

# 综合能源系统状态估计研究综述

陈艳波<sup>1</sup>, 高瑜珑<sup>1</sup>, 赵俊博<sup>2</sup>, 葛磊蛟<sup>3</sup>

- (1. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;
- 2. 密西西比州立大学电气与计算机学院, 密西西比州 39762;
- 3. 天津大学智能电网教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 综合能源系统(integrated energy system, IES)被誉为未来人类社会能源的主要承载形式。为了保证IES的安全、可靠、优质和经济运行,亟需提出和发展面向IES的能量管理系统(integrated energy system energy management system, IES-EMS)。高性能的IES状态估计(integrated energy system state estimation, IES-SE)可为IES-EMS提供准确可靠的实时运行数据,是IES-EMS各项高级应用正常运行的保证。在当前IES快速发展之际,加快研究面向多能流的IES-SE成为当务之急。首先对IES的构成和特点进行了简要分析;接着对比分析了电力系统SE和IES-SE的异同;然后重点对已有的静态IES-SE模型和方法及动态IES-SE模型和方法进行了剖析;最后,分析了IES-SE领域所面临的挑战,展望了该领域未来可能的研究方向。

**关键词:** 综合能源系统; 多能流系统; 状态估计; 态势感知; 能量管理系统

## Review on Integrated Energy System State Estimation

CHEN Yanbo<sup>1</sup>, GAO Yulong<sup>1</sup>, ZHAO Junbo<sup>2</sup>, GE Leijiao<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Electrical and Computer Engineering, Mississippi State University, 5547 Mississippi State, Mississippi 39762, United States; 3. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The integrated energy system (IES) will play a critical role in ensuring future energy generations and distributions. To ensure the safety, reliability, quality and economical operation of IES, it is urgent to develop the energy management system of IES (IES-EMS). The high performance IES state estimation (IES-SE) can provide accurate and reliable real-time operation data for IES-EMS, and can further benefit other advanced applications. With the rapid development of IES, it is urgent to accelerate the research of IES-SE for multi energy flow. Consequently, this paper provides a comprehensive survey on IES. The structure and characteristics of IES are briefly analyzed first. Then, the similarities and differences between power system SE and IES-SE are analyzed. Finally, the existing static and dynamic IES-SE models and methods are summarized, and the challenges as well as the possible research directions are discussed.

**Key words:** integrated energy system; multi energy flow system; state estimation; situation awareness; energy management system

## 0 引言

人类社会的主要用能形式除了电,还包括气、热/冷等。在传统能源系统中,各类能源系统(电、气、热/冷等)单独规划、单独设计、独立运行,导致能源的整体使用效率不高<sup>[1-3]</sup>。为提高能源的总体使用效率和对可再生能源的消纳能力,对各类能源

系统互联融合和互补集成的需求日益迫切。事实上,电力系统、天然气系统、热力系统等物理特性天然具有互补性(如电能易传输、难存储,热能难传输、易存储,天然气易传输、易存储),同时电、气、热/冷等各类用能负荷之间存在明显的峰谷交错现象,这使得电、气、热/冷等联合系统控制手段更多、调整空间更大、联合运行的经济性更好;另一方面,现实工业生产中的各类能源转化设备(如热电联产(combined heat and power, CHP)、冷热电联产(combined cooling heating and power, CCHP)、电采暖、热泵、电制氢等)也为各类能源之间的互联提供

基金资助项目: 国家自然科学基金(52077076, 51777067); 国家电网公司科技项目(52110418002R)。

Project supported by National Natural Science Foundation of China (52077076, 51777067), Science and Technology Project of SGCC (52110418002R).

了手段。以上原因使得近年来综合能源系统(integrated energy system, IES)/多能流系统成为能源领域的发展趋势<sup>[4-5]</sup>。

在传统的电、热/冷、气等各自领域，均有较为成熟的管理方法和监控手段，但这些管理方法和监控手段尚未统一。随着IES的发展，为了保证IES的安全、可靠、优质和经济运行，对整个IES的精确预测、精当决策、精准控制和精益管理成为必然要求，为此需要提出和构建一套能够实现对多能流进行统一管理和科学调度的IES能量管理系统(integrated energy system energy management system, IES-EMS)。在电力系统领域，由DyLiacco博士在1967年提出的EMS经过半个世纪的发展已趋于成熟。然而，传统EMS仅能对电气量进行管理和调度，而IES-EMS需要对物理特性差异较大的多能流进行控制与管理；其次，传统EMS的数据采集与监控系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)仅可获取电力系统的运行数据，而面向IES-EMS的SCADA需利用物联网技术收集不同能量子系统的所有必需数据<sup>[6]</sup>，这些来自不同子系统的量测数据属于典型的多源异构数据；最后，多能流系统的特点(见下文1.2节)决定了传统EMS中的调控方法无法直接应用于IES-EMS。综上，传统EMS与IES-EMS在调控对象、数据特性、控制方法等方面均有较大差异，进而导致传统EMS无法直接应用于IES。为实现IES的安全、可靠、优质和经济运行，亟需提出和发展面向多能流的IES-EMS<sup>[4]</sup>。

IES-EMS的运行依赖于对IES的全面、实时(并具有一定的预测能力)和精确感知。但是，由IES量测设备直接采集得到的数据在全面性与准确性上无法满足实际应用的需求：一方面量测设备无法覆盖所有节点，另一方面量测量可能由于干扰出现坏数据的情况。而面向多能流的IES状态估计(integrated energy system state estimation, IES-SE)可对原始量测数据进行滤波，剔除量测数据中的坏数据，从而为IES-EMS提供可信的熟数据，即得到IES状态变量的可信值。在此基础上才能实现对多能流的统一管理和科学调度<sup>[7-9]</sup>(如图1所示)。从这个意义上说，面向多能流的IES-SE是IES-EMS的基础和核心。高性能的IES-SE可为IES-EMS提供准确可靠的实时运行数据，是IES-EMS各项高级应用正常运行的保证。在当前IES快速发展之际，加快研究面向多

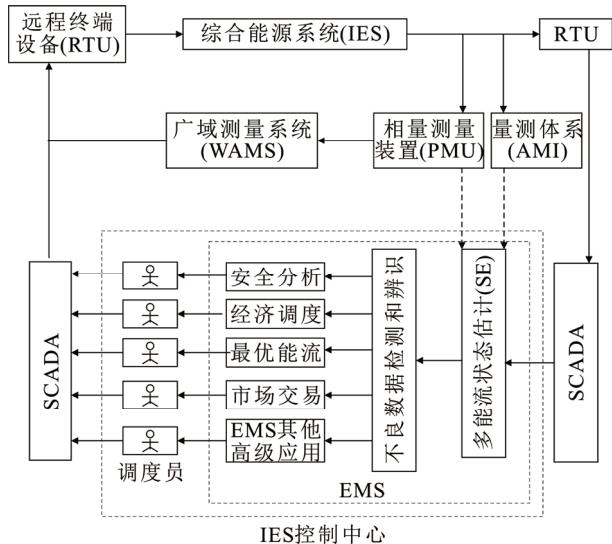


图1 综合能源系统的能量管理系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of energy management system for integrated energy system

能流的IES-SE成为当务之急。

通过研究者和工程人员的不断努力，IES-SE的理论研究不断深入，工程应用日益广泛。迫切需要对IES-SE这一新兴研究领域进行系统的归纳和总结，为IES-EMS提供可信数据保障，不断推动IES的发展，为“双碳”目标作出贡献。文中首先对IES的构成和特点进行了简要分析；接着对比分析了电力系统状态估计(power system state estimation, PS-SE)与IES-SE的异同；然后重点对IES-SE领域已有的模型和方法进行了剖析；最后，提出了IES-SE领域的挑战与展望。

## 1 IES的构成和特点分析

### 1.1 IES的构成

典型的含电、热、气的综合能源系统示意图如图2所示。由图2可见，IES由电力系统、热力系统、天然气系统及作为耦合环节的能源转换设备等组成<sup>[10]</sup>，其中电力系统负责电能的生产、输送、分配和消费；对热力系统而言，热源产生的高温热水经供热网络输送到热负荷处，经过热负荷的散热器后，高温热水变为低温热水，再经回热网络流回热源；天然气系统则负责天然气的生产(由气源产生)、输送(由供气管道完成)和消费(由天然气负荷完成)，为保证压力，天然气系统还需要压缩机；而CHP机组、CCHP机组、电锅炉和燃气锅炉等设备则用以完成不同能源之间的转换。

## 1.2 IES 的特点

分析图 2 所示的 IES 可知, 包含电力系统、热力系统和天然气系统的 IES 主要特点如下<sup>[4]</sup>:

1) 涉及多能域物理量(电、热/冷、气等), 物理定律不统一。由物理学知识可知, 组成 IES 的 3 个主要系统遵循不同的物理学定律。其中, 电力系统遵循电磁学定律和电路定律; 热力系统(供热/供冷系统)包含水力模型和热力模型, 遵循流体力学定律和热力学定律<sup>[11-12]</sup>; 天然气系统则遵循流体力学定律<sup>[13-14]</sup>。

2) 多能流耦合, 物理上具有高度异质性。电力系统、热力系统和天然气系统的物理特性差异较大, 它们属于多类异质能流系统, 通过 CHP、CCHP、电采暖、热泵、电制氢等设备耦合在一起。

3) 各子系统时间尺度不同(如图 3 所示), 具有不同的动态过程。电力系统的时间常数最小, 变化速度最快; 热力系统的时间常数最大, 变化速度最慢; 天然气系统的时间常数和变化速度居中, 进而导致 IES 呈现多时间尺度特性。

4) 各子系统分属不同的管理主体, 存在行业壁垒。组成 IES 的 3 个主要系统目前分属不同的公司和管理主体, 存在信息隐私、操作差异和目标差异等行业壁垒问题<sup>[4]</sup>, 进而给综合管理和调度带来挑战。当然对于园区 IES, 这一特点会弱化。

## 2 IES-SE 与其余系统 SE 的对比分析

PS-SE 和其余系统 SE 均属于系统辨识的范畴, 它们的数学基础类似, 这决定了其余系统 SE 领域已取得的成果对 IES-SE 的研究具有重要的启发意义; 但这并不意味着其余系统 SE 的模型和方法可直接应用于 IES-SE, 其原因在于 IES 自身的特点与电力系统、热力系统和天然气系统本身有一定差异。本章对 IES-SE 与 3 种系统 SE 进行对比分析。

### 2.1 均包括静态方法和动态方法

众所周知, PS-SE 包括静态方法和动态方法, 后者涉及发电机的动态过程, 发电机动态特性用常微分方程描述<sup>[15-16]</sup>。

与 PS-SE 类似, IES-SE 也包括静态方法(integrated energy system static state estimation, IES-SSE)和动态方法(integrated energy system dynamic state estimation, IES-DSE)。当 IES 处于稳态或准稳态时, 可采用 IES-SSE 进行建模, 此时组成 IES 的各子系统及耦合设备的特性均用代数方程描述;

此外, IES-SSE 的估计结果也可作为 IES-DSE 的初值。由于组成 IES 的各子系统时间尺度不同(如图 3 所示), 故 IES-DSE 比 IES-SSE 的适用范围更广。在实际运行中, 电力子系统的运行时间尺度为秒级至分钟级; 天然气子系统的运行时间尺度为分钟级至小时级; 热力子系统的运行时间尺度为小时级至天级。因此, 在 IES-DSE 建模时通常以电力系统的运行时间尺度为基准, 可将电力子系统视为稳态, 用代数方程来描述; 而天然气系统和热力系统仍处于动态变化过程中, 用偏微分方程描述<sup>[17-19]</sup>。

## 2.2 状态变量、量测量、量测方程及状态转移方程不同

PS-SE 的状态变量为节点电压复相量和发电机动态变量, 量测量通常包括节点电压、节点注入功率、支路功率、发电机的动态变量等; 热力系统状态变量包括节点压强、节点供热温度和节点回热温度, 量测量为节点压强、节点注入流量、节点供热温度、节点回热温度、支路流量和节点注入热功率;

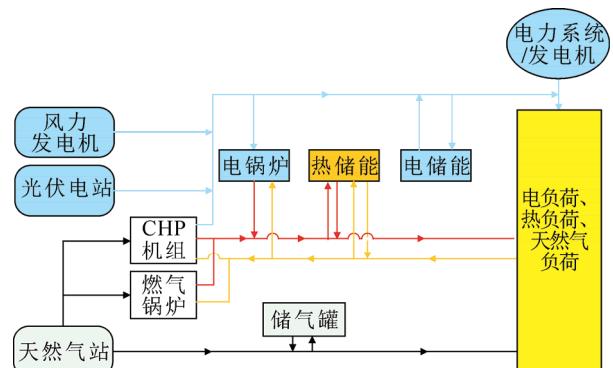


图 2 含电、热、气的综合能源系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of an integrated energy system with electricity, heat and gas

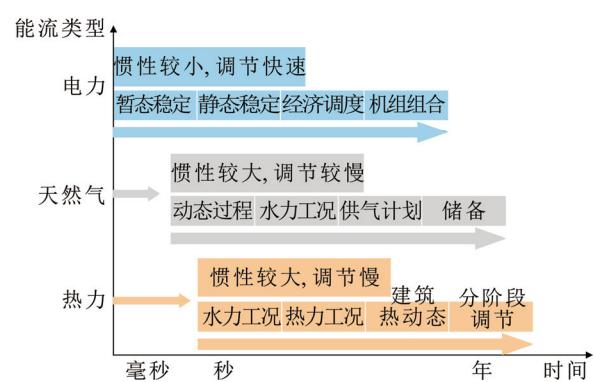


图 3 综合能源系统多时间特性尺度示意图

Fig.3 Schematic diagram of multiple time scale characteristics of IES

天然气系统状态量为节点压强, 量测量为节点压强、节点负荷流量和支路流量。IES-SE 中的状态变量除了电力子系统的节点电压复相量外, 还包括天然气子系统中的压强、热力子系统的压强(或流量)和温度。IES-SE 中的量测量除了包括电力子系统中的量测外, 还应包括天然气子系统中压强和流量以及热力子系统的压强、流量和温度等。

状态变量和量测量的不同导致 3 种系统 SE 和 IES-SE 的量测方程形式不同。除了量测方程外, 组成 IES 的天然气子系统和热力子系统还包括转移转移方程, 一般来说, 热力模型的状态转移方程可用 3 个偏微分方程来表示: 动量方程、物质平衡方程和能量方程<sup>[17-19]</sup>; 天然气的状态转移方程同样可用 3 个方程来表示: 动量方程(偏微分方程)、物质平衡方程(偏微分方程)和状态方程(代数方程)<sup>[17-19]</sup>。

### 2.3 IES-SE 需要处理耦合设备

电力系统中仅涉及同质设备, 故 PS-SE 不涉及耦合设备处理问题, 天然气系统与热力系统同理。由图 2 可知, IES 包含多种耦合设备, 故在 IES-SE 模型中, 必须通过耦合设备模型才能将组成 IES 的不同子系统中的多类异质能流模型关联起来, 从而为统一估计奠定基础。

### 2.4 均包括集中式估计方法和分布式估计方法

天然气系统与热力系统 SE 主要是集中式估计方法。PS-SE 包括集中式估计方法和分布式估计方

法, 后者的提出可提高集中式估计的计算效率。IES-SE 同样包括集中式估计方法和分布式估计方法。对于统一管理的园区 IES, 一般具有集中数据能量管理中心, 其能量管理中心可获得各个子系统的信息, 可实施程序设计相对简单的集中式 IES-SE; 当 IES 不具有数据集中中心时, 由于各子系统分属不同的管理主体, 存在行业壁垒, 为保证信息安全性与隐私性, 无法进行所有信息的实时交互, 仅可对耦合区域信息进行共享, 此时集中式 IES-SE 方法不适用, 需采用分布式 IES-SE 方法。

以上关于 3 种系统 SE 与 IES-SE 的对比总结于表 1, 进一步表明, IES-SE 与其余系统 SE 的模型和方法不同, 必须进行深入研究。

## 3 IES-SE 的研究现状分析

本章从 IES-SE 可观测性分析、热力系统和天然气系统 SE 研究现状、IES-SSE、IES-DSE 等方面, 讨论 IES-SE 已取得的成果。

### 3.1 IES-SE 可观测性分析

和 PS-SE 一样, IES-SE 计算离不开可观测性分析。在 IES 规划建设阶段, 可观测性分析可为 IES 的量测配置提供建议, 而在 IES-SE 软件系统布置之后, 需在实时 IES-SE 运行之前进行可观测性分析以找到可观测的子系统, IES-SE 仅对满足可观测性的子系统进行。

表 1 IES-SE 与其余系统 SE 的对比分析

Table 1 Comparison of SE of other systems and IES-SE

估计算法	对比项目	状态变量	量测量	量测方程形式	状态转移方程形式	耦合设备	集中和分布
均包括静态估计算法和动态估计算法	PS-SE	发电机动态变量及节点电压复相量	发电机的动态变量、节点电压幅值和相角、节点注入功率(包括有功和无功)、支路功率	代数方程	常微分方程	无耦合设备	集中式估计为主; 也有分布式估计
	天然气系统 SE	节点压强(或支路流量)	节点压强、节点负荷流量和支路流量	代数方程	偏微分方程	无耦合设备	以集中式估计为主
	热力系统 SE	节点压强(或支路流量)、节点供热温度和节点回热温度	节点压强、节点注入流量、节点供热温度、节点回热温度、支路流量、节点注入热功率等	代数方程	偏微分方程	无耦合设备	以集中式估计为主
IES-SE	除了电力子系统中的状态变量外, 还包括热力子系统压强(或流量)和温度以及天然气系统压强(或流量)	除电力子系统中的量测外, 还应包括天然气子系统中压强和流量以及热力系统的压强、流量和温度等	代数方程	偏微分方程	须处理众多耦合设备	园区 IES 可用集中式估计; 其他 IES 须用分布式估计	

对 IES-SSE 来说, 容易得出适用于电力系统静态 SE 可观测性分析的数值法<sup>[20-21]</sup>、图论法<sup>[22-23]</sup>和混合法<sup>[24-25]</sup>均可推广到 IES-SSE 中。对 IES-DSE 来说, 其可观性分析的本质是需要判断用微分代数方程描述的量测系统是否满足可观性。适用于电力系统动态 SE 可观测性分析的近似线性化法或李导数法<sup>[26-27]</sup>有望推广到 IES-DSE 的可观测性分析。杨晓楠、郎燕生等提出了一套面向电-气 IES 可观测性分析方法<sup>[28]</sup>, 此法属于近似线性化法。

### 3.2 热力系统和天然气系统 SE 研究现状

热力系统包含水力模型和热力模型, 因此严格的热网 SE 应对这两个模型都予以建模。文献[29]对水管网络进行 SE 建模和计算, 并带有不良数据辨识环节和漏水检测。文献[30]首先使用预测-校正方法对城市未来的用水需求进行预测, 然后使用改进的最小二乘法进行水管网络的 SE 计算。文献[31]运用最小绝对值法对水管网络进行 SE 计算。显然, 文献[29-31]都未对热力模型进行建模。文献[32]利用用户端的量测量, 采用启发式 SE 对热力系统进行估计, 但未考虑热网约约束, 且量测不存在冗余, 并不是严格意义上的热网 SE。对于天然气系统, 文献[33-34]对天然气管道构建动态模型, 然后使用卡尔曼滤波法进行 SE 计算。文献[35]提出了一种面向天然气系统的基于统一能路理论的动态 SE 模型。

综上, 电力系统 SE 的理论研究和工程实践已较为成熟, 热力系统和天然气系统 SE 的理论研究和工程实践也有一定成果, 但以上研究均为单一能域下的 SE 模型和方法, 不能直接应用于面向多能流的 IES-SE。

### 3.3 综合能源系统静态状态估计方法(IES-SSE)

#### 3.3.1 加权最小二乘估计

董今妮、孙宏斌等提出了将经典加权最小二乘估计方法(weighted least square, WLS)运用于电-气 IES-SE 和电-热 IES-SE<sup>[36-37]</sup>。以上方法可表示为

$$\begin{cases} \min J(\mathbf{x}) = (\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}))^\top \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})) \\ \text{s.t. } \mathbf{c}(\mathbf{x}) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $J(\mathbf{x})$  为目标函数;  $\mathbf{x}$  为 IES-SSE 状态向量, 包括电力系统的节点电压幅值和相角、热力系统的压强(或流量)和温度及天然气系统的压强;  $\mathbf{z}$  为 IES-SSE 量测向量;  $\mathbf{h}(\mathbf{x})$  为量测表达式;  $\mathbf{R}^{-1}$  为权重对角矩阵;  $\mathbf{c}(\mathbf{x})=0$  为零注入节点伪量测约束。

基于 WLS 的 IES-SSE 模型相对简洁、计算方法简单, 且在系统初值适当的情况下具有良好的收敛性。

但这种方法存在以下 4 方面局限性: (1)WLS 本身不具有抗差性, 通常在 WLS 运行之后利用最大正则化残差法(largest normal residual, LNR)对不良数据进行辨识, 但是 WLS+LNR 对强相关性的多不良数据辨识能力有限; (2)WLS 对初值要求严格, 初值选取不当可能会造成 IES-SE 雅可比矩阵病态, 进而无法得到合理结果; (3)WLS 在数学上属于非凸优化问题, 从理论上无法确保获得全局最优解; (4)WLS 在计算中涉及非线性迭代, 计算效率还不够高。

#### 3.3.2 加权最小绝对值估计

陈艳波、郑顺林等将抗差估计方法中的加权最小绝对值方法(weighted least absolute value, WLAV)应用于电-气 IES-SE<sup>[38]</sup>, 并使用拉格朗日乘数法对模型进行求解, 证实了基于 WLAV 的电-气 IES-SE 具有良好的抗差性。该方法可以表示为

$$\begin{cases} \min J(\mathbf{x}) = \boldsymbol{\omega}^\top |\boldsymbol{\varepsilon}| \\ \text{s.t. } \begin{cases} \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}) \\ \mathbf{c}(\mathbf{x}) = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\boldsymbol{\omega}$  为此时的量测权重向量;  $\boldsymbol{\varepsilon}$  为残差向量。

基于 WLAV 的电-气 IES-SE 方法具有良好的抗差性, 可以有效辨识强相关的多不良数据, 但是其求解过程计算量大、计算效率低, 进而限制了该方法在大规模 IES 中的在线应用。

#### 3.3.3 双线性抗差状态估计

为提高基于 WLAV 的电-气 IES-SE 模型的计算效率, 陈艳波、郑顺林等进一步提出了基于 WLAV 的双线性抗差状态估计(bilinear weighted least absolute value, BWLAV)模型并应用于电-气 IES-SE<sup>[39]</sup>。该方法的核心思想在于通过两次状态变量的变换, 使得 IES 的原始非线性量测方程转换成线性量测方程, 进而将 IES-SE 建模为双层 SE 模型, 其中第 1 层为线性 WLAV 模型, 第 2 层为线性 WLS 模型。

基于 BWLAV 的电-气 IES-SE 方法在保证强抗差性的同时提高了计算效率, 更有利于在工程实际中应用。但是不足之处在于双线性变换会增加状态变量的个数、减少整个状态估计模型冗余度, 导致估计精度相较于 WLS 有所降低。

#### 3.3.4 改进 BWLAV 估计

针对 BWLAV 量测冗余度不足的问题, 陈艳波等进一步提出了改进 BWLAV 方法并应用于电-热

IES-SE<sup>[40]</sup>, 其基本思想是通过在原始 BWLAV 模型中引入用辅助变量表示的约束条件以等效弥补量测冗余度的损失; 为保证模型的凸性, 在求解过程中将该二次等式约束松弛为二阶锥不等式约束, 进而构建基于二阶锥规划的电–热 IES 抗差 SE 模型。

改进 BWLAV 方法在保证良好抗差性及计算效率的同时, 通过增加约束弥补了量测冗余度, 使得其量测冗余度等同于基于非线性 WLS 的 IES-SE, 从而保证了估计精度。

### 3.3.5 基于交替方向乘子法的分布式 IES-SE

第 3.3.1 节到第 3.3.4 节中所述方法均为集中式 IES-SE 方法, 适用于具有集中数据能量管理中心的区域型 IES。当 IES 不具有数据集中中心时, 需采用分布式 IES-SE 方法。

为此, 张文等提出基于交替方向乘子法 (alternating direction method of multipliers, ADMM) 的分布式电–热–气 IES-SE<sup>[41]</sup>, 该模型采用双线性变换将非线性量测方程线性化, 然后通过 ADMM 算法将基于 WLS 的 IES-SE 转化成分布式 SE。与集中式 IES-SE 方法相比, 基于 ADMM 的分布式 IES-SE 可解决 IES 各子系统存在行业壁垒的问题, 因此适用范围更广。但是以上分布式 IES-SE 基于 WLS 构造, 抗差性能有限; 且在 IES 耦合元件数量增多时精度有所下降, 因此此法在应用于耦合元件较多的大规模 IES 时需要进一步改进。

### 3.3.6 IES-SSE 总结

综上, 目前对于 ISE-SSE 的研究还有如下问题亟待解决: (1)在集中式 IES-SSE 和分布式 IES-SSE 模型中, 热网的冗余度均较低, 影响了 IES-SSE 的整体估计精度和数值稳定性; (2)现有的分布式 IES-SSE 模型仍不具备抗差性, 未来需要提出具有良好抗差性的分布式 IES-SSE 模型和方法。

以上关于 IES-SSE 的研究现状分析总结于表 2。

## 3.4 综合能源系统动态状态估计方法(IES-DSE)

### 3.4.1 天然气系统和热力系统动态模型处理方法

在 IES-DSE 中, 天然气子系统和热力子系统的动态模型通常由一系列的偏微分方程构成, 直接进行求解比较困难。目前主要有“有限元法”、“管存模型法”和“复频域法”3 种简化处理方法。

#### (1) 有限元法

有限元法的核心思想在于将天然气系统和热力系统的一系列偏微分方程转化为用差分方程表示的代数形式。对于天然气系统, 杨经纬、康重庆等

表 2 综合能源系统静态状态估计方法对比

Table 2 Comparison of static state estimation methods for integrated energy system

IES-SSE 方法	优点	缺点
基于 WLS 的方法 <sup>[36-37]</sup>	模型相对简单; 在初值适当情况下具有良好的收敛性	对初值要求严格; 不具备抗差性; 难以获得全局最优解; 计算效率不高
集中式估计方法 <sup>[38]</sup>	具有抗差性, 可以对强相关不良数据进行辨识	计算量大, 计算效率低
基于 BWLAV 的方法 <sup>[39]</sup>	在保证抗差性的同时, 提高了计算效率	牺牲了量测冗余度, 精度较低
改进 BWLAV 方法 <sup>[40]</sup>	具有抗差性; 计算效率高; 量测冗余度得到补偿, 精度较高	对量测量权重取值敏感
分布式估计方法 <sup>[41]</sup>	计算效率高; 无需进行信息共享, 信息隐私性、安全性强	不具备抗差性; 系统耦合元件增多时, 精度有所降低

采用 Euler 差分法将描述天然气系统的偏微分方程转化为代数方程<sup>[42]</sup>, 进而提出了一种电–气 IES 的鲁棒调度模型; 陈艳波、姚远等采用 Lax-Wendroff 差分方法对描述天然气系统的偏微分方程进行化简<sup>[43]</sup>, 进而提出了一种基于扩展卡尔曼滤波的电–气 IES-DSE。对于热力系统, 周守军、田茂诚等采用逆步法对描述热力系统的偏微分方程进行差分<sup>[44]</sup>; 张文等通过 Lax-Wendroff 差分方法对描述热力系统的偏微分方程进行化简<sup>[45]</sup>, 进而提出一种基于容积卡尔曼滤波的电–热 IES 动态状态估计方法。

有限元法的优点在于当差分步长足够小时有良好的计算精度; 不足之处在于物理意义不够清晰, 且当系统状态变量发生突变时其精度会下降。

#### (2) 管存模型法

管存模型法通过将连续“流”按照时间顺序差分成若干个离散的“块”, 从而将偏微分方程转化为代数方程。对于天然气系统, 乔铮、郭庆来等提出了一种基于管存模型法的天然气系统多时段优化配置与调度模型<sup>[46]</sup>; 王程、魏巍等用管存模型法描述天然气系统<sup>[47]</sup>, 进而提出了一种电–气 IES 鲁棒调度模型; Allti Benonysson 首次在热力系统中提出管存模型法<sup>[48]</sup>。

与有限元法相比, 管存模型法具有更加明确的物理意义, 便于理解, 且计算效率更高; 但因无法准确描述管道两端压力与流量的关系而使得其精度还不够高。

### (3) 统一能路法

统一能路法的核心思想在于参考电路中“场”、“路”的理论, 提出适用于天然气系统与热力系统的统一方法。陈彬彬、孙宏斌等通过傅里叶变换构造了频域下的天然气系统模型<sup>[49]</sup>, 提出了一种统一能路的概念。杨经纬、康重庆等通过拉普拉斯变换构造了频域下的热力系统模型<sup>[50]</sup>。陈彬彬、孙宏斌等提出了一种热力系统的统一能路方法<sup>[35]</sup>。

统一能路法的物理意义更为明确, 对多能域物理量统一的物理机理和物理定律进行探索, 有助于推进对电-热-气 IES 系统的统一建模。表 3 对前述动态建模方法进行了比较总结。

### 3.4.2 现有的 IES-DSE 模型

#### (1) 基于 WLS 的 IES-DSE 方法

郭庆来、孙宏斌等提出了一种基于 WLS 的两阶段电-热 IES-DSE 方法<sup>[51]</sup>, 在第 1 阶段进行稳态状态下的 IES-SSE 计算, 第 2 阶段选取最近一次的历史数据作为初值进行动态状态估计计算。李志刚等提出了一种基于 WLS 的分布式电-热 IES-DSE 模型<sup>[52]</sup>, 并提出采用异步 ADMM 算法对模型进行求解, 具有较高的计算效率。郭庆来等提出了基于 WLS 的双时间尺度顺序的电-热 IES 状态估计模型<sup>[53]</sup>。董雷、王春斐等提出了一种多时间断面的电-气 IES-DSE 方法<sup>[54]</sup>。

综上, 基于 WLS 的 IES-DSE 方法的核心思路在于求解出描述系统的偏微分方程的解后, 按一定的时间顺序对不同子系统进行状态估计计算。

#### (2) 基于卡尔曼滤波的 IES-DSE 方法

陈艳波、姚远等提出了一种基于扩展卡尔曼滤波的电-气 IES-DSE 方法<sup>[43]</sup>, 此法采用 Lax-Wendroff 差分方法对描述天然气系统的偏微分方程进行化简, 并通过线性外推法和线性内推法生成伪量测数据以解决电力系统与天然气系统采样周期不同的问题, 最后通过扩展卡尔曼滤波法进行状态估计, 大幅度提高了状态估计的精准度。张文等提出了一种基于容积卡尔曼滤波的异步分布式电-热 IES-DSE 方法<sup>[45]</sup>。刘鑫蕊、李垚等提出了一种基于无迹卡尔曼滤波的电-热-气 IES-DSE 方法<sup>[55]</sup>, 此法采用有限元法对天然气系统近似求解, 对热力系统构建管存模型, 最后通过无迹卡尔曼滤波对所提的多时间尺度顺序的电-热-气 IES 状态估计模型进行求解。

综上, 基于卡尔曼滤波的 IES-DSE 在建模时, 一般首先采用有限元法等将天然气、热力系统的动

态模型转化为代数方程, 然后采用各种卡尔曼滤波算法进行 IES-DSE 计算。这类方法对 IES 的多时间尺度特性具有良好的适用性, 不足之处在于计算量较大、计算效率尚需提高。

### 3.4.3 IES-DSE 总结

综上, 目前对 IES-DSE 的研究才刚刚起步, 存在以下问题亟待解决: (1)现有的 IES-DSE 方法均不具备抗差性, 亟需提出具有良好抗差性的 IES-DSE; (2)现在的 IES-DSE 方法未考虑量测时延, 这不符合 IES 的多时间尺度特性所带来的量测时延特性; (3)现有的 IES-DSE 模型的计算效率还不够高, 无法满足在线应用需求。表 4 对前述 IES-DSE 方法进行了总结。

## 4 综合能源系统状态估计的挑战与展望

IES-SE 问题引起了研究者和工程人员日益广泛的关注, 本章在归纳总结文中所综述内容的基础上, 探讨 IES-SE 所面临的前沿挑战, 并对这一领域未来的研究和应用进行展望。本章归纳的挑战与展望共分 7 个方面, 如图 4 所示。

表 3 天然气系统和热力系统动态模型处理方法

Table 3 Processing method for dynamic model of natural gas system and thermal system

方法	优点	缺点
有限元法 <sup>[42-45]</sup>	差分步长足够小时, 具有良好的计算精度	物理意义不明确; 系统状态变量发生突变时精度会下降, 计算效率较低
管存模型法 <sup>[46-48]</sup>	有明确的物理意义; 计算量相对减少, 计算效率高	计算精度较低
统一能路法 <sup>[35,49-50]</sup>	搭建异质能源之间的统一模型, 具有清晰的物理含义; 大幅提高计算效率	相较于有限元法计算精度略有下降

表 4 综合能源系统动态状态估计方法

Table 4 Integrated energy system dynamic state estimation methods

方法	说明	优缺点
基于 WLS 的 IES-DSE 方法 <sup>[51-54]</sup>	对描述系统的偏微分方程求解后, 按一定时间顺序基于 WLS 进行状态估计	(+)模型简单; 收敛性好; (-)抗差性不足
卡尔曼滤波估计 <sup>[43,45,55]</sup>	对描述系统的偏微分方程进行差分后, 通过卡尔曼滤波方法进行估计	(+)对多时间尺度有良好适用性; (-)计算量大、计算效率低

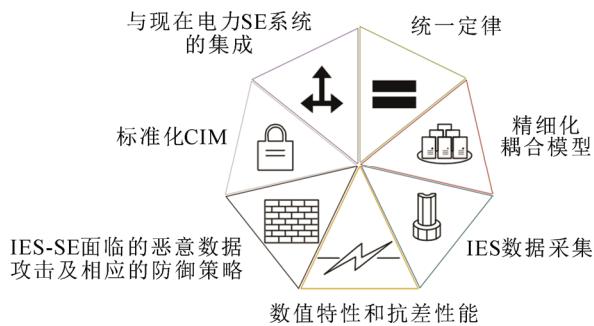


图 4 综合能源系统状态估计的挑战与展望

Fig.4 Challenge and prospect of state estimation for integrated energy system

#### 4.1 统一的物理机理和物理定律

IES 包含多能域物理量(电、热/冷、气等)，对 IES 进行建模和分析时，若简单地用电磁学定律和电路定律、热力学定律、流体力学定律分别对电力系统、热力系统和天然气系统进行建模，再拼装为统一的网络方程(潮流方程、量测方程等)，则无法体现多能域物理量(电、热/冷、气等)传递、耦合和转换的普遍规律；而遵循不同物理定律的电力系统、天然气系统和热力系统在物理上具有高度异质性，属于多类异质能流系统，多能流系统在物理上的高度异质性会造成所得到的数学模型具有高度异构性，进一步造成所构建的 SE 模型往往具有病态性、抗差能力不强、计算效率低等问题以及在多能流建模过程中存在繁琐的量纲转化问题。为此，这一领域首先需要解决的问题为：能否从理论上揭示电、热/冷、气、机械等多能域物理量统一的物理机理和物理定律？即要从更深、更广的层次上研究多能域物理量(电、热/冷、气、机械等)传递、耦合和转换的普遍规律，从而清晰地反映多能流系统的跨能域耦合机制及全局动力学特性，并解决多能流系统在数学上的高度异构性问题。这不仅是构建数值稳定性好、抗差能力强、计算效率高的综合能源系统动态 SE 需要解决的首要科学问题，也是其他多能流规划分析、运行分析和控制策略制定等研究需要解决的首要科学问题。

文献[56]对此问题进行了研究，但相关研究尚未充分展开。文献[49]中提出的统一能路理论及文献[57-58]提出的广义电路分析理论为解决以上问题提供了很好的思路。此外，建立在能量守恒定律基础上的键合图理论，通过把多能域物理量(电、热/冷、气、机械等)统一归纳为势、流、位移和动量等

变量，并通过广义功率流把系统中的能量参数与元件参数统一起来，从而可从理论上揭示电、热/冷、气、机械等多能域物理量得以统一的物理机理和物理定律，并可清晰地反映多能流系统的跨能域耦合机制及全局动力学特性。因此也有望基于键合图理论解决以上问题。

#### 4.2 精细化耦合模型

IES 由多类异质能流系统耦合组成。已有的 Energy Hub 模型虽然可以表示多种能量之间的转换和耦合关系等，但它是高度抽象的简化模型，不能精确地刻画多种能量之间转换和耦合的复杂特性(如仅能反映电力系统和其他系统之间的有功交互，而不能反映无功交互)。换言之，已有工作在研究一个系统的运行特性时，常将与其相关联的其他系统作为边界条件、约束条件或输入处理，这种处理方法仅能反映相连系统对所研究系统的单向作用，难以精确刻画互联系统的双向、动态、非线性交互影响，这将影响到 IES-SE 模型的数值稳定性、估计精度和计算效率等。

综上，现有 IES-SE 方法采用的耦合元件仍是粗糙、高度抽象的简化模型，并不能准确刻画耦合元件的能量交互与动态过程。因此，对 IES 耦合元件的精细化建模也是未来亟需解决的关键性问题。

#### 4.3 IES 的数据采集

在电力系统领域，EMS 利用 SCADA、广域量测系统(wide area measurements system, WAMS)等提供的实时数据完成对系统的闭环(或半闭环)控制，以实现电力系统运行的安全性、可靠性、优质性和经济性，即在电力系统中已有相当成熟的数据采集设备。相较于电力系统，天然气系统与热力系统的数据采集并不是十分成熟，数据的精度相对较差<sup>[59-60]</sup>。天然气系统与热力系统在数据采集中，目前还存在着依赖人工抄表的现象，还没有实现自动化，进而导致采集到的数据精度较低，不利于管理与调度。同时，天然气系统与热力系统的量测冗余度也较低，在一定程度上会降低 IES-SE 的精度。

为保证 IES-SE 所得结果的可靠性，未来亟需开发面向天然气系统与热力系统的高精度数据采集设备和稳定数据传输手段，从而为 IES-SE 提供更为准确的原始量测数据。此外，组成 IES 的不同子系统量测设备的采样频率可能不一致，此时需要通过插值的方法来进行量测量的对齐，从而保证 IES-SE 的可观性。

#### 4.4 数值特性和抗差性能

IES 在物理上的高度异质性、多时间尺度所导致的量测时延等会导致 IES-SE 在数学上的高度异构性。与单纯的 PS-SE 相比, IES-SE 模型在数学上往往更为病态, 进而影响到 IES-SE 模型的数值稳定性、估计精度和计算效率等。已有 IES-SE 研究在数值稳定性、抗差性能、估计精度和计算效率方面还需要进一步改进和提高。特别是到目前为止已提出的 IES-DSE 模型尚不具备抗差性能, 而考虑量测时延的 IES-DSE 方法还未有报道。

其次, IES 的特点使得分布式 IES-SE 方法比集中式 IES-SE 方法可能更为适用。如何对 IES 各子系统的信息进行有效协调, 从而提高分布式 IES-SE 方法的抗差性能、数值稳定性、对量测时延和对异常通信的适应性等, 是值得深入研究的方向。

此外, 现有的 IES-SE 大多是基于模型驱动的方法, 需要求解复杂的非线性优化问题, 导致其计算规模大、计算效率低; 采取数据驱动的方法可以有效解决模型驱动的不足<sup>[61]</sup>。可考虑将新一代人工智能应用于 IES-SE, 提出基于数据驱动的 IES-SE 方法, 以大幅度提高计算效率。

#### 4.5 IES-SE 面临的恶意数据攻击及相应的防御策略

已有研究表明, 黑客可以通过精心设计攻击策略来影响 PS-SE 的结果<sup>[62-63]</sup>或通过影响电价而获益<sup>[64-65]</sup>。事实上, 包括天然气系统在内的 IES 也极易遭受恶意攻击进而导致严重后果<sup>[66-67]</sup>。

为保证 IES-SE 运行结果的可靠性以及 IES 中市场交易行为的安全性, 未来一方面需要深入研究针对 IES-SE 和面向 IES 市场交易行为的恶意攻击策略, 另一方面需要深入研究以上恶意攻击策略的检测和辨识方法以及 IES 应该实施的主动防御策略。

#### 4.6 面向 IES 的标准化公共信息模型

由图 2 可见, IES 涉及众多设备, 除了电力系统设备, IES 中还包括供热/冷设备、供热/冷辅助设备、储能设备、新能源设备、燃气主设备、燃气辅助设备及管网设备等。这些设备由不同制造商依据不同的标准来制造, 目前尚缺乏 IES 设备的统一标准; 此外, 在开发 IES-SE 或 IES-EMS 系统时, 不同的开发商目前还处于自定义设备模型阶段, 尚缺乏面向 IES 的公共信息模型(common information model, CIM), 这不利于不同开发商独立开发的 IES-SE 和 IES-EMS 应用的集成, 也不利于多个独立开发商开发的完整 IES-EMS 系统之间的集成, 更

不利于 IES-SE 和 IES-EMS 的市场化推广应用。为此, 需要尽快研究面向 IES 的标准化 CIM, 从而为包括 IES-SE 在内的 IES-EMS 的实际应用和市场化推广扫除障碍。

#### 4.7 与现在电力 SE 系统的集成

对于已经布置了电力系统 SE 软件的 IES(如将已有的电力系统改造为 IES)来说, 由于 IES-SE 的数值稳定性较差, 故可考虑将 IES-SE 软件设计为独立的系统, 此时电力系统 SE 的运行结果可为 IES-SE 提供一个很好的初值。而对于新建的 IES 来说, 电力系统中成熟的 SCADA 和 SE 运行和维护经验均可推广到 IES 中。

此外, 考虑到 IES-SE 程序与常规电力系统 SE 程序相比有不少源码和数据结构类似, 故在软件设计和开发中应充分考虑代码的复用性, 提高软件的效率和质量。

### 5 结论

IES 可提高能源的总体使用效率和对可再生能源的消纳能力, 逐渐成为世界各国的关注热点, 未来很有可能成为能源领域的战略高地。为了 IES 的安全、可靠、优质和经济运行, 厥需提出和发展面向多能流的 EMS。高性能的 IES-SE 可为 IES-EMS 提供准确可靠的实时运行数据, 是 IES-EMS 各项高级应用正常运行的保证。

文中总结了该领域现有研究成果, 根据综合能源系统的构成, 分析了综合能源系统的特点; 然后对比分析了电力系统状态估计和综合能源系统状态估计的异同; 在此基础上, 总结了已有的综合能源系统静态状态估计模型和方法以及综合能源系统动态状态估计模型和方法; 最后, 文中分析了这一领域目前面临的挑战, 并对未来的研究方向进行展望, 对当前需要解决的关键问题进行剖析, 希望能为后续研究提供借鉴。

### 参考文献 References

- [1] JIN H G, HONG H, WANG B Q, et al. A new principle of synthetic cascade utilization of chemical energy and physical energy[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2005, 48(2): 163-179.
- [2] BIROL F. World energy outlook 2010[R]. Paris, France: International Energy Agency, 2010.
- [3] 徐宪东. 电/气/热微型能源系统的建模、仿真与能量管理研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- XU Xiandong. Modelling, simulation, and energy management research for electricity, gas and heat based micro energy system[D].

- Tianjin, China: Tianjin University, 2014.
- [4] 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, 16.  
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, 16.
- [5] STANISLAV P, BRYAN K, TIHOMIR M. Smart grids better with integrated energy system[C]//2009 IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC). Montreal, Canada: IEEE, 2009: 1-8.
- [6] SUN H B, GUO Q L, ZHANG B M, et al. Integrated energy management system: concept, design, and demonstration in China[J]. IEEE Electrification Magazine, 2018, 6(2): 42-50.
- [7] 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): 93-101.  
ZHANG Shuting, LU Hai, LIN Xiaojie, et al. Operation scheduling optimization of integrated-energy system in industrial park in consideration of energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 93-101.
- [8] 李更丰, 别朝红, 王睿豪, 等. 综合能源系统可靠性评估的研究现状及展望[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 114-121.  
LI Gengfeng, BIE Zhaohong, WANG Ruihao, et al. Research status and prospects on reliability evaluation of integrated energy system[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 114-121.
- [9] 魏震波, 郭毅, 魏平桉, 等. 基于 IGDT 的电-气互联综合能源系统多目标扩展规划模型[J/OL]. 高电压技术: 1-12[2021-05-17]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20201730>.  
WEI Zhenbo, GUO Yi, WEI Pingan, et al. An IGDT based multi-objective expansion planning model for integrated natural gas and electric power systems[J/OL]. High Voltage Engineering, 1-12[2021-05-17]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20201730>.
- [10] 王英瑞, 曾博, 郭经, 等. 电-热-气综合能源系统多能流计算方法[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 2942-2950.  
WANG Yingrui, ZENG Bo, GUO Jing, et al. Multi-energy flow calculation method for integrated energy system containing electricity, heat and gas[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2942-2950.
- [11] LIU X. Combined analysis of electricity and heat networks[D]. Cardiff, UK: Cardiff University, 2013.
- [12] ZHAO H. Analysis, modeling and operational optimization of district heating systems[D]. Lyngby: Technical University of Denmark, 1995.
- [13] 江茂泽, 徐羽铿, 王寿喜, 等. 输配气管网的模拟与分析[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.  
JIANG Maoze, XU Yutang, WANG Shouxi, et al. Simulation and analysis of gas transmission and distribution network[M]. Beijing China: Petroleum Industry Press, 1995.
- [14] 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.
- [15] ZHAO J B, WANG S B, HUANG R K, et al. Robust adaptive decentralized dynamic state estimation with unknown control inputs using field PMU measurements[C]//2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Montreal, Canada: IEEE, 2020: 1-5.
- [16] ZHAO J B, GÓMEZ-EXPÓSITO A, NETTO M, et al. Power system dynamic state estimation: motivations, definitions, methodologies, and future work[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 3188-3198.
- [17] 约翰 D. 安德森. 计算流体力学基础及其应用[M]. 吴颂平, 刘赵森, 译. 北京: 机械工业出版社, 2007.  
ANDERSON J D. Computational fluid dynamics[M]. WU Songping, LIU Zhaomiao, translated. Beijing, China: China Machine Press, 2007.
- [18] 马喜成. 集中供热管网动态特性分析及热瞬态预测研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2011.  
MA Xicheng. Dynamic characteristics analysis and thermal transient prediction about centralized heating network[D]. Taiyuan, China: Taiyuan University of Technology, 2011.
- [19] 陆昌根. 流体力学中的数值计算方法[M]. 北京: 科学出版社, 2014.  
LU Changgen. Numerical methods in fluid mechanics[M]. Beijing, China: Science Press, 2014.
- [20] WU F F, MONTICELLI A. Network observability: theory[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, PAS-104(5): 1042-1048.
- [21] MONTICELLI A, WU F F. Network observability: identification of observable islands and measurement placement[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(5): 1035-1041.
- [22] KRUMPHOLZ G R, CLEMENTS K A, DAVIS P W. Power system observability: a practical algorithm using network topology[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, 99(4): 1534-1542.
- [23] CLAMENT K A, KRUTNPHOLZ G R, DAVIS P W. Power system state estimation with measurement deficiency: an observability/measurement placement algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(7): 2012-2020.
- [24] CLEMENTS K A. Observability methods and optimal meter placement[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1990, 12(2): 88-93.
- [25] CONTAXIS G C, KORRES G N. A reduced model for power system observability: analysis and restoration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 3(4): 1411-1417.
- [26] WANG G Q, LIU C C, BHATT N, et al. Observability of nonlinear power system dynamics using synchrophasor data[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2016, 26(5): 952-967.
- [27] WANG G Q, LIU C C, BHATT N, et al. Observability for PMU-based monitoring of nonlinear power system dynamics[C]//2013 IREP Symposium Bulk Power System Dynamics and Control—IX Optimization, Security and Control of the Emerging Power Grid (IREP), 2013 IREP Symposium. Rethymno, Greece: IEEE, 2013: 1-6.
- [28] 杨晓楠, 郎燕生, 姚远, 等. 电-气综合能源系统状态估计可观测性分析[J]. 中国电力, 2020, 53(10): 133-139.  
YANG Xiaonan, LANG Yansheng, YAO Yuan et al. Observability analysis on state estimation of integrated electricity-gas system[J]. Electric Power, 2020, 53(10): 133-139.
- [29] BARGIELA A. On-line monitoring of water distribution networks[D]. Durham, UK: Durham University, 1984.
- [30] PREIS A, WHITTLE A J, OSTFELD A. Efficient hydraulic state estimation technique using reduced models of urban water networks[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2011, 137(4): 343-351.
- [31] STERLING M J H, BARGIELA A. Minimum norm state estimation for computer control of water distribution systems[J]. IEE Proceedings —Control Theory and Applications, 1984, 131(2): 57-63.
- [32] FANG T T, LAHDELMA R. State estimation of district heating network based on customer measurements[J]. Applied Thermal

- Engineering, 2014, 73(1): 1211-1221.
- [33] DURGUT S, LEBLEBICIOĞLU M K. State estimation of transient flow in gas pipelines by a Kalman filter-based estimator[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 35: 189-196.
- [34] UYLHOORN F E. State-space estimation with a Bayesian filter in a coupled PDE system for transient gas flows[J]. Applied Mathematical Modelling, 2015, 39(2): 682-692.
- [35] 尹冠雄, 陈彬彬, 孙宏斌, 等. 综合能源系统分析的统一能路理论(四): 天然气网动态状态估计[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5827-5836.  
YIN Guanxiong, CHEN Binbin, SUN Hongbin, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis(IV): dynamic state estimation of the natural gas network[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5827-5836.
- [36] 董今妮, 孙宏斌, 郭庆来, 等. 热电联合网络状态估计[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1635-1641.  
DONG Jinni, SUN Hongbin, GUO Qinglai, et al. State estimation for combined electricity and heat networks[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1635-1641.
- [37] 董今妮, 孙宏斌, 郭庆来, 等. 面向能源互联网的电-气耦合网络状态估计技术[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 400-408.  
DONG Jinni, SUN Hongbin, GUO Qinglai, et al. State estimation of combined electric-gas networks for energy internet[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 400-408.
- [38] 陈艳波, 郑顺林, 杨宁, 等. 基于加权最小绝对值的电-气综合能源系统抗差状态估计[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(13): 61-70.  
CHEN Yanbo, ZHENG Shunlin, YANG Ning, et al. Robust state estimation of electric-gas integrated energy system based on weighted least absolute value[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(13): 61-70.
- [39] 郑顺林, 刘进, 陈艳波, 等. 基于加权最小绝对值的电-气综合能源系统双线性抗差状态估计[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3733-3742.  
ZHENG Shunlin, LIU Jin, CHEN Yanbo, et al. Bilinear robust state estimation based on weighted least absolute value for integrated electricity-gas system[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3733-3742.
- [40] CHEN Y B, YAO Y, ZHANG Y. A robust state estimation method based on SOCP for integrated electricity-heat system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1): 810-820.
- [41] DU Y X, ZHANG W, ZHANG T T. ADMM-based distributed state estimation for integrated energy system[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(2): 275-283.
- [42] YANG J W, ZHANG N, KANG C Q, 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] CHEN Y B, YAO Y, LIN Y Z, et al. Dynamic state estimation for integrated electricity-gas systems based on kalman filter[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, doi: 10.17775/CSEJPES.2020.02050.
- [44] ZHOU S J, TIAN M C, ZHAO Y E, et al. Dynamic modeling of thermal conditions for hot-water district-heating networks[J]. Journal of Hydrodynamics, 2014, 26(4): 531-537.
- [45] ZHANG T T, ZHANG W, ZHAO Q, et al. Distributed real-time state estimation for combined heat and power systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 9(2): 316-327.
- [46] QIAO Z, GUO Q L, SUN H B, et al. Multi-time period optimized configuration and scheduling of gas storage in gas-fired power plants[J]. Applied Energy, 2018, 226: 924-934.
- [47] WANG C, WEI W, WANG J H, et al. Convex optimization based adjustable robust dispatch for integrated electric-gas systems considering gas delivery priority[J]. Applied Energy, 2019, 239: 70-82.
- [48] BENONYSSON A, BØHM B, RAVN H F. Operational optimization in a district heating system[J]. Energy Conversion and Management, 1995, 36(5): 297-314.
- [49] 陈彬彬, 孙宏斌, 陈瑜玮, 等. 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): 436-443.  
CHEN Binbin, SUN Hongbin, CHEN Yuwei, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis (I): gaseous circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 436-443.
- [50] YANG J W, ZHANG N, BOTTERUD A, et al. On an equivalent representation of the dynamics in district heating networks for combined electricity-heat operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 560-570.
- [51] SHENG T T, GUO Q L, SUN H B, et al. Two-stage state estimation approach for combined heat and electric networks considering the dynamic property of pipelines[J]. Energy Procedia, 2017, 142: 3014-3019.
- [52] ZHANG T, LI Z G, WU Q H, et al. Decentralized state estimation of combined heat and power systems using the asynchronous alternating direction method of multipliers[J]. Applied Energy, 2019, 248: 600-613.
- [53] SHENG T T, YIN G X, GUO Q L, et al. A hybrid state estimation approach for integrated heat and electricity networks considering time-scale characteristics[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(4): 636-645.
- [54] 董雷, 王春斐, 李烨, 等. 多时间断面电-气综合能源系统状态估计[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3458-3465.  
DONG Lei, WANG Chunfei, LI Ye, et al. Multi-snapshot state estimation of electric-gas integrated energy system[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3458-3465.
- [55] 刘鑫蕊, 李垚, 孙秋野, 等. 基于多时间尺度的电-气-热耦合网络动态状态估计[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 479-488.  
LIU Xinrui, LI Yao, SUN Qiuye, et al. Interaction and joint state estimation of electric-gas-thermal coupling network[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 479-488.
- [56] 陈皓勇, 文俊中, 王增煜, 等. 能量网络的传递规律与网络方程[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(10): 66-76.  
CHEN Haoyong, WEN Junzhong, WANG Zengyu, et al. Transfer laws and equations of energy networks[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(10): 66-76.
- [57] 杨经纬, 张宁, 康重庆. 多能源网络的广义电路分析理论—(一) 支路模型[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(9): 21-32.  
YANG Jingwei, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Analysis theory of generalized electric circuit for multi-energy networks—part one branch model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(9): 21-32.
- [58] 杨经纬, 张宁, 康重庆. 多能源网络的广义电路分析理论—(二) 网络模型[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10): 10-21.  
YANG Jingwei, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Analysis theory of generalized electric circuit for multi-energy networks—part two network model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 10-21.

10-21.

- [59] 孙建韧. 关于热电厂热网计量监测系统升级改造的研究[J]. 中国设备工程, 2021(2): 160-161.  
SUN Jianren. Study on upgrade and transformation of thermal power plant heat network measurement and monitoring system[J]. China Plant Engineering, 2021(2): 160-161.
- [60] 汪谷银, 王丹. 基于物联网技术的企业天然气能耗数据采集系统研究[J]. 长江信息通信, 2021, 34(1): 176-178.  
WANG Guyin, WANG Dan. Research on enterprise natural gas energy consumption data acquisition system based on internet of things technology[J]. Changjiang Information and Communications, 2021, 34(1): 176-178.
- [61] 唐文虎, 牛哲文, 赵柏宁, 等. 数据驱动的人工智能技术在电力设备状态分析中的研究与应用[J]. 高电压技术, 2020, 46(9): 2985-2999.  
TANG Wenhu, NIU Zhewen, ZHAO Boning, et al. Research and application of data-driven artificial intelligence technology for condition analysis of power equipment[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 2985-2999.
- [62] LIU Y, NING P, REITER M K. False data injection attacks against state estimation in electric power grids[C]//Proceedings of the 16th ACM Conference on Computer and Communications Security. Chicago, USA: ACM, 2009: 21-32.
- [63] KOSUT O, JIA L Y, THOMAS R J, et al. Malicious data attacks on the smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(4): 645-658.
- [64] XIE L, MO Y L, SINOPOLI B. Integrity data attacks in power market operations[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(4): 659-666.
- [65] CHOI D H, XIE L. Ramp-induced data attacks on look-ahead dispatch in real-time power markets[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(3): 1235-1243.
- [66] CARVALHO R, BUZNA L, BONO F, et al. Resilience of natural gas networks during conflicts, crises and disruptions[J]. PLoS One, 2014, 9(3): e90265.
- [67] 王丹, 赵平, 臧宁宁, 等. 基于安全博弈的综合能源系统安全性分析及防御策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(10): 10-16.  
WANG Dan, ZHAO Ping, ZANG Ningning, et al. Security analysis and defense strategy of integrated energy system based on security game[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 10-16.



陈艳波(通信作者)

1982—, 男, 博士, 副教授, 博导

主要从事电力系统态势感知、能量管理、大数据和新一代人工智能方面的研究工作

E-mail: chenyanbo@ncepu.edu.cn

CHEN Yanbo

Ph.D.

Associate professor

Corresponding author



高瑜珑

1997—, 男, 硕士生

主要研究方向为综合能源系统状态估计

E-mail: 120202201031@ncepu.edu.cn



赵俊博

1989—, 男, 博士, 助理教授, 博导

主要研究方向为电力系统状态估计、安全、稳定性及机器学习理论和应用

E-mail: junbo@ece.msstate.edu



葛磊蛟

1984—, 男, 博士, 副教授

主要从事智能配电网态势感知、云计算和大数据方面的研究工作

E-mail: legendglj99@tju.edu.cn

GE Leijiao

Ph.D.

Associate professor