

基于储能灵活性的综合能源系统优化调度方法

李振¹, 赵鹏翔¹, 王楠¹, 丛琳¹, 王慧媛², 曹严²

(1. 国网综合能源服务集团有限公司, 北京 100052;

2. 天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要:挖掘热电耦合综合能源系统(HEC-IES)灵活性,降低系统运行成本、促进可再生能源消纳是能源互联网领域研究的热点问题。为此,提出了考虑供热管网热动态储能灵活性的热电耦合综合能源系统日前优化调度方法。首先,对HEC-IES进行建模,构建了考虑供热管网储能特性的供热管网热动态模型及等效热储能模型;在此基础上,提出了HEC-IES灵活性量化方法,以定量描述系统灵活性的大小;进而,构建了考虑供热管网热动态储能灵活性的HEC-IES优化调度模型,以系统运行成本最小化为目标,计及功率平衡约束、能源设备约束、供热管网约束以及电网约束,得到最优的系统调度方案。通过算例验证了所提方法的有效性,结果表明,基于所提方法得到的优化调度方案可最大限度挖掘系统的灵活性,通过利用供热管网的储能特性,实现能量供需的时空平移,减小供能环节的强制出力,从而减小系统的运行费用,并促进对风能、光伏等可再生能源的消纳。

关键词:综合能源系统;热电协同;优化调度;灵活性

中图分类号:TM721 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd24103

Optimal Scheduling Method of Integrated Energy System Based on Energy Storage Flexibility

LI Zhen¹, ZHAO Pengxiang¹, WANG Nan¹, CONG Lin¹, WANG Huiyuan², CAO Yan²

(1. State Grid Integrated Energy Service Group Co., Ltd., Beijing 100052, China; 2. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Exploring the flexibility of the heat and electricity coupling integrated energy system (HEC-IES), reducing system operation costs and promoting renewable energy consumption are hot issues in the field of energy internet. Thus, a day-ahead optimal scheduling method of the HEC-IES considering the thermal dynamic energy storage flexibility of heating network was proposed. Firstly, the HEC-IES was modeled and the thermal dynamic model and equivalent thermal energy storage model of the heating network considering energy storage characteristics were constructed. On this basis, the flexibility quantification method was proposed to quantify the flexibility of the HEC-IES. Furthermore, the optimal scheduling model of the HEC-IES considering thermal dynamic energy storage flexibility of heating network was constructed, where minimizing the system operation cost was taken as the objective, and the power balance constraints, energy equipment constraints, heating network constraints and power grid constraints were taken as constraints, then, the optimal system scheduling scheme was obtained. The effectiveness of the proposed method was verified by case studies. The results show that the optimal scheduling scheme based on the proposed method can maximize the utilization of system flexibility. By using the energy storage characteristics of the heating pipe network, the space-time shift of energy supply and demand is realized, and the forced output of the energy supply equipment is reduced, so as to reduce the operation costs of the system and promote the consumption of renewable energy.

Key words: integrated energy system(IES); thermo-electric cooperation; optimization scheduling; flexibility

在“双碳”目标下,发展综合能源系统(integrated energy system, IES)以减少化石燃料消耗,提高能源利用效率是实现“碳达峰”、“碳中和”目

标的必由之路^[1-6]。然而,随着波动性可再生能源大规模接入电网,其弱支撑、低惯量特性使电网安全稳定问题日益突出。因此,充分挖掘 IES 不

基金项目:国网综合能源服务集团有限公司科技资助项目(5278991900MU)

作者简介:李振(1986—),男,博士,高级工程师,Email:lizhen@sgecs.com.cn

通讯作者:王慧媛(1999—),女,博士研究生,Email:huiyuanwang@tju.edu.cn

同能源环节之间的运行灵活性,可为IES运行优化提供灵活调节响应能力,保证系统运行经济性与稳定性。热电耦合综合能源系统(heat and electricity coupling IES, HEC-IES)可通过热电联产(combined heat and power, CHP)机组、热泵(heat pump, HP)等能量转换设备实现热、电系统间的能量转换,可充分利用热、电能源之间时间尺度的动态差异性,为HEC-IES提供可调控的灵活性。

目前,针对HEC-IES运行灵活性问题已有大量研究。文献[7-9]构建了考虑热负荷舒适度、热管道时滞的热惯性模型,并将其转化为约束条件参与HEC-IES的优化调度;文献[10]提出了考虑电热锅炉和建筑热惯性的HEC-IES调度方法,仿真结果表明可以利用热力系统的热惯性提高新能源的消纳比例,并降低系统的运行成本;文献[11]提出了将热电联产作为热电机组灵活性改造的关键技术,可有效提升热电厂的调峰和供热调节能力,提升电源侧灵活性,促进新能源消纳;文献[12]考虑热负荷弹性与分时电价需求侧响应协同,建立了一种针对HEC-IES的日前优化调度模型,可促进系统的低碳经济运行;文献[9]提出一种考虑热能传输延时和建筑物蓄热特性的IES优化调度方法,可有效提高系统风电消纳水平;文献[13]考虑供热系统能流变化缓慢的响应特性,提出多时间尺度的能量协调优化方法。然而,上述量化供热管网对系统灵活性的方法往往依赖大量仿真,所得结果只适用于特定场景,缺乏一种直观、统一的灵活性评估方法。此外,由于运行机理复杂、参数难获取,给供热管网的动态特性及储能特性分析带来了困难。

基于以上问题,本文提出了考虑供热管网热动态灵活性的热电耦合综合能源系统日前优化调度方法。首先,对HEC-IES进行建模,构建了考虑供热管网储能特性的供热管网热动态模型及等效热储能模型,并在此基础上提出了HEC-IES灵活性量化方法;进而,以系统运行成本最小化为目标构建了考虑供热管网热动态储能灵活性的HEC-IES优化调度模型;最后,通过一个典型算例验证了模型的有效性。

1 供热管网热动态储能灵活性建模

不同于电力系统,供热管网传输具有时延性^[8],热能生产和使用可打破瞬时平衡关系,在热

力管网中储存一定比例能量,给HEC-IES的运行优化提供了一定范围的灵活性。本节构建了HEC-IES供热管网热动态灵活性模型及等效热储能模型,进而提出了HEC-IES灵活性量化方法并分析其对HEC-IES优化调度的影响。

1.1 供热管网模型

热力系统由热源、供热管网、热负荷组成。其中,供热管网在热源和热负荷间起连接作用,通过工质的流动将热能从热源传送到热负荷。供热管网由供水网络和回水网络组成,从层次结构上划分为一级管网和二级管网。一级管网连接换热首站与换热站,具有管道直径大、工质温度高、流量大、传输距离远等特点,供热管网的储热特性主要在此段体现;二级管网连接换热站和各个热负荷,一般距离较近,储热特性不明显,故本文暂不考虑。工质在换热首站中加热后通过一级管网传输到换热站,在换热站中完成换热后,经过回水网络传输回换热首站,形成供热循环。供热管网的结构如图1所示。

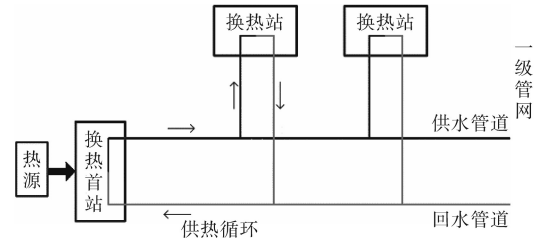


图1 供热管网结构

Fig.1 Structure of heat supply network

1.2 水力模型

供热管网中,节点满足节点流量连续性方程,即对供热管网中任意节点,流向该节点的流量之和与流出该节点的流量之和相等:

$$\sum_{j \in P_n^{\text{in}}} q_{t,j} = \sum_{k \in P_n^{\text{out}}} q_{t,k} \quad (1)$$

式中: $P_n^{\text{in}}, P_n^{\text{out}}$ 分别为与节点 n 相连并向节点 n 注入流量和从节点 n 流出流量的管道集合; $q_{t,j}, q_{t,k}$ 分别为 t 时段管道 j 和 k 中工质的质量流量,kg/s。

1.3 热力模型

热力模型由热功率方程、节点温度混合方程构成。热功率方程描述供热管网中的换热过程,换热过程在换热站中进行,其换热约束为

$$H_{t,i} = c_w m_{t,i} (T_{t,i}^s - T_{t,i}^r) \quad (2)$$

$$Q_{t,i}^1 \Delta t = H_{t,i} \quad (3)$$

式中: $H_{t,i}$ 为 t 时段换热站 i 的换热量,kJ; $m_{t,i}$ 为 t 时段流经换热站 i 的工质质量,kg; c_w 为工质的比热容,J/(kg·K); $T_{t,i}^s, T_{t,i}^r$ 分别为 t 时段换热站 i 的供热

温度和回热温度,℃; Q_{ti}^l 为 t 时段换热站 i 的热负荷, kW; Δt 为调度阶段时长。

节点温度混合方程描述供热管网中工质混合过程,供热管网中不同管道的工质流入相同节点后进行温度混合,混合后从该节点流出的工质温度相同,即

$$\sum_{j \in P_n^{\text{out}}} (T_{tj}^{\text{out}} q_{tj}) = T_{t,k}^{\text{in}} \sum_{k \in P_n^{\text{in}}} q_{t,k} \quad (4)$$

式中: T_{tj}^{out} 为 t 时段管道 j 的出口温度,℃; $T_{t,k}^{\text{in}}$ 为 t 时段管道 k 的入口温度,℃。

1.4 供热管网储能模型

一次管网由于管道直径大、工质温度高、流量大、传输距离远等特性,具有一定储热的能力,可以视为热源与热负荷间的一种储能装置。由于供热管网的储能特性,热源的供热功率不必实时与热负荷平衡,热能供应充足时,多余的热能可以存储在供热管网中,热能供应不足时,热负荷可以从供热管网中获取热能,填补热能空缺。

考虑热能传输过程中的能量损失,构建等效储能模型,如图2所示。

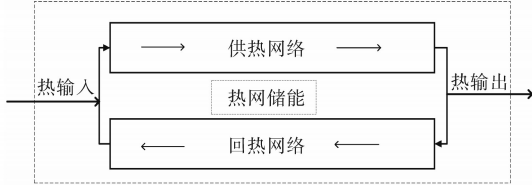


图2 等效储能模型

Fig.2 Equivalent energy storage model

供热管网在 t 时段储存的热能由下式表示:

$$E_t = \sum_{p \in P} [c_w m_{p,t} (T_{p,t}^{\text{s,in}} + T_{p,t}^{\text{r,in}})] + \sum_{\tau=0}^{t-1} (H_{\tau}^{\text{in}} - H_{\tau}^{\text{out}} - H_{\tau}^{\text{loss}}) \quad (5)$$

式中: P 为供热管网中管道的集合; $m_{p,t}$ 为管道 p 在 t 时段的水的质量; $T_{p,t}^{\text{s,in}}$ 为供水网络中管道 p 在 t 时段的入口温度,℃; $T_{p,t}^{\text{r,in}}$ 为回水网络中管道 p 在 t 时段的入口温度,℃; H_{τ}^{in} 为在 τ 时段热源向供热管网输入的热量, kW; H_{τ}^{out} 为在 τ 时段供热管网向热负荷输出的热量, kW; H_{τ}^{loss} 为 τ 时段供热管网的能量损失, kW。

$\sum_{p \in P} [c_w m_{p,t} (T_{p,t}^{\text{s,in}} + T_{p,t}^{\text{r,in}})]$ 表示供热管网本身具有的热量,由供水网络和回水网络的温度决定; $\sum_{\tau=0}^{t-1} (H_{\tau}^{\text{in}} - H_{\tau}^{\text{out}} - H_{\tau}^{\text{loss}})$ 表示供热管网的能量变化, $\sum_{\tau=0}^{t-1} (H_{\tau}^{\text{in}} - H_{\tau}^{\text{out}} - H_{\tau}^{\text{loss}}) > 0$ 时,多余的热能存储在供热管网中,供热管网储能水平升高; $\sum_{\tau=0}^{t-1} (H_{\tau}^{\text{in}} - H_{\tau}^{\text{out}} - H_{\tau}^{\text{loss}}) < 0$ 时,供热管网向负荷提供

热能,供热管网储能水平下降。

1.5 供热管网储能灵活量化评估

将热力系统的定流量定温度模式定义为系统基准运行方式,此运行方式下热源供应温度 $\tilde{T}_n^{\text{s,in}}$ 和供水流量 $\tilde{m}_n^{\text{in}}$ 定义为基准值,此时系统热输入功率、供热温度、回热温度可以通过电热联合调度计算得出。定义供热系统的储能灵活性为在系统运行约束条件下热输入功率偏离基准热输入功率的范围。热输入功率的变化范围越大,表示热力系统能够在更大的范围内安全运行,供热系统具有更大的储能灵活性。同时,引入相关参数刻画系统的运行灵活性。

热输入功率集合可表示为

$$\begin{cases} H = \{ H_t^{\text{in}} | E_{t+1} = E_t + (H_t^{\text{in}} - H_t^{\text{out}} - H_t^{\text{loss}}) \} \\ \text{s.t. } E_t^- \leq E_t - \tilde{E}_t \leq E_t^+ \\ H_t^- \leq H_t^{\text{in}} - \tilde{H}_t^{\text{in}} \leq H_t^+ \\ R_t^- \leq H_t^{\text{in}} - H_{t-1}^{\text{in}} \leq R_t^+ \end{cases} \quad (6)$$

式中: E_t^+ , E_t^- 分别为 t 时段最大和最小热储能容量偏差; H_t^+ , H_t^- 分别为 t 时段最大和最小热输入功率偏差; R_t^+ , R_t^- 分别为 t 时段最大和最小热输入功率爬坡速率; $\tilde{E}_t$ 为 t 时段基准情况下供热管网的储能容量; $\tilde{H}_t^{\text{in}}$ 为 t 时段基准情况下的热输入功率。

选取式(6)中相关参数建立供热管网储能灵活性评估模型,对供热管网储能灵活性进行评估,即对其灵活性参数进行评估。本节采用一种直接评估算法,可以通过已有条件直接得出系统灵活性评估结果,而不依赖大量仿真。在此评估算法中,以定流量定温度运行模式下的系统运行情况为基准,当系统运行模式发生变化时,系统的各个参数也发生相应变化,参数的变化范围越大,说明系统具有更大的灵活性。

热输入功率偏差的上限 H_t^+ 和下限 H_t^- 受包括热源的出力、供热管网的工质流量限制、供热温度限制等约束条件影响。当热力系统的运行方式发生变化时,热力管网的储能也会发生变化,如热力系统的运行方式由定流量定温度转换为变流量变温度时,可以通过提高工质流量和工质温度增加热力管网中的储能量。

热输入功率偏差的上限 H_t^+ 和下限 H_t^- 可以由下式计算得到:

$$\begin{cases} H_t^+ = \sum_{n \in I} [c_w \tilde{m}_n^{\text{in}} (\tilde{T}_n^{\text{s}} - \tilde{T}_{n,t}^{\text{r}})] - \tilde{H}_t^{\text{in}} \\ H_t^- = \sum_{n \in I} [c_w \underline{m}_n^{\text{in}} (\underline{T}_n^{\text{s}} - \tilde{T}_{n,t}^{\text{r}})] - \tilde{H}_t^{\text{in}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: Γ 为节点集合; $\bar{m}_n^{\text{in}}, \underline{m}_n^{\text{in}}$ 分别为 n 节点注入工质流量的上限和下限; $\bar{T}_n^s, T_n^s$ 分别为供热管网节点 n 的最高供热温度和最低供热温度; $\bar{T}_{n,d}^r$ 为基准情况下回供热管网节点 n 的回热温度。

2 日前优化调度模型

HEC-IES通过协调系统中各能源设备出力,向用户提供供电、供热服务。一个典型的HEC-IES中的能源设备可包括火力发电机组、CHP机组、电锅炉(electric boiler, EB)、风机(wind turbine, WT)、光伏(photovoltaic, PV)等。其中电负荷由CHP机组、风机、光伏供给;热负荷由CHP机组、电锅炉供给。

2.1 目标函数

本节构建考虑供热管网热动态储能灵活性的HEC-IES日前优化调度模型,主要目标是在满足用户电负荷、热负荷的前提下,实现系统总运行成本的最小化,同时提升可再生能源消纳能力。HEC-IES的运行成本包括CHP机组购气成本、火力发电机组运行费用和弃风弃光的惩罚费用。

考虑供热管网热动态储能灵活性的HEC-IES优化调度模型的目标函数为

$$\min C = \sum_{t \in N} (C_{\text{unit}} + C_G + C_{\text{loss}}) \quad (8)$$

式中: C 为HEC-IES的总运行成本,元; C_{unit} 为火力发电机组运行费用,元; C_G 为CHP购气费用,元; C_{loss} 为弃风弃光惩罚费用,元。

各项成本计算如下:

$$C_{\text{unit}} = \sum_{t=1}^N \{ [b_{0,t} + b_{1,t} P_t^{\text{unit}} + b_{2,t} (P_t^{\text{unit}})^2] \Delta t \} \quad (9)$$

$$C_G = \sum_{t=1}^N (c_t^G G_t^{\text{buy}} \Delta t) \quad (10)$$

$$C_{\text{loss}} = \sum_{t=1}^N (c_t^{\text{loss}} P_t^{\text{loss}} \Delta t) \quad (11)$$

式中: $b_{0,t}, b_{1,t}, b_{2,t}$ 为 t 时段火力发电机组的发电成本参数; P_t^{unit} 为 t 时段火力发电机组发出的电功率; c_t^G 为 t 时段单位购气价格,元/ m^3 ; G_t^{buy} 为 t 时段购气功率, m^3/h ; c_t^{loss} 为 t 时段单位弃风弃光惩罚价格; P_t^{loss} 为 t 时段弃风弃光功率, kW; N 为调度时段数。

2.2 约束条件

优化调度模型的约束条件包括功率平衡约束、能源设备约束、供热管网约束、电网约束。

2.2.1 功率平衡约束

1) 电功率平衡约束。忽略网损,电功率生产和使用应实时平衡,即

$$P_t^{\text{unit}} + P_t^{\text{CHP}} + P_t^{\text{WT}} + P_t^{\text{PV}} - P_t^{\text{EB}} = P_t^{\text{load}} \quad (12)$$

式中: P_t^{CHP} 为 t 时段CHP机组发出的电功率, kW; P_t^{WT} 为 t 时段风机发出的电功率, kW; P_t^{PV} 为 t 时段光伏发出的电功率, kW; P_t^{EB} 为 t 时段电锅炉消耗的电功率, kW; P_t^{load} 为 t 时段的电负荷, kW。

2) 热功率平衡约束。忽略供热管网损耗,热输入功率应与热负荷相等:

$$Q_t^{\text{CHP}} + Q_t^{\text{EB}} = Q_t^{\text{load}} \quad (13)$$

式中: Q_t^{CHP} 为 t 时段CHP机组产生的热功率, kW; Q_t^{EB} 为 t 时段的电锅炉产生的热功率, kW; Q_t^{load} 为 t 时段系统的热负荷, kW。

考虑供热管网储能灵活性的热功率平衡约束为

$$H_t^- < Q_t^{\text{CHP}} + Q_t^{\text{EB}} - Q_t^{\text{load}} < H_t^+ \quad (14)$$

2.2.2 能源设备约束

1) 热电联产机组约束。CHP机组热电比约束、能量转换约束如下:

$$Q_t^{\text{CHP}} = \varepsilon P_t^{\text{CHP}} \quad (15)$$

$$Q_t^{\text{CHP}} = \eta G_t^{\text{CHP}} \quad (16)$$

其中

$$\eta = \frac{\varepsilon \eta_{\text{CHP}} b_v}{\varepsilon + 1} \quad (17)$$

式中: ε 为CHP机组的热电比; η 为CHP机组气—热转换效率; G_t^{CHP} 为 t 时段CHP机组消耗的天然气的功率; η_{CHP} 为CHP机组效率; b_v 为天然气的燃烧热值。

CHP机组出力上、下限约束:

$$P_{\min}^{\text{CHP}} \leq P_t^{\text{CHP}} \leq P_{\max}^{\text{CHP}} \quad (18)$$

式中: $P_{\max}^{\text{CHP}}, P_{\min}^{\text{CHP}}$ 分别为CHP机组出力的上限和下限, kW。

CHP机组在相邻两个调度时段内出力变化量的爬坡约束如下:

$$-P_{\text{DR}}^{\text{CHP}} \leq P_{t+1}^{\text{CHP}} - P_t^{\text{CHP}} \leq P_{\text{UR}}^{\text{CHP}} \quad (19)$$

式中: $P_{\text{UR}}^{\text{CHP}}, P_{\text{DR}}^{\text{CHP}}$ 分别为向上、向下的最大爬坡率, kW。

2) 电锅炉约束。电锅炉电—热转换效率的约束如下:

$$Q_t^{\text{EB}} = \eta_{\text{EB}} P_t^{\text{EB}} \quad (20)$$

式中: η_{EB} 为电锅炉的电—热转换效率, 是电锅炉制热量 Q_t^{EB} 与耗电量 P_t^{EB} 之比。

电锅炉出力上、下限约束:

$$Q_{\min}^{\text{EB}} \leq Q_t^{\text{EB}} \leq Q_{\max}^{\text{EB}} \quad (21)$$

式中: $Q_{\max}^{\text{EB}}$, $Q_{\min}^{\text{EB}}$ 分别为电锅炉热出力的上限和下限, kW。

电锅炉在相邻两个调度时段内出力的变化量的爬坡约束为

$$-Q_{\text{DR}}^{\text{EB}} \leq Q_{t+1}^{\text{EB}} - Q_t^{\text{EB}} \leq Q_{\text{UR}}^{\text{EB}} \quad (22)$$

式中: $Q_{\text{UR}}^{\text{EB}}$, $Q_{\text{DR}}^{\text{EB}}$ 分别为向上、向下的最大爬坡率, kW。

3) 可再生能源出力约束。可再生能源的出力受到可再生能源预测值的限制, 若系统中可再生能源消纳能力不足, 就会产生弃风弃光现象, 约束为

$$0 \leq P_t^{\text{WT}} \leq P_t^{\text{WT,pre}} \quad (23)$$

$$P_t^{\text{WT}} + P_t^{\text{WT,loss}} = P_t^{\text{WT,pre}} \quad (24)$$

$$0 \leq P_t^{\text{PV}} \leq P_t^{\text{PV,pre}} \quad (25)$$

$$P_t^{\text{PV}} + P_t^{\text{PV,loss}} = P_t^{\text{PV,pre}} \quad (26)$$

式中: $P_t^{\text{WT,pre}}$, $P_t^{\text{PV,pre}}$ 分别为 t 时段风机的预测出力值和光伏预测出力值, kW; $P_t^{\text{WT,loss}}$, $P_t^{\text{PV,loss}}$ 分别为 t 时段的弃风功率和弃光功率, kW。

2.2.3 供热管网约束

供热管网约束包括换热约束(式(1))、热功率约束(式(2)、式(3))以及节点温度混合约束(式(4))。

3 算例分析

本节采用基于文献[14]的改进算例进行分析验证, 如图3所示。算例由IEEE14节点电力系统和由文献[14]改进的32节点集中供热管网组成。HEC-IES中包含的能源设备包括CHP机组、火电机组、电锅炉、风机、光伏。

选取调度周期为24 h, 调度阶段时长 Δt 为1 h; 电负荷、热负荷、WT与PV的预测出力如图4所示。弃风、弃光惩罚费用为0.1元/(kW·h)。供热管网中, 节点1(H1)、节点31(H31)、节点32(H32)分别对应三个热源, 其中, 节点1为热松弛节点, 节点31和节点32为热平衡节点。每个热源的供应温度为70℃, 热负荷的回水温度为30℃。

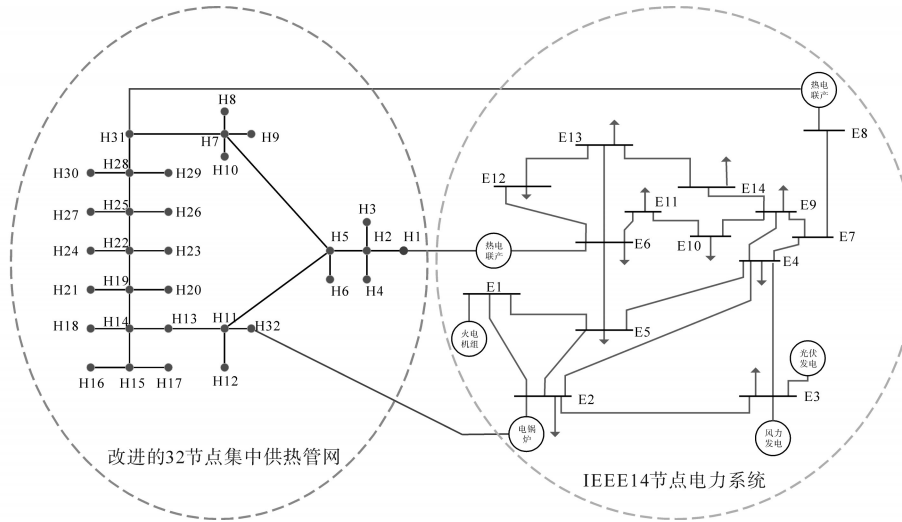


图3 热电耦合综合能源系统结构图

Fig.3 Structure of the HEC-IES

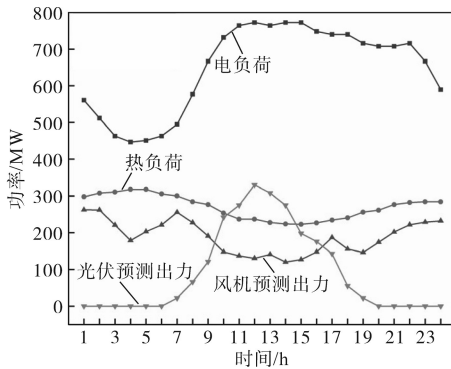


图4 负荷及风、光预测出力

Fig. 4 Loads and prediction output of WT and PV

为对比验证文中所提考虑供热管网热动态储能灵活性的HEC-IES优化调度模型的有效性, 设置以下4个场景进行对比分析。

场景1: 不考虑供热管网提供的灵活性;

场景2: 考虑供热管网提供的储能灵活性;

场景3: 不考虑供热管网提供的灵活性情况下加入高比例可再生能源, WT和PV的预测出力提高为场景1的2倍;

场景4: 考虑供热管网提供的灵活性情况下加入高比例可再生能源, WT和PV的预测出力提高为场景1的2倍。

3.1 经济效益分析

对比场景1和场景2,考虑供热管网储能灵活性前后的经济效益对比如表1所示。场景2在24 h之内系统总运行费用为4 157 209元,比场景1的总运行费用节省了约0.32%。其中,场景2的火力发电费用比场景1减少约6%,CHP费用比场景1增加了约1.8%。场景2的调度方案使系统的总运行费用降低,火力发电费用明显下降,而CHP运行费用稍有提高。

表1 四种场景的运行调度结果

Tab.1 Dispatch operation results of four scenarios

场景	火力发电 费用/元	CHP运行 费用/元	弃风、弃光 费用/元	总运行 成本/元
场景1	1 123 932	3 046 635	0	4 170 567
场景2	1 056 366	3 100 843	0	4 157 209
场景3	449 663	2 973 550	62 923	3 486 136
场景4	329 416	2 980 510	26 461	3 336 387

场景1、场景2下系统电功率平衡与热功率平衡曲线分别如图5和图6所示。

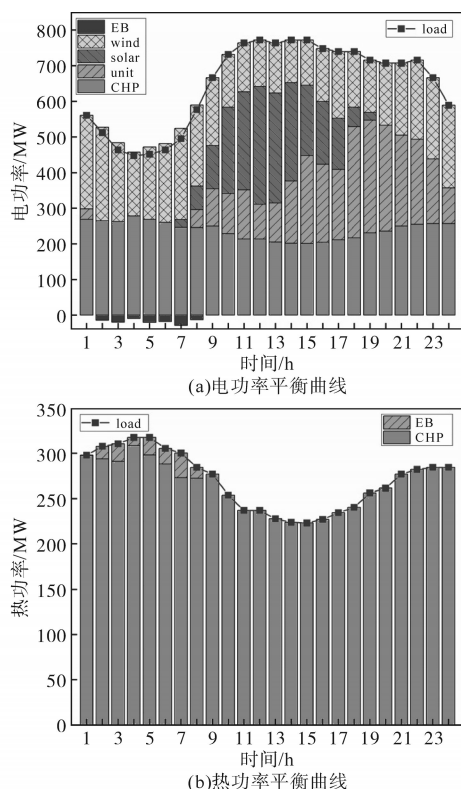


图5 场景1电、热功率平衡情况

Fig.5 Power balance of electricity and heat of scenario 1

由于场景1没有考虑供热管网的储能灵活性,能源供应端设备的出力需实时跟随热负荷的变化。在热负荷高峰期,系统利用CHP和EB对热负荷进行供能,供热机组的运行变化范围被约束,以总运行成本最低为优化目标时,优化程度

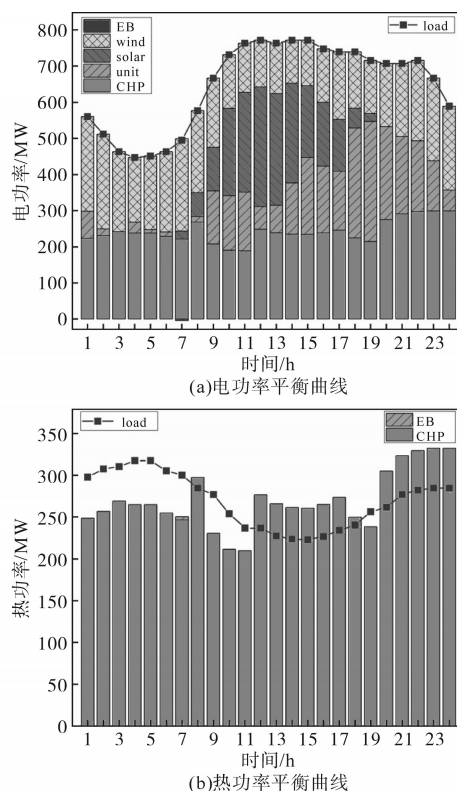


图6 场景2电、热功率平衡情况

Fig.6 Power balance of electricity and heat of scenario 2

有限。而场景2考虑了供热管网的储能特性,打破了原有以热定电的约束,系统的供热功率不必实时跟随热负荷的变化。场景1中,在热负荷高峰期02:00—08:00,CHP机组和EB均投入运行,为系统提供热能;场景2中,在热负荷高峰期,由于供热管网的储能特性,其释放存储的热能为系统供能,此时供热管网中的热储能值减少。为实现HEC-IES调度时间段内总运行费用最低,在热负荷低谷期12:00—16:00,通过增加CHP出力向供热管网中储存能量,此时供热管网中热储能值增加,这部分热能在热负荷高峰期时被负荷利用,实现了热能在时空上的平移,达到系统经济性最优的效果。

由图6分析可知,电热负荷具有明显的峰谷时间差,在电负荷低谷期02:00—08:00,热负荷需求较高,CHP出力较少,热负荷缺额由热力管网储存的热能供应;在电负荷高峰期12:00—16:00,热负荷需求量较小,为了满足电负荷需求,CHP出力较大,部分热能储存在供热管网中。

在运行过程中供热管网的储热以及放热情况如图7所示,反映了供热管网的储能灵活性对系统调度的支撑作用。当热负荷大于热出力时,多余的热能存储在供热管网中;当热负荷小于热

出力时,供热管网向热负荷提供一部分热能。考虑了供热管网热动态储能灵活性的热电耦合 IES 在日前优化调度时,热力系统的供应端具有更大的调节范围,可以根据可再生能源出力情况优化热力系统供应端出力,得到经济性更优的系统调度方案。

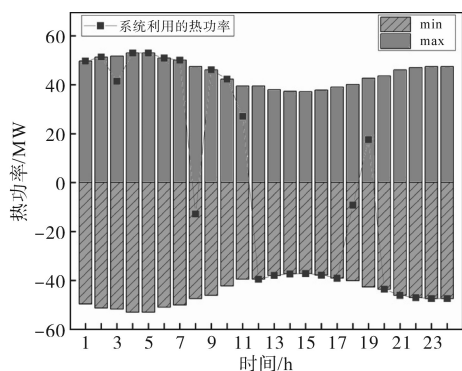


图7 系统灵活性评估图

Fig.7 Flexibility assessment chart of the system

3.2 可再生能源消纳水平分析

对比场景3和场景4,考虑供热管网储能灵活性前后对可再生能源消纳水平的影响如图8所示。可见,在考虑供热管网储能灵活性的场景下,可再生能源消纳率显著提高,弃风弃光的惩罚成本降低,从而降低了系统总运行成本。因此,考虑供热管网储能灵活性后,可再生能源在优化调度中将获得更多上网空间,提高了可再生能源消纳率,促进系统低碳运行。

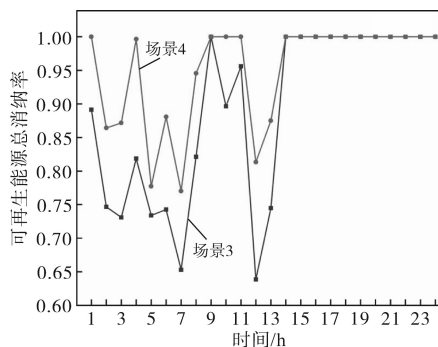


图8 场景3、场景4可再生能源消纳率

Fig.10 Renewable energy consumption rate in scenario 3 and 4

由于场景3没有考虑供热管网储能灵活性,系统无法消纳全部的可再生能源出力,产生了大量弃风和弃光量;场景4考虑了供热管网储能灵活性,在可再生能源出力高峰期,系统利用供热管网储能并降低CHP机组的出力,增大了系统对可再生能源的消纳能力。系统对可再生能源消纳不足的现象主要出现在01:00—08:00,该时间段内场景3为满足较高的热负荷,CHP机组和电

锅炉均出力,且CHP机组强制出力较高,导致系统对可再生能源的消纳不足;在场景4中,由于供热管网储能特性,CHP机组强制出力低,机组出力具有更大的灵活性,可进一步优化运行成本,提高可再生能源消纳能力。

4 结论

本文构建了供热管网的储能灵活性模型与量化方法;在此基础上,构建了HEC-IES日前优化调度模型,通过算例验证了本文方法的有效性。所得结论如下:

1)提出了供热管网的储能灵活性量化方法,不依赖大量仿真,可挖掘供热管网运行灵活性对系统整体经济性与可再生能源消纳水平的提升作用;

2)提出的日前优化调度方法考虑了热电耦合及供热管网储热特性给HEC-IES带来的灵活性,通过利用供热管网储热特性,可实现能量的时空平移,降低系统运行费用;

3)供热管网的储热特性减小了热负荷高峰时段CHP机组的强制发电量,增大了风机和光伏的出力空间,提升了系统可再生能源消纳水平。

参考文献

- [1] 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话[EB/OL]. [2020-09-22]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546168.htm.
Xi Jinping delivered an important speech at the general debate of the 75th session of the UN general assembly. [EB/OL]. [2020-09-22]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546168.htm.
- [2] 习近平在气候雄心峰会上的讲话(全文)[EB/OL]. [2020-12-12]. https://www.ccps.gov.cn/xxsxk/zyls/202012/t20201213_145612.shtml.
Xi Jinping at the climate ambitions summit (full text) [EB/OL]. [2020-12-12]. https://www.ccps.gov.cn/xxsxk/zyls/202012/t20201213_145612.shtml.
- [3] 中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议[EB/OL]. [2020-11-03]. http://www.gov.cn/zhengce/2020-11/03/content_5556991.htm.
The proposal of the CPC central committee on formulating the 14th five-year plan for national economic and social development and the long-range goals for 2035[EB/OL]. [2020-11-03]. http://www.gov.cn/zhengce/2020-11/03/content_5556991.htm.
- [4] 国家发展改革委. 做好电力供需平衡预测[EB/OL]. [2017-12-04]. http://www.nea.gov.cn/2017-12/04/c_136799627.htm.
National Development and Reform Commission. We will fore-

- cast the balance between supply and demand of electricity [EB/OL]. [2017-12-04]. http://www.nea.gov.cn/2017-12/04/c_136799627.htm.
- [5] 谭显东,刘俊,徐志成,等. “双碳”目标下“十四五”电力供需形势[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 1-6.
- TAN Xiandong, LIU Jun, XU Zhicheng, et al. Power supply and demand balance during the 14th five-year plan period under the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 1-6.
- [6] 余晓丹,徐宪东,陈硕翼,等. 综合能源系统与能源互联网简述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 1-13.
- YU Xiaodan, XU Xiandong, CHEN Shuoyi, et al. A brief review to integrated energy system and energy internet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 1-13.
- [7] ZHANG Lei, LUO Yi. Combined heat and power scheduling utilizing building-level thermal inertia for short-term thermal energy storage in district heat system[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2018, 13(1): 804-814.
- [8] 邹云阳,杨莉,冯丽,等. 考虑热负荷二维可控性的微网热电协调调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6): 13-19.
- ZOU Yunyang, YANG Li, FENG Li, et al. Coordinated heat and power dispatch of microgrid considering two-dimensional controllability of heat loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6): 13-19.
- [9] GU Wei, WANG Jun, LU Shuai, et al. Optimal operation for integrated energy system considering thermal inertia of district heating network and buildings[J]. Applied Energy, 2017, 199(1): 234-246.
- [10] HUANG X Z, XU Z F, SUN Y, et al. Heat and power load dispatching considering energy storage of district heating system and electric boilers[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(5): 992-1003.
- [11] 申融容,玄婉玥,张健,等. 面向电源侧灵活性提升的热电耦合技术综述[J]. 中国能源, 2021, 43(5): 51-59.
- SHEN Rongrong, XUAN Wanyue, ZHANG Jian, et al. Review of retrofitting methods for decoupling heat and electricity generation to promote the power system flexibility[J]. Energy of China, 2021, 43(5): 51-59.
- [12] 朱伟业,罗毅,胡博,等. 热负荷弹性与分时电价需求侧响应协同促进碳减排的电热优化调度[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 3803-3813.
- ZHU Weiye, LUO Yi, HU Bo, et al. Optimized combined heat and power dispatch considering decreasing carbon emission by coordination of heat load elasticity and time-of-use demand response[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 3803-3813.
- [13] 裴玮,邓卫,沈子奇,等. 可再生能源与热电联供混合微网能量协调优化[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 9-15.
- PEI Wei, DENG Wei, SHEN Ziqi, et al. Energy coordination and optimization of hybrid microgrid based on renewable energy and chp supply[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 9-15.
- [14] LIU X Z, WU J Z, JENKINS N, et al. Combined analysis of electricity and heat networks[J]. Applied Energy, 2016, 162: 1238-1250.

收稿日期:2021-11-23

修改稿日期:2022-01-06