

# 综合能源系统混合时间尺度运行优化

顾 伟,陆 帅,姚 帅,庄文楠,潘光胜,周苏洋,吴 志 (东南大学 电气工程学院,江苏 南京 210096)

摘要:综合能源系统融合电、气、热等多种能源子系统,不同能源网络动静态特性与设备控制特性差异显著。为实现电、气、热异质能流网络和设备协同运行,建立综合能源系统混合时间尺度运行优化框架,包含混合分辨率建模与混合指令周期调度。混合分辨率建模采用与气网、热网动态过程相匹配的模型分辨率刻画能流动态过程,平衡模型的精确度与问题的复杂度,实现电气热多能网络动态过程的协同优化;混合指令周期调度立足于多种异质能流的传输特性差异和多类型设备的控制特性差异,兼顾源/荷多重不确定性,确定各子系统的最佳调度指令周期,实现多能子系统间的协调运行。算例结果验证了所提方法的可行性。

关键词:综合能源系统;网络特性;控制特性;混合分辨率建模;混合指令周期调度

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI: 10.16081 / j.epae.201908023

# 0 引言

当今社会能源需求日益增长,能源供需矛盾日 益突出,环境污染日趋严峻,如何缓解能源危机、提 高能源综合利用效率、降低污染气体排放已经成为 我国乃至世界范围内亟需解决的社会难题[1-2]。针 对该问题,美国早在2001年就已提出集成能源系统 的发展计划,要求电力和天然气协同规划;加拿大在 2009年颁布实施了综合能源系统 IES (Integrated Energy System)指导意见,并将该政策上升为国家战 略;欧洲诸国在欧盟第7框架(FP7)中,提出泛欧网 络(trans-European networks)和智能能源(intelligent energy)概念。在我国,国务院关于进一步深化电力 体制改革的若干意见中,提出要大力发展热电联供、 热电冷三联供技术。能源局和发改委也相继在《能 源"十三五"规划》[3]和《电力发展"十三五"规划》[4] 中提出要建设"多能互补的智慧能源系统"和"多能 协同综合能源网络"。可见,突破传统能源体系架 构,发展电、气、热多系统耦合的IES,实现多能源高 效清洁利用,已成为世界能源领域的必然选择[5-7]。

IES是以电力为核心,融合燃气、热力等多种能源,依托联产设备、能量转换设备和可再生能源等相关技术的不断革新,实现多种能源生产、输配、利用、存储等多环节高度协同的新型能源服务系统<sup>[8-11]</sup>。 IES中电、气、热等多种能流的动态特性各不相同,各能源子系统中设备控制特性、网络特性及负荷对调度指令的响应过程也有着显著差异<sup>[12-14]</sup>,加之可再

收稿日期:2019-04-14;修回日期:2019-06-18

基金项目: 国家自然科学基金委员会-国家电网公司智能电网联合基金资助项目(U1866208)

Project supported by the Smart Grid Joint Fund of National Natural Science Foundation of China & State Grid Corporation of China(U1866208)

生能源与负荷预测的不精确性,使得系统的调度存在较大难度。本质上,IES调度是一个多能源耦合(电、气、冷、热)、多时间尺度(分钟级、小时级)以及多运行目标(经济、能效、环保)的复杂问题。

作为IES的关键环节,多能网络与设备相互耦 合给系统运行既带来了挑战,也带来了优势[15-18]。 对于多能网络,一方面,电、气、热能流传输特性差异 显著,网络动静态过程相互影响,使问题异常复 杂[19-20];另一方面,天然气网络、热力网络具有一定 的储能能力,可提高能源系统运行的安全性、经济性 以及可再生能源消纳能力[21-22]。因此,如何实现多 能网络间的协同,充分发掘能源网络的灵活性,是 IES调度的关键问题之一。对于不同子系统中的设 备,其控制特性、变工况运行能力以及在优化调度中 所起的作用各不相同,各设备采用统一的调度指令 周期在实际执行时存在一定的技术限制,并可能导 致部分设备的运行维护费用因频繁调节而大幅增 加[23],影响系统整体运行的安全性与经济性。因此, 如何充分考虑各设备的控制特性差异,兼顾系统多 重不确定因素,确定各子系统中设备的最优调度指 令周期,是IES调度的另一关键问题。

在多能网络中,电能以光速传播,相较于优化调度的时间尺度,电网的暂态过程持续时间可以忽略不计,因此其数学模型为代数方程组。天然气网络中气体流速较慢,网络状态受质量守恒、动量守恒、能量守恒以及气体状态方程等多个物理规律支配,气体状态极为复杂,本质上由偏微分-代数方程组进行描述<sup>[20,24-26]</sup>。目前,在气网优化调度中,常用的网络模型分为稳态等温、稳态非等温、动态等温和动态非等温4种<sup>[27]</sup>。模型间的差异体现在对气体动态过程的处理上。与电网、气网不同,供热网络依赖热媒(蒸汽或热水)流动实现能量输送,热媒仅作为能量媒介而自身并不消耗,因此热网状态由水力模型与

热力模型共同描述。水力模型是代数方程组,而热力模型本质上是偏微分-代数方程组。目前常用的热网模型有延时-损耗模型<sup>[28]</sup>、分段线性模型<sup>[29-30]</sup>、节点法模型<sup>[31-32]</sup>和偏微分方程模型<sup>[33]</sup>等。模型的精度逐步增加,计算复杂度也显著增加。总体上,目前关于IES多能网络动态协同的研究较少,如何建立精确度与计算量适中的多能网络模型,仍缺乏有效方法。

在IES调度过程中,为应对源/荷侧多维不确 定性因素,常将调度过程分为多个阶段,各阶段在不 同时间尺度下相互配合,逐级削弱不确定性因素对 优化调度的影响[34-36]。文献[34]针对风光和负荷的 不确定性,基于多场景随机规划和模型预测控制方 法,建立冷热电联供系统多时间尺度协调优化模型。 文献[35]计及天然气管网的慢动态特性,提出一种 基于模型预测控制的电气互联IES多时间尺度动态 优化调度方法。上述研究中,各调度阶段内电气热 设备的调度指令周期相同,然而实际IES动态时间 尺度差异显著,同时间尺度优化运行策略难以适用。 电网对于调度指令可实现瞬时响应,立刻达到稳态 值。然而,在天然气网络和热力网络中,由于受气热 工质动力学特性的影响,调度指令下发后其响应过 程需要一定时间的动态变化才能达到稳态值。同 时,IES由电力、燃气和热力等能源子系统组成,各子 系统内设备对于调度指令的响应特性和变工况运行 能力各不相同。因此,对于具有不同控制特性的设 备,有必要选择恰当的调度指令周期,从而实现IES 网络与设备的协调运行。当前,IES中不同能源子系 统的控制特性差异尚未引起足够的关注,如何实现 多能设备的协同调度与控制,仍缺乏有效方法。

因此,针对IES多能网络与设备特性差异,本文建立IES混合时间尺度运行优化框架,包括混合分辨率建模和混合指令周期调度。混合分辨率建模采用与气网、热网动态过程相匹配的模型分辨率刻画其能流动态过程,平衡模型的精确度与问题的复杂度,实现电气热多能网络动态过程的协同优化。混合指令周期调度立足于多种异质能流的传输特性差异和多类型设备的运行特性差异,兼顾源/荷侧多重不确定性,确定各子系统的最佳调度指令周期,实现多能子系统间的协调运行。

#### 1 IES特性

#### 1.1 多能网络特性

#### 1.1.1 电力网络

电力系统中,电能以光速进行传播,传输所需时间极短(10<sup>-8</sup> s),因此在调度过程中,无需考虑电能传播的暂态过程以及能量传输所带来的时间延迟。在电力系统中,采用潮流方程来刻画电能在网络中

的分布情况。潮流方程给出了某一时刻的电网电流、电压及功率之间的关系,其本质上是一组代数方程。

# 1.1.2 天然气网络

天然气系统中,天然气的传输速度相对较慢(每秒几米至几十米),气体在管道中的动态过程较为复杂。天然气在管道中流动的基本方程包括连续性方程、动量方程、能量方程和状态方程。在IES调度阶段,一般将天然气传输视为等温过程,因此不需能量方程。由连续性方程和动量方程构成的天然气状态控制方程为[37]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho_{\rm g}}{\partial t} + \frac{1}{A_{\rm g}} \frac{\partial M}{\partial l_{\rm g}} = 0\\ \frac{1}{A_{\rm g}} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial p_{\rm g}}{\partial l_{\rm g}} + \frac{\lambda_{\rm g}}{2d_{\rm g}} \frac{M^2}{\rho_{\rm g} A_{\rm g}^2} = 0 \end{cases}$$
(1)

其中,t为时间变量(s); $l_g$ 为天然气管段长度变量(m); $\rho_g$ 为天然气密度(kg/m³); $p_g$ 为天然气压强(Pa); $d_g$ 为管道内径(m); $A_g$ 为管道横截面积(m²); $\lambda_g$ 为管道摩擦系数; $M=\rho_g w_g A_g$ 为天然气质量流量(kg/s), $w_g$ 为天然气流速(m/s)。式(1)中动量方程的表面阻力一项是非线性项,可采用平均流速 $\bar{w}_g$ 对 M 进行近似,即  $M=\rho_g \bar{w}_g A_g$ 。同时,采用状态方程  $p_g=c_g^2 \rho_g$ ,其中  $c_g$  为气体声速(m/s),则可得如下线性偏微分方程组[20]:

$$\begin{cases}
\frac{\partial p_{g}}{\partial t} + \frac{c_{g}^{2}}{A_{g}} \frac{\partial M}{\partial l_{g}} = 0 \\
\frac{1}{A_{g}} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial l_{g}} + \frac{\lambda_{g} \bar{w}_{g}}{2d_{g} A_{g}} M = 0
\end{cases}$$
(2)

#### 1.1.3 供热网络

供热系统根据供热介质的不同分为蒸汽供热系统和热水供热系统,蒸汽在管道中的传输过程本质上与天然气的传输过程相似。热水供热系统中,热水在管道中的传输速度往往较慢(每秒数米),且伴随着能量损失和传输延时。热网中热水的流动受水力方程和热力方程的控制。当前大部分供热系统采取分阶段质—量调节的运行方式,即在供热季到来前确定各阶段热网中热水流量,在实时运行中通过调节供水温度来满足热负荷需求<sup>[38]</sup>。因此,在短期运行中,可将热网中热水流量视为常数,从而不需考虑其水力工况。对于热水供热系统,热网热力过程受如下偏微分方程控制<sup>[39]</sup>:

$$\frac{\partial \tau_{\rm in}}{\partial t} = -\frac{m}{A_{\rm h} \rho_{\rm w}} \frac{\partial \tau_{\rm in}}{\partial l_{\rm h}} - \frac{\lambda_{\rm h}}{A_{\rm h} \rho_{\rm w} c_{\rm w}} (\tau_{\rm in} - \tau_{\rm amb}) \tag{3}$$

其中, $\tau_{in}$ 为热媒温度( $\mathbb{C}$ );m为热水质量流量(kg/s);  $A_h$ 为管道横截面积( $m^2$ ); $\rho_w$ 为热水密度( $kg/m^3$ ); $c_w$ 为热水比热容( $kJ/(kg\cdot\mathbb{C})$ ); $\lambda_h$ 为管道热损系数

205

 $(kW/(m\cdot ^{\circ})); l_h$  为热网管段长度 $(m); \tau_{amb}$  为管道环境温度。

另一种被广泛采用的模型为节点法<sup>[4041]</sup>,节点 法首先计算无热损的情况下管道出口端热水温度:

$$\tau_{\text{out}}^{t} = (1 - k_{\text{h}}) \tau_{\text{in}}^{t-\gamma-1} + k \tau_{\text{in}}^{t-\gamma}$$
 (4)

其中, $\gamma$ 和 $k_h$ 为热水在管道中传输的延时参数; $\tau_{out}^{\tau}$ 为不考虑热损时的管道出口端热水温度( $\mathbb{C}$ ); $\tau_{in}^{\tau-\gamma}$ 和 $\tau_{in}^{\tau-\gamma-1}$ 分别为 $t-\gamma$ 时刻及 $t-\gamma-1$ 时刻管道进口段热水温度( $\mathbb{C}$ )。参数 $\gamma$ 和k的计算公式分别为:

$$\gamma = \left[ \rho_{\rm w} A_{\rm h} l_{\rm h} / (m \Delta t) \right] - 1 \tag{5}$$

$$k = \gamma + 1 - \rho_{\rm w} A_{\rm h} l_{\rm h} / (m\Delta t) \tag{6}$$

其中, $\Delta t$ 为时间间隔(h); $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整函数。

接着,考虑热损的影响,则出口温度为:

$$\tau_{\text{out}}^{t} = \beta \tau_{\text{out}}^{t} + (1 - \beta) \tau_{\text{amb}} \tag{7}$$

其中,β为管道热损系数。

综上可知,IES中不同能源网络的动态特性差异显著,气、热能流本质上是慢动态能流,因此,在IES 调度中有必要考虑气、热动态过程的影响。

#### 1.2 设备控制特性

IES中设备按功能可分为供电设备、供热设备、供气设备和联供设备,其中联供设备可同时供应电、热、气负荷。由于工作原理和控制方式不同,各类型设备在响应调度指令时体现的控制特性各不相同。

图 1 给出了典型设备的调节速率和可调容量, 其中调节速率是指该设备在单位时间内可增加/减少的出力,可调容量是指该设备出力可增加/减少的最大值。图 1 表明,以电力电子器件为核心控制器的供电设备具有较快的调节速率,而大型燃烧类设备通常具有较慢的调节速率和较大的可调容量;小功率的燃气轮机、燃料电池、部分电制热设备以及采用电动驱动方式的供气设备也具有较好的快速调节能力,但是调节容量范围较窄;储热和储气设备调节速率相当,均处于较慢水平,但储气设备的可调容

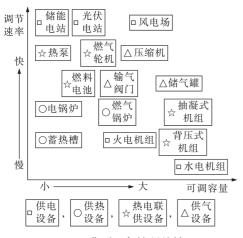


图1 典型设备控制特性

Fig.1 Control characteristics of typical devices

量往往远大于储热设备。由以上分析可知,在IES 运行优化中,一方面需要充分考虑多能网络动静态特性差异,精确刻画各能流状态;另一方面需充分考虑各子系统设备特性差异,实现各子系统间设备与网络协调运行。

## 2 混合分辨率建模方法

从数学模型上看,气网和热网中能量流的状态由偏微分方程进行描述,从而使得IES运行优化问题为含有偏微分方程与代数方程约束的混合优化问题。该模型无法直接求解,需要将偏微分方程离散化为代数方程。对于气网和热网偏微分方程的离散化问题,首先要解决的问题是差分格式的选择,其次是分辨率选择问题。分辨率越高,对能量动态过程刻画越加精确,但随之而来的问题是计算量的增长。分辨率太低则无法准确刻画能量的动态过程,给系统调度带来一系列问题,如调度决策的结果与系统实际运行状态偏差过大等。

#### 2.1 气网分辨率影响

对于气网方程,常采用中心隐式差分格式,该格式的截断误差为 $O((\Delta t)^2 + (\Delta x)^2)$ ,但数值色散现象较为严重,即在曲线不平滑的位置产生较大的虚假数值振荡,即使网格加密也无法避免数值振荡。以一具体管道进行仿真,管段长度为 $50~\mathrm{km}$ ,内径 $d~\mathrm{b}$ 0.5 m,摩阻系数取0.01。管道首端为恒压控制方式( $p_g$ 恒定),末端为流量控制方式(即给定流量M)。仿真时长为 $6~\mathrm{h}$ 。取不同的空间步长与时间步长,仿真结果如图 $2~\mathrm{fm}$ 示(图中, $N_x$ 为空间网格数, $N_i$ 为时

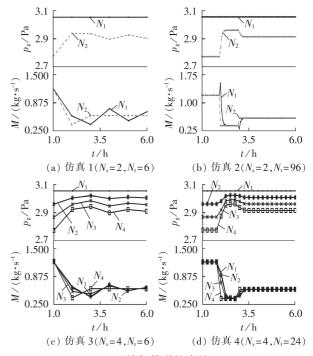


图2 输气管道仿真结果

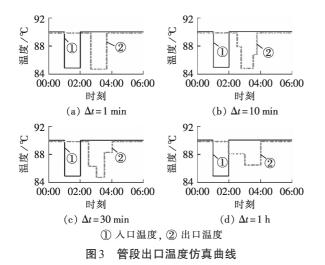
Fig.2 Simulative results of gas pipeline

间网格数, $N_1$ — $N_4$ 分别为第1—4个分段)。

图 2 中各个场景下的流量仿真结果均存在一定的虚假振荡现象,其中图 2(b)的色散现象较为严重,带来了较大的误差。相比之下,图 2(d)的结果相对最为精确,其他场景的误差较大。由结果可知:一方面,过小的时空分辨率将带来较大的误差;另一方面,仅提高时间分辨率并不一定能提高精确性,反而可能带来较大的误差,理论上空间步长与时间步长之比越小,色散现象越严重[42]。因此在 IES 调度中,需充分研究天然气动态误差的不利影响,选择合适的分辨率,将动态误差的影响控制在一定范围内,同时尽可能地降低问题规模。

#### 2.2 热网分辨率影响

对于热网模型,可对模型式(3)进行差分。与气 网模型相似,该模型需要在空间和时间2个维度进行 差分。节点法需在时间维度进行差分。因此2种模 型均涉及分辨率的选择问题。以节点法为例进行 分析。以一具体管段为例( $l_b=3.5 \text{ km}, A_b=0.115.7 \text{ m}^2$ ,  $\lambda_b$ = 0.25 kW / (m·℃), m=73.89 kg / s), 给定特性的人 口热媒温度曲线,分别设置 $\Delta t$ 为1 min、10 min、30 min 和1h进行仿真,出口温度结果见图3。 $\Delta t$ 为1 min 时的出口温度结果最为精确,随着 $\Delta t$ 的增大,仿真 结果与实际结果误差越大,误差一方面体现在热损 计算上,另一方面体现在对管段延时的计算上。由 于热损本身较小,因此其在不同 $\Delta t$ 下的差异相对不 明显。而管段延时的误差则随着 \(\Delta t\) 的变化有着显 著的差异,进而导致不同 $\Delta t$ 下出口温度存在较大偏 差。可见在运行优化模型中对热网模型需采用适当 的分辨率。



2.3 混合分辨率建模方法

在IES中,电能本质上由代数方程进行描述,其 能流暂态过程时间常数极小,远小于指令周期长度,

temperature of pipeline

Simulative curves of outlet

因此可以忽略。燃气能流和热力能流暂态过程时间常数相对较大,甚至可能跨越数个指令周期。如果能流时间常数小于指令周期但又不足够小,则需采用小于指令周期的时间分辨率对能流过程进行建模。鉴于此,本文提出混合分辨率建模方法,对气网和热网模型采用适当的空间、时间分辨率进行建模,如图4所示,图中P为电力系统有功功率(kW)。

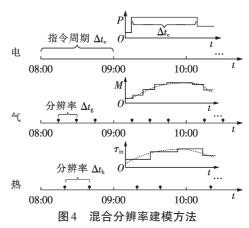


Fig.4 Hybrid resolution modeling method

对于燃气网络,首先需要针对模型式(2)选择合适的差分格式,目前常用的差分格式有中心隐式差分格式<sup>[20]</sup>和欧拉显式差分格式<sup>[43]</sup>,其均无法避免数值振荡问题,一方面,可选择合适的时空差分步长有效抑制数值振荡,满足精确度要求;另一方面,可研究适用于气网方程的全变差不增TVD(Total Variation Diminishing)差分格式<sup>[44]</sup>。其次,需要对能量流误差的影响进行刻画。对于天然气能流,分辨率所引起的误差体现在网络中气体压强、流量和管存上,压强误差过大将会导致管道压力越限,流量误差过大将会影响天然气备用量,威胁供气系统的安全稳定运行。因此气网分辨率需要在计算量和精确度之间进行折中。此外,空间分辨率与时间分辨率的协调同样影响结果的精确性,需要对二者进行协调。

对于供热网络,采用节点法可以降低模型维度,但是时间分辨率仍然影响结果的精确度。时间分辨率过大,将导致热网水温和延时计算误差过大。在调度过程中,一方面将导致系统热能供需失衡,另一方面可能给用户舒适度造成不利影响,影响供暖质量。因此,首先需要针对分辨率对能量流误差的影响进行刻画,然后兼顾精确性和计算量进行分辨率的选择。

## 2.4 分辨率的选择方法

上述结果表明,合适的分辨率对IES运行优化十分重要,如何选择与网络特性相匹配的分辨率是一个关键问题。本文采用基于仿真-评估流程的分辨率选择方法,具体流程如下。

- (1)选择所考察的气/热网络状态变量x,如气网气体压强、流量、管存,热网水温、注入功率等,初始化气/热网络分辨率,给定 IES 系统参数及负荷数据
- (2)求解运行优化模型,获得IES调度决策结果。
- (3)以调度决策中的气/热网络注入量作为边界条件,对气/热网络动态进行暂态过程仿真。
- (4)按照式(8)计算气/热网络每个调度指令内的平均状态偏差百分比,用以衡量动态过程所产生的误差。

$$\delta_{x}^{t_{e}} = \sum_{t_{gh} \in T_{gh}(t_{e}), t_{s} \in T_{s}(t_{e})} \frac{\left| x^{t_{gh}} - x_{*}^{t_{s}} \right|}{x^{t_{s}}} \times 100\%$$
 (8)

其中, $t_{gh}$ 、 $t_s$ 分别为气/热网络调度决策中的时段和精细化仿真中的时段; $T_{gh}(t_e)$ 、 $T_s(t_e)$ 分别为 $t_e$ 时段的调度指令所对应的气/热网络状态优化时段集合和精细化仿真时段集合; $x^{t_{gh}}$ 、 $x^{t_e}$ 分别为调度决策中和精细化仿真所得到的气/热网络状态结果。

#### (5)判断是否满足:

$$\max_{t \in T} \delta_x^{t_e} \le \bar{\delta}_x \tag{9}$$

其中, $T_e$ 为电力系统调度时段集合; $\bar{\delta}_e$ 为给定的状态百分比偏差上限,该值的选择取决于对系统运行安全性的需求。

#### 3 混合指令周期调度方法

为应对 IES 能流特性差异大、不确定性强等挑战,本文基于电力系统中消纳不确定性的多时间尺度滚动调度基本思想,提出满足异质能流协调精细化调度的混合指令周期优化调度方法。

#### 3.1 基本内涵

混合指令周期调度方法如图 5 所示,其基本内涵包括以下3个层面。

首先,将IES的优化调度过程由粗到细分为"日前调度计划-日内滚动出力计划-实时调度"三阶段调度体系。该调度层级通过协调各阶段的运行目标逐步降低不确定性对系统运行的影响。各调度阶段采取不同的调度周期,例如,日前调度计划基于较为粗糙的日前预测信息,主要优化系统运行的经济性指标,并为部分设备提供出力参考,因而可以采用较长的调度周期(如1h),而实时调度环节需要保证供电系统的实时功率平衡及联络线上的功率偏差范围,因而必须采用较短的调度周期(如5~15 min)。

其次,IES包含供电、供气和供热等子系统中的 多种类型设备,各设备的调节特性、变工况运行能力 以及在优化调度中所起的作用各不相同。在传统的 电力系统多时间尺度调度体系中,同一调度阶段内 各子系统的调度周期通常保持一致,但对于IES而 言,各子系统中设备的运行特性差异巨大,使用统一 的调度周期既存在难以解决的技术障碍(如电力电 子器件和燃烧类设备的调节特性差异显著),又可能 因为部分设备的频繁调节而增加运行维护的费用, 从而影响系统运行经济性。此外,与供电子系统不 同,供热和供气子系统由于热网和建筑群存在一定 的热惯性[45-46],以及燃气管道的管存特性[46],频繁调 节设备不会显著改善系统供气/热的质量,反而会 导致系统状态时刻处于暂态变化过程,进一步增加 了运行优化的难度。因此,即使在同一调度阶段内, 各设备的调度周期也因各自的运行特性差异及所起 的作用不同而有所差异。在IES各子系统中,天然

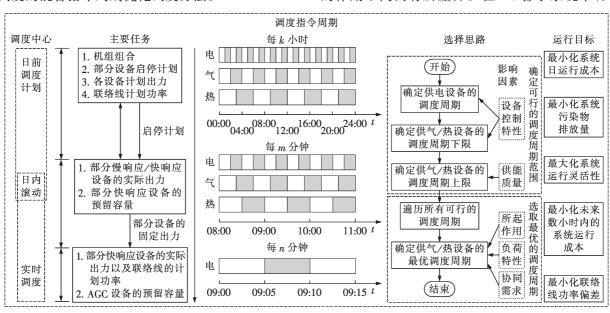


图 5 混合指令周期调度方法

Fig.5 Hybrid instruction interval dispatch method



208

气动态时间尺度为小时级,通常只需执行目前调度 决策;热力系统动态时间尺度根据系统规模不同从 分钟级到小时级不等,依规模大小宜执行目前调度 决策和日内滚动调度决策;电力系统动态时间尺度 为秒级至分钟级,可执行目前-日内-实时多阶段调 度决策。

最后,同一调度阶段内同一设备也会因为不同时刻负荷特性的差异而适当调整调度指令周期,如典型日下电负荷在08:00—10:00和17:00—19:00变化率较大且出现频繁波动,而在其他时段变化较为平缓,则应在这2个时段内适当缩短相关设备的调度指令周期以更好地跟踪电负荷变化。同样地,对于气、热负荷,可以通过适当调整调度指令周期的长短来更好地跟踪多能负荷变化,从而保障系统安全稳定运行,提升供能质量。

综上所述,混合指令周期调度方法既能有效应对 IES源/荷侧的多重不确定性因素,促进可再生能源消纳,保证供能稳定性,又能兼顾多种异质能流的传输特性差异和多类型设备的运行特性差异,合理确定多能设备的调度指令周期,实现多能子系统协调经济运行。在时间维度上,该方法通过分析多能负荷特性自适应调整调度指令周期,进一步提升供能质量和系统运行稳定性。但是对于给定的IES,如何综合考虑设备的控制特性约束、频繁调节产生的运维成本和多能负荷特性、确定满足供能要求的最优调度周期组合尚处于研究的起步阶段。

#### 3.2 指令周期选择方法

笔者在文献[23]中针对电热型IES提出了一种考虑区域热网运行方式、建筑物蓄热能力和设备频繁调节产生的额外运行维护费用共同确定热电联产机组最优调度指令周期的方法。以该文献的算例系统为例,对多能设备调度指令周期的选取方法进行说明。

- (1)在满足供电设备运行约束的前提下,给定其调度指令周期:日前调度计划1h,日内滚动出力计划15 min,实时调整5 min。
- (2)依据供热设备的运行特性及其在优化调度中所起的作用,确定除热电联产机组外的供热设备调度指令周期:承担较大供热负荷比例的燃烧类设备(如燃气锅炉)在日内滚动阶段每30 min调度一次,日前调度周期保持不变;用于消纳富余可再生能源电力的电转热设备(如电锅炉和热泵)在日内滚动阶段保持15 min的调度周期不变,并参与实时调度环节,保持联络线功率偏差最小。
- (3)基于最恶劣场景分析,确定承担供热基荷的 热电联产机组调度指令周期范围:设定供暖建筑物 室温初值,并假设外界环境温度 $\tau_{amb}$ 按最恶劣情况 降低,如式(10)所示。

$$\tau_{\text{amb}} = \bar{\tau}_{\text{amb}} - g_{\text{dec}}t \tag{10}$$

其中 $,\bar{\tau}_{amb}$ 为外界环境温度的最大值 $;g_{dec}$ 为最恶劣场景下温度降低的速率。

为了保证供暖舒适度,通常需要将室温限制在一定范围内,将联产机组的调度指令周期从0每次增加 $\Delta t$ 直至找到满足式(11)的临界时长 $\hat{t}_{ter}$ 。

$$\begin{cases} \tau_{\text{in}}(\hat{t}_{\text{dec}}) \geq \underline{\tau}_{\text{in}} \\ \tau_{\text{in}}(\hat{t}_{\text{dec}} + \Delta t) < \underline{\tau}_{\text{in}} \end{cases}$$
 (11)

其中, $\Sigma_{in}$ 为允许的供暖室温下限。由此确定的 $\hat{t}_{dec}$ 即为允许的最大调度指令周期 $\Delta t_{max}$ 。对于外界环境温度按照最恶劣情况升高的场景,确定 $\Delta t_{max}$ 的方法与上文类似。结合热电联产机组的调节特性,确定满足物理约束的最小调度指令周期 $\Delta t_{min}$ ,因而 $\Delta t$ 满足:

$$\Delta t_{\min} \leq \Delta t \leq \Delta t_{\max} \tag{12}$$

(4)确定热电联产机组的最优调度指令周期:对于采用量调节的供热系统,频繁调节流量易造成水力工况失衡,引发安全事故,因此最优调度指令周期即设为步骤(3)确定的Δt<sub>max</sub>;对于采用质调节的供热系统,在日前经济调度时将设备调节成本计入目标函数,遍历所有可行的调度指令周期,在日前经济性最优时所得调度周期即为最优调度指令周期。

该方法仅是混合指令周期调度方法的初步探索,研究未能计及天然气能流以及多能负荷特性的影响,并且在确定最优调度指令周期时未能考虑不同模型分辨率对选取结果的影响。因此,如何量化表达多重影响因素,并建立适用于工程实际的IES混合调度指令周期自适应选取方法依然面临诸多技术难题,需要更多的研究关注。

## 4 混合时间尺度运行优化

## 4.1 基本框架

基于以上内容,本文提出IES混合时间尺度运行优化体系,包括混合分辨率建模和混合指令周期调度,如图6所示。混合分辨率建模方法针对不同规模的气/热网络,用与其特性相匹配的时间/空间步长,对气/热动态刻画进行精确刻画,本文同时提出气、热网络差分步长以及建筑物动态特性仿真步长的选择方法。混合指令周期调度方法提供了各子系统目前-日内-实时多个阶段的调度指令周期遗择方法及系统间协同方法。混合指令周期调度能够有效应对多能互补IES强耦合性、多动态并存、强不确定性、强非线性等特点,可实现系统安全、稳定、高效、经济、灵活、低碳运行。

#### 4.2 数学模型

基于IES混合指令周期调度方法,结合前文的混合时间分辨率建模方法,可以得到IES混合时间



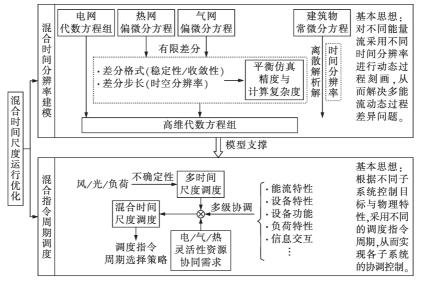


图 6 混合时间尺度运行优化体系

Fig.6 Hybrid time-scale operation optimization system

尺度运行优化基本数学模型为:

$$\begin{cases} \min f\left(x_{e}^{t_{e}}, x_{g}^{t_{g}}, x_{h}^{t_{h}}\right) \\ \text{s.t.} \quad g_{e}\left(x_{e}^{t_{e}}\right) \leq 0, \ g_{g}\left(x_{g}^{t_{g}}\right) \leq 0, \ g_{h}\left(x_{h}^{t_{h}}\right) \leq 0 \\ x_{e,g}^{t_{e}} = x_{g,e}^{t_{g}} \quad \forall t_{g} \in T_{g}\left(t_{e}\right) \\ x_{e,h}^{t_{e}} = x_{h,e}^{t_{h}} \quad \forall t_{h} \in T_{h}\left(t_{e}\right) \\ x_{g,h}^{t_{g}} = x_{h,g}^{t_{h}} \quad \forall t_{g} \in T_{g}\left(t_{e}\right), t_{h} \in T_{h}\left(t_{e}\right) \\ x_{g,c}^{t_{g}} = x_{g,c}^{t_{g}} \quad \forall t_{g}, t_{g}^{\prime} \in T_{g,c}\left(t_{g,c}\right) \\ x_{h,c}^{t_{h}} = x_{h,c}^{\prime_{h}} \quad \forall t_{h}, t_{h}^{\prime} \in T_{h,c}\left(t_{h,c}\right) \end{cases}$$

其中, t, t, t, 分别为电力、燃气、供热子系统的时间 索引,其中 $t_a$ 与电力系统调度时间间隔一致; $x_a$ 、 $x_b$ 、 分别为各子系统的决策变量; $f(\cdot)$ 为运行优化目标 函数; $g_e(\cdot) \leq 0 \setminus g_g(\cdot) \leq 0 \setminus g_h(\cdot) \leq 0$  分别为各子系 统自身运行约束条件; x e, g \ X g, e 分别为电力系统与燃 气系统耦合变量中的电力系统部分和燃气系统部 分;x,,,x,,,分别为电力系统与供热系统耦合变量中 气系统与供热系统耦合变量中的燃气系统部分和供 热系统部分; $T_s(t_e)$ 、 $T_h(t_e)$ 分别为第 $t_e$ 个调度间隔所 对应的时间燃气及供热系统时间索引集合; $x_{so},x_{ho}$ 分别为燃气系统和供热系统中可调度设备所对应的 状态变量;t<sub>s.c</sub>、t<sub>h.c</sub>分别为燃气系统和供热系统调度 指令周期索引;  $T_{g,c}(t_{g,c})$  为第  $t_{g,c}$  个调度指令周期所 对应的燃气系统时间索引集合; $T_{h,c}(t_{h,c})$ 为第 $t_{h,c}$ 个 调度指令周期所对应的供热系统时间索引集合。模 型式(13)中第4-6组约束为子系统间耦合关系所 产生的状态约束条件;第7、8组约束分别为燃气系 统和供热系统调度状态约束,表明燃气系统/供热 系统中可调度设备所对应的状态变量在同一调度指 令周期内应保持一致。

## 5 算例分析

为验证所提混合时间尺度运行优化方法的可行性,本节构建一个小规模电热型IES算例,算例系统结构如图7所示。该算例系统包含1台4MW的燃气轮机,1台6MW燃气锅炉,容量为1.6MW的风电场和1MWh的储热罐。热网包含6个节点,节点4—6连接热负荷。电负荷、风电功率及室外温度的日前预测数据如图8所示。

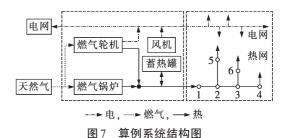


Fig.7 Structure of case system

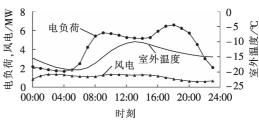


图 8 日前预测数据

Fig.8 Day-ahead forecasted data

#### 5.1 分辨率的选择

基于上文给出的分辨率选择流程,首先选择热 网注入功率作为所考察的状态变量;然后,将调度决 策中的热网供水温度作为热网暂态仿真的输入,仿 真步长设置为1 min,可得热网注入功率的仿真结 果;接着,按照式(8)计算状态偏差量。热网建模采 用节点法模型,不同时间分辨率下的状态偏差百分 比如表1所示。

不同热网分辨率下的调度结果 Table 1 Dispatch results for different time scales of heating network

$\Delta t_{ m h}$ / min	成本 / 万元	$\max \delta_x^{t_e} / \%$
60	8.182	9.90
30	8.207	3.49
20	8.200	1.91
15	8.194	1.51
10	8.187	0.79
1	8.177	0

可见,分辨率的选择基本不影响系统调度成本。 对于该系统,如果 $\delta$ ,设置为5%,则热网最佳分辨率 为30 min,如果分辨率设置为3%,则热网最佳分辨 率为20 min。此外,对于某一给定IES,一旦确定其 气/热网络分辨率,则可将其视作系统基本参数。

#### 5.2 指令周期的选择

该算例系统中各设备的调度指令周期列于表 2. 表中"x"表示某设备不参与相应调度阶段。各设 备均参与目前调度计划和日内滚动计划的制定,但 是仅有风电场和电网联络线参与实时调度。燃气锅 炉和蓄热罐由于调节速率慢,参与日内滚动调度时 指令周期设为30 min。

表2 各设备的调度指令周期

Table 2 Dispatch instruction intervals of each unit

	指令周期		
设备	日前 调度 / h	日内滚动 调度 / min	实时 调度 / min
燃气轮机	1	15	×
燃气锅炉	1	30	×
风电场	1	15	5
蓄热罐	1	30	×
电网联络线	1	15	5

日前调度计划的目标函数是系统日运行成本最 小,根据上文混合分辨率选择结果,供热系统的时间 分辨率取为20 min。日内滚动调度的目标函数为系 统未来4h内总运行费用最低,每15 min滚动一次, 供热系统的时间分辨率取15 min。实时调度以电网 联络线功率实际功率与目前计划值之间的偏差最小 为目标函数,每5 min滚动一次,滚动时间窗为2h, 供热系统的时间分辨率取5 min。算例系统3个阶 段的调度结果如图9所示。图中, $P_a$ 为燃气轮机的 输出电功率; $P_{g,sell}$ 和 $P_{g,buv}$ 分别为向电网售电功率和 从电网购电功率; $P_w$ 为风电场输出的风电功率; $Q_w$ 为燃气轮机的输出热功率; Q , 为燃气锅炉的输出热 功率; $Q_{\text{tst,chr}}$ 和 $Q_{\text{tst,dis}}$ 分别为蓄热罐的蓄热功率和放 执功率。

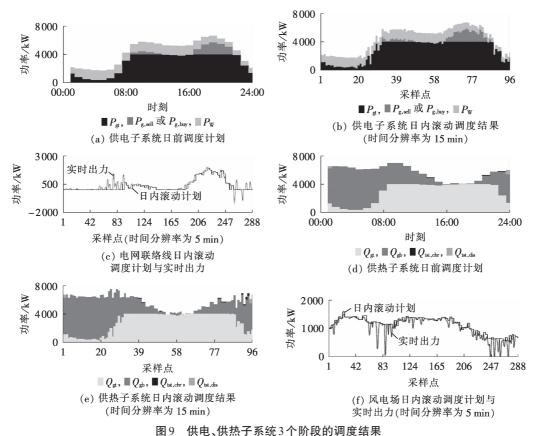


Fig.9 Dispatch results of three stages in electric and heat subsystems



在00:00 - 07:00 时段,由于风电场出力较高, 燃气轮机出力压至最低水平,优先使用风电出力满 足系统电负荷需求(见图9(a)),此时系统的热负荷 需求主要由燃气锅炉满足(见图9(d))。此后,随着 电负荷水平升高,燃气轮机的出力逐步增至最大值, 部分电负荷缺额由电网联络线购电满足。由于燃气 轮机的热、电出力满足一定比例关系,该时段内燃气 轮机的热出力也显著增加,这导致燃气锅炉的热出 力逐步降低而成为辅助热源。而在22:00之后的夜 间,由于电负荷水平有所下降,燃气轮机出力再次减 小,而热负荷水平却有所升高,这使得燃气锅炉再次 增加出力而成为主热源。日内滚动调度基于超短期 滚动预测信息(见图9(b)、(e)),调度结果与实际负 荷偏差更小,但是各设备的整体出力趋势与日前调 度计划一致。值得注意的是,在日内调度计划中,考 虑到设备的调节特性差异,将燃气锅炉和蓄热罐的 调度指令周期设置为供电设备的2倍,并且供热子 系统只参与日前调度计划和日内滚动调度,不参与 实时调度。

在实时调度阶段,主要通过调节性能良好的电力电子装置对负荷变化进行快速跟踪。在该算例中,优先考虑调节风电场出力来减小联络线上的功率波动(见图9(f)),在此基础上,通过快速调节联络线传输功率实现系统供需电功率实时平衡(见图9(c))。IES混合时间尺度运行优化方法能够充分考虑不同设备的工作特性,有效协调日前-日内-实时多阶段调度目标,从而逐级削弱多能负荷与可再生能源的不确定性对于系统优化调度的影响。

#### 6 结论

多能耦合互补是IES区别于传统分立式供能系 统的重要特征之一,这为能源系统的运行优化提供 了一定的灵活性资源和协调优化空间,但同时也带 来了诸多技术挑战。为有效应对相关挑战,实现多 能子系统协调高效运行,本文提出IES混合时间尺 度运行优化体系,包括混合分辨率建模和混合指令 周期调度。混合分辨率建模在分析异质能流传输特 性的基础上,建立了能够反映能流输配慢动态过程 的(偏)微分-代数方程组模型,并通过选取合适的时 间和空间分辨率实现模型精度与求解复杂度之间的 平衡。混合指令周期协调优化方法在传统电力系统 多时间尺度滚动优化思想的基础上,考虑异质能流 的传输特性差异和多类型设备的控制特性差异,通 过选取合理的调度指令周期逐级削弱多重不确定性 因素对优化调度的影响,促进可再生能源消纳,实现 多能子系统协调经济运行。

目前,针对混合时间尺度运行优化体系的相关研究依然处于起步阶段,仍有诸多技术难题需要攻

克,包括如何基于数值稳定性理论选取综合性能最优的差分格式和差分步长(模型分辨率)、如何量化多能设备控制特性及多能负荷特性,并据此建立适用于工程应用的调度指令周期自适应选取方法等。

#### 参考文献:

- [1]中国能源研究会.《中国能源发展报告2018》[M]. 北京:中国建材工业出版社,2018:2.
- [ 2 ] IEA. World energy outlook 2018[EB/OL]. [2019-06-18]. https://doi.org/10.1787/weo-2018-en.
- [3] 国家发改委和国家能源局. 能源发展"十三五"规划[EB/OL]. [2019-06-18]. http://www.nea.gov.cn/135989417\_148462178 74961n. pdf.
- [4] 国家发改委和国家能源局. 电力发展"十三五"规划[EB/OL]. [2019-06-18]. http://www.ndrc.gov.cn/fzgggz/fzgh/ghwb/gjjgh/201706/W020170605632835660561.pdf.
- [5] 孙宏斌,潘昭光,郭庆来. 多能流能量管理研究:挑战与展望 [J]. 电力系统自动化,2016,40(15):1-8. SUN Hongbin,PAN Zhaoguang,GUO Qinglai. Energy management for multi-energy flow:challenges and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(15):1-8.
- [6] 艾芊,郝然. 多能互补、集成优化能源系统关键技术及挑战 [J]. 电力系统自动化,2018,42(4):2-10.
  AI Qian,HAO Ran. Key technologies and challenges for multi-energy complementarity and optimization of integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(4):
- [7] 孙宏斌,郭庆来,潘昭光,等. 能源互联网:驱动力、评述与展望[J]. 电网技术,2015,39(11):3005-3013.

  SUN Hongbin,GUO Qinglai,PAN Zhaoguang,et al. Energy internet: driving force, review and outlook[J]. Power System Technology,2015,39(11):3005-3013.
- [8] 贾宏杰,王丹,徐宪东,等. 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. JIA Hongjie,WANG Dan,XU Xiandong,et al. Research on some key problems related to integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(7):198-207.
- [9] 余晓丹,徐宪东,陈硕翼,等. 综合能源系统与能源互联网简述[J]. 电工技术学报,2016,31(1):1-13.

  YU Xiaodan,XU Xiandong,CHEN Shuoyi,et al. A brief review to integrated energy system and energy internet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(1):1-13.
- [10] 卫志农,梅建春,孙国强,等. 电-气互联综合能源系统多时段暂态能量流仿真[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):41-47. WEI Zhinong, MEI Jianchun, SUN Guoqiang, et al. Multi-period transient energy-flow simulation of integrated power and gas energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017,37(6):41-47.
- [11] 孙娟,卫志农,孙国强,等. 计及 P2H 的电-热互联综合能源系统概率能量流分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):62-68. SUN Juan, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Analysis of probabilistic energy flow for integrated electricity-heat energy system with P2H[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017,37(6):62-68.
- [12] GU W, WU Z, BO R, et al. Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power

- 212
  - microgrid: a review[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 54:26-37.
- [13] 孙宏斌,潘昭光,郭庆来. 多能流能量管理研究:挑战与展望 [J]. 电力系统自动化,2016,40(15):1-8. SUN Hongbin,PAN Zhaoguang,GUO Qinglai. Energy management for multi-energy flow: challenges and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(15):1-8.
- [14] 潘昭光,孙宏斌,郭庆来. 面向能源互联网的多能流静态安全分析方法[J]. 电网技术,2016,40(6):1627-1634.

  PAN Zhaoguang,SUN Hongbin,GUO Qinglai. Energy internet oriented static security analysis method for multi-energy flow [J]. Power System Technology,2016,40(6):1627-1634.
- [15] NUYTTEN T, CLAESSENS B, PAREDIS K, et al. Flexibility of a combined heat and power system with thermal energy storage for district heating[J]. Applied Energy, 2013, 104:583-591.
- [16] CLEGG S,MANCARELLA P. Integrated electrical and gas network flexibility assessment in low-carbon multi-energy systems
  [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7 (2): 718-731.
- [17] 熊文,刘育权,苏万煌,等. 考虑多能互补的区域综合能源系统多种储能优化配置[J]. 电力自动化设备,2019,39(1): 118-126.

  XIONG Wen,LIU Yuquan,SU Wanhuang,et al. Optimal configuration of multi-energy storage in regional integrated ener
  - figuration of multi-energy storage in regional integrated energy system considering multi-energy complementation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1):118-126.
- [18] 赵曰浩,彭克,徐丙垠,等. 综合能源系统分层分布式协调控制方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):253-259.

  ZHAO Yuehao,PENG Ke,XU Bingyin, et al. Hierarchical and distributed coordination control of integrated energy system [J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(6):253-259.
- [19] PAN Z,GUO Q,SUN H. Interactions of district electricity and heating systems considering time-scale characteristics based on quasi-steady multi-energy flow[J]. Applied Energy, 2016, 167:230-243.
- [20] FANG J,ZENG Q, AI X, et al. Dynamic optimal energy flow in the integrated natural gas and electrical power systems [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 188-198
- [21] LU S, GU W, ZHOU J, et al. Coordinated dispatch of multienergy system with district heating network; modeling and solution strategy[J]. Energy, 2018, 152; 358-370.
- [22] GU W, WANG J, LU S, et al. Optimal operation for integrated energy system considering thermal inertia of district heating network and buildings[J]. Applied Energy, 2017, 199: 234-246.
- [23] YAO S,GU W,ZHOU S,et al. Hybrid timescale dispatch hierarchy for combined heat and power system considering the thermal inertia of heat sector[J]. IEEE Access, 2018(6): 63033-63044.
- [24] PAMBOUR K A,BOLADO-LAVIN R,DIJKEMA G P J. An integrated transient model for simulating the operation of natural gas transport systems [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 28:672-690.
- [25] CHACZYKOWSKI M. Transient flow in natural gas pipeline the effect of pipeline thermal model [J]. Applied Mathematical Modelling, 2010, 34(4):1051-1067.

- [26] DE WOLF D, SMEERS Y. The gas transmission problem solved by an extension of the simplex algorithm [J]. Management Science, 2000, 46(11):1454-1465.
- [27] WANG C, WEI W, WANG J H, et al. Strategic offering and equilibrium in coupled gas and electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1):290-306.
- [28] 顾伟,陆帅,王珺,等. 多区域综合能源系统热网建模及系统 运行优化[J]. 中国电机工程学报,2017,37(5):1305-1316. GU Wei,LU Shuai,WANG Jun,et al. Modeling of the heating network for multi-district integrated energy system and its operation optimization[J]. Proceedings of the CSEE,2017, 37(5):1305-1316.
- [29] 姚帅,顾伟,张雪松,等. 热网特性对于综合能源系统超短期调度的影响[J]. 电力系统自动化,2018,42(14):83-90. YAO Shuai, GU Wei, ZHANG Xuesong, et al. Effect of heating network characteristics on ultra-short-term scheduling of integrated energy system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14):83-90.
- [30] YAO S,GU W,LU S, et al. A transient thermodynamic model of district heating network for operational optimization of the energy integration system[C]//2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration(EI2). Beijing, China: [s.n.], 2017:1-6.
- [31] BENONYSSON A. Dynamic modelling and operational optimization of district heating systems, dissertation [D]. Copenhagen, Denmark; Technical University of Denmark, 1991.
- [32] LI Z, WU W, SHAHIDEHPOUR M, et al. Combined heat and power dispatch considering pipeline energy storage of district heating network[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016,7(1):12-22.
- [33] WANG Y, YOU S, ZHANG H, et al. Thermal transient prediction of district heating pipeline; optimal selection of the time and spatial steps for fast and accurate calculation [J]. Applied Energy, 2017, 206; 900-910.
- [34] 王皓,艾芊,甘霖,等. 基于多场景随机规划和MPC的冷热电联合系统协同优化[J]. 电力系统自动化,2018,42(13):51-58.
  - WANG Hao, AI Qian, GAN Lin, et al. Collaborative optimization of combined cooling heating and power system based on multi-scenario stochastic programming and model predictive control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42 (13):51-58.
- [35] 梅建春,卫志农,张勇,等。电-气互联综合能源系统多时间尺度动态优化调度[J]. 电力系统自动化,2018,42(13):36-42.

  MEI Jianchun, WEI Zhinong, ZHANG Yong, et al. Dynamic optimal dispatch with multiple time scale in integrated power and gas energy systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13):36-42.
- [36] 丁涛,牟晨璐,别朝红,等. 能源互联网及其优化运行研究现状综述[J]. 中国电机工程学报,2018,38(15):4318-4328.

  DING Tao,MOU Chenlu,BIE Chaohong,et al. Review of energy internet and its operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018,38(15):4318-4328.
- [37] 艾小猛,方家琨,徐沈智,等. 一种考虑天然气系统动态过程的气电联合系统优化运行模型[J]. 电网技术,2018,42(2):409-416.
  - AI Xiaomeng, FANG Jiakun, XU Shenzhi, et al. An optimal energy flow model in integrated gas-electric systems considering dynamics of natural gas system[J]. Power System Tech-



- nology, 2018, 42(2): 409-416.
- [38] 石兆玉. 供热系统运行调节与控制[M]. 北京:清华大学出版 社,1994:106-303.
- [39] WANG Y, YOU S, ZHANG H, et al. Thermal transient prediction of district heating pipeline; optimal selection of the time and spatial steps for fast and accurate calculation [J]. Applied Energy, 2017, 206; 900-910.
- [40] LI Z, WU W, SHAHIDEHPOUR M, et al. Combined heat and power dispatch considering pipeline energy storage of district heating network[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016,7(1):12-22.
- [41] ANDERSON J D, WENDT J. Computational fluid dynamics[M]. Heidelberg, Germany; Springer, 1995; 183-235.
- [42] YANG J,ZHANG N,KANG C, et al. Effect of natural gas flow dynamics in robust generation scheduling under wind uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33 (2):2087-2097.
- [43] 张强. 偏微分方程的有限差分格式[M]. 北京:科学出版社, 2018:119-182.
- [44] GU W, WANG J, LU S, et al. Optimal operation for integrated energy system considering thermal inertia of district heating network and buildings[J]. Applied Energy, 2017, 199:234-246.

- [45] 朱承治,陆帅,周金辉,等. 基于电-热分时间尺度平衡的综合能源系统日前经济调度[J]. 电力自动化设备,2018,38(6):
  - ZHU Chengzhi, LU Shuai, ZHOU Jinhui, et al. Day-ahead economic dispatch of integrated energy system based on electricity and heat balance in different time scales [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6):138-143.
- [46] 黄春芳. 天然气管道输送技术[M]. 北京:中国石化出版社, 2009:20-90.

#### 作者简介:



顾 伟(1981—),男,江苏南京人,教授,博士,主要研究方向为电力系统运行控制、综合能源系统等(E-mail:wgu@seu.edu.cn);

陆 帅(1993—),男,江苏徐州人,博士研究生,研究方向为综合能源系统建模、仿真与优化(E-mail:lushuai1004@outlook.com);

姚 帅(1995—),男,江苏连云港人,博研究生 主栗研究方向为综合能源系统建模 仿直与优化

士研究生,主要研究方向为综合能源系统建模、仿真与优化 (E-mail:yaoshuai484@seu.edu.cn)。

## Hybrid time-scale operation optimization of integrated energy system

GU Wei, LU Shuai, YAO Shuai, ZHUANG Wennan, PAN Guangsheng, ZHOU Suyang, WU Zhi (School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The IES (Integrated Energy System) integrates multiple energy subsystems, i.e. electrical system, gas system, heating system, and so on. The dynamic / static characteristics and device control characteristics of different energy systems are significantly different. In order to realize coordinated operation of the heterogeneous energy networks and devices, a hybrid time-scale operation optimization framework of IES is built, which includes hybrid resolution modelling and hybrid instruction interval dispatch. The hybrid resolution modelling adopts the model resolution matching with the dynamic process of gas network and heat network to describe the dynamic process of energy flow and balance the model accuracy and problem complexity, which realizes the coordinated optimization of dynamic process of multi-energy system with electricity, gas and heat. The hybrid instruction interval dispatching is focused on the transmission characteristic difference of multiple heterogeneous energy flows and the control characteristic difference of multi-type equipment, considers multiple uncertainties of source / load sides, determines the optimal dispatch instruction interval of each subsystem and realize the coordinated operation of multiple energy subsystems. Case results verify the feasibility of the proposed method.

**Key words:** integrated energy system; network characteristic; control characteristic; hybrid resolution modeling; hybrid instruction interval dispatch