# 含相变储能的冷热电联供型微网多目标优化配置

孙 亮1,李佳雯1,杨心贺1,孙立国2

(1. 东北电力大学 电气工程学院,吉林 吉林 132012;2. 华能九台电厂,吉林 长春 130022)

摘要:为应对日益增长的能源需求以及实现中国"十四五"规划的"双碳"目标,提出一种含相变储能的冷热电 联供型微网。从经济、能耗和碳排放3个角度出发建立微网多目标优化配置模型,并采用基于分解的多目标 优化算法对模型进行求解,从而得到一系列可行的备选方案,同时利用基于区间直觉模糊信息的双向投影方 法进行决策,得到最优配置方案。以某商业园区为例验证所提微网的可行性和有效性。

**关键词:**相变储能;冷热电联供;微网;多目标;优化配置 中图分类号:TM 727 **文献标志码:**A

DOI:10.16081/j.epae.202110023

## 0 引言

冷热电联供 CCHP (Combined Cooling, Heating and Power)型微网集供电、供冷、供热于一体,通过 电、冷、热三联供的方式可实现能源的梯级利用以提 高能效<sup>[1]</sup>。将 CCHP 型微网与分布式可再生能源整 合,可实现多能互补,有效解决分布式能源上网难的 问题。

目前关于CCHP型微网的规划配置以及优化运行的研究已经取得了很多成果<sup>[26]</sup>。文献[2]基于能源的耦合、互补、互动关系,建立计及综合需求响应的微网容量优化模型;文献[3]将储能电站服务应用到CCHP型参微网系统中,建立考虑2个不同时间尺度问题的双层规划模型;文献[4]提出不同运行策略下的能量流函数,以实现对CCHP系统的优化调度;文献[5]采用带约束因子的粒子群优化算法求解优化设备容量和运行参数。文献[6]基于Logistic函数模糊响应机理优化分时电价,引导用户合理转移负荷,降低了用户和配电网两大利益主体的运行成本。CCHP与可再生能源的有机结合,可实现能源转型,降低碳排放。但传统的CCHP型微网的一次能源消耗和碳排放仍比较高,无法有效推进"十四五"规划提出的"双碳"目标的实现。

CCHP型微网的碳排放主要来源于以天然气为 燃料的燃气轮机和燃气锅炉,微网内热负荷需求决 定了天然气的消耗量和碳排放量。电加热设备和大 容量储热技术具有巨大的发展空间和应用潜力。传 统储热方式以水蓄热为主,存在储能密度低、散热 快、水温难以控制等缺点,阻碍了储热技术的应用。 而相变储能 PCMES(Phase Change Material Energy Storage)具有高能量密度、充放能过程温度稳定等

收稿日期:2021-05-26;修回日期:2021-08-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877033)

优势,受到了广泛关注。通过将 PCMES 技术集成到 CCHP 系统和可再生能源系统中,可以降低可再生 能源发电与微网冷 / 热负荷需求之间的不匹配度。 文献[7]将相变材料嵌入建筑墙体,建立电-热联合 模型,提出优化消纳系统的储能控制策略;文献[8] 建立计及热耗散的热力侧和计及无功调节能力的电 力侧封装模型。文献[9-11]分别考虑风光热不确定 性,建立含有 PCMES 的建筑电-热联合调度模型。 上述研究均是为建筑室内温度调控而将相变材料嵌 入墙体进行储热,且均为含 PCMES 微网的优化调 度,有必要对含有非墙体式的集成 PCMES 系统的微 网进行合理的优化配置,在实现经济建设的基础上, 实现低能耗、低碳目标。

由于微网的优化配置是对各设备进行定容,同 时需要考虑多方面的因素,以确保配置方案的综合 性能最优,因此需建立多目标优化配置模型。多目 标粒子群优化算法是最常用的多目标优化模型的求 解方法,但由于微网的多目标优化配置模型是离散 化的优化问题,粒子群优化算法易陷入局部最优。

本文构建含相变储能的冷热电联供(PCMES-CCHP)型微网,并从经济、能耗和碳排放3个角度出 发提出多目标优化配置模型。采用多目标进化算法 得到Pareto前沿解,并采用基于直接模糊理论的双 向投影法对其进行决策,从而得到最优配置方案。

## 1 PCMES-CCHP型微网结构

PCMES-CCHP型微网结构如图1所示,该微网 以光伏和燃气轮机为主要的电能生产单元,采用 PCMES代替传统CCHP系统的水蓄热,具有更优良 的储热性能且价格低廉。PCMES-CCHP型微网由于 具有自主发电、储能的功能,可实现孤岛离网运行, 同时也可与大电网互联,实现电能的双向传输。

由图1可见,系统主要包括能源的输入、生产、 转换、储能、消耗5个环节。系统中的电能来源于光

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877033)





## 图1 PCMES-CCHP型微网结构

## Fig.1 Structure of PCMES-CCHP microgrid

伏发电和以天然气为燃料的燃气轮机发电。当系统 自身供电能力不足或处于谷电时段时也可从上级 电网购电;而当系统有富余电能自身不能消纳时,可 售给电网,从而缓解电网压力,且能创造经济收益。 燃气轮机在发电的同时会产生热量,可以对热量进 行回收利用,在用电高峰时段,燃气轮机工作于"以 电定热"模式,在谷电时段,燃气轮机工作于"以热 定电"模式。燃气锅炉以天然气为燃料产生热能。 热泵作为微网中电网与热网的耦合设备,将电能转 化为热能供给热负荷或在谷电时段储存到 PCMES 中。电制冷机和溴化锂吸收式制冷机分别将电能和 热能转化为冷能以满足冷负荷需求。微网的储能 系统包括电储能和热储能,电储能采用蓄电池,热 储能采用PCMES。本文中的电负荷主要为微网内 的电器、照明设备等负荷,热负荷为微网内冬季供暖 负荷和生活热水,冷负荷为微网内夏季空调负荷。

## 2 PCMES-CCHP型微网的数学模型

## 2.1 PCMES模型

PCMES 是利用相变材料的相态变化过程实现 热量的吸收和释放<sup>[12]</sup>,如附录 A图 A1 所示。在储能 密度方面, PCMES 介于显热储热和化学储热之间, 储热性能明显优于显热储热,且 PCMES 系统能够利 用相变材料的熔化 / 凝固焓在几乎恒定的温度下储 存热量。在相变过程中相变材料体积变化小,方便 储存,且能保持稳定的化学性质,因此使用寿命长, 可达 30 a<sup>[12]</sup>。PCMES 环节的换热量控制原理如附录 A图 A2 所示。

假设流过 PCMES 系统出口温度与相变材料温度  $T_{PCM}$ 相同, t 时刻 PCMES 系统吸收热量  $P_{PCM}(t)$  可表示为:

$$P_{\rm PCM}(t) = \alpha c_{\rm w} m_{\rm s} \left( T_{\rm in}(t) - T_{\rm PCM}(t) \right) \tag{1}$$

式中: $\alpha$ 为流入PCMES系统的流量百分比; $c_{w}$ 为水比 热,单位为kJ/(kg·°C); $m_{s}$ 为PCMES系统的总流 量,单位为kg/s; $T_{in}(t)$ 为t时刻PCMES系统入口温 度,单位为°C。

在 PCMES 系统与 CCHP 系统的热交换过程中, t

时刻PCMES系统储热量 $Q_{PCM}(t)$ 可表示为:

$$Q_{\text{PCM}}(t) = Q_{\text{PCM}}(t_0) + \int_{t_0}^{t} \left( H_{\text{PCM}}(\tau) - H_{\text{loss}}(\tau) \right) d\tau \quad (2)$$

式中: $Q_{PCM}(t_0)$ 为PCMES系统在初始时刻 $t_0$ 的储热 量,单位为kJ; $H_{PCM}(\tau)$ 为 $\tau$ 时刻PCMES系统与CCHP 系统的交换功率,单位为kW; $H_{loss}(\tau)$ 为 $\tau$ 时刻PCMES 系统自身热量耗散功率,单位为kW。

假设当相变材料处于最低允许温度时,其储热量为0,当相变材料处于最高允许温度时,其储热量为100%,则该PCMES系统存储的最大热量 Q<sub>PCM.max</sub>可表示为:

$$Q_{\text{PCM, max}} = \Delta Q_{\text{PCM}} + \int_{T_{\text{PCM, min}}}^{T_{\text{PCM}}} c_{\text{sp}} m_{\text{PCM}} dt + \int_{T_{\text{PCM}}}^{T_{\text{PCM, max}}} c_{\text{lp}} m_{\text{PCM}} dt \quad (3)$$
$$\Delta Q_{\text{PCM}} = m_{\text{PCM}} \Delta H_{\text{m}} \qquad (4)$$

式中: $T_{PCM}$ 为相变材料的相变温度,单位为°C; $T_{PCM,min}$ 、  $T_{PCM,max}$ 分别为相变材料的最低、最高允许温度,单位为°C; $c_{sp}$ 、 $c_{lp}$ 分别为固态、液态下相变材料的比热 值,单位为kJ/(kg·°C); $m_{PCM}$ 为装置中相变材料的 质量,单位为kg; $\Delta H_{m}$ 为相变材料的单位相变潜热,单 位为kJ/kg; $\Delta Q_{PCM}$ 为相变装置的储热量,单位为kJ。

将t时刻 PCMES 系统的储热状态 $S_{PCM}(t)$ 定义为:

$$S_{\text{PCM}}(t) = \frac{Q_{\text{PCM}}(t)}{Q_{\text{PCM, max}}} \times 100\%$$
(5)

$$S_{\rm PCM}(t) = S_{\rm PCM}(t-1) + \frac{Q_{\rm PCM, char}(t) - Q_{\rm PCM, dis}(t)}{Q_{\rm PCM, max} - Q_{\rm PCM, min}}$$
(6)

 $Q_{\text{PCM, char}}(t) - Q_{\text{PCM, dis}}(t) = (H_{\text{PCM, char}}(t) - H_{\text{PCM, dis}}(t))\Delta t$  (7) 式中: $S_{\text{PCM}}(t-1)$ 为t-1时刻 PCMES 系统的储热状态;  $Q_{\text{PCM, char}}(t)$ 、 $Q_{\text{PCM, dis}}(t)$ 分别为t时刻 PCMES 系统的充、 放能量; $Q_{\text{PCM, min}}$ 为 PCMES 系统最小储热量; $H_{\text{PCM, char}}(t)$ 、  $H_{\text{PCM, dis}}(t)$ 分别为t时刻 PSMES 系统的充、放能功率;  $\Delta t$ 为单位时间段时长。

#### 2.2 其他设备模型

1)光伏。

光伏单元基于太阳辐照度产生的电能*P*<sub>PV</sub>(*G*)可表示为:

$$P_{\rm PV}(G) = P_{\rm PVN} G/G_{\rm STC} \tag{8}$$

式中: $P_{PVN}$ 为光伏组件的额定输出功率;G为光照强度; $G_{STC}$ 为标准光照强度,取值为1000 W / m<sup>2</sup>。

2)燃气轮机。

燃气轮机在发电的同时,可对其产生的热量进行回收,用于供热。燃气轮机的产热功率<sup>[13]</sup>可表示为:

$$H_{\rm GT_H} = P_{\rm GT_E} \varepsilon \eta_{\rm rec} \tag{9}$$

$$N_{\rm GT} = \frac{P_{\rm GT\_E}}{\eta_{\rm GT\_E}} \tag{10}$$

式中: $H_{GT_H}$ 为燃气轮机的余热回收功率,即产热功率; $\varepsilon$ 为燃气轮机的热电比; $\eta_{re}$ 为系统的余热回收

率;N<sub>GT</sub>为燃气轮机消耗的天然气量;P<sub>GTE</sub>为燃气轮 机的实际发电功率;η<sub>GTE</sub>为燃气轮机的实际发电 效率。

3) 燃气锅炉。

燃气锅炉的输出特性取决于其自身性能和负荷 需求特性,其输出的热功率可由式(11)计算得出。

$$H_{\rm GB\_H} = \eta_{\rm GB} N_{\rm GB} \tag{11}$$

式中: $H_{GB_H}$ 为燃气锅炉输出的热功率,单位为kW;  $\eta_{GB}$ 为燃气锅炉的制热效率; $N_{GB}$ 为燃气锅炉消耗的 天然气量,单位为kg。

4)热泵。

在本文的CCHP型微网中,热泵将谷电或可再 生能源波动发电量转化为热量用于供热或储存于 PCMES系统中,其是实现电网-热网耦合的重要 纽带。

热泵的数学模型为:

$$H_{\rm HP}(t) = C_{\rm eh} P_{\rm HP}(t) \tag{12}$$

式中: $H_{HP}(t)$ 为t时刻热泵的热输出功率; $C_{eh}$ 为热 泵的电热转换系数; $P_{HP}(t)$ 为t时刻热泵的电输入 功率。

5)蓄电池。

蓄电池是一种最常规的储电设备,其寿命主要 取决于放电深度,因此蓄电池的充放电要维持在合 适的区间内,避免过放或过充。通常采用荷电比表 征蓄电池的电量状态,即蓄电池当前电量与最大允 许电量的比值,如式(13)和式(14)所示。

$$S_{\rm bat}(t) = \frac{E_{\rm bat}}{E_{\rm max}} \tag{13}$$

$$S_{\text{bat}}(t) = S_{\text{bat}}(t-1) + \left(\gamma \eta_{\text{char}} P_{\text{char}}(t) - \frac{1-\gamma}{\eta_{\text{dis}}} P_{\text{dis}}(t)\right) \frac{\Delta t}{E_{\text{max}}}$$
(14)

式中: $E_{bat}$ 为蓄电池当前电量; $E_{max}$ 为蓄电池最大允许 电量; $P_{char}(t)$ 、 $P_{dis}(t)$ 分别为蓄电池的充、放电功率; $\gamma$ 为用于表征蓄电池充放电状态的0-1变量,其值为0 表示蓄电池充电,为1表示蓄电池放电; $\eta_{char}$ 、 $\eta_{dis}$ 分 别为蓄电池的充、放电效率。

6)电制冷机。

电制冷机的制冷效果可用制冷系数来表示,如 式(15)所示。

$$Q_{\rm EAC} = E_{\rm EAC} \eta_{\rm EAC} \tag{15}$$

式中: $Q_{EAC}$ 为电制冷机的制冷量,单位为kW; $E_{EAC}$ 为电制冷机的耗电量,单位为kW; $\eta_{EAC}$ 为电制冷机的制冷系数,其值一般在3~4之间。

7) 溴化锂吸收式制冷机。

溴化锂吸收式制冷机的制冷效果主要取决于余 热蒸汽的温度<sup>[13]</sup>,其制冷系数可由式(16)表示。

$$\eta_{\rm AR} = Q_{\rm C} / (Q_1 + A) \approx Q_{\rm C} / Q_1$$
 (16)

式中: $\eta_{AR}$ 为溴化锂吸收式制冷机的制冷系数; $Q_c$ 为 溴化锂吸收式制冷机的制冷量,单位为kW; $Q_1$ 为溴 化锂吸收式制冷机消耗的热量,单位为kW;A为系 统能耗,单位为kW,由于溴化锂吸收式制冷机能耗 很小,因此可忽略不计。

## 3 系统规划配置模型

#### 3.1 目标函数及基本约束条件

本文从经济、能耗和碳排放3个角度出发,建立 多目标模型对PCMES-CCHP型微网进行规划配置, 规划光伏、燃气轮机和燃气锅炉的装机容量,蓄电池 容量,PCMES的容量以及其他各类能源转换设备的 容量。

1) 经济指标。

以微网初始投资成本最小化为目标,该成本包括各发电机组、发热机组、储能设备和能量转换设备的投资费用 $C_{in}$ ,所有设备在生命周期内的运行维护成本 $C_{op}$ ,燃气轮机和燃气锅炉的燃料成本 $C_{gas}$ ,以及微网与电网的交互成本 $C_{grid}$ ,如式(7)所示。

$$C = C_{\rm in} + C_{\rm op} + C_{\rm gas} + C_{\rm grid} \tag{17}$$

2)能耗指标。

能源是社会发展的支柱,然而能源是有限的, PCMES-CCHP型微网的稳定运行会消耗大量的一次 能源,因此,减少一次能源的使用是 PCMES-CCHP 型微网规划的关键。本文将 PCMES-CCHP 型微网 购买的电量 $N_{\rm E}$ 和天然气量 $N_{\rm gas}$ 作为该系统的一次能 源消耗量 $N_{\rm energy}$ ,可表示为:

$$N_{\text{energy}} = N_{\text{E}} + N_{\text{gas}}$$
 (18)  
3)碳排放指标。

PCMES-CCHP型微网在发热发电的同时会排放 一些有害气体污染环境,同时会造成温室效应,甚至 危害人类的身体健康。为积极响应低碳经济、可持 续发展战略的倡议,本文以碳排放量最小化为目标, 以实现 PCMES-CCHP型微网低碳环保。微网的碳 排放量可表示为:

$$N_{\rm CO_2} = \lambda_{\rm e} P_{\rm grid\_buy}(t) + \lambda_{\rm h} N_{\rm gas}$$
(19)

式中: $N_{co_2}$ 为微网的碳排放量; $\lambda_e$ 为单位电量的碳转 换系数; $P_{grid_{buy}}(t)$ 为t时刻微网从电网购买的电量;  $\lambda_b$ 为单位天然气的碳转换系数。

约束条件包括等式约束和不等式约束,是确保 系统安全稳定运行的关键。等式约束主要为电功率 平衡约束、热功率平衡约束和冷功率平衡约束;不等 式约束为设备的输出功率约束和运行状态约束以及 与电网交互功率约束,这些约束与常规的微网约束 条件相同<sup>[13]</sup>。

为保证 PCMES 正常工作和寿命,其约束条件

如下:

$$\begin{cases} 0 \leq Q_{\text{PCM, char}}(t) \leq Q_{\text{PCM, char}}^{\max} \\ 0 \leq Q_{\text{PCM, dis}}(t) \leq Q_{\text{PCM, dis}}^{\max} \\ \underline{S}_{\text{PCM}} \leq S_{\text{PCM}}(t) \leq \overline{S}_{\text{PCM}} \end{cases}$$
(20)

式中: $Q_{PCM, char}^{max}$ 、 $Q_{PCM, dis}^{max}$ 分别为PCMES最大充、放能量;  $\overline{S}_{PCM}$ 、 $\underline{S}_{PCM}$ 分别为PCMES状态上、下限。

## 3.2 模型求解算法及多准则决策方法

3.2.1 基于分解的多目标进化算法

本文用基于分解的多目标进化算法对 PCMES-CCHP 型微网优化配置模型进行求解。该算法是将 一个多目标优化问题分解为若干个标量子问题,并 对它们同时进行优化,得到一个由若干非支配解组 成的 Pareto 最优前沿,具体步骤<sup>[14]</sup>如下。

假设:第*j*个目标函数为 $V^{j} = F(\varphi^{j}), \varphi^{j}$ 为第*j*个子 问题的当前解;  $Z = [z_{1}, z_{2}, \dots, z_{m}]$ 且 $z_{i} = \min(f_{1}(X), f_{2}(X), \dots, f_{n}(X))$ ,其中*m*为自变量的数量,*n*为目标 函数的数量,*X*为当前解, $f_{1}(X), f_{2}(X), \dots, f_{n}(X)$ 为 当前解对应的各个目标函数值; $\lambda^{1}, \lambda^{2}, \dots, \lambda^{n}$ 为均匀 分布的*n*个权重向量; *W*为一个外部种群,用来存放 当前搜索到的非支配解。

1)初始化。在可行空间内随机生成初始种群  $X = [\varphi^1, \varphi^2, \dots, \varphi^n]$ ,设置 W初始为空,同时计算任意 2个权重向量间的欧氏距离,并找到每个权重向量 的L个最近的索引  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_L$ 构成索引向量  $B = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_L]$ 。

2)从1~L中随机选取2个序号p,q,运用遗传算 子由 $\varphi^{p}$ 和 $\varphi^{q}$ 产生新的解 $y_{o}$ 

3)运用基于测试问题的修复和改进启发由 *y* 产生 *y*'。如果  $\forall j = 1, 2, ..., n, f_{z_i} < f_j(y'), 则更新 z_i = f_i(y')。$ 

4)采用切比雪夫聚合方法得到*n*个标量优化子问题,其中每个子问题g<sup>te</sup>可表示为:

$$g^{\text{te}}(\boldsymbol{X} \mid \boldsymbol{\lambda}^{j}, \boldsymbol{Z}) = \max_{i=1, 2, \cdots, m} \left\{ \boldsymbol{\lambda}_{i}^{j} \middle| f_{i}(\boldsymbol{X}) - \boldsymbol{Z} \right\}$$
(21)

$$\boldsymbol{\lambda}^{j} = [\lambda_{1}^{j}, \lambda_{2}^{j}, \cdots, \lambda_{m}^{j}]^{\mathrm{T}}$$
(22)

式中: $\lambda_{1}^{j}$ 、 $\lambda_{2}^{j}$ 、…、 $\lambda_{m}^{j}$ 为第*j*个目标函数下*m*个自变量的权重。

如果  $\forall j \in B$ , 有 $g^{\text{te}}(y' | \lambda^{j}, Z) \leq g^{\text{te}}(\varphi^{j} | \lambda^{j}, Z)$ , 则 令  $\varphi^{j} = y' \setminus V^{j} = F(\varphi^{j})_{\circ}$ 

5)更新 W,从中删除所有可被 F(y')支配的向量,如果 W 中没有可以被 F(y')支配的向量,则将 F(y')加入 W。

6)重复步骤2)—5)直到满足终止条件时停止, 并输出 ₩。

与其他多目标优化算法相比,该算法计算复杂 度较低,利用一些简单的分解算法就可以得到相近 的精度。

3.2.2 基于区间直觉模糊信息的双向投影决策方法

在多准则决策问题中,决策者对评价信息的直 觉往往是模糊的。评价准则权重的确定对于科学合 理的评价具有重要作用。在准则权重未知和区间 直觉模糊信息的情境下,充分考虑正、负理想方案与 备选方案的关系,采用双向投影的决策方法具体步 骤<sup>[15]</sup>如下。

1)确定多准则决策问题的备选方案集*X*和准则集*R*:

$$\boldsymbol{X} = \left\{ \boldsymbol{X}_1, \boldsymbol{X}_2, \cdots, \boldsymbol{X}_i, \cdots, \boldsymbol{X}_d \right\}$$
(23)

$$\boldsymbol{R} = \left\{ \boldsymbol{R}_1, \boldsymbol{R}_2, \cdots, \boldsymbol{R}_j, \cdots, \boldsymbol{R}_s \right\}$$
(24)

式中: $X_i$ 为第i个备选方案;d为备选方案总数; $R_j$ 为 第j个评价准则;s为评价准则总数。

2)决策者根据备选方案在准则 $R_i$ 下对备选方案  $X_i$ 进行评估,并给出评估值 $u_{ij}$ ,以确定区间直觉模糊 决策矩阵 $U = (u_{ij})_{d \times s}, u_{ij}$ 如式(25)所示。

$$u_{ij} = \left\langle [\underline{\mu}_{ij}, \overline{\mu}_{ij}], [\underline{\nu}_{ij}, \overline{\nu}_{ij}] \right\rangle$$
(25)

式中: $[\underline{\mu}_{ij}, \bar{\mu}_{ij}]$ 为隶属度区间,表征决策者的支持态度, $\bar{\mu}_{ij}, \underline{\mu}_{ij}$ 分别为隶属度上、下限; $[\underline{\nu}_{ij}, \bar{\nu}_{ij}]$ 为非隶属 度区间,表征决策者的中立态度, $\bar{\nu}_{ij}, \underline{\nu}_{ij}$ 分别为非隶 属度上、下限。

3)根据区间直觉模糊决策矩阵U确定正理想方案*X*<sup>+</sup>和负理想方案*X*<sup>-</sup>。

4)根据区间直觉模糊集相关理论计算出负理想 方案与正理想方案形成的向量*X*<sup>-</sup>*X*<sup>+</sup>、负理想方案与 备选方案形成的向量*X*<sup>-</sup>*X*<sub>i</sub>以及备选方案与正理想 方案形成的向量*X*<sub>i</sub>*X*<sup>+</sup>。

5)根据双向投影理论分别计算向量 $X^{-}X_{i}$ 与向 量 $X^{-}X^{+}$ 的夹角 $\theta(X^{-}X_{i}, X^{-}X^{+})$ 和投影 $\Gamma(X^{-}X_{i}, X^{-}X^{+})$ 以及向量 $X^{-}X^{+}$ 和向量 $X_{i}X^{+}$ 的夹角 $\theta(X^{-}X^{+}, X_{i}X^{+})$ 和 投影 $\Gamma(X^{-}X^{+}, X_{i}X^{+})$ 。

6)求取在所有评价准则下所有备选方案  $X = \{X_1, X_2, ..., X_i, ..., X_a\}$ 与正理想方案  $X^+$ 的偏差以及 与负理想方案  $X^-$ 的偏差,并利用拉格朗日乘数法求 得各评价准则的权重  $\omega = \{\omega_1, \omega_2, ..., \omega_j, ..., \omega_s\}, 从$ 而确定各备选方案与正理想方案的加权投影  $\Gamma^+ = \{\Gamma_1^+, \Gamma_2^+, ..., \Gamma_i^+, ..., \Gamma_a^+\}$ 以及与负理想方案的加权投 影  $\Gamma^- = \{\Gamma_1^-, \Gamma_2^-, ..., \Gamma_i^-, ..., \Gamma_a^-\}_{\circ}$ 。

7)根据决策理论,决策者认为 $\Gamma_i^*$ 越大,备选方 案 $X_i$ 越接近正理想方案 $X^*$ ,备选方案 $X_i$ 越优。由此 可定义正理想方案贴进度 $K(X_i)$ 为:

$$K(X_i) = \frac{\Gamma_i^+}{\Gamma_i^+ + \Gamma_i^-}$$
(26)

从而对备选方案进行排序,并从中选出最优规

划配置方案。

## 4 算例分析

#### 4.1 基础数据

以某商业园区为例,应用本文所提出的PCMES-CCHP 型微网规划配置模型进行求解以及决策分 析。假设一年365 d分为夏季122 d、过渡季153 d和 冬季90 d,当地在3个季度的典型日光照强度如附 录A图A3所示。该商业园区商业建筑的典型日电 负荷如附录A图A4所示,3个季度的典型日冷、热负 荷如附录A图A5所示。该商业园区所在地区的分 时电价和天然气价格如附录A表A1所示,待规划配 置的设备参数如附录A表A2所示。

采用基于分解的多目标进化算法对模型进行优化计算,可得到一系列的可行方案,然后运用基于区间直觉模糊信息的双向投影决策方法选出最优的系统配置方案。

#### 4.2 结果分析

通过基于分解的多目标进化算法得到PCMES-CCHP型微网的Pareto前沿如图2所示,可以看出得 到的系统规划配置方案在经济性、能源和环境3个 准则之间存在冲突关系。从图2中选取10个备选方 案,附录A表A3和表A4分别为这10个方案的规划 结果和3个目标值。需要说明的是,燃气锅炉的装 机容量均为0,即微网无需配置燃气锅炉。





决策者对求解得到的10个备选方案进行评价, 得到的区间直觉模糊矩阵U如附录B式(B1)所示。 最终可计算得到各配置方案与正理想方案贴进 度K(X<sub>i</sub>),并从优到劣进行排序,结果如表1所示。

Table 1 Paste progress of 10 alternatives

方案	$K(X_i)$	排序	方案	$K(X_i)$	排序
$X_1$	0.488074	2	X <sub>6</sub>	0.439887	10
$X_{2}$	0.516785	1	$X_7$	0.459042	7
$X_3$	0.465218	5	X <sub>8</sub>	0.487476	3
$X_4$	0.462010	6	$X_9$	0.445605	9
$X_5$	0.450349	8	$X_{10}$	0.466601	4

因此,方案 $X_2$ 为PCMES-CCHP型微网的最优规 划配置方案。 同时,采用多目标粒子群优化算法对该算例进 行求解,得到的结果如表2所示。

#### 表2 2种方案的结果对比

Table 2 Comparison of results between two schemes

方案	<i>C</i> /元	$N_{\rm energy}/\rm kg$	$N_{{\rm CO}_2}/{\rm kg}$
多目标粒子群优化算法所得方案	1.263 5×107	2.2374×105	5.589×105
$X_2$	9.2530×106	$2.4187 \times 10^{5}$	3.957×105

由表2可见,采用多目标粒子群优化算法得到 的优化设计方案,仅能耗指标略有优势,经济指标和 碳排放指标均明显偏高,显然其在寻优过程中陷入 了局部最优。

为验证本文 PCMES-CCHP 型微网的经济性和 可行性,将其与传统 CCHP 型微网进行对比,如表3 所示。其中,传统 CCHP 型微网的规划配置方案是 根据本文算例数据和本文求解方法进行配置的,以 确保2种微网的可比较性。

#### 表3 2种微网的结果对比

 Table 3
 Comparison of results between two microgrids

微网	<i>C</i> /元	$N_{\rm energy}/\rm kg$	$N_{\rm CO_2}/\rm kg$	购电量 / kW	耗气量 / m <sup>3</sup>
传统CCHP	1.146×107	3.0846×105	5.744×10 <sup>5</sup>	2188390	1970528
PCMES-CCHP	9.253×106	2.4187×105	3.957×10 <sup>5</sup>	3864282	1851234

由表3可见,与传统CCHP型微网相比,本文构 建的PCMES-CCHP型微网增加了1675892 kW购电 量,但减少了119294 m<sup>3</sup>的耗气量。

PCMES-CCHP型微网与电网交互功率曲线如图 3所示。PCMES系统的储热状态如图4所示。由图 可知,PCMES系统在谷电时段从上级电网大量购











电,通过热泵将电能转化为热能并进行储存,在用电高峰和平时段释放能量,代替电制冷机通过溴化锂吸收制冷机供冷,以实现电负荷的转移,或停用燃气锅炉并减少燃气轮机供热,用大量谷电代替天然气的消耗,从而增加了供电量,但是减少了耗气量和碳排放量,因此PCMES-CCHP型微网在经济、能耗和碳排放3个方面的性能均有所改善。相较于传统CCHP型微网,PCMES-CCHP型微网每年可节约成本2207000元,同时降低了21.59%的能耗和31.11%的碳排放量,同时为上级电网削峰填谷、提高设备利用率做出了重要贡献。

#### 5 结论

本文提出一种 PCMES-CCHP 型微网,从经济、 能耗和碳排放3个角度出发建立多目标优化配置模 型,通过基于分解的多目标进化算法对模型进行求 解,得到一系列可行的备选方案,并利用基于区间直 觉模糊信息的双向投影方法对备选方案进行决策选 择,选出最优决策方案。通过与传统 CCHP 型微网 的仿真对比可以得出以下结论:

1)PCMES-CCHP型微网通过储热实现了能源在 时间上的转移和利用,从而降低了系统设备配置需 求,同时充分利用了峰谷电价差值提高经济性;

2)PCMES-CCHP型微网在更好地适应电网平衡 的前提下,不牺牲微网热舒适性,有效降低了系统能 耗,同时大量减少了碳排放,是应对"十四五"规划、 实现"双碳"目标的有效手段;

3) PCMES-CCHP 型微网通过 PCMES 系统在峰 电时段释能降低电负荷需求,在谷电时段购电储能, 为上级电网削峰填谷、提高设备利用率做出了重要 贡献。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

- 吴盛军,刘建坤,周前,等.考虑储能电站服务的冷热电多微网 系统优化经济调度[J].电力系统自动化,2019,43(10):10-18.
   WU Shengjun, LIU Jiankun, ZHOU Qian, et al. Optimal economic scheduling for multi-microgrid system with combined cooling, heating and power considering service of energy storage station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10):10-18.
- [2] 陈灵敏,吴杰康,唐惠玲,等. 计及综合需求响应的冷热电联供 独立微网容量优化配置模型[J]. 南方电网技术,2019,13(10): 44-53.

CHEN Lingmin, WU Jiekang, TANG Huiling, et al. Optimal capacity allocation model of the stand-alone microgrid combined cooling, heating and power systems considering integrated demand response[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(10):44-53.

[3] 吴盛军,李群,刘建坤,等. 基于储能电站服务的冷热电多微网 系统双层优化配置[J/OL]. 电网技术. [2021-05-22]. https:// doi.org / 10.13335 / j.1000-3673.pst.2020.1838.

- [4] 周任军,康信文,李绍金,等. 冷热电联供系统能量流函数及运行策略[J]. 电力自动化设备,2014,34(1):1-5.
   ZHOU Renjun, KANG Xinwen, LI Shaojin, et al. Energy flow function and operational strategy of CCHP system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(1):1-5.
- [5]魏大钧.小型冷热电联供系统多目标优化设计与能量管理策略研究[D]. 济南:山东大学,2016.
   WEI Dajun. Multi-objective optimal design and energy management of the small-scale combined cooling heating and power system[D]. Jinan:Shandong University,2016.
- [6]杨世博,孙亮,陈立东,等. 计及分时电价的含冷热电联供型微网的配电网系统协调优化调度[J]. 电力自动化设备,2021,41
   (4):15-23.
   YANG Shibo,SUN Liang,CHEN Lidong, et al. Coordinated op-

timal scheduling of distribution network with CCHP-based microgird considering time-of-use electricity price[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4):15-23.

- [7]魏繁荣,林湘宁,陈乐,等.基于建筑相变材料储能的微网综合 能源消纳系统[J].中国电机工程学报,2018,38(3):792-804.
   WEI Fanrong,LIN Xiangning,CHEN Le, et al. Microgrid comprehensive energy consumption system based on phase change building materials[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(3): 792-804.
- [8] 杜进桥,李艳,随权,等.基于相变储能系统主动响应能力挖掘的配电网经济调度[J].电力自动化设备,2020,40(4):210-217.
   DU Jinqiao,LI Yan,SUI Quan, et al. Economic dispatch of distribution network based on active response capability mining of phase change material energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(4):210-217.
- [9] 李艳,胡志豪,随权,等.考虑风光热不确定性和相变储能系统 的城市建筑微网电-热联合调度[J].电网技术,2019,43(10): 3687-3697.

LI Yan, HU Zhihao, SUI Quan, et al. Microgrid joint electrothermal scheduling for phase change energy storage system of urban buildings considering uncertainty of wind, light and heat[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3687-3697.

 [10] 杜进桥,徐诗鸿,胡志豪,等. 基于光伏出力区间预测的相变储 能电-热联合调度策略[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(21): 109-116.
 DU Jinqiao, XU Shihong, HU Zhihao, et al. Electric-thermal

combined scheduling strategy by phase-change energy storage based on interval prediction of photovoltaic output[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21):109-116.

- [11] 胡志豪,冯忠楠,魏繁荣,等. 计及热力不确定性的智能建筑 电-热联合鲁棒经济调度[J]. 中国电机工程学报,2020,40 (12):3907-3919.
  HU Zhihao,FENG Zhongnan,WEI Fanrong, et al. Robust dispatch for electrical-thermal combined intelligent building considering impacts of uncertainties on thermal side[J]. Procee-
- dings of the CSEE,2020,40(12):3907-3919.
  [12] 陈亮,刘道平,杨亮.相变储能过程传热强化技术研究进展
  [J]. 化工进展,2017,36(增刊1):291-296.
  CHEN Liang,LIU Daoping,YANG Liang. Progress of heat transfer enhancement technology in phase change energy storage process[J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2017, 36(Supplement 1):291-296.
- [13] 唐沂媛. 冷热电联供 / 综合能源系统的规划研究[D]. 南京: 东南大学,2016.

TANG Yiyuan. Study on planning of combined cooling, heating and power system / integrated energy system[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.

(编辑 王锦秀)

 [14] 张奇胜. 基于分解思想的多目标进化算法研究[D]. 长沙:湖 南大学,2018.
 ZHANG Qisheng. Research on multi-objective evolutionary al-

gorithm based on decomposition thought [D]. Changsha: Hunan University, 2018.

[15] 邵良杉,赵琳琳.区间直觉模糊信息下的双向投影决策模型 [J].控制与决策,2016,31(3):571-576.

SHAO Liangshan, ZHAO Linlin. Bidirectional projection method with interval-valued intuitionistic fuzzy information [J]. Control and Decision, 2016, 31(3): 571-576. 作者简介:



孙 亮(1973—),男,吉林吉林人,副
 教授,主要研究方向为电力系统运行与控制
 (E-mail:sunliang@neepu.edu.cn);
 李佳雯(1997—),女,吉林吉林人,硕
 士研究生,主要研究方向为综合能源系统
 (E-mail:ljwen\_0428@163.com)。

孙 亮

## Multi-objective optimal configuration of combined cooling, heating and power microgrid with phase change material energy storage

SUN Liang<sup>1</sup>, LI Jiawen<sup>1</sup>, YANG Xinhe<sup>1</sup>, SUN Liguo<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. Huaneng Jiutai Power Plant, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to deal with the growing energy demand and realize the "double carbon" target of China's 14th five-year plan, a combined cooling, heating and power microgrid with phase change material energy storage is proposed. A multi-objective optimal configuration model of microgrid is built from three aspects of economy, energy consumption and carbon emission, and the multi-objective optimal algorithm based on decomposition is adopted to solve the model, thus a series of feasible alternative schemes is obtained, mean-while the bidirectional projection method based on interval intuitionistic fuzzy information is used to make the decision, and the optimal configuration scheme is obtained. A business park is taken as an example to verify the feasibility and effectiveness of the proposed microgrid.

Key words: phase change material energy storage; combined cooling, heating and power; microgrid; multiobjective; optimal configuration 附录 A:



Fig.A1 Phase change curve



图 A2 PCMES 换热量控制原理图





Fig.A3 Illumination intensity



Fig.A5 Cooling load and heating load of typical daily

表 A1 能源价格

Table III Energy price						
	时段	电价/[元 (kW h) <sup>-1</sup> ]	气价/(元 m <sup>-3</sup> )			
峰	10:00—19:00	1.217				
平	08:00-09:00, 20:00-21:00	0.875	3.5			
谷	00:00-07:00, 22:00-24:00	0.524				

Table A1 Energy price

## 表 A2 设备参数

Table A2 Device parameters

设备	投资成本/(元 <b>kW</b> <sup>-1</sup> 或元 <b>kI</b> <sup>-1</sup> )	运维成本/[元 (kW h) <sup>-1</sup> 或元 k[ <sup>-1</sup> ]	效素	寿命/a
			<u>M</u> +	л <b>ј</b> ни <b>и</b>
光伏	10 000	0.019	—	20
辦写於扣	6 800	0.01	电 0.29	20
<i>M</i> (761)	0.800	0.01	热 0.61	20
燃气锅炉	750	0.05	0.85	20
热泵	1 920	0.02	3.7	20
蓄电池	2 000	0.045	0.9	10
相变储能	0.12	0	0.95	30
电制冷机	970	0.06	3.5	20
溴化锂吸收	1 200	0.025	0.8	20
式制冷机	1 200	0.055	0.8	20

## 表 A3 10 个备选方案的容量规划结果

方案	光伏/MW	燃气轮机/kW	热泵/kW	蓄电池/MW	相变储能/kJ	电制冷/kJ	溴化锂制冷/kJ
$X_1$	1.85	1 039	630.1	9.09	9.388×10 <sup>6</sup>	9.46×10 <sup>7</sup>	$1.00 \times 10^{11}$
$\boldsymbol{X}_{2}$	1.89	1 039	630.2	8.61	9.401×10 <sup>6</sup>	$9.80 \times 10^{7}$	$9.73 \times 10^{10}$
$X_3$	1.87	1 035	630.6	8.90	$9.472 \times 10^{6}$	$9.94 \times 10^{7}$	$9.99 \times 10^{10}$
$X_4$	1.90	1 028	630.9	8.52	$9.472 \times 10^{6}$	$1.00 \times 10^{8}$	$8.77 \times 10^{10}$
$X_5$	1.87	1 029	630.7	9.10	$9.471 \times 10^{6}$	$7.69 \times 10^{7}$	9.57×10 <sup>10</sup>
$X_{6}$	1.83	1 030	630.1	8.98	$9.470 \times 10^{6}$	$8.46 \times 10^{7}$	9.50×10 <sup>10</sup>
$X_7$	1.89	1 031	630.1	8.55	$9.470 \times 10^{6}$	$9.53 \times 10^{7}$	9.39×10 <sup>10</sup>
$X_8$	1.82	1 035	630.0	9.07	$9.472 \times 10^{6}$	$9.59 \times 10^{7}$	$9.97 \times 10^{10}$
$X_9$	1.83	1 032	630.2	9.15	9.473×10 <sup>6</sup>	$9.80 \times 10^{7}$	$9.85 \times 10^{10}$
$X_{10}$	1.80	1 033	630.6	9.28	$9.472 \times 10^{6}$	$9.93 \times 10^{7}$	$9.83 \times 10^{10}$

Table A3 Planning results of ten alternative schemes

方案	<i>C</i> /元	$N_{ m energy}/ m kg$	$N_{\rm CO_2}$ /kg
$X_1$	9.251×10 <sup>6</sup>	$2.418 8 \times 10^{5}$	$3.958 \times 10^{5}$
$X_{2}$	$9.253 \times 10^{6}$	$2.418.7 \times 10^{5}$	$3.957 \times 10^{5}$
$X_{3}$	$9.254 \times 10^{6}$	$2.416.9 \times 10^{5}$	$3.961 \times 10^{5}$
$X_{_4}$	$9.242 \times 10^{6}$	$2.415 4 \times 10^{5}$	$3.970 \times 10^{5}$
$X_5$	$9.244 \times 10^{6}$	$2.415~6 \times 10^{5}$	$3.968 \times 10^{5}$
$X_{_6}$	$9.245 \times 10^{6}$	$2.415 9 \times 10^{5}$	$3.967 \times 10^{5}$
$X_7$	$9.248 \times 10^{6}$	2.416 1×10 <sup>5</sup>	3.966×10 <sup>5</sup>
$X_8$	$9.255 \times 10^{6}$	2.417 1×10 <sup>5</sup>	$3.960 \times 10^{5}$
$X_9$	$9.251 \times 10^{6}$	$2.416.5 \times 10^{5}$	$3.963 \times 10^{5}$
$X_{10}$	$9.252 \times 10^{6}$	$2.416.7 \times 10^{5}$	$3.962 \times 10^{5}$

表 A4 10 个备选方案的目标值

Table A4 Objective values of ten alternative schemes

附录 B:

$oldsymbol{U}=$	$ \begin{array}{l} \left< [0.2, 0.3], [0.3, 0.4] \right> \\ \left< [0.1, 0.3], [0.1, 0.2] \right> \\ \left< [0.5, 0.8], [0.1, 0.2] \right> \\ \left< [0.5, 0.7], [0.2, 0.3] \right> \\ \left< [0.4, 0.6], [0.2, 0.3] \right> \\ \left< [0.4, 0.5], [0.2, 0.3] \right> \\ \left< [0.1, 0.2], [0.3, 0.4] \right> \end{array} \right. $	$ \begin{array}{c} \left< [0,0.1], [0.1,0.2] \right> \\ \left< [0,0.2], [0.1,0.2] \right> \\ \left< [0.1,0.3], [0.4,0.5] \right> \\ \left< [0.5,0.8], [0,0.1] \right> \\ \left< [0.5,0.7], [0.1,0.2] \right> \\ \left< [0.5,0.6], [0.2,0.3] \right> \\ \left< [0.4,0.6], [0.2,0.3] \right> \\ \left< [0.2,0.4], [0.2,0.3] \right> \end{array} $	$ \begin{array}{l} \left< [0.6, 0.8], [0.1, 0.2] \right> \\ \left< [0.5, 0.8], [0.0, 1] \right> \\ \left< [0.4, 0.5], [0.3, 0.4] \right> \\ \left< [0, 0.1], [0.4, 0.5] \right> \\ \left< [0.1, 0.2], [0.2, 0.3] \right> \\ \left< [0.1, 0.2], [0.2, 0.3] \right> \\ \left< [0.3, 0.4], [0.2, 0.3] \right> \\ \left< [0.5, 0.6], [0.1, 0.2] \right> \end{array} \right. $
	$ \begin{array}{c} \langle [0.1, 0.2], [0.3, 0.4] \rangle \\ \langle [0.2, 0.3], [0.3, 0.4] \rangle \\ \langle [0.2, 0.3], [0.2, 0.3] \rangle \end{array} $	$ \langle [0.2, 0.4], [0.2, 0.3] \rangle \\ \langle [0.3, 0.5], [0.2, 0.3] \rangle \\ \langle [0.3, 0.4], [0.2, 0.3] \rangle $	$ \begin{array}{c} \langle [0.3, 0.7], [0.1, 0.2] \rangle \\ \langle [0.3, 0.5], [0.4, 0.5] \rangle \\ \langle [0.4, 0.5], [0.2, 0.3] \rangle \end{array} $

(B1)