

计及热网热惯性的沼气热电联产发电灵活性评估

何伟¹, 赵伟哲¹, 饶臻¹, 李佳¹, 单文亮²

(1. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 360102;

2. 天津市智慧能源与信息技术重点实验室(天津大学), 天津 300072)

摘要:随着碳中和和清洁供暖目标在农村地区的推广, 电力和能源系统运行灵活性发挥着越来越重要的作用。针对这一趋势, 以沼气热电联产系统为对象, 提出一种计及热网热惯性的灵活性评估方法。首先, 介绍了零碳农村综合能源系统的结构特征和运行目标, 建立了覆盖沼气热电联产系统、沼气池、供热管网的模型。在此基础上, 给出了适用于含热网的沼气热电联产灵活性的关键性能指标和评估方法。为了应对热网灵活性评估带来的延时最优控制问题, 给出分解-聚合的评估方法, 保证用户供热的同时, 支持电力系统运行。算例结果表明, 通过挖掘热网的灵活性消除热能供需之间的不平衡, 能够有效提升热电联产灵活性, 同时避免增加出力过程对于额外产生热量的浪费。

关键词:农村综合能源系统; 沼气热电联产; 发电灵活性; 热网

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd24047

Flexibility Evaluation of Biogas Driven Combined Heat and Power Considering the Thermal Inertia of District Heating Systems

HE Wei¹, ZHAO Weizhe¹, RAO Zhen¹, LI Jia¹, SHAN Wenliang²

(1. State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 360102, Jiangxi, China;

2. Key Laboratory of Smart Energy & Information Technology of Tianjin

Municipality (Tianjin University), Tianjin 300072, China)

Abstract: Along with the promotion of carbon neutrality and clean heating in countryside areas, operational flexibility plays a more important role in electric power systems. Following this trend, a novel method was proposed for evaluating the flexibility of biogas driven combined heat and power (CHP) considering the thermal inertia of district heating systems. First, the structure and operating scheme of the zero-carbon rural integrated energy system were introduced. The biogas driven CHP, biogas storage system and district heating systems were modelled. On this base, key performance indices and evaluation methodology were proposed to characterize the flexibility of this system. To deal with the optimal control problem with time delays in flexibility evaluation, a decomposition and aggregation method was proposed, which ensure the heat supply to buildings while supporting the operation of the electrical system. The results show that district heating systems enhance the flexibility of the CHP by accommodating the imbalance in heat supply and demand, also, the use of district heating system can help the operator avoid dumping heat when increasing the CHP power output.

Key words: rural integrated energy system; biogas driven combined heat and power (CHP); electricity flexibility; district heating systems

随着碳中和目标的提出以及清洁供暖目标的推进, 越来越多的可再生能源在农村能源系统得到利用, 部分地区因地制宜发展了沼气热电联

产 (combined heat and power, CHP) 机组, 降低农民用能成本的同时, 也大大降低了农村供能系统的碳排放, 实现了一举多得^[1-2]。与此同时, 间歇

基金项目: 国家电网公司总部科技项目 (52182019000K)

作者简介: 何伟 (1985—), 男, 博士, 高级工程师, Email: lanlyhw@163.com

式可再生能源的大规模接入对于接入电气系统的灵活性也有了更高的要求。

沼气、电、热等多种能源的综合利用使得农村能源系统具有典型的区域综合能源特性,各系统运行存在较强的互济特性。已有研究表明多种能源协同能够大大提升系统运行灵活性^[3],利用灵活性的关键问题之一是如何对其灵活性进行评估,以满足系统调控需求,同时保证用户供能不受影响^[4]。

区域综合能源系统的灵活性评估有两个关键因素,即灵活性指标和灵活性评估方法,目前已有大量研究。其中,灵活性指标包含两类典型体系:一是由幅值、爬坡率、持续时间和能量组成的技术指标;二是由容量、爬坡率和持续时间组成的正则化灵活性指标,提升灵活性评估模型的适用性^[5-6]。对于区域综合能源系统灵活性评估主要涉及能源转换单元、热网、储能以及建筑物的协同^[7]。文献[8]指出电-热系统的协同运行可以提升电力系统的灵活性,支持间歇性可再生能源的消纳;文献[9]讨论了热电机组两种灵活性改造方式(配置储热设备和配置电锅炉)的原理和有效性;文献[10]提出了综合考虑建筑物与集中供热管网热动态特性的热电联合运行模式;文献[11]进行了考虑管存特性的综合能源系统低碳经济调度研究;文献[12]考虑了能源市场背景下含储能的光伏和热电联产评估;文献[13]对利用建筑物和热网热惯性实施热电联产电力调峰运行的可行性进行了定性分析;文献[14]在考虑用户舒适度和碳交易的基础上,研究了园区电-热综合能源系统的经济调度;文献[15-16]从需求灵活性和蓄热能力的角度研究了热-电系统的灵活性,分析了热电厂和集中供热的动态可操作性,并对发电容量的灵活性与参加自动频率时设定的要求进行了比较。

随着清洁供热的发展,我国部分农村地区出现了沼气热电联产驱动的区域供热系统,提升了农村能源系统的灵活性。尽管已有大量相关研究,但对于以沼气热电联产为核心的农村综合能源系统灵活性评估依然存在如下问题:

1)不同于一般天然气热电联产等具有充足燃料供应的供能系统,农村使用的热电联产系统,一般采用沼气存储系统供应燃料,使用期间需要受容量约束,其调控能力也因此受限^[17],给现有热电联产模型增加了额外约束;

2)热电联产系统供热输出的扰动会导致沼气制备系统受到影响,进而影响燃料供应系统稳定性,因此沼气热电联产的供热需要更多手段保持稳定^[18],已有研究中对于沼气热电联产和热网协同模型尚不足以支撑其灵活性分析需求;

3)热网调控能力评估涉及多延时过程^[19],在求解过程中会遇到系统维度过高、规模受限的问题。

本文针对沼气热电联产、沼气存储、区域供热网络协同下的综合能源系统灵活性,开展了如下工作:首先介绍了含供热网络的沼气热电联产系统结构,并给出了相应的系统模型;在此基础上,给出了考虑系统运行约束的灵活性指标,并提出了基于管网模型“分解-聚合”的灵活性评估方法。最后通过算例分析,给出了影响不同因素对灵活性的影响。

1 含区域供热管网的沼气热电联产系统

1.1 典型结构

通过对农村生态养殖排泄物的有效处理,能够实现废弃物的能源化、资源化。沼气发酵池通过厌氧作用将秸秆、粪便等有机废弃物进行发酵,产生沼气用于储存或用作沼气 CHP 的燃料。图 1 给出了一种典型的沼气制备及供能系统结构。CHP 产生的电能与电网一同满足居民和沼气制备的电能需求;另一方面,CHP 产生的热能一部分用于维持沼气制备系统热能需求,余下的部分可通过区域供热管网满足居民供热需求。

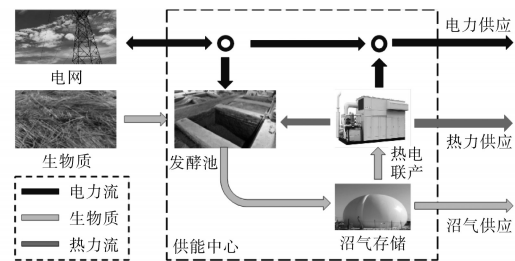


图1 典型沼气热电联产系统结构

Fig.1 Typical structure of biogas driven CHP

1.2 系统模型

沼气 CHP 系统各装置运行过程中,沼气制备过程中的电/热用量、热电联产能、与电网的功率交换以及居民电/热用量满足:

$$\begin{bmatrix} L_e \\ L_h^{DH} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma_{fur}^e & v_{chp} \eta_e^{CHP} \\ 0 & -\gamma_{fur}^h & v_{chp} \eta_h^{CHP} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{grid} \\ P_{bio}^{met} \\ P_{stor}^{met} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$0 \leq \int_0^T (P_{bio}^{met} - P_{stor}^{met}) dt + E_{bio}^{met,0} \leq E_{bio}^{cap} \quad (2)$$

式中: L_e, L_h^{DH} 分别为居民用电和用热负荷; $\gamma_{\text{ur}}^e, \gamma_{\text{ur}}^h$ 分别为生物质制备沼气过程中用电量和用热量系数; $\eta_e^{\text{CHP}}, \eta_h^{\text{CHP}}$ 分别为沼气 CHP 发电和产热效率; v_{chp} 为储气装置释放沼气中用于 CHP 的比例; P_{grid} 为从电网外购电量; $P_{\text{met}}^{\text{met}}$ 为生物质发酵池生物质注入量; $P_{\text{met}}^{\text{stor}}$ 为沼气存储装置释放流量; $E_{\text{bio}}^{\text{met},0}$ 为沼气池初始值; $E_{\text{bio}}^{\text{cap}}$ 为沼气池容量; Π 为一个调度周期。

1.3 供热管网

本文研究对象为单热源热网,在忽略水锤等水力动态的建设基础上,可采用如下准动态模型对其动态行为进行描述:

$$\dot{T}(t) = f[t, T(t), T(t - \tau_{d,1}), \dots, T(t - \tau_{d,N_p}), L_h^{DH}, T_w] \quad (3)$$

其中 $f: \mathbf{R} \times \mathbf{R}^{(N_p + 1)N_T} \rightarrow \mathbf{R}^{N_T}$

$$T_w = [T_{\text{env}} \quad T_{\text{amb}}]^T \in \mathbf{R}^2$$

式中: $T(t)$ 为热网和建筑物温度的状态变量, $T(t) \in \mathbf{R}^{N_T}$; \mathbf{R} 为实数集; N_T 为热网和建筑物中的状态总数; T_w 为管道的周围温度(土壤温度); T_{env} 为环境温度; T_{amb} 为建筑室外温度; f 为描述热网动态行为的函数; N_p 为管道数; $\tau_{d,i}$ 为管道的传输延迟, $i = 1, 2, \dots, N_p$ 。

2 沼气热电联产灵活性评估

2.1 灵活性指标

灵活性是生成单元或系统响应适应需求和供应变化的能力^[5]。就本文系统而言,运行灵活性是指通过沼气热电联产系统各部分的协同,使农村能源系统适应间歇式可再生能源发电和用户电能需求方面波动和变化的能力。在灵活性描述方面,经典的灵活性指标包括3个,即灵活性幅值、爬坡速度及服务持续时间。对于沼气 CHP 来说,爬坡速度主要由发电设备和原动机本体决定,与其他系统关联较小,这里不做细化分析。

正常运行时沼气 CHP 运行基线由优化调度结果决定,其灵活性幅值可定义为输出容量上、下边界与基线的差,即

$$P_{\text{up}}^{\text{flexis}} = P_{e,\text{max}}^{\text{CHP}} - P_e^{\text{CHP}} \quad (4)$$

$$P_{\text{down}}^{\text{flexis}} = P_e^{\text{CHP}} - P_{e,\text{min}}^{\text{CHP}} \quad (5)$$

式中: $P_{\text{up}}^{\text{flexis}}, P_{\text{down}}^{\text{flexis}}$ 分别为热电联产机组可提供的向上和向下灵活性幅值; P_e^{CHP} 为根据负荷和可再生能源预测结果生成的优化调度结果; $P_{e,\text{max}}^{\text{CHP}}, P_{e,\text{min}}^{\text{CHP}}$ 为沼气热电联产发电量可调控的上、下边界。

2.2 沼气热电联产系统灵活性评估

对于给定服务而言,需要 CHP 能够维持其调控一定时间长度,其灵活性需要综合考虑沼气 CHP 容量及热网运行的约束,具体评估方法如下:

$$P_{e,\text{max}}^{\text{CHP}} = \min \{ \bar{P}_{e,\text{cap}}^{\text{CHP}}, \bar{P}_{e,\text{stor}}^{\text{CHP}}, \bar{P}_{e,\text{dh}}^{\text{CHP}} \} \quad (6)$$

$$P_{e,\text{min}}^{\text{CHP}} = \max \{ \underline{P}_{e,\text{cap}}^{\text{CHP}}, \underline{P}_{e,\text{stor}}^{\text{CHP}}, \underline{P}_{e,\text{dh}}^{\text{CHP}} \} \quad (7)$$

式中: $\bar{P}_{e,\text{cap}}^{\text{CHP}}, \underline{P}_{e,\text{cap}}^{\text{CHP}}$ 为 CHP 正常运行的最大、最小出力; $\bar{P}_{e,\text{stor}}^{\text{CHP}}, \underline{P}_{e,\text{stor}}^{\text{CHP}}$ 为考虑沼气池存气能力的最大、最小功率限制; $\bar{P}_{e,\text{dh}}^{\text{CHP}}, \underline{P}_{e,\text{dh}}^{\text{CHP}}$ 为考虑热网对于不平衡供热消纳能力的最大、最小功率限制。

从沼气存储约束来看,在给定服务持续时间 t_{flexis} 范围内以及发酵池产气水平下,热电联产能够从沼气池获取的最大和最小容量如下:

$$\bar{P}_{e,\text{stor}}^{\text{CHP}} = \frac{\eta_e^{\text{CHP}} \gamma_{\text{met}} (M_{\text{stor}} + m_{\text{in}} t_{\text{flexis}})}{t_{\text{flexis}}} \quad (8)$$

$$\underline{P}_{e,\text{stor}}^{\text{CHP}} = \frac{\eta_e^{\text{CHP}} \gamma_{\text{met}} (\bar{M}_{\text{stor}} - M_{\text{stor}} - m_{\text{in}} t_{\text{flexis}})}{t_{\text{flexis}}} \quad (9)$$

式中: γ_{met} 为沼气热值; $M_{\text{stor}}, \bar{M}_{\text{stor}}$ 分别为当前沼气存储量及额定容量; m_{in} 为发酵池沼气产量。

2.3 供热系统灵活性评估

2.3.1 问题描述

对于供热管网导致的功率限制,需考虑如下因素的影响:

1) 热电联产供热可调控范围为 $[Q_h, \bar{Q}_h]$;

2) 热网运行温度范围为 $[T_r, \bar{T}_r]$;

3) 建筑温度舒适区范围为 $[T_b, \bar{T}_b]$;

4) 管道传输存在延时,即供热管道中热量的过量或短缺可能导致建筑温度在随后一个时期 τ_d 内升高或降低。

当单个系统的灵活性被量化得以进入市场并以此作为经济性基础时,首选最大灵活性。考虑到对灵活性的需求可以是正的,也可以是负的,因此集中供热系统的最大灵活性被表示为向上和向下的边界。供热系统的最大灵活性可以表述为具有状态约束的最优控制问题。求解状态时滞最优控制问题的一种方法是对方程进行离散化,并将问题转化为约束优化问题。在实践中,供热系统可能有多条不同长度的管道,这将显著带来不同的传输延迟,并增加计算负担,因此需要一种简化的方法。

2.3.2 求解方法

为解决系统灵活性量化过程中所涉及的复杂

多时滞系统优化控制问题,提出一种基于“分解-评估-聚合”框架的灵活性评估方法,如图2所示。

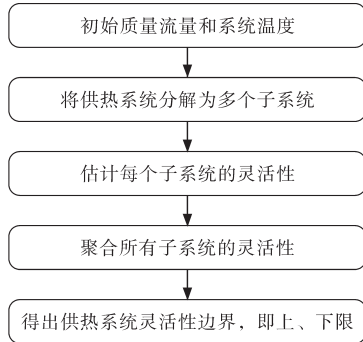


图2 灵活性量化方法流程图

Fig.2 Schematic diagram of the saturated filter-based controller

该方法首先给出一种等价模型,把每个换热站及其二次网辖区建筑视为一个整体,即为整个各供热系统的子系统。由于子系统模型仅含有单延时环节,求解难度随系统维度线性增长,避免了多延时系统的求解复杂度随维度指数增长的问题。在获取全部子系统复杂度后,考虑用户供能需求,采用“木桶”原则进行聚合,即当任何子系统达到其运行边界,则整个供热系统的灵活性到达边界。具体介绍如下:

1)系统分解。将原始供热系统分解为具有单生产者单消费者结构的 N_s 个子系统,如图3和图4所示。

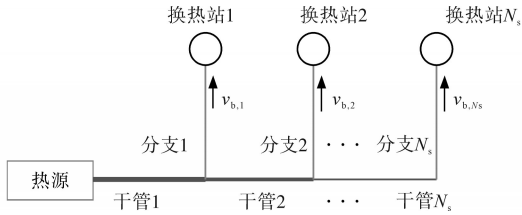


图3 典型树状热网系统结构图

Fig.3 Typical tree heat supply network system structure diagram

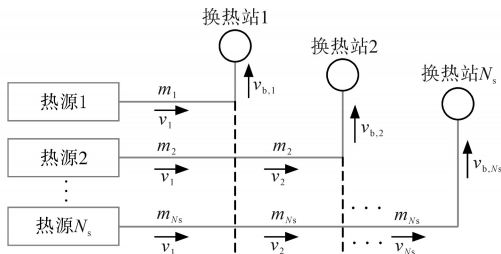


图4 热网等效系统结构图

Fig.4 Structure of the equivalent district heating system

各子系统流量等于原系统中相关换热站的一次流量,并根据每个子系统质量流量 m_i ,计算出其设计热负荷。各子系统主干管道 k 的流速等于原管道的流速,从原管道中提取分解管道的摩擦因子和热损失因子,得到的参数保证了分

解后的系统能反映原系统的水力和热行为。

令 m_i 为分支管道 i 的热水量, ρ_w 为水的密度, $A_{b,i}$ 为分支管道 i 的横截面积。分支管道 i 的流速通过 $v_{b,i} = m_i / (\rho_w A_{b,i})$ 计算。对于枝状管网,进入节点的主管道流量等于支管和其他干线管道的总流量,它们作为同一节点的出口。主管道 k 流量通过 $m_{t,k} = \sum_{i=k}^{N_s} m_i$ 计算,则主管道 k 流速为

$$v_k = \frac{\sum_{i=k}^{N_s} m_i}{\rho_w A_{t,k}} \quad (10)$$

式中: N_s 为换热站数量; $A_{t,k}$ 为主干管道 k 的横截面积。

假设管道内的水是不可压缩的,管道内水流的运输延迟表示水从管道一端移动到另一端所需的时间,然后可以计算子系统 i 的传输延迟为

$$\tau_{d,i} = \frac{l_{b,i}}{v_{b,i}} + \sum_{k=1}^i \frac{l_{t,k}}{v_k} \quad (11)$$

式中: $l_{t,k}$ 为主干管道 k 的长度; $l_{b,i}$ 为分支管道 i 的长度。

分解子系统的行为可以理解为热量通过换热首站注入一次网。研究二次网作为等效建筑的一部分,通过建筑换热器从热网中获得热量。子系统 i 的模型可以表示为

$$\dot{T}_i(t) = A_0 T_i(t) + A_1 T_i(t - \tau_{d,i}) + B Q_{h,i} + E T_w \quad (12)$$

其中

$$T_i(t) = [T_s^p \quad T_{1,o,i}^b \quad T_{2,o,i}^b \quad T_{b,i}]^T$$

式中: T_s^p 为一次网供水温度; $T_{1,o,i}^b$ 为子系统 i 中等效建筑物换热器一次侧的出口温度; $T_{2,o,i}^b$ 为等效建筑物换热器二次侧的出口温度; $T_{b,i}$ 为等效建筑物的温度; $Q_{h,i}$ 为第 i 个换热器输出热量; A_0, A_1, B, E 为等效建筑物相关参数,详细表述见文献[18]。

对于图4所示的供热管网,其一次网供水温度、等效建筑物温度和换热器输出热量均受到实际运行约束,可表示为

$$\underline{T}_s^p \leq T_s^p \leq \bar{T}_s^p \quad (13)$$

$$\underline{T}_{b,i} \leq T_{b,i} \leq \bar{T}_{b,i} \quad (14)$$

$$\underline{Q}_{h,i} \leq Q_{h,i} \leq \bar{Q}_{h,i} \quad (15)$$

式中: $\underline{T}_s^p, \bar{T}_s^p$ 分别为一次网供水温度上、下限; $\underline{T}_{b,i}, \bar{T}_{b,i}$ 分别为等效建筑物温度上、下限; $\underline{Q}_{h,i}, \bar{Q}_{h,i}$ 分别为换热器输出热量上、下限。

2)量化子系统灵活性。根据系统提供给定灵活性服务的最大持续时间,按照以下步骤计算子系统的灵活性范围:

a) 根据给定的建筑温度设定点估计热需求,并根据式(11)计算时延 $\tau_{d,i}$ 。

b) 假设一次网供水温度为 T_s^p ,然后初始化管道,获得换热器和建筑物的温度与稳态估计值。

c) 选择满足 $\tau_{d,i}$ 的适当的时间步长 Δt ,然后通过 $n_{flexis} = t_{flexis}/\Delta t$ 将 t_{flexis} 转换为 n_{flexis} 。

d) 将 $Q_{h,i}$ 划分为 $n_{i,j}$ 个间隔,并在每个区间内将 $Q_{h,i}$ 视为常数,设置间隔 $j=1$ 。

e) 将离散方程与约束式(13)~式(15)相结合,形成一个新的优化问题。如果热量输出增加,即 $Q_{h,i}(j) - Q_{d,i}(t_0) > 0$,则目标函数可表示为

$$\max \sum_{m=0}^{n_{flexis}} [Q_{h,i}(j) - Q_{d,i}(t_0)] \Delta t \quad (16)$$

式中: $Q_{d,i}(t_0)$ 为初始时刻换热器的期望输出热量。如果热量输出减少,即 $Q_{h,i}(j) - Q_{d,i}(t_0) < 0$,则目标函数可表示为

$$\min \sum_{m=0}^{n_{flexis}} [Q_{h,i}(j) - Q_{d,i}(t_0)] \Delta t \quad (17)$$

分解后子系统向上和向下调节的能力求解问题都是线性优化问题,具有 $4 \times n_{flexis}$ 个等式约束和 $3 \times n_{flexis}$ 组上、下边界。

f) 用内部点法求解 Matlab 中的 fmincon 优化问题,获得向上/向下灵活性的最大持续时间。

g) $j = j+1$,回到步骤 e),直到 $j > n_{i,j}$,获得在所有持续时间里换热器输出热量的最大调节量 $Q_i(t)$ 。然后,子系统 i 的灵活性边界可以表示为 $Q_i(t)$,维数为 $1 \times n_{i,j}$ 。

3) 灵活性的聚合。由于不同子系统供热是相互关联的,因此热量的输出需要确保所有子系统都在极限范围内。对于 $Q_{h,i}(j) \geq Q_{d,i}(t_0)$,子系统 i 上限为

$$Q_{h,i}^{u,lim}(j) = m_i \times \min_{1 \leq i \leq N_s} \left\{ \frac{Q_{h,i}(j)}{m_i} \right\} \quad (18)$$

对于 $Q_{h,i}(j) < Q_{d,i}(t_0)$,子系统 i 下限为

$$Q_{h,i}^{d,lim}(j) = m_i \times \max_{1 \leq i \leq N_s} \left\{ \frac{Q_{h,i}(j)}{m_i} \right\} \quad (19)$$

3 算例分析

3.1 系统参数

采用图 1 所示的典型生态综合能源配置形式,系统中包括沼气 CHP 机组、沼气发酵池、生物质储能装置以及配套的供热供电系统。以此进行带有生态养殖的农村综合能源系统仿真,参考实际情况及现有文献的系统仿真参数设置。本文中主要设备参数如表 1 所示。

表 1 系统参数

Tab.1 System parameters

设备	参数	数值
沼气 CHP 机组	额定电功率 $P_{e,max}^{CHP}$	1 370 kW
	电效率 η_e^{CHP}	28.8%
	热效率 η_h^{CHP}	56.2%
生物质储能 MS	额定容量 M_{max}^{MS}	1 200 m ³
	额定输入率 $m_{in,max}^{MS}$	100 m ³ /h
	沼气热值	20 800 kJ/m ³
	额定输出率 $m_{out,max}^{MS}$	100 m ³ /h

假设供热系统为两片主要村落供电,每个村落通过换热站供热,村落与沼气 CHP 之间的管网如图 5 所示,管网参数如表 2 所示。假设每个村落的等效建筑模型热容量为 225 MJ/°C,传热系数为 41.2 kW/°C;建筑物温度设定点为 21 °C,舒适度范围为 20~23 °C;供水温度上限为 99 °C。

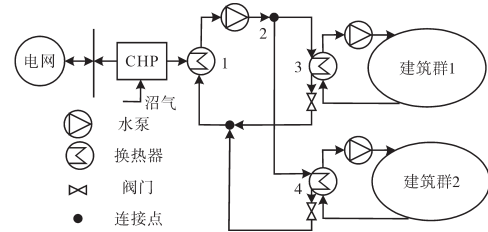


图 5 沼气热电联产与区域供热系统算例结构

Fig.5 Structure of the studied biogas driven CHP and district heating systems

表 2 区域供热系统管道参数

Tab.2 Parameters of the pipelines in the district heating systems

编号	起点	终点	长度/m	管径/mm
(1)	1	2	500	DN 200
(2)	2	3	200	DN 125
(3)	2	4	500	DN 125

3.2 灵活性边界评估结果

选取如下仿真场景:稳态运行时,CHP 电力输出为 891.4 kW,发酵池产气量维持在 70 m³/h,初始状态为 600 m³,热网供水温度设定点为 85 °C。根据本文方法,可得 CHP 输出功率灵活可调上、下边界,如图 6 中曲线所示。在灵活性服务持续时间较短时(小于 0.75 h),沼气储能容量和热网运行状态约束都在允许范围内,此阶段主要为发电机运行功率和容量约束限制 CHP 的灵活调控范围。在服务时间长度大于 0.75 h 时,CHP 调控上边界,由沼气储能约束决定,即 CHP 功率输出大于边界值时沼气储能用光,无法继续提供服务。在服务实际长度大于 0.8 h 时,灵活性服务下边界主要由热网约束决定,即当 CHP 输出减小到一定值以上时,建筑温度下降到舒适度范围之

外。由上述多个边界组合得到的图中阴影区域即为系统灵活调控范围。

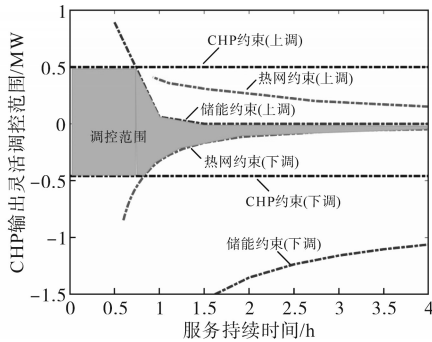


图6 沼气CHP输出电功率调控范围

Fig.6 Flexible power output of the biogas CHP

3.3 影响因素分析

3.3.1 供水温度

根据供热长度、热源条件等不同因素,区域供热系统可选择不同供水温度,为体现其影响,这里分别选择85℃、90℃和95℃三个场景进行分析,所得结果如图7所示。

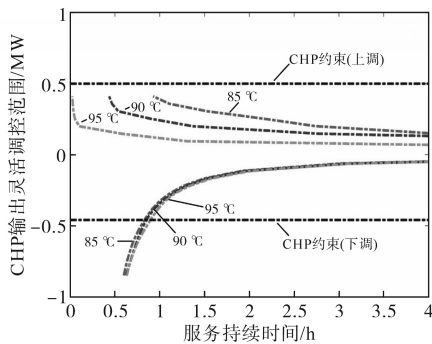


图7 供水温度对于沼气CHP输出电功率调控范围的影响

Fig.7 Impact of supply water temperature on the flexible power output of the CHP

随着供水温度的增加,CHP灵活性上边界不断收缩。导致这一现象的主要原因在于最大供水温度对于CHP输出功率的限制。当供水温度接近其最大值时,CHP供热的增加更容易导致供水温度短时间增大进而导致整个系统上调能力下降。对于下调边界而言,其约束条件主要在于建筑物温度舒适范围的影响,供水温度的小幅度变化对于其调控能力影响有限,因此其灵活性下边界在不同温度水平下保持一致。

结合图6中储能约束可知,供水温度变化对于灵活性下边界的影响较小,但却可能导致原本由储能约束的灵活性边界,转而受到热网运行约束。

3.3.2 沼气存储容量

在沼气热电联产运行过程中,沼气存储量会

不断变化,在CHP增加出力的过程中,沼气会以更快的速度被消耗掉,导致CHP丧失灵活性。而在CHP减小出力的过程中,由于沼气的消耗量减少,发酵池供应的沼气可能导致沼气存储到达最大容量,使得CHP失去下调出力能力。因此,分析沼气储量对于CHP当前状态的灵活性评估具有重要意义。

为分析其影响,分别选择沼气池剩余400 m³、600 m³、900 m³三种工况,所得结果如图8所示。在沼气存储量为400 m³的工况下,系统上调灵活性主要受到沼气存储限制,随着沼气存储量的增加,CHP调控灵活性服务可持续时间不断增加。在服务持续时间增加到一定水平(0.5 h)以上时,系统上调灵活性幅值开始受到热网调控的约束。对于下调灵活性边界,主要受到热网运行约束的限制,不会因工况不同而发生变化。

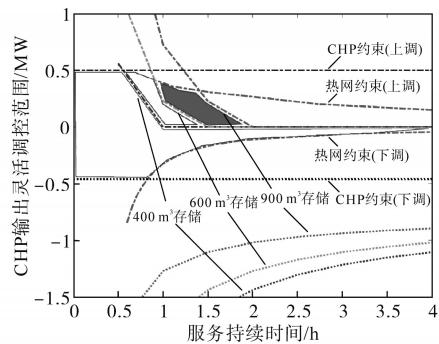


图8 沼气存储量对于CHP输出电功率调控范围的影响

Fig.8 Impact of biogas storage volume on the flexible power output of the CHP

4 结论

本文提出一种计及热网热惯性的沼气CHP系统灵活性评估方法,并从电-热多能源系统协同运行的角度提出了相应的灵活性指标。同时考虑到热网的复杂延时特性,给出了分解-聚合的评估方法。结合算例分析得出如下结论:

- 1)在考虑热网系统的情况下,沼气CHP系统的灵活性边界由发电机容量、沼气存储量以及热网可调控边界共同决定;
- 2)从灵活性的角度来说,在热网流量调控允许的范围,供水温度不宜过高,否则会导致热网上调灵活性范围的收缩;
- 3)实际系统运行过程中的灵活性评估,需要根据具体服务需求(幅值、服务持续时间)进行在线更新。

本文所用综合能源系统分析模型主要为线

性模型,对于部分非线性环节描述精度不足,在不同工况下可能参数差异较大,在实际使用中可考虑分段线性化结合系统辨识方法获取合适参数,满足不同工况下的分析需求。未来将引入关键环节非线性特征(如热电联产系统电-热耦合关系),提升系统分析精度。

参考文献

- [1] 金璐,何伟,闫华光,等.基于改进TOPSIS的乡镇综合能源系统效益综合评价方法[J].电测与仪表,2023,60(2):1-9.
JIN L, HE W, YAN H G, et al. Comprehensive evaluation method for benefits of township integrated energy system based on improved TOPSIS[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(2): 1-9.
- [2] 刘泽庆,张瑞娜,刘帅,等.生物燃气热电联产系统能量优化[J].环境卫生工程,2017,25(4):77-79.
LIU Z Q, ZHANG R N, LIU S, et al. Energy optimization of biogas cogeneration system[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2017, 25(4): 77-79.
- [3] 陈伟,路源,何欣,等.计及风光就地消纳的设施农业产业园区综合能源系统多目标优化调度方法[J].电力建设,2021,42(7):20-27.
CHEN W, LU Y, HE X, et al. A multi-objective optimal scheduling method for integrated energy system of protected agricultural industrial park considering local consumption rate of wind and solar energy[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(7): 20-27.
- [4] PATERAKIS N G, ERDIN O, CATALÃO J. An overview of demand response: key-elements and international experience[J]. Renewable and Sustainable Energy Review, 2017, 69: 871-891.
- [5] COCHRAN J, MILLER M, ZINAMAN O, et al. Flexibility in 21st century power systems[R]. National Renewable Energy Lab (NREL), Golden, CO (United States), 2014.
- [6] PAN Z, SUN H, ABEYSEKERA M. Quantification of operational flexibility from a heating network[J]. Energy Procedia, 2018, 145: 516-521.
- [7] ZHANG L, LI Y, ZHANG H, et al. A review of the potential of district heating system in Northern China[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 188: 116605.
- [8] LI J H, FANG J K, ZENG Q, et al. Optimal operation of the integrated electrical and heating systems to accommodate the intermittent renewable sources[J]. Applied Energy, 2016, 167: 244-254.
- [9] 吕泉,胡炳廷,王海霞.风热冲突下热电厂供热问题研究[J].电力自动化设备,2017,37(6):236-244.
LÜ Q, HU B T, WANG H X. Heat-supply of thermal power plant in wind-heat conflict[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 236-244.
- [10] 李平,王海霞,王漪.利用建筑物与热网热动态特性提高热电联产机组调峰能力[J].电力系统自动化,2017,41(15):26-33.
LI P, WANG H X, WANG Y. Improvement of peak load regulation capacity of combined heat and power units considering dynamic thermal performance of buildings and district heating pipelines network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 26-33.
- [11] 周晨锐,刘继春,张浩禹,等.考虑管存动态特性的电-气-热综合能源系统低碳经济调度[J].电气传动,2021,51(13):69-74.
ZHOU S R, LIU J C, ZHANG H Y, et al. Low-carbon economic dispatch of electric-gas-heat integrated energy system considering dynamic characteristics of storage[J]. Electric Drive, 2021, 51(13): 69-74.
- [12] 魏超,焦晓峰,刘永江,等.能源市场背景下含储能的光伏和热电联产评估[J].电气传动,2021,51(18):76-80.
WEI C, JIAO X F, LIU Y J, et al. Evaluation of photovoltaic and CHP with energy storage under the background of energy market[J]. Electric Drive, 2021, 51(18): 76-80.
- [13] FOTEINAKI K, LI R, PÉAN T, et al. Evaluation of energy flexibility of low-energy residential buildings connected to district heating[J]. Energy and Buildings, 2020, 213: 109804.
- [14] LI L, YU S. Optimal management of multi-stakeholder distributed energy systems in low-carbon communities considering demand response resources and carbon tax[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 61: 102230.
- [15] FINCK C, LI R, KRAMER R, et al. Quantifying demand flexibility of power-to-heat and thermal energy storage in the control of building heating systems[J]. Applied Energy, 2018, 209: 409-425.
- [16] YILMAZ H, KELES D, CHIODI A, et al. Analysis of the power-to-heat potential in the European energy system[J]. Energy Strategy Reviews, 2018, 20: 6-19.
- [17] 冯琛.花庄沼气热电联产系统热稳定性研究[D].兰州:兰州理工大学,2017.
FENG C. Thermal stability study of biogas CHP system in Huazhuang[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017.
- [18] XU X, QUEN L, QADRAN M, et al. Quantification of flexibility of a district heating system for the power grid[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2617-2630.
- [19] 冯智慧,吕林,许立雄.基于能量枢纽的沼-风-光全可再生能源系统日前-实时两阶段优化调度模型[J].电网技术,2019,43(9):3101-3109.
FENG Z H, LÜ L, XU L X. Two-stage optimal dispatch model of day-ahead and real-time for biogas-wind-solar fully renewable energy system based on energy hub[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3101-3109.

收稿日期:2021-10-28

修改稿日期:2021-11-03