

# 考虑焓效率的区域综合能源系统配置与调度双层优化

鲁玲<sup>1,2</sup>, 苑涛<sup>1</sup>, 王敏<sup>3</sup>, 李欣<sup>1,2</sup>, 李明良<sup>1</sup>, 蒲秋平<sup>1</sup>, 张鑫<sup>1</sup>

(1.三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2.三峡大学 智慧能源技术湖北省工程研究中心, 湖北宜昌 443002; 3.国网衢州供电公司, 浙江 衢州 324000)

**摘要:** 文章针对含高比例的可再生能源的区域综合能源系统, 综合考虑能量的数量和品质, 提出了一种计及焓效率的双层优化方法。首先, 建立了区域综合能源系统电、气、热、冷多能耦合的模型, 并对系统内涉及的能量和设备进行焓分析, 分别计算其能量品质系数和焓效率; 然后, 建立了兼顾系统容量规划和调度运行的双层协同优化模型, 其中上层以焓效率和经济性为优化目标进行容量配置, 下层以运行成本最低为目标优化机组出力, 从而得到最佳方案; 最后, 选取某区域综合能源系统进行算例分析。与其他方案相比, 文章所提双层优化方法可以为区域综合能源系统提供更好的配置和调度方案, 焓效率可以更好地反映能量真实利用水平, 实现高质量用能。

**关键词:** 区域综合能源系统; 双层优化; 焓效率; 容量规划; 调度运行

**中图分类号:** TK81; TK51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)10-1381-09

## 0 引言

为推进“碳达峰、碳中和”<sup>[1,2]</sup>工作, 需加快规划建设清洁低碳安全高效新型能源体系, 提高能效, 实施可再生能源替代行动, 构建能源互助互济的综合能源系统(Integrated Energy System, IES)。根据地理范围不同, IES可分为跨区级、区域级<sup>[3]</sup>和用户级。区域级综合能源系统<sup>[4]</sup>(Regional Integrated Energy System, RIES)涉及电、气、热、冷等多种能源的耦合, 统筹能源生产、转换、传输、储存和消费等多个环节。而且可以接入高比例的可再生能源, 相比传统的能源系统, 更加突显经济、低碳、高效用能等优势。

针对区域综合能源系统的优化目标, 文献[5]将最低运行成本和最小碳排放作为优化目标进行调度比对, 得到了兼顾经济性和低碳化的结果。文献[6]构建了 RIES 的经济和能效的多目标优化调度模型。提高综合能源利用率也是 RIES 建设的重要目标之一, 有助于节约能源, 促进可再生能源的消纳<sup>[7]</sup>。但是传统的综合能效分析是基于热力学第一定律为基础的能量计算, 只关注到能量传递、转换过程中数量的变化, 忽略了各种能量之

间品质的差异, 而热力学第二定律中焓分析<sup>[8-10]</sup>能够反映能量的数量和品质。目前对 RIES 进行焓效率分析的研究, 文献[11]介绍多能系统综合能效评价的研究现状, 分析其现有方法的局限性, 将热力学中焓的概念引入 RIES 综合能效分析之中。文献[12]构建了 IES 能量分析与焓分析的数学模型。文献[13]构建了 IES 能量利用效率和焓效率的评估模型。文献[14, 15]提出了一种将焓效率作为 RIES 能效评估指标的方法。但是以上文献仅仅只是提出了基于焓分析的 RIES 评价模型或方法, 没有将其实际应用到 RIES 的容量配置和调度优化问题上去。文献[16]定义了能量品质系数的概念, 提出了基于黑箱模型的总体焓效率计算方法。为了更好地分析能量损失原因, 文献[17]提出了 RIES 综合效率焓分析模型, 并对各个子系统进行焓效率分析。文献[18]以焓损最低作为优化目标, 设计了单一目标优化调度模型。文献[19]则综合考虑了 IES 在能效、经济、环境等多目标上的优化调度需求, 并且在能效的目标函数中引入了焓效率。但是上述文献大部分只针对 RIES 的调度优化, 没有综合考虑系统中设备容量配置的

收稿日期: 2023-10-05。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52107107); 国网湖北省电力公司管理科技项目(5215H0220002)。

作者简介: 鲁玲(1979-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为综合能源系统运行与规划、电力设备状态监测与智能决策。

E-mail: luling@ctgu.edu.cn

问题。文献[20]建立了以经济性和焓效率为目标的 IES 双层规划优化模型优化设备容量, 却没有考虑运行调度的优化问题。

针对上述问题, 本文以区域综合能源系统为研究对象, 兼顾能量的质和量, 综合考虑 RIES 的容量配置和调度运行。通过焓分析计算各类设备的焓效率以及各类能量的品质系数, 提出了一种计及焓效率的 RIES 的双层优化模型。综合考虑经济、环境、能效多个指标, 上层模型以焓效率和总成本作为目标函数, 下层模型以运行成本最低作为目标函数。分别采用带有精英策略的快速非支配排序的遗传算法(NSGA-II)和 yamlip+cplex 求解。最后通过算例验证了本文所提方案的有效性。

### 1 区域综合能源系统及焓分析

#### 1.1 区域级综合能源系统结构

区域综合能源可以实现多种异质能源子系统之间协调规划、互补互济, 从而提高 RIES 的灵活性和经济性, 提高综合能源利用效率。本文所研究的区域综合能源系统基本结构如图 1 所示。

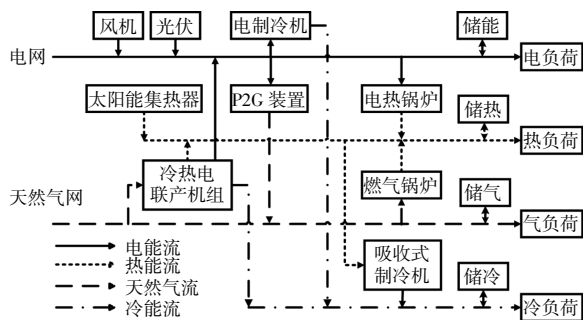


图 1 区域综合能源系统基本结构

Fig.1 Basic structure of regional integrated energy system

图中包含了风机(Wind Turbine, WT)、光伏(Photovoltaic, PV)、太阳能集热器(Solar Thermal Collector, STC)等设备, 利用高比例的可再生能源发电产热。同时考虑到可再生能源的间歇性和不确定性, 加入了储能设备来“削峰填谷”, 提高系统供能的可靠性, 以及电转气(Power To Gas, PtG)装置来提高系统对可再生能源的消纳能力。冷热电联产装置(Combined Cooling, Heating And Power, CCHP)可以通过利用燃气内燃机发电时的余热来制冷、供热, 实现能量的梯级利用, 提高系统的综合能源利用效率。此外, 加入了电热锅炉(Electric Boiler, EB)和燃气锅炉(Gas Boiler, GB)

供热, 吸收式制冷机(Adsorption Chiller, AC)和电制冷机(Electric Chiller, EC)供冷。

根据图 1 可得整个系统的能量耦合关系矩阵为

$$L=CP+P_s \quad (1)$$

式中:  $L$  为负荷矩阵;  $C$  为耦合系数矩阵;  $P$  为功率矩阵;  $P_s$  为储能矩阵。

其中:

$$P = \begin{bmatrix} P^{ele} \\ P^{gas} \\ P^{heat} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{WT}^{ele} + P_{PV}^{ele} + P_{buy}^{ele} \\ P_{buy}^{gas} \\ P_{STC}^{heat} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $P^{ele}, P^{gas}, P^{heat}$  分别为电能、天然气、热能的输入功率;  $P_{WT}^{ele}, P_{PV}^{ele}$  分别为风机、光伏的电功率;  $P_{buy}^{ele}, P_{buy}^{gas}$  分别为外部购电功率和购买天然气的量;  $P_{STC}^{heat}$  为太阳能集热器提供的热功率。

$$L = \begin{bmatrix} L^{ele} \\ L^{gas} \\ L^{heat} \\ L^{cool} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\alpha-\beta-\gamma & (\varepsilon\eta_{CCHP}^{ele})H^{gas} & 0 \\ \alpha\eta_{PtG}^{gas}/H^{gas} & 1-\varepsilon-\delta & 0 \\ \beta\eta_{EB}^{heat} & (\varepsilon\eta_{CCHP}^{heat} + \delta\eta_{GB}^{heat})H^{gas} & 1-\theta \\ \gamma\eta_{EC}^{cool} & \varepsilon\eta_{CCHP}^{cool}H^{gas} & \theta\eta_{AC}^{cool} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{st}^{ele} \\ P_{st}^{gas} \\ P_{st}^{heat} \\ P_{st}^{cool} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $L^{ele}, L^{gas}, L^{heat}, L^{cool}$  分别为电、气、冷、热负荷;  $\alpha, \beta, \gamma$  分别为分配给 PtG, EB, EC 的电能占总输入电能的占比;  $\eta_{PtG}^{gas}$  为 PtG 的转气效率;  $\eta_{EB}^{heat}, \eta_{GB}^{heat}$  分别为 EB, GB 的产热效率;  $\eta_{EC}^{cool}, \eta_{AC}^{cool}$  分别为 EC, AC 的制冷效率;  $\varepsilon, \delta$  分别为分配给 CCHP 和 GB 的天然气占总输入天然气的占比;  $\eta_{CCHP}^{ele}, \eta_{CCHP}^{heat}, \eta_{CCHP}^{cool}$  分别为 CCHP 设备电、热、冷的转换效率;  $\theta$  为分配给 AC 的热量占比;  $H^{gas}$  为天然气热值;  $P_{st}^{ele}, P_{st}^{gas}, P_{st}^{heat}, P_{st}^{cool}$  分别为电、气、热、冷储能设备的充放功率。

#### 1.2 焓分析

本文采用了能质系数法<sup>[16]</sup>为不同的能量赋予

相应能量品质系数,将不同品质的能量折算到同一能级上,可以有效反映能量利用情况和表征能效。本文 RIES 中待选能源生产设备的能量利用效率和焓效率如图 2 所示。

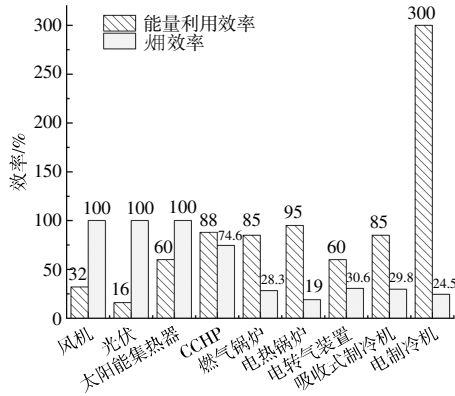


图 2 能源生产设备焓效率和能量利用效率

Fig.2 Exergy efficiency and energy utilization efficiency of energy production equipment

WT, PV, STC 能量利用效率都不高,但是其焓效率均为 100%,这是由于这些设备利用的是可再生能源所提供的能量,支付焓可以定义为 0。除此之外,消耗较低品质天然气提供高品质电能,并且可以利用余热供热和转化为冷能的 CCHP 设备焓效率(74.6%)是最高的。而电转气装置无论是从焓效率还是能量利用效率相较其他设备都不是较好的选择。供热设备 GB 和 EB 相比较而言,从能量利用效率角度来看,GB (85%) 低于 EB (95%);但是从焓效率角度来看,GB(28.3%)高于 EB(19%)。这是由于 GB 消耗的是能量品质较低的天然气,而 EB 消耗的是高品质的电能。供冷设备 AC 和 EC 亦是如此,从能量利用效率角度来看,AC(85%)远远低于 EC(300%);但是从焓效率角度来看,AC 消耗的是能量品质较低的热能(能量品质系数为 0.2),而 EC 消耗的是能量品质系数为 1 的高品质电能。转化为冷能的能量品质系数仅为 0.08 左右,所以电制冷机的焓效率较低。因此,结合式(5)和(10)可得到吸收式制冷机的焓效率(29.8%)略高于电制冷机(24.5%)。此外,EC 的制冷系数为 3.0,并不能代表能量的真实利用率。如果单独计算供冷子系统的能量利用效率,可能会得到效率高于 1 的情况<sup>[2]</sup>,所以基于热力学第一定律的能源利用效率计算方法存在不合理的地方。而本文通过焓分析,为不同种类的能量赋

予相应的能量品质系数,采用焓效率计算得到的 RIES 能效结果为 0~1,更加符合实际情况。

## 2 RIES 双层优化模型

本文提出 RIES 的双层模型兼顾设备容量规划和运行调度优化,综合考虑规划和调度两个方面,将其纳入统一框架,如图 3 所示。图中,上、下两层模型通过数据的传递实现迭代优化,最终得到最优容量配置和最优运行调度方案。

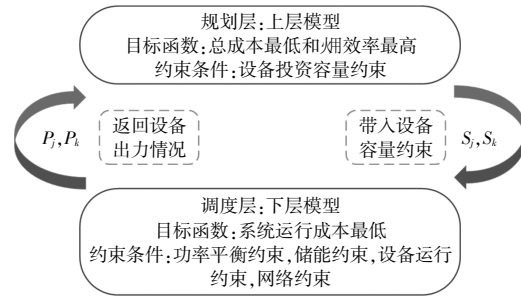


图 3 RIES 双层优化模型

Fig.3 RIES two-layer optimization model

### 2.1 RIES 上层模型

上层即规划层,优化目标综合考虑 RIES 整体的经济性、能效以及环境指标。将 RIES 的总成本和焓效率作为目标函数,决策变量为能源生产设备以及储能设备的容量。

#### ①系统经济性

RIES 总成本  $C_{total}$  包括折算后的初始投资成本  $C_{in}$  和运行成本  $C_{run}$ ,其目标函数的数学模型如下:

$$C_{total} = C_{in} + C_{run} \quad (4)$$

$$C_{in} = \frac{1}{D} \left( \sum_j C_{in,j} S_j + \sum_k C_{in,k} S_k \right) \frac{r(r+1)^N}{(r+1)^N - 1} \quad (5)$$

式中:  $C_{in,j}, S_j, C_{in,k}, S_k$  分别为第  $j$  种能源生产设备和第  $k$  种储能设备的单位容量配置成本和容量;  $r$  为贴现率;  $N$  为规划年限;  $D$  为天数。

#### ②系统焓效率

根据前文定义,RIES 的总体焓效率为

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_{out}}{Ex_{in}} = \frac{\sum_{i \in \Omega_{out}} E_{i,out} \lambda_i}{\sum_{i \in \Omega_{in}} E_{i,in} \lambda_i}$$

$$Ex_{out} = \sum_{t=1}^T \left( L_t^{ele} \lambda_{ele} + L_t^{gas} \lambda_{gas} + L_t^{heat} \lambda_{heat} + L_t^{cool} \lambda_{cool} \right) \quad (6)$$

$$Ex_{in} = \sum_{t=1}^T \left( P_{buy,t}^{ele} \lambda_{ele} + P_{buy,t}^{gas} \lambda_{gas} + P_{re,t} \lambda_{re} \right)$$

式中:  $E_{i,out}, E_{i,in}$  分别指输出和输入的第  $i$  种形式的能量;  $\Omega_{in}, \Omega_{out}$  分别为输入和输出能量形式的集合;  $\lambda_i$  为第  $i$  种形式的能量的能质系数;  $\lambda_{re}$  为可再生能源的能质系数。

### 2.2 RIES 下层模型

下层为运行层,以运行成本作为目标函数,包括维护成本  $C_{op}$ 、能耗成本  $C_{ec}$ 。此外考虑到环境指标,降低碳排放,充分利用可再生能源,在运行成本中引入了碳排放成本  $C_{ce}$ 。决策变量为各设备机组的出力情况以及储能设备的充放功率,其数学模型为

$$C_{run} = C_{op} + C_{ec} + C_{ce} \quad (7)$$

$$\begin{cases} C_{op} = \sum_{t=1}^T \left[ \sum_j C_{op,j} P_{j,t} + \sum_k C_{op,k} P_{k,t} \right] \\ C_{ec} = \sum_{t=1}^T \left[ P_{buy,t}^{ele} C_{buy,t}^{ele} + P_{buy,t}^{gas} C_{buy,t}^{gas} \right] \\ C_{ce} = \sum_{t=1}^T \left[ P_{buy,t}^{ele} \mu_{ele} + P_{buy,t}^{gas} \mu_{gas} \right] C_{c,tax} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $C_{op,j}, P_{j,t}$  分别为第  $j$  种能源生产设备的单位运维成本和功率;  $C_{op,k}, P_{k,t}$  分别为第  $k$  种储能设备的单位运维成本和功率;  $P_{buy,t}^{ele}, P_{buy,t}^{gas}$  分别为购电和购气量;  $C_{buy,t}^{ele}, C_{buy,t}^{gas}$  分别为购电和购买天然气单位价格;  $\mu_{ele}, \mu_{gas}$  分别为电和天然气的碳排放因子;  $C_{c,tax}$  为碳税价格。

综上所述,上层的目标函数为 RIES 总成本最低和最大焓效率,下层的目标函数为运行成本最低。

$$\begin{cases} F_{1.1} = \min C_{total} \\ F_{1.2} = \max \eta_{ex} \end{cases} \quad (9)$$

$$F_2 = \min C_{run} \quad (10)$$

上层目标函数和的求解需要变量  $P_j, P_k$ , 而这些变量为下层的决策变量。同时,上层模型的决策变量  $S_j, S_k$  又作为下层的决策变量  $P_j, P_k$  出力的上限约束。因此上层模型需首先生成  $S_j, S_k$  带入下层求解,得到  $P_j, P_k$  后返回上层求得目标函数和,并生成新的  $S_j, S_k$  进行再次迭代优化。

### 2.3 约束条件

上层模型主要考虑各类设备投资容量的约束,下层模型则需要考虑能量平衡生产储能设备

以及电网和天然气网的网络传输约束。

$$\begin{cases} S_{j,min} \leq S_j \leq S_{j,max} \\ S_{k,min} \leq S_k \leq S_{k,max} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $S_{j,max}, S_{k,max}, S_{j,min}, S_{k,min}$  分别为第  $j$  种能源生产设备和第  $k$  种储能设备容量配置的上、下限值。

#### ① 能量供需平衡约束

主要考虑式(3)整个系统各种能量之间的耦合关系,其中功率平衡约束主要为电、气、热、冷 4 种能量的功率供需平衡:

$$\begin{cases} P_{WT,t}^{ele} + P_{PV,t}^{ele} + P_{buy,t}^{ele} + P_{CCHP,t}^{ele} + P_{dis,t}^{ele} = L_t^{ele} + P_{cha,t}^{ele} + P_{PtG,t}^{ele} + P_{EB,t}^{ele} + P_{EC,t}^{ele} \\ P_{PtG,t}^{gas} + P_{buy,t}^{gas} + P_{dis,t}^{gas} = L_t^{gas} + P_{cha,t}^{gas} + P_{GB,t}^{gas} + P_{CCHP,t}^{gas} \\ P_{STC,t}^{heat} + P_{CCHP,t}^{heat} + P_{EB,t}^{heat} + P_{GB,t}^{heat} + P_{dis,t}^{heat} = L_t^{heat} + P_{cha,t}^{heat} + P_{AC,t}^{heat} \\ P_{CCHP,t}^{cool} + P_{AC,t}^{cool} + P_{EC,t}^{cool} + P_{dis,t}^{cool} = L_t^{cool} + P_{cha,t}^{cool} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $P_{CCHP,t}^{gas}, P_{CCHP,t}^{ele}, P_{CCHP,t}^{heat}, P_{CCHP,t}^{cool}$  分别为 CCHP 设备消耗的天然气、提供的电功率、热功率和冷功率;  $P_{PtG,t}^{ele}, P_{EB,t}^{ele}, P_{EC,t}^{ele}$  分别为 PtG, EB 和 EC 消耗的电功率;  $P_{PtG,t}^{gas}$  为 PtG 提供的天然气;  $P_{GB,t}^{gas}$  为 GB 消耗的天然气;  $P_{EB,t}^{heat}, P_{GB,t}^{heat}$  分别为 EB, GB 提供的热功率;  $P_{AC,t}^{heat}$  为 AC 消耗的热功率;  $P_{AC,t}^{cool}, P_{EC,t}^{cool}$  分别为 AC, EC 提供的冷功率。

#### ② 机组出力、爬坡约束

$$\begin{cases} P_{j,min} \leq P_{j,t} \leq P_{j,max} \\ P_{j,down} \leq P_{j,t-1} - P_{j,t} \leq P_{j,up} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $P_{j,max}, P_{j,min}$  分别为机组运行功率的上、下限;  $P_{j,up}, P_{j,down}$  分别为机组爬坡能力的上、下界。

#### ③ 可再生能源约束

$$\begin{cases} P_{WT,min} \leq P_{WT,t} \leq P_{WT,max} \\ P_{PV,min} \leq P_{PV,t} \leq P_{PV,max} \\ P_{STC,min} \leq P_{STC,t} \leq P_{STC,max} \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $P_{WT,t}, P_{PV,t}, P_{STC,t}$  分别为 WT, PV, STC 的功率;  $P_{WT,min}, P_{WT,max}, P_{PV,min}, P_{PV,max}, P_{STC,min}, P_{STC,max}$  分别为 WT, PV, STC 功率的下、上限。

#### ④ 储能设备约束

$$\begin{cases} S_{k,t+1} = S_{k,t} + [P_{cha,t}^k \eta_{cha}^k - P_{dis,t}^k / \eta_{dis}^k] \Delta t \\ 0 \leq P_{cha,t}^k \leq P_{cha,max}^k \\ 0 \leq P_{dis,t}^k \leq P_{dis,max}^k \\ S_{st}^k(0) = S_{st}^k(24) \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $P_{cha,t}^k, P_{dis,t}^k$  分别为第  $k$  种储能设备充、放能的功率;  $P_{cha,max}^k, P_{dis,max}^k$  分别为充、放能的功率的上限;  $\eta_{cha}^k, \eta_{dis}^k$  分别为充、放能的效率;  $\Delta t$  为调度的时间步长。

为保证储能设备充放电不能同时进行, 设置  $\rho_{cha}^k, \rho_{dis}^k \in \{0, 1\}$ ;  $\rho_{cha}^k, \rho_{dis}^k$  分别为第  $k$  种储能设备的充放电状态, 即:

$$\begin{cases} 0 \leq \rho_{cha}^k + \rho_{dis}^k \leq 1 \\ 0 \leq P_{cha,t}^k \leq \rho_{cha}^k P_{cha,max}^k \\ 0 \leq P_{dis,t}^k \leq \rho_{dis}^k P_{dis,max}^k \end{cases} \quad (16)$$

⑤网络约束

$$\begin{cases} P_{buy,min}^{ele} \leq P_{buy,t}^{ele} \leq P_{buy,max}^{ele} \\ P_{buy,min}^{gas} \leq P_{buy,t}^{gas} \leq P_{buy,max}^{gas} \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $P_{buy,max}^{ele}, P_{buy,max}^{gas}, P_{buy,min}^{ele}, P_{buy,min}^{gas}$  分别为从电网和天然气网络购买能量的上、下限, 满足电力传输和天然气管网传输的约束。

3 模型求解方法及流程

3.1 求解方法

本文构建的 RIES 的双层规划模型, 上层规划模型兼顾经济性和烟效率, 采用了被广泛应用于多目标求解的 NSGA-II 算法, 可以得到关于 RIES 总成本和烟效率的 Pareto 前沿解集。然后采用主客观组合赋权的评价模型, 该模型融合层次分析法和熵权法, 避免了层次分析法产生的主观臆断以及熵权法导致的偏离实际, 最终从 Pareto 前沿解集中选取一组最优解。下层调度模型在 Matlab 中使用 Yalmip 工具箱建模仿真, 根据构建的目标函数和约束条件的数学模型, 调用求解器 cplex 求解。

3.2 求解流程

首先输入各类参数和约束条件带入双层优化模型, 上层模型在约束范围内随机生成设备容量

初始种群。然后将容量数据带入下层, 作为机组出力上限约束, 调用求解器, 得到运行调度数据。将数据再返回上层模型, 求解多目标函数。然后进行遗传操作, 对父代种群选择、变异和交叉, 并且进行精英选择策略生成新一代种群。重复上述过程, 直至满足终止条件, 输出最优容量配置和运行调度方案, 流程如图 4 所示。

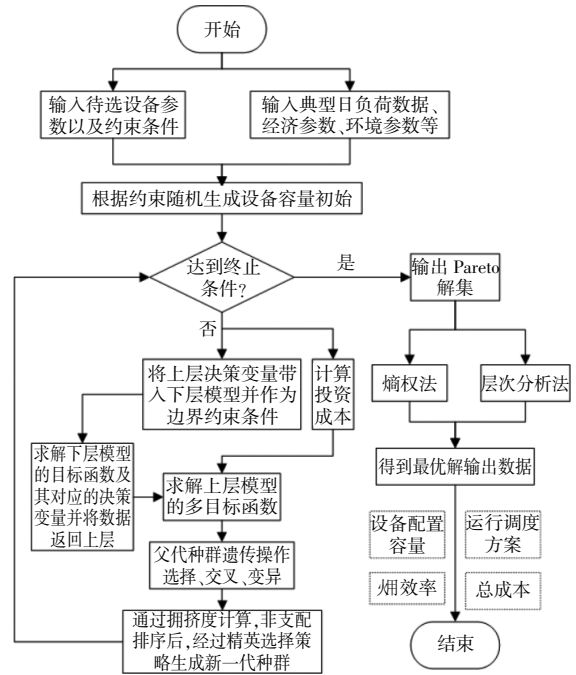
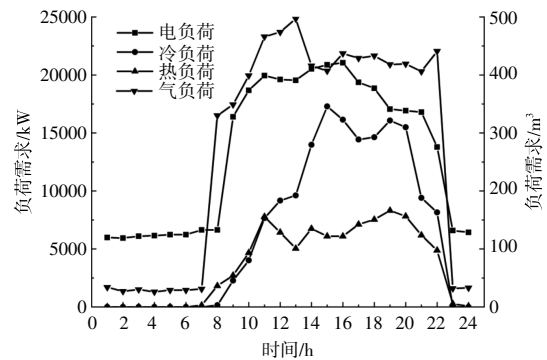


图 4 双层优化模型求解流程图

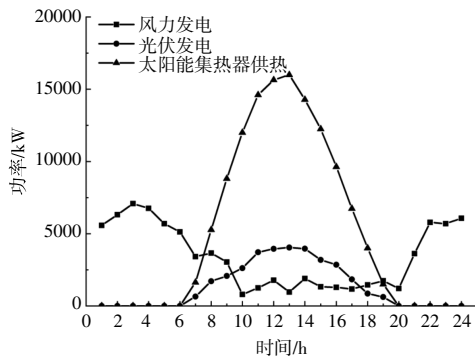
Fig.4 Two-layer optimization model solution flow chart

4 算例分析

本文考虑用户侧的电、气、热、冷等多种负荷需求, 设定规划年限  $N$  为 15 a, 折现率  $r$  为 5%。选取某区域综合能源系统作为算例, 其过渡季节典型日的负荷曲线和可再生能源出力情况如图 5 所示。价格参数如表 1 所示。



(a)典型日负荷曲线



(b) 可再生能源出力

图 5 负荷和可再生能源出力曲线

Fig.5 Load and renewable energy output curve

表 1 价格参数

Table 1 Price parameter

参数	价格	时段
电/元·(kW·h) <sup>-1</sup>	1.04	10:00-14:00
		19:00-22:00
	0.315	00:00-7:00
		23:00-24:00
	0.63	其他
天然气/元·m <sup>-3</sup>	2.37	00:00-24:00
碳税/元·(kgCO <sub>2</sub> ) <sup>-1</sup>	0.23	00:00-24:00

4.1 方案设置

为验证本文所提双层优化模型的有效性,设计了 4 种方案,如表 2 所示。

表 2 目标规划方案

Table 2 Goal planning scheme

方案	目标规划
方案 1	经济性单目标规划
方案 2	能源综合利用效率单目标规划
方案 3	焓效率单目标规划
方案 4	兼顾经济性和焓效率的多目标双层规划

方案 1,3 分别以总成本和焓效率作为单目标优化;方案 4 为本文所提方法;方案 2 则以传统意义上的能源综合利用效率作为优化目标。

目标函数为

$$\eta_{en} = \frac{E_{out}}{E_{in}} = \frac{\sum_{i \in \Omega_{out}} E_{i,out}}{\sum_{i \in \Omega_{in}} E_{i,in}} = \frac{\sum_{t=1}^T (L_t^{ele} + L_t^{gas} + L_t^{heat} + L_t^{cool})}{\sum_{t=1}^T (P_{buy,t}^{ele} + P_{buy,t}^{gas} + P_{WT,t}^{ele} + P_{PV,t}^{ele} + P_{STC,t}^{heat})} \quad (18)$$

4.2 优化结果分析

在过渡季节典型日场景下,方案 4 得到的 Pareto 最优解集如图 6 所示。然后基于主客观组合赋权模型,兼顾 RIES 的经济性和焓效率两个评价指标,得到一组最优解,其对应的 RIES 焓效率为 66.89%,总成本为 38.8 万元。

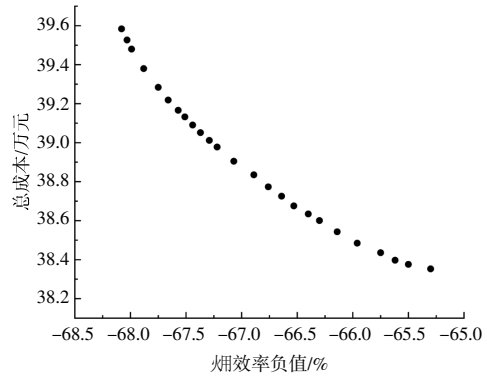


图 6 方案 4 Pareto 最优解集

Fig.6 Pareto optimal solutions of scheme 4

4.2.1 容量配置

RIES 4 种方案的容量配置结果如表 3 所示。

表 3 不同方案下设备容量配置对比

Table 3 Comparison of device capacity configurations in different schemes

设备	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
CCHP	0	8 184	26 933	15 512
GB	23 103	19	0	17 510
EB	26	690	288	466
PtG	1 868	147	166	470
AC	14 927	6 547	11 482	12 845
EC	128	15 988	15 423	1 115

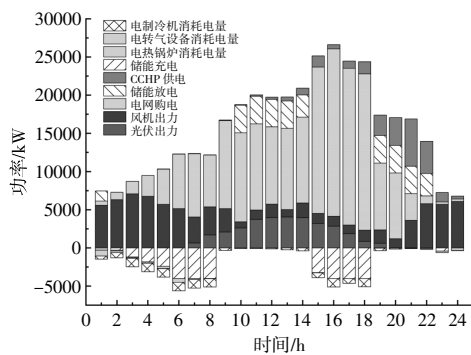
CCHP 设备由于焓效率和传统能源利用效率都较高,方案 2,3,4 中均有较大的容量配置,但是其投资和运维成本较高,导致经济性不佳,所以方案 1 中没有配置。方案 2,3,4 对 PtG 装置配置容量均不大,这说明该设备在能效方面不占优势,将电能转为天然气也不符合高质量用能的理念,但是可以起到可再生能源消纳的作用。此外,方案 1 中配置了较大容量的 GB,需要大量天然气来源,由于受到天然气管网的限制,所以配置了一定容量的 PtG 装置供给天然气,提高了系统的灵活性。

在供热方面,方案 1 中首选 GB,主要是由于其经济性优于 EB,对比方案 2 却选择了能源利用效率较高的 CCHP 和 EB。在供冷方面,方案 2 中配置的 EC 远多于 AC,根据前文可知是由于 EC

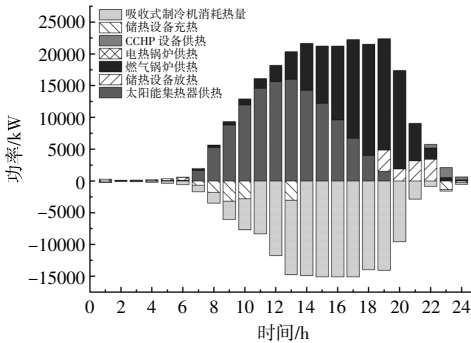
的制冷系数很高,但是其焓效率不高,不符合高质量用能的理念。方案3中配置了和方案2中容量相差不大的EC,是由于方案3配置了很大容量的CCHP设备,消耗了大量的天然气,受到天然气管网的限制,没有多余的天然气通过GB装置产热,导致AC没有多余热能来制冷,只能消耗电能来提供冷能。而综合考虑焓效率和经济性的方案4中,配置EC的容量较方案2和3明显有所减少。

4.2.2 运行调度分析

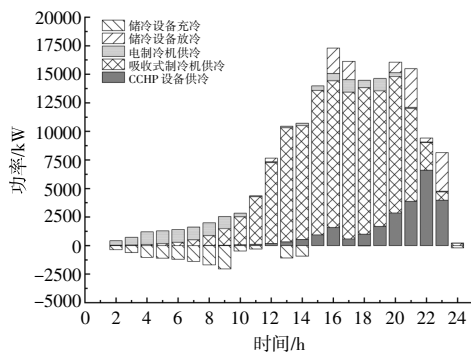
图7为方案4最优解对应的RIES运行调度结果。



(a) 电能调度



(b) 热能调度



(c) 冷能调度

图7 过渡季节典型日优化调度结果

Fig.7 Optimal scheduling results of typical days in transitional season

储能设备在电能调度中明显起到了很好的削峰填谷作用,在低电价位时进行储能,用电高峰,电价较高时放电,减小电网供电压力的同时,提升了RIES的经济效益。由于本文引入焓,可再生能源设备的焓效率均为100%,在一定程度上实现了可再生能源的优先使用。在凌晨用电低谷时间段,电负荷主要通过风机出力来供电,风机多余的电量也会通过PtG设备转化为天然气储存起来,有效减少了弃风现象,促进可再生能源的消纳。

在热能调度中,白天主要由太阳能集热器提供热能,夜晚则由GB提供,只有在凌晨电价较低时,较少使用EB。冷能调度中,绝大部分冷能由AC吸收热能提供,电价较低的时间段由少量的EC提供。此外CCHP设备在电能和冷能的调度中也发挥了较大的作用,没有明显的提供热量是由于该RIES中热负荷需求较小,STC已经可以满足大部分热负荷需求。

4.2.3 经济性和效率分析

RIES 4种方案的优化结果如表4,5所示。

表4 不同方案下经济性对比

Table 4 Economic comparison under different schemes

成本/元	方案1	方案2	方案3	方案4
运维成本	20 112	32 215	76 343	30 110
能耗成本	263 890	301 490	250 450	241 670
碳排放成本	11 108	14 415	9 437	10 325
运行成本	295 110	348 120	336 230	282 105
投资成本	63 650	34 420	111 100	106 245
总成本	358 760	382 540	447 330	388 350

表5 不同方案下能效对比

Table 5 Energy efficiency comparison under different schemes

参数	方案1	方案2	方案3	方案4
焓效率/%	63.59	60.42	69.59	66.89
能源利用效率/%	80.79	87.85	83.04	87.03

方案2以牺牲大量能源为代价,换取传统综合能源利用率的提升,但也导致了该方案碳排放的成本最高。而方案3的碳排放成本是最低的,说明将焓效率作为RIES评价指标,在优化焓效率的同时,会降低碳排放,有利于保护环境,符合对实现“双碳”目标的期望。但是由于配置较大容量的CCHP设备,运维成本和投资成本较高,导致方案3经济性较差。方案1中经济性最好,但是其焓效率和能源利用效率均不高,造成了能源浪费。方案2的能源利用效率最高,经济性也仅次于

方案 1, 是由于配置了较大容量的 EC 设备, 但是其焓效率是最低的, 不能反映能源的真实利用情况, 而且碳排放成本最高, 不利于保护环境。方案 3 的焓效率最高, 但是其成本远高于其他方案。以上三种方案均片面地追求单一目标, 造成了 RIES 的其他指标结果较差。而本文所提兼顾经济性和焓效率的多目标优化结果, 相较于方案 3 单一考虑焓效率时, 牺牲了 3.88% 的焓效率, 大幅降低了 13.18% 的总成本。焓效率比方案 1 提升了 4.17%, 比方案 2 提升了 10.7%, 同时碳排放成本也少于方案 1 和方案 2, 各项评价指标均处于较优的水平。

## 5 结论

本文在 RIES 的综合能效评估方法中引入了焓分析理论, 提出了一种计及焓效率的双层优化配置和调度的方法, 并通过算例分析的结果得到以下结论。

①相较于传统的综合能源利用效率, 焓效率能够更好地衡量 RIES 中能量的真实利用水平, 实现了可再生能源的充分利用和高质量用能。

②兼顾焓效率和经济性的双层优化方法上层所得到的 Pareto 设备容量解集, 采取主客观相结合的赋权评价模型选择最优解。很好地平衡了焓效率和经济性两个指标, 可以极大满足 RIES 的配置需求, 实现多目标利益均衡, 对 RIES 的规划更具指导性。

③考虑经济性并在目标函数中引入了碳排放成本、综合能效的多目标双层优化方法能够兼顾 RIES 的容量配置和运行调度, 进行协同优化, 可以为其提供更加完善的配置和调度方案。

## 参考文献:

- [1] 张淑婷, 陆海, 林小杰, 等. 考虑储能的工业园区综合能源系统日前优化调度[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 93-103.
- [2] 徐楠, 赵子豪, 张丹阳, 等. 双碳目标下考虑风光不确定性的综合能源系统规划研究[J]. 可再生能源, 2023, 41(2): 236-242.
- [3] 吕佳炜, 张沈习, 程浩忠, 等. 考虑互联互动的区域综合能源系统规划研究综述[J]. 国电机工程学报, 2021, 41(12): 4001-4021.
- [4] 程浩忠, 胡泉, 王莉, 等. 区域综合能源系统规划研究综述[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(7): 2-13.
- [5] 赵乃新, 顾文波, 美合日阿依·穆太力普. 考虑低碳经济运行的四联供综合能源系统优化调度[J]. 热力发电, 2023, 52(4): 54-62.
- [6] 王子驰, 雷炳银, 杨灵芝, 等. 考虑电热联合需求响应的区域综合能源系统多目标双层优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(7): 120-127.
- [7] 袁智勇, 赵懿祺, 郭祚刚, 等. 面向能源互联网的综合能源系统规划研究综述[J]. 南方电网技术, 2019, 13(7): 1-9.
- [8] 朱明善. 能量系统的焓分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- [9] GB/T 14909-2021, 能量系统焓分析技术导则[S].
- [10] 傅秦生. 能量系统的热力学分析方法[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2005.
- [11] 胡泉. 考虑能量品质的区域综合能源系统优[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- [12] 郭艳飞, 吴强. 基于焓效率的综合能源系统能效分析模型[J]. 可再生能源, 2017, 35(9): 1387-1394.
- [13] Su Huiling, Huang Qifeng, Wang Zhongdong. An energy efficiency index formation and analysis of integrated energy system based on exergy efficiency[J]. Frontiers in Energy Research, 2021(9): 1-12.
- [14] 田立亭, 程林. 基于加权有向图的园区综合能源系统多场景能效评价方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6471-6483.
- [15] 刘晓鸥, 葛少云. 区域综合能源系统的能效定义及其相关性分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(8): 8-18.
- [16] 胡泉, 尚策, 陈东文, 等. 考虑能量品质的区域综合能源系统多目标规划方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 22-31, 139.
- [17] 陈威成. 计及(焓)效率的区域综合能源系统综合评估方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- [18] 何帅, 刘念, 盛超群, 等. 多能源枢纽联合运行的焓损最小化分布式优化调度[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 28-37.
- [19] 陈聪, 沈欣炜, 夏天, 等. 计及有焓效率的综合能源系统多目标优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 60-67, 121.
- [20] Wang Y L, Huang F F, Tao S Y, et al. Multi-objective planning of regional integrated energy system aiming at exergy efficiency and economy [J]. Applied Energy, 2022, 306(5): 1-23.

## Two-layer optimization of regional integrated energy system configuration and dispatching considering exergy efficiency

Lu Ling<sup>1,2</sup>, Yuan Tao<sup>1</sup>, Wang Min<sup>3</sup>, Li Xin<sup>1,2</sup>, Li Mingliang<sup>1</sup>, Pu Qiuping<sup>1</sup>, Zhang Xin<sup>1</sup>

(1.College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2.Hubei Provincial Engineering Center for Intelligent Energy Technology, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3.State Grid Quzhou Power Supply Company, Quzhou 324000, China)

**Abstract:** For regional integrated energy system containing a high proportion of renewable energy, "quantity" and "quality" of energy are both discussed under "Exergy" concept and a two-layer optimization method considering exergy efficiency is proposed. Firstly, a model of multi-energy coupling of electricity, gas, heat and cold was established, and exergy analysis of energy and equipment is implemented. Then, a two-layer optimization model is established that considers system capacity planning and dispatching operation. The upper layer takes exergy efficiency and economy as the optimization goal for capacity allocation, while the lower layer takes the lowest operating cost as the optimization goal for unit output, therefore the best capacity allocation and operation scheduling scheme are obtained. Finally, a regional integrated energy system case is selected, and different schemes are analyzed for comparison. The result shows that the two-layer optimization method proposed in this paper can provide a better planning and scheduling scheme for the regional integrated energy system, while the exergy efficiency can characterize the actual level of energy utilization precisely and achieve high-quality energy use.

**Keywords:** regional integrated energy systems; two-layer optimization; exergy efficiency; capacity configuration; operation dispatching