

电-热-气混联综合能源系统状态估计研究综述与展望

臧海祥, 耿明昊, 黄蔓云, 卫志农, 陈 胜, 孙国强

(河海大学能源与电气学院, 江苏省南京市 211100)

摘要: 综合能源系统的发展在提高能源效率、减少碳排放及增加可再生能源渗透率等方面起到了巨大的推动作用,面对耦合日益紧密的电-热、电-气互联综合能源系统,现有的能量管理模式和调度手段难以充分发挥其应有的优势。因此,实现综合能源系统协同一体、高效准确的状态估计,可以为后续协同调度、安全运行提供可靠的数据支撑。鉴于此,简要概述碳中和背景下综合能源系统状态估计研究,回顾综合能源系统状态估计理论的发展历程及难点;并从模型、数据、时间尺度3个层面分析电-热、电-气综合能源系统状态估计研究的总体思路。最后,对未来综合能源系统状态估计可深入研究的方向进行了展望。

关键词: 综合能源系统; 状态估计; 潮流模型; 热网; 气网; 碳中和

0 引言

世界范围内能源系统正在经历深层次的重组,为了在不同能源环节实现互联互通,加强能源合作,提高能源消费效率,近年来对各类能源系统互联融合和互补集成的需求日益迫切。2020年9月22日,中国在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话中决定“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”。目前,中国的化石能源系统在一次能源中占比85%左右,因此,中国“碳中和”是一个宏伟目标,充满机遇和挑战。实现碳中和,需重点关注工业、电力的能源效率和可再生能源的合理利用,而综合能源系统(integrated energy system, IES)的发展在提高能源效率、减少碳排放和增加可再生能源的渗透三方面起到了巨大的推动作用^[1-3]。研究表明,热电联产机组可实现90%以上的高燃料效率^[4],采用热电联产技术还可以有效减少环境污染物^[5]和温室气体^[6]的排放;燃气轮机的使用和电转气(power to gas, P2G)技术的发展也为平抑间歇性新能源出力提供了保障。因此,发展深度耦合、互补集成的综合能源系统在未来以电力为主的能源体系中,可以减少波动和增强电力系统的灵活性,既能有效降低碳排放,促进储能技术与可再生能源发电技术的发展,又能提供安全稳定的电力能源。

国内外政企对综合能源系统的规划、发展高度重视^[7-8],2021年3月,国家电网有限公司发布“碳达峰、碳中和”行动方案,加强能源电力统一规划。在学术界,有关综合能源系统建模、规划、调度、优化及能源市场方向^[9-13]的理论也是当前的研究热点,综合能源系统规划与运行的经济价值也已被定量验证,因此未来能源体系将打破多能源系统之间传统独立规划与运行的模式,构建面向充分协同、深度耦合的综合能源系统能量管理系统(energy management system, EMS),而状态估计(state estimation, SE)技术作为能量管理系统的基石,负责提供实时、可靠、完备的运行状态信息,为后续安全分析和优化调控提供可信的运行数据库。

由于目前状态估计的概念和应用仍限于输配电网、热网的供热管网、气网的中高压部分,因此本文以电-热、电-气综合能源系统为研究对象,综述了电-热、电-气状态估计领域的研究现状。首先介绍了综合能源系统状态估计理论的发展历程及与传统电力系统状态估计的区别、难点,然后分别概述了电-热、电-气互联综合能源系统状态估计及各自子问题的研究进展,最后给出对未来该领域研究的展望。

1 综合能源系统状态估计的发展及重难点

1.1 电力系统状态估计与综合能源系统状态估计

状态估计的本质是滤波,在传统电网中,量测数据被称为“生数据”,状态估计结果被称为“熟数据”,状态估计技术利用大量量测数据的冗余,通过一定的准则(如“最小二乘准则”),获得最接近系统真实

收稿日期: 2021-06-09; 修回日期: 2021-11-05。

上网日期: 2022-01-04。

国家自然科学基金资助项目(51877071)。

运行状态的状态数据。与电力系统状态估计相同,综合能源系统状态估计负责为综合能源系统-能量管理系统提供实时、可靠、一致、完整的运行状态信息,为后续安全分析和优化调控提供可信的运行数据,最终实现综合能源系统多能流的统一管理和科学调度。

近5年来,参照与借鉴传统电力系统状态估计的研究思路,国内外学者已对综合能源系统状态估计理论开展了较多的研究。研究发现,尽管综合能源系统-状态估计与传统电力系统状态估计间存在共同的数学基础与描述形式,但由于电、热、气三者系统本身的差异,无法简单地移植传统电网状态估计算法到综合能源系统状态估计中。两者在物理特性、量测通信、算法要求及控制主体上存在着差异。

1) 物理特性

综合能源系统中各子系统的能量介质在物理上具有高度的异质性,其中电力系统遵循电磁学定律,在网络分析中由电磁场方程推导出由时间与一维空间中的偏微分方程组描述的基础电路理论,然后引入相量方法将电路从时域映射到频域,最终简化为代数方程描述的集总参数频域电路。而热力系统中最常见的热介质水和天然气系统中的天然气则遵循质量守恒定律、能量守恒定律和牛顿第二定律。各子系统能量介质的异质性也导致了电-热、电-气乃至电-气-热系统的实时状态估计需要面对电、热、气3种能量介质动态特性不一致的问题,电力系统暂态过程瞬时完成,而热网和气网则为小时级。

2) 量测通信

量测数据是系统进行状态估计的基础,综合能源系统与电网间量测的差异主要体现在:1)量测类型;2)传感器安装环境、量测误差;3)通信时延及稳定性;4)通信频率;5)配置范围导致的系统/局部可观测性。在后续章节中本文将对各子系统的状态估计量测模型进行详细叙述和分析。

3) 算法要求

在传统电力系统状态估计算法与综合能源系统状态估计中,两种算法滤波性能的关注点不同(整体/局部),算法精度依赖系统物理模型的精准表述,而传统电力系统状态估计仅须关注整体的滤波效果好坏,而综合能源系统状态估计还须关注局部滤波情况,各子系统滤波效果及耦合节点处滤波结果相对整体滤波效果更为关键。其次,由于各子系统量测水平的差异,综合能源系统状态估计对数据通信性能、算法抗差性能的要求较电网更高,状态估计的收敛性及稳定性也需要算法调整解决。由于各子系统时间尺度的差异,实际状态估计中信息量测时标

不一致、系统动态响应时间不一致也需要算法协调,同理,综合能源系统状态估计的计算效率要求较低。

4) 控制主体

由于各子系统分属不同的运营主体,不同的能源系统由统一的能量管理系统进行调控难以实现,各子系统间存在通信壁垒、信息隐私、操作差异和目标差异,需要综合能源系统状态估计在有限量测数据交互的情况下进行可靠的状态估计。

在电-热、电-气综合能源系统状态估计的领域中,各子课题的研究历程也是逐一解决上述差异性所导致的问题。

1.2 电-热互联综合能源系统状态估计理论发展历程

在电-热互联综合能源系统的状态估计研究中,文献[14]首先对电-热互联综合能源系统进行了系统的建模分析,类比电力系统潮流的方式,提出了热网潮流和电热耦合网络潮流的计算方法,并与商业软件的结果进行对比,为状态估计在电-热互联系统中的应用奠定了“真值”基础。紧接着,文献[15-16]提出了基于热网稳态模型的热电联合状态估计方法,成功将状态估计引入热网中。对应上述综合能源系统状态估计与传统电力系统状态估计间的异同,该领域学者随后在坏数据问题^[17-20](抗差估计研究)、耦合系统的数据交互问题^[21-23](分布式估计)和考虑热网慢动态特性(动态估计)等方面展开了相应的研究。在电-热互联综合能源系统的状态估计研究中,学者发现热网的稳态模型难以描述供水管道中的动态特性,为了更准确地获得系统的实时状态,文献[24]考虑了热能在管网中传输的动态特性,提出一种两阶段状态估计策略,以更好地追踪热网运行时的温度变化。由于热网中量测数据的采样分辨率明显低于电网中量测数据的采样分辨率,文献[25]对两系统的时间尺度特征进行研究,提出一种混合状态估计方法,对不同量测下的网络提出不同的状态估计解决方案。文献[27]建立了一种不完全量测配置下电-热互联综合能源系统的鲁棒估计模型,设计了在热力系统质调节与量调节2种模式下的双层优化算法。电-热互联综合能源系统的研究历程如表1所示。需要说明的是,在城市供热工程的研究中也有“状态估计”的概念,大都用于估算热网的管道热能损失,且与电力系统状态估计不同的是没有冗余度的概念,因此两处的状态估计实质含义并不相同。

1.3 电-气互联综合能源系统状态估计理论发展历程

“状态估计”“卡尔曼滤波”等技术也应用于气网

表1 电-热互联综合能源系统状态估计研究历程
Table 1 Research route of state estimation for electricity-heat integrated energy system

研究方向	文献	发表时间	研究贡献
基础性研究工作	文献[14]	2015年1月	构建电-热潮流模型
	文献[15-16]	2016年7月	提出基于加权平方和(WLS)的电-热状态估计模型
研究方向1: 关注两系统间的通信与数据交换问题 (分布式状态估计研究)	文献[21]	2019年4月	提出电-热分布式异步状态估计模型
	文献[22]	2019年4月	提出电-气-热分布式状态估计框架
	文献[23]	2020年2月	研究了考虑通信丢包问题下的电-热分布式状态估计
研究方向2:关注热网能量传输的慢动态 特性(动态估计研究)	文献[24]	2017年8月	考虑管道热能传输最大时延
	文献[25]	2020年5月	考虑管道慢动态特性及两系统数据不同采样分辨率
	文献[26]	2021年2月	基于扩展卡尔曼滤波(EKF)的电-气-热网络顺序状态估计算法
	文献[17]	2019年5月	考虑热网全约束模型的加权绝对值之和(WLAV)抗差状态估计
研究方向3:解决不良数据对联合状态估计 的影响(抗差状态估计研究)	文献[20]	2020年8月	辐射状热网下的分布式快速抗差状态估计模型
	文献[18]	2019年5月	电-热双线性抗差状态估计模型
	文献[19]	2020年9月	基于二阶锥规划的抗差状态估计模型
	文献[27]	2020年10月	不完全量测配置下电-热系统双层鲁棒优化估计模型

中,同样,不同于电力系统状态估计的含义,气网状态估计中也没有冗余度的概念^[28-31]。文献[32]将电力系统状态估计的概念引入电网和气网的联合分析中,定量分析了联合分析对于耦合节点状态估计效果的影响。文献[33]针对复杂气网系统,建立了标幺化体系,证明了电-气耦合状态估计相较于单独状态估计在获得系统全局一致解、实现边界坏数据辨识方面具有明显的优势。文献[34-35]对综合能源系统状态估计研究中存在的初值问题、坏数据问题及计算效率问题进行了更为深入的研究,提出了电-气综合能源系统抗差及双线性抗差状态估计方法,同时,对含压缩机的支路进行了更为细化的建模,提高了状态估计的精度。文献[36]为城市天然气-电力耦合系统提供了一种区间状态估计方法,以不确定的思维方式,为综合能源系统的运行提供数据参考。针对气网的动态工况,计及气网的暂态过程,文

献[37]提出了多时间断面的电-气互联综合能源系统状态估计方法,实现了对系统某一时段运行轨迹的准确感知,与此同时,文献[38]提出一种基于扩展卡尔曼滤波的电-气动态估计方法,通过线性外推法和线性内推法生成伪量测数据,最后通过扩展卡尔曼滤波法进行状态估计,提高了状态估计的精准度。文献[39]建立了基于“统一能路理论”的天然气动态状态估计模型^[39],以另一种思路平衡了动态状态估计问题中计算精度与求解效率之间的矛盾,同时,将坏数据辨识环节添加进了动态状态估计过程中。电-气互联综合能源系统的研究历程如表2所示。

1.4 综合能源系统状态估计研究中的难点

在综合能源系统状态估计的研究中,主要有以下3个层面的难点。

表2 电-气互联综合能源系统状态估计研究历程
Table 2 Research route of state estimation for electricity-gas integrated energy system

研究方向	文献	发表时间	研究贡献
基础性研究工作	文献[31]	2017年1月	将状态估计引入电-气互联综合能源系统,构建WLS模型
	文献[32]	2018年2月	
研究方向1: 解决不良数据对联合状态估计的影响(抗差 状态估计研究)	文献[21]	2018年9月	提出基于WLAV的抗差状态估计模型
	文献[22]	2019年4月	解决气网模型中初值难以确定的问题,进行双线性抗差状态估计
研究方向2:在模型层面对气网状态估计 进行研究	文献[36]	2017年8月	考虑不确定性下的城市电-气系统区间状态估计,指导系统安全运行
	文献[39]	2020年10月	重新建立气网统一能路模型,并进行气网动态状态估计研究
研究方向3:解决两系统间时间尺度/数据采 样周期不一致问题(动态状态估计研究)	文献[37]	2020年9月	考虑气网相较电网的慢动态特性,进行多时间断面的状态估计,感知暂态过程下天然气系统的状态变化趋势
	文献[38]	2020年10月	采用Lax-Wendroff差分,通过线性外推法和线性内推法生成伪量测数据,进行基于EKF的电-气动态估计
	文献[27]	2021年2月	基于EKF的电-气-热网络顺序状态估计算法

1) 模型层面

传统状态估计的本质是基于物理模型的数据优化问题,因此对模型精度要求较高,而应用于状态估计问题的热网与气网模型往往过度简化,适用工况的范围较窄。

2) 数据层面

由于技术和经济原因,热网与气网的监测水平与通信基础架构远远低于电网^[40],因此综合能源系统的状态估计器对不良数据辨识、算法收敛性及多维度断面数据的完整性要求更高。其次,在大多数情况下,不同的能源系统由统一的能量管理系统进行调控难以实现,怎样在有限量测数据交互的情况下进行可靠的状态估计需要进行考虑。

3) 时间尺度层面

目前综合能源系统状态估计领域仍以针对静态模型的静态估计为主,当系统发生较大扰动时,相较于电力系统快速的响应状态,热网与气网较长的暂态过程会使静态估计模型产生较大的精度误差,无法进行实时状态跟踪监测、满足系统安全稳定运行的要求。在已有的综合能源系统动态估计模型中,怎样平衡随系统规模指数级增大的计算规模与计算效率之间关系也是研究的难点。

文献[41]从静态状态估计模型和动态估计模型2个角度对综合能源系统状态估计方法进行了对比和剖析,整合性地综述了电-热、电-气综合能源系统状态估计理论,并在模型机理、数据采集、性能要求、数据安全及软件开发几个方面对未来综合能源系统状态估计的研究和应用进行了展望。本文介绍思路则围绕着综合能源系统状态估计研究中的模型、数据、时间尺度3个层面在电-热、电-气状态估计领域详细展开叙述。

2 电-热互联综合能源系统状态估计

2.1 电-热互联综合能源系统建模

2.1.1 供热系统

供热系统是热电厂向热力用户提供蒸汽或热水并回收其返回水的设备和场内管道连接的系统,包括热源、供热管网、热用户、热转换设施等。其中热源主要包括热电联产机组、燃煤锅炉、电热锅炉房配备的高温承压蓄热水罐(风电供暖);供热管网按密封程度不同分为封闭式系统、开式系统(热介质不能被取出),按管道根数不同分为单管、双管、三管、四管系统(根据热用户选择),按所处地位分为一级管网和二级管网(热力站),按供回关系分为供水管网和回水管网(热源、热用户);供热管网中的热媒主要为水或蒸汽,其中水需满足城市水质要求;热转换设

施主要为热力站(换热站);其他重要组成部件还有循环水泵、补水箱、补水泵、阀门(主要安装于干线、支干线、支线的起点);热用户主要包括供暖、通风、热水供应、生产工艺等。随着热电联产机组、燃气轮机、能源集线器等转化设备的广泛应用以及多能源系统耦合程度的不断加强,原有各供能系统单独规划、设计和独立运行的模式已经难以适应未来能源发展趋势^[42]。

由于热负荷不恒定需要对热力系统进行调节,根据供热地点不同,主要可分为集中调节(调节热源)、局部调节(调节热力站)、个体调节;根据调节方法分为质调节(只改变网络的供水温度)、量调节(只改变网络的循环水流量)、间歇调节(改变供暖小时数)。国内城市供热系统进行热源调节时,只控制一次侧供水温度和循环水总量,保证按需供热并均匀分配到热力站;进行热网调节时,根据室外温度确定二次侧供水温度,通过改变一次侧流量来保证二次侧供水温度。

2.1.2 电-热互联综合能源系统稳态潮流模型

综合能源系统中各子系统的建模理论和方法较为成熟。电力系统稳态建模常采用以基尔霍夫电压、电流定律为基础的潮流模型,将电网的主要元件,如线路、变压器等采用一般支路模型描述^[43],发电机和负荷采用接地支路模型描述^[44],形成了以节点电压、节点注入功率(有功、无功功率)、支路功率(有功、无功功率)为变量的网络分析方法^[42,44]。由于暂态过程极短,电网稳态潮流模型足以满足状态估计精度的需求^[45]。

热网动态过程通常在小时级,需要根据不同的工况和仿真需求选择稳态或动态潮流模型。目前在电-热状态估计研究中,以稳态潮流模型为主,仅在关注热能传输时延时对管道的热力模型进行动态建模。

热源到热力站与热力站到用户的结构相似,均为星形枝状结构,与电力系统配电网相似。城市中供热系统通常供热面积大、影响因素多、内部剪性强、滞后时间长、非线性严重。热网潮流模型需要对热网中水力工况和热力工况进行分析,水力模型描述了热网中管道流量与压强间的关系,可以用以下公式描述^[14]。

1) 流量连续性方程(质量守恒定律):流入一个节点的质量流量减去流出该节点的质量流量等于该节点的质量流量消耗量。

$$\sum m_{in} - \sum m_{out} = m_q \quad (1)$$

2) 压头损失方程:当热介质沿管道流动时,由于存在摩擦,水头压力下降。因此,沿着管道流量和

水头损失之间的关系为:

$$h_i = Km|m| \quad (2)$$

3) 环路压力方程: 闭环回路的压头损失总和为零。

$$\sum h_i = 0 \quad (3)$$

式中: m_{in} 和 m_{out} 分别为流入和流出热网节点的流量; m_q 为热网节点注入流量; h_i 为管道内的水头损失; m 为管道流量; K 为由管道流量和管道内部参数决定的管道阻力系数^[14]。式(1)描述了管道中的质量守恒; 式(2)描述了热介质在管道中流动时由于摩擦造成的压头损失; 类似于基尔霍夫电压定律, 式(3)描述了热力网络中闭环回路的压头损失总和为零。

热网热力模型和水力模型之间通过管道流量耦合, 热力模型描述了热网中管道流量、温度和热功率之间的关系。

1) 节点热功率使用下列公式计算:

$$\Phi = C_p m_q (T_s - T_o) \quad (4)$$

2) 管道 k 末端 j 处的温度与管道始端 i 处的温度可以表示为:

$$T_j = (T_i - T_a) e^{-\frac{\lambda L_k}{C_p m_k}} + T_a \quad (5)$$

3) 管道相连节点处热媒介存在温度混合, 其温度混合方程可以表示为:

$$\left(\sum m_{out} \right) T_{out} = \sum (m_{in} T_{in}) \quad (6)$$

式中: Φ 为节点热负荷功率; T_s 为供水温度; T_o 为各回水管道混合前的回水温度; C_p 为热介质的比热容; T_i 和 T_j 分别为管道 k 首、末端的温度; T_a 为环境温度; L_k 为管道 k 的长度; λ 为管道单位长度的热传递系数; T_{in} 和 m_{in} 分别为各管道流入节点前的温度和各管道流量; T_{out} 和 m_{out} 分别为汇入节点后的管道混水温度和流出该节点各管道的流量。式(5)为管道温降方程; 式(6)为温度混合方程。

2.1.3 电-热互联综合能源系统建模研究

文献[14]类比电网^[46]定义了热网的基本变量, 将电-热稳态潮流模型的统一求解和顺序求解进行对比分析, 并将潮流结果与商业软件比对, 为电-热联合分析奠定了基础; 在热网动态潮流领域, 文献[47-49]对热网中热力模型的动态特性进行分析和建模, 文献[50]考虑管道管存和热介质的传输延迟, 详细阐述了热网的动态模型, 使得热力系统能协助电力系统消纳可再生能源; 针对热网潮流非线性方程组求解困难的问题(含大量非线性约束且含指数方程等超越方程), 文献[51]提出了辐射型热网的3种快速潮流计算方法和环状热网的解环方法, 实

现了电-热潮流的快速、稳定运算。

此外, 部分学者深入探究了多能流耦合下的统一作用机理, 揭示各种异质能流的能量转换与网络传输规律, 文献[51-52]应用热电比拟的思想, 提出了热网整体能量流模型, 用以描述热能的传输规律, 文献[53-55]赋予热网水力模型的“水压”“水流”“水阻”“水感”和热力模型中的“温度”“热流”“热阻”“热导”“热感”“热容”明确的物理意义, 通过傅里叶变换和二端口等值将热网微分方程转化为代数方程, 并提出了基于统一能路理论的稳态、动态潮流计算方法, 奠定了多异质能流在多时间尺度上统一分析的应用基础, 打破了不同能源系统在建模、架构形态设计与规划设计、能量优化管理与最优化控制等领域的差异性壁垒, 真正实现各能源子系统之间的“融合”研究, 具有极高的应用价值。

2.2 电-热互联综合能源系统状态估计模型

2.2.1 量测模型

随着智能配电网的发展, 电网中量测设备的数量、种类和精度也在不断提高。除了配电网中常见的支路功率和支路电流幅值量测之外, 节点注入功率和电压幅值也可以从智能电表中获得。在电网中, 量测数据采集主要由数据采集与监控(supervisory control and data acquisition, SCADA)系统、相量测量装置(phasor measurement unit, PMU)与高级量测体系(advanced metering infrastructure, AMI)完成。SCADA系统采集的量测数据类型一般为节点电压幅值、支路电流幅值、支路功率与节点注入功率, 采样周期约为3~5 s; PMU的量测数据一般为电压向量与电流向量, 采样周期约为5~30 ms; AMI的量测数据一般为支路电压幅值、支路电流幅值、支路功率、节点注入功率与用电信息, 采样周期为15, 30, 60 min。

供热系统的监控系统主要为SCADA系统, 根据欧盟的指令报告, 到2016年底, 欧洲已使用独立的热量计量装置来获取公寓等建筑中供暖和生活热水的消耗量^[56]。随着中国的供热市场改革, 许多城市供热系统也配备了更多的自动热量计^[57]。此外, 一些先进的城市供热系统中已经安装了监控和SCADA系统, 以保证供热系统稳定运行^[58]。

在供热系统中, 管道质量流量和温度是最常见的量测类型, 几乎所有的管道和节点都配置了这类量测。压强量测在供热系统中通常也有配置, 但是压力量测精度较低, 受环境的影响较大。最后, 实时热功率量测通常仅配置在关键节点, 如热源或热交换站处。因此, 普通热负荷节点一般缺乏实时热功率量测, 或仅有一天内网络的总热能消耗^[17]。

电-热互联综合能源系统中量测量可以表示为:

$$\begin{cases} z_e = h_e(x_e) + \epsilon_e \\ z_h = h_h(x_h) + \epsilon_h \end{cases} \quad (7)$$

式中: x_e 、 $h_e(x_e)$ 和 x_h 、 $h_h(x_h)$ 分别为电网和热网中的状态变量、量测方程; z_e 和 z_h 分别为电网和热网中的量测量; ϵ_e 和 ϵ_h 分别为电网和热网量测的误差向量。

2.2.2 状态变量选择

状态变量能够完整地描述系统的状态,合理的状态变量选择便于状态估计模型的计算。

电网中的状态变量可以用极坐标形式的电压相角来表示,而热网中的状态变量则有3种表示方式^[14,27],3种表示方式的优缺点比较如表3所示。其中: T_s 为供水温度向量; T_r 为节点混水后回水温度向量; H_n 和 T_n 分别为节点 n 的压力和温度向量; T_{bt} 为各支路末端温度向量,即节点前的混水温度; m 为管道流量向量; h_l 为管道内的水头损失向量。

表3 热网3种状态变量组合的比较
Table 3 Comparison of three state variable choices for heat networks

状态变量	优点	缺点
$[m, T_s, T_r]$	直观,计算简单,精度高	描述热网模型的整体性较差
$[h_l, T_s, T_r]$	计算简单	精度较低
$[H_n, T_n, T_{bt}]$	描述热网模型的整体性好	量测冗余度较低

2.2.3 状态估计模型

在静态状态估计中,电-热互联综合能源系统常以残差的WLS或残差的WLAV最小作为优化目标函数,考虑到由于经济和技术原因,热网实时量测布置受限,受到坏数据影响的概率也远大于电力系统。以WLAV准则为目标函数的状态估计数学模型可以表示为:

$$\begin{cases} \min J(x_e, x_h) = w_e^T |\epsilon_e| + w_h^T |\epsilon_h| \\ \text{s.t. } \epsilon_e = z_e - h_e(x_e) \\ \epsilon_h = z_h - h_h(x_h) \\ c(x_e, x_h) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: w_e 和 w_h 分别为电网和热网中量测的权重向量; $c(x_e, x_h) = 0$ 为电-热互联综合能源系统中的等式约束,通常采用内点法求解该数学模型^[17]。

在状态估计求解中,文献[15]将电网标幺化的方法推广至热网中,有效避免了数值稳定性问题。

以WLAV为代表的抗差状态估计器解决了电-热互联系统数据层面中坏数据的影响,保证了状态估计器的鲁棒性^[17-20],抗差状态估计器的关键技术示意图如图1所示。文献[21-23]中的分布式状态

估计方法也对电-热互联系统数据层面中数据交互的问题提出了较为全面的对策。然而在模型层面和时间尺度层面,电-热状态估计的研究稍显单薄,电-热动态潮流模型和统一能路模型还未在状态估计技术中得到应用。文献[25]在文献[24]的研究基础上对两系统的时间尺度特征进行研究,提出了一种混合状态估计方法,对不同量测下的网络提出不同的状态估计解决方案,以获得更准确的状态估计结果。此外,文献[17]提出了一种基于人工神经网络(artificial neural network, ANN)的热负荷伪量测模型,但数据驱动技术在电-热状态估计的其他环节中也未得到应用。

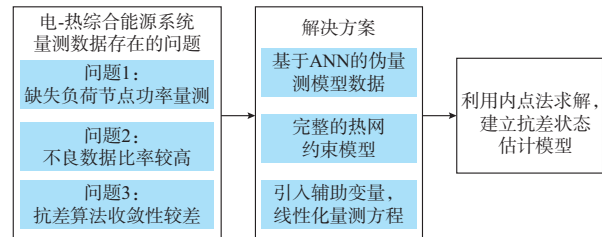


图1 抗差状态估计器的关键技术示意图

Fig. 1 Schematic diagram of key techniques of robust state estimator

2.2.4 约束模型

量测方程不能完整地描述系统中变量的耦合约束关系,因此需要补充约束方程 $c(x_e, x_h) = 0$ 提高模型精度,约束方程 $c(x_e, x_h) = 0$ 具体如下。

1) 零注入节点有功功率约束

$$P_i = \text{real}\{V(YV)^*\} = 0 \quad (9)$$

2) 零注入节点无功功率约束

$$Q_i = \text{imag}\{V(YV)^*\} = 0 \quad (10)$$

3) 供水管道温降方程约束

$$A_s T_s' - b_s = 0 \quad (11)$$

4) 回水管道温降方程约束

$$A_r T_r' - b_r = 0 \quad (12)$$

5) 回路压降方程约束

$$BKm |m| = 0 \quad (13)$$

6) 零注入热功率/注入流量约束

$$A_p m = 0 \quad (14)$$

7) 耦合元件约束

$$P_{\text{source}} - \zeta \Phi = 0 \quad (15)$$

式中: P_i 和 Q_i 分别为零注入节点有功和无功功率向量; Y 为电网节点导纳矩阵; 上标*表示复数的共轭; T_s' 和 T_r' 分别为节点供水和回水温度与环境温度的差值; A_p 为零注入功率节点的节点-支路关联矩阵; P_{source} 为耦合元件功率; A_s 、 b_s 、 A_r 、 b_r 为温度系数; B

为支路-回路关联矩阵; ζ 为热电联产、热泵等耦合元件的耦合系数^[17]; K 为管道阻力系数向量; Φ 为节点热负荷功率向量; $\text{real}\{\cdot\}$ 和 $\text{imag}\{\cdot\}$ 分别表示求实部和虚部。

需要注意的是,为了对供热系统进行较为整体的描述,需要将热网中不同类型节点的变量关联关系抽象成网络方程的形式,如式(9)中的网络系数(A_s, b_s, A_r, b_r)对热网稳态模型进行了简化^[14,17],文献[53-54]也提出了一种适用于热网统一能路模型的网络方程表达形式。

2.3 坏数据辨识

坏数据辨识在综合能源系统状态估计中意义尤为重要。在坏数据辨识方面,文献[15-16]提出了基于WLS估计的坏数据方法,将电力系统最大正则化残差法(the largest normalized residual test, LNR)推广到电-热互联综合能源系统中,能够对边界坏数据进行有效的辨识。该方法虽然简单,但并不能对热网中的温度量测坏数据进行辨识,从而导致WLS估计失去其优良特性,难以获取系统的全局实时状态;其次,直接基于传统WLS的坏数据辨识方法未考虑系统的自治性,忽略了子系统内和子系统间的约束关系,对于耦合节点处的坏数据不能做出有效的辨识。文献[17]将式(9)考虑在内,构建了拉格朗日方程进行求解,并基于此进行LNR法坏数据辨识,实现对温度量测的坏数据辨识,但对于热网中的强相关量测仍无法有效辨识。电-热互联综合能源系统坏数据辨识流程图如图2所示。

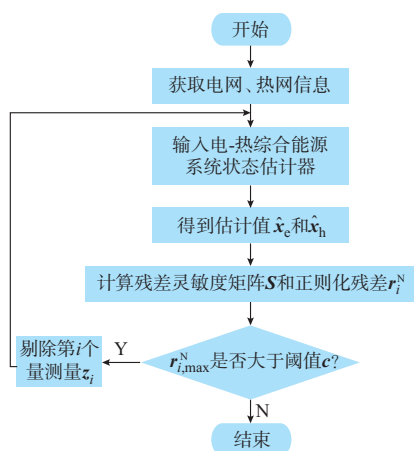


图2 电-热互联综合能源系统坏数据辨识流程图
Fig. 2 Flow chart of bad data identification for electricity-heat integrated energy system

3 电-气互联综合能源系统状态估计

3.1 电-气互联综合能源系统建模

相对于热网而言,气网在传输过程中的能量损

耗较小,一般可以忽略不计,因此天然气可以进行大规模远距离传输;在网络架构中,通常为了保证供气可靠性建设为环形网架,与输电网类似。气网建模的思路与电网、热网类似,将系统分为节点和支路进行分析,节点又分为气源节点、负荷节点、平衡节点和耦合节点(燃气轮机、电转气)。气网构成元素与热网、电网的类比如表4所示。与热网不同,气网建模主要是气网管道流量、加压站建模和节点流量平衡描述三部分。在稳态建模方面,文献[59-60]提出了一种考虑燃气和电力网络的分析模型,以分析燃气和电力耦合网络的运行状态。文献[61]类比电力系统潮流,基于牛顿-拉夫逊法计算了气网潮流。文献[62]提出了电-气互联综合能源系统混合能量流分析方法。气网的暂态过程主要体现在气网管道流量建模这一部分。描述气网的精确模型是由一组无法采用解析法求解的偏微分方程组构成,该方程组基于能量守恒方程,数值计算难度较大^[63]。气网的3种物理简化模型及对比如表5所示。

表4 综合能源系统构成元素类比
Table 4 Analogy of components of integrated energy system

气网	热网	电网
天然气井 (气源节点)	热电联产、热锅炉(热源节点)	发电机节点
输气管道 (高压、低压)	供热管道(一级、二级)	输电线路(主网、配电网)
加压站(消耗电能)	循环水泵、补水泵(消耗电能)	
阀门	阀门	开关
调压器	换热器	变压器
储气设施	储热设施	

3.2 电-气互联综合能源系统稳态状态估计研究

电-气互联综合能源系统量测量主要包括电网节点电压、节点注入功率、支路功率、气网节点压力、节点注入流量、管道流量等。气网的量测数据由量测设备涡轮流量计与压力变送器瞬时采样测量完成。文献[33-34]对气网中的燃气压缩机进行了详细建模,将燃气压缩机的某一恒定量也当作量测量进行状态估计。

电网状态量一般选择电压幅值和相角,在气网稳态状态估计中,通常选择节点压力或节点压强的平方作为气网的状态量^[31-35],在气网暂态潮流计算中,选择节点压力和管道流量作为气网的状态量^[70]。

目前,电-气互联综合能源系统状态估计理论主要基于气网的稳态 Weymouth 方程^[31-35]进行WLS估计或WLAV估计,其量测方程可以表示为:

表5 气网物理简化模型对比
Table 5 Comparison of simplified gas network physical models

物理模型	优点	缺点
“管存”模型(文献[64-65])	用于考虑天然气网络动态的电-气耦合系统联合优化中, 计算方便	无法准确描述管道两端压力和流量之间的关系, 难以达到动态潮流计算和动态状态估计的精度要求
有限元模型 (文献[66-68])	主要用于天然气网的动态潮流计算	会引入大量的时空微元, 在优化应用中会大大增加计算复杂度
基于统一能路的气路模型 (文献[69])	基于傅里叶变换, 将管道时域动态映射至频域并通过二端口等值得到集总参数模型, 实现了模型从偏微分方程向代数方程的简化, 在保证精度的同时, 显著提升了计算效率	计算精度较有限元模型低

$$\Pi_i = \Pi_i \quad (16)$$

$$m_{ij} = S_{ij} \sqrt{\frac{K_2}{L}} \sqrt{S_{ij}(\Pi_i^2 - \Pi_j^2)} \quad (17)$$

$$m_i = \sum_{j \in N_i} S_{ij} \sqrt{\frac{K_2}{L}} \sqrt{S_{ij}(\Pi_i^2 - \Pi_j^2)} \quad (18)$$

式中: Π_i 为节点 i 的压力; m_i 为节点 i 的管道注入流量; m_{ij} 为管道 ij 的流量; K_2 为天然气管道暂态常数; L 为管道长度; S_{ij} 用于表征天然气的流动方向, 取 +1 表示该管道天然气流动方向与规定正方向相同, -1 时则相反; N_i 为与节点 i 关联的气网节点集合。

气网约束模型主要包括气网节点流量平衡约束、压缩机约束、燃气轮机耦合约束、电转气耦合约束和气网零注入流量约束, 其中文献[34]对燃气压缩机进行了精确建模, 讨论燃气压缩机在 4 种控制模型下约束方程的具体表达式。文献[35]在文献[34]的基础上, 进行了双线性抗差状态估计, 对电-气互联综合能源系统状态估计存在的初值问题、坏数据问题及计算效率问题进行了更为深入的研究。

由上述分析可以得出, 在稳态状态估计理论方面, 电-热和电-气有着很高的相似度, 两者的差异主要体现在以下几个方面。

1) 模型不同。热网分为热力模型和水力模型进行分析, 气网相对简单, 相当于仅有热网的水力模型部分。

2) 约束不同。电-热和电-气的耦合元件在各子系统中充当的角色不同, 也就是节点类型不同, 如热网中的热电联产和气网中的加压站。

3) 在稳态状态估计求解算法中遇到的困难不同。电-热状态估计中主要面对的困难是坏数据下算法的收敛问题, 而电-气状态估计中收敛问题则是状态量初值设置导致的。

3.3 电-气互联综合能源系统动态状态估计研究

在天然气网的状态估计理论中, 已有基于卡尔曼滤波的动态状态估计研究^[28-30], 这些方法以单个气网管道进行状态估计, 与电力系统状态估计的网

络分析方法不同, 忽略了天然气网络约束, 且要求管道内部的初始状态已知(一般假设为稳态), 目前还没有针对天然气复杂管网的动态状态估计方法。

文献[37]引入了离散化的天然气管道方程来描述其暂态变化过程, 基于气网暂态模型构建多时间断面的电-气综合能源系统状态估计模型, 实现了对系统运行状态的实时跟踪; 文献[38]将扩展卡尔曼滤波法应用到电-气互联综合能源系统中, 大幅度提高了状态估计的精准度。文献[39]基于气网的统一能路模型, 以 WLS 准则实现了简单气网的动态估计, 并在动态估计中加入坏数据辨识环节, 平衡了天然气网络动态计算中计算复杂度与求解精度之间的矛盾, 具有较高的理论研究意义。文献[27]以无迹卡尔曼滤波算法为基础, 考虑到不同子网络间的耦合约束, 构建了适应多情景的状态估计顺序求解算法。但由于天然气系统动态过程明显慢于电力系统, 在二者状态估计周期差异较大的情况下如何实现融合估计需要考虑; 同时, 当天然气系统大扰动下运行状态剧烈波动时, 当前固定周期的动态估计效果欠佳; 此外, 由于不同能源运营者之间存在信息差距, 在耦合的能源系统中采用联合状态估计难以实现。因此, 基于异步信息交互实现电力系统与天然气系统之间分布式动态状态估计理论需要更加深入的研究。

此外, 随着综合能源系统物理硬件的逐步发展, 支撑其安全、经济运行的量测数据(传统 SCADA 量测、相量量测装置、智能电表量测、天然气系统量测)日益增加, 传统的电力系统分析理论与方法已经无法有效提取海量数据中的主要特征和有效信息, 亟须研究针对综合能源系统特点的数据挖掘和分析的理论与方法。在电网中, 数据驱动技术已经在态势感知^[71-75]、系统控制^[76-79]、稳定评估^[80]等方面有了较为深入的研究, 基于数据挖掘的天然气系统运行与控制研究却鲜见报道。文献[81]建立了一种基于长短期记忆网络的电-气耦合综合能源系统贝叶斯状态估计模型, 通过贝叶斯补全和校正气网中训练样

本,解决了气网量测数据冗余度低,网络结构不可观测的问题,为数据驱动在电-气互联综合能源系统中的应用提供了新思路。

4 综合能源系统状态估计研究展望

综合能源系统状态估计问题已得到了学者与工程人员的广泛关注,基于当前研究所遇到的困难与挑战,笔者认为该领域以下4个方向值得深入研究。

1) 计及不确定性的多能流耦合系统区间状态估计

随着世界范围内能源系统变革,面向未来的能源使用方式和监测体系可能出现更替,电、气、冷、热协同运行的场景将会逐渐增多,实现多能流系统的协同状态估计的需求可能出现。在大规模、多环节、多主体的未来综合能源系统框架下,系统中的不确定性如分布式电源出力、电气冷热负荷功率以及各子系统的量测设备误差将大大增加。因此,为了提高新能源消纳率的前提下保证综合能源系统安全稳定运行,计及系统中不确定性的区间状态估计方法值得深入研究。

2) 基于统一能路理论的综合能源系统状态估计

目前,综合能源系统状态估计体系仍停留于在热网、气网稳态模型的基础上处理数据与模型间的关系,无法在大扰动状况下进行系统实时状态跟踪监测、满足系统安全稳定运行的要求。而已有的暂态模型在此状态估计体系下存在计算时间长、收敛稳定差的缺点,无法应用大规模综合能源系统。因此,相关学者积极对电、气、热统一的能流框架进行研究,基于统一能路理论实现综合能源系统的动态状态估计具有重要意义。

3) 综合能源系统分布式异步状态估计研究

当系统发生较大扰动时,相较于电力系统快速的响应状态,热网与气网较长的暂态过程会使静态估计模型产生较大的精度误差,全局理想估计较为困难,无法进行实时状态跟踪监测、满足系统安全稳定运行的要求。因此,有必要在系统量测时标不统一、动态响应时间不一致的前提下,研究综合能源系统的分布式动态状态估计。

4) 基于数据驱动或数据-模型驱动的综合能源系统状态估计体系

首先,数据驱动应在综合能源系统领域发挥更大的作用,相对电网而言,物理模型仍较难完整精确地描述气网和热网中的内部关系,基于数据驱动的状态估计方法更有优势;其次,数据驱动在综合能源

系统动态估计的负荷预测及坏数据辨识技术上也有很大的应用空间。

5 结语

综合能源系统在协调配置区域资源、提高能源利用效率、可再生能源的渗透率和能源系统灵活性上起到了巨大的推进作用。发展综合能源系统,是实现中国2060“碳中和”宏伟目标的重要途径。面对耦合日益紧密的电-热、电-气综合能源系统,现有的能量管理模式、调度方案难以充分发挥综合能源系统的优势。作为现代能量管理的核心,状态估计技术有望为综合能源系统的协同调度、安全运行提供可靠的数据支撑。

本文综述了电-热、电-气互联综合能源系统状态估计理论的研究现状,综合能源系统的发展对于构建清洁低碳、安全高效的能源体系具有重要意义。本文从模型层面、数据层面和时间尺度层面,对电-热、电-气互联综合能源系统的状态估计理论的研究思路和发展历程进行了阐述和分析比较,分别具体地介绍了电-热、电-气2个子问题的研究逻辑和类比思路,使读者对该领域具有一个较为全面的认识,为后续相关研究提供参考。

参考文献

- [1] MANCARELLA P. MES (multi-energy systems): an overview of concepts and evaluation models[J]. Energy, 2014, 65: 1-17.
- [2] 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.
- [3] WU J, YAN J Y, JIA H J, et al. Integrated energy systems[J]. Applied Energy, 2016, 167: 155-157.
- [4] GUSTAFSSON J, DELSING J, VAN DEVENTER J. Improved district heating substation efficiency with a new control strategy[J]. Applied Energy, 2010, 87(6): 1996-2004.
- [5] KARKI S, KULKARNI M, MANN M D, et al. Efficiency improvements through combined heat and power for on-site distributed generation technologies [J]. Cogeneration & Distributed Generation Journal, 2007, 22(3): 19-34.
- [6] HAST A, SYRI S, LEKAVIČIUS V, et al. District heating in cities as a part of low-carbon energy system[J]. Energy, 2018, 152: 627-639.
- [7] GEIDL M, ANDERSSON G. Optimal power flow of multiple energy carriers [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 145-155.
- [8] Energy independence and security ACT of 2007 [EB/OL] [2004-10-09]. <http://www.ferc.gov/eventcalendar/files/20050608125055-grid-2030.pdf>.
- [9] 胡泉,尚策,程浩忠,等.综合能源系统能流计算方法述评与展

- 望[J].电力系统自动化,2020,44(18):179-191.
- HU Xiao, SHANG Ce, CHENG Haozhong, et al. Review and prospect of calculation method for energy flow in integrated energy system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18): 179-191.
- [10] PAN Z G, GUO Q L, SUN H B. 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.
- [11] 刘文霞,李征洲,杨粤,等.计及需求响应不确定性的综合能源系统协同优化配置[J].电力系统自动化,2020,44(10):41-49.
- LIU Wenxia, LI Zhengzhou, YANG Yue, et al. Collaborative optimal configuration for integrated energy system considering uncertainties of demand response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 41-49.
- [12] CHEN S, WEI Z N, SUN G Q, et al. Adaptive robust day-ahead dispatch for urban energy systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1379-1390.
- [13] LI R, WEI W, MEI S W, et al. Participation of an energy hub in electricity and heat distribution markets: an MPEC approach [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 3641-3653.
- [14] LIU X Z, WU J Z, JENKINS N, et al. Combined analysis of electricity and heat networks[J]. Applied Energy, 2016, 162: 1238-1250.
- [15] DONG J N, GUO Q L, SUN H B, et al. Research on state estimation for combined heat and power networks[C]// 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), July 17-21, 2016, Boston, USA: 1-5.
- [16] 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.
- [17] ZANG H X, GENG M H, XUE M F, et al. A robust state estimator for integrated electrical and heating networks [J]. IEEE Access, 2019, 7: 109990-110001.
- [18] 陈艳波,姚远,杨晓楠,等.面向电-热综合能源系统的双线性抗差状态估计方法[J].电力自动化设备,2019,39(8):47-54.
- CHEN Yanbo, YAO Yuan, YANG Xiaonan, et al. Bilinear robust state estimation method for integrated electricity-heat energy systems [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 47-54.
- [19] 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.
- [20] WANG C, GENG M H, XU Q S, et al. A fast state estimator for integrated electrical and heating networks [J]. Energies, 2020, 13(17): 4488.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] ZHENG W J, LI Z G, LIANG X Y, et al. Decentralized state estimation of combined heat and power system considering communication packet loss [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(4): 646-656.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 刘鑫蕊,李焱,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):479-490.
- 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): 479-490.
- [27] ZHANG S H, GU W, QIU H F, et al. State estimation models of district heating networks for integrated energy system considering incomplete measurements [J]. Applied Energy, 2021, 282: 116105.
- [28] PARKINSON J, WYNNE R. Reduced-order modeling and state estimation applied to gas distribution systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1986, 31(8): 701-709.
- [29] DURGUT İ, 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.
- [30] AHMADIAN BEHROOZ H, BOOZARJOMEHRY R B. Modeling and state estimation for gas transmission networks[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 22: 551-570.
- [31] AHMADIAN BEHROOZ H, BOOZARJOMEHRY R B. Distributed and decentralized state estimation in gas networks as distributed parameter systems [J]. ISA Transactions, 2015, 58: 552-566.
- [32] GE S Y, LIU X O, GE L K, et al. State estimation of regional interconnected electricity and gas networks[J]. Energy Procedia, 2017, 142: 1920-1932.
- [33] 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 electricity and gas networks for Energy Internet [J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 400-408.
- [34] 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.
- [35] 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): 3733-3744.
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): 3733-3744.
- [36] CHEN S, WEI Z N, SUN G Q, et al. An interval state estimation for electricity-gas urban energy systems[C]// 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI²), November 26-28, 2017, Beijing, China: 1-5.
- [37] 董雷,王春斐,李焱,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.
- [38] CHEN Y B, YAO Y, LIN Y Z, et al. Dynamic state estimation for integrated electricity-gas systems based on Kalman filter [J/OL]. CSEE Journal of Power and Energy Systems [2020-10-06]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9215195>.
- [39] 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):5827-5837.
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): 5827-5837.
- [40] LUND H, WERNER S, WILTSHIRE R, et al. 4th generation district heating (4GDH): integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems[J]. Energy, 2014, 68: 1-11.
- [41] 陈艳波,高瑜珑,赵俊博,等.综合能源系统状态估计研究综述[J].高电压技术,2021,47(7):2281-2292.
CHEN Yanbo, GAO Yulong, ZHAO Junbo, et al. Review on integrated energy system state estimation [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2281-2292.
- [42] 孙宏斌,潘昭光,郭庆来,等.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):1-9.
SUN Hongbing, PAN Zhaoguang, GUO Qinglai, et al. Energy management for multi-energy flow: challenges and prospects [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 1-9.
- [43] 张伯明,陈寿孙,严正.高等电力网络分析[M].2版.北京:清华大学出版社,2007.
ZHANG Boming, CHEN Shousun, YAN Zheng. Analysis of higher power network analysis[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [44] 倪以信,陈寿孙,张宝霖.动态电力系统的理论和分析[M].清华大学出版社,2002.
NI Yixin, CHEN Shousun, ZHANG Baolin. Theoretical analysis of dynamic power system [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [45] 刘晟源,林振智,李金城,等.电力系统态势感知技术研究综述与展望[J].电力系统自动化,2020,44(3):229-239.
LIU Shengyuan, LIN Zhenzhi, LI Jincheng, et al. Review and prospect of situation awareness technologies of power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 229-239.
- [46] 于尔铿.电力系统状态估计[M].北京:水利电力出版社,1985.
YU Erkeng. Power system state estimation[M]. Beijing: China Water Power Press, 1985.
- [47] BøHM B, HA S, KIM W, et al. Simple models for operational optimization [R]. Denmark: Technical University of Denmark (DTU), Fraunhofer-Institute for Environmental, Safety and Energy Technology (UMSICHT), Korea District Heating Corporation (KDHC), 2002.
- [48] STEER K C B, WIRTH A, HALGAMUGE S K. Control period selection for improved operating performance in district heating networks[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(2/3): 605-613.
- [49] BEN HASSINE I, EICKER U. Impact of load structure variation and solar thermal energy integration on an existing district heating network [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 50(2): 1437-1446.
- [50] YANG J W, BOTTERUD A, ZHANG N, et al. A cost-sharing approach for decentralized electricity-heat operation with renewables [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1838-1847.
- [51] 孙国强,王文学,吴奕,等.辐射型电-热互联综合能源系统快速潮流计算方法[J].中国电机工程学报,2020,40(13):4131-4142.
SUN Guoqiang, WANG Wenxue, WU Yi, et al. Fast power flow calculation method for radiant electric-thermal interconnected integrated energy system [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(13): 4131-4142.
- [52] 陈群,郝俊红,陈磊,等.电-热综合能源系统中能量的整体运输模型[J].电力系统自动化,2017,41(13):7-13.
CHEN Qun, HAO Junhong, CHEN Lei, et al. Integral transport model for energy of electric-thermal integrated energy system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 7-13.
- [53] CHEN Q, FU R H, XU Y C. Electrical circuit analogy for heat transfer analysis and optimization in heat exchanger networks[J]. Applied Energy, 2015, 139: 81-92.
- [54] 陈彬彬,孙宏斌,尹冠雄,等.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.
CHEN Binbin, SUN Hongbin, YIN Guanxiong, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis (II): hydraulic circuit and thermal circuit [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2133-2142.
- [55] 陈彬彬,孙宏斌,吴文传,等.综合能源系统分析的统一能路理论(三):稳态与动态潮流计算[J].中国电机工程学报,2020,40(15):4820-4831.
CHEN Binbin, SUN Hongbin, WU Wenchuan, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis (III): steady and dynamic energy flow calculation [J]. Proceedings of the

- CSEE, 2020, 40(15): 4820-4831.
- [56] European Parliament. Directive 2012/27/EU of the European parliament and of the council[EB/OL]. [2012-10-25]. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:315:0001:0056:EN:PDF>.
- [57] WEI H. Central heating thermal stations in Beijing energy consumption status and energy saving effect analysis [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2016.
- [58] YUAN S S, XU W. Establishment and validation of a sustainable evaluation model for heat metering technology in China[J]. Energy and Buildings, 2015, 99: 153-161.
- [59] HELSETH A, HOLEN A T. Reliability modeling of gas and electric power distribution systems; similarities and differences [C]// 2006 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, June 11-15, 2006, Stockholm, Sweden: 1-5.
- [60] SHAHIDEPOUR M, FU Y, WIEDMAN T. Impact of natural gas infrastructure on electric power systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5): 1042-1056.
- [61] LI Q, AN S, GEDRA T W. Solving natural gas load flow problems using electric load flow techniques[C]// Proceedings of the North American Power Symposium, 2003, Columbia, USA.
- [62] 张义斌. 天然气-电力混合系统分析方法研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
ZHANG Yibin. Study on the methods for analyzing combined gas and electricity networks[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2005.
- [63] OSIADACZ A J. Simulation and analysis of gas network[EB/OL]. [2021-02-05]. https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=380563b45a569cff551468dfc969e671&site=xueshu_se.
- [64] 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.
- [65] 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.
- [66] CHAUDRY M, JENKINS N, STRBAC G. Multi-time period combined gas and electricity network optimisation [J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(7): 1265-1279.
- [67] 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.
- [68] FANG J K, ZENG Q, AI X M, 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.
- [69] 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): 436-444.
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): 436-444.
- [70] 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.
- [71] 臧海祥, 郭镜玮, 黄蔓云, 等. 基于深度迁移学习的时变拓扑下电力系统状态估计[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(24): 49-56.
ZANG Haixiang, GUO Jingwei, HUANG Manyun, et al. State estimation for power systems with time-varying topology based on deep transfer learning [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(24): 49-56.
- [72] 李建斌, 王鹏程, 傅侃, 等. 基于预处理共轭梯度迭代法的电力系统状态估计算法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(14): 90-96.
LI Jianbin, WANG Pengcheng, FU Kan, et al. State estimation algorithm of power system based on preconditioned conjugate gradient iteration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(14): 90-96.
- [73] WENG Y, NEGI R, FALOUTSOS C, et al. Robust data-driven state estimation for smart grid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(4): 1956-1967.
- [74] HUANG M Y, WEI Z N, SUN G Q, et al. A historical data-driven unscented Kalman filter for distribution system state estimation [C]// 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 16-20, 2017, Chicago, USA: 1-5.
- [75] 王玉彬, 夏明超, 李鹏, 等. 基于改进鲁棒自适应 UKF 的配电网动态状态估计方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(1): 92-100.
WANG Yubin, XIA Mingchao, LI Peng, et al. Dynamic state estimation method of distribution network based on improved robust adaptive unscented Kalman filter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 92-100.
- [76] HUANG S J, LIN J M. Enhancement of anomalous data mining in power system predicting-aided state estimation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19 (1) : 610-619.
- [77] KIM J, TONG L, THOMAS R J. Subspace methods for data attack on state estimation: a data driven approach [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 63(5): 1102-1114.
- [78] 刘东, 张弘, 王建春. 主动配电网技术研究现状综述[J]. 电力工程技术, 2017, 36(4): 2-7.
LIU Dong, ZHANG Hong, WANG Jianchun. Review on the state of the art of active distribution network technology research [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36 (4) : 2-7.
- [79] 刘升伟, 王星华, 鲁迪, 等. 基于改进高斯过程回归的短期负荷概率率区间预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 18-25.
LIU Shengwei, WANG Xinghua, LU Di, et al. Electric load probabilistic interval prediction method based on improved Gaussian process regression [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 18-25.

- [80] 刘道伟,张东霞,孙华东,等.时空大数据环境下的大电网稳定态势量化评估与自适应防控体系构建[J].中国电机工程学报,2015,35(2):268-276.
LIU Daowei, ZHANG Dongxia, SUN Huadong, et al. Construction of stability situation quantitative assessment and adaptive control system for large-scale power grid in the spatio-temporal big data environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 268-276.
- [81] 兰浦哲,韩冬,徐潇源,等.基于长短期记忆的电-气耦合综合能源系统贝叶斯状态估计[J].电力系统自动化,2021,45(20):18-28.
LAN Puzhe, HAN Dong, XU Xiaoyuan, et al. Bayesian state estimation for electric-gas coupled integrated energy system based on long short-term memory [J]. Automation of Electric

Power Systems, 2021, 45(20): 18-28.

臧海祥(1986—),男,博士,副教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统规划与运行分析、综合能源系统、新能源发电技术。E-mail:zanghaixiang@hhu.edu.cn

耿明昊(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向:综合能源系统状态估计。E-mail:gengmhhhu@163.com

黄蔓云(1991—),女,博士,讲师,主要研究方向:状态估计、智能配电网态势感知。E-mail:hmy_hhu@yeah.net

卫志农(1962—),男,通信作者,教授,博士生导师,主要研究方向:综合能源系统、电力系统运行与分析控制。E-mail:wzn_nj@263.com

(编辑 孔丽蓓)

Review and Prospect of State Estimation for Electricity-Heat-Gas Integrated Energy System

ZANG Haixiang, GENG Minghao, HUANG Manyun, WEI Zhingnong, CHEN Sheng, SUN Guoqiang

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: The development of integrated energy system plays a huge role in improving energy efficiency, reducing carbon emissions and increasing the permeability of renewable energy. Faced with the increasingly closely coupled integrated energy system of electricity-heat and electricity-gas interconnection, the existing energy management mode and scheduling means cannot give full play to their due advantages. Therefore, the realization of the integrated, efficient and accurate state estimation of the integrated energy system can provide reliable data support for the subsequent collaborative scheduling and safe operation. In view of this, this paper briefly summarizes the research on the state estimation of the integrated energy system in the background of carbon neutrality, and reviews the development history and difficulties of the theory of state estimation for the integrated energy system. The general idea of the research on the state estimation of the electricity-heat and electricity-gas integrated energy systems is analyzed from the three aspects of model, data and time scale. Finally, the future research directions of the integrated energy system state estimation are prospected.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51877071).

Key words: integrated energy system (IES); state estimation; power flow model; heat network; gas network; carbon neutrality

