

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241607

基于状态转移模型的综合能源系统日前优化调度方法

杨义^{1,2}, 高亦恒¹, 王灿^{1,2}, 杨楠^{1,2}, 马辉¹, 王自力³

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 3. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410000)

摘要: 综合能源系统(integrated energy system, IES)中多能源的相互转化与耦合使得其运行状态复杂多变, 亟需建立一个能够精准描述 IES 运行状态及状态转移逻辑的模型, 从而为 IES 优化调度提供精准的参考。而传统针对 IES 的建模方法多从输入-输出关系进行描述, 难以清晰描述 IES 在不同运行阶段的运行状态及不同状态间的转移过程。为此, 提出了一种基于混合自动机(hybrid automatic, HA)的 IES 状态转移建模方法。首先对 IES 的运行状态及其转移条件进行精细化描述, 并基于 HA 建立了 IES 的状态转移模型。其次, 以 IES 日运行成本最低为目标, 给出了确定 IES 初始状态转移路径的方法。最后通过对 IES 的状态转移模型进行成本分析, 提出了一种求解 IES 日前最优状态转移路径的方法。算例结果表明, 相比于传统建模方法, 所提方法不但能保证解的最优性, 而且具有较短的求解时间, 同时在面对新能源快速波动时能降低设备出力和联络线功率波动, 有利于设备的可靠控制及系统的稳定运行。

关键词: 综合能源系统; 混合自动机; 状态转移模型; 日运行成本; 状态转移路径

Day-ahead optimal scheduling method for integrated energy systems based on state transition model

YANG Yi^{1,2}, GAO Yiheng¹, WANG Can^{1,2}, YANG Nan^{1,2}, MA Hui¹, WANG Zili³

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded Hydropower Station (China Three Gorges University), Yichang 443002, China; 3. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410000, China)

Abstract: The interconversion and coupling of multiple energy sources in integrated energy systems (IES) lead to highly complex and variable operating states. Therefore, it is essential to establish a model capable of accurately describing the operating states and transition logic of IES, providing precise references for optimal scheduling. However, traditional IES modeling methods primarily focus on input-output relationships, which makes it difficult to clearly describe the operating states and state transition process in different stages. To address this issue, this paper proposes a state transition modeling method for IES based on hybrid automatic (HA). First, the operating states of the IES and their transition conditions are described in detail, and a state transition model of the IES is established based on HA. Second, a method to determine the initial state transition path of the IES is developed with the objective of minimizing the daily operation cost of the IES. Finally, a method to solve the day-ahead optimal state transition path of the IES is proposed through cost analysis of the state transition model. Numerical simulations show that compared with traditional modeling methods, the proposed method not only ensures the optimality of the solution but also significantly reduces computation time. Moreover, it mitigates fluctuations in equipment output and interconnection line power under rapid renewable energy variations, thereby enhancing equipment reliability and overall system stability.

This work is supported by the Youth Talent Program of Hubei Provincial Department of Education (No. Q20231208).

Key words: integrated energy system; hybrid automatic; state transition model; daily operation cost; state transition path

0 引言

综合能源系统(integrated energy system, IES)通过

基金项目: 湖北省教育厅青年人才计划项目资助(Q20231208);
国家自然科学基金项目资助(52107108)

智能化的方式将多种能源形式(如冷、热、电、气)进行整合, 通过合理的优化调度来实现不同能源间的相互转化和有机协调, 可以提升系统整体的能量利用效率, 降低环境污染, 是实现“双碳”目标的重要举措^[1-3]。同时 IES 中不同能源形式间的耦合以及大量可再生能源的接入, 使其优化调度面临新

的挑战^[4-6]。

目前针对 IES 的优化调度已有相关文献进行了研究,主要包括日前、日内和实时调度 3 个时间尺度。关于日前调度,文献[7]提出了一种考虑电-气和动态管网的综合能源系统日前最优调度,促进了可再生能源的消纳。文献[8]提出了一种考虑储能和可再生能源不确定性的综合能源系统日前调度策略,降低了系统运行成本。文献[9]提出了一种基于风电不确定性的考虑极端场景的日前经济调度方法,降低了由于风电预测误差给系统调度带来的不利影响。文献[10]在综合考虑 IES 运行成本、环境成本和实时电价的基础上,建立了一种基于全新子能源集线器结构的日前调度优化模型,可以实现电、热、冷能的优化调度运行。文献[11]从信息物理融合的视角提出了一种 IES 的日前优化调度框架,能描述 IES 中能量流和信息流的交互。以上文献都实现了单一时间尺度的优化,而 IES 中负荷的需求和可再生能源的出力具有不确定性,随着时间尺度的增加,风光等可再生能源和负荷功率的预测精度将降低,单一时间尺度的调度难以有效应对 IES 中存在的各种预测误差^[12]。因此需要在实际运行过程中,采用多时间尺度的调度对日前调度计划进行修正^[13]。

因此文献[14]提出了一种考虑预测误差的 IES 多时间尺度协调优化框架,有效降低了可再生能源和负荷预测误差给系统优化调度带来的影响。文献[15]考虑可再生能源不确定性,提出了一种基于模型预测控制的 IES 多时间尺度优化调度方法,能够提高系统运行经济性并准确跟踪可再生能源随机波动。文献[16]将电力市场开放条件下的经济因素、供电安全/质量方面的技术因素和用户偏好考虑在内,基于模型预测控制(model predictive control, MPC)建立了用户微电网日前和实时优化调度模型。文献[17]基于 MPC 提出了一种考虑需求响应和用户满意度的主动配电网多时间尺度调度方法,在保证用户利益的同时,通过对发电侧和需求侧进行日前和实时两种时间尺度的优化,有效地改善了配电网的运行状态。文献[18-19]针对智能微电网提出了一种基于分布式模型预测控制的能量管理策略,解决了多时间尺度框架和多层优化策略下的能量管理问题。

综上所述,现有在 IES 优化调度方面的研究已取得一些初步成果,但针对 IES 优化调度所建立的模型都是从输入输出关系进行描述的。而 IES 涉及多类型能源、多种设备和网络(如电网、气网、热网等)以及各种约束条件(如设备出力、能源供需平衡等)。这些因素使得 IES 的运行状态和调度决策具有

高度的复杂性和动态性,表现在系统运行状态复杂多变,且包含离散和连续的动态特征,这在现有的 IES 优化调度模型中考虑的比较少。而通过对系统运行状态进行精细化划分,可以更清晰地识别出各个设备的运行模式及其相互关系,通过系统的状态转移模型,可以动态地反映系统在不同阶段内的运行变化,提高优化调度决策的准确性和可靠性。但是传统的 IES 建模方法无法描述 IES 在不同运行阶段的状态和转移过程,因此亟需建立能够精准描述 IES 复杂多变的运行状态及状态转移逻辑的模型。

混合自动机(hybrid automatic, HA)因融合了离散状态与连续动态^[20],能够精准刻画系统中各类设备的启停、状态转移等离散事件,同时能描述电力、热能、天然气等连续变量的动态演变,因此为建立 IES 状态转移模型提供了思路。例如文献[21-23]建立了描述火电机组启停及运行阶段下的状态转移特性模型,并据此提出了考虑火电机组多阶段状态转移的电力系统调度模型。但相比于火电机组,IES 是一个涵盖电、热、冷、气等多个网络的综合能源网络,运行状态更加复杂,系统状态也远多于火电机组,需建立适用于分析 IES 优化调度的状态转移模型。文献[24]采用 HA 对园区 IES 的设备级和系统级运行状态进行描述,但是未给出 IES 在各阶段的状态转移过程。

本文主要聚焦于 IES 日前调度单一时间尺度的研究,从状态转移的全新视角出发,基于 HA 建立 IES 的状态转移模型,对 IES 在不同阶段的运行状态及转移过程进行精准描述。并将状态转移模型应用到 IES 日前优化调度中。算例结果表明,相比于其他建模方法,本文所提方法不但能保证解的最优性而且具有较低的求解时间,同时在面对新能源快速波动时能有效降低能源单元输出和联络线功率波动。

1 IES 的状态描述

1.1 IES 典型结构

图 1 表示一个典型的 IES 结构,主要由不同的能源单元以及连接这些能源单元的能源网络组成。

IES 通过对不同的能源单元进行合理的优化调度以实现经济运行。关于各能源单元的数学模型已有大量文献进行了介绍,本文不再赘述。

1.2 IES 状态描述

IES 的状态可以分为 IES 内能源单元的运行状态以及 IES 系统的运行状态。下面分别给出能源单元的运行状态和 IES 系统的运行状态描述,为后文建立 IES 的状态转移模型打下基础。

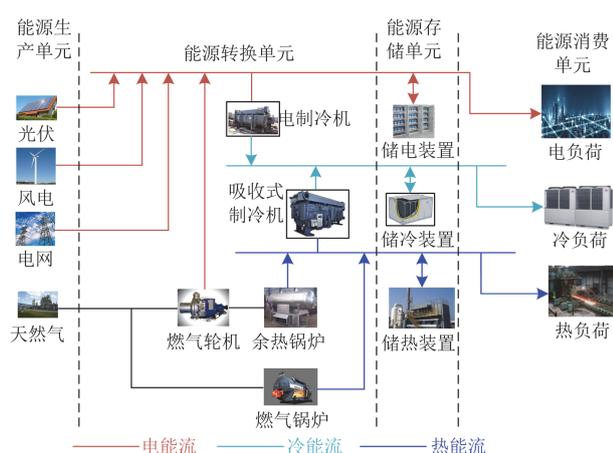


图1 IES的典型结构

Fig. 1 Typical architecture of IES

1.2.1 IES 能源单元的运行状态描述

1) 能源生产单元运行状态

光伏、风电、电网和天然气网可以看作 IES 的能源生产单元。由于光伏和风电受自然条件影响较大，其输出具有随机性和波动性，属于不可调度能源，因此本文不考虑其运行状态。对于电网，IES 可以从电网购电，也可以将多余的电能卖给电网，因此与电网交换的功率存在两种状态：购电状态和售电状态。对于天然气网，IES 只能向天然气网购入天然气，因此只存在购气一种状态。本文只考虑购电和购气这两种状态。

2) 能源转换单元运行状态

能源转换单元主要对不同类型的能源进行相互转化，具体包括燃气轮机(gas turbine, GT)、燃气锅炉(gas boiler, GB)、电制冷机(electric chiller, EC)以及吸收式制冷机(absorption chiller, AC)。本文将能源转换单元划分为启动、带载运行和停机 3 种状态。其中当能源转换单元带载运行时，根据能源转换单元的带载率情况可以将其划分为 4 种运行状态：轻载、中载、重载以及满载。能源转换单元在运行过程中根据系统实际要求在上述状态间进行转移。

3) 能源存储单元运行状态

能源存储单元实现不同形式能量的存储，包括电储能(battery storage, BS)、热储能(thermal storage, TS)以及冷储能(cold storage, CS)。能源存储单元在系统能量富余时进行充能，在能量不足时进行放能，以维持系统实时功率平衡。因此可以将能源存储单元划分为充能、放能以及待机 3 种运行状态。能源存储单元在运行过程中根据系统实际要求在上述状态间进行转移。

4) 能源消费单元运行状态

能源消费单元包括电、热和冷 3 类负荷。当负

荷增加导致系统无法满足时，可以切断部分可中断负荷，提高关键负荷的供电可靠性。因此，可以将能源消费单元划分为正常和减载两种运行状态。本文假设系统的容量能满足负荷在任意时刻的功率需求，因此本文能源消费单元都运行在正常状态下。

1.2.2 IES 的运行状态描述

参照电力系统运行状态，可以将 IES 划分为停机、启动、正常、优化调整、故障以及恢复 6 种运行状态。下面对各个状态进行描述。

1) 停机状态：IES 内的全部能源单元由于计划内维护、故障维修、负荷需求变化等原因而停止运行，此时整个 IES 处于停机状态。

2) 启动状态：IES 内的所有能源单元在接收到启动指令后，各能源单元从停机状态开始启动，按照预定的程序逐步投入运行。

3) 正常运行状态：IES 内各能源单元均处于正常工作状态，没有过载或故障。系统在设计参数范围内稳定运行，此时系统的运行成本和运行效率可能不是最优的，但能够满足用户的用能需求。

4) 优化调整状态：IES 在正常运行状态的基础上，根据能源单元运行状态和外部因素(如电价、气价波动、负荷需求变化)对运行策略进行优化调整，以降低成本或满足其他优化目标。

5) 故障状态：IES 内的某个或多个能源单元运行参数出现严重的越限，无法满足安全运行的约束条件，导致系统失去稳定而无法正常工作，此时系统进入到故障状态。

6) 恢复状态：IES 在经历故障状态后，通过一系列的恢复措施和策略，使系统逐步恢复到正常运行状态的过程。即使一部分单元在恢复阶段，另一部分单元由于响应速度慢，可能仍处于严重的越限，但经过一段时间后这部分处于严重越限的单元开始进入恢复阶段，此时系统也被认为处于恢复状态。

通常情况下，IES 需要运行在上述正常状态或优化调整状态下，以确保 IES 的安全稳定和经济运行。当 IES 处在其他状态下时，需要采取控制措施，通过协调内部单元来使 IES 恢复到正常状态或优化调整状态。

2 基于 HA 的 IES 状态转移模型

2.1 HA 的工作原理

HA 融合了离散状态和连续状态变量，通过离散状态的转移和连续动态状态变量的变化可以精准描述系统的混合复杂动态行为特性。HA 通常由当前状态、转移条件、转移逻辑以及目标状态组成。一个 HA 通常由有向图表示，图 2 表示 HA 的建模元素。

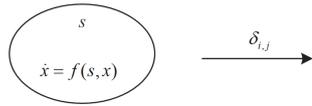


图2 HA 的建模元素

Fig. 2 Modeling elements of HA

图2中，圆圈中 s 表示 HA 的离散运行状态，离散状态的转移过程用图中的箭头描述，并在有向弧上标注有触发状态转移的条件 $\delta_{i,j}$ 。同时，在每个状态下，用微分方程或者代数方程来描述系统连续动态变化特性。

基于 HA 所建立的状态转移模型与马尔可夫决策过程很相似，二者都能描述系统的状态以及状态的转移过程，但二者又有不同的地方。马尔可夫决策过程主要应用于强化学习、动态规划及其他决策理论中。且当前状态只取决于当前状态及所采取的动作，而与过去状态无关。在每个状态下，决策者(或智能体)可以选择一个动作来影响状态转移，并因此获得不同的奖励。目标是找到一个策略，以最大化长期奖励的累积。而基于 HA 建立的状态转移模型主要应用于系统的建模与优化控制中。它主要结合系统离散状态和连续动态，以更全面地描述系统的混合动态行为特性。同时所建立的系统状态转移模型用于描述系统在运行过程中各阶段的状态转移过程，以提高系统优化调控的可观测性。总之，马尔可夫决策过程更侧重于在具有马尔可夫性质的环境中模拟智能体的决策与回报，而状态转移模型则更侧重于系统的建模与优化控制。

2.2 基于 HA 的 IES 状态转移模型

2.2.1 基于 HA 的能源单元状态转移模型

1) 能源转换单元状态转移模型

以燃气轮机为例，建立基于 HA 的燃气轮机状态转移模型，如图3所示。

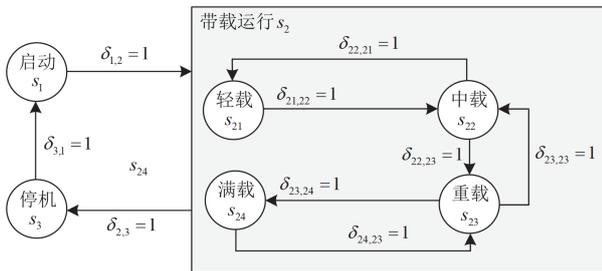


图3 基于 HA 的燃气轮机状态转移模型

Fig. 3 GT state transition model based on HA

图3中，处在带载运行状态下燃气轮机的连续动态特性可以用式(1)描述。

$$\begin{cases} P_{GT}(t) = F_{GT}(t) \cdot \eta_{gt} \cdot L_{NG} \\ Q_{GT}(t) = P_{GT}(t) \cdot (1 - \eta_{gt} - \eta_{loss}) / \eta_{gt} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $P_{GT}(t)$ 和 $Q_{GT}(t)$ 分别表示燃气轮机在 t 时刻输出的电、热功率； $F_{GT}(t)$ 表示燃气轮机在 t 时刻的进气量； L_{NG} 表示天然气低位热值； η_{gt} 和 η_{loss} 分别表示燃气轮机的转化效率和热损失率。

图3中，触发燃气轮机运行状态发生转移的条件 $\delta_{i,j}$ 如表1所示。

表1 燃气轮机的状态转移条件

Table 1 State transition conditions for GT

条件	描述	条件描述
$\delta_{3,1}$	从停机进入启动运行	接收到启动指令
$\delta_{1,2}$	从启动运行进入带载运行	$s_1 = 1 \ \&\& \ \lambda_{gt} = \lambda_{min}$
$\delta_{22,21}$	进入到轻载运行	$s_2 = 1 \ \&\& \ \lambda_{min} < \lambda_{gt} < \lambda_l$
$\delta_{23,22}$	进入到中载运行	$s_2 = 1 \ \&\& \ \lambda_l < \lambda_{gt} < \lambda_m$
$\delta_{22,23}$	进入到重载运行	$s_2 = 1 \ \&\& \ \lambda_m < \lambda_{gt} < \lambda_h$
$\delta_{23,24}$	进入到满载运行	$s_2 = 1 \ \&\& \ \lambda_{gt} = \lambda_h$
$\delta_{2,3}$	从带载运行进入停机运行	$s_2 = 1 \ \&\& \ \lambda_{gt} < \lambda_{min}$

表1中： λ_{gt} 表示燃气轮机的负载率； λ_{min} 表示燃气轮机进入带载运行时的最小负载率； λ_l 、 λ_m 以及 λ_h 分别表示燃气轮机进入中载运行、重载运行以及满载运行状态下的负载率阈值。当表1中逻辑判断表达式成立时， $\delta_{i,j}$ 取值为1，则触发燃气轮机发生状态转移，否则取值为0。

2) 能源存储单元状态转移模型

以电储能为例，建立基于 HA 的电储能状态转移模型，如图4所示。

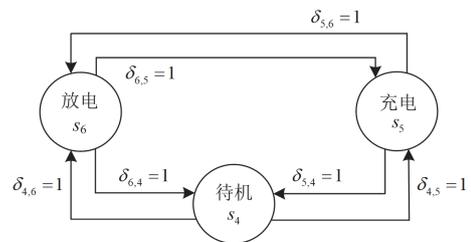


图4 基于 HA 的电储能状态转移模型

Fig. 4 BS state transition model based on HA

图4中，电储能处在不同运行状态下的连续动态特性可以用式(2)描述。

$$\begin{cases} S_{soc}(t+1) = S_{soc}(t) + \left[\eta_c P_c(t) - \frac{P_d(t)}{\eta_d} \right] \Delta t / S_{bs} \\ 0 \leq P_c(t) \leq v_c(t) P_{cmax} \\ 0 \leq P_d(t) \leq v_d(t) P_{dmax} \\ v_c(t) + v_d(t) \leq 1 \\ v_c(t), v_d(t) \in \{0, 1\} \\ S_{soc_min} \leq S_{soc}(t) \leq S_{soc_max} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $S_{\text{soc}}(t)$ 和 $S_{\text{soc}}(t+1)$ 分别表示电储能在 t 时刻和 $t+1$ 时刻的荷电状态; $S_{\text{soc_max}}$ 和 $S_{\text{soc_min}}$ 分别表示电储能荷电状态的上、下限值; $P_c(t)$ 和 $P_{c\text{max}}$ 分别表示电储能在 t 时刻的充电功率和最大充电功率; $P_d(t)$ 和 $P_{d\text{max}}$ 分别表示电储能在 t 时刻的放电功率和最大放电功率; Δt 表示时间尺度; η_c 和 η_d 分别表示电储能的充、放电效率; S_{bs} 表示电储能的额定容量; $v_c(t)$ 和 $v_d(t)$ 分别表示电储能的充电和放电状态, 为 0-1 变量。

图 4 中, 电储能运行状态发生转移的条件 $\delta_{i,j}$ 如表 2 所示。

表 2 电储能的状态转移条件

Table 2 State transition conditions for BS		
条件	描述	条件描述
$\delta_{5,6}$	从充电进入放电	$s_5 = 1 \ \&\& \ S_{\text{soc}}(t) \geq S_{\text{soc_max}} \ \&\& \ (\text{负荷增加、电价上升})$
$\delta_{6,5}$	从放电进入充电	$s_6 = 1 \ \&\& \ S_{\text{soc}}(t) \leq S_{\text{soc_max}} \ \&\& \ (\text{负荷减小、电价下降})$
$\delta_{5,4}$	从充电进入待机	$s_5 = 1 \ \&\& \ S_{\text{soc}}(t) \geq S_{\text{soc_max}} \ \parallel \ (\text{系统负荷不需要储能充电就能满足})$
$\delta_{4,5}$	从待机进入充电	$s_4 = 1 \ \&\& \ S_{\text{soc}}(t) \leq S_{\text{soc_max}} \ \&\& \ (\text{负荷减小、电价下降})$
$\delta_{6,4}$	从放电进入待机	$s_6 = 1 \ \&\& \ S_{\text{soc}}(t) \leq S_{\text{soc_min}} \ \parallel \ (\text{系统负荷降低到不需要储能放电就能满足})$
$\delta_{4,6}$	从待机进入放电	$s_4 = 1 \ \&\& \ S_{\text{soc}}(t) \geq S_{\text{soc_min}} \ \&\& \ (\text{负荷增加、电价上升})$

表 2 中逻辑符号“&&”和“||”分别表示“与”和“或”, 当表 2 中逻辑判断表达式成立时, $\delta_{i,j}$ 取值为 1, 则触发电储能发生状态转移, 否则取值为 0。

2.2.2 基于 HA 的 IES 状态转移模型

根据前文对 IES 运行状态的描述, 建立如图 5 所示的 IES 状态转移模型, 用于描述 IES 实际运行中在不同状态间的转移关系。

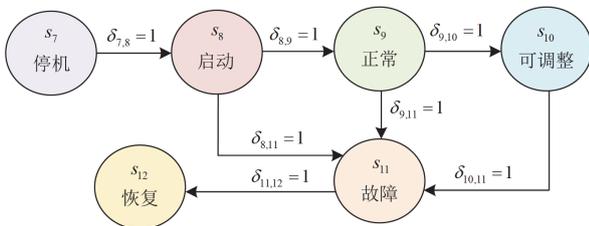


图 5 基于 HA 的 IES 状态转移模型

Fig. 5 State transition model of IES based on HA

图 5 中, 系统处在正常运行状态或可调整状态下的连续动态特性可以用式(3)描述。

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ \dot{x}(t) = [\dot{x}_e(t), \dot{x}_h(t), \dot{x}_c(t)]^T \end{cases} \quad (3)$$

式中: x 表示 IES 的状态变量; x_e 、 x_h 以及 x_c 分别表示与供电、供热和供冷单元相关的状态变量; u 表示 IES 的控制输入变量, 包括电制冷机、燃气轮机、燃气锅炉、吸收式制冷机等能源单元的输出功率; A 和 B 分别表示状态变量矩阵和控制输入矩阵。

图 5 中, 触发系统运行状态发生转移的条件 $\delta_{i,j}$ 如表 3 所示。

表 3 IES 的状态转移条件

Table 3 State transition conditions for IES

条件	描述	条件描述
$\delta_{7,8}$	从停机进入启动运行	接收到启动指令
$\delta_{8,9}$	从启动运行进入正常运行	$s_8 = 1 \ \&\& \ \lambda_1 = \lambda_{\text{min}}$
$\delta_{9,10}$	从正常运行进入可调整运行状态	$s_9 = 1 \ \&\& \ (\text{负荷需求变化、能源价格波动等})$
$\delta_{8,11}$	进入故障状态	多个能源单元发生故障导致系统无法正常工作
$\delta_{11,12}$	从故障状态进入恢复状态	下达恢复指令

通常情况下, IES 主要运行在图 5 中的正常运行状态或可调整状态, 本文将正常运行状态和优化调整状态统称为可调度状态, 本文也主要关注 IES 的可调度状态。在 IES 运行过程中的不同时间段, 系统内部能源单元的运行状态可能发生变化, 因此 IES 的可调度状态也存在多个运行状态。由于光伏、风电属于不可调度单元, 本文又假设能源消费单元都运行在正常运行状态, 且只考虑与电网和天然气网交互的购电状态和购气状态, 因此 IES 的可调度状态主要由能源存储单元和能源转换单元的运行状态决定。则经过能源存储单元和能源转换单元不同运行状态的组合共可得到 IES 的多种可调度运行状态, 如图 6 所示。

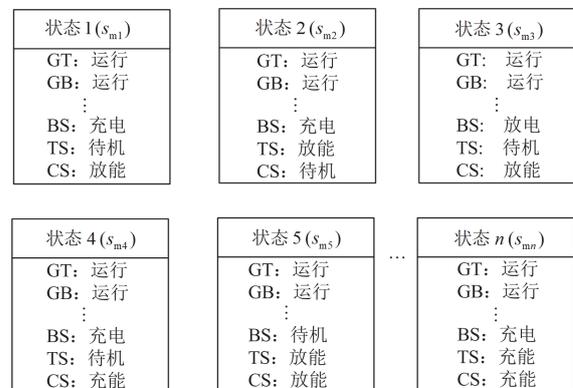


图 6 IES 的多种可调度状态

Fig. 6 Multiple dispatchable state of IES

图 6 中每一个框图都代表 IES 的一种可调度运行状态, IES 在运行中的不同阶段可以处在上述任何一个运行状态。例如 IES 为了实现某一优化目标, 假设以天为时间单位, 以小时为时间尺度, 则随着时间的推移, IES 会在图 6 中不同运行状态间进行转移, 共可形成多条状态转移路径, 如图 7 所示。

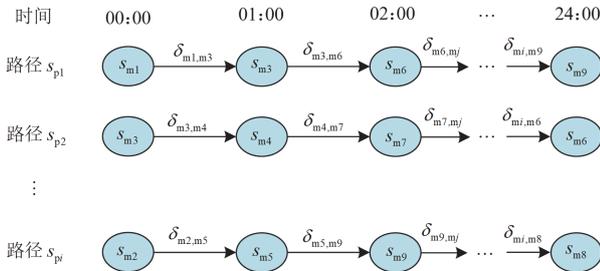


图 7 多条状态转移路径

Fig. 7 Multiple state transition paths

由图 7 所示的 IES 状态转移路径实现了对 IES 运行状态转移全过程的可观测, 即在 IES 运行状态转移的过程中, 系统内各能源单元的运行状态及其变化过程都能够清晰展示和被观测到, 这是传统的 IES 模型所不能实现的。基于图 7 所建立的状态转移模型, 可以设计和选择一条最优的状态转移路径, 所依据的性能指标可以是系统运行成本最小、能源效率最大化以及系统稳定性等。本文主要考虑系统运行成本最小化这个指标, 因此基于图 7 如何获得一条使得系统运行成本最小的最优状态转移路径将在下文进行详细介绍。

3 IES 最优状态转移路径的求解策略

3.1 IES 初始状态转移路径的确定策略

3.1.1 IES 运行状态的简化

从图 6 对 IES 运行状态的描述可知, 由于运行状态过多, 使得 IES 状态转移路径的设计变得困难, 而在实际运行过程中, IES 可能只会处于图 6 中某些运行状态, 即图 6 中多个运行状态在 IES 运行过程中不会出现。因此本文通过设置两个 0-1 变量 $v_d(t)$ 和 $v_q(t)$ 来简化图 6 中的运行状态, 将 IES 可调度运行状态简化为 4 种主要运行状态。

$v_d(t)$ 和 $v_q(t)$ 分别表示 IES 向电网购入电能和向天然气网购入天然气的倾向, 例如当 $v_d(t)$ 取值为 1 时, 表示此时系统倾向于从电网购入电能来满足负荷需求, 当 $v_d(t)$ 取值为 0 时, 表示此时系统不倾向于从电网购入电能。对于 $v_q(t)$ 的取值类似。则根据两个变量的不同取值, 可以将 IES 的运行状态简化为 4 种, 如表 4 所示。

表 4 IES 的 4 种运行状态

Table 4 Four operating states of the IES

条件	$v_d(t)$	$v_q(t)$
状态 1	0	0
状态 2	0	1
状态 3	1	0
状态 4	1	1

状态 1: IES 不倾向于从电网和天然气网购入电能和天然气, 由能源存储单元优先供给负荷, 不足部分再由电网和天然气网补充。

状态 2: IES 优先倾向于从天然气网购入天然气来满足负荷需求, 不足部分再由电网补充。

状态 3: IES 优先倾向于从电网购入电能来满足负荷需求, 不足部分再由天然气网补充。

状态 4: IES 同时从电网和天然气网购入电能和天然气来满足负荷需求。

3.1.2 IES 初始运行状态的确定规则

为得到以系统运行成本最小为目标时 IES 最优状态转移路径, 首先需要确定 IES 初始状态转移路径以及状态转移路径中每个运行状态下不同能源单元的运行状态。

1) IES 初始状态转移路径确定规则

IES 的外部输入能源主要来自于电网和天然气网。由于电价和天然气价格随时间变化, 因此从电网购入电能和从天然气网购入天然气的倾向也随时间波动且与价格呈负相关, 即当能源价格高时, 系统倾向于使用能源存储单元储存的能源来供给负荷, 而不希望从外部网络购入过多能源; 而当能源价格低时, 系统则倾向于从外部网络购买更多的能源, 在满足负荷需求的同时将多余的能源存储到能源存储单元中。

因此本文以电价和天然气价格平均值作为阈值, 通过将每个时段电价和天然气价格与阈值进行比较来确定当前时段系统购买电能和天然气的倾向, 即当电价和天然气价格高于阈值时, 不倾向于购买电能和天然气, 变量 $v_d(t)$ 和 $v_q(t)$ 取值为 0, 反之当电价和天然气价格低于阈值时, 倾向于购买电能和天然气, 变量 $v_d(t)$ 和 $v_q(t)$ 取值为 1。则基于上述规则, 可得到系统各时刻的运行状态, 即获得了系统的初始状态转移路径。

2) 能源单元运行状态确定规则

当获得了系统的初始状态转移路径后, 则需要确定初始状态转移路径中每个运行状态下各能源单元的具体运行状态, 下面给出确定规则。

① 能量生产单元运行状态确定规则

由于仅靠能源存储单元输出是无法满足负荷需求的, 即需要从电网和天然气网购入能源来满足负荷需求, 因此可以确定向电网购电和向天然气网购气的状态, 如式(4)所示。

$$\begin{cases} s_{\text{grid}} = 1 \\ s_{\text{gas}} = 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: s_{grid} 和 s_{gas} 分别表示购电状态和购气状态。 s_{grid} 和 s_{gas} 取值为 1 表示分别向电网购电和向天然气网购气, 取值为 0 则表示既不购电也不购气。

② 能量转换单元运行状态确定规则

由于系统需要从电网和天然气网购入能源来满足负荷需求, 因此燃气轮机和燃气锅炉始终处于运行状态, 即

$$\begin{cases} s_{\text{gt}} = 1 \\ s_{\text{gb}} = 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: s_{gt} 和 s_{gb} 分别表示燃气轮机和燃气锅炉的运行状态。 s_{gt} 和 s_{gb} 取值为 1 表示处于带载运行状态, 反之处于停机状态。

接下来需要确定电制冷机和吸收式制冷机的运行状态。由于制冷机主要供给冷负荷, 因此可以通过将冷负荷等效为电、热负荷来确定制冷机运行状态。具体来说, 当系统处于表 4 中状态 1 时, 各能源均不倾向于转换, 由于电能相对廉价且转换效率略高, 因此可将冷负荷等效为电负荷, 即此时通过电制冷机来满足冷负荷需求。状态 4 同理。当处于状态 2 时, 系统倾向于购气, 因此将冷负荷等效为热负荷, 即此时通过吸收式制冷机来满足冷负荷需求。当处于状态 3 时, 系统倾向于购电, 可将冷负荷等效为电负荷, 即此时通过电制冷机来满足冷负荷需求。则最终可确定电制冷机和吸收式制冷机的运行状态, 如式(6)所示。

$$\begin{cases} s_{\text{ac}} = 0, s_{\text{ec}} = 1, & v_{\text{d}} = v_{\text{q}} \\ s_{\text{ac}} = 1, s_{\text{ec}} = 0, & v_{\text{d}} = 0, v_{\text{q}} = 1 \\ s_{\text{ac}} = 0, s_{\text{ec}} = 1, & v_{\text{d}} = 1, v_{\text{q}} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: s_{ac} 和 s_{ec} 分别为吸收式制冷机和电制冷机运行状态, 取值为 1 表示运行, 取值为 0 表示停机。

③ 能源存储单元运行状态确定规则

对于电储能和热储能, 当系统分别有购电和购气倾向时, 电储能和热储能运行在充能状态。而当系统无购电和购气倾向时, 电储能和热储能则运行在放能状态。当能源存储单元储能为满或空时, 则停止充能或放能。对于冷储能, 由于冷负荷可以通过制冷机消耗电能和热能进行转化来满足, 因此对

冷储能的依赖程度低。当电价或气价只有一方低时, 可以通过购买大量电能或天然气来满足冷负荷需求, 此时冷储能处于待机状态。当电价和气价都高时, 冷储能运行在放冷状态, 降低冷负荷需求。当电价和气价都低时, 冷储能运行在充冷状态, 将低价能源进行存储, 以便在能源价格高的时段进行放能, 降低系统运行成本。因此规定当系统处于表 4 中状态 1 时冷储能放能, 当处于状态 4 时充能, 当处于状态 2 和状态 3 时待机。则最终可得到能源存储单元的运行状态确定规则, 如式(7)所示。

$$\begin{cases} s_{\text{bs}} = 2v_{\text{d}} - 1 \\ s_{\text{ts}} = 2v_{\text{q}} - 1 \\ s_{\text{cs}} = 2v_{\text{d}} - 1, & v_{\text{d}} = v_{\text{q}} \\ s_{\text{cs}} = 0, & v_{\text{d}} \neq v_{\text{q}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: s_{bs} 、 s_{ts} 、 s_{cs} 分别为电储能、热储能和冷储能的运行状态变量, 当取值为 1 时表示充能, 取值为 -1 时表示放能, 取值为 0 时表示待机。

3.1.3 能源单元出力计算

当确定了初始状态转移路径中每个运行状态下能源单元的运行状态后, 需要进一步确定每个能源单元的出力情况, 以计算出系统运行成本。

为降低计算的复杂度, 本文采用等效替换的思想, 即将冷负荷需求量转化为电负荷和热负荷功率的增加量, 将风电和光伏发电量转化为电负荷功率的减少量, 将能源存储单元的充能功率和放能功率分别转化为负荷功率的增加量和减少量。由此可将电、热和冷 3 类负荷规划问题转化为电和热两类负荷规划问题。

为了计算出系统运行成本, 首先需要给出系统的目标函数和约束条件。

1) 目标函数

本文目标函数为在满足所有负荷需求的情况下, 以 IES 日运行成本 F_c 最低为目标, 因此可建立目标函数如式(8)所示。

$$F_c = \min(f_{\text{buy}} + f_{\text{op}}) \quad (8)$$

式中: f_{buy} 、 f_{op} 分别表示系统的购能成本和能源单元的运行维护成本。

其中购能成本的表达式如式(9)所示。

$$f_{\text{buy}} = f_{\text{ele}} + f_{\text{gas}} = \sum_{t=1}^{24} [c_e(t) \cdot P_{\text{gb}}(t) + c_g(t) \cdot P_{\text{sb}}(t)] \cdot \Delta t \quad (9)$$

式中: f_{ele} 、 f_{gas} 分别表示购电成本和购气成本; $c_e(t)$ 、 $c_g(t)$ 分别表示 t 时刻的电价和天然气价; $P_{\text{gb}}(t)$ 、 $P_{\text{sb}}(t)$ 分别表示 t 时刻的购电功率和购气功率。

IES 中能源单元的运行维护成本与能源单元的输出功率近似成正比, 如式(10)所示。

$$f_{op} = \sum_{t=1}^{24} \left[\begin{matrix} c_{pv} P_{pv}(t) + c_{WT} P_{WT}(t) + c_{GT} P_{GT}(t) + \\ c_{bs} P_{bs}(t) + c_{GB} H_{GB}(t) + c_{is} H_{is}(t) + \\ c_{ac} C_{ac}(t) + c_{ec} C_{ec}(t) + c_{cs} C_{cs}(t) \end{matrix} \right] \cdot \Delta t \quad (10)$$

式中: $P_{pv}(t)$ 、 $P_{WT}(t)$ 、 $P_{GT}(t)$ 、 $P_{bs}(t)$ 、 $H_{GB}(t)$ 、 $H_{is}(t)$ 、 $C_{ac}(t)$ 、 $C_{ec}(t)$ 以及 $C_{cs}(t)$ 分别为光伏、风电、燃气轮机、电储能、燃气锅炉、热储能、吸收式制冷机、电制冷机以及冷储能的输出功率; c_{pv} 、 c_{WT} 、 c_{GT} 、 c_{bs} 、 c_{GB} 、 c_{is} 、 c_{ac} 、 c_{ec} 以及 c_{cs} 分别为相对应的能源单元运行维护费用系数。

2) 约束条件

系统约束条件主要包括能量平衡约束、能源单元出力约束、能源单元爬坡率约束、能源存储单元运行约束以及购电购气约束等。这些约束条件见文献[14], 本文不再赘述。

基于上述目标函数和约束条件, 则可以求解出初始状态转移路径中各系统状态下能源单元的出力情况, 进而可计算出系统的日运行成本。

3.2 基于遗传算法的 IES 最优状态转移路径求解

通过上述规则获得的初始状态转移路径不一定是最优的, 可能只是局部最优解。因此本节提出一种基于遗传算法的 IES 最优状态转移路径获取方法。该方法的主要思想是通过遗传算法优化路径来逼近全局最优解。首先通过编码初始化路径和变异得到初始种群, 接着计算种群适应度, 并通过交叉、变异、演替、循环一系列操作来优化路径。最终设计阈值和循环次数上限, 当优化达到阈值或循环次数限值后结束迭代, 所得到的结果则可视作最优解。整个算法的求解流程如图 8 所示。

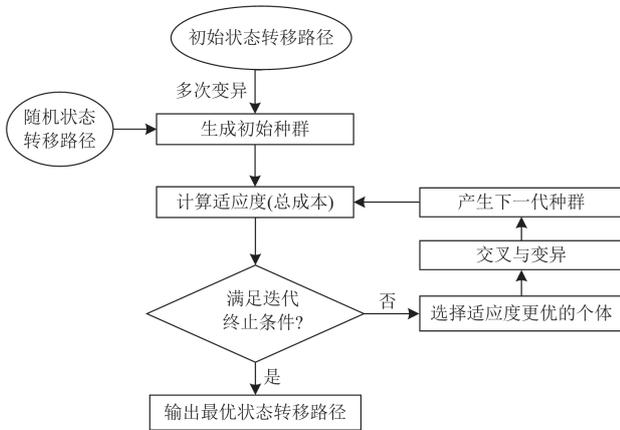


图 8 求解流程图

Fig. 8 Solution flow chart

1) 初始化种群获取

传统的遗传算法由于缺乏初始数据, 需要随机生成初始化种群。但通过前文分析可知, 本文已经获得了初始状态转移路径。因此, 本文首先通过对初始状态转移路径重复进行多次变异操作, 得到一系列以初始序列为母系的子路径, 并将其作为初始化种群。由于所得到的初始化状态转移路径已具备较优特性, 因此可大幅降低遗传算法在求解最优状态转移路径时的计算负担, 有效缓解了传统遗传算法资源消耗大、运算时间长的不足。

考虑到若全部个体均由初始状态转移路径变异得到, 则会大大降低交叉操作对子代产生的影响。因此本文随机生成 40% 的路径加入子系中, 提高初始种群的多样性。

2) 计算个体适应度

本文以运行成本为适应度, 以轮盘赌的方式进行选择并淘汰。由 3.1.3 节可计算出每个个体的运行成本, 经累加得到总成本后, 以总成本为基础计算各个体的淘汰概率(即轮盘赌中被选中淘汰的概率)。通过多轮轮盘赌的操作, 逐步淘汰部分个体, 实现个体数量的缩减。轮盘赌参数计算如式(11)所示。

$$\begin{cases} F = \sum_{i=1}^n f_i \\ P_i = \frac{f_i}{F} \end{cases} \quad (11)$$

式中: F 为所有个体的总成本之和; f_i 为第 i 个个体的总成本; P_i 表示个体被选中淘汰的概率。

3) 交叉与变异

交叉操作是遗传算法中最主要的遗传操作。通过交叉操作可以得到新代个体, 新个体组合了其父辈个体的特性。交叉是指从父代个体中随机选择部分基因片段进行交换, 生成子代个体的过程。变异是指以较小概率随机改变子代个体中某个或某些基因值的过程。具体来说从子代种群中按一定概率挑选需要变异的个体, 然后随机选择一个或多个基因位作为变异点, 最后采用二进制编码的方式修改基因值, 将值 0、1 互换即完成变异操作。

4) 部分精英个体的保留

保留部分最优秀的个体, 可以防止出现负优化的现象, 并减少无意义迭代对程序运行的影响。因此本文选择总群体前 10% 直接保留, 其余的个体进行交叉变异后保留。

5) 重复上述步骤直到满足迭代终止条件, 输出最优结果。

4 算例分析

4.1 基础数据

为验证本文所提建模方法的可行性, 利用图 1 所示的 IES 进行算例分析, 包含 IES 日前优化调度分析、与其他求解算法的对比以及与传统建模方法的对比 3 个方面。算例中采用的各能源单元参数见文献[14]。

此外 IES 采用分时电价向大电网购电, 同时假设天然气价格也采用分时电价, IES 分时电价如表 5 所示。

表 5 IES 分时电价

Table 5 Time-of-use price of the IES				
分类	时间段	购电价格/ (元/kWh)	时间段	购气价格/ (元/kWh)
峰段	08:00—12:00	1.12	11:00—13:00	1.21
	19:00—23:00		17:00—19:00	
平段	12:00—19:00	0.84	05:00—10:00	0.65
			14:00—16:00	
谷段	23:00—次日 08:00	0.35	24:00—次日 04:00	0.45

IES 中负荷、光伏以及风电的功率曲线如图 9 所示。

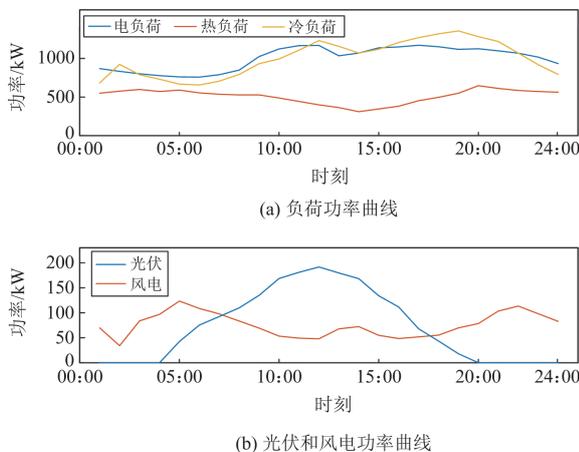


图 9 IES 中负荷和可再生能源功率曲线

Fig. 9 Load and renewable energy power curves in IES

4.2 算例分析

4.2.1 日前优化调度结果分析

为验证本文所提建模方法的可行性, 本节利用图 9 所示的数据进行算例分析, 所得到的日前优化调度结果如图 10 和图 11 所示。

图 10 和图 11 分别表示初始状态转移路径下的 IES 日前调度结果和能源存储单元在不同时段的运行状态。

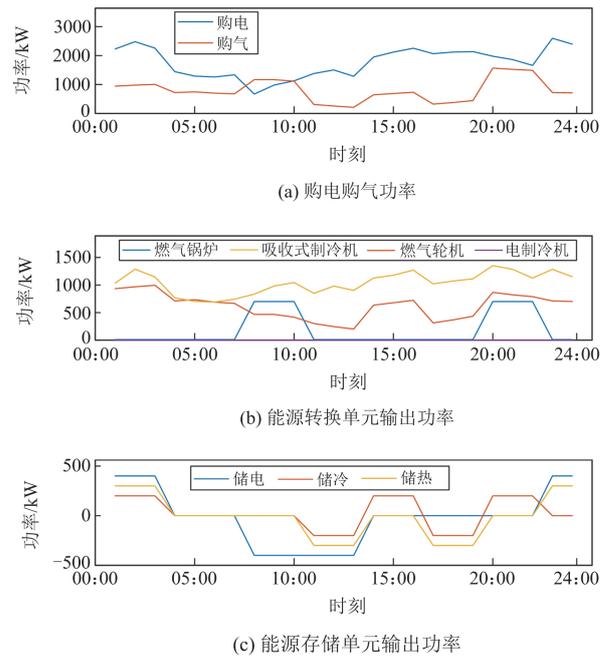


图 10 初始状态转移路径下的 IES 日前调度结果

Fig. 10 Day-ahead scheduling results of the IES

under initial state transition path

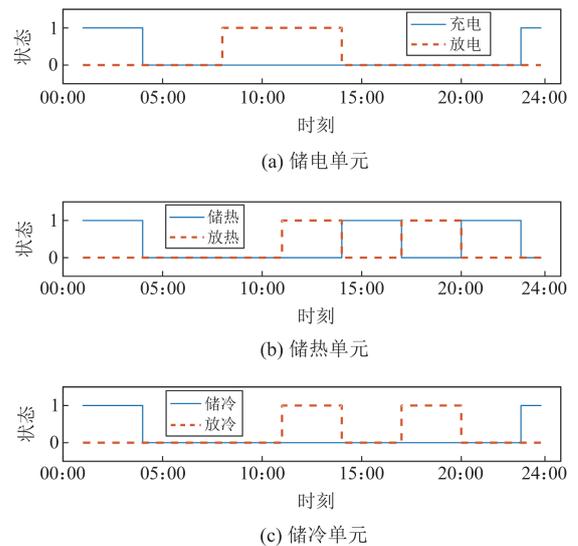


图 11 初始状态转移路径下的能源存储单元运行状态

Fig. 11 Energy storage unit operating states

under initial state transition path

图 12 和图 13 则分别表示采用本文所提遗传算法所获得的日前最优状态转移路径下的 IES 调度结果以及能源存储单元在不同时段的运行状态。

从图 12 可以看出, 在电价和气价相对较高的时段, IES 减少对电能和天然气的购买量; 而在电价和气价相对较低时, IES 则增加对电能和天然气

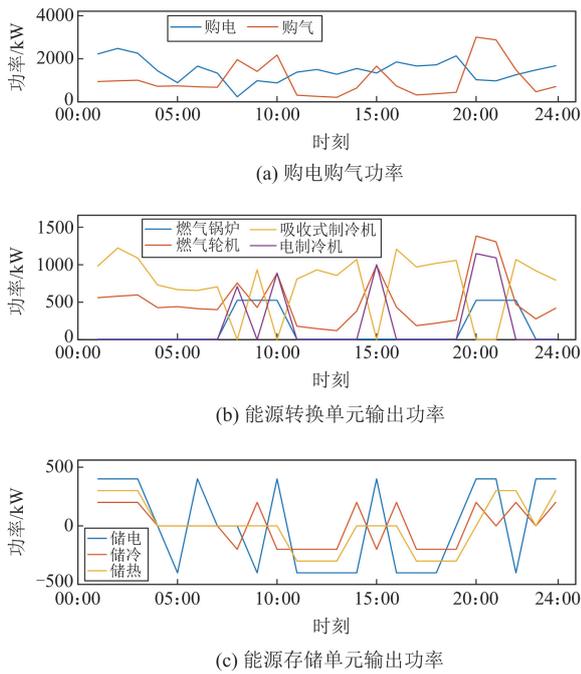


图 12 基于遗传算法的 IES 日前优化调度结果

Fig. 12 Day-ahead optimal scheduling results of the IES based on genetic algorithm

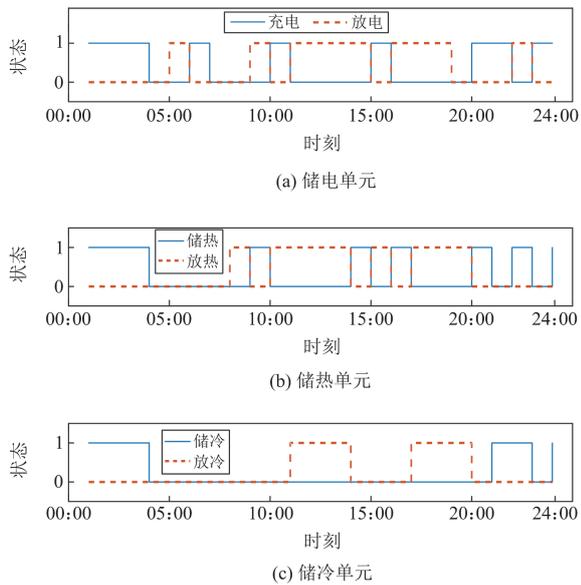


图 13 基于遗传算法的能源存储单元运行状态

Fig. 13 Energy storage unit operating states based on genetic algorithm

的购买量，这与前文分析的从电网购入电能和从天然气网购入天然气的倾向与价格呈负相关一致。在整个优化过程中，由于储能装置容量有限，会导致在电价和气价较低时段，对低价能源的利用不充分，且由于负荷的波动性，IES 从电网购入电能和从天

然气网购入天然气的倾向和价格在某些时段并没有出现极强的负相关，部分时段出现价格高而购买量大的情况。

通过对比优化前后结果可知，优化后的调度结果具有以下特征：

1) 优化后 IES 购电购气倾向更加明显，具体表现在购电购气量的极值差较优化前有所提高，即 IES 购电购气倾向和电价气价曲线有更突出的负相关性，这从图 12 可以看出。这表明 IES 能够随着能源价格的波动来改变购买的能源输入量。

2) 对比图 10(c)和图 12(c)可知，优化后储能单元的使用频率明显增加，其充放能行为也更加灵活。具体表现在储能单元能够灵活控制储能量，IES 通过在能源价格平时段对储能单元进行充电或者放电，从而使得储能单元在能源价格较低时段具备更大的容量以储存更廉价的能源，而在能源价格较高时段能释放更多储存的能源以减少对高价外部能源的依赖，降低了系统的日运行总成本。

3) 对于能源转换单元，在电价较高时段，由于燃气轮机发电量较大，产热量较多，因此热负荷主要由燃气轮机满足，不足部分则由燃气锅炉补充。而在电价较低时段，热负荷主要由燃气锅炉满足。在系统存在热量富余时，吸收式制冷机通过吸收多余热量制冷，在电能富余时段，则由电制冷机制冷以满足冷负荷需求。系统冷负荷主要由电制冷机满足，而在电价较高时，吸收式制冷机参与提供部分冷能，从而降低系统运行成本。

图 14 表示 IES 的运行成本迭代曲线，初始状态下 IES 的运行成本为 46.92×10^3 元。采用遗传算法进行 40 次迭代后，IES 的运行成本稳定在 44.8×10^3 元，相比于初始状态下的运行成本降低了 8.4%，表明 IES 获得了最优的状态转移路径。

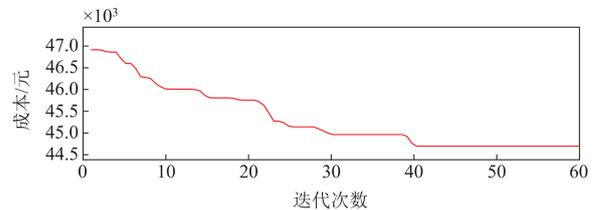


图 14 IES 运行成本

Fig. 14 IES operating cost

4.2.2 与其他求解算法的日前优化调度对比分析

为了进一步验证本文所提遗传求解算法相比于其他求解算法的优越性，本节将本文所提遗传求解算法(记为算法 1)和穷举搜索算法(记为算法 2)以及获取初始状态转移路径的原始算法(记为算法 3)

进行了对比分析。由于在算法 1 和算法 3 下的 IES 日前优化调度结果已经在图 10 和图 11 中给出, 因此本节只给出在算法 2 下的 IES 日前优化调度结果, 如图 15 所示。

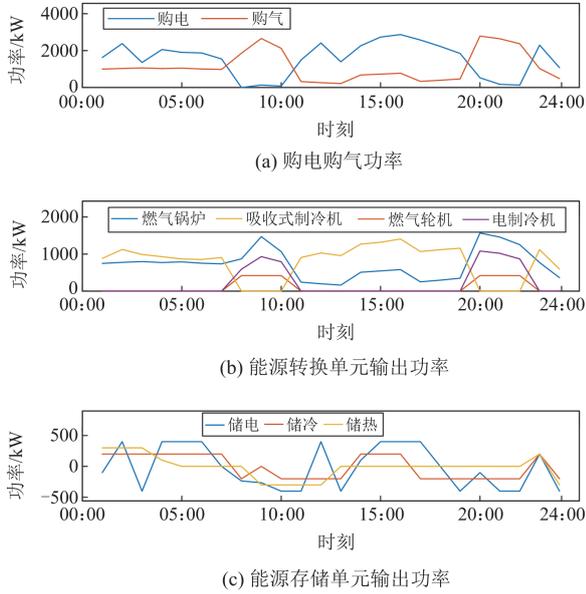


图 15 基于穷举搜索算法的 IES 日前优化调度结果

Fig. 15 Day-ahead optimal scheduling results of the IES based on exhaustive search method

从图 15 可以看出, 基于穷举搜索算法所求得各能源单元输出功率曲线变化趋势与本文所提的遗传求解算法所得到的结果基本一致。将 3 种算法下的运行成本和求解时间进行对比, 所得到的结果如表 6 所示。

表 6 3 种方法下的运行成本和求解时间

Table 6 Operating costs and solution time under three methods

对比指标	算法 1	算法 2	算法 3
运行成本/元	44.8×10^3	44.23×10^3	48.92×10^3
求解时间/s	21.1	33.7	0.6

从表 6 可以看出, 算法 3 的求解时间最短, 主要是由于算法 3 获得的是 IES 的初始状态转移路径, 因此求解速度较快, 但不能保证解的最优性, 因此其成本最高。穷举搜索算法通过遍历所有能满足约束条件的解, 因此理论上可以确保找到问题的最优解。但是当系统的规模增大时, 穷举搜索算法将变得极其耗时, 即当 IES 运行状态增多时, 穷举搜索算法求解时间将显著增加。而在本文所提建模方法下, 由于所建状态转移模型能够简化系统状态的表示和状态转移过程, 可以在一定程度上降低优化调度的计算复杂度, 提高求解效率, 因此所提遗传算法求解

时间要小于穷举搜索算法。对比本文所提建模方法和穷举搜索算法的运行成本可知, 二者的运行成本接近, 表明本文所提建模方法能够保证解的最优性。

综上所述, 本文所提建模方法不但能保证解的最优性, 而且具有较低的求解时间复杂度。

4.2.3 与传统建模方法的前日优化调度对比分析

在可再生能源出力快速波动的场景下, 以风电输出功率快速波动为例, 对比在本文所提建模方法(记为方法 1)和传统的能源集线器建模方法(记为方法 2)^[10]下各能源单元的输出波动情况。所得到的日前优化调度结果如图 16 和图 17 所示。

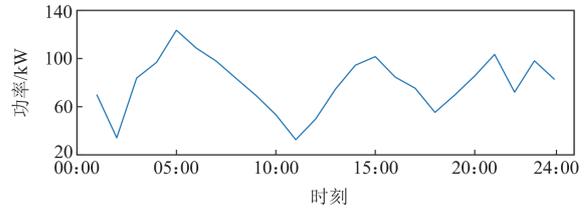


图 16 风电输出功率快速波动曲线

Fig. 16 Rapid fluctuation curve of WT output power

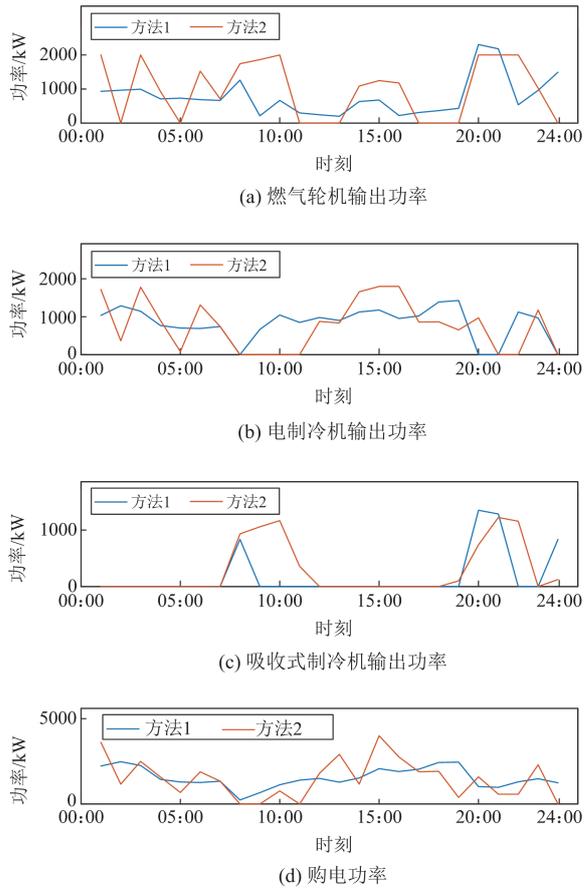


图 17 两种方法下能源单元出力对比

Fig. 17 Comparison of energy unit output with two methods

图 16 为风电快速波动下的功率曲线, 图 17 为能源单元输出功率以及 IES 与电网的联络线功率曲线。为了表征功率曲线的波动程度, 即能源单元的出力波动, 这里需要选用一个指标。由于概率统计中的标准差 σ 能反映一组数据集的离散程度, 因此可以将其作为指标来分析能源单元的出力波动情况, 其计算公式如式(12)所示。

$$\sigma = \sqrt{\sum_{t=1}^T (P_t - P_{ave})^2 / T} \quad (12)$$

式中: P_t 表示能源单元在 t 时刻的输出功率; P_{ave} 表示能源单元在整个优化时段内的输出功率平均值; T 表示优化时段数, 本文取值为 24。

基于式(12), 可以分别计算出在风电出力快速波动时, 在两种建模方法下各能源单元及 IES 与电网的联络线功率的标准差, 结果如表 7 所示。

表 7 两种方法下的标准差

Table 7 Standard deviation grid with two methods

能源单元	方法 1	方法 2
燃气轮机输出功率标准差	550.5	835.2
电制冷机输出功率标准差	422.9	651.4
吸收式制冷机输出功率标准差	413.1	452.9
IES 与电网联络线功率标准差	571.2	1118.6

从表 7 可以看出, 在传统的建模方法下, 当面对风电出力快速波动时, 各能源单元的输出功率标准差较大, 表明各能源单元的输出功率波动性较大, 这从图 17 能源单元输出功率曲线可以看出。而在本文所提建模方法下, 各能源单元的输出功率标准差均有所减小, 表明各能源单元的输出功率在整个优化时段内平稳性更好, 这能够有效降低能源单元的机械损耗, 从而有利于延长能源单元的使用寿命。同时从图 17(d)可以看出, 在本文所提建模方法下, IES 与电网的联络线功率波动也更小, 这主要是由于基于 HA 的 IES 状态转移模型清晰给出了系统在各个阶段的运行状态及转换逻辑, 各能源单元在面对风电快速波动时能够更快速地响应, 并触发状态转移, IES 中能源单元的协调能力得到加强, 更容易达到功率平衡, 因此减小了 IES 与电网的联络线功率波动。

综上所述, 相较于传统的建模方法, 本文所提建模方法在面对可再生能源出力快速波动时, 具有更优的能源单元出力和联络线功率平稳性, 能有效降低能源单元输出功率和联络线功率波动, 有利于能源单元的可靠控制及系统的稳定运行。

5 结论

本文提出了一种基于 HA 的 IES 状态转移建模方法, 并将其应用到 IES 的日前优化调度中, 算例分析验证了所提策略的可行性。本文主要结论总结如下:

1) IES 的状态转移模型可以对 IES 在启停以及运行不同阶段的状态转移过程进行精准描述, 能更直观地展示各状态间的转移关系, 实现了对 IES 状态转移轨迹在各个不同阶段的全过程观测。

2) 相较于穷举搜索算法, 本文所提方法不但能保证解的最优性而且具有较低的求解时间。

3) 与传统的基于能源集线器的建模方法相比, 本文所提建模方法在面对新能源快速波动时能够提高设备出力的平稳性, 有效降低设备的磨损, 有利于延长设备的使用寿命。

本文所提建模方法能够为 IES 实现可观可控的优化调度提供指导, 未来随着 IES 中能源单元数量的增加, 所提出的基于 HA 的 IES 状态转移模型将具有不可替代的优势。此外, 关于系统运行状态的划分方法, 未来可以考虑选择系统频率、温度、流量、电压、电流等具体参数来作为系统运行状态划分的依据。

参考文献

- [1] 张程, 罗玉锦, 陈昌亮. 考虑源荷不确定的多园区微网与共享储能电站协同优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 77-89.
ZHANG Cheng, LUO Yujin, CHEN Changliang. Collaborative optimization operation of multi park microgrids and shared energy storage power stations considering source load uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 77-89.
- [2] 臧云帆, 夏晟, 李嘉文, 等. 含共享储能的微电网群分布鲁棒博弈优化调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 90-101.
ZANG Yunfan, XIA Sheng, LI Jiawen, et al. A robust game optimization scheduling method for shared energy storage micro electric network group distribution[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 90-101.
- [3] 李贵君, 赵兴勇, 刘昊炆, 等. 考虑梯级碳交易机制和电转气两阶段运行的综合能源系统优化[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(3): 331-340.
LI Guijun, ZHAO Xingyong, LIU Haoyang, et al. Integrated energy system optimization considering cascading carbon trading mechanism and two-stage operation of power-to-gas[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(3): 331-340.
- [4] 贺文, 陈珍萍, 胡伏原, 等. 基于一致性的综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023,

- 51(19): 42-53.
HE Wen, CHEN Zhenping, HU Fuyuan, et al. Consensus-based low-carbon economic dispatching of integrated energy systems[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(19): 42-53.
- [5] QIN M, YANG Y, ZHAO X, et al. Low-carbon economic multi-objective dispatch of integrated energy system considering the price fluctuation of natural gas and carbon emission accounting[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2023, 8(4): 1-8.
- [6] 韩子娇, 那广宇, 董鹤楠, 等. 考虑灵活性供需平衡的含电转氢综合能源系统鲁棒优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(6): 161-169.
HAN Zijiao, NA Guangyu, DONG Henan, et al. Robust optimal operation of integrated energy system with P2H considering flexibility balance[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(6): 161-169.
- [7] ZHANG Z, WANG C, LÜ H, et al. Day-ahead optimal dispatch for integrated energy system considering power-to-gas and dynamic pipeline networks[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2021, 57(4): 3317-3328.
- [8] LIU F, BIE Z, WANG X. Day-ahead dispatch of integrated electricity and natural gas system considering reserve scheduling and renewable uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 10(2): 646-658.
- [9] XU J, WANG B, SUN Y, et al. A day-ahead economic dispatch method considering extreme scenarios based on wind power uncertainty[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2019, 5(2): 224-233.
- [10] PENG H, XIONG R, FENG T. A cloud-fog based adaptive framework for optimal scheduling of energy hubs[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(8): 5681-5688.
- [11] 杨义, 杨苹, 李壮壮, 等. 基于信息物理融合的微能源网统一调控架构及优化运行[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(4): 34-41.
YANG Yi, YANG Ping, LI Zhuangzhuang, et al. Architecture and optimal operation of unified dispatch and control of micro-energy grid based on cyber-physical fusion[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(4): 34-41.
- [12] BAO Z, QIU W, WU L, et al. Optimal multi-timescale demand side scheduling considering dynamic scenarios of electricity demand[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(3): 2428-2439.
- [13] MAYHORN E, XIE L, BUTLER-PURRY K. Multi-time scale coordination of distributed energy resources in isolated power systems[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(2): 998-1005.
- [14] YANG Y, YANG P, ZHAO Z, et al. A multi-timescale coordinated optimization framework for economic dispatch of micro-energy grid considering prediction error[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024, 39(2): 3211-3226.
- [15] ZHANG Z, WANG C, CHEN S, et al. Multitime scale co-optimized dispatch for integrated electricity and natural gas system considering bidirectional interactions and renewable uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2022, 58(4): 5317-5327.
- [16] VASILJ J, GROS S, JAKUS D, et al. Day-ahead scheduling and real-time economic MPC of CHP unit in microgrid with smart buildings[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(2): 1992-2001.
- [17] SHENG H, WANG C, LI B, et al. Multi-timescale active distribution network scheduling considering demand response and user comprehensive satisfaction[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2021, 57(3): 1995-2005.
- [18] SAAD A, YOUSSEF T, ELSAYED A T, et al. Datacentric hierarchical distributed model predictive control for smart grid energy management[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(7): 4086-4098.
- [19] DU Y, WU J, LI S, et al. Distributed MPC for coordinated energy efficiency utilization in microgrid systems[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(2): 1781-1790.
- [20] BEG O A, JOHNSON T T, DAVOUDI A. Detection of false-data injection attacks in cyber-physical DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(5): 2693-2703.
- [21] ARROYO J M, CONEJO A J. Modeling of start-up and shut-down power trajectories of thermal units[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2004, 19(3): 1562-1568.
- [22] SIMOGLU C K, BISKAS P N, BAKIRTZIS A G. Optimal self-scheduling of a thermal producer in short-term electricity markets by MILP[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2010, 25(4): 1965-1977.
- [23] MORALES-ESPANA G, LATORRE J M, RAMOS A. Tight and compact MILP formulation of start-up and shut-down ramping in unit commitment[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(2): 1288-1296.
- [24] 邱迪, 刘东, 高飞, 等. 基于离散混合自动机的园区综合能源系统多模式建模与日前优化[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(1): 135-147.
QIU Di, LIU Dong, GAO Fei, et al. Multi-scenario modeling and day-ahead optimization of park multiple energy system based on discrete hybrid automaton[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(1): 135-147.

收稿日期: 2024-12-03; 修回日期: 2025-02-28

作者简介:

杨义(1992—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要研究方向为分布式发电和微电网运行与控制、综合能源系统优化。E-mail: epyyang@163.com

(编辑 魏小丽)