

抽水蓄能灰启动下冷热电互补综合能源系统优化调度

侯慧¹, 王燕¹, 刘超¹, 张炜², 周杨珺², LI Zhengmao³, 李正天⁴, 林湘宁⁴

(1. 武汉理工大学自动化学院, 湖北省 武汉市 430070; 2. 广西电网有限责任公司电力科学研究院, 广西壮族自治区 南宁市 530023; 3. 阿尔托大学电气与自动化工程系, 南芬兰省 埃斯波市 00076, 芬兰; 4. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北省 武汉市 430074)

Optimization Scheduling of Cold-Heat-Electricity Integrated Energy System Under Pumped Storage Gray Start

HOU Hui¹, WANG Yan¹, LIU Chao¹, ZHANG Wei², ZHOU Yangjun², LI Zhengmao³,
LI Zhengtian⁴, LIN Xiangning⁴

(1. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei Province, China; 2. Electric Power Research Institute, Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China; 3. Department of Electrical Engineering and Automation, Aalto University, Espoo 00076, South Finland, Finland; 4. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei Province, China)

摘要:【目的】抽水蓄能机组具有灰启动潜力, 将其与综合能源系统(integrated energy system, IES)的多能互补优势相结合, 可适用于系统在极端事件下恢复运行。为研究灾后 IES 的恢复机制, 提出一种抽水蓄能灰启动下冷热电互补综合能源系统(cold-heat-electricity IES, CHEIES)优化调度模型。【方法】首先, 通过随机场景优化处理风光冷热功率不确定性问题, 采用拉丁超立方抽样生成大量随机风光冷热场景, 并使用概率距离快速削减法对场景数量进行削减。然后, 针对灰启动下的 CHEIES, 以抽水蓄能作为灰启动电源为热电联产机组提供启动电源, 并以灰启动效益为核心考量因素, 综合构建单目标优化调度模型, 引入冷热电功率平衡约束, 确保 IES 在各种负荷情况下的稳定运行。最后, 对模型进行仿真求解, 并分析了各种运行方案下的优化调度策略和经济效益。【结果】配置抽水蓄能灰启动的 CHEIES 在应对极端自然灾害情境下展现出较高的灵活性和运行效率, 与未配置抽水蓄能灰启动的方案相比, 系统运行成本降低了 12.14%。【结论】所提方法可充分挖掘紧急状态下 CHEIES 的可靠性、经济性与灵活性, 为极端事件灾后 IES 的快速恢复提供了策略支持。

关键词: 综合能源系统(IES); 抽水蓄能; 灰启动; 黑启动; 冷热电互补综合能源系统(CHEIES); 优化调度; 极端事件

ABSTRACT: [Objectives] Pumped storage units have gray start potential. Integrating this capability with the multi-energy complementary advantages of an integrated energy system (IES) makes it suitable for system recovery under extreme events. To investigate the post-disaster recovery mechanism of IES, this paper proposes an optimization scheduling model for a cold-heat-electricity integrated energy system (CHEIES) under pumped storage gray start. [Methods] First, stochastic scenario optimization is employed to address the uncertainties in wind, solar, cold, and thermal power. Latin hypercube sampling is used to generate a large number of random wind-solar-cold-heat scenarios, and a probability distance-based rapid reduction method is applied to reduce the number of scenarios. Then, for CHEIES under gray start, pumped storage serves as the gray start power source to provide startup power for the combined heat and power unit. A single-objective optimization scheduling model is established with gray start benefit as the core consideration, incorporating cold-heat-electricity power balance constraints to ensure the stable operation of IES under various load conditions. Finally, simulations are conducted to solve the model, and optimization scheduling strategies and economic benefits under different operation schemes are analyzed. [Results] CHEIES with pumped storage ash start-up shows high flexibility and operation efficiency in response to extreme natural disasters. Compared with the scheme without pumped storage ash start-up, the system operation cost is reduced by 12.14%. [Conclusions] The proposed method fully explores the reliability, economic efficiency, and flexibility of CHEIES under emergency conditions, providing strategic support for the rapid

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U22B20106)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (U22B20106).

recovery of IES after extreme events.

KEY WORDS: integrated energy system (IES); pumped storage; gray start; black start; cold-heat-electricity integrated energy system (CHEIES); optimization scheduling; extreme events

0 引言

近年来, 极端自然灾害频发^[1-3], 如冰灾、洪涝和台风等, 对能源供需造成了严重冲击^[4-7], 导致综合能源系统(integrated energy system, IES)失衡。这种失衡不仅对居民生活和工业生产造成影响, 也对 IES 韧性提出了更高要求^[8-11]。在自然灾害等极端事件发生后, IES 往往会进入半黑状态, 此时系统部分功能失效, 但仍保留一定的可用资源。在此情形下, 如何快速、高效地恢复 IES 的正常运行, 是保证社会经济平稳运行的重要工作。

当前研究在 IES 灾前韧性提升和灾后恢复策略方面已有一些进展。在灾前 IES 的韧性方面, 文献[8]提出地震灾害下 IES 的多尺度韧性提升方法; 文献[12]提出了一种基于地震、台风、热浪、寒潮等极端自然灾害的 IES 规划方法, 通过考虑可再生能源不确定性与需求响应, 协同提升区域 IES 的经济性和韧性。然而, 这些研究主要集中在灾前系统韧性提升规划方面, 对灾后 IES 的研究相对较少。针对灾后 IES 恢复策略研究, 文献[13]考虑冰灾下光伏出力不确定性, 利用多种灵活性资源动态恢复重要负荷; 文献[14]提出考虑网络信息动态变化的 IES 恢复策略。值得注意的是, 灾后 IES 系统通常处于部分损毁但尚具备一定运行能力的灰启动状态。不同于传统意义上完全停电条件下的黑启动, 灰启动是指系统在部分能源单元仍可运行的前提下, 通过灵活资源协调、负荷分级重启、多能协同调度等手段, 实现系统的渐进式恢复^[15]。灰启动介于黑启动与正常运行之间, 具有显著的不确定性和动态演化特征, 但也为恢复关键负荷提供了现实基础。因此, 针对灰启动状态下的 IES 恢复机制研究具有重要的研究价值, 但现有研究在揭示多能互补协同机制及其对系统恢复的潜在影响方面仍存在明

显不足。

多能互补在提升灾后 IES 的经济性与灵活性方面取得了一定进展。在灾后经济性方面, 文献[16]为应对严重灾害情景, 提出储能储备配置方案以维持经济效益; 文献[17]探讨了在碳达峰、碳中和目标下, 水能耦合与协同运行对降低运营成本的贡献; 文献[18]提出了一种应对极端事件的工业园区分布式能源配置优化模型, 以寻求经济成本、环境保护和电力系统弹性之间的权衡。以上研究将可再生能源整合到灾后 IES 中, 忽视了抽水蓄能在提高系统调节能力和恢复速度方面的重要性。针对这一局限性, 国家发展改革委和国家能源局发布了《关于加强电网调峰储能和智能化调度能力建设的指导意见》^[19], 明确其在应急响应和能源系统恢复中的关键作用。在灾后灵活性方面, 已有研究广泛探讨了通过多能互补协调优化不同能源形式, 以增强灾后 IES 的灵活性^[20-21]。然而, 抽水蓄能作为关键调节能力, 研究灾后灰启动交互机制仍存在不足, 同时优化调度中也缺乏对系统经济性和灵活性的充分考虑。因此, 如何有效结合抽水蓄能, 提高系统调节能力和恢复速度, 将是未来研究的重要方向。

为此, 本文提出一种新的冷热电互补综合能源系统(cold-heat-electricity IES, CHEIES)优化调度模型, 以研究抽水蓄能和灰启动技术在综合能源系统中的应用, 旨在实现冷能、热能和电能的高效协同与平衡供应。首先, 通过拉丁超立方抽样(Latin hypercube sampling, LHS)法和概率距离削减法生成风能、光伏等冷热功率的不同场景。接着, 将抽水蓄能作为灰启动电源, 并考虑其启动过程中的经济效益, 构建了 CHEIES 优化调度模型。最后, 对各种运行方案下的经济调度策略进行分析, 验证了所提模型能够显著提升灾后 IES 的可靠性、经济性和灵活性, 以及增强系统在紧急状态下的运行能力。

1 CHEIES 优化调度研究框架

本文提出的 CHEIES 优化调度研究框架包括风光冷热不确定性分析、CHEIES 建模及灰启动

效益经济调度模型建模,如图1所示。其中,构建的CHEIES供能系统包含电负荷、热负荷及冷负荷,其结构如图2所示。在电力系统半黑状态下,抽水蓄能机组作为灰启动电源,为热电联产机组提供启动功率,而热电联产机组满足最小技术出力后并网,为CHEIES提供能量。电力系统在优先满足用户端用电需求后,再以电定热的方式给用户端供热供冷。

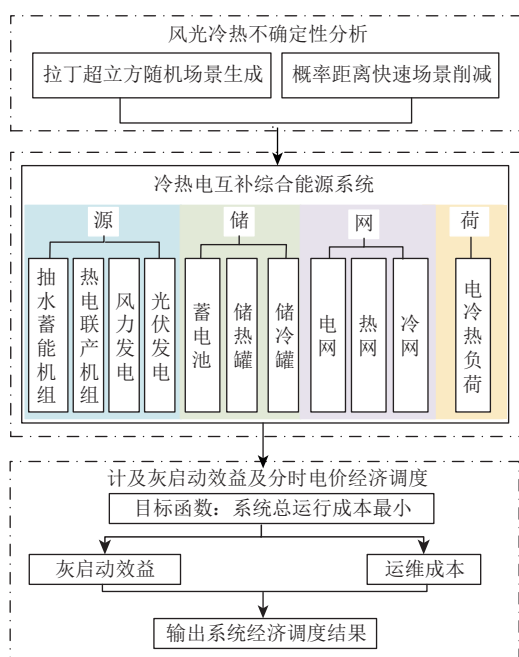


图1 CHEIES优化调度研究框架

Fig. 1 Research framework for optimization scheduling of CHEIES

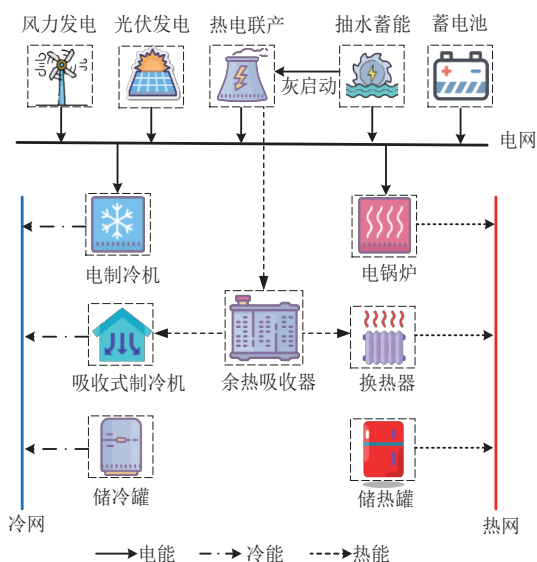


图2 CHEIES供能系统结构

Fig. 2 Structure of CHEIES energy supply system

2 冷热电互补综合能源系统

2.1 抽水蓄能机组

在热电联产机组停机状态下,抽水蓄能机组可快速、稳定地为热电联产机组提供启动功率。抽水蓄能机组既可以作为发电机又可以作为电动机使用,以下为发电及抽水的约束条件:

$$\begin{cases} P_{p,p}(t) = W \cdot U_{p,p}(t) \\ P_p(t) = P_{p,g}(t) - P_{p,p}(t) \\ U_p(t) + U_{p,p}(t) \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{p,p}(t)$ 为抽水蓄能机组在 t 时刻的抽水功率; W 为水泵电机功率; $U_{p,p}(t)$ 为 0-1 变量, 若为 1, 则表示机组在此时间段内抽水, 否则表示不抽水; $P_p(t)$ 为机组在 t 时刻的净功率输出; $P_{p,g}(t)$ 为抽水蓄能机组输出的有功功率, 通过约束条件确保发电和储能 2 种状态不会同时发生; $U_p(t)$ 为 0-1 变量, 若 $U_p(t) = 1$, 表示机组处于发电模式。

假设库容水量充足, 作为灰启动电源抽水蓄能机组的出力, 需满足:

$$\begin{cases} P_{p,p}^{\min} \leq P_{p,p}(t) \leq P_{p,p}^{\max} \\ P_{p,g}^{\min} \leq P_{p,g}(t) \leq P_{p,g}^{\max} \\ |P_{p,g}(t) - P_{p,g}(t-1)| \leq K_p \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_{p,p}^{\max}$ 、 $P_{p,p}^{\min}$ 分别为抽水蓄能机组抽水功率的上、下限; $P_{p,g}^{\max}$ 、 $P_{p,g}^{\min}$ 分别为抽水蓄能机组输出有功功率的上、下限; K_p 为抽水蓄能机组的爬坡斜率。

2.2 热电联产机组

热电联产机组在满足电负荷需求的情况下, 还可对冷热负荷进行功率互补^[22]。热电联产机组以天然气为主要燃料, 通过燃气轮机生产电能, 发电时产生的余热被余热锅炉回收并转化为热能, 而回收的热能一部分用于向用户供热, 一部分通过吸收式冷水机转化为冷能, 从而实现冷、热、电联合供应。其能源效应满足以下条件:

$$\begin{cases} P_G(t) = V_G(t) \cdot H^C \cdot \eta_c^G \\ H_G(t) = P_G(t) \cdot (1 - \eta_c^G - \eta_h^G) / \eta_c^G \\ P_W(t) = H_G(t) \cdot \eta_h^H \\ P_C(t) = P_W(t) - H_A(t) \\ C_A(t) = H_A(t) \cdot \eta_c^A \\ P_C^{\min} \leq P_C(t) \leq P_C^{\max} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $P_G(t)$ 为燃气轮机的输出电功率，kW； $V_G(t)$ 为燃气轮机的天然气消耗量； H_c 为燃气轮机的低热值； η_c^G 、 η_l^G 分别为燃气轮机的发电效率、热损失率； η_h^H 为余热锅炉的运行效率； $P_w(t)$ 为余热锅炉回收并转化的总热能； $H_G(t)$ 为燃气轮机输出热功率； $P_c(t)$ 为余热锅炉的热输出功率，即热电联产机组的热输出功率； $H_A(t)$ 为吸收式冷水机的热输入功率； $C_A(t)$ 为吸收式冷水机的冷输出功率，即热电联产机组的冷输出功率； η_c^A 为吸收式冷水机的运行效率； $P_c^{\max}$ 、 $P_c^{\min}$ 分别为热电联产机组热输出功率的上、下限。

2.3 电制冷/热装置

电制冷机可将电能转换为冷能，电锅炉可将电能转换为热能。电制冷机及电锅炉的输出功率分别如下：

$$L_{d,l}(t) = P_{d,l}(t)\eta_{d,l} \quad (4)$$

$$R_{d,r}(t) = P_{d,r}(t)\eta_{d,r} \quad (5)$$

式中： $L_{d,l}(t)$ 、 $R_{d,r}(t)$ 分别为 t 时刻系统所需的冷能量、热能量； $P_{d,l}(t)$ 、 $P_{d,r}(t)$ 分别为 t 时刻电制冷、电制热系统所需的电能量； $\eta_{d,l}$ 为电能转换为冷能的制冷效率； $\eta_{d,r}$ 为每单位电能转换为热能的有效能量。

电制冷机及电锅炉的输出功率需满足以下约束条件：

$$\begin{cases} 0 \leq L_{d,l}(t) \leq L_{d,l}^{\max} \\ 0 \leq R_{d,r}(t) \leq R_{d,r}^{\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中 $L_{d,l}^{\max}$ 、 $R_{d,r}^{\max}$ 分别为电制冷机、电锅炉输出功率的上限。

2.4 风力及光伏发电

为刻画风力发电、光伏发电、冷负荷及热负荷的功率不确定性^[23]，本文采用LHS法生成风光冷热负荷的随机场景，根据正态分布概率密度函数对原始数据进行抽样，并通过Cholesky分解法降低矩阵内部相关性，提高抽样精度^[24]。生成的场景经过概率距离快速削减法进行场景数量的优化，以提高预测和决策的准确性。风力及光伏发电机组的输出功率(即 P_w 、 P_v)须分别小于生成场景中风光发电功率预测最大值(即 $P_w^{\max}$ 、 $P_v^{\max}$)，表达式如下：

$$\begin{cases} 0 \leq P_w(t) \leq P_w^{\max}(t) \\ 0 \leq P_v(t) \leq P_v^{\max}(t) \end{cases} \quad (7)$$

2.5 蓄电池充放电

当系统电能不能满足电负荷需求时，蓄电池放电为系统提供电能；当电能过剩时，蓄电池将存储多余电能^[25]。蓄电池的运行约束条件如下：

$$\begin{cases} E_E(t) = E_E(t-1) + [\eta_{E,c} P_{E,c}(t) - \frac{1}{\eta_{E,f}} P_{E,f}(t)] \Delta t \\ 0.2E_E^{\max} \leq E_E(t) \leq 0.85E_E^{\max} \\ 0 \leq P_{E,c}(t) \leq P_E^{\max} U_{E,c}(t) \\ 0 \leq P_{E,f}(t) \leq P_E^{\max} U_{E,f}(t) \\ U_{E,c}(t) + U_{E,f}(t) \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中： $E_E(t-1)$ 、 $E_E(t)$ 分别为场景 $t-1$ 、 t 时刻蓄电池的能量； $\eta_{E,c}$ 、 $\eta_{E,f}$ 分别为蓄电池的充、放电效率； $P_{E,c}(t)$ 、 $P_{E,f}(t)$ 分别为蓄电池在 t 时刻的充、放电功率； $E_E^{\max}$ 为蓄电池的能量上限； $P_E^{\max}$ 为蓄电池的最大功率； $U_{E,c}(t)$ 、 $U_{E,f}(t)$ 分别表示蓄电池在 t 时刻的充、放电状态，为0-1变量，蓄电池不能同时处于放电和充电状态。

2.6 储冷热罐

冷能不足时由储冷罐放出冷能，冷能充足时则向储冷罐充入冷能。热能不足时由储热罐放出热能，热能充足时则向储热罐充入热能。储冷罐及储热罐的运行约束条件^[26]如下：

$$\begin{cases} 0 \leq L_{l,c}(t) \leq L_{l,c}^{\max} U_{l,c}(t) \\ 0 \leq L_{l,f}(t) \leq L_{l,f}^{\max} U_{l,f}(t) \\ U_{l,c}(t) + U_{l,f}(t) \leq 1 \\ 0 \leq R_{r,c}(t) \leq R_{r,c}^{\max} U_{r,c}(t) \\ 0 \leq R_{r,f}(t) \leq R_{r,f}^{\max} U_{r,f}(t) \\ U_{r,c}(t) + U_{r,f}(t) \leq 1 \end{cases} \quad (9)$$

式中： $L_{l,c}(t)$ 、 $L_{l,f}(t)$ 分别为储冷罐的充、放冷功率； $L_{l,c}^{\max}$ 、 $L_{l,f}^{\max}$ 分别为储冷罐的最大充、放冷功率； $U_{l,c}(t)$ 、 $U_{l,f}(t)$ 分别为储冷罐的充、放冷0-1控制变量， $U_{l,c}(t)=1$ 表示允许充冷， $U_{l,f}(t)=1$ 表示允许放冷，充冷和放冷不能同时进行； $R_{r,c}(t)$ 、 $R_{r,f}(t)$ 分别为储热罐的充、放热功率； $R_{r,c}^{\max}$ 、 $R_{r,f}^{\max}$ 分别为储热罐的最大充、放热功率； $U_{r,c}(t)$ 、 $U_{r,f}(t)$ 分别为储热罐的充、放热0-1控制变量，且放热和充热不能同时进行。

3 灰启动效益经济调度模型

3.1 目标函数

本文综合考虑抽水蓄能机组灰启动效益和多种运维成本(抽水蓄能机组运维成本、热电联产机组运维成本、风光运维及弃电惩罚成本、蓄电池运维成本),综合目标函数^[27]如下:

$$\min F = F_p + F_c + F_w + F_v + F_e \quad (10)$$

式中: F 为综合目标函数; F_p 为抽水蓄能机组运维成本; F_c 为热电联产机组的运行成本; F_w 为风力发电的运维及弃电惩罚成本; F_v 为光伏发电的运维及弃电惩罚成本; F_e 为蓄电池的运维成本。

根据黑启动服务两部制定价方法,抽水蓄能机组作为灰启动电源时的经济效益取决于被启动机组恢复带来的附加效益,即热电联产机组发出的有功功率^[27]。抽水蓄能机组的总运行成本为运维成本减去灰启动效益,其表达式为

$$F_p = \sum_{t=1}^T \{ \alpha_p [P_{p,g}(t) + P_{p,p}(t)] - \beta_p P_c(t) \} \quad (11)$$

式中: T 为总运行时间,即抽水蓄能机组提供灰启动服务的时间; α_p 为抽水蓄能机组的单位运行维护成本; β_p 为抽水蓄能机组灰启动单位经济效益。

热电联产机组的运行成本主要取决于煤耗成本,消耗的煤量由机组发出的有功功率及余热吸收器功率决定,其表达式为

$$F_c = \sum_{t=1}^T S_c \{ \alpha_c [P_c(t) + R_c(t)]^2 + \beta_c [P_c(t) + R_c(t)] + \gamma_c \} \quad (12)$$

式中: α_c 、 β_c 及 γ_c 均为热电联产机组发电煤耗特性系数; S_c 为单位煤价; $R_c(t)$ 为余热吸收器功率。

由于风力发电及光伏发电不需要消耗燃料,因此,只需考虑风光发电的运维成本及弃电惩罚成本,表达式如下:

$$F_w = \sum_{t=1}^T \{ \alpha_w P_w(t) + \beta_w [P_w^{\max}(t) - P_w(t)] \} \quad (13)$$

$$F_v = \sum_{t=1}^T \{ \alpha_v P_v(t) + \beta_v [P_v^{\max}(t) - P_v(t)] \} \quad (14)$$

式中: α_w 、 α_v 分别为单位风电、光伏运维成本; β_w 、 β_v 分别为单位风电、光伏弃电惩罚成本。

蓄电池的成本主要为运维成本,取决于充、放功率,表达式为

$$F_e = \sum_{t=1}^T \{ \alpha_e [P_{e,f}(t) + P_{e,c}(t)] \} \quad (15)$$

式中 α_e 为单位蓄电池运维成本。

3.2 功率平衡约束

由于系统存在冷负荷、热负荷及电负荷,为满足系统的安全稳定运行,各设备出力须满足功率平衡约束。

其中冷功率平衡约束条件如下:

$$P_{d,l}(t) + C_t^A + L_{l,f}(t) - L_{l,c}(t) = L_L(t) \quad (16)$$

式中 $L_L(t)$ 为系统的冷负荷。

热功率平衡约束条件如下:

$$R_{d,r}(t) + H_t^A + R_{r,f}(t) - R_{r,c}(t) = R_L(t) \quad (17)$$

式中 $R_L(t)$ 为系统的热负荷。

电功率平衡约束条件如下:

$$P_p(t) + P_c(t) + P_w(t) + P_v(t) + P_{e,f}(t) - P_{e,c}(t) = P_L(t) + P_{d,l}(t) + P_{d,r}(t) \quad (18)$$

式中 $P_L(t)$ 为系统的电负荷。

3.3 配电网运行约束

在综合能源系统的运行中,应考虑配电网的运行约束。配电网中每个节点的电压应保持在允许的范围内,以确保设备的运行和系统的安全性。

$$U_{j,\min} \leq U_{j,t} \leq U_{j,\max} \quad (19)$$

式中: $U_{j,t}$ 为在 t 时刻节点 j 的电压幅值; $U_{j,\max}$ 、 $U_{j,\min}$ 分别为节点 j 电压的上、下限。

此外,电力系统的每个节点需满足以下潮流约束条件:

$$U_{i,t} \sum_{j=1}^N U_{j,t} (G_{ij,t} \cos \theta_{ij,t} + B_{ij,t} \sin \theta_{ij,t}) = P_{i,t} - P_{i,t}^L \quad (20)$$

$$U_{i,t} \sum_{j=1}^N U_{j,t} (G_{ij,t} \sin \theta_{ij,t} + B_{ij,t} \cos \theta_{ij,t}) = Q_{i,t} - Q_{i,t}^L \quad (21)$$

式中: $U_{i,t}$ 和 $U_{j,t}$ 分别为 t 时刻节点 i 、 j 的电压幅值; $G_{ij,t}$ 和 $B_{ij,t}$ 分别为 t 时刻节点 i 和节点 j 之间导纳的实部和虚部; $\theta_{ij,t}$ 为 t 时刻节点 i 和节点 j 之间的相角差; $P_{i,t}$ 、 $Q_{i,t}$ 分别为 t 时刻节点 i 的注入有功、无功功率; $P_{i,t}^L$ 、 $Q_{i,t}^L$ 分别为 t 时刻节点 i 的有功、无功负荷; N 为潮流计算涵盖网络节点。

4 算例仿真

本研究假设配电网遭遇极端情况后，以改进的 IEEE 33 节点为例，验证所提策略的有效性。配电网节点 20 和 33 处装有分布式发电机，其最大有功出力均为 300 kW。仿真实验在 RTX 3060 处理器上完成，采用 MATLAB 2022A 平台，在 Yalmip 中调用 Gurobi 求解器进行求解。

4.1 调度方案对比分析

在极端自然灾害发生后，IES 短时间内无法从主网获取电能，此时抽水蓄能作为灰启动电源，为热电联产机组提供启动功率。为适应用户的不同负荷需求，设置 5 种不同的运行方案以分析抽水蓄能灰启动的经济效益影响，如表 1 所示。

表1 5种运行方案对比

Tab. 1 Comparison of 5 operation schemes

方案	负荷类型			抽水蓄能灰启动
	冷负荷	热负荷	电负荷	
1	×	×	√	√
2	×	√	√	√
3	√	×	√	√
4	√	√	√	√
5	√	√	√	×

4.2 风光冷热不确定性分析

为分析 IES 中风光发电及冷热负荷的功率不确定性，采用 LHS 技术生成 1 000 个随机场景，并使用概率距离快速削减法削减为 10 个场景，选取概率最高的场景进行系统的经济调度分析。削减后各场景的概率如表 2 所示。

表2 各削减场景发生概率

Tab. 2 Probability of occurrence for each curtailment scenario

场景	风光场景概率	冷热负荷场景概率
1	0.09	0.18
2	0.12	0.14
3	0.13	0.12
4	0.09	0.09
5	0.05	0.10
6	0.13	0.05
7	0.06	0.05
8	0.10	0.05
9	0.20	0.11
10	0.05	0.11

由表 2 可知，风光削减场景中场景 9 的概率最高，为 0.20，冷热负荷削减场景中场景 1 的概率最高，为 0.18。因此，将场景 9 的风光发电曲线及场景 1 的冷热负荷曲线应用于 IES 的经济调度分析。

4.3 各方案运行调度对比分析

对以上 5 种方案进行仿真，得到系统的运行成本及仿真运行时间。在方案 1—4 中，随着热负荷和冷负荷的引入，系统的能量调度方式发生变化，影响其运行成本和调度灵活性。在方案 4 中，当系统同时承担冷热电 3 种负荷时，运行成本达到 1 234.30 万元，表明 IES 在同时满足多种能源需求时需面临更大的调度挑战和资源消耗。由于增加各类负荷会导致系统调度的复杂性上升，需要更多的资源来满足需求。此外，方案 5 同样涵盖冷热电负荷，但因未考虑抽水蓄能灰启动，运行成本达到 1 405.1 万元。与方案 5 相比，方案 4 运行成本降低了 12.14%，这是因为抽水蓄能灰启动将低需求时段的多余电力储存起来，而在高需求或高电价时段不需要依赖电力供应。因此，在面对复杂的多负荷能源系统时，应充分考虑抽水蓄能灰启动的作用，从而实现更优的经济和能源效率。

4.3.1 电负荷系统经济调度结果

在方案 1 中，IES 只有电负荷，无冷热负荷，各设备的电功率如图 3 所示。可知，05:00 以前由抽水蓄能机组向热电联产机组提供灰启动功率；在 05:00 热电联产机组达到最小技术出力，开始并网并向系统提供电功率。由于增加了风力及光伏清洁能源发电的弃电惩罚成本，IES 首先使用风力及光伏发电提供的功率，减少了对化石能源的依赖。

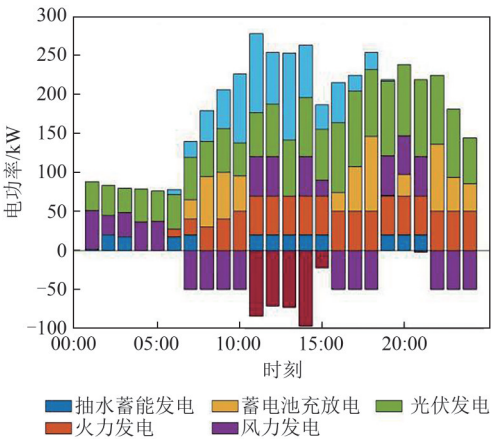


图3 方案1各设备出力情况

Fig. 3 Output of each device in scheme 1

4.3.2 热负荷系统经济调度结果

在方案 2 中，IES 有热负荷和电负荷，无冷负

荷, 各设备的出力如图 4 所示。可知, 在 05:00 之前, 由于热电联产机组没有启动, 不会提供余热, 因此换热器不提供热功率, 而由电锅炉和储热罐满足热负荷需求。在 05:00 之后, 热电联产机组通过余热吸收器将余热转化为热功率, 提升了能源利用效率。

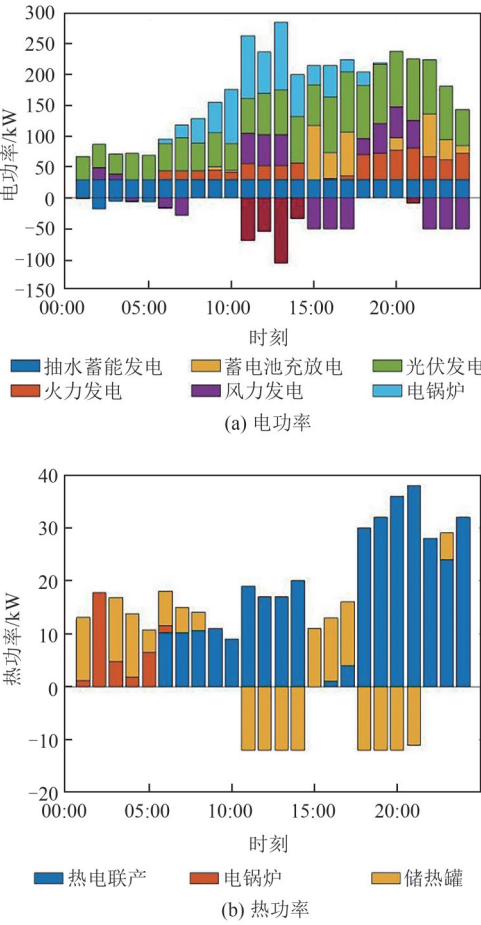


图 4 方案 2 各设备出力情况

Fig. 4 Output of each device in scheme 2

4.3.3 冷电负荷系统经济调度结果

在方案 3 中, IES 有冷负荷及电负荷, 无热负荷, 各设备的出力如图 5 所示。可知, 与方案 2 相似, 在 05:00 之前, 由于热电联产机组未启动, 吸收式制冷机无法提供冷功率。此时, 电制冷机和储冷罐承担了冷负荷需求, 导致能源使用成本增加。在 05:00 之后, 热电联产机组向系统提供电功率, 将余热吸收器吸收的余热经吸收式制冷机提供冷功率。在 10:00—15:00, 冷负荷达到峰值, 电功率出力根据冷负荷需求进行灵活调整, 确保系统的稳定运行。

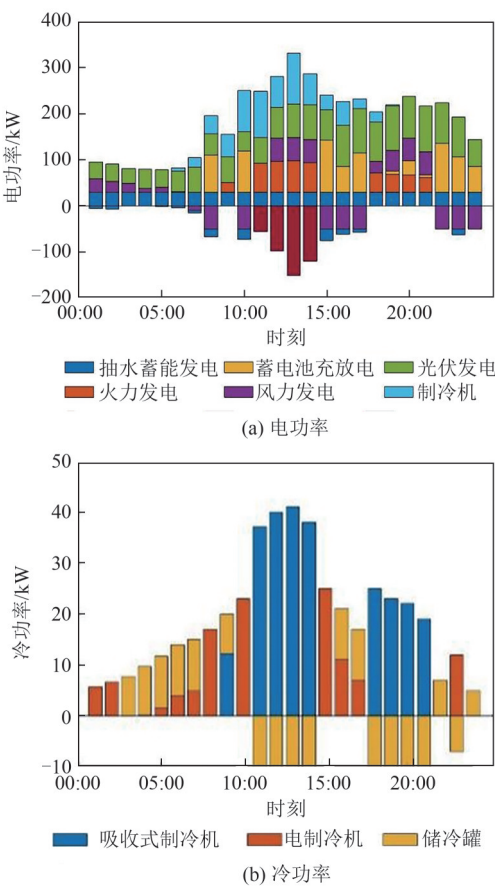
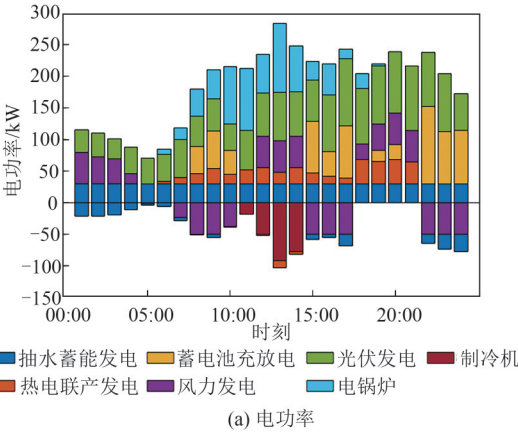


图 5 方案 3 各设备出力情况

Fig. 5 Output of each device in scheme 3

4.3.4 冷热电负荷系统经济调度结果

在方案 4 中, IES 有冷热电负荷, 各设备的出力如图 6 所示。在同时存在冷热电负荷的情况下, 热电联产机组需要灵活调度, 既要满足电负荷需求, 又要利用余热为冷热负荷提供功率。此外, 储热罐和储冷罐通过在低负荷时段储能、高负荷时段放能, 起到削峰填谷的作用, 增强了系统对负荷变化的适应性, 提升了系统运行的经济性和稳定性。



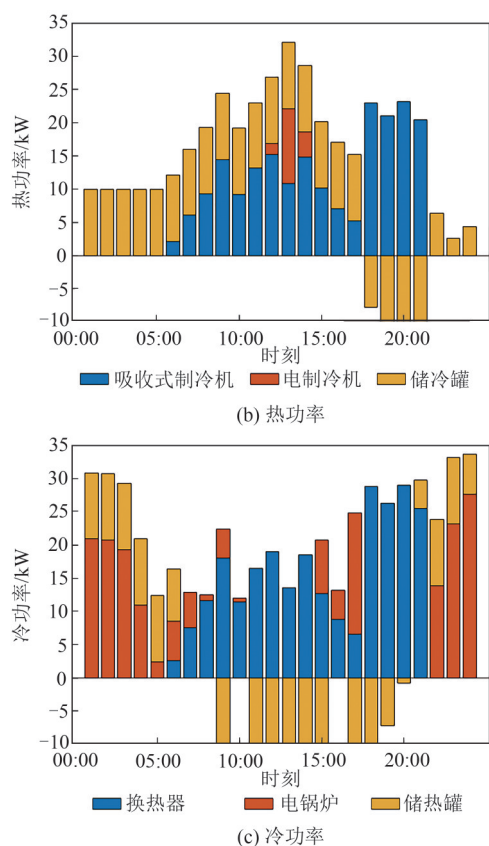


图6 方案4各设备出力情况

Fig. 6 Output of each device in scheme 4

4.3.5 无抽水蓄能灰启动系统经济调度结果

在方案5中, IES有冷热电负荷, 但未考虑抽水蓄能灰启动, 各设备的出力如图7所示。可知, 在缺乏抽水蓄能灰启动的情况下, 冷热负荷需求完全依赖电制冷机和电锅炉提供的功率。虽然储冷罐和储热罐可以通过削峰填谷的方式缓解负荷波动, 但整体系统运行效率和经济性较低, 特别是在高峰时段, 系统的调度灵活性受到限制。

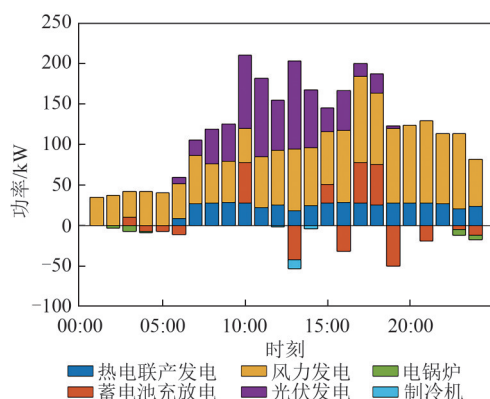


图7 方案5各设备出力情况

Fig. 7 Output of each device in scheme 5

5 结论

为有效提高半黑状态下 IES 的可靠性、经济性及灵活性, 提出一种抽水蓄能灰启动下冷热电互补综合能源系统优化调度。针对该系统, 对不同运行方案进行策略分析, 得到以下结论:

1) 在极端事件下, 抽水蓄能机组能够在主网电力供应中断的情况下, 为热电联产机组等设施提供启动电力, 使系统恢复运行。

2) 综合考虑 CHEIES 灾后运行的能量调度策略在系统恢复运行过程中, 将灰启动效益、运维成本等纳入目标函数, 仿真结果表明, 与未配置抽水蓄能灰启动的方案5相比, 其运行成本降低了12.14%。

3) 在抽水蓄能与热电联产机组的协同作用下, CHEIES 在极端自然灾害下展现出较高的灵活性和运行效率, 增强了系统的可靠性和自给能力。

4) 未来计划在更为精细的模型框架下, 验证抽水蓄能灰启动调度优化策略的有效性。具体而言, 将进一步考虑热电联产机组动态特性及其在不同运行工况下的响应特征, 从而更精准地应对实际应用中的挑战。

参考文献

- [1] 于松源, 张峻松, 元志伟, 等. 计及热惯性的热电联产虚拟电厂韧性提升策略[J]. 发电技术, 2023, 44(6): 758-768.
YU S Y, ZHANG J S, YUAN Z W, et al. Resilience enhancement strategy of combined heat and power-virtual power plant considering thermal inertia[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(6): 758-768.
- [2] 杜洋, 刘家好, 郭灵瑜, 等. 极端事件下电力-天然气耦合系统故障连锁传播仿真分析[J]. 电力建设, 2024, 45(5): 1-8.
DU Y, LIU J Y, GUO L Y, et al. Simulation analysis of fault cascading propagation in power-gas coupling system during extreme events[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(5): 1-8.
- [3] 罗春辉, 邹同华, 瞿纲举, 等. 考虑经济性和可靠性的抗灾型骨干网架规划方法[J]. 发电技术, 2023,

- 44(3): 425-430.
- LUO C H, ZOU T H, QU G J, et al. A planning method for anti-disaster backbone grid considering economy and reliability[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(3): 425-430.
- [4] 闫泽辉, 李更丰, 任彦哲. 构建高弹性城市能源系统的关键技术[J]. 电力建设, 2023, 44(5): 1-12.
- YAN Z H, LI G F, REN Y Z. Key technologies for building highly resilient urban energy systems[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(5): 1-12.
- [5] 范馨予, 黄媛, 吴疆, 等. 考虑源网荷储协同优化的配电网韧性提升策略[J]. 电力建设, 2023, 44(4): 63-73.
- FAN X Y, HUANG Y, WU J, et al. Resilience promotion strategy for distribution network considering source-network-load-storage coordination[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(4): 63-73.
- [6] 陶然, 赵冬梅, 徐辰宇, 等. 考虑电-气-热-交通相互依存的城市能源系统韧性评估与提升方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(22): 6133-6149.
- TAO R, ZHAO D M, XU C Y, et al. Resilience assessment and enhancement methods for urban energy system considering electricity-gas-heat-transport interdependency[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(22): 6133-6149.
- [7] 陈春, 万金金, 曹一家, 等. 极端条件下多源配电网主动孤岛研究综述与展望[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(5): 1-11.
- CHEN C, WAN J J, CAO Y J, et al. Review and outlook on active islanding of multi-source distribution networks under extreme conditions[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 1-11.
- [8] 朱喜玥, 刘鑫蕊, 侯敏, 等. 地震影响下综合能源系统的多时间尺度韧性提升方法[J/OL]. 电力系统自动化, 2024: 1-18. (2024-01-24)[2024-05-21]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=DLXT20240119001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- ZHU X Y, LIU X R, HOU M, et al. Multi-time scale toughness improvement method of comprehensive energy system under earthquake influence[J/OL]. China Industrial Economics, 2024: 1-18. (2024-01-24)[2024-05-21]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=DLXT20240119001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [9] 龚贤夫, 梁秀壮, 廖晖, 等. 考虑集中式新能源接入的综合能源系统韧性提升研究[J]. 广东电力, 2023, 36(11): 75-86.
- GONG X F, LIANG X Z, LIAO H, et al. Study on the resilience enhancement of integrated energy systems considering centralised new energy sources[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(11): 75-86.
- [10] 徐琴, 金海翔, 边晓燕, 等. 基于混合 IGDT 的电-气综合能源系统弹性提升灾前规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(21): 86-95.
- XU Q, JIN H X, BIAN X Y, et al. Pre-disaster planning method for resilience enhancement of integrated electric-gas energy system based on hybrid IGDT[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(21): 86-95.
- [11] 杜洁, 张海锋, 王佳蕊, 等. 计及用户热耐受度的区域综合能源系统韧性评估及提升研究[J]. 全球能源互联网, 2024, 7(1): 3-13.
- DU J, ZHANG H F, WANG J R, et al. Resilience assessment and enhancement oriented human heat tolerance of regional integrated energy systems[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2024, 7(1): 3-13.
- [12] REN H B, JIANG Z P, WU Q, et al. Optimal planning of an economic and resilient district integrated energy system considering renewable energy uncertainty and demand response under natural disasters[J]. Energy, 2023, 277: 127644.
- [13] ZHANG S, LIU W X, WAN H Y, et al. Combining data-driven and model-driven methods for high proportion renewable energy distribution network reliability evaluation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 149: 108941.
- [14] SUN X C, CHEN J, ZHAO H R, et al. Sequential disaster recovery strategy for resilient distribution network based on cyber-physical collaborative optimization[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(2): 1173-1187.
- [15] WANG Z G, HOU H, LIU C, et al. Distribution network gray-start and emergency recovery strategy with pumped storage unit under a typhoon[J]. Global Energy Interconnection, 2025, 8(1): 121-133.
- [16] CHEN Z, SUN Z H, LIN D, et al. Optimal configuration of multi-energy storage in an electric-thermal-hydrogen integrated energy system considering extreme disaster scenarios[J]. Sustainability, 2024, 16(6): 2276.
- [17] LIU X O. Research on collaborative scheduling of Internet data center and regional integrated energy system based on electricity-heat-water coupling[J].

- Energy, 2024, 292: 130462.
- [18] XU J P, TIAN Y L, WANG F J, et al. Resilience-economy-environment equilibrium based configuration interaction approach towards distributed energy system in energy intensive industry parks[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 191: 114139.
- [19] 国家发展和改革委员会. 关于加强电网调峰储能和智能化调度能力建设的指导意见[EB/OL]. (2024-02-27) [2024-06-24]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202402/t20240227_1364257.html.
National Development and Reform Commission. Guiding Opinions on Strengthening the Construction of Peak Shaving Energy Storage and Intelligent Scheduling Capacity of Power Grids[EB/OL]. (2024-02-27)[2024-06-24]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202402/t20240227_1364257.html.
- [20] LI X Y, WANG H L. Integrated energy system model with multi-time scale optimal dispatch method based on a demand response mechanism[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 445: 141321.
- [21] 张冠宇, 付炜, 陈晨, 等. 面向电-气-热综合能源系统的恢复力研究现状与展望[J]. 智慧电力, 2023, 51(1): 69-77.
ZHANG G Y, FU W, CHEN C, et al. Status and prospects of resilience research for electric-gas-thermal integrated energy system[J]. Smart Power, 2023, 51(1): 69-77.
- [22] WANG Y L, LI Y W, ZHANG Y F, et al. Optimized operation of integrated energy systems accounting for synergistic electricity and heat demand response under heat load flexibility[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 243: 122640.
- [23] 易纯, 肖辉, 吴公平, 等. 含电、冷、热、气的区域综合能源系统优化运行[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(4): 215-221.
YI C, XIAO H, WU G P, et al. Optimal operation of regional integrated energy system including electricity, cooling, heating and gas[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4): 215-221.
- [24] ZHOU R, CHEN S H, HAN Y, et al. Probabilistic spatiotemporal scenario generation method for dynamic optimal power flow in distribution networks[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024, 155: 109667.
- [25] LIU S, YAN J, YAN Y M, et al. Joint operation of

mobile battery, power system, and transportation system for improving the renewable energy penetration rate[J]. Applied Energy, 2024, 357: 122455.

- [26] HOU X K, SUN R F, HUANG J K, et al. Energy, economic, and environmental analysis: a study of operational strategies for combined heat and power system based on PEM fuel cell in the East China Region [J]. Renewable Energy, 2024, 223: 120023.
- [27] HUANG Z F, CHEN W D, WAN Y D, et al. Techno-economic comparison of different energy storage configurations for renewable energy combined cooling heating and power system[J]. Applied Energy, 2024, 356: 122340.

收稿日期: 2024-08-15。

修回日期: 2024-10-27。

作者简介:



侯慧

侯慧(1981), 女, 博士, 教授, 研究方向为电力系统风险评估、能源互联网、电动汽车与电网互动等, houthui@whut.edu.cn;



王燕

王燕(2001), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统风险评估, 302867@whut.edu.cn;



LI Zhengmao

LI Zhengmao(1991), 男, 博士, 助理教授, 研究方向为综合能源系统最优规划和运行, Zhengmao.li@aalto.fi;



林湘宁

林湘宁(1970), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析与控制、电力系统继电保护, xiangning.lin@hust.edu.cn。

(责任编辑 苗雪连)