Vol.43 No.3 Mar. 2023

# 考虑设备变工况特性和灵活性供需匹配的 园区综合能源系统优化配置模型

王强钢<sup>1</sup>,吴雪翚<sup>1</sup>,杨龙杰<sup>1</sup>,周念成<sup>1</sup>,张 浩<sup>2</sup>,李 哲<sup>3</sup> (1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044; 2. 浙江华云电力工程设计咨询有限公司,浙江 杭州 310014; 3. 国网重庆市电力公司电力科学研究院,重庆 401120)

摘要:在综合能源系统中,建立合理有效的优化配置模型是实现系统经济运行和多能源供需平衡的关键。针 对园区综合能源系统,提出一种考虑设备变工况特性和系统灵活性供需匹配的优化配置模型。考虑系统中 设备能效的不确定性,建立其受多因素影响的变工况特性模型;为提升系统应对可再生能源输入及负荷需求 不确定性的能力,提出灵活性供需匹配指标;以系统配置成本最优为目标、灵活性供需匹配指标为约束,建立 园区综合能源系统优化配置模型。最后,以北方某园区为例进行仿真分析,结果表明在系统优化配置中考虑 设备的变工况特性和灵活性供需匹配程度,可进一步提高系统配置的科学性和合理性。

关键词:园区综合能源系统;变工况特性;灵活性供需匹配;优化配置

中图分类号:TM73;TK01

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202209003

# 0 引言

国务院在《新时代的中国能源发展》白皮书中提 出着力推进储能与可再生能源互补发展,形成发储 用一体化局域清洁供能系统,全面提升电力系统灵 活性和调节能力<sup>[1]</sup>。园区综合能源系统(community integrated energy system, CIES)作为一种包含电、 气、热、冷等多种能源的局域多能耦合系统,可通过 对不同能源的统一规划及调度<sup>[2-3]</sup>,实现能源的协调 高效利用,是未来电力系统的重要研究方向之一。

CIES的优化配置是实现本地资源高效利用、提高系统综合能效的基础。目前,对CIES的优化配置已经开展了诸多方面的研究。文献[4]考虑不同典型日下的冷热电需求,基于能源集线器建立CIES鲁棒规划模型;文献[5]基于两阶段随机优化模型,构建了考虑热电联供机组等设备容量优化的CIES规划模型。上述研究中的CIES优化配置模型将系统的输入输出关系简化为线性耦合关系,即考虑系统内能源设备的效率为恒定常数<sup>[6]</sup>,设备处于额定工况下高效率运行状态。但实际中,能源设备受负载率等因素影响,具有明显的非线性变工况特性<sup>[6-7]</sup>。现有关于设备变工况的研究中,文献[7]在构建动态能源集线器模型的基础上,考虑系统内设备效率与

收稿日期:2022-01-17;修回日期:2022-05-19

在线出版日期:2022-09-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077017);重庆市 自然科学基金资助项目(cstc2019jcyj-msxmX0723)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52077017) and Chongqing Municipal Natural Science Foundation(cstc2019jcyj-msxmX0723) 负载率的非线性关系,提出一种考虑设备变工况特 性的区域综合能源系统优化调度方法。文献[8]提 出了一种基于变工况特性的设备效率随负载率波动 而变化的系统容量优化模型,并采取两阶段规划方 法来求解系统的最优容量配置。文献[9]基于设备 效率受负载率影响的变工况特性,建立了以运行成 本最小为目标的经济调度运行优化模型,并求解得 到日前最优调度方案。然而,目前对于设备变工况 的研究中,通常仅考虑负载率变化对设备能效的影 响,而忽略了进气温度、排烟温度等其他多种因素变 化的影响,所建设备变工况模型不够精确,进而影响 到设备配置结果及配置方案的经济性。

此外,考虑到CIES中的可再生能源的随机波动 性与多能负荷需求的不确定性,系统以一定的成本 优化调配各类可用资源,具备快速响应和调节的能 力,即在CIES的优化配置中考虑系统的灵活性[10-12] 可使系统运行更加安全稳定。因此,在对系统进行 配置时不仅需要考虑经济性等内在要求,系统还需 要具备一定的灵活性。灵活性的定量评价是系统考 虑具备灵活性进行优化配置的基础<sup>[10]</sup>,而灵活性指 标作为其定量评价的手段之一,是目前评估系统应 对不确定性能力的有效方式之一。相关研究中,文 献[12]提出了爬坡资源不足的期望值指标,从不同 时间尺度和不同方向上衡量了系统的灵活性;文献 [13]建立了评价大规模风电并网系统灵活性的指 标,通过上、下调灵活性不足概率和不足期望构建系 统的灵活性评估模型;文献[14]建立了考虑灵活性 不足度、充裕度、充裕率作为灵活性指标的多目标输 电网双层规划模型;文献[15]建立了评估孤岛微电

网日前调度的上调和下调灵活性不足率指标,以运 行费用最优为目标,建立日前优化调度模型。本文 基于现有对灵活性的研究,提出灵活性供需匹配指 标。该指标可直观反映系统灵活性供给和需求的匹 配程度,在满足配置方案经济性的前提下提升系统 的灵活性调节能力。

为此,本文基于 CIES 首先建立了计及负载率、 外部环境等多种因素影响的设备变工况数学模型, 该模型能够准确描述设备输入输出关系;其次,为评 价系统应对不确定性的能力,提出了灵活性供需匹 配指标,该指标具有整体可视化评估系统灵活性的 特点,可直观量化系统内灵活性供需关系的匹配情 况;然后,以配置成本最小为优化目标、灵活性供需 匹配指标为约束,提出一种考虑设备变工况和灵活 性供需匹配的 CIES 优化配置模型;最后,以北方某 园区为例进行优化配置,验证了本文所提模型的有 效性。

# 1 基于变工况特性的CIES设备模型

CIES 是一个多输入多输出的多能耦合系统,包括多种发电设备、能源转换设备和能源储存设备,其 典型结构如图1所示。



#### Fig.1 Structure of CIES

# 1.1 基于变工况特性的CIES设备模型

CIES中各能源转换设备的输出功率和输入功率与自身能效有关,其数学模型为:

$$P_{\text{out}}^{m,t} = P_{\text{in}}^{m,t} \boldsymbol{\eta}^{m,t} \tag{1}$$

式中: $P_{\text{out}}^{m,t}$ 、 $P_{\text{in}}^{m,t}$ 、 $\eta^{m,t}$ 分别为t时刻第m种设备的输出 功率、输入功率、转换效率。

CIES中各能源转换设备的能效受负载率、外部 环境等多种因素的影响,其设备能效与影响因素的 关系具体如下。

1.1.1 燃气轮机

燃气轮机通过压气机从外部吸入空气并进行压 缩,将压缩后的气体在燃烧室内与天然气进行混合, 燃烧生成高温、高压的烟气,以此驱动燃气透平机旋转做功产生电能;同时,排烟尾气可通过余热回收装置如余热锅炉进行回收再利用。其发电效率主要受负载率和环境温度的影响<sup>[89,16]</sup>,供热效率主要受负载率和燃气轮机压缩比的影响<sup>[17-18]</sup>。而燃气轮机的 排烟流量、排气温度、温比作为受负载率和环境温度影响的间接因素,不在效率主要影响因素考虑范畴内<sup>[17-18]</sup>。

综合文献[8,17-18]燃气轮机影响因素的变工 况数据,其发电、供热效率与其相关影响因素特性曲 线如附录 A 图 A1 所示。由图可见,燃气轮机的发 电、供热效率与其影响因素呈非线性关系,通过数据 进行拟合<sup>[7-9]</sup>,其多项式拟合关系为:

$$\boldsymbol{\eta}_{e, GT}^{t} = \boldsymbol{\omega}_{e, GT}^{a} \left[ \sum_{n=0}^{3} k_{e, GT}^{a, n} \left( R_{e, GT}^{t} \right)^{n} \right] \boldsymbol{\eta}_{e, GT}^{N} +$$

$$\boldsymbol{\omega}_{e, GT}^{b} \left[ \sum_{n=0}^{2} k_{e, GT}^{b, n} \left( T_{aGT}^{t} \right)^{n} \right] \boldsymbol{\eta}_{e, GT}^{N}$$

$$\boldsymbol{\eta}_{h, GT}^{t} = \boldsymbol{\omega}_{h, GT}^{a} \left[ \sum_{n=0}^{3} k_{h, GT}^{a, n} \left( R_{h, GT}^{t} \right)^{n} \right] \boldsymbol{\eta}_{h, GT}^{N} +$$

$$\boldsymbol{\omega}_{h, GT}^{b} \left[ \sum_{n=0}^{2} k_{h, GT}^{b, n} \left( \pi_{GT}^{t} \right)^{n} \right] \boldsymbol{\eta}_{h, GT}^{N}$$

$$(3)$$

式中: $\eta_{e,GT}^{t}$ 、 $\eta_{h,GT}^{t}$ 分别为t时刻燃气轮机的发电效率、 供热效率; $R_{e,GT}^{t}$ 、 $T_{aGT}^{t}$ 、 $R_{h,GT}^{t}$ 、 $\pi_{GT}^{t}$ 分别为t时刻燃气轮 机的电负载率、进气温度、热负载率、压气机压缩比;  $\omega_{e,GT}^{a}$ 、 $\omega_{e,GT}^{b}$ 、 $\omega_{h,GT}^{a}$ 、 $\omega_{h,GT}^{b}$ 为燃气轮机影响因素的权重系 数; $k_{e,GT}^{a,n}$ 、 $k_{h,GT}^{b,n}$ 、 $k_{h,GT}^{b,n}$ 为燃气轮机n阶拟合系数;  $\eta_{e,GT}^{s}$ 、 $\eta_{h,GT}^{b}$ 分别为燃气轮机额定发电、供热效率。

燃气轮机利用天然气发电,产生的烟气可通过 余热锅炉进行供热。因此,燃气轮机发电和供热存 在关联关系。环境温度(进气温度)与燃气轮机排烟 流量<sup>[6]</sup>的多项式拟合关系见附录A式(A1)。压缩 比<sup>[18]</sup>用一次多项式表示的拟合关系见附录A式 (A2)。将式(A1)和式(A2)代入式(2)可得到燃气轮 机供热效率解析表达式,即燃气轮机发电和供热的 非线性耦合关系。

1.1.2 余热锅炉

余热锅炉是连接燃气轮机和其他能源转换设备 的中间设备,该设备利用燃气轮机产生的烟气,通过 余热回收产生热能。其转换效率受负载率、排烟温 度、节点温差、接近点温差等因素影响<sup>[89,18-19]</sup>,其中 节点温差、接近点温差作为余热锅炉供热的中间过 程影响因素,与燃气轮机烟气余热温度有关,故不将 其考虑为主要影响供热效率的因素。余热锅炉效率 受负载率及排烟温度影响的特性曲线如附录A 图 A2所示,其多项式拟合关系为:

$$\boldsymbol{\eta}_{\mathrm{h, WHB}}^{t} = \boldsymbol{\omega}_{\mathrm{h, WHB}}^{a} \left[ \sum_{n=0}^{2} k_{\mathrm{h, WHB}}^{a, n} \left( R_{\mathrm{WHB}}^{t} \right)^{n} \right] \boldsymbol{\eta}_{\mathrm{h, WHB}}^{\mathrm{N}} + \boldsymbol{\omega}_{\mathrm{h, WHB}}^{\mathrm{b}} \left[ \sum_{n=0}^{2} k_{\mathrm{h, WHB}}^{\mathrm{b, n}} \left( T_{\mathrm{pWHB}}^{t} \right)^{n} \right] \boldsymbol{\eta}_{\mathrm{h, WHB}}^{\mathrm{N}}$$
(4)

式中: $\eta_{h,WHB}^{t}$ 为t时刻余热锅炉的转换效率; $R_{WHB}^{t}$ 、  $T_{pWHB}^{t}$ 分别为t时刻余热锅炉的负载率和排烟温度;  $\omega_{h,WHB}^{t}$ 、 $\omega_{h,WHB}^{t}$ 为余热锅炉影响因素的权重系数;  $k_{h,WHB}^{h,WHB}$ 为余热锅炉*n*阶拟合系数; $\eta_{h,WHB}^{N}$ 为余热锅炉额定效率。

余热锅炉回收利用燃气轮机的烟气余热,其排烟温度与燃气轮机余热温度有关<sup>[19]</sup>,其多项式拟合关系见附录A式(A3)。燃气轮机排烟温度受其烟气流量影响的关系见附录A式(A4)。

1.1.3 燃气锅炉

燃气锅炉可通过天然气进行供热,其供热效率 主要受负载率和热损失影响<sup>[6-7]</sup>,热损失主要包括排 烟热损失和表面散热损失。其中:排烟热损失主要 受排烟温度影响;表面散热损失占比很小,可忽略不 计<sup>[6]</sup>。因此,燃气锅炉的供热效率主要取决于负载 率和排烟温度,其变工况特性曲线如附录A图A3所 示,拟合关系为:

$$\boldsymbol{\eta}_{h,GB}^{t} = \boldsymbol{\omega}_{h,GB}^{a} \left[ \sum_{n=0}^{3} k_{h,GB}^{a,n} \left( R_{GB}^{t} \right)^{n} \right] \boldsymbol{\eta}_{h,GB}^{N} + \boldsymbol{\omega}_{h,GB}^{b} \left[ \sum_{n=0}^{1} k_{h,GB}^{b,n} \left( T_{pGB}^{t} \right)^{n} \right] \boldsymbol{\eta}_{h,GB}^{N}$$
(5)

式中: $\eta_{h,GB}^{t}$ 为t时刻燃气锅炉的转换效率; $R_{GB}^{t}$ 、 $T_{pGB}^{c}$ 分别为t时刻燃气锅炉的负载率和排烟温度; $\omega_{h,GB}^{a}$ 、 $\omega_{h,GB}^{b}$ 、为燃气锅炉影响因素的权重系数; $k_{h,GB}^{a,n}$ 为燃气锅炉影响因素的权重系数; $k_{h,GB}^{a,n}$ 为燃气锅炉和阶拟合系数; $\eta_{h,GB}^{n}$ 为燃气锅炉额定效率。

燃气锅炉排烟温度受进气温度即环境温度的影响<sup>[6-7]</sup>,其拟合关系见附录A式(A5)。

1.1.4 吸收式制冷机

吸收式制冷机是一种以热驱动制冷的装置,其 转换性能系数主要受负载率和出口温度的影响<sup>[6]</sup>。 能效系数特性曲线如附录A图A4所示,其多项式拟 合关系为:

$$C_{c,AC}^{t} = \boldsymbol{\omega}_{c,AC}^{a} \left[ \sum_{n=0}^{2} k_{c,AC}^{a,n} \left( R_{AC}^{t} \right)^{n} \right] C_{c,AC}^{N} +$$
$$\boldsymbol{\omega}_{c,AC}^{b} \left[ \sum_{n=0}^{3} k_{c,AC}^{b,n} \left( T_{pAC}^{t} \right)^{n} \right] C_{c,AC}^{N}$$
(6)

式中: $C_{e,AC}^{t}$ 为t时刻吸收式制冷机的能效系数; $R_{AC}^{t}$ 、  $T_{pAC}^{t}$ 分别为t时刻吸收式制冷机的负载率和出口温 度; $\omega_{e,AC}^{a}$ 、 $\omega_{e,AC}^{b}$ 为吸收式制冷机影响因素的权重系 数; $k_{e,AC}^{a,n}$ 为吸收式制冷机n阶拟合系数; $C_{e,AC}^{N}$ 为吸收式制冷机n阶拟合系数; $C_{e,AC}^{N}$ 为吸收式制冷机额定能效系数。

吸收式制冷机出口温度与进气温度有关<sup>[6]</sup>,其 多项式拟合关系见附录A式(A6)。 1.1.5 电制冷机

电制冷机是一种以电驱动制冷的装置,制冷效 率较吸收式制冷机高,其能效系数与负载率有关<sup>[8]</sup>, 如附录A图A5所示。电制冷机能效系数可用如下 多项式拟合:

$$C_{\mathrm{c,EC}}^{t} = \left[\sum_{n=0}^{2} k_{\mathrm{c,EC}}^{n} \left(R_{\mathrm{EC}}^{t}\right)^{n}\right] C_{\mathrm{c,EC}}^{\mathrm{N}}$$
(7)

式中: $C_{c,EC}^{t}$ 为t时刻电制冷机的能效系数; $R_{EC}^{t}$ 为t时 刻电制冷机的负载率; $k_{c,EC}^{n}$ 为电制冷机n阶拟合系数; $C_{c,EC}^{N}$ 为电制冷机额定能效系数。

1.1.6 热交换设备

热交换设备是一种热量传递装置,换热过程中 会存在一些损耗,由于其转换效率受负载率和环境 变化影响不大<sup>[89]</sup>,故采用恒定转换效率模型,可参 考文献[9]。

#### 1.2 CIES中能源储存设备模型

CIES中的能源储存设备主要有蓄电设备、蓄热 设备和蓄冷设备,能起到削峰填谷及能量时空转换 的作用,其模型如附录A式(A7)所示。

# 2 灵活性供需匹配指标

系统的灵活性是指在供需发生变动时保持供需 平衡的应对能力。CIES在运行中存在可再生能源 输入、多能负荷需求等诸多不确定性因素,系统通过 优化调配各类可用灵活性资源,满足系统的灵活性 需求,以一定的灵活性调用成本维持CIES在运行中 的供需平衡<sup>[10,12]</sup>。灵活性指标作为评估系统应对不 确定性能力的有效方式之一,利用灵活性供需匹配 原理对配置方案灵活性进行评价,这对提高CIES配 置合理性具有重要意义。因此,本节提出了具有整 体可视化评估特点的灵活性供需匹配指标,该指标 可直观量化系统内灵活性供需的匹配情况。

#### 2.1 CIES的灵活性需求

CIES的灵活性需求主要来自于可再生能源输 入和负荷不可预测带来的不确定性所引起系统内功 率的变化。假设 $F_{\text{NL,up}}^{t}$ 和 $F_{\text{NL,down}}^{t}$ 分别为t时刻CIES因 净负荷的不确定性而产生的上调灵活性需求和下 调灵活性需求。考虑置信水平<sup>[20]</sup>为1- $\alpha$ ,标准差为  $\sigma_{\text{NL}}^{t}$ ,则 $F_{\text{NL,up}}^{t}$ 和 $F_{\text{NL,down}}^{t}$ 可表示为:

$$\begin{cases} F_{\rm NL,up}^{\prime} = (1 - \alpha/2) \sigma_{\rm NL}^{\prime} \\ F_{\rm NL,down}^{\prime} = (\alpha/2) \sigma_{\rm NL}^{\prime} \end{cases}$$
(8)

假设风、光及负荷的预测误差互不相关,且均服 从期望为0的正态分布<sup>[17]</sup>,则CIES的净负荷预测误 差也应服从期望为0、标准差为σ<sup>ML</sup>的正态分布,即:

$$\sigma_{\rm NL}^{t} = \sqrt{(\sigma_{\rm WT}^{t})^{2} + (\sigma_{\rm PV}^{t})^{2} + (\sigma_{\rm L}^{t})^{2}}$$
(9)

式中: $\sigma'_{WT}$ 、 $\sigma'_{PV}$ 和 $\sigma'_{L}$ 分别为t时刻风机出力、光伏出 力和负荷预测值的标准差<sup>[21]</sup>,其计算公式如式(10) 所示。

$$\begin{cases} \sigma_{WT}^{t} = 0.2P_{WT,F}^{t} + 0.02S_{WT} \\ \sigma_{PV}^{t} = 0.2P_{PV,F}^{t} + 0.02S_{PV} \\ \sigma_{L}^{t} = 0.02P_{L,F}^{t} \end{cases}$$
(10)

式中: P<sup>*t*</sup><sub>WT,F</sub>、P<sup>*t*</sup><sub>PV,F</sub>和P<sup>*t*</sup><sub>LF</sub>分别为*t*时刻风机出力预测 值、光伏出力预测值和负荷预测值; S<sub>WT</sub>、S<sub>PV</sub>分别为 风机、光伏的总装机容量。

#### 2.2 CIES的灵活性供给

CIES的灵活性资源由能源转换设备和能源储存设备供给。灵活性资源可在系统出现灵活性需求时,在相应的时间尺度和方向上快速准确地响应该需求,保证系统的供需平衡。

# 2.2.1 能源转换设备

能源转换设备可根据其运行状态,迅速调节出 力以提供上调、下调灵活性。对计及灵活性调节能 力的能源转换设备,其灵活性供给除了需考虑设备 爬坡速率和出力范围外,还与前一时刻预留的上调、 下调灵活性供给有关。

$$\begin{cases} 0 \leq f_{up}^{i,m,t} \leq P_{max}^{m} - P^{i,m,t} \\ f_{up}^{i,m,t} \leq r_{up}^{m} t - (P^{i,m,t} - P^{i,m,t-1}) - f_{down}^{i,m,t-1} \end{cases}$$
(11)

$$\begin{pmatrix} 0 \leq f_{\text{down}}^{i,m,t} \leq P^{i,m,t} - P_{\min}^{m} \\ f_{\text{down}}^{i,m,t} \leq r_{\text{down}}^{m}t + (P^{i,m,t} - P^{i,m,t-1}) - f_{\text{up}}^{i,m,t-1} \end{cases}$$
(12)

式中: $f_{up}^{i.m.t}$ 、 $f_{down}^{i.m.t}$ 、 $P^{i.m.t}$ 分别为t时刻第m种设备的第i台机组预留的上调灵活性供给、下调灵活性供给、 输出功率; $r_{up}^m$ 、 $r_{down}^m$ 、 $P_{max}^m$ 分别为第m种设备上调 功率速率、下调功率速率、最大功率、最小功率。

2.2.2 能源储存设备

蓄能设备可提供的上、下调灵活性与其充放能 状态有关,其表达式为:

$$\begin{cases} 0 \leq f_{up}^{i,m,t} \leq \min\left(P_{S,D}^{t}, E_{S}^{t} - E_{S,\min}/t\right) \\ 0 \leq f_{down}^{i,m,t} \leq \min\left(P_{S,C}^{t}, E_{S,\max} - E_{S}^{t}/t\right) \end{cases}$$
(13)

式中: $P_{s,c}^{t}$ ,  $P_{s,D}^{t}$ 分别为t时刻蓄能设备的充、放能功率; $E_{s,max}$ ,  $E_{s,min}$ 、 $E_{s}^{t}$ 分别为蓄能设备的蓄能上限、蓄能下限和t时刻所蓄能量。

#### 2.3 灵活性供需匹配指标

为更好地评估 CIES 内可用灵活性资源与灵活性 需求间的供需匹配程度,本文建立了灵活性供需匹 配指标。基于上述灵活性需求与供给模型,分别得 到上调、下调的灵活性需求边界和上调、下调的灵活 性供给边界,其上调、下调的边界范围内形成了一个 闭合包络面。灵活性供需匹配示意图如图2所示。

由图2可以看出:当灵活性供给能够完全覆盖 灵活性需求时,CIES的系统灵活性充足;当上调的 灵活性供给不足以完全覆盖灵活性需求时,CIES需 配置更多的灵活性资源供给设备以满足系统的灵活 性需求;当下调的灵活性供给不足以完全覆盖灵活





性需求时,CIES需弃风、弃光来满足灵活性需求,以保证系统内部的供需平衡。

因此,可根据灵活性总供给覆盖灵活性总需求 的比例,建立灵活性供需匹配指标。其中,灵活性总 供给和灵活性总需求可根据图2通过积分求得各自 的覆盖面积。为了简化计算,可将灵活性总供给和 总需求以一定的时间尺度划分为若干区间,每个区 间可视为以上调、下调灵活性供给(需求)之和为底, 时间尺度为高的曲边梯形,通过计算所有曲边梯形 面积之和,可近似得到总灵活性供给和总需求的覆 盖面积。通过两者的覆盖面积之比,可得灵活性供 需匹配系数F<sub>MC</sub>为:

$$F_{\rm MC} = \sum_{t=1}^{T} \left( \frac{f_{\rm S}^{t-1} + f_{\rm S}^{t}}{2} t \right) / \sum_{t=1}^{T} \left( \frac{F_{\rm D}^{t-1} + F_{\rm D}^{t}}{2} t \right)$$
(14)

式中:*T*=24 h; *f*<sup>*s*</sup><sub>s</sub>、*F*<sup>*b*</sup><sub>D</sub>分别为*t*时刻系统内各能源转换 设备可提供的灵活性总供给、风光及负荷的灵活性 总需求,其计算公式如式(15)所示。

$$\begin{cases} f_{\rm S}^{t} = \sum_{m=1}^{M} \sum_{i=1}^{I} f_{\rm up}^{i,m,t} + \sum_{m=1}^{M} \sum_{i=1}^{I} f_{\rm down}^{i,m,t} \\ F_{\rm D}^{t} = F_{\rm NL,\,up}^{t} + F_{\rm NL,\,down}^{t} \end{cases}$$
(15)

式中:M为设备总数;I为机组总数。

由式(14)对附录A图A6所示的灵活性供需匹配示意图的灵活性供需匹配系数进行计算,可以得到图A6(a)、(b)中灵活性供需匹配系数 $F_{MC}$ 均为1.15。但图A6(a)中灵活性供给完全满足灵活性需求,而图A6(b)中灵活性供给无法完全满足灵活性需求。由此可见,灵活性供需匹配系数 $F_{MC}$ 越大不能表示系统灵活性供给越充足。

为了使式(14)所示的指标更加准确直观地描述 系统内灵活性供需匹配的情况,引入变量 W<sub>sn</sub>将该 指标的取值范围限定为[0,1]。因此,将灵活性供需 匹配系数修正为:

$$F_{\rm MC} = \sum_{t=1}^{T} \left( \frac{W_{\rm SD}^{t-1} + W_{\rm SD}^{t}}{2} t \right) / \sum_{t=1}^{T} \left( \frac{F_{\rm D}^{t-1} + F_{\rm D}^{t}}{2} t \right) \quad (16)$$
$$W_{\rm SD}^{t} = \min\left( f_{\rm S}^{t}, F_{\rm D}^{t} \right) \quad (17)$$

用式(16)重新计算图A6(a)、(b)中的灵活性供

需匹配系数*F*<sub>MC</sub>,优化后的灵活性供给与灵活性需求 匹配示意图分别如附录A图A7(a)、(b)所示。从图 A7(a)可以看出,深蓝色面积块的灵活性供给1为系 统的实际灵活性供给,而浅蓝色面积块的灵活性供 给2为优化后的有效灵活性供给,优化灵活性供需 匹配指标计算方法后,*F*<sub>MC</sub>取值为1,表示该系统的灵 活性供给完全满足灵活性需求。同理可得,在图A7 (b)中,优化灵活性供需匹配指标计算方法后,*F*<sub>MC</sub>取 值为0.85,表示该系统的灵活性供给不能够完全满 足灵活性需求。因此,该指标可直观通过灵活性总 供给和灵活性总需求曲线两者覆盖区域匹配程度准 确反映灵活性供需匹配程度。

由此可见,该指标具有可视化和整体评估系统 灵活性的特点,能够直观判断系统内的灵活性供给 和需求的匹配程度。F<sub>MC</sub>的取值越接近1,表征系统 的灵活性供需匹配程度越高。

# 3 CIES优化配置模型

本文以冷热电气耦合的 CIES 为对象,以 CIES 配置成本最优为目标,满足灵活性供需匹配指标约 束,考虑设备受多因素影响的变工况特性和系统灵 活性供需匹配约束,建立 CIES 优化配置模型。

# 3.1 目标函数

CIES优化配置以全寿命周期成本等年值为目标函数描述系统配置的经济性,其表达式为:

min  $C_{total} = C_I + C_E + C_M + C_{EN} + C_{FE}$  (18) 式中: $C_{total}$ 、 $C_I$ 、 $C_E$ 、 $C_M$ 、 $C_{EN}$ 、 $C_{FE}$ 分别为配置成本、投资 成本等年值、能源购置成本、运维成本、环境成本、灵 活性调用成本。目标函数的各构成成本具体计算过 程见附录A式(A8)—(A12)。

### 3.2 约束条件

3.2.1 灵活性供需匹配指标约束

在CIES中考虑配置充足的灵活性,是实现系统 减小或消除可再生能源接入、负荷等不确定因素带 来负面影响的根本。灵活性指标作为衡量系统应对 不确定性能力的有效方式之一,在优化配置中考虑 将该指标作为约束,对CIES配置具有重要意义<sup>[10,14]</sup>, 具体如下:

$$F_{\rm MC} \ge F_{\rm MC,m} \tag{19}$$

式中: F<sub>MC,m</sub>为灵活性匹配系数的阈值,即对系统进行优化配置时预期的灵活性供需匹配水平。

3.2.2 功率平衡约束

天然气、电、热、冷功率平衡约束如附录A式(A13) 所示。

3.2.3 出力约束

各能源转换设备的出力约束如附录A式 (A14)、(A15)所示。 3.2.4 蓄能约束

能源储存设备的蓄能约束见附录A式(A16)。

3.2.5 灵活性供需平衡约束

灵活性供需平衡约束如下:

$$\left\{ \sum_{m=1}^{M} \sum_{i=1}^{I} f_{up}^{i,m,t} + P_{Grid,f}^{i} \ge F_{NL,up}^{t} \\ \sum_{m=1}^{M} \sum_{i=1}^{I} f_{down}^{i,m,t} + P_{Grid,f}^{i} \ge F_{NL,down}^{t} \right.$$
(20)

式中: P<sup>t</sup><sub>Grid,f</sub>为 t 时刻为满足系统灵活性需求额外从 上级电网购买的功率。

#### 3.3 求解方法

本文所构建的优化配置模型属于混合整数非 线性规划问题,将该问题通过分段线性化<sup>[17,22]</sup>转化 为混合整数线性规划问题,以CPU为i7-8700T、内存 为8GB的PC为计算平台,基于MATLAB R2015b仿 真平台通过YALMIP工具箱调用GUROBI 9.0.2求 解器对优化配置模型进行求解。

## 4 算例分析

本文以我国北方某园区为例进行仿真,该地区 夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,冷、热供给需求大。 根据该园区的历史用能数据,利用场景削减<sup>[23]</sup>,通过 场景间的"概率距离"来表示场景之间的关系,去除 小概率场景,根据概率距离之和最小原则选出部分 代表性场景来表示概率距离与之相近的场景,并聚 合其概率,从而分别获得冬季典型日供热场景、夏季 典型日供冷场景和过渡季典型日供电场景,具体削 减方法见文献[23]。其风光、负荷特性曲线见附录 A图A8,各典型日的环境温度见附录A图A9,该园 区的分时电价和天然气价格见附录A表A1,算例中 各设备装置参数见附录A表A2,其中包括技术参数 和经济参数。考虑能源转换设备受多因素影响的变 工况特性下的能效拟合数据见附录A表A3。系统 中电能和天然气的污染物排放系数和环境惩罚价值 见附录A表A4。

# 4.1 考虑不同工况的配置结果分析

CIES中设备种类多样且运行状态复杂,系统配置方案的经济性及协同互补效果主要取决于系统模型的精确程度。相较于将设备的输入和输出关系简化为线性关系,本文考虑系统内设备受负载率、外部环境等因素影响而能效实时变化的特点,对其受多种因素影响的非线性变工况特性进行仿真分析。以30 min 为时间间隔进行算例仿真,分别考虑设备处于额定工况和变工况对系统进行优化配置,额定工况模型和变工况模型的求解时间分别为654.27 s和785.54 s,2种工况下系统配置结果和配置成本分别如表1和图3所示。

图3给出了2种工况下系统配置成本的分布情

24

#### 表1 2种工况下系统配置结果

Table 1 System allocation results under two conditions

设备	额定工况	变工况
燃气轮机台数	6	2
余热锅炉台数	4	1
燃气锅炉台数	7	8
电制冷机台数	5	8
吸收式制冷机台数	6	4
热交换设备台数	14	14
光伏设备台数	8	8
风机台数	8	8
蓄电设备容量 / (kW·h)	837.54	1654.12
蓄热设备容量 / (kW·h)	454.28	833.58
蒌\公	154 20	336.80



#### 图3 2种工况下系统配置成本

Fig.3 System allocation costs under two conditions

况,其中投资成本和能源购置成本所占比例较高, 运维成本和环境成本所占比例相对较低。变工况 和额定工况模型的配置成本分别为2208.38万元和 2068.52万元,变工况模型的配置成本相比额定工况 模型增加了6.76%。

变工况特性下,能源购置成本、运维成本和环境 成本均较额定工况有所增加,投资成本相比减少,其 中能源购置成本增加是导致配置成本增加的主要原 因。这是由于在额定工况特性下,各设备以理想状 态高效率运行,能源利用率高,经济性更优,故系统 主要通过配置设备让其以额定工况高效率出力满足 系统内的多能负荷需求。但考虑变工况特性时,系 统内各设备效率实时动态变化,且均较额定工况有 一定程度的降低,所以需要配置更多数量的设备来 保证相同负荷的能源需求。而相较于上述增加设备 配置数量的方案,由图3可知系统从上级电网购电 满足系统内负荷需求有着更好的经济效益,所以变 工况特性下购电成本显著增加,能源购置成本也随 之增加。变工况特性下系统内设备效率降低导致出 力增加,而运维成本和环境成本与设备出力紧密相 关,因此相较于额定工况下成本有所增加。投资成 本与系统内设备配置数量和其配置成本紧密联系, 其中燃气轮机配置成本高而配置数量显著减少是导 致投资成本减少的主要原因。

额定工况、变工况特性下的电功率、热功率、冷 功率优化出力的结果如附录A图A10所示。结合图 A10(a)中电功率优化出力结果和表1中系统配置结 果可以看出,冬季、夏季和过渡季都有电负荷需求, 变工况特性下燃气轮机配置数量减少,蓄电设备配 置容量增加。这是由于在额定工况特性下,系统内 的电负荷主要由风光发电和燃气轮机发电满足;由 于夏季和过渡季热负荷需求显著减少而电负荷需求 增多,燃气轮机发电受供热制约,因此部分电负荷还 需系统向上级电网购电满足,并有一部分电能用来 驱动电制冷机供冷。而在变工况特性下,冬季、夏 季、过渡季电负荷都主要由风光发电和向上级电网 购电满足,且提供给电制冷机的电能增加。

2种工况下热功率优化出力结果如附录A图 A10(b)所示,可见热负荷在冬季供热场景需求大, 在夏季和过渡季需求小。变工况特性下,余热锅炉 配置数量减少,燃气锅炉配置数量、蓄热设备配置容 量增加。这是由于在额定工况特性下,系统内热负 荷主要由余热锅炉供热满足;由于冬季热负荷需求 过大,余热锅炉供热受上级燃气轮机供热影响不能 满足全部热负荷需求,因此还需要燃气锅炉消耗天 然气供热满足。其中在夏季和过渡季,系统内大部 分热能提供给吸收式制冷机供冷。而在变工况特性 下,热负荷主要由燃气锅炉供热满足,且提供给吸收 式制冷机的热能减少。

2种工况下冷功率优化出力结果如附录A图 A10(c)所示,可见夏季冷负荷需求大,冬季无冷负 荷需求。变工况特性下,吸收式制冷机配置数量减 少,电制冷机配置数量、蓄冷设备配置容量增加。这 是由于在额定工况特性下,系统内的冷负荷主要由 吸收式制冷机供冷满足,其中在冷负荷需求大的夏 季,吸收式制冷机的供冷量受系统内热功率供需平 衡影响不能满足全部冷负荷需求,因此还需要电制 冷机耗电供冷满足。而在变工况特性下,受上级供 给的电能增多而热能减少的影响,系统内冷负荷需 求主要由电制冷机满足。

基于上述变工况特性下系统的最优配置方案, 典型日下余热锅炉效率受负载率和排烟温度影响的 能效变化曲线如图4所示。由图可见,余热锅炉在 实际运行过程中的效率明显低于额定工况下90% 的运行效率,且效率随着负载率和排烟温度的实时 变化而动态变化,余热锅炉输入输出关系呈现非线 性特征。余热锅炉的实时效率受负载率和排烟温度 影响,一方面部分负载率和园区用能特性紧密相关, 在高负载率下,余热锅炉效率较高,而在低负载率 下,余热锅炉效率较低;另一方面,排烟温度与进气 温度密切关联,余热锅炉排烟温度升高,效率随之降 低。这是由于出口温度越高,废气带出的热量越多, 可利用的能量也就越少。

除此之外,CIES中其余能源转换设备的能效也



26



受负载率和环境变化因素影响而动态变化。燃气轮机、燃气锅炉、吸收式制冷机、电制冷机等设备在典型 日下的能效变化曲线如附录A图A11—A15所示。

综合分析可得,2种工况下系统的配置结果具 有明显的差异,考虑设备受多种因素影响的变工况 特性下的CIES优化配置会一定程度上增加配置成 本,但是能够更加准确反映设备能效实时变化的特 点,从而使配置结果更加合理准确,符合工程实际。

# 4.2 计及灵活性供需匹配约束的配置结果分析

对上述2种工况下的系统进行优化配置时不考 虑将灵活性供需匹配指标作为约束,额定工况和 变工况特性下系统配置成本分别为2024.88万元和 2212.35万元,灵活性供需匹配系数分别为0.1855 和0.2021。由此可见系统明显缺乏灵活性。

在考虑上述设备变工况特性的基础上,进一步 计及灵活性供需匹配指标约束对系统进行优化配 置,考虑可再生能源接入的不同比例,对不同风电、 光伏发电接入比例下的灵活性供需匹配系数和系统 配置成本进行计算,其对应关系如图5所示。从图 可以看出,随着风电占可再生能源接入比例的增加, 灵活性供需匹配系数呈现先升高后降低的趋势,而 系统配置成本则呈现单调递减且减速逐渐增大的趋势。这是由风电和光伏的出力特性决定的,风电在 夜间出力相对较高且在白天稳定出力,而光伏只在 白天出力。随着风电占可再生能源接入比例的提 高,风电出力显著增加,与光伏出力叠加使可再生能 源出力更加平稳,系统内灵活性更加充足,发生弃风、弃光概率也将降低,因此灵活性供需匹配系数会逐渐上升。当风电占可再生能源接入比例达到 60%后,随着风电占比的继续增加,光伏发电占比 继续减小,可再生能源在白天的总出力逐渐降低,系 统在白天的灵活性需求将逐渐上升,因此灵活性供 需匹配系数逐渐下降。



随着风电占可再生能源接入比例的增加,系统 的净负荷峰谷差随之减小,系统内灵活性供需匹配 程度增加,灵活性调用成本随之增加;但单台风机成 本较光伏设备低,随着风电容量占比的增加,投资成 本随之减小。考虑灵活性供需匹配的系统配置成本 主要受投资成本和灵活性调用成本影响,随着风电 占可再生能源接入比例的增加,配置成本逐渐减小。 当风电占可再生能源接入比例达到60%后,灵活性 供需匹配系数逐渐下降,灵活性调用成本随之下降, 配置成本继续下降且降速增大。

考虑上述风电占可再生能源接入比例最优时, 计及灵活性对 CIES 进行优化配置,可得到系统的灵 活性供需匹配系数和配置成本的关系,如图6所示。 可见系统配置中考虑灵活性供需匹配指标约束会在 一定程度上增加配置成本,但是系统的灵活性也会 显著提升。此外,系统配置中为满足不同的灵活性 供需匹配指标,配置成本具有明显差异。配置成本 随着灵活性供需匹配系数的增加而上升,在灵活性 匹配系数超过0.89后,配置成本出现跳跃式上升且 在该点后的上升速率较之前有所增长。



考虑图6中跳跃式增长点前灵活性供需匹配系数为0.89时的系统配置情况,得到此时各典型日下系统的灵活性供需匹配结果如图7所示。





Fig.7 Flexible supply-demand matching when flexible supply-demand matching coefficient is 0.89

灵活性供需匹配系数为0.89时,系统内的灵 活性供给能够满足大部分灵活性需求,但在某些 时段存在灵活性供给不足的场景。例如,在冬季供 热场景中,06:30-08:30、18:30-21:30时段出现上 调灵活性不足,09:00-13:00时段出现下调灵活性 不足;在夏季供冷场景中,18:00-22:30时段出现上 调灵活性不足,09:30-17:00时段出现下调灵活性 不足;在过渡季供电场景中,08:00-09:30、16:00-18:30时段出现上调灵活性不足,05:30-07:00时段 出现下调灵活性不足。这些时段均是处于系统净负 荷的上调峰值和下调峰值时段,在此时段内,可提供 灵活性的能源设备在满足电、热、冷负荷平衡的同时 已达到自身出力最大值,无法再提供额外的功率。 此时若要进一步提高系统的灵活性供需匹配程度, 则必须配置更多数量的能源转换设备和更大容量的 能源储存设备,因此系统配置成本将跳跃式增加。

此外,在灵活性供需匹配系数超过0.89后,配置 成本上升速率也较之前有所增长。这是由于考虑系 统灵活性供需匹配后,配置成本分布中的投资成本 和运维成本受灵活性匹配程度影响较大。其中,配 置成本跳跃式上升是由于增加设备配置台数导致投 资成本明显增加,而上升速率增加则是由于运维成 本受设备配置台数和设备出力的共同影响,增长速 度较灵活性供需匹配系数小于0.89时更加显著,因 此配置成本上升速率增加。

由此可得,系统的经济性和灵活性存在明显的 博弈关系,在系统优化配置中根据实际需要合理选 择灵活性供需匹配系数,能够以一定经济性的牺牲 提升系统应对不确定性的能力,达到预期的灵活性 水平,从而更好地应对风光的随机波动性和负荷需 求的不确定性,避免过度投资和资源浪费。

#### 5 结论

本文针对 CIES 中设备的变工况特性及可再生 能源接入、负荷需求波动带来的不确定性问题,构建 能源转换设备的变工况模型,并提出了灵活性供需 匹配指标,在此基础上,进一步建立了 CIES 优化配 置模型,所得结论如下。

1)考虑负载率、外部环境等多种影响因素,提出 了能源转换设备基于变工况特性下的数学模型,并 在此基础上建立了CIES优化配置模型。该模型能 够更加准确反映设备受多种因素影响下能效实时变 化的特性,更符合设备实际运行情况,使系统配置结 果更加科学合理。

2)为了提升系统应对可再生能源接入和负荷需 求不确定性的能力,提出灵活性供需匹配指标,该指 标具有通用性,能够整体可视化地评价系统的灵活 性供给与灵活性需求的匹配程度。在CIES优化配 置中考虑将该指标作为约束,使系统配置具有充足 的灵活性以应对不确定性问题。

3)以北方某园区为例进行了仿真分析,仿真结 果表明考虑能源转换设备变工况特性可使配置结果 更加合理可行;考虑系统内灵活性供需匹配并选取 合理的灵活性供需匹配系数来指导系统优化配置, 能够以较优的经济性提升系统应对不确定性的能 力。本文所提优化配置模型可帮助规划运营部门进 行决策,在考虑本地资源条件下使 CIES 的优化配置 更加有效合理。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

# 参考文献:

- [1] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 新时代的中国能源发展 [EB / OL]. [2022-01-17]. http://www.scio.gov.cn / zfbps.
- [2] 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.
- [3] 郝然,艾芊,朱字超,等. 基于能源集线器的区域综合能源系统 分层优化调度[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):171-178.
   HAO Ran, AI Qian, ZHU Yuchao, et al. Hierarchical optimal dispatch based on energy hub for regional integrated energy

system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 171-178.

[4] 沈欣炜,郭庆来,许银亮,等.考虑多能负荷不确定性的区域
 综合能源系统鲁棒规划[J].电力系统自动化,2019,43(7):
 34-41.

SHEN Xinwei, GUO Qinglai, XU Yinliang, et al. Robust planning method for regional integrated energy system considering multi-energy load uncertainties[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 34-41.

- [5] SHEN X, GUO Q, SUN H. Regional integrated energy system planning considering energy price uncertainties: a two-stage stochastic programming approach [J]. Energy Procedia, 2019, 158:6564-6569.
- [6] 李建林,田立亭,程林,等.考虑变工况特性的微能源系统优化规划(一)基本模型和分析[J].电力系统自动化,2018,42(19): 18-26,49.

LI Jianlin, TIAN Liting, CHENG Lin, et al. Optimal planning of micro-energy system considering off-design performance part one general model and analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19):18-26, 49.

- [7] 陈晚晴,穆云飞,贾宏杰,等.考虑设备变工况特性的区域综合 能源系统优化调度方法[J]. 电网技术,2021,45(3):951-958.
   CHEN Wanqing, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Operation optimization method for regional integrated energy system considering part-load performances of devices[J]. Power System Technology, 2021, 45(3):951-958.
- [8] DENG Sha, WU Qinghua, JING Zhaoxia, et al. Optimal capacity configuration for energy hubs considering part-load characteristics of generation units[J]. Energies, 2017, 10(12): 1966.
- [9] YUAN Z, JING Z X, HU R, et al. Operation optimization of CCHP-type microgrid considering units' part-load characteristics
   [C] //2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia. Bangkok, Thailand: IEEE, 2015:182-188.
- [10] 鲁宗相,李海波,乔颖. 含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J]. 电力系统自动化,2016,40(13):147-158.
   LU Zongxiang,LI Haibo,QIAO Ying. Power system flexibility planning and challenges considering high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems,2016, 40(13):147-158.
- [11] 孙伟卿,田坤鹏,谈一鸣,等.考虑灵活性需求时空特性的电网 调度计划与评价[J].电力自动化设备,2018,38(7):168-174. SUN Weiqing,TIAN Kunpeng,TAN Yiming, et al. Power grid dispatching plan and evaluation considering spatial and temporal characteristics of flexibility demands[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(7):168-174.
- [12] 肖定垚,王承民,曾平良,等.考虑可再生能源电源功率不确定性的电源灵活性评价[J].电力自动化设备,2015,35(7):120-125,139.
   XIAO Dingyao, WANG Chengmin, ZENG Pingliang, et al. Power source flexibility evaluation considering renewable energy

wer source flexibility evaluation considering renewable energy generation uncertainty[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(7):120-125, 139.

- [13] 李海波,鲁宗相,乔颖,等. 大规模风电并网的电力系统运行灵 活性评估[J]. 电网技术,2015,39(6):1672-1678.
  LI Haibo,LU Zongxiang,QIAO Ying, et al. Assessment on operational flexibility of power grid with grid-connected largescale wind farms[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1672-1678.
- [14] 刘万宇,李华强,张弘历,等.考虑灵活性供需平衡的输电网扩展规划[J].电力系统自动化,2018,42(5):56-63.
   LIU Wanyu, LI Huaqiang, ZHANG Hongli, et al. Expansion

LIU Wanyu, LI Huaqiang, ZHANG Hongli, et al. Expansion planning of transmission grid based on coordination of flexible power supply and demand[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5):56-63.

- [15] 杨龙杰,李华强,余雪莹,等. 计及灵活性的孤岛型微电网多目标日前优化调度方法[J]. 电网技术,2018,42(5):1432-1440. YANG Longjie, LI Huaqiang, YU Xueying, et al. Multi-objective day-ahead optimal scheduling of isolated microgrid considering flexibility[J]. Power System Technology, 2018,42(5): 1432-1440.
- [16] MEYBODI M A, BEHNIA M. A study on the optimum arrangement of prime movers in small scale microturbine-based CHP systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 48:122-135.
- [17] 李志伟,赵书强,刘金山.基于机会约束目标规划的风-光-水-气-火-储联合优化调度[J].电力自动化设备,2019,39(8):214-223.
  LI Zhiwei, ZHAO Shuqiang, LIU Jinshan. Coordinated optimal dispatch of wind-photovoltaic-hydro-gas-thermal-storage system based on chance-constrained goal programming[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(8):214-223.
- [18] 杨承,王平,刘换新,等.分布式燃气-蒸汽联合循环供能系统 热经济性分析[J].中国电机工程学报,2019,39(18):5424-5432,5590.
   YANG Cheng, WANG Ping, LIU Huanxin, et al. Thermo-eco-

nomic analysis on gas-steam combined cycle-based distributed energy supply system [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39 (18):5424-5432,5590.

- [19] 吴穷. 燃气-蒸汽联合循环机组热力性能分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
   WU Qiong. Analysis of thermal performance for cogas unit
   [D]. Harbin; Harbin Institute of Technology,2018.
- [20] 施泉生,丁建勇,刘坤,等.含电、气、热3种储能的微网综合能 源系统经济优化运行[J].电力自动化设备,2019,39(8):269-276,293.

SHI Quansheng, DING Jianyong, LIU Kun, et al. Economic optimal operation of microgrid integrated energy system with electricity, gas and heat storage [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8):269-276, 293.

- [21] 丛小涵. 计及需求侧广泛参与的电力系统灵活性评价与优化 配置研究[D]. 南京:东南大学,2020.
   CONG Xiaohan. Study on flexibility evaluation and optimal configuration of power system with extensive participation of demand side[D]. Nanjing:Southeast University,2020.
- [22] 刘天琪,曾红,何川,等.考虑电转气设备和风电场协同扩建的 气电互联综合能源系统规划[J]. 电力自动化设备,2019,39 (8):144-151.

LIU Tianqi, ZENG Hong, HE Chuan, et al. Planning of integrated gas and electricity system considering coordinated expansion of power-to-gas facilities and wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8):144-151.

[23] LI Y, ZOU Y, TAN Y, et al. Optimal stochastic operation of integrated low-carbon electric power, natural gas and heat delivery system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018,9(1):273-283.

### 作者简介:



王强钢(1987—),男,副教授,博士,研 究方向为电力系统运行与控制、电力系统自 动化、电能质量等(E-mail:qianggang1987@ cqu.edu.cn);

吴雪翚(1996—),女,硕士研究生,主 要研究方向为电力系统优化运行(E-mail: 1084547873@qq.com)。

王强钢

(编辑 李玮)

(下转第37页 continued on page 37)

28

# Optimal dispatching of electric-thermal coupling system considering influence of laying method of heating network pipeline

ZHANG Lei<sup>1</sup>, LU Tianlin<sup>2</sup>, YANG Chen<sup>2</sup>, YE Jing<sup>2</sup>, CHEN Qing<sup>1</sup>, HUANG Yuehua<sup>2</sup>, XUE Tianliang<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering & Renewable Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Microgrid,

China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: As an important driving factor of the temperature dynamic process in the heating system, the heating loss characteristics of heating network are significantly affected by the laying method of heating network pipeline in the combined electric-thermal dispatching. Aiming at the different laying methods of heating network pipeline, the mechanism of heating loss characteristics of heating network in the combined electric-thermal dispatching. Aiming at the different laying methods of heating network pipeline, the mechanism of heating loss characteristics of heating network in the combined electric-thermal dispatching and the characteristic differences under different laying methods of heating network pipeline are analyzed. A dynamic process constraint model of heating network pipeline temperature considering the influence of heating loss characteristics is proposed. On this basis, considering the uncertainties of wind power output and load, the dispatching model of multi-scene electric-thermal coupling system considering the influence of laying method of heating network pipeline is established, and the robust optimization solution strategy with information gap is proposed. The simulative results of case study show that compared with the traditional pipeline constraint model, the proposed pipeline constraint model reflects the influence of the actual structure of heating network on the operation constraints of heating system, and improves the operation economy of system.

Key words: electric-thermal coupling system; pipeline laying method; heat loss characteristics of heating network; uncertainty of wind power; dispatching decision

(上接第28页 continued from page 28)

# Optimal allocation model of community integrated energy system considering off-design performance of device and flexible supply-demand matching

WANG Qianggang<sup>1</sup>, WU Xuehui<sup>1</sup>, YANG Longjie<sup>1</sup>, ZHOU Niancheng<sup>1</sup>, ZHANG Hao<sup>2</sup>, LI Zhe<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Zhejiang Huayun Electric Power Engineering Design & Consultation Co., Ltd., Hangzhou 310014, China;

3. State Grid Chongqing Electric Power Company Research Institute, Chongqing 401120, China)

Abstract: The establishment of reasonable and effective optimal allocation model is important for the economic operation and multi-energy supply-demand balance in the integrated energy system. Thereby, an optimal allocation model is proposed considering the off-design performance and the flexible supply-demand matching for the community integrated energy system. The off-design performance model of equipment affected by multiple factors is proposed, in which the uncertainty of equipment energy efficiency in the system is considered. Then, the flexible supply-demand matching index is developed to improve the system's ability for coping with the uncertainty of renewable energy generally and power demand. The optimal allocation model of community integrated energy system is developed to minimize the system allocation cost, in which the constraint that corresponds to flexible supply-demand matching index is taken into account. Finally, a community integrated energy system in northern China is taken as an example for simulation analysis. Simulative results show that the system allocation can be scientifically and reasonably optimized considering the off-design performance and the degree of flexible supply-demand matching.

Key words: community integrated energy system; off-design performance; flexible supply-demand matching; optimal allocation





(a)电效率随负载率及环境温度的变化



(b)热效率随负载率及压气机压缩比的变化图 A1 燃气轮机变工况特性曲线Fig.A1 Off-design performance curve of gas turbine

$$m_{\rm GT}^{\prime} = \sum_{n=0}^{1} k_{\rm GT}^{m} \left( T_{\rm aGT}^{\prime} \right)^{n}$$
(A1)

式中:  $m'_{GT}$ 为燃气轮机t时刻的烟气流量;  $k''_{GT}$ 为拟合系数。

$$\pi_{\rm GT}^{t} = \sum_{n=0}^{1} k_{\rm GT}^{\pi} \left( m_{\rm GT}^{t} \right)^{n} \tag{A2}$$

式中:  $k_{GT}^{\pi}$ 为拟合系数。



# 图 A2 余热锅炉变工况特性曲线 Fig.A2 Off-design performance curve of waste heat boiler

$$T'_{\rm pWHB} = \sum_{n=0}^{1} k_{\rm WHB}^{\rm p} \left(T'_{\rm pGT}\right)^{n}$$
(A3)

式中:  $T'_{pGT}$ 为燃气轮机t时刻的排烟温度;  $k^p_{WHB}$ 为拟合系数。

$$T_{\rm pGT}^{t} = \sum_{n=0}^{1} k_{\rm WHB}^{\rm g} \left( m_{\rm GT}^{t} \right)^{n}$$
(A4)

式中: k<sup>g</sup><sub>WHB</sub> 为拟合系数。



图 A3 燃气锅炉变工况特性曲线

Fig.A3 Off-design performance curve of gas boiler

$$T_{pGB}^{t} = \sum_{n=0}^{1} k_{GB}^{t} \left( T_{aGB}^{t} \right)^{n}$$
(A5)

式中:  $T'_{aGB}$ 为燃气锅炉t时刻的进气温度;  $k'_{GB}$ 为拟合系数。





Fig.A4 Off-design performance curve of absorption chiller

$$T_{pAC}^{t} = \sum_{n=0}^{1} k_{AC}^{t} \left( T_{aAC}^{t} \right)^{n}$$
(A6)

式中:  $T_{aAC}^{t}$ 为吸收式制冷机 t 时刻的进气温度;  $k_{AC}^{t}$ 为拟合系数。



#### 图 A5 电制冷机变工况特性曲线

Fig.A5 Off-design performance curve of electrical chiller

$$E_{s}^{t} = E_{s}^{t-1}(1 - \sigma_{s}) + \left(P_{s,c}^{t}\eta_{s,c} - \frac{P_{s,D}^{t}}{\eta_{s,D}}\right)\Delta t$$
(A7)

式中:  $S \in \{\text{ESE,TSE,CSE}\}; E_{s}^{t-1} 、 E_{s}^{t} 分别为蓄能设备 t-1 时刻、t 时刻的蓄能量; <math>\sigma_{s}$ 为蓄能设备自放能率;  $P_{s,c}^{t} 、 P_{s,D}^{t} 分别为蓄能设备 t 时刻的充、放能功率; <math>\eta_{s,c} \land \eta_{s,D} 分别为蓄能设备充、放能效率。$ 







$$C_{\rm I} = \sum_{p} \frac{r(1+r)^{y_p}}{r(1+r)^{y_p} - 1} n_p s_p \lambda_p \delta_p + \sum_{q} \frac{r(1+r)^{y_q}}{r(1+r)^{y_q} - 1} s_q \lambda_q \delta_q$$
(A8)

式中:  $p \in \{GT, WHB, GB, EC, PV, WT, AC, HE\}$ 为容量固定、考虑配置台数的能源转换设备(离散设备);  $q \in \{ESE, TSE, CSE\}$ 为考虑容量定制的能源储存设备(连续设备); r为年利率;  $y_p$ 、 $y_q$ 分别为离散设备和 连续设备的预期使用年限;  $n_p$ 为离散设备的台数;  $s_p$ 、 $s_q$ 分别为离散设备和连续设备的单台设备容量;  $\lambda_p$ 、 $\lambda_q$ 分别为离散设备和连续设备的单台设备容量投资成本;  $\delta_p$ 、 $\delta_q$ 分别为离散设备和连续设备的二进 制变量, 1表示设备配置, 0表示设备未配置。

 $C_{\rm E}$ 是购电和购气的能源购置成本:

$$C_{\rm E} = \sum_{d=1}^{D} \sum_{t=1}^{T} \left( \mu_{\rm Grid} P_{\rm Grid}^{\prime} + \mu_{\rm gas} P_{\rm gas}^{\prime} \right) \tag{A9}$$

式中: d为系统运行天数; D为总天数; T为一天总小时数;  $\mu_{Grid}$ 、  $\mu_{gas}$ 分别为购电、购气成本;  $P'_{Grid}$ 、  $P'_{gas}$ 分别为t时刻的购电功率和购气功率。

C<sub>M</sub>是设备的运行维护成本:

$$C_{\rm M} = \sum_{d=1}^{D} \sum_{t=1}^{T} \sum_{m=1}^{M} \sum_{i=1}^{L} \left( \varphi^{i,m} P^{i,m,t} \right)$$
(A10)

式中: $\varphi^{i.m}$ 为第m种设备第i台机组的运行成本。

C<sub>EN</sub>是系统运行中排放污染物的环境成本:

$$C_{\rm EN} = \sum_{d=1}^{D} \sum_{t=1}^{T} \sum_{j=1}^{J} \kappa^{j} \left( \gamma_{\rm Grid}^{j} P_{\rm Grid}^{t} + \gamma_{\rm gas}^{j} P_{\rm gas}^{t} \right)$$
(A11)

式中: j为排放物类型;  $\kappa^{j}$ 为第 j类排放物的环境惩罚成本;  $\gamma_{\text{Grid}}^{j}$ 、  $\gamma_{\text{gas}}^{j}$ 分别为单位电功率和天然气功率 所产生的第 j类排放物的排放量。

C<sub>FE</sub>是系统调配灵活性资源所产生的调用成本:

$$C_{\rm FE} = \sum_{d=1}^{D} \sum_{t=1}^{T} \sum_{m}^{M} \sum_{i=1}^{I} \left( \mu_p^{i.m,t} f_p^{i.m,t} \right) + \sum_{d=1}^{D} \sum_{t=1}^{T} \sum_{m}^{M} \left( \mu_q^{i.m,t} f_q^{i.m,t} \right)$$
(A12)

式中: $\mu_p^{i.m.t}$ 、 $\mu_q^{i.m.t}$ 分别为离散设备、连续设备的第m种设备第i台机组在t时刻灵活性资源调用成本; $f_p^{i.m.t}$ 、 $f_a^{i.m.t}$ 分别为离散设备、连续设备的第m种设备第i台机组在t时刻灵活性资源调用功率。

$$\begin{cases} P_{\text{gas}}^{t} = \sum_{i=1}^{n_{\text{GT}}} P_{\text{gas,GT}}^{i,t} + \sum_{i=1}^{n_{\text{GT}}} P_{\text{gas,GB}}^{i,t} \\ P_{\text{Grid}}^{t} + \sum_{i=1}^{n_{\text{PV}}} P_{\text{PV}}^{i,t} + \sum_{i=1}^{n_{\text{GT}}} P_{\text{WT}}^{i,t} + \sum_{i=1}^{n_{\text{GT}}} P_{\text{e,GT}}^{i,t} = P_{\text{eL}}^{t} + \sum_{i=1}^{n_{\text{EC}}} P_{\text{e,EC}}^{i,t} + P_{\text{ESE,C}}^{t} - P_{\text{ESE,D}}^{t} \\ \\ \sum_{i=1}^{n_{\text{GB}}} P_{\text{h,GB}}^{i,t} + \sum_{i=1}^{n_{\text{WH}}} P_{\text{h,WHB}}^{i,t} = \sum_{i=1}^{n_{\text{HE}}} P_{\text{h,HE}}^{i,t} + \sum_{i=1}^{n_{\text{AC}}} P_{\text{h,AC}}^{i,t} + P_{\text{TSE,C}}^{t} - P_{\text{TSE,D}}^{t} \\ \\ \\ \sum_{i=1}^{n_{\text{AC}}} P_{\text{c,AC}}^{i,t} + \sum_{i=1}^{n_{\text{EC}}} P_{\text{c,EC}}^{i,t} = P_{\text{cL}}^{t} + P_{\text{CSE,C}}^{t} - P_{\text{CSE,D}}^{t} \end{cases}$$
(A13)

式中:  $P'_{Grid}$ 、 $P'_{ESE,C}$ 、 $P'_{eL}$ 分别为 t 时刻的购电功率、蓄电设备的充电功率、放电功率、电负荷功率;  $P'_{TSE,C}$ 、  $P'_{TSE,D}$ 分别为蓄热设备 t 时刻的充、放热功率;  $P'_{CSE,C}$ 、 $P'_{CSE,D}$ 、 $P'_{dL}$ 分别为 t 时刻的蓄冷设备充、放冷功率和冷负荷功率。

$$\tau^{i,m,t}\delta^m_{\min}s^{i,m} \le P^{i,m,t} \le \tau^{i,m,t}\delta^m_{\max}s^{i,m}$$
(A14)

式中:  $m \in \{\text{GT,WHB,GB,EC,AC}\}; \tau^{i,m,t} \in \{0,1\}$ 代表设备的启停状态;  $\delta_{\min}^m \setminus \delta_{\max}^m$ 分别为第 m 种设备的最小和最大功率系数。

$$0 \le P^{i,m,t} \le P^{m,t}_{\max} \tag{A15}$$

式中:  $m \in \{PV, WT, HE\}; P_{max}^{m,t}$ 为第 m 种设备在 t 时刻的输出功率最大值。

$$\begin{cases} E_{s}^{\min} \leq E_{s}' \leq E_{s}^{\max} \\ 0 \leq P_{s,C}' \leq (1 - \delta_{s}') P_{s,C}^{\max} \\ 0 \leq P_{s,D}' \leq \delta_{s}' P_{s,D}^{\max} \end{cases}$$
(A16)

式中:  $S \in \{\text{ESE,TSE,CSE}\}; E_s^{\min} \in E_s^{\max}$ 分别为蓄能设备允许的最小和最大储能量;  $P_{s,c}^{\max} \in P_{s,D}^{\max}$ 分别为蓄能设备的充放能功率上限;  $\delta'_s \in \{0,1\}$ , 0代表蓄能设备的充电状态, 1代表放电状态。



Fig.A8 Curve of load and wind solar power in typical day



图 A9 典型日温度曲线 Fig.A9 Temperature curve in typical day

中十 625	购电价格/	购气价格/			
	(元/kWh)	(元/m <sup>3</sup> )			
峰时段 (10:00-15:00,18:00-21:00)	1.1865				
平时段 (07:00-10:00,15:00-18:00,21:00-23:00)	0.8102	3.5			
谷时段 (23:00-07:00)	0.4015				

表 A1 电价和天然气价格 Table A1 Electricity price and natural gas price

表 A2 设备参数

Table A2 The parameters of equipment						
ነቢ ወ		技术参数	经济参数			
设备 寿命/a		单台机组容量/kW	投资成本/(元・kW <sup>-1</sup> )	运维成本/(元・kW <sup>-1</sup> )		
燃气轮机	25	500	8000	0.0472		
余热锅炉	20	750	1800	0.00216		
燃气锅炉	20	400	4050	0.00216		
光伏设备	20	200	10000	0.0096		
风机	15	300	8000	0.0196		
电制冷机	15	300	1000	0.0087		
吸收式制冷	15	400	1500	0.0072		
热交换设备	10	400	900	0.0024		
蓄电系统	10	_	3000	0.0018		
蓄热系统	10		1000	0.0016		
蓄冷系统	10		800	0.0016		

表 A3 能源转化设备变工况特性拟合常数

Table A3 Fitting constant of off-design performance of energy conversion equipment								
设备类型				拟合:	常数			
燃气轮机	$k_{ m e,GT}^{ m a,0}$	4.6489	$k_{\mathrm{e,GT}}^{\mathrm{b,1}}$	-0.073 2	$k_{ m h,GT}^{ m a,1}$	0.1894	$k_{ m h,GT}^{ m b,2}$	-0.0063
	$k_{\mathrm{e,GT}}^{\mathrm{a,1}}$	0.9157	$k_{\mathrm{e,GT}}^{\mathrm{b,2}}$	-4.2×10 <sup>-4</sup>	$k_{ m h,GT}^{ m a,2}$	-0.0045	$\omega^{\mathrm{b}}_{\mathrm{h,GT}}$	0.7828
	$k_{\mathrm{e,GT}}^{\mathrm{a,2}}$	-0.0098	$\omega_{\rm e,GT}^{\rm a}$	0.6381	$k_{ m h,GT}^{ m a,3}$	1.4×10 <sup>-5</sup>	$\omega^{\rm b}_{\rm h,GT}$	0.2172
	$k_{\mathrm{e,GT}}^{\mathrm{a,3}}$	3.7×10 <sup>-5</sup>	$\omega^{\rm b}_{\rm e,GT}$	0.3619	$k_{ m h,GT}^{ m b,0}$	31.8021	$k_{ m GT}^m$	8.9123
	$k_{\mathrm{e,GT}}^{\mathrm{b,0}}$	29.426 1	$k_{ m h,GT}^{ m a,0}$	70.7744	$k_{ m h,GT}^{ m b,1}$	0.5139	$k_{ m GT}^{\pi}$	3.7151
余热锅炉	$k_{ m h,WHB}^{ m a,0}$	67.9533	$k_{ m h,WHB}^{ m b,0}$	-60.1854	$\omega^{\rm a}_{\rm h,WHB}$	0.5105	$k_{ m WHB}^{ m g}$	0.9364
	$k_{ m h,WHB}^{ m a,1}$	0.2411	$k_{ m h,WHB}^{ m b,1}$	0.2470	$\omega^{\scriptscriptstyle b}_{\scriptscriptstyle h, \rm WHB}$	0.4895		
	$k_{ m h,WHB}^{ m a,2}$	-8.9×10 <sup>-4</sup>	$k_{ m h,WHB}^{ m b,2}$	-1.6×10 <sup>-4</sup>	$k_{ m WHB}^{ m p}$	0.8271		
燃气锅炉	$k_{ m h,GB}^{ m a,0}$	81.0545	$k_{ m h,GB}^{ m a,3}$	-1.8×10 <sup>-4</sup>	$\omega^{\rm a}_{ m h,GB}$	0.6173		
	$k_{ m h,GB}^{ m a,1}$	-0.0490	$k_{ m h,GB}^{ m b,0}$	96.4380	$\omega^{ m b}_{ m h,GB}$	0.3827		
	$k_{ m h,GB}^{ m a,2}$	0.0100	$k_{ m h,GB}^{ m b,1}$	-0.0773	$k_{ ext{GB}}^{t}$	0.7385		
吸收式制冷机	$k_{ m c,AC}^{ m a,0}$	0.1643	$k_{ m c,AC}^{ m b,0}$	6.3904	$k_{\mathrm{c,AC}}^{\mathrm{b,3}}$	-2.5×10 <sup>-6</sup>	$k_{\rm AC}^t$	0.8574
	$k_{ m c,AC}^{ m a,1}$	0.0063	$k_{\mathrm{c,AC}}^{\mathrm{b,1}}$	-0.1212	$\omega^{\rm a}_{\rm c,AC}$	0.7595		
	$k_{ m c,AC}^{ m a,2}$	5.5×10 <sup>-5</sup>	$k_{ m c,AC}^{ m b,2}$	9.6×10 <sup>-4</sup>	$\omega^{ m b}_{ m c,AC}$	0.2405		
电制冷机	$k_{ m c,EC}^0$	0.9375	$k_{\rm c,EC}^1$	0.0780	$k_{ m c,EC}^2$	-6.7×10 <sup>-4</sup>		

Table A4 Environmental costs of major pollutant				
	污染物排放系数/		<b>安陵存</b> 四世世。	
污染物	[g•(1	$kW \cdot h^{-1}]$	坏 現 惩 讨 价 值 /	
	电力	天然气	(兀・kg )	
СО	0.1083	0.1702	1.015	
$CO_2$	623	184.0829	0.028875	
氮氧化物	2.88	0.6188	8.75	







# (c)两种工况下冷功率优化出力结果 图 A10 两种工况下各设备优化出力结果

Fig.A10 Optimized output results of each equipment under two conditions



(a) 冬季典型日下燃气轮机能效变化曲线图

(b) 夏季典型日下燃气轮机能效变化曲线图



# (c) 过渡季典型日下燃气轮机能效变化曲线图

### 图 A11 典型日下燃气轮机发电效率变化曲线图





#### (a) 冬季典型日下燃气轮机能效变化曲线图

#### (b) 夏季典型日下燃气轮机能效变化曲线图



# (c) 过渡季典型日下燃气轮机能效变化曲线图

# 图 A12 典型日下燃气轮机供热效率变化曲线图

Fig.A12 Variation curve of gas turbine heating efficiency under typical days







180





100

### (c) 过渡季典型日下燃气锅炉能效变化曲线图

### 图 A13 典型日下燃气锅炉能效变化曲线图







(b) 过渡季典型日下吸收式制冷机能效变化曲线图

图 A14 典型日下吸收式制冷机能效变化曲线图

Fig.A14 Energy efficiency change curve of absorption chiller under typical days



(a) 夏季典型日下电制冷机能效变化曲线图

### (b) 过渡季典型日下电制冷机能效变化曲线图

# 图 A15 典型日下电制冷机能效变化曲线图

Fig.A15 Energy efficiency change curve of electrical chiller under typical days