分时购售电价格曲线及 典型季节的负荷曲线见附录A。

3.2 场景设置

首先对集中供冷供暖方式进行预评估。该地区 位于西南,光照条件较差,光伏发电寿命周期内的 度电成本超过1元,远不及电网购电和燃气发电经 济,故不予考虑。峰谷电价差为0.6元/kWh,按照寿 命周期内充放电次数2600次、电池储能综合建设成本 2000元/kWh计算,电储能同样不具备经济性。因此,从 综合成本最优的目标出发,设置以下3个场景进行分析。

场景1: 仅含三联供机组供能,满足冷热电负荷 需求;

场景2: 三联供机组+储热设备,储热设备用于热 负荷需求的削峰填谷;

场景3: 三联供机组+热泵,热泵用于满足余热锅 炉在热负荷峰值期间的不足出力。

3.3 结果分析

3种场景的优化配置结果和成本比较结果如表1和 表2所示。根据经济性设备选取原则,电储能、电制 冷机和燃气锅炉等经济性较差的设备不在配置结果 之内。

场景1燃气内燃机和余热锅炉的配置容量最高, 年成本最高,比场景3年总成本高23.88%。场景2加 入了储热设备且燃气内燃机和余热锅炉的安装容量较 大,安装成本最高,同时储能环节提高了夏季吸收式 制冷机吸收的最大热能,使其配置容量最高,比场景 3年总成本高22.08%。场景3加入热泵后,有效解决热 负荷峰值期间出力不足的问题,燃气内燃机和余热锅 炉的配置容量最低,年总成本最低。后续以最佳规划 结果(场景3)配置为案例进行结果分析。

图3为春秋季典型日的电功率平衡曲线,图中引 人分时购电电价分析燃气轮机工况及实时购电状态。 1~6时、23~24时为谷段电价,11~18时为平段电价, 7~10时、19~22时为峰段电价。在谷段电价和平段电 价时段,燃气发电成本高于电网购电成本,燃气内燃 机停止运行,系统向电网全额购电满足刚性电负荷需 求及维持用于热能供应的热泵运行;在峰值电价时 段,燃气内燃机高负荷率运行满足该区域内的电负荷 需求,电负荷过大时由电网购电进行补充。

	Table 1	Capacity	h scenario		
		配置功	执储能功率/容量		
场景	燃气 轮机	余热 锅炉	热泵	吸收式制 冷机	kW/kWh
场景1	1 354.4	3 656.8	0	1 595.1	0
场景2	1 299.5	3 508.7	0	1 714.6	1 822.6/3 645.2
场景3	936.7	2 529.1	871.7	1 579.3	0

表 1 各场景容量配置情况

表 2 各场景成本比较 Table 2 Cost comparison of each scenario

七早	成	ː本/(万元 ·a	-1)	总成本/
切京	安装	运维	能耗	(万元 ·a ⁻¹)
场景1	70.61	3.53	890.41	964.55
场景2	76.46	3.82	870.32	950.6
场景3	64	3.2	711.44	778.64



Fig. 3 Electric power balance in spring and autumn of scenario 3

图4为春秋季典型日的热功率平衡曲线,热负荷 (含刚性热负荷和维持体感舒适温度所需的空气调节 热负荷)由余热锅炉和热泵共同产生的热量予以平 衡。余热锅炉通过回收燃气轮机余热进行供热,与燃 气内燃机的启停工况一致。在峰值电价时段,余热锅 炉与燃气轮机共同运行供电、供热,此时热泵作为补 充供热源保持低负荷率运行(夜间峰段电价)甚至 停运(上午峰段电价);在平段电价和谷段电价时段 燃气内燃机和余热锅炉停止运行,由热泵单独供热满 足区域内的刚性热负荷及温度调节热负荷需求。在 10~17时之间,室外温度较高,维持室内温度的热能 需求较少;其他时刻室外温度较低,维持室内温度热 能需求较多,图4的趋势与室内室外热能交换原理相符合,室内温度维持在21.5 ℃~23 ℃之间,满足最佳体感温度。春秋季时段吸收式制冷机停机。



Fig. 4 Thermal power balance in spring and autumn of scenario 3

图5、图6为夏季典型日的电热功率平衡曲线,燃 气内燃机、余热锅炉、吸收式制冷机和热泵均投入运 行。吸收式制冷机作为热负荷消耗设备用于室内降 温,其热能消耗来自热泵和余热锅炉。在上午和夜间 的电价高峰时段,燃气内燃机开机发电运行,余热锅 炉满足刚性热负荷和吸收式制冷机冷却室温所需要的 热交换热能,热泵停止工作,不足功率由电网提供。 在平段和谷段电价时期,吸收式制冷机完全由热泵提 供换热,刚性热负荷也由热泵满足,热泵完全由电网 购电产生热量。吸收式制冷机在室外温度高的5~17时 之间接近额定功率运行,热能除了少量供应刚性热负 荷之外,其余全部用于制冷机制冷供用户调节室内温 度。吸收式制冷机在17时之后随外界环境温度降低, 其所需提供的冷负荷逐渐减小,按照以热定电原则, 夜间高峰时段燃气内燃机发电功率不及早间高峰电价 时段,而23时至早间5时外界温度适宜,室内无需空 气温度调节,室内温度全天均可维持在26 ℃~29 ℃ 之间。





图7、图8为冬季典型日的电热功率平衡曲线, 余热锅炉和热泵投入运行,冬季无需制冷降温,吸 收式制冷机不工作。同样,峰值电价阶段燃气轮机 开机发电,减少从电网购电的高价电量。由于冬季 供暖需求较大,燃气内燃机和余热锅炉在开机时均 接近额定功率运行。当用电功率超过燃气内燃机输 出电功率时,从电网购电满足电功率实时平衡;当 供热需求超过余热锅炉输出功率时,由热泵产生的 热量进行补充。在平价和谷段电价时段,热泵替代 余热锅炉持续供热,电负荷和热泵用电均来自电网。 冬季热负荷需求较高,热泵1~24时实时运行,在燃 气内燃机和余热锅炉工作时低载运行,将室内温度 维持在17℃~19℃之间。









Fig. 8 Thermal power balance in winter of scenario 3

3.4 敏感度分析

3.4.1 价格敏感度分析

天然气价格是影响优化配置结果的重要因素之一,下面探讨安装容量及年总成本对气价的敏感度, 图9为场景3三联供+热泵设备的安装容量与年成本随 气价的变化趋势。年总成本与气价正相关,随着气价 升高,年总成本增长率减小,气价从2.4元/m³增长至 2.7元/m³,年总成本的增长率为5.49%,气价从2.7元/m³ 增长至3.0元/m³,年总成本的增长率仅为3.34%。燃 气价格下降至2.4元/m³以下时,在平段电价时期燃气 发电比从电网购电更经济,燃气内燃机和余热锅炉 配置容量和运行时间增加,年总成本也呈快速下降 趋势。



燃气内燃机与余热锅炉的变化趋势基本一致,当 气价升高时,燃气内燃机发电成本增加,经济性变 差,配置容量越来越小。热泵与燃气内燃机和余热锅 炉趋势相反,由于热功率平衡限制,余热锅炉安装容 量减小,额定热功率减少,热泵热功率需要增大,以 达到系统热功率平衡。吸收式制冷机的安装容量随气 价上升先略微减小,后保持不变,在气价在2.4元/m³ 之后稳定在1546 kW。

3.4.2 峰谷电价差敏感度分析

为探究峰谷电价差对容量配置和年总成本的影响,设 定3个场景讨论分析。3个场景的平段电价都为0.66元kWh, 场景1无峰谷电价差,场景2谷电0.165元/kWh、峰段电 价1.155元/kWh,场景3为3.1节的实际电价场景。优 化配置结果如图10所示,场景1电价稳定在平段电价, 从电网购电更为经济,只需要配置热泵和吸收式制冷 机保障热冷功率平衡,但该场景总成本最高。场景2 峰谷电价差较大,峰段电价期间联供机组发电满足 供电需求更加经济,谷段电价期间向电网购电更为经 济。值得注意的是,为满足系统中冷、热功率需求, 谷段电价的低电价蓄热加储热成为最经济的实现方式。 因此场景2配置设备种类最多,热泵和余热锅炉设备容 量也更大,但充分利用低谷段电价使总成本最低。尽 管峰谷电价差达到电池储能也具有经济效益的程度, 但储热凭借更低廉的成本成为最优方案。



3.4.3 热电比敏感度分析

当机组的输出热电比变化时,其设备配置容量及 年总成本结果如图11所示。



一般热电机组的热电比在2.5~3之间,本文热电 比研究范围为λ_{her}=2~3。根据图11,当热电比增大时, 总成本持续下降,λ_{her}=3时总成本比λ_{her}=2.1时降低 3.72%。热电比由燃气内燃机发电效率和余热锅炉余 热回收效率共同决定,不可能无限制增大以达到经济 性最佳的容量配置。当热电比逐渐增大时,燃气热电 机组的热能输出增加,由图11可知燃气内燃机配置容 量基本不变,而余热锅炉需要增大容量以适应热电比 增大引起的热能输出量的增加。热负荷需求不变的情 况下,热泵的热能输出减少,配置容量略微降低。制 冷机仅与夏季冷负荷需求有关,冷负荷不变时,制冷 机的配置容量不随热电比变化。

4 结论

本文基于以室内活动为主导的楼宇式建筑群,提 出一种在考虑人体温度舒适度的情况下,以经济性为 优化目标的楼宇能量枢纽配置方法。通过算例分析得 出以下结论。

 1)能量枢纽应充分发挥各类能源转换设备的互补功能,如燃气发电与电网购电的互补、余热锅炉与 热泵的互补等,实现经济性最佳。

2)楼宇型燃机三联供容量的设计不宜按照最大 热负荷确定余热锅炉容量再以热定电的原则确定,而 应以开机运行负载率尽量高、输出电能被楼宇就地消 纳不上网为目标。

3)热泵可极大改善热电机组在输出热电比上的限制,达到热负荷削峰填谷的作用,降低三联供的配置容量,减少能量枢纽规划配置成本。

4) 气价、峰谷电价差和燃气内燃机热电比是年运行总成本的重要影响因素,气价越低、热电比越高,年总运行成本越低;更大的峰谷电价差有利于降低总运行成本,且储热比电池储能更具有经济性。

5)基于PMV指标的楼宇式能量枢纽将电制冷模 式下对电功率的需求转化成热制冷模式下对热功率的 需求,伴随燃气三联供的作用可以较大程度上减少对 电网峰值电购电的依赖,并起到削峰填谷的作用。

参考文献

- [1] 国家发展改革委,国家能源局,工业和信息化部.关于推进"互联网+"智慧能源发展的指导意见[J].城市燃气,2016(4):4-9.
- [2] 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(in Chinese).
- [3] 钟永洁,孙永辉,谢东亮,等.含电-热-气-冷子系统的 区域综合能源系统多场景优化调度[J].电力系统自动化, 2019,43(12):76-96.
 ZHONG Yongjie, SUN Yonghui, XIE Dongliang, et al. Multiscenario optimal dispatch of regional integrated energy system with power-heating-gas-cooling subsystems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12):76-96(in Chinese).
- [4] 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(in Chinese).

- [5] 黄武靖,张宁,董瑞彪,等. 多能源网络与能量枢纽联合规 划方法[J].中国电机工程学报,2018,38(18):5425-5437. HUANG Wujing, ZHANG Ning, DONG Ruibiao, et al. Coordinated planning of multiple energy networks and energy hubs[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5425-5437(in Chinese).
- [6] 蒋超凡,艾欣.面向工业园区的综合能源系统协同规划方 法研究综述[J].全球能源互联网,2019(3):255-265. JIANG Chaofan, AI Xin. Review on integrated energy system collaborative planning methods for industrial Parks[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019(3):255-265(in Chinese).
- [7] 刘迪,吴俊勇,林凯骏,等. 基于Kriging模型的综合能源 系统规划方法[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 185-194.
 LIU Di, WU Junyong, LIN Kaijun, et al. A planning method of integrated energy system based on kriging model[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 185-194(in Chinese).
- [8] SHEIKHI A, RAYATI M, RANJBAR A M. Energy Hub optimal sizing in the smart grid; machine learning approach[C]//2015 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), February 18-20, 2015. Washington, DC, USA. IEEE, 2015: 1-5.
- [9] 权超,董晓峰,姜彤.基于CCHP耦合的电力、天然气区域综合能源系统优化规划[J].电网技术,2018,42(8):2456-2466. QUAN Chao, DONG Xiaofeng, JIANG Tong. Optimization planning of integrated electricity-gas community energy system based on coupled CCHP[J]. Power System Technology, 2018,42(8):2456-2466(in Chinese).
- [10] 马溪原,郭晓斌,雷金勇.面向多能互补的分布式光伏与 气电混合容量规划方法[J].电力系统自动化,2018,42(4): 55-63.

MA Xiyuan, GUO Xiaobin, LEI Jinyong. Capacity planning method of distributed PV and P2G in multi-energy coupled system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 55-63(in Chinese).

- [11] 吴聪,唐巍,白牧可,等.基于能源路由器的用户侧能源 互联网规划[J].电力系统自动化,2017,41(4):20-28.
 WU Cong, TANG Wei, BAI Muke, et al. Energy router based planning of energy Internet at user side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 20-28(in Chinese).
- [12] 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.
- [13] 赵峰,张承慧,孙波,等. 冷热电联供系统的三级协同整体优化设计方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(15): 3785-3793.
 ZHAO Feng, ZHANG Chenghui, SUN Bo, et al. Three-stage

collaborative global optimization design method of combined cooling heating and power[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3785-3793(in Chinese).

- [14] SALIMI M, ADELPOUR M, VAEZ-ZADEH S, et al. 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.
- [15] 丁勇花, 狄育慧, 王智鹏. 热舒适模型与热适应模型的对 比分析[J]. 低温建筑技术, 2015, 37(4): 149-152.
- [16] 林俐,顾嘉,王铃.面向风电消纳的考虑热网特性及热 舒适度弹性的电热联合优化调度[J].电网技术,2019, 43(10): 3648-3661.
 LIN Li, GU Jia, WANG Ling. Optimal dispatching of combined heat-power system considering characteristics of thermal network and thermal comfort elasticity for wind power accommodation[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3648-3661(in Chinese).
- [17] 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]. Construction Conserves Energy, 2007, 35(3):11-16(in Chinese).
- [18] 崔鹏程, 史俊祎, 文福拴, 等. 计及综合需求侧响应的能量 枢纽优化配置[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 101-109. CUI Pengcheng, SHI Junyi, WEN Fushuan, et al. Optimal energy hub configuration considering integrated demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 101-109(in Chinese).
- [19] 李伟,张宏图,王群锋,等.吉林省风电规律特性及减少 弃风政策建议研究[J].可再生能源,2013,31(2):123-126. LI Wei, ZHANG Hongtu, WANG Qunfeng, et al. Characteristics of wind power in Jilin Province and the study of wind curtailment reduction policy recommendations[J]. Renewable Energy Resources, 2013, 31(2): 123-126(in Chinese).
- [20] 崔鹏程. 计及综合需求侧响应的能量枢纽优化配置和综合 效益评估[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.

收稿日期:2019-10-10;修回日期:2019-12-11。

作者简介:

范成围(1989),男,工程师, 博士,主要研究方向为电力系统安全 稳定分析。

雷一(1985),男,高级工程师, 博士,主要研究方向为综合能源规划 及智能电网技术。通信作者,E-mail: leiyi@tsinghua-eiri.org。

(责任编辑 张宇)



附录A 算例基础参数

表 A1 设备经济性参数

 Table A1
 Economic parameters of equipment

			1					
设备s	简称	平均 寿命/a	最小 负荷率	最大 负荷率	单位安装 容量成本/元	电效率	热效率	性能系数
燃气内燃机	MT	30	0.2	1	6000	0.25	_	_
余热锅炉	WH	20	0	1	125	_	0.9	—
燃气锅炉	GB	15	0	1	340	_	0.93	_
热泵	HP	10	0	1	971	_	—	4.5
吸收式制冷机	AC	20	0	1	1100	_	—	0.85
电制冷机	EC	20	0	1	3000	_	—	0.95
电储能	ES	10	0.2	0.8	2000	0.95	—	0.2
热储能	HS	10	0.1	0.9	150		0.9	0.2

(注:储能性能系数为充放能倍率,储能充放能效率相等。)

表 A2 室内温度约束参数

Tau	ne A2	muoor	temperature	constraints	
			4		

类别	参数	数值
	Cl_1	$0.155 \text{ m}^2 \cdot ^\circ \text{C/W}$
PMV指标	Cl_2	$0.067 \text{ m}^2 \cdot ^\circ \text{C/W}$
参数	Cl_3	$0.251 \text{ m}^2 \cdot ^\circ \text{C/W}$
	М	58.2 W/m ²
建筑物	R	1.5 °C/kW
参数	С	5.44 kWh/°C



图 A1 购售电价格曲线







(b) 夏季典型日刚性电热负荷与室外温度



图 A2 典型日刚性电热负荷与室外温度

