

# 基于惯性特征的综合能源系统联合优化运行

仇洋, 张巍

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2023年2月7日; 录用日期: 2023年3月14日; 发布日期: 2023年3月21日

## 摘要

在多能源耦合的综合能源系统(IES)中, 随着高比例可再生能源的高度渗透, 给IES的灵活运行提出了新的挑战。考虑到天然气网的慢动态所带来的惯性特性, 可利用差分法将天然气网高度非线性偏微分方程转化为线性代数方程组, 同时, 现有的IES大多只考虑单一机组或者耦合设备的运行状况, 严重影响系统的联合优化运行。为此, 本文以系统经济性和最低碳排放为目标, 考虑天然气网惯性特征, 构建结合燃气轮机、燃气内燃机、燃气锅炉等多种耦合设备运行约束的IES日前优化调度模型, 并运用PSO算法对建立的IES优化调度模型进行求解, 并借助MATLAB仿真软件编写程序进行仿真分析, 最后得到使IES具有最小运行成本的调度策略。所得结果表明, 在通过日前优化调度, 更准确的体现了IES在协调各惯性网络及耦合设备的出力中系统的变化过程, 验证了各能源网及耦合设备可在一定范围内为系统提供功率支撑, 在考虑碳排放最低的前提下以实现经济最优。

## 关键词

综合能源系统, 差分法, 动态特性, 日前优化调度

# Joint Optimal Operation of Integrated Energy System Based on Dynamic Simulation

Yang Qiu, Wei Zhang

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Feb. 7<sup>th</sup>, 2023; accepted: Mar. 14<sup>th</sup>, 2023; published: Mar. 21<sup>st</sup>, 2023

## Abstract

In the multi-energy coupling integrated energy system (IES), with the high penetration of high

proportion of renewable energy, the flexible operation of IES has posed new challenges. Considering the inertia characteristics brought by the slow dynamics of the natural gas network, the highly nonlinear partial differential equations of the natural gas network can be converted into linear algebraic equations using the difference method. At the same time, most of the existing IES only consider the operation of a single unit or coupling equipment, which seriously affects the joint optimization operation of the system. Therefore, taking the system economy and the lowest carbon emissions as the objectives, taking into account the inertia characteristics of the natural gas network, this paper constructs an IES day-ahead optimal scheduling model that combines the operation constraints of gas turbines, gas internal combustion engines, gas boilers and other coupling equipment, and uses PSO algorithm to solve the established IES optimal scheduling model, and uses MATLAB simulation software to write programs for simulation analysis. Finally, the scheduling strategy that makes IES have the minimum running cost is obtained. The results show that through the day-ahead optimization scheduling, the system change process of IES in coordinating the output of various inertial networks and coupling equipment is more accurately reflected, and the energy networks and coupling equipment can provide power support for the system within a certain range, so as to achieve economic optimization under the premise of considering the lowest carbon emissions.

## Keywords

Integrated Energy System, Difference Method, Dynamic Characteristics, Day-Ahead Optimal Scheduling

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在全球性能源危机的大背景下, 综合能源系统(Integrated Energy System, IES)通过耦合设备将多种传统异质能源组成有机的整体, 打破了能源间的信息壁垒, 提高了能源的利用效率[1] [2]。随着耦合设备等关键技术的普及, 电、气等异质能源网络之间的相互耦合已经得到了广泛的关注与研究。

近年来, 国内外学者已经对含电-气-热 IES 的联合优化运行进行了较为深入的研究。对于 IES 中各类能源网络, 其在工程上并非时刻维持在稳定工况, 针对其滞后性, 文献[3]提出了差异化能量惯性的概念, 其中电网属于严格的刚性系统, 供需实时平衡; 然而天然气网、供热网及配水网的能量传导具有滞后性, 其传导速度相较于电网差异较大, 具有明显的惯性特征。文献[4]从能量本质的角度出发, 深入探讨能量传递及转换机理, 文献[5] [6]利用统一能路的方法论, 推导惯性网络的场路模型与相应的网络矩阵和网络方程, 将惯性网络动态偏微分方程转化为一系列代数方程。文献[7] [8]分析复杂拓扑和动态过程, 提出更具精确性及通用性的惯性模型。文献[9]考虑了气热惯性并将其作为备用。文献[10]将热惯性视为具有调度价值的热需求响应资源, 与电需求响应资源共同参与源荷协调。上述研究通过网络矩阵和网络方程, 偏向于流体速度场、压力场、温度场的精确计算, 计算量大, 主要用于数值模拟和设备的特性研究, 故不满足多能系统仿真高效性的要求。

对于 IES 日前优化调度, 文献[11]以系统经济性和环保性为目标, 对冷热电联供系统进行研究分析; 文献[12]结合储能系统时空位移特性, 进行风-光-氢-储综合能源系统日前经济调度; 文献[13]加入热泵及电转气装置前后系统的风电消纳及负荷波动情况进行联合调度分析; 文献[14]提出了一种计及碳排放

和垃圾发电的综合能源系统日前区间优化策略;文献[15]在调度过程中基于蒙特卡洛抽样方法生成并削减日前与日内优化调度光伏、风电场景,并且缩短时间尺度进行日前优化调度。上述研究均为考虑调度过程中的能流变化,调度时间仍采用传统的电力系统的调度策略,误差较高。

综上所述,目前鲜有研究在考虑惯性特征的基础上对 IES 进行日前优化调度。本文首先依据天然气网及热力管网的慢动态特征,利用流体动力学理论对该网络进行详细的数学表达,分别建立天然气网、供热网的动态潮流模型;其次,基于各能源网络的动态过程,给出在动态特性下燃气轮机、P2G 等耦合设备的数学表达;最后通过算例分析 IES 在多场景模式下各子系统的相互影响,以及受到不同扰动后各网络及耦合设备物理量的动态过程,从而对算法的有效性进行验证。

## 2. IES 建模及动态能量流分析

本文研究的 IES 结构如图 1 所示,系统由电网、天然气网、供热网 3 种异质能源子系统及燃气轮机、燃气内燃机等多种耦合设备构成。基于上述能源系统,根据流体动力学及热能传导理论,推导气-热动态潮流方程并考虑系统多边潮流耦合转换关系[8]。

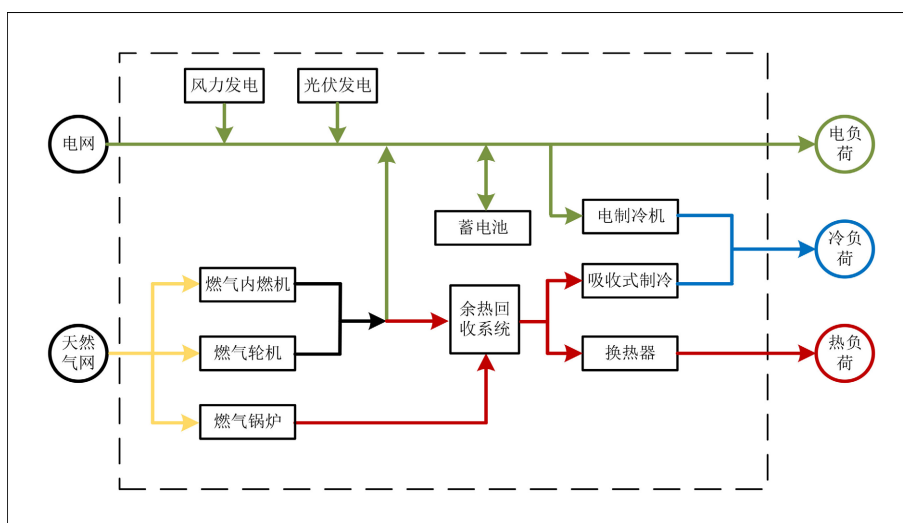


Figure 1. Structure of integrated energy system  
图 1. 综合能源系统结构

由图 1 可见,电、气、热之间存在着密切的耦合关系,主要包括电-气耦合、电-热耦合及气-热耦合,从而使得电网与其他网络形成双向耦合的统一整体,以实现能源间的双向转化。

### 2.1. IES 惯性定义

由于惯性的存在,在任何发生瞬态变化的地方都将有一定的过渡过程。以供热网为例,供热网惯性特征具体可表现为:当环境温度或热负荷需求量发生变化时,由于热水比热容的存在,当管道的距离较长,热水本身的温度变化具有一定滞后性,可能存在着几分钟到几小时的延时[10],在大型供热管网中可能存在更长的热迟滞(图 2)。

### 2.2. 天然气网的流体动力学模型

动态天然气的流动方程由质量守恒、动量守恒及能量守恒三个基本定律给出。同时,通过状态方程将气体温度、密度和压力联系起来[9]。

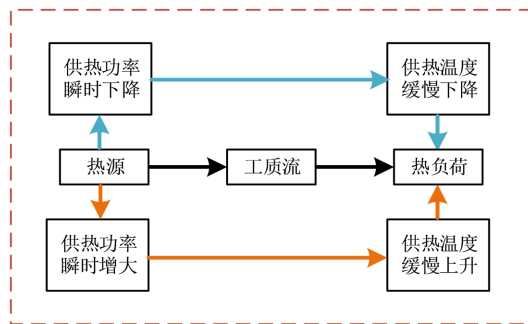


Figure 2. Thermal inertia diagram  
图 2. 热惯性示意图

在短时间内的天然气管道动态建模中, 假设气体传输是等温的, 即不存在能量交换, 可忽略能量守恒方程。气体流动模型可由一系列含空间维度  $x$  与时间维度  $t$  的偏微分方程所描述:

$$\partial_t p + \frac{c^2}{A} \partial_x m = 0 \tag{1}$$

$$\partial_t m + A \cdot \partial_x p + \frac{f c^2 m |m|}{2dA\pi} = 0 \tag{2}$$

式中:  $p$  为管道天然气压力分布;  $m$  为管道质量流量分布;  $d$  为管道直径;  $f$  为摩擦系数;  $A$  为管道横截面积;  $c$  为音速。

### 2.3. 供热管网的动态传热模型

供热管网是通过供水管网及回水管网将热能输送到热负荷的网络系统。因此, 供热系统的动态模型可分为动态水力模型及动态热力模型两部分, 其中热力模型以水力模型为基础, 先根据管网水力模型, 计算管道中输送热水的质量流量, 再通过管网的热力模型计算出网络的换热功率。其中, 热水在流动过程中动能的损失与热能的损耗都会引起管网本身热能属性的变化, 管道内温度随时间与空间变化的偏微分方程可描述为:

$$\rho C_p A \partial_t T + m C_p \partial_x T - k(T_a - T) = 0 \tag{3}$$

式中:  $\rho$  为热水密度;  $C_p$  为水的比热容;  $T$  为管道温度分布;  $m$  为管道热水流量;  $k$  为管道的传热系数;  $T_a$  为室温。

### 2.4. 耦合设备动态模型

IES 能量流并非时刻处于稳定状态, 同时由于风光等可再生能源的不确定性, 在电负荷突然增大的情况下, 可利用燃气内燃机和燃气轮机增发电量, 同时可利用各类燃气设备工作所产生的热并结合余热回收装置进行供暖和制冷, 从而打破电、气、热、冷等能源之间的信息壁垒, 利用各能源网的耦合程度, 提高了能源的利用效率。燃气轮机是以天然气为燃料向电网供电, 在各时刻下燃气轮机的耗气量与输出电功率呈如下关系:

$$H_{g,gt}^t = \alpha_{g,gt} + \beta_{g,gt} P_{G,gt}^t + \gamma_{g,gt} P_{G,gt}^{t^2} \tag{4}$$

$$q_{g,gt}^t = \frac{H_{g,gt}^t}{k} \tag{5}$$

$$H_{G,gt}^{\min} \leq H_{G,gt}^t \leq H_{G,gt}^{\max} \tag{6}$$

式中:  $H'_{g,gt}$ 、 $P'_{G,gt}$ 、 $q'_{g,gt}$  为  $t$  时刻下燃气轮机热功率、供电功率、耗气量;  $\alpha_{g,gt}$ 、 $\beta_{g,gt}$ 、 $\gamma_{g,gt}$  为耗热系数;  $H'_{G,gt}$ 、 $H'_{G,gt}$  为燃气锅炉热功率上下限;  $k$  为固定高热值。

考虑向用户供给热水的终端燃气锅炉, 本质上是气-热综合负荷。燃气锅炉的气-热转换关系及约束条件分别为:

$$H'_{gb} = kq'_{gb}\eta_{gb} \quad (7)$$

$$H'_{gb}^{\min} \leq H'_{gb} \leq H'_{gb}^{\max} \quad (8)$$

式中:  $H'_{gb}$  为燃气锅炉的产热功率;  $q'_{gb}$  为燃气锅炉的耗气量;  $\eta_{gb}$  为锅炉的产热效率。  $H'_{gb}^{\min}$ 、 $H'_{gb}^{\max}$  为燃气锅炉热功率上下限。

燃气内燃机的数学模型为

$$P'_{GE,e} = \eta_{GE}^e P'_{GE,e} \quad (9)$$

$$H'_{GE,h} = \eta_{GE}^h H'_{GE,h} \quad (10)$$

$$H'_{GE,h}^{\min} \leq H'_{GE,h} \leq H'_{GE,h}^{\max} \quad (11)$$

式中:  $P'_{GE,e}$ 、 $H'_{GE,h}$  分别为燃气内燃机的供电功率及热功率;  $\eta_{GE}^e$ 、 $\eta_{GE}^h$  分别为发电效率及热效率;  $H'_{GE,h}^{\min}$ 、 $H'_{GE,h}^{\max}$  燃气内燃机热功率上下限。

电制冷机及电制冷机的数学模型为

$$P'_{EC,out} = \alpha_{EC} P'_{EC,in} \quad (12)$$

$$P'_{AC,out} = \alpha_{AC} H'_{AC,in} \quad (13)$$

式中:  $P'_{EC,out}$ 、 $P'_{AC,out}$  分别为电制冷机与吸收式制冷机的输出制冷功率;  $\alpha_{EC}$ 、 $\alpha_{AC}$  分别为电制冷机与吸收式制冷机的制冷系数;  $P'_{EC,in}$ 、 $H'_{AC,in}$  为输入电功率及热功率。

$$P'_{ES} = (1 - \mu_e) P'_{ES} + \eta_{in}^e P_{in}^e(t) - \frac{P_{out}^e(t)}{\eta_{out}^e} \quad (14)$$

$$P'_{ES}^{\min} \leq P'_{ES} \leq P'_{ES}^{\max} \quad (15)$$

式中:  $\mu_e$  为蓄电池自放电率;  $P'_{ES}$ 、 $P'_{ES}^{-1}$  为该时刻充放电能量;  $P_{in}^e(t)$ 、 $P_{out}^e(t)$  为蓄电池充放电功率;  $\eta_{in}^e$ 、 $\eta_{out}^e$  为蓄电池充放电效率;  $P'_{ES}^{\max}$ 、 $P'_{ES}^{\min}$  为蓄电池储电上下限。

### 3. 动态方程的求解

为避免偏微分方程的直接求解, 一种常用的方法是引入 *wendroff* 差分法来代替空间与时间上的导数表达式。其差分形式可描述为:

$$\frac{\partial X}{\partial t} \approx \frac{1}{2} \left( \frac{X_{i+1,t+1} - X_{i+1,t}}{\Delta t} + \frac{X_{i,t+1} - X_{i,t}}{\Delta t} \right) \quad (16)$$

$$\frac{\partial X}{\partial x} \approx \frac{1}{2} \left( \frac{X_{i+1,t+1} - X_{i,t+1}}{\Delta x} + \frac{X_{i+1,t} - X_{i,t}}{\Delta x} \right) \quad (17)$$

$$X \approx \frac{1}{4} (X_{i+1,t+1} + X_{i,t+1} + X_{i+1,t} + X_{i,t}) \quad (18)$$

式中:  $\Delta x$ 、 $\Delta t$  分别代表空间与时间步长。

*Wendroff* 差分格式具有二阶精度, 具有截断误差。利用此差分形式可将管道分为若干段, 各工质流

的动态微分方程对于  $\Delta x$  微元同样试用, 同时可采用变步长形式, 将  $i+1$  移至管道末端,  $\Delta x$  便可由管道长度  $L$  所代替。以天然气网为例, 网络差分格式如式(7)~(8)所示。

$$p_{j,t+1} + p_{i,t+1} - p_{j,t} - p_{i,t} + \frac{c^2 \Delta t}{L_{ij} A_{ij}} [m_{j,t+1} - m_{i,t+1} + m_{j,t} - m_{i,t}] = 0 \quad (19)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{A_{ij}} (m_{j,t+1} + m_{i,t+1} - m_{j,t} - m_{i,t}) + \frac{\Delta t}{L_{ij}} [p_{j,t+1} - p_{i,t+1} + p_{j,t} - p_{i,t}] \\ & + \frac{f \bar{m}_{ij} \Delta t}{4 d_{ij} A_{ij}} (m_{j,t+1} + m_{i,t+1} + m_{j,t} + m_{i,t}) = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

除流动方程外, 为了保证方程稳定有解, 还需在管道末端设置边界条件。首先, 这些汇节点处的气体负荷称为源节点, 在这些源节点中, 气体的流量是相同的, 即其压力和密度均为恒定值。根据之前的差分方案, 在每条管道的发送端和接收端都设置了观测点, 分别设置在管道连接处的交叉点, 如图 3 所示。这些交叉点应具有均匀的气体密度, 同时流入节点的流量应该与流出节点的流量相同, 气体状态方程也适用于气体系统中每个观测点的边界条件。

$$\begin{cases} m_{i,t} = m_{Di,t} \\ P_{i,t} = P_{Si,0} \\ P_{i,t} = P_{Si,0} \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} m_i/A_i + m_{i+1}/A_{i+1} + m_{i+2}/A_{i+2} \cdots = 0 \\ P_{i,t} = P_{i+1,t} = P_{i+2,t} \cdots \end{cases} \quad (22)$$

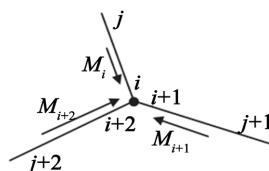


Figure 3. Intersected gas pipes  
图 3. 气体连接管道

## 4. 算例分析

### 4.1. 天然气网动态及惯性分析

为了验证本文所提方法的准确性, 本节使用如图 4 所示单管模型作为示例, 将管道分为 3 段, 节点 1 被设置为源节点, 节点 4 被设置为汇合节点。当  $t = 75$  s 时, 气负荷需求量下降, 图 5 给出了天然气流量及节点气压的变化过程。

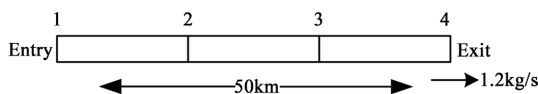


Figure 4. Gas flow in an individual pipe  
图 4. 单管模型

基于上述的推导与仿真结果, 气体流量不仅取决于当前时间步长, 还与受上一步长中的气体流量的影响。所以在瞬态状态下, 不同时间的气体流动是相互依赖的。如图 5 可知, 当负荷需求量下降时, 流

向负荷节点的气流量缓慢下降, 导致气体密度增加, 进而导致节点气压的抬升。由于节点 4 与负荷直接相连, 节点 4 处的气体密度首先增加, 而后节点 3、2、1 处的密度随之变化。超过 200 s 后, 气流达到新的稳态。所有 4 个节点的质量流率一致。在此之前, M3、M2 和 M1 随后随 M4 的变化而下降。

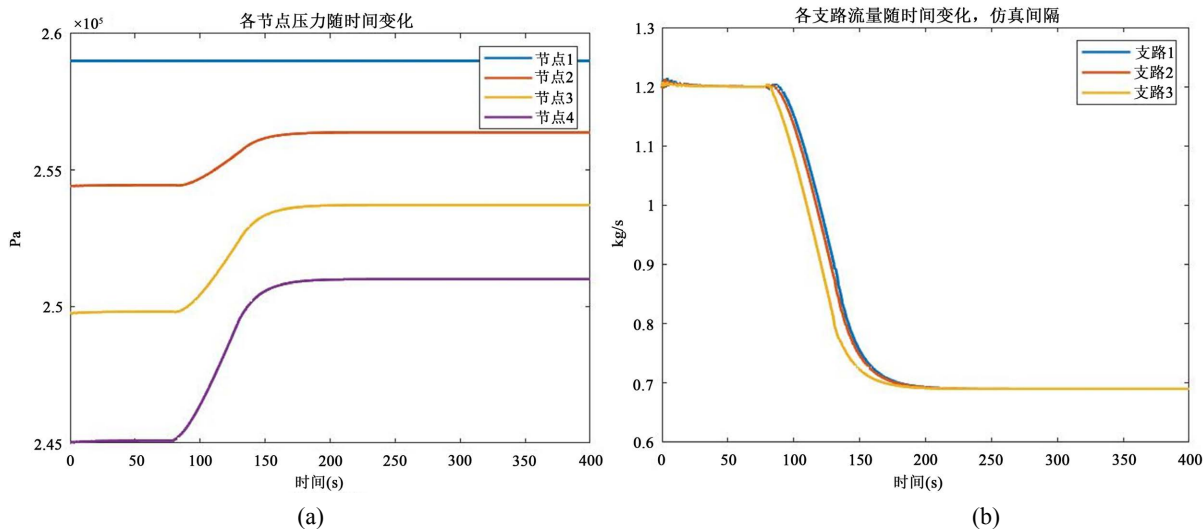


Figure 5. Dynamic simulation results

图 5. 动态仿真结果

由于气惯性的存在, 各个节点与管道的变化周期并不相同。若负荷节点功率上升, 势必会产生功率缺额, 缺额量由气惯性优先供给, 刚气惯性不足以满足缺额量时再由源节点增发功率; 若负荷节点功率下降, 会由功率溢出, 溢出的功率可存储在管道中, 多余的功率可回馈网络。此单管模型各管道气惯性变化过程如图 6 所示。

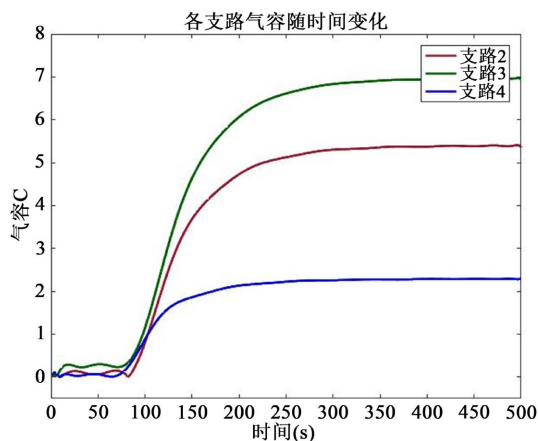


Figure 6. Gas inertia change process

图 6. 气惯性变化过程

从示例性模拟结果来看, 天然气系统需要较长的响应时间才能达到新的稳态。然而, 在实践中, 燃气消耗量一直在变化。因此气体系统可能无法达到稳定状态; 相反, 它可能总是处于过渡状态, 这证明了所提出的模型在综合天然气和电力系统中嵌入瞬态气流的重要性。

## 4.2. IES 联合优化调度

基于上述动态能量流分析结合冷热电联供系统进行 IES 日前动态调度。在调度过程中, 天然气经燃气内燃机及燃气锅炉产生热潮流供给热负荷; 由于风力光伏的不确定性, 在新能源间歇期由燃气轮机将天然气转化为电能以弥补功率缺额并供电负荷; 对于冷负荷, 通过电制冷机及吸收式制冷补充冷负荷供能。同时, 在燃气内燃机及燃气轮机后加装余热回收系统, 该系统优先给热负荷供能, 当供能不足时, 再由燃气锅炉补充; 当供能充足时, 其余能量用于给冷负荷供能。综上所述, 燃气锅炉补充热负荷和冷负荷供能; 电制冷机补充冷负荷供能; 余热回收系统优先供给热负荷, 有盈余时再供给冷负荷。系统运行策略导图如图 7 所示。

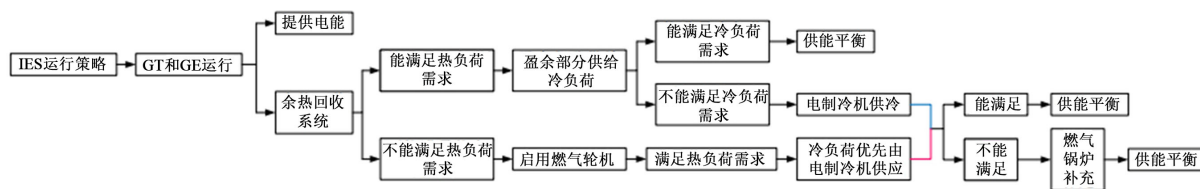


Figure 7. IES operation strategy map  
图 7. IES 运行策略导图

### 4.2.1. 目标函数

IES 系统中设备众多, 多种能源之间可实现相互转化, 在负荷波动下, 充分利用系统特点, 合理地调节能量源及设备出力, 以实现系统的经济运行, 因此本文以 IES 总运行成本最小为优化目标, 目标函数为:

$$\min F_{tot} = F_g + F_{gb} + F_e + F_{g\_c} + F_{gb\_c} + F_{e\_c} + F_{cut\_c} \quad (23)$$

$$\begin{cases} F_g = \left( \frac{P_{G,gt}^t}{\eta_{GT}^e} + \frac{P_{GE,e}^t}{\eta_{GE}^e} \right) PC_{gas} \\ F_{gb} = \left( \frac{H_{gb\_H}^t + H_{gb\_C}^t}{\eta_{gb}} \right) RC_{gas} \\ F_e = P_{e\_buy} C_{buy} - P_{e\_sale} C_{sale} \\ F_{G\_C} = \left( \frac{P_{G,gt}^t}{\eta_{GT}^e} + \frac{P_{GE,e}^t}{\eta_{GE}^e} \right) Rf_{vc} \\ F_{GB\_C} = \left( \frac{H_{gb\_H}^t + H_{gb\_C}^t}{\eta_{gb}} \right) Rf_{vc} \\ F_{e\_c} = P_{e\_buy} \times f_{pc} \\ F_{cut\_c} = C_{cut} L_{cut\_c} \end{cases} \quad (24)$$

式中:  $F_{tot}$  为 IES 总运行成本;  $F_g$  为燃气发电机的天然气使用成本;  $F_{gb}$  为燃气锅炉的天然气使用成本;  $F_e$  为与电网交互(购电 - 售电)的成本;  $F_{g\_c}$  为燃气发电机碳排放惩罚成本;  $F_{gb\_c}$  为燃气锅炉碳排放惩罚成本;  $F_{e\_c}$  为与电网交互(购电)碳排放惩罚成本;  $F_{cut\_c}$  为失电负荷惩罚成本。

### 4.2.2. 约束条件

- a) 功率平衡约束



$$\begin{cases} L_{ele} = P_{WT} + P_{PV} + P_{GT} + P_{GE} + P_{GRID} - P_{BAT} - P_{EC} \\ L_{cool} = P_{REC} + P_{EC\_C} + P_{GB\_C} \\ L_{heat} = P_{REH} + P_{GB\_H} \end{cases} \quad (25)$$

式中:  $L_{ele}$ 、 $L_{cool}$ 、 $L_{heat}$  为 IES 电、冷、热负荷;  $P_{WT}$ 、 $P_{PV}$  分别为风机、光伏的出力;  $P_{GRID}$  为 IES 与电网的交互功率(大于 0 为购电、小于 0 为售电);  $P_{BAT}$  为蓄电池的充放电功率(大于 0 为充电、小于 0 为放电);  $P_{EC}$  为电制冷机的功率;  $P_{REC}$ 、 $P_{EC\_C}$ 、 $P_{GB\_C}$  分别为余热回收系统、电制冷机、燃气锅炉提供给冷负荷的功率;  $P_{REH}$ 、 $P_{GB\_H}$  分别为余热回收系统、燃气锅炉提供给热负荷的功率。

b) 耦合设备约束

$$\begin{cases} P_{gt,min} \leq P_{G,gt}^t \leq P_{gt,max} \\ P_{GE,min} \leq P_{GE,e}^t \leq P_{GE,max} \\ -P_{e,min} \leq P_e \leq P_{e,max} \\ \max(0, (Q_{HRS} - L_{heat})) \leq P_{HRS} \leq L_{cool} / \eta_{AC} \\ P_{GB\_C\_H} = \left| \min(0, (P_{RE\_C} + P_{EC\_C} - L_{cool})) \right| / \eta_{AC} \end{cases} \quad (26)$$

式中:  $P_{gt,min}$ 、 $P_{gt,max}$  分别为燃气轮机允许的最大、最小出力;  $P_{GE,min}$ 、 $P_{GE,max}$  分别为燃气内燃机允许的最大、最小出力;  $P_{e,min}$ 、 $P_{e,max}$  分别为 IES 与电网的最大、最小交互功率;  $Q_{HRS}$  为余热回收系统提供的总热功率;  $P_{GB\_C\_H}$  为电制冷机的额定功率。

c) 蓄电池约束

$$\begin{cases} S_{BAT,t+1} = (1 - \eta_{BAT}) S_{BAT,t} + P_{BAT,cha} \eta_{BAT\_cha} + P_{BAT,dis} / \eta_{BAT\_dis} \\ S_{BAT,min} \leq S_{BAT} \leq S_{BAT,max} \end{cases} \quad (27)$$

式中,  $S_{BAT,t+1}$  为  $t+1$  时段蓄电池的容量;  $\eta_{BAT}$  为蓄电池的自放电率;  $P_{BAT,cha}$ 、 $P_{BAT,dis}$  分别为蓄电池的充、放电功率;  $\eta_{BAT\_cha}$ 、 $\eta_{BAT\_dis}$  分别为蓄电池的充、放电效率。

4.2.3. IES 综合算例分析

采用 PSO 算法对建立的 IES 优化调度模型进行求解, 并借助 MATLAB 仿真软件编写程序, 然后进行仿真分析, 最后得到使 IES 具有最小运行成本的调度策略。仿真结果如图 8~10 所示。

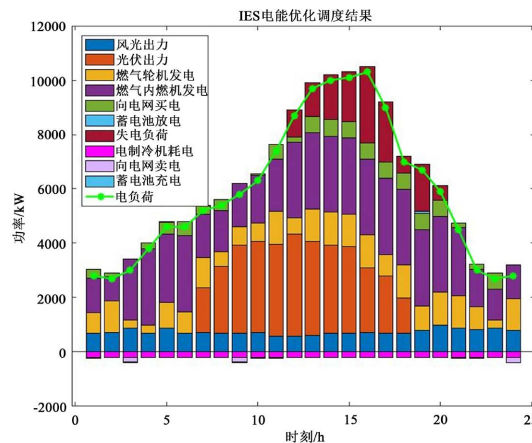


Figure 8. IES Optimal dispatching results of electric energy  
图 8. IES 电能优化调度结果

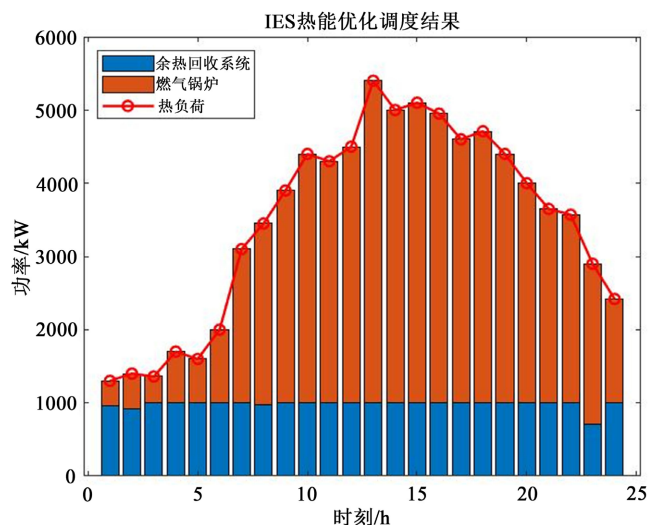


Figure 9. IES Thermal energy optimization dispatching results

图 9. IES 热能优化调度结果

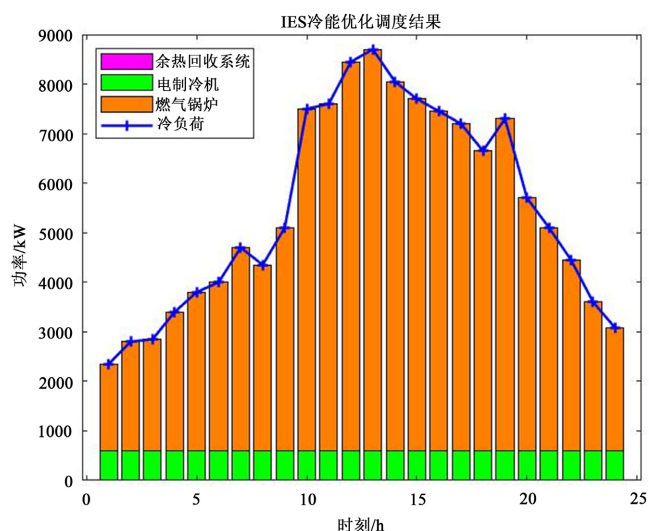


Figure 10. IES Optimal dispatching results of cold energy

图 10. IES 冷能优化调度结果

如图 8~10 可知, 在用电高峰期时, 系统中的燃气轮机耦合设备开始弥补电功率缺额, 在此过程中蓄电池既可以充电又可以放电, 由此减少可再生能源波动所引起的不确定性; 当处于负荷低估期时, 蓄电池所储存的多余电量可回馈电网, 以提高系统经济性, 同时系统中仅少量机组仍处于工作状态, 可减少碳排放, 以提高能源的利用效率。

## 5. 结论

本文以多能源 IES 为研究对象, 充分考虑 IES 的强耦合特性, 对慢动态网络的惯性特征进行了量化, 并进行了日前调度的建模仿真。基于各惯性网间能量的双向耦合, 某一能源网的随机波动和运行不确定性将通过耦合环节传递至全区域 IES, 影响其余子系统的工作状态, 不同形式能源的供需情况相互影响。在波动过程中, 各节点受影响程度与距离和扰动大小相关, 可充分调动耦合设备进行调节, 对于一定规

模网络, 扰动后建立新稳态的过渡过程时间相对较长。

模型求解结果证明改进后的 PSO 算法能够同时兼顾计算的准确性和快速性, 使系统运行更加优化。通过考虑惯性对综合能源系统的整体影响, 降低系统经济成本, 减少碳排放量, 提升了能源的利用效率。同时与传统调度方法相比, 该优化调度模型之后的 IES 多能流优化计算及系统整体规划运行提供了坚实基础。

## 参考文献

- [1] 董朝阳, 赵俊华, 文福拴, 薛禹胜. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 1-11.
- [2] 贾宏杰, 王丹, 徐宪东, 余晓丹. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 198-207.
- [3] Li, X.Y., Zhao, X. and Yang, L. (2018) Combined Power—Water Flow Analysis of Regional Integrated Electricity and Water Networks. *Proceedings of 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, Beijing, China, 20-22 October 2018. <https://doi.org/10.1109/EI2.2018.8582241>
- [4] Qin, X., Sun, H.B., Shen, X.W., et al. (2019) A Generalized Quasi-Dynamic Model for Electric-Heat Coupling Integrated Energy System with Distributed Energy Resources. *Applied Energy*, **251**, Article ID: 113270. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.073>
- [5] 陈皓勇, 李明, 邱明, 葛海麟, 黄龙. 时变能量网络建模与分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(3): 243-254.
- [6] 陈彬彬, 孙宏斌, 陈瑜玮, 郭庆来, 吴文传, 乔铮. 综合能源系统分析的统一能路理论(一): 气路[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 436-444.
- [7] 陈彬彬, 孙宏斌, 尹冠雄, 吴文传, 郭庆来, 陈瑜玮, 潘昭光, 王彬. 综合能源系统分析的统一能路理论(二): 水路与热路[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2133-2142+2393.
- [8] Lu, S., Gu, W., Meng, K., et al. (2020) Thermal Inertial Aggregation Model for Integrated Energy Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, **35**, 2374-2387. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2951719>
- [9] Chen, X., Wang, C.F., Wu, Q.W., et al. (2020) Optimal Operation of Integrated Energy System Considering Dynamic Heat-Gas Characteristics and Uncertain Wind Power. *Energy*, **198**, Article ID: 117270. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117270>
- [10] Clegg, S. And Mancarella, P. (2016) Integrated Electrical and Gas Network Flexibility Assessment in Low-Carbon Multi-Energy Systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, **7**, 718-731. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2015.2497329>
- [11] 陶静, 徐武, 李逸琳, 等. 基于多目标算法的冷热电联供型综合能源系统运行优化[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(33): 200-205.
- [12] 徐桂芝, 梁丹曦, 宋洁, 康伟, 赵雪莹, 郜捷. 风-光-氢储综合能源系统日前经济调度[J/OL]. 现代电力: 1-8. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?doi=10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0116>, 2022-12-01.
- [13] 陈克文, 王帅, 韩兴臣, 张智晟. 考虑风电消纳的冷热电联供型综合能源系统多目标日前优化调度[J]. 电气工程学报, 2022, 17(3): 170-176.
- [14] 叶文浩, 陈耀红, 黄力淼, 周力行, 易英炜, 伍旻铨. 计及碳排放和垃圾发电的综合能源系统日前区间优化[J/OL]. 电测与仪表: 1-9. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20220926.1412.002.html>, 2022-09-27.
- [15] 徐健玮, 马刚, 高丛, 沈静文, 闫照康, 陆睿琪. 基于风光场景生成的综合能源系统日前-日内优化调度[J]. 分布式能源, 2022, 7(4): 18-27.