

考虑功能区差异性和虚拟储能的综合能源系统 多元储能规划

代琮丹¹, 杨莉¹, 林振智¹, 兰洲², 王耀雷³, 刘钊³

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江杭州 310027; 2. 国网浙江省电力有限公司经济技术研究院, 浙江杭州 310000;
3. 国网山东省电力有限公司经济技术研究院, 山东济南 250000)

摘要:综合能源系统实现了冷、热、电等多种能源形式的横向互补以及“源-网-荷-储”多个环节的纵向协调。基于区域综合能源系统功能区内冷热产消就地平衡,以及电作为功能区间能量枢纽的特点,分析了典型功能区“源-网-荷-储”的差异特性,包括电动汽车(EV)的时空特征、用户冷热需求的柔性和供热系统的热惯性等;考虑了EV负荷、冷热负荷和供热系统的虚拟储能特性,建立了计及功能区间能量交换能力、储能设备成本等差异的区域综合能源系统实体储能(设备)规划模型;以某一包含居民区、办公区、商业区和工业区的新区综合能源系统为例进行算例分析,结果表明考虑了虚拟储能的多功能区综合能源系统优化调度为整个系统带来了更多的弹性和联网效益,有效减少了消纳可再生能源所需的实体储能配置容量。

关键词:综合能源系统;功能区;差异性;虚拟储能;实体储能

中图分类号:TM 715

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202107009

0 引言

综合能源系统指通过对多种能源的生产、传输与分配、存储、消费等环节优化协调形成的产供销一体化系统^[1]。综合能源系统的“综合”侧重体现在提供不同品类能源的服务,包括冷、热、电、气等。合理配置储能是提高综合能源系统能效的关键,储热储冷设备由于体量大、效率高、成本低,在示范工程中得到广泛关注,例如:国网客服中心北方园区综合能源服务项目的储热式电锅炉EB(Electric Boiler)和冰蓄冷空调,雄安新区多能服务示范项目的电蓄热供暖,湖北鄂州机场多能服务示范项目的蓄热蓄冷,江苏同里综合能源服务中心的高温相变储热,银川经开区综合能源园区的固体高温储热等。蓄电池、储热罐和蓄冷罐等冷热电实体储能的优化配置和协调运行,提升了综合能源系统中多能互补的盈利空间^[2-3]。

事实上,综合能源系统中除了冷热电实体储能设备之外,电动汽车EV(Electric Vehicle)的移动储能特性^[4]、冷热负荷的二维可控性和供热系统的热惯性^[5]也可通过对冷热电时空转移或变换能量形

式优化平衡系统在不同时段、不同区域的多种能量,达到储能的效果,降低系统对蓄电池、储热罐和蓄冷罐等冷热电实体储能容量的要求。这种利用蓄电池、储热罐和蓄冷罐等实体储能之外的现存设备或调度策略平衡电力系统能量的思想称为虚拟储能^[6]。例如:文献[7]利用EV的移动储能特性,提出EV与电网的双向互动调度模型以合理消纳可再生能源,平抑负荷波动;文献[8]基于EV出行链特征量(出行时刻、行驶时间、行驶里程、出行目的)的概率分布,模拟出EV用户的移动充电需求具有时空分布特性;文献[9]基于办公楼宇的蓄热特性和温度舒适度构建了热负荷虚拟储能模型,通过在温度舒适度范围内优化调节室温,提升了综合能源系统的能效;文献[10]基于空调负荷热力学和人体热舒适度模型,将建筑物冷热负荷等效为一种虚拟储能,在人体舒适度范围内优化调节室温以实现多能平衡;文献[11]充分利用楼宇的蓄热特性,将楼宇虚拟储能系统作为灵活可控单元集成到楼宇微网中,挖掘楼宇参与微网优化调控的虚拟储能潜力,降低了运行成本;文献[12]基于供热系统的时延和储热等动态特性,提出热能运输准动态模型,分析供热系统的虚拟储能潜力;文献[13]建立考虑供热管道传输时延和热损失等热动态特性以及用户柔性热需求的供热系统虚拟储能模型。

目前,综合能源系统的储能配置研究对象多为单一功能区,例如商住区^[2]、工业区^[3]、办公区^[9]等,示范项目也多集中在单一功能园区,没有挖掘多功能区差异性带来的时空互补潜力。实际上,综合能源系统按规模可分为建筑物级、区域级和跨区级综

收稿日期:2020-09-29;修回日期:2021-05-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0900100);国家自然科学基金资助项目(51777185);国网浙江省电力有限公司科技项目(5211JY19000T)

Project supported by the National Key R&D Program of China(2016YFB0900100),the National Natural Science Foundation of China(51777185) and the Science and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Co.,Ltd.(5211JY19000T)

合能源系统^[14]。考虑多个功能区多种能源的供需差异性,有利于提高区域综合能源系统的经济效益。例如:文献[15]以互联网思维为导向,基于产能、用能行为的时空互补性,提出考虑住宅、办公、商业等各类区域的空间布局以及电热多能源流动态需求的电-热区域分布式能源互联网模型;文献[16]利用EV在居民区、工商业区等功能区停车行为的时空互补性,从整体描述了EV的移动储能特性;文献[17]利用功能区间多能负荷的互补特性,通过热网将居民区、商业区和工业区等功能区相联,实现多功能区在区域综合能源系统的联网运行。

基于以上分析,本文考虑不同类型功能区冷热电“源-网-荷-储”的差异性及时空互补特性,提出利用EV的时空分布特征、温度负荷的柔性以及供热系统的热惯性,优化EV充放电、室温、冷库温度等,构建考虑多功能区“源-网-荷-储”差异性和实体-虚拟储能协调运行的区域综合能源系统多元实体储能设备规划模型。算例分析采用某包含居民区、办公区、商业区和工业区的综合能源示范区基础数据,得到的多元储能设备配置方案显示考虑多功能区虚拟储能的优化调度可以有效提升区域综合能源系统的经济效益,减少消纳可再生能源所需的实体储能配置容量。

1 典型功能区综合能源系统的供能、用能与储能特性

依据GB 50137—2011《城市用地分类与规划建

设用地标准》,城市用地可划分为居民区、办公区、商业区和工业区等功能区。图1为某一区域综合能源系统示意图,其中能源有风电机组WT(Wind Turbine)、光伏PV(Photo Voltaic)和热电联产CHP(Combined Heating and Power)机组;负荷有冷、热、电负荷;网络有电力网、供热网、供冷网和含EV的交通网;储能有电储能ES(Electric Storage)、热储能TS(Thermal Storage)和冷储能CS(Cold Storage);另外电锅炉、热泵HP(Heat Pump)、吸收式制冷机AC(Absorption Chiller)和电制冷机EC(Electric Chiller)为冷热电多能源间的转换设备。

1.1 典型功能区的供能、用能特点

居民区、办公区、商业区和工业区等典型功能区的供能用能具有差异性。以典型功能区冷热负荷为例,居民区供冷多采用独立户式空调,空调冷指标为 80 W/m^2 ,采暖热指标为 40 W/m^2 ;办公区采用风机盘管加新风系统,空调冷指标为 90 W/m^2 ,采暖热指标为 55 W/m^2 ;商业区采用全空气变风量系统,冷负荷受新风、灯光、设备、人员等因素影响较大,受围护结构影响相对较小,空调冷指标为 125 W/m^2 ,采暖热指标为 60 W/m^2 ^[18],冷库温度常要求处于某一区间,例如保鲜库为 $-5\sim 5\text{ }^\circ\text{C}$,冷藏库为 $-18\sim -10\text{ }^\circ\text{C}$,冷冻库为 $-23\sim -20\text{ }^\circ\text{C}$ 等^[19];工业区热负荷包含生产和非生产热负荷,其中生产热负荷可能存在间断点,多为全年性。表1展示了典型功能区典型日冷热电供能、用能差异性。

由于传输特性不同,电能可以远距离传输,而供

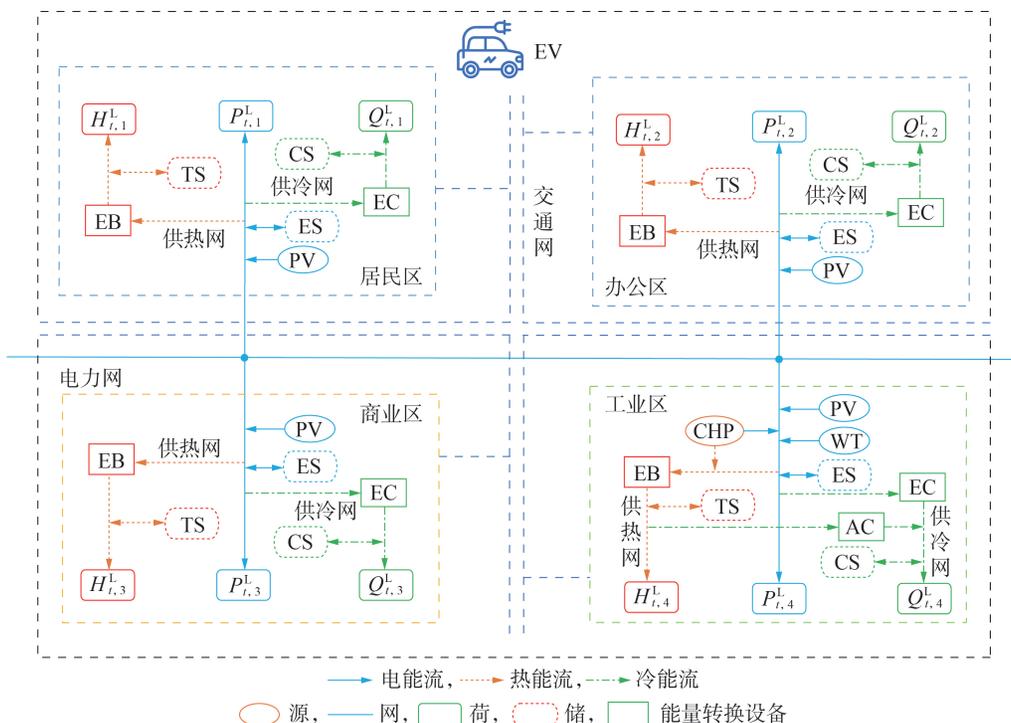


图1 含多功能区的区域综合能源系统

Fig.1 Regional integrated energy system with multiple functional areas

表1 典型功能区典型日供能、用能差异性特点

Table 1 Typical daily energy production and consumption characteristics of typical functional areas

功能区	人员密度 / (m ² ·人 ⁻¹)	供能特性			用能特性(负荷密度 / (W·m ⁻²))			
		主要供冷热时段	供电方式	供热方式	供冷方式	电负荷	热负荷	冷负荷
居民区	20~40	不定	PV	集中:EB、HP;独立:EB	独立:EC	40~60	10~20	10~20
办公区	5~20	09:00—18:00	PV	集中/独立:EB、HP	集中/独立:EC	15~35	30~50	50~70
商业区	1.25~2.5	10:00—22:00	PV	集中:EB、HP	集中:EC	90~150	60~80	120~180
工业区	1~5	全天	PV、WT、CHP	集中:CHP、EB	集中:EC、AC	75~300	70~120	100~150

热有效距离为5~8 km,供冷有效距离仅为1 km。本文考虑到城市功能区面积,假设区域综合能源系统各功能区内部冷热负荷就地平衡,功能区间以电能形式进行能量交换。

与电负荷类似,冷热负荷也可参与需求响应,特别是与人体舒适度有关的冷热负荷。人体对温度感知具有模糊性,舒适室温是一个区间,冷热负荷具有柔性,适合纳入需求侧管理,但不同功能区的冷热负荷特性有差异:居民区采用分布式空调供热供冷比例高,集中控制难度大,可控负荷比例小;办公区和商业区多采用中央空调,需求响应特性好;工业区负荷量大、自动化程度高,有相当比例的冷热负荷可控。假设居民区、办公区、商业区和工业区编号 r 分别为1—4,功能区 r 的热、冷负荷可控系数分别为 α_r 和 β_r ,则时段 t 功能区 r 中用户的热负荷 $H_{t,r}^L$ 和冷负荷 $Q_{t,r}^L$ 可分别表示为:

$$H_{t,r}^L = \alpha_r H_{t,r}^{L,c} + (1 - \alpha_r) H_{t,r}^{L,n} = H_{t,r}^{L,c} + H_{t,r}^{L,n} \quad (1)$$

$$Q_{t,r}^L = \beta_r Q_{t,r}^{L,c} + (1 - \beta_r) Q_{t,r}^{L,n} = Q_{t,r}^{L,c} + Q_{t,r}^{L,n} \quad (2)$$

式中: $H_{t,r}^{L,c}$ 、 $H_{t,r}^{L,n}$ 和 $Q_{t,r}^{L,c}$ 、 $Q_{t,r}^{L,n}$ 分别为时段 t 功能区 r 中可控、不可控的热负荷和冷负荷。

1.2 典型功能区的储能特点

1.2.1 典型功能区的冷热电实体储能

本文假设采用铅蓄电池、储热罐和蓄冷罐分别作为存储电、热、冷的实体设备,编号 x 分别为1—3,3种实体储能模型具有相似的运行特征,如充放电过程存在损耗等,时段 t 功能区 r 中实体储能 x 的存储能量 $E_{t,r,x}$ 与充、放功率 $P_{t,r,x}^{ch}$ 、 $P_{t,r,x}^{dis}$ 间的关系为:

$$E_{t,r,x} = (1 - k_x) E_{t-\Delta t,r,x} + \eta_x^{ch} P_{t,r,x}^{ch} \Delta t - \frac{P_{t,r,x}^{dis} \Delta t}{\eta_x^{dis}} \quad (3)$$

式中: k_x 为实体储能 x 的自损系数; Δt 为调度时间间隔; η_x^{ch} 和 η_x^{dis} 分别为实体储能 x 的充、放效率。

1.2.2 典型功能区的冷热电虚拟储能

EV、冷热负荷和供热系统都是可时空转移能量的虚拟储能。

1) EV 移动储能。

EV具有源、荷双重属性,既可从电网充电,也可向电网售电,相当于一个具有移动特性的分布式储能装置^[20]。不考虑EV驶入、驶出区域,将区域内EV整体等效为一个可分解、可移动的储能装置。假设运行时段数量为 T ,功能区个数为 R ,定义EV的时空

分布矩阵为一个 $T \times R$ 维矩阵 p^{EV} ,其中元素 $p_{t,r}^{EV}$ 为时段 t EV处于功能区 r 的概率,则:

$$\sum_{r=1}^R p_{t,r}^{EV} = 1 \quad (4)$$

作为移动储能,EV具有与一般实体储能(式(3))类似的特性。时段 $t - \Delta t$ 区域EV总电量为 $\sum_{r=1}^R E_{t-\Delta t,r}^{EV}$,功能区 r 中的EV在时段 t 的充放电功率/电量按照此时EV在功能区 r 的概率 $p_{t,r}^{EV}$ 重新分解时段 $t - \Delta t$ 区域EV总电量,得到时段 t 区域EV在功能区 r 的初始电量,即 $p_{t,r}^{EV} \sum_{r=1}^R E_{t-\Delta t,r}^{EV}$ 。考虑EV在区域内时空分布特性的移动储能模型为:

$$E_{t,r}^{EV} = p_{t,r}^{EV} \sum_{r=1}^R E_{t-\Delta t,r}^{EV} + \eta^{EV, ch} P_{t,r}^{EV, ch} \Delta t - \frac{P_{t,r}^{EV, dis} \Delta t}{\eta^{EV, dis}} \quad (5)$$

式中: $\eta^{EV, ch}$ 、 $\eta^{EV, dis}$ 分别为EV充、放电效率; $P_{t,r}^{EV, ch}$ 和 $P_{t,r}^{EV, dis}$ 分别为时段 t 功能区 r 中EV的充、放电功率。式(5)表征了各时段EV移动储能的电量状态具有耦合特性和移动特性:时段 t 功能区 r 中EV的电量 $E_{t,r}^{EV}$ 与时段 $t - \Delta t$ 功能区 r 中EV的充放电特性相关,与时段 t 功能区 r 中EV的分布特性相关。

EV必须处于功能区 r 才会有充、放电功率和电量 $P_{t,r}^{EV, ch}$ 、 $P_{t,r}^{EV, dis}$ 和 $E_{t,r}^{EV}$,即:

$$P_{t,r}^{EV} P^{EV, min} \leq P_{t,r}^{EV, ch} \leq P_{t,r}^{EV} P^{EV, max} \quad (6)$$

$$P_{t,r}^{EV} P^{EV, min} \leq P_{t,r}^{EV, dis} \leq P_{t,r}^{EV} P^{EV, max} \quad (7)$$

$$P_{t,r}^{EV} E^{EV, min} \leq E_{t,r}^{EV} \leq P_{t,r}^{EV} E^{EV, max} \quad (8)$$

式中: $P^{EV, max}$ 、 $P^{EV, min}$ 和 $E^{EV, max}$ 、 $E^{EV, min}$ 分别为整个区域EV的充放电功率和电量上、下限。式(6)—(8)表示EV在时段 t 的充放电功率/电量受限于所在功能区可调度的功率/电量范围,此范围由EV的时空分布情况决定。

2) 冷热负荷。

人体对温度感知具有模糊性,冷热负荷需求为一个区间值。用户对热环境质量的要求一般用热舒适度表征,热舒适度有许多评价指标,其中热感觉平均标度预测PMV(Predicted Mean Vote)指标是最常用的一种指标。时段 t 功能区 r 的PMV值 $\lambda_{t,r}^{PMV}$ 为:

$$\lambda_{t,r}^{PMV} = b_r T_{t,r}^n + c_r P_{t,r} - d_r \quad (9)$$

式中: $T_{t,r}^n$ 为时段 t 功能区 r 的室温; $P_{t,r}$ 为时段 t 功能区 r 的相对湿度; b_r 、 c_r 和 d_r 为功能区 r 的系数,由调查

统计数据拟合得到。

冷负荷具备一定的“储能”能力,其温度动态特性可用等值热参数ETP(Equivalent Thermal Parameter)模型描述:

$$T_{t,r}^n = T_{t,r}^w - Q_{t,r}^C R_r - (T_{t,r}^w - Q_{t,r}^C R_r - T_{t-\Delta t,r}^n) e^{-\frac{\Delta t}{R_r C_r}} \quad (10)$$

式中: $Q_{t,r}^C$ 和 $T_{t,r}^w$ 分别为时段 t 功能区 r 的制冷机总出力 and 室外温度; R_r 、 C_r 分别为功能区 r 中建筑物室内等效热阻和等效热容。

3) 供热系统。

由于供热系统本身有一定的热容量,且系统传热介质具有一定的导热能力,所以当系统被加热或冷却时,系统温度上升或下降往往需要经过一定时间,这种性质称为系统的热惯性。热惯性越大,意味着供热系统温度量在更多时段内存在耦合关系。考虑热惯性的供热系统可用自回归滑动平均时间序列ARMA(Auto-Regressive and Moving Average)模型描述如下:

$$T_{t,r}^h = \sum_{j=0}^{J_r} \mu_j T_{t-j,r}^n + \sum_{j=0}^{J_r} \delta_j T_{t-j,r}^g + \sum_{j=0}^{J_r} \lambda_j T_{t-j,r}^w \quad (11)$$

$$T_{t,r}^n = \sum_{j=0}^{J_r} \theta_j T_{t-j,r}^n + \sum_{j=0}^{J_r} \phi_j T_{t-j,r}^g + \sum_{j=0}^{J_r} \omega_j T_{t-j,r}^w \quad (12)$$

式中: $T_{t,r}^g$ 和 $T_{t,r}^h$ 分别为时段 t 功能区 r 的热网供水温度和热网回水温度; μ_j 、 δ_j 、 λ_j 、 θ_j 、 ϕ_j 和 ω_j 为供热系统的热惯性物理参数,可通过实测数据进行参数辨识得到; J_r 为热惯性系数,其值的大小体现了功能区 r 供热系统的热惯性, J_r 越大,说明供热系统温度量在更多时段内存在耦合关系,即越关注之前时段供热系统的情况。

类似于可调节电负荷,供热系统对工业区产生的供热量 $H_{t,r}^G$ 波动须在一定范围内,为不失一般性,假设时段 T' 内热负荷需求总量不变,即:

$$g_1 H_{t,4}^{cl} \leq H_{t,4}^G \leq g_2 H_{t,4}^{cl} \quad (13)$$

$$\sum_t^{t+T'} H_{t,4}^G = \sum_t^{t+T'} H_{t,4}^{cl} \quad (14)$$

式中: g_1 和 g_2 分别为供热调整范围的下限和上限系数; T' 越大表示供热可在越长的时间尺度上进行调整, $T'=1$ 时表示各时段完全按用户要求供热。

2 考虑虚拟储能的含差异化功能区区域综合能源系统实体储能规划模型

2.1 目标函数

本文采用场景分析法描述风电、光伏出力的不确定性,假设规划年限为 N 年,典型日天数为 D ,时间间隔 $\Delta t=1$ h。典型日 d 出现的概率为 p_d ,该典型日风电、光伏出力由 S_d 个风光典型场景描述,其中场景 s_d 的概率为 $p'_{d,s}$ 。目标函数为区域综合能源系统的实

体储能总投资成本 C_{inv} 和运行成本 C_{ope} 之和最小,即:

$$\min(C_{inv} + C_{ope}) \quad (15)$$

$$C_{inv} = \sum_{r=1}^R \sum_{n=1}^N \sum_{x=1}^3 R_{n,x} m_{r,x} W_{n,r,x} \quad (16)$$

式中: $R_{n,x}$ 为第 n 年实体储能 x 的资金时间折算系数,具体表达式见附录A式(A1); $m_{r,x}$ 为功能区 r 实体储能 x 的单位容量成本,考虑到地段差异性, $m_{r,x}$ 可以不同; $W_{n,r,x}$ 为第 n 年功能区 r 实体储能 x 的规划容量。

运行成本 C_{ope} 包括各功能区CHP机组发电成本、偏离计划出力惩罚成本、购电成本和弃风弃光惩罚成本,如式(17)所示。

$$C_{ope} = 365 \sum_{d=1}^D p_d \sum_{s_d=1}^{S_d} \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^R p'_{d,s,t,r} \left[c^{CHP} (P_{d,s_d,t,r}^{CHP} (P_{d,s_d,t,r}^{CHP}, H_{d,s_d,t,r}^{CHP}) + \rho_1 \left| P_{d,s_d,t,r}^{CHP} - P_{d,s_d,t,r}^{CHP,0} \right| + \varphi P_{d,s_d,t,r}^{buy} + \rho_2 P_{d,s_d,t,r}^{cut} \right] \quad (17)$$

式中: c^{CHP} 为CHP机组的发电成本,具体表达式见附录A式(A2); $P_{d,s_d,t,r}^{CHP}$ 、 $P_{d,s_d,t,r}^{CHP,0}$ 、 $H_{d,s_d,t,r}^{CHP}$ 、 $P_{d,s_d,t,r}^{buy}$ 和 $P_{d,s_d,t,r}^{cut}$ 分别为典型日 d 场景 s_d 下时段 t 功能区 r 中CHP机组的电出力、计划电出力、热出力、购电功率和弃风弃光功率, $P_{d,s_d,t,r}^{cut}$ 的具体表达式见附录A式(A3); φ 、 ρ_1 和 ρ_2 分别为购电成本、CHP机组偏离计划出力和弃风弃光的单位惩罚价格。

2.2 约束条件

1) 功率平衡约束。

电能作为多功能区的能量枢纽,不同功能区之间通过联络线交互电能。

$$\sum_{r=1}^R (P_{d,s_d,t,r}^{CHP} + P_{d,s_d,t,r}^{buy} + P_{d,s_d,t,r}^{PV} + P_{d,s_d,t,r}^{WT} + P_{d,s_d,t,r}^{dis} + P_{d,s_d,t,r}^{EV,dis}) = \sum_{r=1}^R (P_{d,s_d,t,r}^L + P_{d,s_d,t,r}^{EB} + P_{d,s_d,t,r}^{HP} + P_{d,s_d,t,r}^{ch} + P_{d,s_d,t,r}^{EV,ch} + P_{d,s_d,t,r}^{EC}) \quad (18)$$

$$-P_l^{tie,max} \leq P_{d,s_d,t,l}^{tie} \leq P_l^{tie,max} \quad (19)$$

式中: $P_{d,s_d,t,r}^{PV}$ 、 $P_{d,s_d,t,r}^{WT}$ 、 $P_{d,s_d,t,r}^L$ 、 $P_{d,s_d,t,r}^{EB}$ 、 $P_{d,s_d,t,r}^{HP}$ 和 $P_{d,s_d,t,r}^{EC}$ 分别为典型日 d 场景 s_d 下时段 t 功能区 r 中光伏、风电、用户、电锅炉、热泵和电制冷机的电功率, $P_{d,s_d,t,r}^{ch}$ 、 $P_{d,s_d,t,r}^{dis}$ 和 $P_{d,s_d,t,r}^{EV,ch}$ 、 $P_{d,s_d,t,r}^{EV,dis}$ 以及 $P_{d,s_d,t,l}^{tie}$ 分别为典型日 d 场景 s_d 下时段 t 功能区 r 中电储能和EV的充、放电功率以及功能区间联络线 l 的传输功率,以上变量和 $P_{d,s_d,t,r}^{CHP}$ 、 $P_{d,s_d,t,r}^{buy}$ 均为运行决策变量; $P_l^{tie,max}$ 为功能区间联络线 l 的传输功率上限,考虑联络线的功能区内电功率也是平衡的。

由于冷热传输有距离限制,需满足功能区内部就地平衡。功能区供用能设备配置具有差异性,居民区、办公区和商业区的供热来源有电锅炉、热泵和储热罐,供冷来源有电制冷机和蓄冷罐。

$$H_{d,s_d,t,r}^{EB} + H_{d,s_d,t,r}^{HP} + P_{d,s_d,t,r,2}^{dis} = H_{d,s_d,t,r}^L + P_{d,s_d,t,r,2}^{ch} \quad (20)$$

$$Q_{d,s_d,t,r}^{EC} + P_{d,s_d,t,r,3}^{dis} = Q_{d,s_d,t,r}^L + P_{d,s_d,t,r,3}^{ch} \quad (21)$$

式中： $H_{d,s_d,t,r}^{EB}$ 、 $H_{d,s_d,t,r}^{HP}$ 、 $Q_{d,s_d,t,r}^{EC}$ 和 $H_{d,s_d,t,r}^L$ 、 $Q_{d,s_d,t,r}^L$ 分别为典型日 d 场景 s_d 下时段 t 功能区 r 中电锅炉、热泵、电制冷机的出力和用户的热、冷负荷。

除以上冷热来源,工业区的供热来源还包括 CHP 机组,供冷来源还包括吸收式制冷机。

$$H_{d,s_d,t,4}^{CHP} + H_{d,s_d,t,4}^{EB} + P_{d,s_d,t,4,2}^{dis} = H_{d,s_d,t,4}^L + H_{d,s_d,t,4}^{AC} + P_{d,s_d,t,4,2}^{ch} \quad (22)$$

$$Q_{d,s_d,t,4}^{EC} + Q_{d,s_d,t,4}^{AC} + P_{d,s_d,t,4,3}^{dis} = Q_{d,s_d,t,4}^L + P_{d,s_d,t,4,3}^{ch} \quad (23)$$

式中： $H_{d,s_d,t,4}^{AC}$ 、 $Q_{d,s_d,t,4}^{AC}$ 为典型日 d 场景 s_d 下时段 t 工业区吸收式制冷机的热、冷功率； $P_{d,s_d,t,4,2}^{ch}$ 、 $P_{d,s_d,t,4,2}^{dis}$ 和 $P_{d,s_d,t,4,3}^{ch}$ 、 $P_{d,s_d,t,4,3}^{dis}$ 分别为典型日 d 场景 s_d 下时段 t 工业区热储能和冷储能的充、放功率。

2) 实体储能约束。

充放状态约束、充放功率约束、储能容量约束和能量守恒约束分别为：

$$0 \leq x_{d,s_d,t,r,x}^{dis} + x_{d,s_d,t,r,x}^{ch} \leq 1 \quad (24)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{d,s_d,t,r,x}^{ch} \leq x_{d,s_d,t,r,x}^{ch} P_{r,x}^{max} \\ 0 \leq P_{d,s_d,t,r,x}^{dis} \leq x_{d,s_d,t,r,x}^{dis} P_{r,x}^{max} \end{cases} \quad (25)$$

$$\alpha_x^{min} \sum_{n=1}^N W_{n,r,x} \leq E_{d,s_d,t,r,x} \leq \alpha_x^{max} \sum_{n=1}^N W_{n,r,x} \quad (26)$$

$$E_{d,s_d,0,r,x} = E_{d,s_d,T,r,x} \quad (27)$$

式中： $x_{d,s_d,t,r,x}^{ch}$ 、 $x_{d,s_d,t,r,x}^{dis}$ 分别为典型日 d 场景 s_d 下时段 t 功能区 r 中实体储能 x 的充、放状态变量,以 $x_{d,s_d,t,r,x}^{ch}$ 为例,其值为 1 时表示实体储能 x 处于充电状态,其值为 0 时表示不处于充电状态, $x_{d,s_d,t,r,x}^{dis}$ 类似； $P_{r,x}^{max}$ 为实体储能 x 充放功率最大值； α_x^{max} 、 α_x^{min} 分别为实体储能 x 比率的上、下限值； $E_{d,s_d,0,r,x}$ 、 $E_{d,s_d,T,r,x}$ 分别为实体储能 x 在初时段、末时段的能量。式(24)–(27)与式(3)构成了实体储能的运行模型。

3) 虚拟储能约束。

式(1)中的可控热负荷 $H_{t,r}^{cl}$ 是考虑功能区 r PMV 值的控制变量,与热网供水温度 $T_{t,r}^g$ 和回水温度 $T_{t,r}^h$ 满足如下关系：

$$H_{d,s_d,t,r}^{cl} = \chi (T_{d,s_d,t,r}^g - T_{d,s_d,t,r}^h) \quad (28)$$

$$T_{d,s_d,t,r}^h \leq T_{d,s_d,t,r}^g \leq T_r^{g,max} \quad (29)$$

$$-\sigma_{d,s_d,t,r} \leq \lambda_{d,s_d,t,r}^{PMV} \leq \sigma_{d,s_d,t,r} \quad (30)$$

式中： χ 为可控热负荷与热网供/回水温度差间的关系系数； $\sigma_{d,s_d,t,r}$ 为典型日 d 场景 s_d 下时段 t 功能区 r PMV 指标的取值上限； $T_r^{g,max}$ 为功能区 r 热网的最高供水温度。式(28)中热网供水和回水温度为中间参数,由式(11)和式(12)计算可得,描述了可控热负荷

和建筑室温间热惯性的多时段关系；式(29)、(30)分别描述了热网供水温度和用户 PMV 值的取值范围,表征了供热系统和冷热负荷的虚拟储能。

各功能区其余冷热电设备运行约束见附录 A 式 (A4)–(A16)。

3 算例分析

根据某新区的定位和发展前景,在概念性规划的布局形态下,该新区在规划中被划分为居住综合区、生产服务区等 6 类功能区。该新区负荷密度预测按居民用地、公共管理与公共服务用地、商业设施用地、工业用地、仓储用地 5 类进行统计,其中仓储用电负荷密度和用地与前四者相比要小很多。综合考虑负荷体量和地理位置,本文将该新区分为居民区、办公区、商业区和工业区 4 类功能区。设规划年限 $N=3$ a, 各类负荷年增长率为 15%, 热惯性系数 $J=2$ 。功能区间联络线参数、各功能区分布式冷热电源、各类单位储能设备价格、各功能区冷热电负荷曲线、EV 时空分布概率等相关参数见附录 B。本文建立的冷热电实体储能规划模型使用优化求解工具 YALMIP 进行建模,调用 CPLEX 求解器求解得到实体储能规划方案。

附录 B 图 B1 为 4 类功能区的负荷特性和相关性分析,其中图 B1(a)为根据当地温度和湿度等历史数据拟合得到的功能区不同典型日冷热电负荷,图 B1(b)为计及各功能区负荷体量后得到的各功能区与其余功能区间能源需求的相关性。为避免重复统计,用电的冷/热负荷从电负荷中扣除,一并计入冷/热负荷。由图 B1(a)可见不同类型功能区负荷存在差异性:居民区电负荷在时段 07:00–09:00、18:00–21:00 呈现双峰,负荷率为 0.4 左右;办公区在时段 09:00–18:00 的电负荷率为 0.65~0.85;商业区在时段 09:00–22:00 的电负荷率为 0.7~0.9;工业区电负荷由三峰型、双峰型、平滑型和避峰型等多种负荷曲线合成,负荷率高。由图 B1(b)可见居民区与其他 3 类功能区能源需求基本呈负相关,商业区和办公区呈强正相关,工业负荷体量大(超过 65%),居民区、办公区和商业区总负荷体现出对工业区负荷的互补性。

3.1 冷热电储能规划结果分析

表 2 为联网运行后各功能区实体储能的配置情况。可见第 1 年工业区、居民区分别配置了 8.2、0.4 MW·h 的蓄电池,办公区和商业区没有配置,这是由于新区初期负荷较少,联络线容量充裕,蓄电池配置更适用于在单位储能成本低的工业区配置。随着新区负荷的发展,联络线出现阻塞,其他功能区蓄电池容量增加。由于冷热负荷在功能区内产消平衡,热负荷体量大,储热罐成本低,且具有虚拟储能

的作用,各区域储热罐配置容量明显高于蓄电池。

表 2 各功能区实体储能容量规划结果

Table 2 Capacity planning results of physical storage in four functional areas

功能区	蓄电池数			储热罐数			蓄冷罐数		
	n=1	n=2	n=3	n=1	n=2	n=3	n=1	n=2	n=3
居民区	4	8	13	98	106	118	6	6	12
办公区	0	2	6	22	26	32	8	10	14
商业区	0	6	10	46	54	64	22	26	30
工业区	82	82	82	162	168	174	86	90	94

本文将冬、夏、春秋典型负荷、风电 / 光伏出力以及逐年增长的冷热电负荷等不确定性因素以场景进行描述,算例重点分析对规划影响大的某些场景。

3.2 虚拟储能优化运行对实体储能规划的影响

3.2.1 EV 移动虚拟储能特性

不考虑 EV 移动储能模型的实体储能配置结果如表 3 所示,对比表 2 可见考虑 EV 移动虚拟储能后实体储能的配置容量减少。附录 C 图 C1 展示了目标年冬季典型日某概率最大场景下考虑 EV 时空移动储能特性后的运行情况。可见 EV 在功能区间的可移动性使得 EV 更多地利用功能区多余电力充电,在电力出现缺额时少充电或适当放电。例如:在时段 10:00—12:00, EV 在办公区和工业区有多余电力时充电,尽管居民区此时也有多余电力,但是此时段 EV 在居民区概率低, EV 充电负荷也相应的小。因此,考虑 EV 移动储能后,原本由实体储能实现负荷削峰填谷以及功能区区间交换的一部分能量由 EV 虚拟储能通过负荷削减或移动实现。

表 3 不考虑 EV 移动储能时各功能区实体储能容量规划结果

Table 3 Capacity planning results of physical storage in four functional areas without considering EV mobile storage

功能区	蓄电池数			储热罐数			蓄冷罐数		
	n=1	n=2	n=3	n=1	n=2	n=3	n=1	n=2	n=3
居民区	4	9	17	98	108	126	6	10	22
办公区	0	3	7	22	30	40	8	12	18
商业区	0	7	11	50	60	66	22	32	40
工业区	82	83	84	166	174	178	86	94	100

3.2.2 冷热负荷虚拟储能

1) 冷热负荷可控系数。

改变热、冷负荷可控系数 α , 和 β , 可分析可控冷热负荷的虚拟储能对实体储能规划的影响。表 4 为居民区的逐年储能配置方案。可见居民区热负荷可控系数 α_1 分别为 0.2、0.45 时, 目标年居民区储热罐优化配置容量分别为 11.8、11.2 MW·h。附录 C 图 C2 为目标年冬季典型日某概率最大场景下居民区室温 and 储热罐充放功率情况。可见在负荷高峰时段 19:00—21:00 之前, $\alpha_1=0.2$ 时室温提前于 17:00 升至 22 °C, $\alpha_1=0.45$ 时室温提前于 17:00 升至 23.4 °C, 显然可控热负荷作为可移动负荷, 减少了用电高峰期电锅炉和储热罐的出力, 利用可控热负荷的虚拟储能特性减少了实体储能投资。

表 4 不同 α_1 下居民区实体储能容量规划结果

Table 4 Capacity planning results of physical storage in resident area under different values of α_1

α_1	蓄电池数			储热罐数			蓄冷罐数		
	n=1	n=2	n=3	n=1	n=2	n=3	n=1	n=2	n=3
0.2	4	8	13	98	106	118	6	8	12
0.45	4	6	10	98	102	112	6	6	10

2) PMV 指标。

PMV 指标反映了人对环境的舒适度。表 5 为目标年商业区的实体储能规划方案。当 σ_3 分别为 0.2、0.6、1 时, 目标年商业区配置的储热罐容量分别为 6.4、6.1、5.6 MW·h。附录 C 图 C3 为目标年冬季典型日某概率最大场景下 σ_3 对商业区室温、购电量、电锅炉与储热罐出力的影响。可见, $\sigma_3=0.2$ 时, 在时段 07:00—08:00 商业区升高室温至允许温度 26.7 °C, σ_3 为 0.6 和 1 时, 允许的温度范围更宽。PMV 指标取值越大, 允许的温度越低, 意味着热负荷的弹性越大, 热能“存储”容量越大, 显然其作为虚拟储能的作用越大, 从而减少了储热罐的配置容量。

3.2.3 供热系统热惯性虚拟储能

表 6 和附录 C 表 C1 分别为目标年不同 J_2 下各功能区的储能规划方案及成本, J_2 为 0、1 和 2 时, 目标年办公区配置的储热罐容量分别为 3.6、3.4、3.2 MW·h。图 2 为不同 J_2 下目标年冬季典型日某概率最大场景下办公区的运行情况。可见, $J_2=0$ 时, 供热系统不提前升温; $J_2=1$ 时, 供热系统于 06:00 提前升温; 而 $J_2=2$ 时, 供热系统提前于 05:00 升温, 此时电能富余, 高峰时段 08:00—10:00 储热罐放热, 在虚拟储能和实体储能的协同作用下, 办公区高峰时

表 5 目标年不同 σ_3 下各功能区实体储能容量规划结果

Table 5 Capacity planning results of physical storage in four functional areas under different values of σ_3 in target year

功能区	蓄电池数			储热罐数			蓄冷罐数		
	$\sigma_3=0.2$	$\sigma_3=0.6$	$\sigma_3=1$	$\sigma_3=0.2$	$\sigma_3=0.6$	$\sigma_3=1$	$\sigma_3=0.2$	$\sigma_3=0.6$	$\sigma_3=1$
居民区	13	3	12	118	116	114	12	12	10
办公区	6	6	6	32	32	32	14	14	14
商业区	9	6	4	64	61	56	30	24	22
工业区	82	79	77	174	172	170	94	92	92

段的负荷压力得以缓解,显然虚拟储能和实体储能的协同作用使得系统所需的冷热电实体储能容量减少。

表6 目标年不同 J_2 下各功能区实体储能容量规划结果

Table 6 Capacity planning results of physical storage in four functional areas under different values of J_2 in target year

功能区	蓄电池数			储热罐数			蓄冷罐数		
	$J_2=0$	$J_2=1$	$J_2=2$	$J_2=0$	$J_2=1$	$J_2=2$	$J_2=0$	$J_2=1$	$J_2=2$
居民区	14	13	13	120	118	116	12	12	12
办公区	10	7	6	36	34	32	16	14	12
商业区	9	9	9	64	64	64	30	30	30
工业区	83	82	82	176	174	172	94	92	92

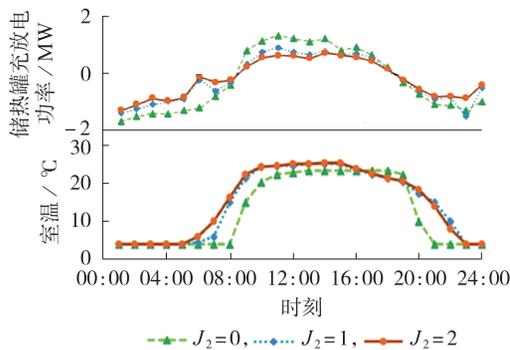


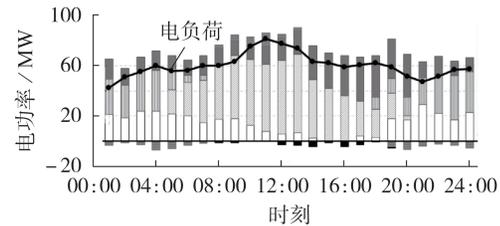
图2 供热系统热惯性 J_2 对办公区运行的影响

Fig.2 Impact of heating system thermal inertia J_2 on office area operation

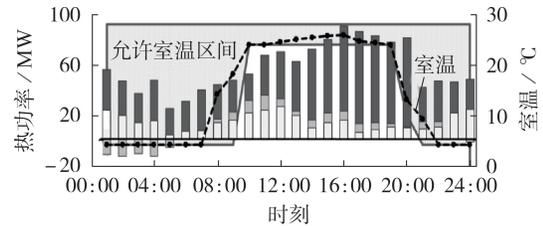
3.3 典型功能区间时空互补特性对储能规划的影响

区域综合能源系统内功能区之间具有时空互补特性,通过联络线联网运行可以实现功能区间间的能量交换。图3展示了冬季某风光最大出力场景下工业区冷热电功率和联络线的运行情况,图中功率为负表示吸收功率,功率为正表示输出功率。可见在时段07:00—09:00工业区有剩余风光,而09:00以后电能供应偏紧张,在虚拟储能的作用下工业区提前于07:00升高室温和降低冷库温度,体现了时间轴上的负荷转移;在时段09:00—10:00工业区EV的净充电功率低于前后时段,尽管该时段EV处于工业区的概率大于前后时段,同时室温保持在室温允许的下限(23.9 °C),削减了负荷。此外,其他功能区对工业区均提供了支持,例如在时段09:00—10:00整个区域EV的净充电功率均小于前后时段,商业区向工业区送出多余的光伏出力等,体现了多功能区间的能量互补。18:00之后,工业区负荷降低,部分多余的电能传输给办公区和商业区,由于联络线容量的限制,无法就地消纳和传输出去的风光出力以冷热电形式被存储起来,其中61%通过电锅炉转化为热能存储于储热罐,24%通过电制冷机转化成冷能存储于蓄冷罐,15%存储于蓄电池,这是由于储热罐热比热容为4.2 kJ/(kg·°C),储能容量大,效率高,

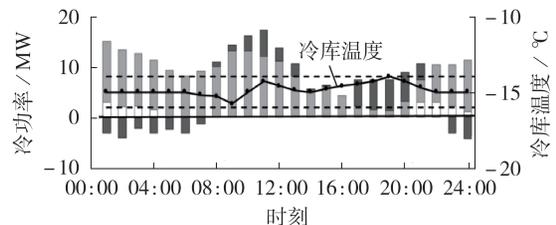
成本低,因此更容易转化成热能储存起来。



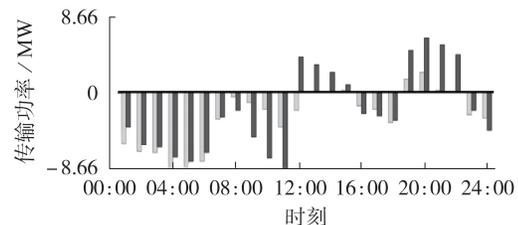
(a) 工业区电功率



(b) 工业区热功率及室温



(c) 工业区冷功率及冷库温度



(d) 工业区联络线传输功率

图3 冬季典型日工业区风光最大出力场景运行情况

Fig.3 Operation situation of typical daily maximum output scenario of industrial area in winter

多功能区联网前各功能区的储能规划结果和联网后的年弃风弃光率对比情况分别见附录C表C2和表C3。可见,对比联网后的储能规划结果(表2),多功能区联网可使各功能区的储能配置容量减少,同时年弃风弃光率下降。由于功能区间的时空互补性,虚拟储能的优化调度以电能形式实现了功能区间的相互支持,从而减少了消纳可再生能源所需的实体储能配置容量。

4 结论

本文从多功能区冷热电的时空互补相关性角度出发,利用EV的时空分布特征、用户温度负荷的柔

性和供热系统的热惯性,建立了功能区内冷热就地平衡、电为多功能区能量枢纽、考虑多功能区“源-网-荷-储”差异性和实体-虚拟储能协调运行的区域综合能源系统多元实体储能设备规划模型。算例分析结果表明,虽然区域冷热电综合能源系统内各个功能区冷热就地平衡,但虚拟储能的优化调度发挥了各功能区EV负荷的移动储能特性、冷热负荷的柔性以及供热系统的惯性,有效通过电能形式实现了功能区间相互支持,各功能区间的多能量流体现出更有效的时空互补特性,从而减少了消纳可再生能源所需的实体储能配置容量,为实现区域综合能源系统差异化供用能和消纳大规模可再生能源提供了新思路。

本文模型还可以进行以下方面的研究:

1)基于供热管道的传输特性,考虑供热管道的时滞、热损问题对不同功能区用户冷热需求的影响,研究储热设备在各个功能区供热系统中的选址定容;

2)不同功能区冷热电需求响应特点不同,尤其是电力需求响应,包括可削减、可转移、可中断等不同类型负荷,本文主要考虑供冷/热系统的冷/热负荷,而对其他类型的需求响应考虑较少,下一步研究将更细致地分析多功能区更多类型需求响应的特征,建立多功能区时空互补特性的综合能源系统规划模型。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 黄子硕,何桂雄,闫华光,等. 园区级综合能源系统优化模型功能综述及展望[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 10-18.
HUANG Zishuo, HE Guixiong, YAN Huaguang, et al. Overview and prospect of optimization model function for community-scale integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 10-18.
- [2] 管霖,陈鹏,唐宗顺,等. 考虑冷热电存储的区域综合能源站优化设计方法[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 2934-2941.
GUAN Lin, CHEN Peng, TANG Zongshun, et al. Integrated energy station design considering cold and heat storage[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2934-2941.
- [3] 熊文,刘育权,苏万煌,等. 考虑多能互补的区域综合能源系统多种储能优化配置[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1): 118-126.
XIONG Wen, LIU Yuquan, SU Wanhuang, et al. Optimal configuration of multi-energy storage in regional integrated energy system considering multi-energy complementation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 118-126.
- [4] 陈中,刘艺,周涛,等. 考虑移动特性的电动汽车最优分时充电定价策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(4): 96-102.
CHEN Zhong, LIU Yi, ZHOU Tao, et al. Optimal time-of-use charging pricing strategy of EVs considering mobile characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4): 96-102.
- [5] 邹云阳,杨莉,冯丽,等. 考虑热负荷二维可控性的微网热电协调调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6): 13-19.
ZOU Yunyang, YANG Li, FENG Li, et al. Coordinated heat and power dispatch of microgrid considering two-dimensional controllability of heat loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6): 13-19.
- [6] 陈绍宇,王丹,贾宏杰,等. 基于连续状态变量约束的微网虚拟储能系统最优平抑控制策略[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 55-63.
CHEN Zhaoyu, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Optimal smoothing control strategy of virtual energy storage system in microgrid based on continuous state constraints[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 55-63.
- [7] 鲍谚,姜久春,张维戈,等. 电动汽车移动储能系统模型及控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(22): 36-43.
BAO Yan, JIANG Yongchun, ZHANG Weige, et al. Model control strategy of electric vehicle mobile energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 36-43.
- [8] 温剑锋,陶顺,肖湘宁,等. 基于出行链随机模拟的电动汽车充电需求分析[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1477-1484.
WEN Jianfeng, TAO Shun, XIAO Xiangning, et al. Analysis on charging demand of EV based on stochastic simulation of trip chain[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1477-1484.
- [9] 靳小龙,穆云飞,贾宏杰,等. 融合需求侧虚拟储能系统的冷热电联供楼宇微网优化调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 581-590.
JIN Xiaolong, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Optimal scheduling method for a combined cooling, heating and power building microgrid considering virtual storage system at demand side[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 581-590.
- [10] 王怡岚,童亦斌,黄梅,等. 基于需求侧响应的空调负荷虚拟储能模型研究[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 394-401.
WANG Yilan, TONG Yibin, HUANG Mei, et al. Research on virtual energy storage model of air conditioning loads based on demand response[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 394-401.
- [11] 张风晓,靳小龙,穆云飞,等. 融合虚拟储能系统的楼宇微网模型预测调控方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4420-4428.
ZHANG Fengxiao, JIN Xiaolong, MU Yunfei, et al. Model predictive scheduling method for a building microgrid considering virtual storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4420-4428.
- [12] 王明军,穆云飞,孟宪君,等. 考虑热能输运动态特性的电-热综合能源系统优化调度方法[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 132-142.
WANG Mingjun, MU Yunfei, MENG Xianjun, et al. Optimal scheduling method for integrated electro-thermal energy system considering heat transmission dynamic characteristics[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 132-142.
- [13] 王婉璐,杨莉,王蕾,等. 考虑供热网储热特性的电-热综合能源系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 45-55.
WANG Wanlu, YANG Li, WANG Lei, et al. Optimal dispatch of integrated electricity-heat energy system considering energy storage of heating network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 45-55.
- [14] 程浩忠,胡泉,王莉,等. 区域综合能源系统规划研究综述[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(7): 2-13.
CHENG Haozhong, HU Xiao, WANG Li, et al. Review on research of regional integrated energy system planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 2-13.
- [15] 任洪波,邓冬冬,吴琼,等. 基于热电共融的区域分布式能源互联网协同优化研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(14): 4023-4034.
REN Hongbo, DENG Dongdong, WU Qiong, et al. Collaborative optimization of distributed energy network based on electricity and heat interchanges[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(14): 4023-4034.
- [16] 陈中,刘艺,陈轩,等. 考虑移动储能特性的电动汽车充放电调

- 度策略[J]. 电力系统自动化,2020,44(2):77-88.
CHEN Zhong, LIU Yi, CHEN Xuan, et al. Charging and discharging dispatching strategy for electric vehicles considering characteristics of mobile energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 77-88.
- [17] 李晓露, 单福州, 宋燕敏, 等. 考虑热网约束和碳交易的多区域综合能源系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 52-61.
LI Xiaolu, SHAN Fuzhou, SONG Yanmin, et al. Optimal dispatch of multi-district integrated energy systems considering heating network constraints and carbon trading[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 52-61.
- [18] 张立东. 区域综合能源系统规划及园区级规划应用研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
ZHANG Lidong. Research on the application of regional comprehensive energy system planning and park-level planning [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.
- [19] 王琪鑫, 刘涤尘, 吴军, 等. 计及用户行为分析的多能协同综合能源系统供需双侧综合优化[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 179-185.
WANG Qixin, LIU Dichen, WU Jun, et al. Comprehensive optimization including user behavior analysis for supply and demand sides of IES-MEC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 179-185.
- [20] 张怡冰, 刘其辉, 洪晨威, 等. 基于模糊控制的区域电动汽车入网充电调度策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(7): 147-153.
ZHANG Yibing, LIU Qihui, HONG Chenhui, et al. Charging and discharging dispatch strategy of regional V2G based on fuzzy control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7): 147-153.

作者简介:



代琼丹

代琼丹(1997—),女,四川绵阳人,硕士研究生,主要研究方向为综合能源系统(E-mail:21810203@zju.edu.cn);

杨莉(1974—),女,山东泰安人,副教授,博士,通信作者,研究方向为电力市场、电力系统优化调度(E-mail:eeyangli@zju.edu.cn);

林振智(1979—),男,福建莆田人,教授,博士,主要研究方向为电力系统优化调度(E-mail:linzhzhenzhi@zju.edu.cn)。

(编辑 李玮)

Multi-storage planning of integrated energy system considering functional area difference and virtual storage

DAI Qiongdan¹, YANG Li¹, LIN Zhenzhi¹, LAN Zhou², WANG Yaolei³, LIU Zhao³

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

2. Economic & Technology Research Institute, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China;

3. Economic & Technology Research Institute, State Grid Shandong Electric Power Co., Ltd., Jinan 250000, China)

Abstract: Integrated energy system positively contributes to the horizontal complementation of various energy forms including cooling, heating and power etc., and multiple vertical coordination among “sources, grid, demands and storages”. The cooling and thermal production and consumption are balanced within each functional area, and the power system is operated as an energy hub. Based on this, the difference characteristics of “sources, grid, demands and storages” in typical functional areas are analyzed, including the spatial-temporal characteristics of EV (Electric Vehicle), the flexibility of cooling and heating loads, and the thermal inertia of a heating supply network. Then, the virtual storage characteristics of EV, cooling and heating loads and heating supply network are exploited. Moreover, a physical storage (equipment) planning model of a regional integrated energy system is developed, which considers the differences of energy exchange capacities and the storage equipment costs in the functional areas. Numerical results of an integrated energy system represented by a new district including residential, office, commercial and industrial subareas demonstrate that the optimal scheduling of integrated energy system with multiple functional areas considering virtual storage can improve the elasticity of whole system and networking benefit, and it can effectively reduce the physical storage capacity required to accommodate renewable energy.

Key words: integrated energy system; functional area; difference; virtual storage; physical storage

附录 A

资金时间折算系数为：

$$R_{n,x} = \frac{1}{(1+\rho)^n} \frac{\rho(1+\rho)^{a_x}}{(1+\rho)^{a_x} - 1} \quad (\text{A1})$$

其中， ρ 为贴现率； a_x 为实体储能 x 的使用年限。

CHP 机组的发电成本为：

$$c^{\text{CHP}}(P_{d,s_d,t,r}^{\text{CHP}}, H_{d,s_d,t,r}^{\text{CHP}}) = a_{0,r} + a_{1,r} P_{d,s_d,t,r}^{\text{CHP}} + a_{2,r} H_{d,s_d,t,r}^{\text{CHP}} + a_{3,r} (P_{d,s_d,t,r}^{\text{CHP}})^2 + a_{4,r} (H_{d,s_d,t,r}^{\text{CHP}})^2 + a_{5,r} P_{d,s_d,t,r}^{\text{CHP}} H_{d,s_d,t,r}^{\text{CHP}} \quad (\text{A2})$$

其中， $a_{0,r}$ — $a_{5,r}$ 为 CHP 机组的燃料费用系数。

弃风弃光功率为：

$$P_{d,s_d,t,r}^{\text{cut}} = P_{d,s_d,t,r}^{\text{WT,max}} - P_{d,s_d,t,r}^{\text{WT}} + P_{d,s_d,t,r}^{\text{PV,max}} - P_{d,s_d,t,r}^{\text{PV}} \quad (\text{A3})$$

其中， $P_{d,s_d,t,r}^{\text{WT,max}}$ 和 $P_{d,s_d,t,r}^{\text{PV,max}}$ 分别为典型日 d 场景 s_d 下时段 t 功能区 r 中风电和光伏的最大出力。

冷热电设备运行约束如下。

(1) 允许最大弃风弃光与出力约束为：

$$(1-\theta^{\text{WT}})P_{d,s_d,t,r}^{\text{WT,max}} \leq P_{d,s_d,t,r}^{\text{WT}} \leq P_{d,s_d,t,r}^{\text{WT,max}} \quad (\text{A4})$$

$$(1-\theta^{\text{PV}})P_{d,s_d,t,r}^{\text{PV,max}} \leq P_{d,s_d,t,r}^{\text{PV}} \leq P_{d,s_d,t,r}^{\text{PV,max}} \quad (\text{A5})$$

其中， θ^{WT} 、 θ^{PV} 分别为日调度周期内系统允许的最大弃风率、弃光率。

(2) CHP 机组运行约束为：

$$P_{d,s_d,t,r}^{\text{CHP}} = \frac{H_{d,s_d,t,r}^{\text{CHP}}}{k^{\text{CHP}}} \quad (\text{A6})$$

$$P_r^{\text{CHP,min}} \leq P_{d,s_d,t,r}^{\text{CHP}} \leq P_r^{\text{CHP,max}} \quad (\text{A7})$$

$$-D_r^{\text{max}} \Delta t \leq (P_{d,s_d,t,r}^{\text{CHP}} - P_{d,s_d,t-\Delta t,r}^{\text{CHP}}) \leq U_r^{\text{max}} \Delta t \quad (\text{A8})$$

式(A6)为 CHP 机组的热电约束，其中 k^{CHP} 为热电比值；式(A7)为 CHP 机组出力上下限约束，其中 $P_r^{\text{CHP,max}}$ 、 $P_r^{\text{CHP,min}}$ 分别为功能区 r 中 CHP 机组的电出力上、下限；式(A8)为 CHP 机组出力爬坡约束，其中 D_r^{max} 和 U_r^{max} 分别为功能区 r 中 CHP 机组的单位时间内最大下调功率和上调功率。

(3) 电锅炉电热转换约束和出力约束分别为：

$$H_{d,s_d,t,r}^{\text{EB}} = \eta^{\text{EB}} P_{d,s_d,t,r}^{\text{EB}} \quad (\text{A9})$$

$$H_r^{\text{EB,min}} \leq H_{d,s_d,t,r}^{\text{EB}} \leq H_r^{\text{EB,max}} \quad (\text{A10})$$

其中， η^{EB} 为电锅炉的电热转换效率； $H_r^{\text{EB,max}}$ 、 $H_r^{\text{EB,min}}$ 分别为电锅炉允许出力上、下限。

(4) 热泵可通过消耗电能，将自然界中的低品位热能转化为可被利用的高品位热能，电热转换约束和出力约束分别为：

$$H_{d,s_d,t,r}^{\text{HP}} = \eta^{\text{HP}} P_{d,s_d,t,r}^{\text{HP}} \quad (\text{A11})$$

$$H_r^{\text{HP,min}} \leq H_{d,s_d,t,r}^{\text{HP}} \leq H_r^{\text{HP,max}} \quad (\text{A12})$$

其中， η^{HP} 为热泵的电热转换系数； $H_r^{\text{HP,max}}$ 、 $H_r^{\text{HP,min}}$ 为热泵出力上、下限。

(5) 电制冷机的电冷转换约束和出力约束分别为：

$$Q_{d,s_d,t,r}^{\text{EC}} = \eta^{\text{EC}} P_{d,s_d,t,r}^{\text{EC}} \quad (\text{A13})$$

$$Q_r^{\text{EC,min}} \leq Q_{d,s_d,t,r}^{\text{EC}} \leq Q_r^{\text{EC,max}} \quad (\text{A14})$$

其中， η^{EC} 为电制冷机的电冷转换效率； $Q_r^{\text{EC,max}}$ 、 $Q_r^{\text{EC,min}}$ 分别为电制冷机制冷功率上、下限。

(6) 吸收式制冷机的热冷转换约束和出力约束分别为：

$$Q_{d,s_d,t,r}^{\text{AC}} = \eta^{\text{AC}} H_{d,s_d,t,r}^{\text{AC}} \quad (\text{A15})$$

$$Q_r^{\text{AC,min}} \leq Q_{d,s_d,t,r}^{\text{AC}} \leq Q_r^{\text{AC,max}} \quad (\text{A16})$$

其中， η^{AC} 为吸收式制冷机的热冷转换效率； $Q_r^{\text{AC,max}}$ 、 $Q_r^{\text{AC,min}}$ 分别为吸收式制冷机制冷功率上、下限。

附录 B

表 B1 联络线路参数

Table B1 Parameters of tie-lines

联络线	型号	最大输送容量/MW	寿命/a
居民区-办公区 办公区-工业区 工业区-商业区 商业区-居民区	JKLYJ-20-240	8.66	20

表 B2 工业区 CHP 机组燃料费用系数

Table B2 Fuel cost coefficient of CHP units in industrial area

系数	数值	系数	数值
$a_{0,4}$ /元	1650	$a_{3,4}$ /[元 · (MW · h) ²]	345
$a_{1,4}$ /[元 · (MW · h) ⁻¹]	1450	$a_{4,4}$ /[元 · (MW · h) ²]	30
$a_{2,4}$ /[元 · (MW · h) ⁻¹]	420	$a_{5,4}$ /[元 · (MW · h) ²]	31

表 B3 供热系统时间序列模型系数

Table B3 ARMA model coefficients of heating system

J_r	μ_j	δ_j	λ_j	θ_j	ϕ_j	ω_j
0		0.2112	0.3317			
1	0.5721	-0.0243	-0.3169	0.6991	0.1011	0.1998
2	0.0607	-0.0104	0.1741			

表 B4 各功能区冷热电设备装机容量

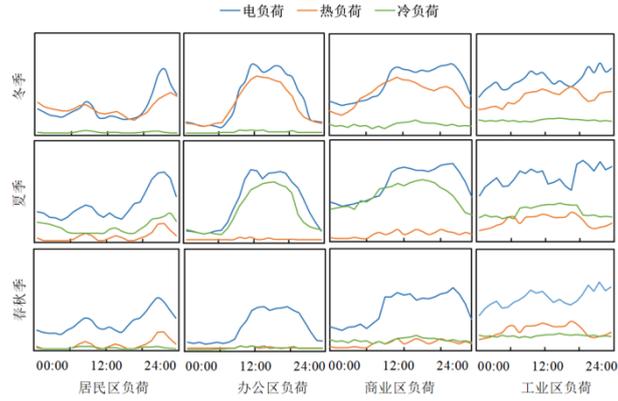
Table B4 Installed capacity of cooling, heating and power equipment in four functional areas

功能区	单位: MW						
	PV	WT	CHP	EB	HP	EC	AC
居民区	6×5			20		10	
办公区	6×5				25	10	
商业区	6×5			30		15	
工业区	14×5	4×8	40	20		10	10

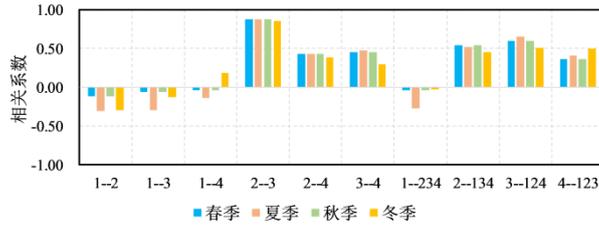
表 B5 各功能区可控冷热负荷相关参数

Table B5 Relevant parameters of controllable cooling and heating load in four functional areas

功能区	α_r	β_r	σ_r
居民区	0.2	0.25	0.2
办公区	0.4	0.45	0.2
商业区	0.5	0.45	0.2
工业区	0.3	0.4	0.5



(a)功能区的多能负荷特性



注：1-2 表示居民区与办公区负荷的相关性；
1-234 表示居民区与其他功能区总负荷的相关性，其他依此类推。

(b)功能区多能负荷特性的相关性

图 B1 功能区的多能负荷特性及相关性

Fig.B1 Multi-energy load characteristics and correlation of functional areas

表 B6 单位实体储能的参数
Table B6 Parameters of unit physical storage

实体储能	功率/kW	容量/(kW · h)	投资成本/[元 · (MW · h) ⁻¹]				效率/%		生命周期/a
			居民区	办公区	商业区	工业区	充电	放电	
蓄电池	50	100	1600	1100	1000	650	0.75	0.75	13.5
储热罐	50	100	700	650	500	300	0.90	0.90	15
蓄冷罐	50	100	750	700	550	350	0.65	0.65	15

表 B7 EV 的时空分布概率
Table B7 Space-time distribution probability of EV

功能区	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00
居民区	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.78	0.57	0.48	0.12	0.04	0.04	0.10
办公区	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.14	0.23	0.37	0.40	0.40	0.37
商业区	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.15	0.16	0.18	0.16	0.18	0.17
工业区	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.08	0.14	0.23	0.33	0.40	0.38	0.36
功能区	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
居民区	0.08	0.04	0.04	0.04	0.09	0.23	0.37	0.47	0.66	0.72	0.80	0.82
办公区	0.40	0.39	0.38	0.37	0.31	0.26	0.17	0.12	0.08	0.07	0.06	0.06
商业区	0.14	0.20	0.21	0.24	0.30	0.22	0.29	0.28	0.19	0.15	0.08	0.06
工业区	0.38	0.37	0.37	0.35	0.30	0.29	0.17	0.13	0.07	0.06	0.06	0.06

附录 C

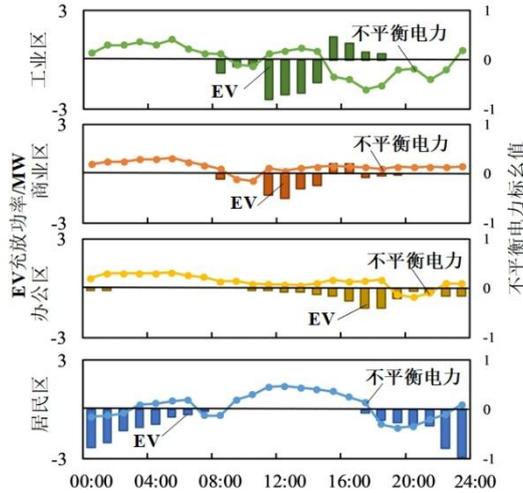


图 C1 EV 移动储能特性对系统的影响

Fig.C1 Impact of EV mobile storage characteristics on system operation

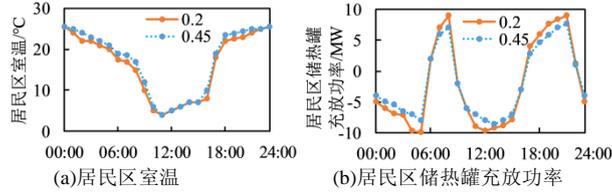


图 C2 热负荷可控系数 α_1 对居民区运行的影响

Fig.C2 Impact of controllable heating load parameter α_1 on residential area operation

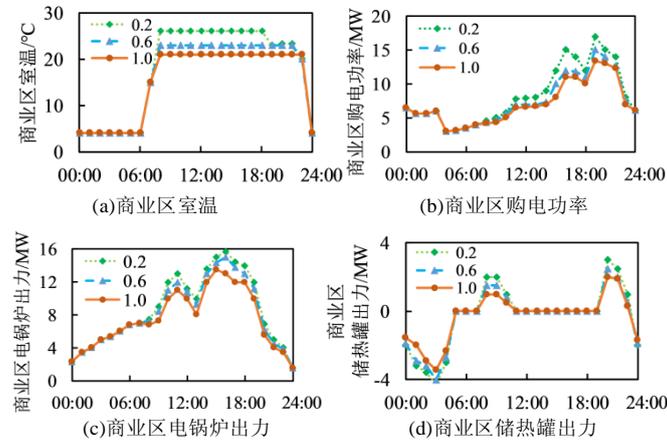


图 C3 PMV 指标对商业区运行的影响

Fig.C3 Impact of PMV on commercial area operation

表 C1 目标年不同 J_2 下系统的成本对比

Table C1 Target year costs comparison under different values of J_2

J_2	规划成本/万元	运行成本/万元	总成本/万元
0	4221.1	2657.8	6878.9
1	4099.3	2479.1	6578.4
2	4064.4	2445.7	6510.1

表 C2 多功能区联网前各功能区实体储能容量规划结果
 Table C2 Physical storage planning results in four functional areas
 before interconnection

功能区	蓄电池数			储热罐数			蓄冷罐数		
	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=1$	$n=2$	$n=3$
居民区	4	8	14	101	110	118	6	7	12
办公区	0	3	6	23	28	32	8	12	15
商业区	0	6	11	46	58	66	22	28	31
工业区	83	83	83	162	174	179	86	92	96

表 C3 不同弃风弃光惩罚价格 ρ_2 下多功能区联网前后功能区的年弃风弃光率
 Table C3 Annual abandoned new energy power rate of functional areas before and after interconnection
 under different price punishment of new energy power abandonment ρ_2

功能区	联网前/%				联网后/%			
	$\rho_2=100$ 元/(kW·h)	$\rho_2=300$ 元/(kW·h)	$\rho_2=600$ 元/(kW·h)	$\rho_2=1200$ 元/(kW·h)	$\rho_2=100$ 元/(kW·h)	$\rho_2=300$ 元/(kW·h)	$\rho_2=600$ 元/(kW·h)	$\rho_2=1200$ 元/(kW·h)
居民区	2.63	2.12	1.99	1.41	1.30	0.85	0.78	0.55
办公区	1.21	1.02	0.83	0.64	0.34	0.30	0.25	0.17
商业区	1.87	1.58	1.02	0.88	0.52	0.36	0.31	0.24
工业区	2.32	2.01	1.34	1.12	0.57	0.51	0.44	0.32
合计	2.01	1.68	1.30	1.01	0.63	0.51	0.41	0.22