

含光伏的冷热电联供园区微网多类型 储能协调鲁棒优化配置

高军伟¹, 陈泽雄¹, 郑欣¹, 陈文炜¹, 唐智强², 王雪峰¹, 林亚培¹

(1. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广东 广州 510000; 2. 广州市奔流电力科技有限公司, 广东 广州 510670)

摘要:含光伏的冷热电联供(CCHP)园区微网中有储冷、储热和储电多种类型储能装置,其合理协调配置能够对日负荷曲线进行削峰填谷和平抑光伏出力的不确定波动,进而提高微网运行的安全性和经济性。该文采用盒式不确定集描述光伏出力和冷热电负荷的不确定波动特性建立含光伏的 CCHP 园区微网中储冷、储热和储电多类型储能的协调鲁棒优化配置模型。该双层优化模型以微网年等值投资和运行费用之和最小为目标函数,通过采用 Benders 分解法,将双层优化问题分解为寻找某个场景下的配置方案主问题和寻找微网典型日运行费用最大的极端场景子问题进行交替迭代求解,以得到对于光伏出力和冷热电负荷不确定波动具有鲁棒性的储冷、储热及储电装置的协调优化配置方案。最后,以某个 CCHP 园区微网为例,通过与确定性优化配置方案和只优化配置蓄电池储能方案的比较,表明鲁棒配置方案更有利于平抑光伏出力和负荷的不确定波动,有效提高微网运行的安全性,同时多类型储能协调配置比只配置蓄电池储能方案的经济效益更好。

关键词:冷热电联供;多类型储能;鲁棒优化配置;Benders 分解

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.06.007 中图分类号:TM721 文章编号:1673-9140(2021)06-0056-11

Coordinated robust optimal allocation of multiple types energy storage devices in the CCHP campus microgrid with photovoltaic

GAO Junwei¹, CHEN Zexiong¹, ZHENG Xin¹, CHEN Wenwei¹,
TANG Zhiqiang², WANG Xuefeng¹, LIN Yapei¹

(1. Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510620, China;

2. Guangzhou Power Electrical Technology Co., Ltd., Guangzhou 510670, China)

Abstract: There are many types of energy storage devices including cooling storage, heating storage and power storage in the CCHP campus microgrid with photovoltaics. Its reasonable and coordinated configuration can cut peaks, fill valleys on the daily load curve and suppress uncertain fluctuations in photovoltaic output, then improving the safety and economy of microgrid operation. This paper uses a box-type uncertainty set to describe the uncertain fluctuation characteristics of photovoltaic output and cooling, heating, and electrical load to establish a coordinated and robust optimization configuration model for multiple types of energy storage in CCHP park microgrid with photovoltaics. This two-layer optimization model takes the minimum sum of the annual equivalent investment and operating cost of

收稿日期:2020-05-25;修回日期:2021-04-22

基金项目:国家自然科学基金(51977080);广东电网有限责任公司科技项目(GZHKJXM20170134)

通信作者:唐智强(1996-),男,硕士,主要从事电力系统优化运行与控制研究;E-mail:1324558275@qq.com

the microgrid as the objective function. By adopting the Benders decomposition method, the two-layer optimization problem is decomposed into the main problem of finding the configuration scheme in a certain scenario and the typical problem of finding the microgrid. The extreme scenario sub-problem with the largest daily operating cost is solved alternately and iteratively to obtain a coordinated and optimized configuration scheme of cold storage, heat storage and power storage devices that is robust to uncertain fluctuations in photovoltaic output and cooling, heating, and electrical loads. Finally, taking a CCHP park microgrid as an example, the comparison with the deterministic optimal configuration scheme and the optimal configuration of battery energy storage only schemes shows that the robust configuration scheme is more conducive to smoothing the uncertain fluctuations in photovoltaic output and load, and effectively improving the safety of microgrid operation. Meanwhile, the coordinated configuration of multiple types of energy storage has better economic benefits than the battery energy storage only solution.

Key words: combined cooling; heating and power; multi-type energy storages; robust optimal allocation; Benders decomposition

冷热电联供(combined cooling, heating and power, CCHP)园区微网作为一种典型的区域综合能源系统,能够有效促进能量的梯级利用和多种能源的互补运行,解决了传统能源系统由于能源耦合不紧、各能源系统相互独立运行所带来的能源利用效率低等问题,对提高微网运行的经济和环境效益具有重要作用。然而,由于光伏发电出力具有随机性和间歇性,其出力大小与光照强度、温度等环境因素密切相关,而 CCHP 机组的“以热定电”运行模式,挤占了微网对光伏的消纳容量,使微网难以灵活地应对光伏出力和冷、热、电负荷的不确定波动特性,降低了微网运行的经济性。虽然仅靠配置蓄电池储能装置能够有效平抑光伏出力和用电负荷的不确定波动从而提高微网运行的经济性,但是,如果能够利用冷/热力系统的能量存储能力将电力转化成其他形式的能源存储,必将进一步提高整个微网运行的灵活性和经济性^[1-3]。储能装置是 CCHP 园区微网的重要组成部分和关键支撑技术,能够实现能量的跨时段转移,削峰填谷,协调微网内部多类型“源-荷”间的平衡。因此,通过对 CCHP 园区微网中的多类型储能装置协调优化配置,使得各种储能装置互补运行,是平衡微网中光伏出力和冷、热、电负荷功率不确定波动的有效手段,并能提高 CCHP 园区微网运行的安全性和经济性。

目前,国内外对 CCHP 园区微网中储能优化配置问题的研究已经取得了一些进展。文献[4-6]均对考虑新能源出力不确定性的微电网中蓄电池优化配置问题进行了研究,表明了蓄电池的合理配置对

促进新能源消纳具有积极作用。不过这些文献只考虑了蓄电池,而没有考虑蓄冷罐和蓄热罐的优化配置对提高 CCHP 园区微网运行灵活性和促进新能源消纳的积极作用。文献[7]提出了一种综合能源系统的两阶段最优规划与设计模型,解决了综合能源系统中的蓄冷罐等多种设备类型及其容量的优化配置问题;文献[8]建立了全寿命周期的冷热电储能调度规划双层优化模型,并利用确定性迭代算法求解得到运行调度方案和储能配置容量;文献[9]在用户侧综合能源系统通用模型的基础上建立了综合储能优化配置模型,以优化配置各种储能的容量和功率;文献[10]以系统总成本最低为目标建立了区域综合能源系统储电、储热设备优化配置模型,并通过仿真分析得到各个设备的最佳出力以及储能设备的最优容量;文献[11]提出了能源互联网中储能容量需求的计算方法以及多种储能协调优化配置方法。但是,上述研究主要侧重于 CCHP 园区微网中多种储能的容量协调优化配置对平抑可再生能源功率波动的作用,没有研究微网中储能装置安装位置的确定方法以发挥其选点对于提高微网运行效益的作用,且所建立的优化配置模型中没有考虑各个子能源系统的网络运行特性约束。

鉴于此,该文采用盒式不确定集描述光伏出力和冷、热、电负荷的不确定波动特性,以 CCHP 园区微网中系统的年运行费用与储能装置投资的等值年费用之和为目标函数,以各类型储能装置的安装位置、配置额定能量和功率为决策变量,同时,考虑 CCHP 园区微网中冷、热、电能源系统详细的网络

运行特性约束,建立 CCHP 园区微网中多类型储能协调鲁棒优化配置的双层优化模型,并采用 Benders 分解法进行求解。

1 CCHP 园区微网的组成和多类型储能的运行特性

CCHP 园区微网的典型结构如图 1 所示,能源站中含有多种能源转换设备。其中,燃气发电机组通过消耗天然气向供电侧供电,其发电余热一部分被能源站中的 2 种吸收式制冷机收集并转化为冷功率,通过供冷管道中的冷水传递给用户以满足用冷需求;而另一部分余热则被换热机组收集并转化为热功率,通过供热管道中的热水传递给用户以满足用热需求,当这些制冷和制热设备无法满足全部冷、热负荷时,余下的冷、热负荷分别由电制冷机和电热锅炉补充。电制冷机和电热锅炉以及供冷管道和供热管道中的水泵所消耗的电功率由供电侧提供,供电侧除了安有燃气发电机外,还装有光伏电站,同时还可向配电网购入一部分电能以满足全部电负荷需求。

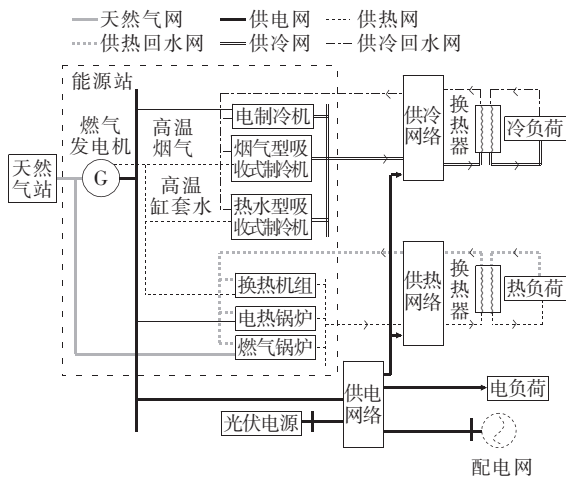


图 1 CCHP 园区微网的结构

Figure 1 Structure of CCHP campus microgrid

在 CCHP 园区微网中配置各种类型的储能装置是提高微网运行安全性和经济性的常用方法。目前,国内外常用的供冷/热网中储能配置形式是集中式储能,即储能装置配置在热/冷源附近,对系统运行进行整体调节,但是由于没有考虑到局部冷/热用户负荷变化的特殊性,因而不能充分发挥储能装置的作用。并且对于集中式储冷/热而言,一次网设计

时除了考虑基本流量外,需考虑储能装置参与调节时冷/热网管道流量的波动,会导致一次网管径较大、经济性差。分散式储冷/热作为一种简单、能灵活设置的储冷/热方式,可以较好地解决上述问题。该储冷/热方式能充分考虑到不同负荷的变化特征,有针对性地对相应冷/热负荷的波动进行平衡,从而使得供冷/热系统的运行更加稳定、可靠^[12]。

如图 2 所示,以分散式蓄热罐为例,供热网通过换热站向二次网的热负荷供热,同时在负荷侧装有蓄热罐,此时满足如下关系:

$$\tilde{\phi}_{n,\text{in}}^t + x_n(\phi_{n,c}^t - \phi_{n,d}^t) = c_w m_{n,q}^t (T_{n,w}^t - T_{n,r}^t) \quad (1)$$

式中 n 为热网节点; $\tilde{\phi}_{n,\text{in}}^t$ 为节点 n 的热负荷; $m_{n,q}^t$ 为节点 n 的换热站质量流量; $T_{n,w}^t$ 、 $T_{n,r}^t$ 分别为节点 n 换热站的供水和回水侧温度; x_n 为储能装置是否安装在节点 n 的 0-1 变量; c_w 为水的比热容(上标 t 表示 t 时段相应变量,以下各式中的变量同理)。

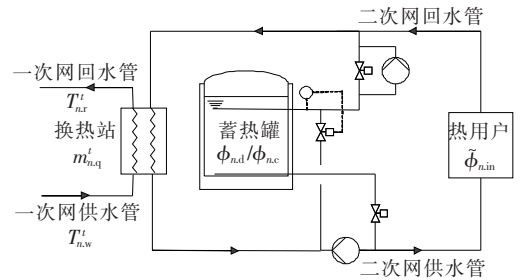


图 2 蓄热罐接在负荷侧

Figure 2 Heat storage tank connected to the load side

而供电网侧的蓄电池一般都是分散式接入负荷附近节点,具有快速功率响应能力,通过快速充放电来平抑光伏出力和用电负荷的不确定波动对 CCHP 园区微网运行带来的不利影响^[13-14]。

储能装置的运行特性可统一描述如下:

$$\begin{cases} E_a^{t+1} = \\ E_a^t (1 - \delta_a) + \phi_{a,c}^t \eta_{a,c} \Delta t - \phi_{a,d}^t \Delta t / \eta_{a,d} \\ k_r E_a \leq E_a \leq E_a \\ 0 \leq \phi_{a,d}^t \leq \phi_a \\ 0 \leq \phi_{a,c}^t \leq \phi_a \\ \phi_{a,d}^t \cdot \phi_{a,c}^t = 0 \\ E_{a,0} = E_{a,T} \end{cases} \quad (2)$$

式中 下标 a 为节点类型,分别对应冷网节点 i 、热网节点 n 和电网节点 j ; E_a^t 为储能装置在 t 时段存

储的能量; δ_a 为储能装置的能量损失率; $\eta_{a,c}/\eta_{a,d}$ 为储能装置的蓄能/放能效率; E_a 为储能装置的配置额定能量; $\phi_{a,c}^t/\phi_{a,d}^t$ 为储能装置在 t 时段的蓄能/放能功率; ϕ_a 为储能装置的配置额定功率; $E_{a,0}/E_{a,T}$ 为储能装置在典型日运行周期的初始/末尾时段存储的能量; k_r 为比例,即为延长储能装置寿命,其放电深度不能低于其额定能量的比例。

2 多类型储能装置的协调优化配置模型

2.1 目标函数

为应对 CCHP 园区微网中光伏出力和冷/热/电负荷的不确定波动给微网安全运行带来的不利影响,含光伏的 CCHP 园区微网中储冷、储热和储电装置的协调优化配置问题可以构造成 min-max 形式的鲁棒优化模型。目标函数为微网中系统的年运行费用与储能装置投资的等值年费用之和:

$$\min\{C_{F,c} \sum_{i=1}^{N_c} (k_{cE} E_{ci} + k_{c\phi} \phi_{ci}) + C_{F,h} \sum_{n=1}^{N_h} (k_{hE} E_{hn} + k_{h\phi} \phi_{hn}) + C_{F,e} \sum_{j=1}^{N_e} (k_{eE} E_{ej} + k_{e\phi} \phi_{ej}) + 365 \max \sum_{t=1}^T (c_{gas} f_{sg}^t + c_{grid} P_{grid}^t + c_s \tilde{P}_s^t + c_{es}^t) \Delta t\} \quad (3)$$

$$c_{es}^t = c_c \sum_{i=1}^{N_c} (\phi_{i,d}^t + \phi_{i,c}^t) + c_h \sum_{n=1}^{N_h} (\phi_{n,d}^t + \phi_{n,c}^t) + c_e \sum_{j=1}^{N_e} (P_{j,d}^t + P_{j,c}^t) \quad (4)$$

$$C_{F,c/h/e} = \frac{d_{es} (1 + d_{es})^{y_{es}}}{(1 + d_{es})^{y_{es}} - 1} \quad (5)$$

式(3)~(5)中 下标 es 为储能类型,取 c 、 h 、 e ,分别表示储冷、储热和储电; N_c 、 N_h 、 N_e 分别为冷网、热网和电网的节点总数; $C_{F,c}$ 、 $C_{F,h}$ 、 $C_{F,e}$ 分别为蓄冷罐、蓄热罐和蓄电池的资本回收系数; $k_{cE}/k_{c\phi}$ 、 $k_{hE}/k_{h\phi}$ 、 $k_{eE}/k_{e\phi}$ 分别为蓄冷罐、蓄热罐和蓄电池的单位额定能量/功率投资费用; T 为总时段数, Δt 为每个时段的时间长度; c_{gas} 为购气单价; c_{grid} 、 c_s 分别为向配电网和光伏电站购电的单价; f_{sg}^t 为 t 时刻

从天然气站流出天然气的流量; P_{grid}^t 为 t 时刻配电网注入的有功; \tilde{P}_s^t 为 t 时刻的光伏电站出力; $\phi_{i,c}^t/\phi_{i,d}^t$ 、 $\phi_{n,c}^t/\phi_{n,d}^t$ 、 $P_{j,c}^t/P_{j,d}^t$ 分别为各储能装置的蓄能/放能功率; d_{es} 、 y_{es} 分别为储能装置的折旧率和折旧年限; c_{es}^t 为储能装置的运行维护费用; c_c 、 c_h 、 c_e 分别为各储能装置的单位功率运行维护费用。

2.2 供冷/热网的运行特性约束

供冷网和供热网的建模原理基本一致。以供热网为例,描述供热网时需从水力与热力 2 个部分考虑,分别建立水力和热力模型^[15-17]。

1) 水力模型。

包括流量连续方程和回路压力方程。流量连续方程表示节点注入的水流量等于节点流出水流量与该节点消耗的水流量之和:

$$\mathbf{A} \mathbf{m} = \mathbf{m}_q \quad (6)$$

式中 \mathbf{A} 为管道的支路—节点关联矩阵; \mathbf{m} 为供水管道水流量向量; \mathbf{m}_q 为节点注入水流量向量。

回路压力方程指环路压力方程即环路各段管道支路的水头损失之和等于零。对于整个液压网络,回路压力方程表示为

$$\mathbf{B} \mathbf{h}_f = 0 \quad (7)$$

式中 \mathbf{B} 为回路—支路关联矩阵; \mathbf{h}_f 为水头损失列向量,且 $\mathbf{h}_f = \mathbf{K} \mathbf{m}$ 。

2) 热力模型。

流体在管道中流动的过程中始终需满足能量平衡,同时由于与外界环境存在热交换,管道中的流体还会存在温度损失的现象。因此,热力模型除式(1)外,还需满足热网管道的节点热流量平衡方程和管道温度损耗方程:

$$\begin{cases} T_{op}^t = (T_{ip}^t - T_a) e^{-\lambda L/c_w m_j^t} + T_a \\ (\sum m_{out}^t) T_{out}^t = \sum (m_{in}^t T_{in}^t) \end{cases} \quad (8)$$

其中,各变量物理意义参见文献[15,17]。

3) 循环水泵耗电特性模型。

供冷/热网络中循环水泵消耗的电功率为

$$P_p^t = \frac{m^t G_{ra} H}{\rho_w \eta_p} \quad (9)$$

其中,各变量物理意义参见文献[17]。

2.3 供电网的运行特性约束

供电网各节点满足交流潮流约束:

$$\left\{ \begin{aligned} & P_{gj}^t + \tilde{P}_{sj}^t + x_{j,e}(P_{j,\text{dis}}^t - P_{j,\text{ch}}^t) - P_{Lj}^t - \\ & V_j^t \sum_{i=1}^n V_i^t (G_{ji} \cos \theta_{ji}^t + B_{ji} \sin \theta_{ji}^t) = 0 \\ & Q_{sj}^t - Q_{Lj}^t - V_j^t \sum_{i=1}^n V_i^t (G_{ji} \sin \theta_{ji}^t - \\ & B_{ji} \cos \theta_{ji}^t) = 0 \end{aligned} \right. \quad (10)$$

式中 P_{Lj}^t, Q_{Lj}^t 分别为电负荷节点 j 的有功和无功功率,计入了冷/热网循环水泵消耗的有功和无功功率。

2.4 能源站内部的运行约束

包括燃气发电机出力的爬坡约束和效率与输入天然气热功率关系约束^[17]:

$$\left\{ \begin{aligned} & -r_{\text{di}} \Delta t \leq P_G^t - P_G^{t-1} \leq r_{\text{ui}} \Delta t \\ & \eta_G^t = a_0 + a_1 P_{G^*}^t + a_2 (P_{G^*}^t)^2 + a_3 (P_{G^*}^t)^3 \quad (11) \\ & Q_{\text{fuel}}^t = P_G^t / \eta_G^t \end{aligned} \right.$$

式中各变量物理意义参见文献^[17]。

热水型和烟气型吸收式制冷机输入的余热功率^[18]为

$$\left\{ \begin{aligned} & \phi_{\text{water}}^t = \alpha_{\text{water}} (Q_{\text{fuel}}^t - P_G^t) \\ & \phi_{\text{smoke}}^t = \alpha_{\text{smoke}} (Q_{\text{fuel}}^t - P_G^t) \end{aligned} \right. \quad (12)$$

式中 $\alpha_{\text{water}}, \alpha_{\text{smoke}}$ 分别为缸套水和烟气余热因子。

由图1可知,热水型和烟气型吸收式制冷机的制冷功率分别由其对应的余热功率求得,而电制冷机的制冷功率则可由其耗电功率得出,各类制冷机的制冷功率为

$$\left\{ \begin{aligned} & \phi_{\text{cl}}^t = C_1 \phi_{\text{water}}^t \eta_{\text{hrs1}} \\ & \phi_{\text{c2}}^t = C_2 \phi_{\text{smoke}}^t \eta_{\text{hrs2}} \\ & \phi_{\text{c3}}^t = C_3 P_C^t \end{aligned} \right. \quad (13)$$

式中 C_1, C_2, C_3 均为热力系数; $\eta_{\text{hrs1}}, \eta_{\text{hrs2}}$ 均为回收效率。

由图1可知,换热机组通过回收高温缸套水供热,电热锅炉和燃气锅炉利用电能和天然气制热,其制热功率为

$$\left\{ \begin{aligned} & \phi_{\text{h1}}^t = \eta_{\text{hrs3}} \phi_{\text{water}}^t \\ & \phi_{\text{h2}}^t = \eta_{\text{H}} P_{\text{H}}^t \\ & \phi_{\text{h3}}^t = \eta_{\text{g}} f_{\text{H}}^t \cdot q_{\text{gas}} \end{aligned} \right. \quad (14)$$

式中 $\eta_{\text{hrs3}}, \eta_{\text{H}}, \eta_{\text{g}}$ 均为效率; P_{H}^t 为电热锅炉供热消耗的电功率; f_{H}^t 为燃气锅炉供热消耗的天然气流量; q_{gas} 为天然气热值。

供冷/热平衡方程:

$$\left\{ \begin{aligned} & [N_1^t \phi_{\text{cl}}^t + N_2^t \phi_{\text{c2}}^t + \phi_{\text{c3}}^t + x_{1,e} \cdot \\ & (\phi_{\text{c,dis}}^t - \phi_{\text{c,ch}}^t) = \phi_{\text{ctotal}}^t \\ & N_{\text{w}}^t \phi_{\text{h1}}^t + \phi_{\text{h2}}^t + \phi_{\text{h3}}^t + x_{1,h} \cdot \\ & (\phi_{\text{h,dis}}^t - \phi_{\text{h,ch}}^t) = \phi_{\text{htotal}}^t \end{aligned} \right. \quad (15)$$

燃气机组机端母线同样需满足交流潮流约束:

$$\left\{ \begin{aligned} & [P_G^t + x_{1,e}(P_{\text{dis}}^t - P_{\text{ch}}^t) - (P_{\text{pcs}}^t + P_{\text{phs}}^t + \\ & N_1^t P_{\text{c1}} + N_2^t P_{\text{c2}} + P_{\text{C}}^t + N_{\text{w}}^t P_{\text{w}} + P_{\text{H}}^t) - \\ & V_k^t \sum_{j=1}^n V_j^t (G_{kj} \cos \theta_{kj}^t + B_{kj} \sin \theta_{kj}^t) = 0 \\ & Q_G^t - (P_{\text{pcs}}^t \tan \varphi_{\text{pcs}} + P_{\text{phs}}^t \tan \varphi_{\text{phs}}) - \\ & V_k^t \sum_{j=1}^n V_j^t (G_{kj} \sin \theta_{kj}^t - B_{kj} \cos \theta_{kj}^t) = 0 \end{aligned} \right. \quad (16)$$

式中 $P_{\text{pcs}}^t / P_{\text{phs}}^t, \varphi_{\text{pcs}} / \varphi_{\text{phs}}$ 分别为能源站的冷/热源侧循环水泵消耗的电功率和功率因数角; $P_{\text{c1}}, P_{\text{c2}}, P_{\text{w}}$ 分别为单台烟气型、热水型制冷机和换热机组消耗的电功率; Q_G^t 为燃气发电机组的无功出力。

2.5 储能装置约束

储能装置约束除运行约束式(2)外,还需满足一些规划约束。目前,由于生产厂家对储能装置的生产一般都采用模块式的设计和封装,因此,每个节点储能装置的配置额定能量和功率的取值必须是离散的,可通过引入离散变量,将所有可能离散取值情况进行线性叠加来表示配置额定能量 E_a 和额定功率 ϕ_a :

$$\left\{ \begin{aligned} & E_a = \sum_{s=1}^{N_{Ea}} \xi_{s,a} E_{s,a}, \sum_{s=1}^{N_{Ea}} \xi_{s,a} \leq x_a \\ & \phi_a = \sum_{s=1}^{N_{\phi a}} \kappa_{s,a} \phi_{s,a}, \sum_{s=1}^{N_{\phi a}} \kappa_{s,a} \phi_{s,a} \leq x_a \end{aligned} \right. \quad (17)$$

式中 $E_{s,a}, \phi_{s,a}$ 分别为储能装置在 a 节点的第 s 种离散配置额定能量和功率的取值; $N_{Ea}, N_{\phi a}$ 分别为配置额定能量和功率的离散取值状态的总数; $\xi_{s,a}, \kappa_{s,a}$ 分别为第 s 种取值状态对应的 0-1 变量; x_a 为储能装置是否安装在节点 a 的 0-1 变量。

另外,还包括微网中储能装置安装点数量限制约束:

$$\sum_{a=1}^{N_{es}} x_a = N_{es} \quad (18)$$

式中 N_{es} 为微网中允许的储能装置安装点总数。

2.6 不确定性变量约束

令 C 为描述不确定变量波动范围的集合,包含

光伏出力 \tilde{P}_s^t 、冷/热负荷功率 $\tilde{\phi}_{in}^t$ 、电负荷有功功率 \tilde{P}_j^t 。采用盒式不确定集,可将不确定变量表示为期望值和扰动量两部分,即 $\tilde{P}_{sj}^t = P_{sj,ref}^t + \Delta\tilde{P}_{sj}^t$, $\tilde{\phi}_{in}^t = \phi_{in,ref}^t + \Delta\tilde{\phi}_{in}^t$, $\tilde{P}_{lj}^t = P_{lj,ref}^t + \Delta\tilde{P}_{lj}^t$ 。根据历史数据统计信息,可以确定光伏出力和冷/热/电负荷功率的预测值和扰动量范围,进而可得到不确定变量变化范围的上、下限,则集合 C 可表示为

$$C = \{(\tilde{P}_s^t, \tilde{\phi}_{in}^t, \tilde{P}_j^t) | \underline{P}_s^t \leq \tilde{P}_s^t \leq \bar{P}_s^t, \underline{\phi}_{in}^t \leq \tilde{\phi}_{in}^t \leq \bar{\phi}_{in}^t, \underline{P}_j^t \leq \tilde{P}_j^t \leq \bar{P}_j^t\} \quad (19)$$

3 Benders 分解法求解鲁棒优化模型

对于式(1)~(19)所示的 CCHP 园区微网中储冷、储热和储电装置的协调鲁棒优化配置模型,由于含有不确定变量,是模型求解的难点。求解此鲁棒优化模型的关键在于:①如何在光伏出力以及冷、热和电负荷这些不确定变量的波动的集合内,找到一组 $(\tilde{P}_s^t, \tilde{\phi}_{in}^t, \tilde{P}_j^t)$ 值,与最大化典型日运行费用的极端场景相对应;②如何在储能优化配置相关的决策变量集合中,找到一组决策变量(选址变量 x_a 、选取配置能量 E^a 和配置功率 ϕ_a 取值状态的 0-1 变量 $\xi_{s,a}$ 和 $\kappa_{s,a}$ 、气源出力 f_{sg}^t 以及配电网注入功率 P_{grid}^t)值,使得不确定变量在其波动范围内的任意取值下该组决策变量都能够满足优化模型中的约束条件,且使得在极端场景下对应的目标函数最小。该文采用 Benders 分解法求解此鲁棒优化配置模型^[19-20],可将此协调鲁棒优化配置模型分解为主问题和子问题。子问题寻找使得微网的日运行费用最大的不确定变量极端场景;主问题则针对极端场景,求解使得微网年等值投资和运行成本之和最小的储能设备的选址变量 x_a 、配置额定电量 E_a 和功率 ϕ_a 取值状态的 0-1 变量 $\xi_{s,a}$ 和 $\kappa_{s,a}$ 。通过主问题和子问题的交替求解,在确定内层子问题解/外层主问题解的情况下求解相应的主/子问题解,并循环迭代。其中,在求解主问题解的过程中根据子问题解的性质加入极点约束或极线约束到外层主问题,由此得到收敛的最优解。

3.1 子问题

在不确定变量波动的不确定集范围内,子问题

寻找使典型日园区微网运行费用最大对应的不确定变量 $(\tilde{P}_s^t, \tilde{\phi}_{in}^t, \tilde{P}_j^t)$ 极端场景,其目标函数为典型日园区微网运行费用最大:

$$z_1 = F_{sub}(\tilde{P}_s^t, \tilde{\phi}_{in}^t, \tilde{P}_j^t) = \max \sum_{t=1}^T (c_{gas} f_{sg}^t + c_{grid} P_{grid}^t + c_s \tilde{P}_s^t + c_{es}^t) \Delta t \quad (20)$$

约束条件包含式(1)、(2)、(7)~(19),在子问题中,不确定变量作为待求未知量,决策变量(选址变量 x_a 、选取配置能量 E^a 和配置功率 ϕ_a 取值状态的 0-1 变量 $\xi_{s,a}$ 和 $\kappa_{s,a}$ 、气源出力 f_{sg}^t 以及配电网注入功率 P_{grid}^t)为已知量。求解子问题得到最优解后,向主问题的约束条件中增加一个最优割集:

$$z_1 \geq \sum_{t=1}^T (c_{gas} f_{sg}^t + c_{grid} P_{grid}^t + c_s \tilde{P}_s^t + c_{es}^t) \Delta t \quad (21)$$

由于在园区微网中没有配置储能装置时子问题就已经有可行解,即此时已能够求解得到园区微网典型日运行费用最大对应的不确定变量极端场景,因此,在主问题传递给子问题某一储能装置配置方案时,必定增加了园区微网运行的灵活调控能力,使得子问题的可行域比没有配置储能装置时更大,此时肯定也有可行解。因此,子问题无需向主问题返回可行割集,只需返回最优割集。

子问题为连续非线性规划模型,可采用 GAMS 软件中的 CONOPT 求解器进行求解。

3.2 主问题

在不确定变量的极端场景情况下,主问题的目标函数为寻找使微网年等值投资和运行成本之和最小的储能优化配置方案:

$$F_{main} = [C_{F,c} \sum_{i=1}^{N_c} (k_{cE} \sum_{s=1}^{N_{Eci}} \xi_{s,i} E_{s,i} + k_{c\phi} \sum_{s=1}^{N_{\phi ci}} \kappa_{s,i} \phi_{s,i}) + C_{F,h} \sum_{n=1}^{N_h} (k_{hE} \sum_{s=1}^{N_{Ehn}} \xi_{s,n} E_{s,n} + k_{h\phi} \sum_{s=1}^{N_{\phi hn}} \kappa_{s,n} \phi_{s,n}) + C_{F,e} \sum_{j=1}^{N_e} (k_{eE} \sum_{s=1}^{N_{Eej}} \xi_{s,j} E_{s,j} + k_{e\phi} \sum_{s=1}^{N_{\phi ej}} \kappa_{s,j} \phi_{s,j})] + 365 z_1 \quad (22)$$

主问题的约束条件除包含子问题的最优割集式(21)外,还包括式(3)、(7)、(11)~(18),在主问题中,决策变量作为未知量,不确定变量 $(\tilde{P}_s^t, \tilde{\phi}_{in}^t, \tilde{P}_j^t)$ 为已知量。

主问题为混合整数非线性规划模型,可采用GAMS软件中的SBB求解器进行求解。

3.3 Benders 分解法的计算过程

采用Benders分解法求解CCHP园区微网中多类型储能装置鲁棒优化配置模型的步骤^[21]如下。

1)初始化。将原多类型储能装置鲁棒优化配置问题的目标函数最低界限 B_L 设置为 $-\infty$,最高界限 B_U 设置为 $+\infty$,在不确定变量的期望值场景下求解确定性优化问题,得到决策变量 $(x_a^{(0)}, \xi_{s,a}^{(0)}, \kappa_{s,a}^{(0)}, f_{sg}^{(0)}, P_{grid}^{(0)})$ 的初始值。

2)将步骤1所求得的决策变量初始值代入子问题,求解子问题,得到使得典型日微网运行费用最大的不确定变量当前值 $(\tilde{P}_s^{t(0)}, \tilde{\phi}_{in}^{t(0)}, \tilde{P}_j^{t(0)})$,令 $k=0$ 。

3)在主问题的约束条件中添加最优割集式:

$$B_L = F_{\text{main}}(x_{a,es}^{(k+1)}, \xi_{s,a}^{(k+1)}, \kappa_{s,a}^{(k+1)}, f_{sg}^{(k+1)}, P_{grid}^{(k+1)}) \quad (23)$$

并将子问题求解得到的不确定变量解 $(\tilde{P}_s^{t(k)}, \tilde{\phi}_{in}^{t(k)}, \tilde{P}_j^{t(k)})$ 作为已知量代入主问题,求解主问题得到决策变量的最优解 $(x_{a,es}^{(k+1)}, \xi_{s,a}^{(k+1)}, \kappa_{s,a}^{(k+1)}, f_{sg}^{(k+1)}, P_{grid}^{(k+1)})$,按式(23)更新最低界限 B_L 。

4)将主问题得到的决策变量解作为已知量代入子问题,求解子问题得到不确定变量最优解 $(\tilde{P}_s^{t(k+1)}, \tilde{\phi}_{in}^{t(k+1)}, \tilde{P}_j^{t(k+1)})$,即

$$B_U = 365F_{\text{sub}}(\tilde{P}_s^{t(k+1)}, \tilde{\phi}_{in}^{t(k+1)}, \tilde{P}_j^{t(k+1)}) + [C_{F,c} \sum_{i=1}^{N_c} (k_{cE} \sum_{s=1}^{N_{Eci}} \xi_{s,i} E_{s,i} + k_{c\phi} \sum_{s=1}^{N_{\phi ci}} \kappa_{s,i} \phi_{s,i}) + C_{F,h} \sum_{n=1}^{N_h} (k_{hE} \sum_{s=1}^{N_{Ehn}} \xi_{s,n} E_{s,n} + k_{h\phi} \sum_{s=1}^{N_{\phi hn}} \kappa_{s,n} \phi_{s,n}) + C_{F,e} \sum_{j=1}^{N_e} (k_{eE} \sum_{s=1}^{N_{Eej}} \xi_{s,j} E_{s,j} + k_{e\phi} \sum_{s=1}^{N_{\phi ej}} \kappa_{s,j} \phi_{s,j})] \quad (24)$$

按式(24)更新最高界限 B_U 。

5)当 $B_U - B_L \leq \delta$,则迭代结束,输出最优解;否则,令 $k=k+1$,返回步骤3。

4 算例分析

以某个CCHP园区微网为例,如图3所示,含有13个节点和12段管道的供冷/热网,54个节点和78个支路的供电网;能源站内部有燃气发电机、吸收式制冷机和换热机组等能量转换设备。购气、购电价格分别为3.5元/ m^3 、1.0228元/($\text{kW} \cdot \text{h}$)。微网中冷/热/电负荷典型日的总负荷曲线如图4所示;接入微网的光伏电站容量为15MW,典型日出力曲线如图5所示。

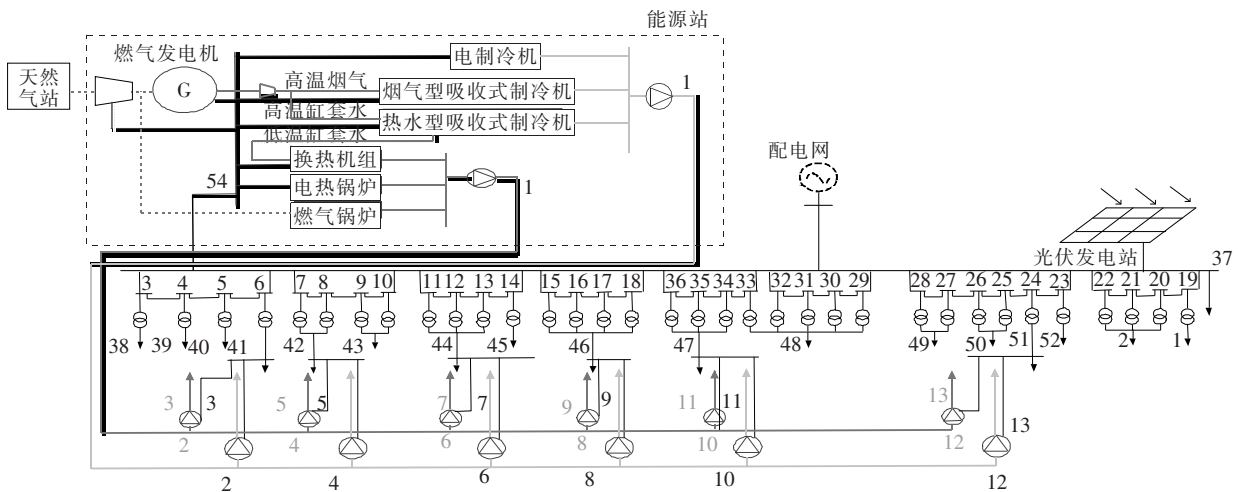


图3 某天然气冷热电联供园区微网

Figure 3 Structure of a CCHP campus microgrid

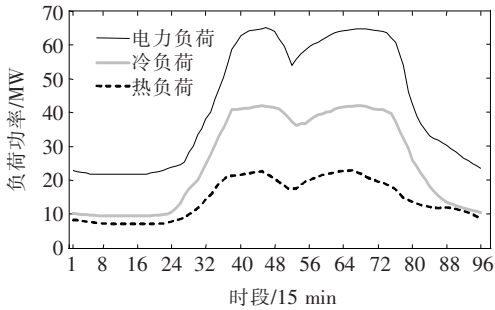


图 4 园区微网的冷、热、电典型日总负荷曲线

Figure 4 Total daily load curve of cooling, heating and electricity in the campus microgrid

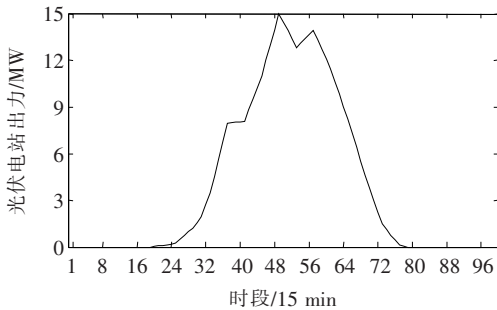


图 5 光伏电站典型日出力曲线

Figure 5 Daily power output curve of photovoltaic station

在储能装置中,蓄电池的单位额定能量和功率的投资费用分别为 3 000 元/(kW·h)、600 元/kW,单位功率运行维护费用为 0.12 元/kW,使用年限为 15 a;蓄冷罐的单位额定能量和功率的投资费用分别为 1 500 元/(kW·h)和 1 000 元/kW,单位功率运行维护费用为 0.10 元/kW,使用年限为 25 a;蓄热罐的单位额定能量和功率的投资费用为 1 500 元/(kW·h)和 1 000 元/kW,单位功率运行维护费用为 0.12 元/kW,使用年限为 25 a。3 种储能装置的折旧率均取 10%,最大安装点数均取 6,各储能装置的配置额定能量的最大和最小值均为 16、2 MW·h,离散档位间距为 2 MW·h,配置额定功率的最大值和最小值均为 8、1 MW,离散档位间距为 1 MW。电压安全限制的上、下限分别设置为 1.06、0.94 p.u.。优化计算采用的 GAMS 软件版本为 GAMS win64 24.5.6,所采用计算机的配置为 Intel(R) Core (TM) i7-9700 CPU @ 3.50 GHz,32 GB 内存。

4.1 确定性优化配置

在不考虑光伏出力和冷/热/电负荷功率的不确定波动条件下,以图 4、5 中各时段的功率值对

CCHP 园区微网中储冷、储热和储电装置进行确定性优化配置计算,所需的计算时间为 547.64 s,得到各种储能装置的优化配置方案,如表 1 所示,可以看出,在优化配置结果中,供冷、供电侧均在负荷侧配置了储能装置,供热侧则只在能源站节点 1 配置了蓄热罐,目标函数即微网年等值投资和运行总费用由优化配置前的 4.55×10^8 降为 4.30×10^8 元,其中各种储能装置的年等值投资费用为 0.095×10^8 元。可以看到,配置储能装置能够有效提高微网运行的经济性。

表 1 各种储能装置的优化配置方案

Table 1 Optimal configuration schemes of various energy storage devices

储能类型	位置	额定能量/(MW·h)	额定功率/MW
蓄电池	15	6	3
	19	2	1
蓄冷罐	1	10	1
	7	12	1
蓄热罐	1	12	2

园区微网中各子网典型日各时段的总负荷减去相应子网中所有储能装置的放能/储能功率后得到的功率曲线如图 6 所示,可以看到,配置了储能装置后,冷/热/电负荷与相应储能的功率差变化曲线与图 4 中的负荷曲线相比,峰谷差均有所减小,一天的功率变化曲线更为平稳。可见,多类型储能协调优化配置能够同时对冷/热/电负荷进行削峰填谷,更有利于园区微网的安全和经济运行。

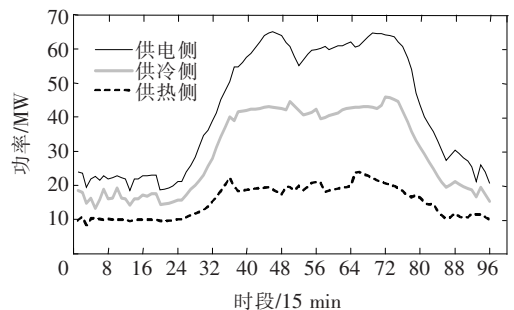


图 6 冷/热/电负荷与储能的功率差的变化曲线

Figure 6 Power changing curve of power supply side and cooling/heating side in the campus

4.2 鲁棒优化配置

当光伏出力以及冷/热/电负荷的不确定波动程度均取典型日各时段功率值的 $\pm 20\%$ 时,所得各类

储能的鲁棒优化配置方案如表2所示,可以看到,当考虑功率不确定波动特性后,储能鲁棒配置方案与表1确定性配置方案相比,供电网中的蓄电池安装节点由2个增加到3个,总配置额定能量和功率由 $8\text{ MW}\cdot\text{h}$ 、 4 MW 增加到 $28\text{ MW}\cdot\text{h}$ 、 11 MW ,供冷网和供热网中均在源节点1和负荷节点11配置了储能,蓄冷罐和蓄热罐的总配置额定功率都由2增加到6 MW,储能总配置额定功率的增加主要是为了快速平抑不确定功率波动对CCHP园区微网运行的不利影响,提高微网运行的安全性。另外,求解鲁棒优化配置模型所需的计算时间仅为 $1\,260.94\text{ s}$,能够满足实际工程应用的需求。

表2 考虑不确定性时各种储能装置的优化配置方案

Table 2 Optimal configuration of various energy storage devices considering the uncertainty

储能类型	位置	额定能量/(MW·h)	额定功率/MW
蓄电池	1	10	4
	22	8	3
	54	10	4
蓄冷罐	1	12	4
	11	6	2
蓄热罐	1	8	3
	11	8	3

将确定性优化配置和 $\pm 20\%$ 功率不确定波动的鲁棒优化配置计算结果中的燃气机组出力、各种储能装置出力和配电网注入功率这些决策变量值,以及鲁棒优化配置计算得到的光伏出力和冷/热/电负荷功率不确定量的极端场景值一起代入进行CCHP园区微网一天各个时段能量流计算,得到的结果进行比较分析。以供电侧2号节点为例,该节点各时段的电压在2种优化配置方案下的比较如图7所示,可以看到,当园区微网中由于光伏出力以及冷热电负荷不确定波动出现极端场景时,确定性优化配置方案在某些时段不能保证微网各供电节点的电压满足安全运行限制要求,存在节点电压越下限的情况;而鲁棒优化配置方案则可以保证微网运行的每个时段电压都满足安全运行限制要求,从而验证了所提出方法获得的多类型储能优化配置方案对于光伏出力和负荷功率的不确定波动具有鲁棒性。

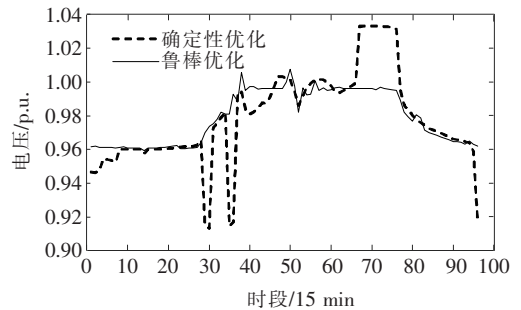


图7 极端场景下不同优化配置方案下的节点2电压对比

Figure 7 Voltage comparison under different optimal configuration schemes in extreme scenarios

在光伏出力和冷/热/电负荷功率的不同不确定波动程度下,对CCHP园区微网进行多类型储能装置鲁棒优化配置计算得到的费用对比,如表3所示,可以看到,随着不确定程度的增大,储能装置的年等值投资和微网年运行费用都有所增大。这是因为当需要平抑冷/热/电负荷和光伏出力的功率不确定波动程度增大,对于园区微网运行的鲁棒性要求也越高,优化方案的费用就随之增大。

表3 不同不确定程度下的鲁棒优化配置结果比较

Table 3 Comparison of results of robust optimal configuration under different uncertainty

不确定波动程度/%	年费用/(10^8 元)		总费用/(10^8 元)	计算时间/s
	等值投资	运行		
± 10	0.12	4.39	4.51	1 259.25
± 15	0.16	4.47	4.63	1 260.31
± 20	0.19	4.54	4.73	1 260.94
± 25	0.20	4.59	4.79	1 261.87
± 30	0.21	4.62	4.83	1 261.44

4.3 与单纯优化配置蓄电池的结果比较

比较CCHP园区微网多类型储能优化配置(情形1)和只优化配置蓄电池(情形2)的结果,对确定性优化配置方案与考虑 $\pm 20\%$ 功率不确定波动的鲁棒优化配置方案的储能年等值投资费用和微网年运行费用进行比较,如表4所示,可以看到,情形1、2的确定性优化配置方案的总费用比不配置储能时的总费用有所降低,主要是由于储能的削峰填谷提高了CCHP园区微网运行的经济性。而情形1与情形2的确定性优化配置方案相比总费用降低了 0.13×10^8 元,情形1与情形2的鲁棒配置方案相比总费用降低了 0.12×10^8 元。这是因为多类型储

能优化配置能够同时对冷/热/电负荷进行削峰填谷,能够更有效地提高 CCHP 园区微网运行的经济性,且蓄冷罐和蓄热罐的单位额定能量投资费用比蓄电池低,能够降低储能投资费用。可见,在 CCHP 园区微网中配置多种类型储能,比单纯配置蓄电池更有利于提高园区微网运行的经济性。

表 4 与单纯配置蓄电池的结果比较

Table 4 Comparison of results between multiple types energy storages and battery energy storage

配置方案	年费用/(10 ⁸ 万元)		总费用/ (10 ⁸ 元)	计算时间/ s
	等值投资	运行		
无配置储能	—	4.55	4.55	260.22
情形 1 确定性	0.09	4.30	4.39	547.64
情形 2 确定性	0.15	4.37	4.52	415.31
情形 1 鲁棒	0.19	4.54	4.73	1 260.94
情形 2 鲁棒	0.24	4.61	4.85	1 024.46

5 结语

以储能设备年等值投资费用和微网年运行费用之和最小为目标建立了考虑光伏出力和负荷功率不确定性的 CCHP 园区微网多类型储能协调鲁棒优化配置模型,并采用 Benders 分解法求解得到微网中储冷、储热和储电装置的选址及额定能量和功率配置方案,通过算例分析得到结论:

1)所提出的 CCHP 园区微网多类型储能鲁棒优化配置方案能够保证微网在光伏出力和冷/热/电负荷功率不确定波动条件下的安全运行,比确定性优化配置方案更符合实际 CCHP 园区微网的运行需求;

2)在 CCHP 园区微网的供冷/热/电侧配置储冷/热/电罐,通过多种储能的互补运行,有利于平抑冷/热/电负荷和光伏出力的不确定波动,实现对多种负荷的削峰填谷,更有效地降低 CCHP 园区微网的运行费用。

参考文献:

[1] 李立鸣,何乐彰,熊宁,等. 基于鲁棒多目标优化模型的可再生能源消纳分析[J]. 智慧电力,2019,47(5):17-24.

LI Liming, HE Lezhang, XIONG Ning, et al. Renewable

energy absorption analysis based on robust multi-objective optimization model[J]. Smart Power, 2019, 47(5): 17-24.

[2] 康慨,邓少平,张超,等. 考虑联络线功率稳定的微电网鲁棒经济调度模型[J]. 中国电力,2019,52(6):60-67.

KANG Kai, DENG Shaoping, ZHANG Chao, et al. Robust economic dispatch model of interconnected microgrid considering tie line power stability[J]. Electric Power, 2019, 52(6): 60-67.

[3] 王源,南海鹏,关欣. 风水储微电网优化调度策略研究[J]. 高压电器,2020,56(5):216-222.

WANG Yuan, NAN Haipeng, GUAN Xin. Optimal scheduling strategy of wind-hydro-storage micro-grid[J]. High voltage apparatus, 2020, 56(5): 216-222.

[4] 汤翔鹰,胡炎,郑棣,等. 考虑电网灵活性的微电网储能优化配置方法[J]. 供用电,2020,37(12):54-60.

TANG Xiangying, HU Yan, ZHENG Di, et al. Research on optimal configuration of energy storage in microgrid considering grid flexibility[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(12): 54-60.

[5] 唐忠,田晨,资容涛. 多微电网互联系统的储能容量配置[J]. 电测与仪表,2019,56(4):95-100.

TANG Zhong, TIAN Chen, ZI Rongtao. Energy storage capacity configuration of inter-connected multi-microgrids[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(4): 95-100.

[6] 严海波,康林贤,周冬. 考虑随机性的微电网日前调度与储能优化模型[J]. 电网与清洁能源,2019,35(11):61-65.

YAN Haibo, KANG Linxian, ZHOU Dong. Optimal model of day-ahead dispatching and energy storage for micro-grid considering randomness[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(11): 61-65.

[7] Guo L, Liu W, Cai J, 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: 433-445.

[8] 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 Wanhuan, et al. Optimal configuration of multi-energy storage in regional integrated energy system considering multi-energy com-

- plementation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39 (1): 118-126.
- [9] 徐海华,王旭东,朱星阳,等. 用户侧综合能源系统中能源储能优化配置模型研究[J]. 电力需求侧管理, 2020, 22(2): 13-20.
XU Haihua, WANG Xudong, ZHU Xingyang, et al. Research on the optimal configuration of energy storage in user side integrated energy system[J]. Power Demand Side Management, 2020, 22 (2): 13-20.
- [10] 许周,孙永辉,谢东亮,等. 计及电/热柔性负荷的区域综合能源系统储能优化配置[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 53-59.
XU Zhou, SUN Yonghui, XIE Dongliang, et al. Optimized configuration of energy storage for integrated region energy system considering electric/thermal flexible load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 53-59.
- [11] 杨天蒙,韩震焘,史喆,等. 能源互联网系统中复合储能协调优化配置方法研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(5): 8-13.
YANG Tianmeng, HAN Zhentao, SHI Zhe, et al. Coordinated optimal configuration method of hybrid energy storage in energy internet system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(5): 8-13.
- [12] 张婷. 分布式蓄热在集中供热系统中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [13] 王彦虹,郇能灵,嵇康. 含大规模风光电源的配电网储能电池选址定容优化方案[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(2): 23-30.
WANG Yanhong, TAI Nengling, JI Kang. Optimal battery storage allocation in distributed network with large-scale of wind and photovoltaic generation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32 (2): 23-30.
- [14] 吴勇,吕林,许立雄,等. 考虑电/热/气耦合需求响应的多能微网多种储能容量综合优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 1-10.
WU Yong, LV Lin, XU Lixiong, et al. Optimized allocation of various energy storage capacities in a multi-energy micro-grid considering electrical/thermal/gas coupling demand response[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 1-10.
- [15] Liu X. Combined analysis of electricity and heat networks[D]. Cardiff: Cardiff University, 2013.
- [16] 潘昭光,孙宏斌,郭庆来. 面向能源互联网的多能流静态安全分析方法[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1627-1634.
PAN Zhaoguang, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Energy internet oriented static security analysis method for multi-energy flow[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1627-1634.
- [17] 林舜江,杨智斌,卢苑,等. 含光伏的天然气管网冷热电联供园区微网能量优化调度[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2019, 47(3): 9-19.
LIN Shunjiang, YANG Zhibin, LU Yuan, et al. Optimal energy scheduling of photovoltaic natural gas, cooling, heating and power co-supply park micro-network[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(3): 9-19.
- [18] 王加龙. 基于内燃机余热梯级利用的冷热电联供系统特性及优化运行研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [19] 丁浩,高峰,刘坤,等. 基于鲁棒优化的含风电工业微电网经济调度模型[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 166-173.
DING Hao, GAO Feng, LIU Kun, et al. An economic dispatch model in an industrial microgrid with wind power based on robust optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39 (17): 166-173.
- [20] JIANG Ruiwei, WANG Jianhui, ZHANG Muhong, et al. Two-stage minimax regret robust unit commitment [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28 (3): 2271-2282.
- [21] 卢艺,梁俊文,程韧俐,等. 考虑光伏和电动汽车不确定性的配电网鲁棒经济调度[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(9): 42-50.
LU Yi, LIANG Junwen, CHENG Renli, et al. Robust economic dispatching of distribution network including photovoltaic and electric vehicles[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37 (9): 42-50.