

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201561

# 基于灵活热电比的区域综合能源系统多目标优化调度

王磊<sup>1</sup>, 姜涛<sup>2</sup>, 宋丹<sup>3</sup>, 崔杨<sup>2</sup>, 胡扬宇<sup>4</sup>, 柴旭峥<sup>4</sup>, 唐耀华<sup>3</sup>

(1. 国网开封供电公司, 河南 开封 475000; 2. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 吉林 132012; 3. 润电能源科学技术有限公司, 河南 郑州 450046; 4. 国网兰考县供电公司, 河南 兰考 475300)

**摘要:** 针对热电联供(Combined Heat and Power, CHP)“以热定电”导致的弃风及运行成本较高问题, 提出基于 CHP 灵活热电比的区域综合能源系统多目标优化调度方法。首先, 采用补燃装置对 CHP 补燃, 灵活调整各时段补燃率以使 CHP 热电比跟随风电出力态势, 提高系统风电接纳水平与运行效益。然后, 考虑补燃燃油的使用增加了系统排污, 综合经济性与环保性建立区域综合能源系统多目标优化模型, 通过层次分析法对各目标权重进行决策。最后, 依托商业优化软件 GAMS 对建立的混合整数非线性规划问题进行求解。算例研究表明: 对 CHP 热电比进行灵活调节, 能够有效促进风电并网消纳、降低系统运行成本。多目标优化使 CHP 热电比兼顾系统经济性与环保性, 较单目标而言更具优势。

**关键词:** 风电消纳; 区域综合能源系统; 灵活热电比; 多目标; 层次分析法; 混合整数非线性规划

## Multi-objective optimal dispatch of a regional integrated energy system based on a flexible heat-to-electric ratio

WANG Lei<sup>1</sup>, JIANG Tao<sup>2</sup>, SONG Dan<sup>3</sup>, CUI Yang<sup>2</sup>, HU Yangyu<sup>4</sup>, CHAI Xuzheng<sup>4</sup>, TANG Yaohua<sup>3</sup>

(1. State Grid Kaifeng Power Supply Company, Kaifeng 475000, China; 2. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology (Northeast Electric Power University), Ministry of Education, Jilin 132012, China; 3. CR Power Energy Science and Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450046, China; 4. State Grid Lankao County Power Supply Company, Lankao 475300, China)

**Abstract:** The Combined Heat and Power (CHP) operation mode of ‘power determined by heat’ carries with it the problem of high operational cost and wind curtailment. To help tackle this we propose a multi-objective optimization scheduling method of a regional integrated energy system based on CHP flexible heat-to-electric ratio. First, the CHP is replenished with a fuel supply device, and the rate of replenishment at each period is flexibly adjusted to make the CHP heat-to-electric ratio follow the wind power output, so as to improve the wind power acceptance level and operational efficiency of the system. Then, a multi-objective optimization model of a regional integrated energy system is established based on comprehensive economy and environmental protection taking into account that the use of supplementary fuel increases system emissions, and the weight of each target is determined by an analytic hierarchy process. Finally, the mixed integer nonlinear programming problem is solved by commercial optimization software GAMS. Simulation results show the flexible adjustment of the CHP heat-to-electric ratio can effectively promote the integration of wind power and reduce system operating costs. However, the multi-objective optimization makes the CHP heat-to-electric ratio more advantageous than a single target, and it takes into account system economy and environmental protection.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51777027).

**Key words:** wind power accommodation; regional integrated energy system; flexible heat-to-electric ratio; multi-objective; analytic hierarchy process; MINLP

## 0 引言

能源危机与环境污染日趋严峻, 发展多能互补

综合能源系统(Integrated Energy System, IES)对建设现代能源体系意义重大<sup>[1-3]</sup>。在以 CHP 为核心的区域综合能源系统中, 供暖季 CHP “以热定电”运行模式制约了燃气轮机调节能力, 导致系统弃风现象严重、运行成本较高。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51777027)

目前,有关解耦热电机组“以热定电”运行约束的研究成果<sup>[4]</sup>主要集中于两方面:(1)增设新的热源以优化热源结构,通过承担供热负荷实现热电机组热电解耦;(2)对热电机组蒸汽流程进行改造,通过扩大机组热电比调节范围实现热电解耦。

对于方面一,文献[5-7]提出将电锅炉安装在二级热网处,通过降低热电机组夜间供热峰荷以促进风电并网消纳。文献[8-10]在配置电锅炉调峰基础上,探讨了储热式电锅炉对消纳弃风的有效性。文献[11-12]建立了电锅炉与碳捕集机组协调优化的电-热综合能源系统低碳经济调度模型,兼顾风电消纳与低碳排放。文献[13-14]引入分布式热泵以改善电、热负荷布局,实现风电就地消纳。由以上文献可知,配置灵活热源能够有效解耦 CHP 热电耦合运行约束、提高风电上网空间,但在弃风率较高的情况下,通常需要安装较大容量热源,导致系统投资成本增加、经济性下降。

对于方面二,文献[15-16]在能源网中引入基于有机朗肯循环的低温余热发电装置对 CHP 热电解耦,将用电高峰部分余热资源进行发电,实现了 CHP 热电比的灵活调节,然而现阶段低温余热发电装置投资成本高昂,目前尚不具备大规模推广条件。文献[17]以分布式热电联产为研究对象,通过对余热锅炉补燃实现 CHP 热电比灵活调节,但该研究仅从理论分析展开,并未涉及能源网调度研究。文献[18-19]建立了基于能量枢纽的区域综合能源系统双层优化模型,通过燃油补燃对 CHP 热电比进行调节,实现了系统高效经济运行,但该研究并未分析补燃装置对提高风电消纳的积极作用,并且补燃燃油的使用增加了系统污染排放,仅以成本最优为目标进行经济调度并不符合我国能源系统清洁低碳的发展方向。

综上,本文提出基于 CHP 灵活热电比的区域综合能源系统优化调度方法。对加装补燃装置后 CHP 热电比调节能力进行分析,并探讨了灵活热电比对促进风电并网消纳、改善系统运行成本的有效性。此外,鉴于补燃燃油排污较高,综合经济与环保因素建立区域综合能源系统多目标优化模型,基于 AHP 决策体系对多目标权重进行求取,在商业优化软件 GAMS 对建立的 MINLP 问题进行求解。算例结果验证了本文调度方法的经济环保优势。

## 1 基于灵活热电比的 RIES 优化架构

本文以华北地区某小型区域综合能源系统为研究对象,其架构如图 1 所示。原系统中余热锅炉无补燃环节,CHP 以恒定热电比模式运行,导致在风

电大发时段系统弃风情况严重、运行成本较高。为此,本文在余热锅炉处设置补燃装置,通过外购补燃燃油进行补燃,实现对 CHP 热电比灵活调节,以提高系统可再生能源接纳水平与运行经济性。

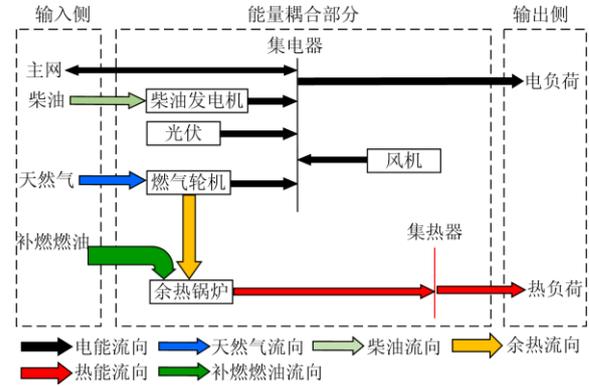


图 1 区域综合能源系统架构

Fig. 1 Structure of regional integrated energy system

### 1.1 CHP 灵活热电比调节原理

CHP 由燃气机组与余热利用装置两部分组成。通过余热回收设备对发电余热回收供热,从而实现能量梯级利用<sup>[20]</sup>。热电比是热电联供机组的技术经济指标,定义为 CHP 实际输出热功率与电功率的比值,表示为

$$\lambda_{\text{CHP}}(t) = P_{\text{CHP}}^{\text{h}}(t) / P_{\text{CHP}}^{\text{e}}(t) \quad (1)$$

$$P_{\text{CHP}}^{\text{e}}(t) = L_{\text{CHP}}(t) H_{\text{GAS}} \eta_{\text{CHP}}^{\text{e}} \quad (2)$$

$$P_{\text{CHP}}^{\text{h}}(t) = L_{\text{CHP}}(t) H_{\text{GAS}} \eta_{\text{CHP}}^{\text{h}} \quad (3)$$

式中:  $\lambda_{\text{CHP}}(t)$  为  $t$  时段 CHP 热电比;  $P_{\text{CHP}}^{\text{e}}(t)$ 、 $P_{\text{CHP}}^{\text{h}}(t)$  分别为  $t$  时段 CHP 发电功率、供热功率;  $\eta_{\text{CHP}}^{\text{e}}$ 、 $\eta_{\text{CHP}}^{\text{h}}$  分别为天然气经 CHP 转换为电能、热能的效率;  $L_{\text{CHP}}(t)$  为  $t$  时段 CHP 天然气消耗量;  $H_{\text{GAS}}$  为天然气低热值,取  $9.7 \text{ kWh/m}^3$ 。

本文对由燃气轮机与余热锅炉构成的 CHP 进行研究。按照是否加装燃烧装置可将余热锅炉分为无补燃式与带补燃式两种,其中无补燃式余热锅炉热效率稳定,并且燃气轮机在一定发电功率范围内电效率可近似认为恒定不变<sup>[21]</sup>,因而通常认为此类 CHP 热电比恒定。而带补燃式余热锅炉通过燃油补燃,能够提高余热锅炉供热出力,从而实现 CHP 热电比调控,以提高系统整体能源利用效率与运行经济性。

余热锅炉补燃装置分为外补燃与内补燃两种。其中内补燃装置结构简单、成本低廉、运维方便,在补燃需求较小的余热锅炉中更为适用。其工作原理为:补燃燃油直接喷入烟道中与燃气轮机排气混合,利用排烟中过余氧气进行燃烧,增加余热锅炉

供热功率。CHP 热电比  $\lambda_{\text{CHP}}$  与补燃装置补燃率  $K$  实验拟合关系<sup>[13]</sup>表示为

$$\lambda_{\text{CHP}}(t) = C_{a1}K(t) + C_{a2} \quad (4)$$

$$K(t) = C_{b1}L_u(t)H_u + C_{b2} \quad (5)$$

式中:  $K(t)$  为  $t$  时段补燃装置补燃率, 单位为%;  $L_u(t)$  为  $t$  时段补燃燃油消耗量, 单位为 kg;  $H_u$  为燃油低热值, 取 11.917 kWh/kg;  $C_{a1}$ 、 $C_{a2}$ 、 $C_{b1}$ 、 $C_{b2}$  为拟合常数。

将式(2)、式(3)进行整理, 进一步得到 CHP 热效率  $\eta_{\text{CHP}}^h$  与补燃燃油消耗量  $L_u(t)$  的关系, 表示为

$$\eta_{\text{CHP}}^h(t) = \eta_{\text{CHP}}^c [C_{a1}(C_{b1}L_u(t)H_u + C_{b2}) + C_{a2}] \quad (6)$$

由此可知, 随着余热锅炉补燃燃油消耗量(即补燃率  $K$ )增加,  $\eta_{\text{CHP}}^h$  也随之提升。根据文献[17]实验数据, 得到不同补燃率  $K$  取值下 CHP 热电比  $\lambda_{\text{CHP}}$ , 如图 2 所示。通过对补燃装置喷油量进行灵活调控, 能够使 CHP 各时段根据系统需要运行于最佳热电比模式, 从而使系统运行状态更优。

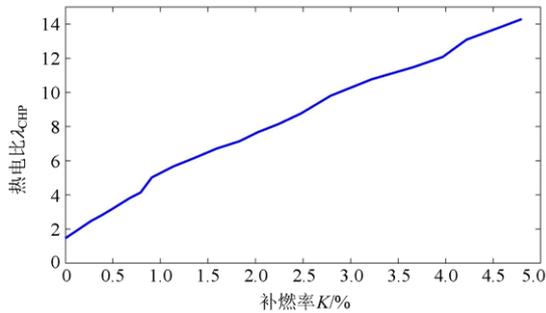


图 2 CHP 热电比与补燃率关系

Fig. 2 Relation between CHP heat-to-electric ratio and replenishment rate

## 1.2 基于灵活热电比的 CHP 促进风电消纳原理

我国华北地区冬季风电反调峰特性明显, 且热电比恒定的 CHP “以热定电” 运行模式导致燃气轮机调节能力大幅受限, 在夜间风电大发时段系统必须弃风限电以保障居民供暖需求。基于灵活热电比的 CHP 促进风电消纳原理如图 3 所示。

分析可知, CHP 以恒定热电比运行时弃风集中于夜间采暖负荷高峰, 弃风功率为  $P_{\text{wd1}}$ ; 加装补燃装置后 CHP 热效率  $\eta_{\text{CHP}}^h$  通过燃油补燃得到了提高, 由式(2)、式(3)可知此时 CHP 电功率为补燃率为  $K$  时对应的发电功率  $P_{\text{CHP}}^c(K)$ , 较原 CHP 电功率得到了明显降低, 从而有效提高了系统风电接纳水平, 即图中  $\Delta P_w$  部分, 此时系统弃风功率为  $P_{\text{wd2}}$ 。此外, 由于风电上网电量的增多以及 CHP 天然气耗量的减少, 系统运行成本在一定程度上将得到改善。

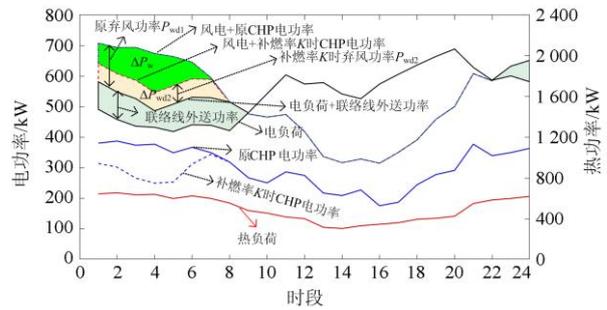


图 3 基于灵活热电比 CHP 提高风电消纳原理

Fig. 3 Wind accommodation based on flexible heat-to-electric ratio of CHP

## 2 基于灵活热电比的 RIES 多目标优化模型

采用补燃装置对 CHP 热电比进行调节, 能够提高系统风电利用水平、改善系统运行经济性。与此同时, 与天然气等清洁能源相比, 燃油燃烧会产生更多的污染排放, 当系统以环保性为目标优化时, 希望尽可能减少补燃燃油的使用, 从而限制了 CHP 热电比调节能力, 导致补燃装置对促进风电并网消纳、降低系统运行成本的作用不能得到充分发挥。由此可知, 基于灵活热电比的 RIES 调度模型实则是经济性与环保性相矛盾的优化问题, 需要采用多目标优化以求解令各个子目标均满意的 CHP 最佳热电比(即各时段补燃装置最佳补燃率  $K$ )。

### 2.1 经济最优调度

经济调度是在保证能量供需平衡前提下, 通过确定各时段补燃装置最优补燃率  $K$  以使系统运行成本最小, 具体包括燃料成本(外购天然气、柴油发电机消耗柴油与补燃装置消耗的补燃燃油)、运维成本、电能交互成本以及弃风惩罚成本。

$$\min F_{\text{OC}} = \sum_{t=1}^T (C_{\text{FU}}(t) + C_{\text{OM}}(t) + C_{\text{EX}}(t) + C_{\text{WD}}(t)) \quad (7)$$

式中:  $F_{\text{OC}}$  为系统运行成本;  $C_{\text{FU}}(t)$ 、 $C_{\text{OM}}(t)$  为  $t$  时段机组燃料成本及其运行维护成本;  $C_{\text{WD}}(t)$  为  $t$  时段系统弃风惩罚成本;  $C_{\text{EX}}(t)$  为  $t$  时段系统电能交互成本, 包括购电成本与售电收益两部分。

#### 2.1.1 燃料成本

燃料成本主要为天然气购买成本、柴油发电机油耗成本与补燃装置油耗成本, 其中补燃燃油采用工业废油以降低购能支出, 表示为

$$C_{\text{FU}}(t) = L_{\text{CHP}}(t)D_{\text{CH4}} + L_u(t)D_u + L_{\text{oil}}(t)D_{\text{oil}} \quad (8)$$

$$L_{\text{oil}}(t) = \alpha + \beta P_{\text{DE}}(t) + \gamma P_{\text{DE}}(t)^2 \quad (9)$$

式中:  $P_{\text{DE}}(t)$  为  $t$  时段柴油发电机发电功率;  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  为柴油发电机燃料系数;  $D_{\text{oil}}$  为柴油购买单价;

$D_{CH4}$  为天然气购买单价； $D_u$  为补燃燃油购买单价。

### 2.1.2 运维成本

运维成本主要考虑风机、光伏、燃气轮机以及柴油发电机在运行过程中的维护费用，表示为

$$C_{OM}(t) = P_w(t)K_w + P_v(t)K_v + P_{CHP}^e(t)K_{GT} + P_{DE}(t)K_{DE} \quad (10)$$

式中： $P_w(t)$ 、 $P_v(t)$  分别为  $t$  时段风机、光伏发电功率； $K_w$ 、 $K_v$ 、 $K_{GT}$ 、 $K_{DE}$  分别为风机、光伏、燃气轮机以及柴油发电机单位功率维护费用。

### 2.1.3 弃风惩罚成本

为了促进风电并网消纳，引入弃风惩罚机制，当系统内存在弃风时，需进行罚款处理，表示为

$$C_{WD}(t) = P_{WD}(t)D_{wd} \quad (11)$$

式中： $P_{WD}(t)$  为  $t$  时段系统弃风功率； $D_{wd}$  为单位弃风惩罚费用，取 0.05 元/kWh。

### 2.1.4 电能交互成本

当系统内电能富余时，可通过联络线向主网出售获利；当系统供电不足时，需向主网购电以满足用户用电需求。成本收益表示为

$$C_{EX}(t) = \begin{cases} P_{sell}(t)D_{sell}(t) & P_{EX}(t) < 0 \\ P_{buy}(t)D_{buy}(t) & P_{EX}(t) \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中： $P_{EX}(t)$  为  $t$  时段系统与主网联络线交互功率，正值表示系统向主网购电，为  $P_{buy}(t)$ ，负值表示售电，即  $P_{sell}(t)$ ； $D_{buy}(t)$ 、 $D_{sell}(t)$  分别为  $t$  时段系统与主网间购/售电电价。

## 2.2 环保最优调度

风机、光伏利用可再生能源供能，运行中无污染物排放，因此环境成本主要为燃气轮机发电、柴油发电机发电、补燃燃油补燃以及系统向主网购电附加的环境费用，污染物主要考虑  $SO_2$ 、 $NO_X$ 、 $CO_2$ 。对调度周期内各排污机组治污费用进行计算以对系统运行环保效益进行衡量，表示为

$$\min F_{EN} = \sum_{t=1}^T P_{CHP}^e(t)\beta_{CHP}^i \varepsilon_{CHP}^i + \sum_{t=1}^T P_{DE}(t)\beta_{DE}^i \varepsilon_{DE}^i + \sum_{t=1}^T L_u(t)\beta_u^i \varepsilon_u^i + \sum_{t=1}^T P_{buy}(t)\beta_{buy}^i \varepsilon_{buy}^i \quad (13)$$

式中： $F_{EN}$  为系统环境成本； $\beta_{CHP}^i$ 、 $\beta_{DE}^i$ 、 $\beta_u^i$ 、 $\beta_{buy}^i$  分别为 CHP、柴油发电机、补燃燃油以及购电电能的第  $i$  种污染物单位治污费用； $\varepsilon_{CHP}^i$ 、 $\varepsilon_{DE}^i$ 、 $\varepsilon_u^i$ 、 $\varepsilon_{buy}^i$  为其对应的污染物排放强度。

## 2.3 基于 AHP 决策体系的 RIES 多目标调度

单一目标函数仅能反映 CHP 在经济与环保层面上独立的热电比调节情况，不能对综合因素下补

燃装置运行工况进行有效描述。采用线性加权的方法将二者目标函数进行叠加以将多目标问题转化为单目标问题，通过求解各时段 CHP 最佳热电比以制定系统调度计划。

$$\min F_C = \lambda_1 F_{OC} + \lambda_2 F_{EN} \quad (14)$$

式中， $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  分别为系统运行成本  $F_{OC}$ 、系统环境成本  $F_{EN}$  对应权重，且  $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ 。

层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)是一种解决多目标复杂问题的定性与定量相结合，以对决策权重进行计算的研究方法，其流程如图 4 所示。

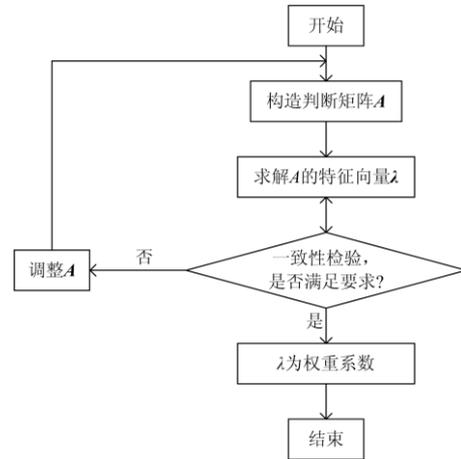


图 4 AHP 求解权重流程

Fig. 4 Weight solution process of AHP

具体步骤如下。

1) 构造判断矩阵  $A$ 。矩阵  $A$  中各元素反映了目标函数间相对重要程度，采用 Thomas 提出的 1-9 标度法进行衡量，具体如表 1 所示。矩阵  $A$  具有以下特征： $a_{ij} > 0$ ； $a_{ii} = 1$ ； $a_{ji} = 1/a_{ij}$ ； $a_{ij} = a_{ik} / a_{jk}$  ( $i, j, k = 1, 2, \dots, n$ )。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (15)$$

表 1 1-9 标度法

Table 1 Scale method of 1-9

标度	说明
1	两个元素对某个属性具有同样重要性
3	两个元素比较，前者较后者稍微重要
5	两个元素比较，前者较后者明显重要
7	两个元素比较，前者较后者强烈重要
9	两个元素比较，前者较后者极端重要
2,4,6,8	表示上述判断的中间情况

2) 对矩阵  $\mathbf{A}$  的特征向量  $\lambda$  进行求解。常用方法包括求和法、迭代法、方根法与特征根法。本文采用求和法进行计算, 分以下两步。

将  $\mathbf{A}$  中每一列元素归一化处理:

$$\bar{a}_{ij} = a_{ij} / \sum_{k=1}^n a_{ki} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (16)$$

对归一化后的  $\bar{\mathbf{A}}$  按行求和:

$$\bar{\lambda}_i = \sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (17)$$

3) 将向量  $\bar{\lambda} = [\bar{\lambda}_1, \bar{\lambda}_2, \bar{\lambda}_3, \dots, \bar{\lambda}_n]^T$  归一化处理, 所得  $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n]$  即为各指标对应权重:

$$\lambda_i = \bar{\lambda}_i / \sum_{i=1}^n \bar{\lambda}_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (18)$$

4) 一致性校验及修正

计算  $\mathbf{A}$  最大特征根  $\lambda_{\max}$ :

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(A\lambda)_i}{n\lambda_i} \quad (19)$$

当  $\lambda_{\max} = n$  时,  $\mathbf{A}$  具有完全一致性, 其余特征根之和为 0, 此时特征向量  $\lambda$  即为符合权重; 当  $\lambda_{\max} > n$  时,  $\mathbf{A}$  不具有完全一致性, 其余特征根之和为  $n - \lambda_{\max}$ , 引入判断矩阵一致性指标  $CI$  (Consistency Index) 进行分析:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (20)$$

若  $CI$  值越大, 表明判断矩阵  $\mathbf{A}$  偏离一致性的程度越大; 若  $CI$  值越小, 则判断矩阵  $\mathbf{A}$  越接近完全一致性。引入平均随机一致性指标  $RI$  (Random Index), 对于不同阶数判断矩阵, 可查表获得对应  $RI$ 。此时可计算一致性比例  $CR$  如式(21)。

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (21)$$

通常情况下, 当  $CR < 0.10$ , 即可认为判断矩阵具有一致性, 此时特征向量  $\lambda$  即为符合权重, 否则对判断矩阵重新调整。

## 2.4 约束条件

### 2.4.1 能量平衡约束

集电器、集热器各时段能量供需分配应保持动态平衡, 表示为

$$P_w(t) + P_v(t) + P_{\text{CHP}}^e(t) + P_{\text{DE}}(t) + P_{\text{buy}}(t) = P_{\text{sell}}(t) + P_e(t) + P_{\text{loss}}(t) \quad (22)$$

$$P_{\text{CHP}}^h = P_h(t) \quad (23)$$

式中:  $P_e(t)$ 、 $P_h(t)$  为  $t$  时段系统电负荷、热负荷;  $P_{\text{loss}}(t)$  为  $t$  时段系统有功损耗。

### 2.4.2 机组运行约束

为保证机组可靠安全运行, 需要考虑 CHP、柴油发电机可控出力约束与爬坡约束, 表示为

$$P_{\text{CHP}, \min}^e \leq P_{\text{CHP}}^e(t) \leq P_{\text{CHP}, \max}^e \quad (24)$$

$$P_{\text{CHP}, \min}^h \leq P_{\text{CHP}}^h(t) \leq P_{\text{CHP}, \max}^h \quad (25)$$

$$P_{\text{DE}}^{\min} \leq P_{\text{DE}}(t) \leq P_{\text{DE}}^{\max} \quad (26)$$

$$-\beta_{\text{GT}}^{\text{down}} \leq P_{\text{GT}}(t) - P_{\text{GT}}(t-1) \leq \beta_{\text{GT}}^{\text{up}} \quad (27)$$

式中:  $P_{\text{CHP}, \max}^e$ 、 $P_{\text{CHP}, \min}^e$  分别为 CHP 最大、最小供电功率;  $P_{\text{CHP}, \max}^h$ 、 $P_{\text{CHP}, \min}^h$  分别为 CHP 最大、最小供热功率;  $P_{\text{DE}}^{\max}$ 、 $P_{\text{DE}}^{\min}$  分别为柴油发电机最大、最小供电功率;  $\beta_{\text{GT}}^{\text{up}}$ 、 $\beta_{\text{GT}}^{\text{down}}$  为燃气轮机爬坡功率上下限。

### 2.4.3 联络线交互功率约束

受联络线传输容量限制, 区域综合能源系统与主网间各时段交互功率应在限值之内, 表示为

$$P_{\text{EX}}^{\min} \leq P_{\text{EX}}(t) \leq P_{\text{EX}}^{\max} \quad (28)$$

式中,  $P_{\text{EX}}^{\max}$ 、 $P_{\text{EX}}^{\min}$  为联络线传输容量上限、下限。

### 2.4.4 补燃率约束

内补燃装置适用于补燃量较少的余热锅炉, 在调节 CHP 热电比  $\lambda_{\text{CHP}}$  时需对补燃装置补燃率进行约束

$$0 \leq K(t) \leq K^{\max} \quad (29)$$

式中,  $K^{\max}$  为内补燃装置允许最大补燃率。

### 2.4.5 综合能效约束

节能性是综合能源系统主要特点之一。优化前后系统综合能源利用效率应满足一定指标, 表示为

$$\frac{\sum_{t=1}^T (P_e(t) + P_h(t) + P_{\text{sell}}(t))}{\sum_{t=1}^T \left( \frac{P_{\text{buy}}(t)}{\phi_p \phi_g} + L_{\text{CHP}}(t) H_{\text{GAS}} + L_u(t) H_u + P_w(t) + P_v(t) \right)} \geq \varepsilon \quad (30)$$

式中:  $\alpha$  为系统能效最低利用水平;  $\phi_p$ 、 $\phi_g$  分别为发电厂平均发电效率、线路输电传输效率。

### 2.4.6 网络约束

网络约束主要考虑电力线路直流潮流约束, 天然气管道流量及节点压强约束, 表示为

$$-P_{ij}^{\max} \leq B_{ij}(\theta_i(t) - \theta_j(t)) \leq P_{ij}^{\max} \quad (31)$$

$$Q_{pq}^{\text{gas}}(t) = \text{sgn}(P_p^{\text{gas}}, P_q^{\text{gas}}) K_{pq} \sqrt{|P_p^{\text{gas}}(t)^2 - P_q^{\text{gas}}(t)^2|} \quad (32)$$

$$P_k^{\min} \leq P_k^{\text{gas}}(t) \leq P_k^{\max} \quad (33)$$

式中:  $B_{ij}$  为节点  $i$  与节点  $j$  之间电纳;  $\theta_i(t)$ 、 $\theta_j(t)$

为  $t$  时段节点  $i$  与节点  $j$  电压相角;  $P_{ij}^{\max}$  为线路  $i, j$  间输电功率上限;  $Q_{pq}^{\text{gas}}(t)$  为  $t$  时段节点  $p, q$  间天然气流量;  $P_p^{\text{gas}}、P_q^{\text{gas}}$  为  $t$  时段节点  $p、q$  气压;  $K_{pq}$  为综合参数;  $\text{sgn}(P_p^{\text{gas}}, P_q^{\text{gas}})$  表示  $t$  时段节点  $p、q$  之间天然气流向;  $P_k^{\max}、P_k^{\min}$  为节点  $k$  压强上限、下限。

### 2.5 仿真工具

上述模型中包含大量非线性约束, 为混合整数非线性规划问题。现有优化软件中 GAMS 能够应用内置的广义简约梯度(General Reduced Gradient, GRG)算法进行快速求解<sup>[22-23]</sup>, 因此本文在 GAMS 中实现仿真。

## 3 算例分析

### 3.1 算例数据

算例系统由 IEEE33 节点配电系统<sup>[24]</sup>与 11 节点低压配气系统<sup>[25]</sup>耦合而成, 结构如图 5 所示。风、光、负荷预测数据以及主要机组参数、电价信息参考文献[14], 网络参数参考文献[26], 污染物单位治理费用以及各机组污染物排放强度参考文献[27]。其他参数如下: 柴油发电机最大功率  $P_{\text{DE}}^{\max}$  为 100 kW; 天然气购买单价  $D_{\text{CH}_4} = 2.54$  元/ $\text{m}^3$ , 补燃燃油购买单价  $D_u = 3.80$  元/kg, 柴油购买单价  $D_{\text{oil}} = 5$  元/L; 补燃装置最大补燃率  $K^{\max} = 0.5\%$ , 系统最低能效利用水平  $\alpha = 80\%$ , 发电厂平均供电效率  $\phi_p = 0.35$ , 线路输电效率  $\phi_g = 0.9$ 。

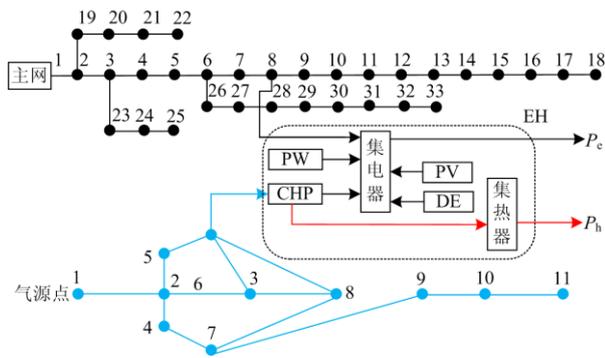


图 5 算例系统结构图

Fig. 5 Structure diagram of the example system

加装补燃装置前后, CHP 分别以固定热电比与灵活热电比方式运行。对 2 种区域综合能源系统运行场景分别进行仿真, 以验证本文调度方法优势。具体场景分类如表 2 所示。

表 2 场景分类

场景	CHP	DE	PW+PV	补燃装置
场景 1	✓	✓	✓	✗
场景 2	✓	✓	✓	✓

### 3.2 经济最优调度结果分析

仅考虑经济调度时, 系统运行结果如图 6 所示。无补燃装置 CHP 以恒定热电比方式运行, 燃气轮机调节能力受限程度较高, 在 1—9 时段 CHP 发电功率维持较高出力水平, 由于此时段内联络线传输功率达到上限, 系统需要弃风限电以保障居民供暖需求, 因而该场景下弃风情况较为严重; 加装补燃装置后 CHP 热电比可灵活调节, 在 1—6 时段、23—24 时段电价低谷时段, 系统售电电价低于 CHP 单位发电成本, 此时通过补燃装置进行补燃以降低燃气轮机热电耦合发电功率, 该时段内补燃装置采用最大补燃率对 CHP 热电比进行调节; 在 7—16 时段电价平时段, CHP 单位发电成本高于系统售电电价、低于购电价格, 燃气轮机尽量维持较高出力, 补燃装置仅在 7—9 时段弃风时段进行补燃; 在 17—22 时段电价高峰时段, 电网购/售电电价均高于燃气轮机单位发电成本, 燃气轮机尽量满发, 补燃装置不参与调节。

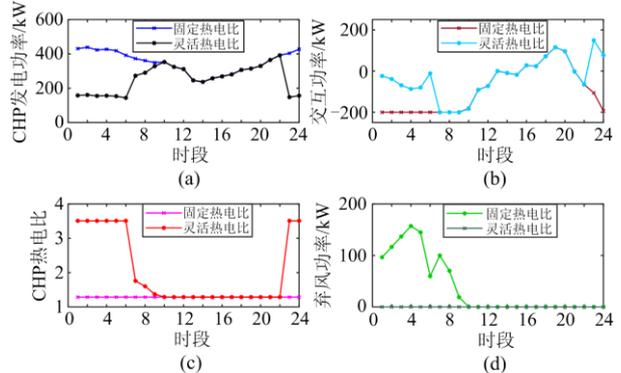


图 6 经济最优调度系统运行结果

Fig. 6 Operation results of the economic optimal dispatch

调度周期内柴油发电机单位发电成本较高, 仅在电价高峰时段系统供电不足时启动供电, 与购电功率共同满足用电负荷需求。

表 3 为经济最优调度各场景系统成本。对比可知, 灵活热电比模式下燃气轮机调节能力得到大幅提高, 有效改善了系统风电接纳水平与运行经济性, 调度周期内场景 2 系统运行成本较场景 1 降低了 16.55%, 从而验证了本文优化方法经济优势。需要指出, 由于补燃燃油在燃烧过程中污染排放较高, 调度周期内场景 2 环境成本较场景 1 增加了 57.41%。

表 3 经济最优调度系统成本

参数	场景 1	场景 2
运行成本/(元/天)	7 057.92	5 889.63
环境成本/(元/天)	1 098.98	1 729.98

3.3 环保最优调度结果分析

图 7 为环保最优调度系统运行结果。由于补燃燃油排污成本较高, 调度周期内 CHP 并未参与补燃运行, 因此场景 1 与场景 2 环保调度结果一致。与经济调度方式相比, 由于柴油发电机污染排放高于燃气轮机、购电功率, 因而调度周期内柴油发电机组停机, 在 17—22 时段电价高峰时段系统供电缺额全部由系统向主网购电补足。

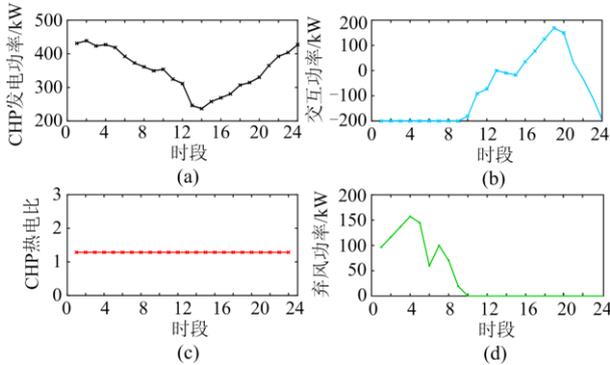


图 7 环保最优调度系统运行结果

Fig. 7 Operation results of the environmental optimal dispatch

表 4 为环保最优调度系统成本。与经济调度场景 1 相比, 该方式下电价高峰污染排放较高的柴油发电机组停机, 系统环境成本有所减少, 但其购电功率对外增加, 因而调度周期内系统运行成本也有所增加。

表 4 环保最优调度系统成本

参数	运行成本/(元/天)	环境成本/(元/天)
场景 1/2	7 197.92	840.75

3.4 基于 CHP 灵活热电比的多目标优化结果分析

单目标优化结果已经验证了 CHP 灵活热电比的经济优势, 但环境成本大幅增加并不符合我国能源系统清洁低碳发展方向, 因此需要开展多目标优化调度以决策综合经济性与环保性的 CHP 最佳热电比。在多目标优化过程中, 采用 AHP 方法对经济、环保权重进行求取。综合专家评估构造如下判断矩阵  $A$ , 由此求得经济性权重  $\lambda_1 = 0.25$ , 环保性权重  $\lambda_2 = 0.75$ 。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 \\ 3 & 1 \end{bmatrix}$$

图 8 为场景 2 多目标优化调度结果。在 1—6、23—24 时段电价低谷时段, CHP 通过补燃装置补燃以提高其热电比, 降低燃气轮机热电耦合发电功率以增加风电上网空间, 同时, 由于补燃燃油排污较高, 补燃装置并未按最大补燃率运行, 因此该时段内 CHP 热电比低于经济调度方式; 在 7—16 时段电价平时段, 由于 7—9 时段存在弃风, 此时补燃装置可进行适量补燃以降低 CHP 发电功率, 促进风电清洁能源并网消纳, 其余时段受电网电价引导, 补燃装置停止运行; 在 17—22 时段电价高峰, 系统购/售电电价均高于 CHP 单位发电成本, 燃气轮机尽量满发, 补燃装置不运行。

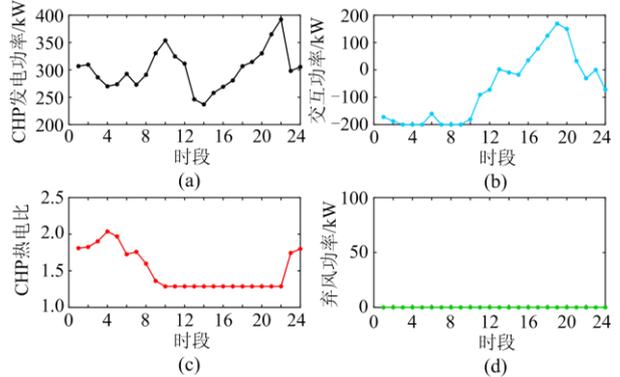


图 8 灵活热电比多目标优化结果

Fig. 8 Optimization results of multi-objective

表 5 为灵活热电比运行方式下多目标与单目标系统成本对比。分析可知, 多目标优化方式调度周期内风电得到了全额消纳, 系统运行成本较经济最优调度成本提高了 8.16%, 但环境成本较其降低了 46.44%; 与环境最优调度相比, 多目标优化系统环境成本提高了 10.20%, 但运行成本较其降低了 11.50%。由此可知, 多目标优化能够使 CHP 热电比兼顾系统运行经济性与环境效益, 较单目标而言更具优势。

表 5 灵活热电比方式多目标优化系统成本

参数	单目标优化		多目标优化
	经济最优	环境最优	
运行成本/(元/天)	5 889.63	7 197.92	6 370.28
环境成本/(元/天)	1 729.98	840.75	926.54
总成本/(元/天)	7 619.61	8 038.67	7 296.82

## 4 结论

针对 CHP “以热定电” 导致的弃风及系统运行成本较高问题, 提出加装补燃装置对 CHP 热电比进行灵活调节, 综合经济与环保因素建立区域综合能源系统多目标优化模型并采用 GAMS 进行求解。算例研究得到以下结论:

1) 加装补燃装置后 CHP 热电比能够进行调节, 灵活调控各时段补燃率能够有效提高系统风电接纳水平、降低系统运行成本;

2) CHP 以灵活热电比模式运行时, 在经济调度目标下将会使系统排污大幅增加, 而以环保调度为目标会使热电比调节受限;

3) AHP 能够对多目标权重进行决策, 该优化模式下 CHP 热电比兼顾系统运行经济性与环境效益, 较单目标而言更具优势。

## 参考文献

- [1] 曾鸣, 刘英新, 周鹏程, 等. 综合能源系统建模及效益评价体系综述与展望[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1697-1708.  
ZENG Ming, LIU Yingxin, ZHOU Pengcheng, et al. Review and prospects of integrated energy system modeling and benefit evaluation[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1697-1708.
- [2] 陈丽萍, 林晓明, 许苑, 等. 基于能源集线器的微能源网建模与多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 9-16.  
CHEN Liping, LIN Xiaoming, XU Yuan, et al. Modeling and multi-objective optimal dispatch of micro energy grid based on energy hub[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 9-16.
- [3] 桂雄威, 李琦芬, 杨涌文, 等. 能源集线器控制体模型及其生长型场景模拟分析[J]. 热力发电, 2020, 49(6): 90-96.  
GUI Xiongwei, LI Qifen, YANG Yongwen, et al. Energy hub control body modeling and its growth scene simulation analysis[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(6): 90-96.
- [4] 北极星电力网新闻中心. 热电联产与热电解耦的概念、意义及实施方式分析[EB/OL]. [2019-01-02]. <http://news.bjx.com.cn/html/20190102/953347.shtml>.
- [5] CHEN X, KANG C, O' MALLRY M, et al. Increasing the flexibility of combined heat and power for wind integration in China: modeling and implications[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4): 1848-1857.
- [6] 李佳佳, 胡林献. 基于二级热网电锅炉调峰的消纳弃风方案研究[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3286-3291.  
LI Jiajia, HU Linxian. Research on accommodation scheme of curtailed wind power based on peak-shaving electric boiler in secondary heat supply network[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3286-3291.
- [7] 孟冰冰, 胡林献, 白雪峰, 等. 具有电转气功能的多能源系统消纳弃风效果分析[J]. 热力发电, 2019, 48(6): 18-23.  
MENG Bingbing, HU Linxian, BAI Xuefeng, et al. Analysis on wind power accommodation effect of multi-energy system with P2G function[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(6): 18-23.
- [8] 谢华宝, 许丹, 胡林献, 等. 电锅炉配置方式对弃风消纳效果的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 126-133.  
XIE Huabao, XU Dan, HU Linxian, et al. Study on effect of electric boiler configuration method on wind power curtailment[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 126-133.
- [9] 郭丰慧, 胡林献, 周升彧. 基于二级热网储热式电锅炉调峰的弃风消纳调度模型[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(19): 50-56.  
GUO Fenghui, HU Linxian, ZHOU Shengyu. Dispatching model of wind power accommodation based on heat storage electric boiler for peak-load regulation in secondary heat supply network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19): 50-56.
- [10] 李建林, 谢志佳, 李雅欣, 等. 蓄热式电锅炉在能源互联网中的应用综述[J]. 热力发电, 2020, 49(8): 1-6.  
LI Jianlin, XIE Zhijia, LI Yaxin, et al. Overview of application of heat storage electric boiler in energy internet[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8): 1-6.
- [11] 卢志刚, 杨宇, 耿丽君, 等. 基于 Benders 分解法的电热综合能源系统低碳经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1922-1934, 2208.  
LU Zhigang, YANG Yu, GENG Lijun, et al. Low-carbon economic dispatch of the integrated electrical and heating systems based on benders decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1922-1934, 2208.
- [12] 张兴平, 张又中. 计及 P2G 和 CCS 的园区级电-热-气综合能源系统多目标优化[J]. 电力建设, 2020, 41(12): 90-99.  
ZHANG Xingping, ZHANG Youzhong. Multi-objective optimization model for park-level electricity-heat-gas integrated energy system considering P2G and CCS[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(12): 90-99.
- [13] 杜进桥, 徐诗鸿, 胡志豪, 等. 基于光伏出力区间预测的相变储能电-热联合调度策略[J]. 电力系统保护与控制

- 制, 2019, 47(21): 109-116.
- DU Jinqiao, XU Shihong, HU Zhihao, et al. Electric-thermal combined scheduling strategy by phase-change energy storage based on interval prediction of photovoltaic output[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(21): 109-116.
- [14] HAILONG L, ELIA C P, YUTING T, et al. Feasibility study about using a stand-alone wind power driven heat pump for space heating[J]. *Applied Energy*, 2018, 228: 1486-1498.
- [15] 魏震波, 黄宇涵, 高红均, 等. 含电转气和热电解耦热电联产机组的区域能源互联网联合经济调度[J]. *电网技术*, 2018, 42(11): 3512-3520.
- WEI Zhenbo, HUANG Yuhan, GAO Hongjun, et al. Joint economic scheduling of power-to-gas and thermoelectric decoupling CHP in regional energy internet[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(11): 3512-3520.
- [16] 刘方泽, 牟龙华, 张涛, 等. 微能源网多能源耦合枢纽的模型搭建与优化[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(14): 91-98.
- LIU Fangze, MOU Longhua, ZHANG Tao, et al. Modelling and optimization of multi-energy coupling hub for micro-energy network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(14): 91-98.
- [17] 李朋, 臧向东, 刘聿拯, 等. 分布式热电联产中热电比的确定[J]. *热电技术*, 2005, 18(4): 43-46.
- LI Peng, ZANG Xiangdong, LIU Yuzheng, et al. Rational determination to heat and power ratio for distributed CHP plant[J]. *Gas Turbine Technology*, 2005, 18(4): 43-46.
- [18] 施锦月, 许健, 曾博, 等. 基于热电比可调模式的区域综合能源系统双层优化运行[J]. *电网技术*, 2016, 40(10): 2959-2966.
- SHI Jinyue, XU Jian, ZENG Bo, et al. A bi-level optimal operation for energy hub based on regulating heat-to-electric ratio mode[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(10): 2959-2966.
- [19] 许健, 施锦月, 张建华, 等. 基于生物质热电混合供能的城镇综合能源双层优化[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(14): 23-31.
- XU Jian, SHI Jinyue, ZHANG Jianhua, et al. Bi-level optimization of urban integrated energy system based on biomass combined heat and power supply[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(14): 23-31.
- [20] LI Gengyin, LI Guodong, ZHOU Ming. Comprehensive evaluation model of wind power accommodation ability based on macroscopic and microscopic indicators[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2019, 4(3): 215-226. DOI: 10.1186/s41601-019-0132-6.
- [21] 李乐. 微网的经济运行研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- LI Le. Economic operation research of microgrid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [22] VAHID A, SHAHRAM J, MEHDI E. Probabilistic optimal power dispatch in multi-carrier networked microgrids under uncertainties[J]. *Energies*, 2017, 10(11): 1770-1779.
- [23] 魏传江. GAMS 用户指南[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [24] HE C, DAI C, WU L, et al. Robust network hardening strategy for enhancing resilience of integrated electricity and natural gas distribution systems against natural disasters[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(5): 5787-5798.
- [25] ABEYSEKERA M, WU J, JENKINS N, et al. Steady state analysis of gas networks with distributed injection of alternative gas[J]. *Applied Energy*, 2016, 164: 991-1002.
- [26] 马腾飞, 吴俊勇, 郝亮亮, 等. 基于能源集线器的微能源网能量流建模及优化运行分析[J]. *电网技术*, 2018, 42(1): 179-186.
- MA Tengfei, WU Junyong, HAO Liangliang, et al. Energy flow modeling and optimal operation analysis of micro energy grid based on energy hub[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(1): 179-186.
- [27] 肖浩, 裴玮, 孔力, 等. 综合能源微网运行优化调度方法研究[J]. *电工电能新技术*, 2016, 35(12): 1-11.
- XIAO Hao, PEI Wei, KONG Li, et al. Research on optimal operation method of integrated energy microgrid system[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2016, 35(12): 1-11.

收稿日期: 2020-12-16; 修回日期: 2021-03-03

作者简介:

王磊(1973—), 男, 高级工程师, 从事电网规划、运营管理方面的研究与实践工作; E-mail: wangleisgckkf@163.com

姜涛(1995—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为区域综合能源系统优化运行; E-mail: 857429745@qq.com

宋丹(1983—), 女, 工程师, 从事发电自动控制技术研究。E-mail: songdan33@crpower.com.cn

(编辑 葛艳娜)