

考虑量测误差的电热综合能源系统状态估计方法

李晓^{1,2*}, 李满礼^{1,2}, 胡云龙^{1,2}, 刘国静³, 胡晓燕³, 倪明^{1,2}

(1. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏省南京市 211106;

2. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏省南京市 211106;

3. 国网江苏省电力有限公司经济技术研究院, 江苏省南京市 210008)

State Estimation Method of Electric-thermal Integrated Energy System Considering Measurement Error

LI Xiao^{1,2*}, LI Manli^{1,2}, HU Yunlong^{1,2}, LIU Guojing³, HU Xiaoyan³, NI Ming^{1,2}

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, Jiangsu Province, China;

2. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211106, Jiangsu Province, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Economic and Technology Research Institute, Nanjing 210008, Jiangsu Province, China)

Abstract: With the construction of new power system under the goal of carbon emission peak and carbon neutrality background, the traditional power energy supply network has gradually developed into a multi-energy coupling integrated energy system. In the process of information collection and transmission, the measurement error will inevitably occur in the integrated energy system. However, the traditional weighted least squares method cannot suppress its influence, so that the accuracy of state estimation will be affected. Therefore, a state estimation method of electric-thermal integrated energy system considering measurement error is proposed in this paper. Firstly, the measurement model of electric-thermal integrated energy system is established on the basis of considering the operation characteristics of power system, thermal system and coupling components. Secondly, a robust state estimation method based on Huber estimation is extended to the electric-thermal integrated energy system, then the redundancy analysis of the electric-thermal integrated energy system is carried out. Finally, based on an electric-thermal integrated energy system, the state estimation errors of voltage, phase angle and pressure under different bad data ratios are calculated to verify the effectiveness of the proposed robust estimation method.

Keywords: integrated energy system; state estimation; measurement error; electrothermal coupling; Huber estimation; robust estimation

摘要: 随着“双碳”背景下新型电力系统的建设,传统的单一供能网络逐渐发展成为多能耦合的综合能源系统。综合能源系统在信息采集和传输过程中会不可避免地出现量测误差,而传统的加权最小二乘法无法抑制其影响,影响状态估计的精度。为此,提出一种考虑量测误差的电热综合能源系统状态估计方法。首先,在考虑电力系统、热力系统以及耦合元件运行特性的基础上,建立电热综合能源系统量测模型。其次,将基于Huber估计的抗差状态估计方法拓展到电热综合能源系统中,提出电热综合能源系统抗差状态估计方法,并对电热耦合系统进行冗余度分析。最后,基于某电热综合能源系统算例,计算不同坏数据比例下的电压、相角、压强等状态估计误差,验证所提抗差估计方法的有效性。

关键词: 综合能源系统; 状态估计; 量测误差; 电热耦合; Huber估计; 抗差估计

0 引言

随着气候变化加剧,传统化石能源供应日益紧张,伴随而来的能源效率低、供需矛盾突出、结构不合理等问题迫切需要能源朝着可再生、综合互补利用和低碳化的方向发展^[1]。构建清洁可持续的新型电力系统、保障能源安全已成为各个国家的重要战略目标,中国也提出分别于2030年前和2060年前实现碳达峰和碳中和的“双碳”目标,推动能源低碳转型^[2]。

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(能源综合服务站为枢纽的电网信息物理系统规划评估及运行策略关键技术, 5700-202018196A-0-0-00)。

Science and Technology Foundation of SGCC (Key Technologies for Planning, Evaluation and Operation Strategy of Power Grid Cyber-physical System Based on Integrated Energy Service Station, 5700-202018196A-0-0-00).

传统的单一供电网络缺少不同种类能源之间的相互协调,能源利用率较低,而能源之间必须相互协调才能够优化资源配置,达到低碳和可持续的目的。因此,能够满足多种能源互补运行的综合能源系统(integrated energy system, IES)应运而生^[3]。其中,利用化石燃料、可再生能源、电能等方式同时发电和供热的热电联供网络在冷、热、电等多种能源形式联合供应的多能流网络中发展最为迅速^[4]。

在电力系统中,状态估计(state estimation, SE)利用能量管理系统(energy management system, EMS)收集到的冗余信息数据,按照一定准则对原始数据进行处理,估算出更加精确的状态量以及系统所处的运行状态,是电力系统运行与控制的重要基础。该领域研究已较为成熟,在抗差估计、计及虚假数据注入攻击、计算效率等方面均有涉及^[5-8]。随着“双碳”背景下综合能源系统的快速建设,跨区级和园区级综合能源系统的规模越来越大,采集和传输的数据种类、数据量也愈加庞大和复杂。为更准确地掌握综合能源系统的运行状态,需要对综合能源系统进行状态估计,得到精度更高的全局一致基态潮流解,从而为后续的系统在线安全评估、优化调度提供坚实基础^[9]。目前,对综合能源系统状态估计的研究还处于起步阶段。文献[10]对比分析了电力系统SE和IES-SE的异同,对已有的静态及动态IES-SE模型和方法进行了剖析,指出了加快研究面向多能流的IES-SE的迫切性。文献[4]和文献[11]利用加权最小二乘法(weighted least squares, WLS)分别对电热耦合系统和电气互联系统进行了状态估计,并验证了联合估计相比独立系统估计可降低整体估计误差,具有重要的理论意义和应用价值。但是WLS没有抗差性,当量测数据含有粗差时,精度会受到很大影响。文献[12]提出了一种用于电-气-热IES的三阶段分布式状态估计方法,该方法能够获得具有足够精度和可靠收敛性的全局IES估计结果,显著提高了估计效率,但该文也未考虑不良数据的影响。

基于WLS的状态估计是误差数据服从高斯分布前提下的最优估计算法,具有简单、快速等优点,但实际测量系统中误差数据的分布不一定遵循高斯分布,会对状态估计结果产生负面影响。为克服WLS估计的非抗差性,业内学者、专家相继提出了多种抗差估计方法。常见方法有:极大似然性估计(maximum likelihood estimation, ME)、顺序统计量线性组合估计(linear combination estimation of order statistics, LE)、非参数秩检验估计(nonparametric rank test estimation,

RE)等^[13]。其中,ME估计是电力系统中应用最为广泛的抗差估计方法,如加权最小绝对值法(weighted least absolute value, WLAV)^[14-15]、指数估计^[16]均属于ME估计。由于LE和RE估计方法不容易推导线性观测方程,在电力系统状态估计中的应用相对较少。此外,当前电热综合能源系统状态估计领域也实现了一些抗差估计算法的应用,如WLAV、指数估计、双线性抗差估计等。总的来说,WLAV方法应用较多,但其抗差效果还具有提升空间;指数型抗差估计方法抗差效果较好,但计算求解效率偏低;双线性抗差估计在将非线性模型转换为线性模型的过程中并不一定能保证求解精度。而属于ME估计的Huber抗差估计方法因其算法特点,可以实现抗差精度与求解效率的良好折中,对IES-SE问题具有较强的适用性。

综上所述,为提高IES状态估计抑制粗差的能力,本文以电热综合能源系统为研究对象,提出一种基于Huber估计的综合能源系统抗差估计方法。首先建立电热综合能源系统量测模型,其次将Huber抗差估计方法引入到电-热联合状态估计模型中,最后,通过与WLS方法在不同比例的不良数据条件下进行对比,验证所提Huber估计方法的抗差性和有效性。

1 Huber抗差估计数学原理

1.1 最小二乘估计

设观测向量为 $\mathbf{z}=[z_1, z_2, \dots, z_n]^T$,状态向量为 $\mathbf{x}=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$,误差向量为 $\mathbf{v}=[v_1, v_2, \dots, v_n]^T$,则线性观测方程可记为

$$\mathbf{z} = h(\mathbf{x}) + \mathbf{v} \quad (1)$$

式中: h 表示非线性函数关系。

作为当前求解状态估计问题应用最为广泛的WLS法,根据状态变量与量测矢量之间的关系式,其本质为求解如下数学问题^[17]:

$$\min f(\mathbf{x}) = (\mathbf{z} - h(\mathbf{x}))^T \mathbf{w} (\mathbf{z} - h(\mathbf{x})) \quad (2)$$

式中: \mathbf{w} 为权重矩阵,一般取量测误差向量的方差矩阵的逆,即

$$\mathbf{w} = \mathbf{R}^{-1} \quad (3)$$

式中: \mathbf{R} 为量测误差向量的方差矩阵,形式为对角矩阵,且取值如下:

$$\mathbf{R} = \text{diag}[\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_n^2] \quad (4)$$

式中: σ_i^2 表示第*i*个量测量服从均值一定、方差为 σ_i^2 的正态分布^[18]。

在大多数情况下,正态分布接近于真实的观察世

界。当量测数据服从正态分布时, WLS估计灵活, 模型简单且易于计算, 因此有着广泛的应用^[19]。然而, 当量测量存在粗差时, 将对估计结果产生很大影响, 使估计结果精度降低。而Huber抗差估计对量测量进行等价权处理, 当量测数据有粗差时, 可以得到比WLS更精确的估计结果^[20]。

1.2 Huber抗差估计

WLS估计精度会受到残差过大的量测值的影响, 为克服WLS估计的非抗差性, 本文重点研究了属于ME估计类的Huber抗差估计方法。

ME准则可由如下目标函数表示:

$$\max G = \sum_{i=1}^n \ln f(v_i) \quad (5)$$

令 $\rho = -\ln f$, 则ME的目标函数可转换为

$$\min \Omega = \sum_{i=1}^n \rho(v_i) \quad (6)$$

令 $\varphi = \rho'$, 由上式求极值可得到:

$$\sum_{i=1}^n \varphi(v_i) \mathbf{a}_i = 0 \quad (7)$$

式中: \mathbf{a}_i 为 h 函数的雅可比矩阵第 i 行行向量。

令 $\varphi_i = \psi_i v_i$, 式 (7) 可记为

$$\sum_{i=1}^n \psi_i v_i \mathbf{a}_i = 0 \quad (8)$$

令 $\mathbf{P} = \psi \mathbf{w}$, \mathbf{w} 为原量测量的权重。式 (8) 的矩阵形式为

$$\mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{v} = 0 \quad (9)$$

式 (9) 的解如下:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{z} \quad (10)$$

Huber估计能结合均值无偏最小方差估计的灵敏度和绝对值无偏估计的稳健性, 其 ρ 函数为

$$\rho(v) = \begin{cases} \frac{v^2}{2} & |v| \leq k \\ k|v| - \frac{1}{2}k^2 & |v| > k \end{cases} \quad (11)$$

则 φ 函数、 ψ 函数如下:

$$\varphi(v) = \begin{cases} v & |v| \leq k \\ k \text{sign}(v) & |v| > k \end{cases} \quad (12)$$

$$\psi(v) = \begin{cases} 1 & |v| \leq k \\ k/|v| & |v| > k \end{cases} \quad (13)$$

式中: 当粗差比例在1%~10%时, k 值在1~2之间^[21]。由式 (8) 可知, 当 $k = \infty$ 时, 即 $\psi = 1$, Huber估计等价于WLS估计。

由以上推导过程可知, Huber抗差估计是通过改变残差较大的量测量权重实现的。当测量值对应的残差超过极限阈值时, 通过权重处理降低测量值对应的权重值, 当不超过阈值时, 权重值保持不变。因此, 在每次迭代中, 使残差保持在一定范围内, 从而降低较大残差对估计结果的影响, 保证抗差估计抵御粗差的能力。

2 电热综合能源系统量测与状态估计模型

2.1 电力系统量测模型

在电力系统中, 需要估计的状态量为电压幅值 (V) 和相角 (θ), 记电力系统状态量为 $\mathbf{x}_e = [\theta; V]$ 。电力系统的量测模型如下:

$$\begin{cases} V_i^{\text{MEA}} = V_i + v_{V_i} \\ P_i^{\text{MEA}} = \sum_{j=1}^n (V_i V_j \cos \theta_{ij} G_{ij} + V_i V_j \sin \theta_{ij} B_{ij}) \\ Q_i^{\text{MEA}} = \sum_{j=1}^n (-V_i V_j \cos \theta_{ij} B_{ij} + V_i V_j \sin \theta_{ij} G_{ij}) \\ P_{ij}^{\text{MEA}} = -V_i V_j \cos \theta_{ij} g_{ij} - V_i V_j \sin \theta_{ij} b_{ij} + V_i^2 g_{ij} \\ Q_{ij}^{\text{MEA}} = V_i V_j \cos \theta_{ij} b_{ij} - V_i V_j \sin \theta_{ij} g_{ij} - V_i^2 (b_{ij} + y_c) \end{cases} \quad (14)$$

式中: 上标MEA代表量测值; v_{V_i} 为 V_i 的量测误差; P_i 、 Q_i 分别为节点 i 注入有功、无功功率; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点 i 和节点 j 之间的互电导和互电纳; P_{ij} 、 Q_{ij} 分别为支路 ij 上节点 i 流向节点 j 的有功、无功功率; g_{ij} 、 b_{ij} 分别为支路 ij 的电导与电纳; y_c 为对地电纳; V_i 为节点 i 的电压幅值; θ_{ij} 为支路 ij 两端的相角差, 且 $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ 。

2.2 热力系统量测模型

供热网络的分析包括水力模型与热力模型两方面, 水力模型量测量包括节点压强 p 、支路流量 m_{ij} 、节点注入流量 m_q , 热力模型中的量测量包括节点供热温度 T_s 、节点回热温度 T_r 、节点热功率 ϕ ^[22], 状态量一般选取节点压强、节点供热和回热温度, 故热力系统的状态量可记为 $\mathbf{x}_h = [p; T_s; T_r]$ 。

热力系统量测方程可表示为式 (15) 的形式:

$$\begin{cases} p_i^{\text{MEA}} = p_i + v_{p_i} \\ m_{ij}^{\text{MEA}} = \frac{\sqrt{p_i - p_j}}{\sqrt{K_{ij}}} \\ m_{q_i}^{\text{MEA}} = \sum_{j=1}^n \frac{\sqrt{p_i - p_j}}{\sqrt{K_{ij}}} \\ \phi_i^{\text{MEA}} = C_p m_{q_i} (T_{s_i} - T_{r_i}) \end{cases} \quad (15)$$

式中: p_i 为热网节点 i 的压强; v_{p_i} 为 p_i 的量测误差; m_{ij} 为支路 ij 的水流量; m_{q_i} 为节点 i 的流入水流量之和; K_{ij} 为与管道直径、材料以及管道内液态种类有关的系数,具体计算方法可参考文献[23]; ϕ_i 是节点 i 的热功率; C_p 为水的比热容系数; T_{si} 、 T_{ri} 分别代表节点 i 的供热温度和回热温度。

2.3 电热耦合元件量测模型

电热综合能源系统中常见的耦合元件有热电联产(combined heat and power, CHP)机组、电锅炉(electric boilers, EB)、循环泵等。CHP机组是热电联产系统中最重要的耦合元件,既可以产生电能,也可以产生热能。EB也是常见的能量转换耦合单元,依靠电气元件来产生热能,同时不产生燃烧类的化学反应,无黑烟、二氧化硫、二氧化碳等废弃物排放。CHP机组、EB能量转换具有如下的数学关系:

$$\phi_{\text{CHP}} = c P_{\text{CHP}} \quad (16)$$

$$\phi_{\text{EB}} = \eta P_{\text{EB}} \quad (17)$$

式中: ϕ 、 P 分别表示热功率和电功率; c 是热电生产比; η 是电加热的转换效率。

2.4 电热综合能源系统状态估计模型

在电热耦合网络状态估计问题中,状态量和量测量可分别表示为

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_e \\ \mathbf{x}_h \end{bmatrix}, \quad \mathbf{z} = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_e \\ \mathbf{z}_h \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中: \mathbf{x}_e 、 \mathbf{x}_h 分别是电网、热网状态量; \mathbf{z}_e 、 \mathbf{z}_h 分别是电网、热网量测量。其中, $\mathbf{z}_e = [V_i; P_i; Q_i; P_{ij}; Q_{ij}]$, $\mathbf{z}_h = [p_i; m_{ij}; m_{q_i}; \phi_i]$ 。若采用加权最小二乘法对电热综合能源系统进行状态估计,可表示为如下数学问题:

$$\begin{cases} \min F(\mathbf{x}) = [\mathbf{z}_e - h_e(\mathbf{x}_e)]^T \omega_e [\mathbf{z}_e - h_e(\mathbf{x}_e)] + \\ [\mathbf{z}_h - h_h(\mathbf{x}_h)]^T \omega_h [\mathbf{z}_h - h_h(\mathbf{x}_h)] \\ \text{s.t. } c(\mathbf{x}) = 0 \end{cases} \quad (19)$$

式中: h_e 、 h_h 分别为电网、热网的非线性函数; \mathbf{z}_e 、 \mathbf{z}_h 分别为电网、热网的量测量(详见式(14)和式(15)); ω_e 、 ω_h 分别为电网、热网量测量权重; 等式约束 $c(\mathbf{x})$ 为耦合元件约束(详见式(16)和式(17))。

Huber估计中通过引用 ψ 函数,降低残差过大的量测量权重,从而达到抗差效果,可转换为如下数学问题:

$$\begin{cases} \min F(\mathbf{x}) = [\mathbf{z}_e - h_e(\mathbf{x}_e)]^T \omega_e \psi[\mathbf{z}_e - h_e(\mathbf{x}_e)] + \\ [\mathbf{z}_h - h_h(\mathbf{x}_h)]^T \omega_h \psi[\mathbf{z}_h - h_h(\mathbf{x}_h)] \\ \text{s.t. } c(\mathbf{x}) = 0 \end{cases} \quad (20)$$

式中: ψ 函数具体计算方法参见式(13)。

2.5 冗余度分析

量测冗余度可定义为量测量个数 n 与待估计状态量个数 m 的比值 n/m ,状态估计就是利用较大的冗余度来提升数据精度。在电热综合能源系统中,由于耦合元件增大了系统的冗余度,使得整个电热综合能源系统的状态估计更加准确。

对于电热综合能源系统,其潮流方程可写为

$$\begin{cases} \mathbf{g}_e = f_e(V_i, \theta_i) \\ \mathbf{g}_h = f_h(P_i, T_{si}, T_{ri}) \\ f(V_i, \theta_i, P_i, T_{si}, T_{ri}) = 0 \end{cases} \quad (21)$$

式中: \mathbf{g}_e 为电网真值; \mathbf{g}_h 为热网真值; f_e 为电网潮流方程; f_h 为热网潮流方程; f 为耦合元件约束条件。

在电热综合能源系统中,若已知部分状态量,可通过潮流方程或耦合元件约束求得另一系统状态量,从而在量测量数目不变的条件下,降低状态量个数,增大系统冗余度。例如,电网节点和热网节点由于CHP机组而产生热电耦合,若对电热综合能源系统进行联合状态估计,此时若电网节点的状态量 \mathbf{x}_e 为已知,通过电网潮流方程可计算电热耦合节点相应电功率 P_{CHP} 。由于式(16)的存在,与之相对应的热网节点的热功率 ϕ_{CHP} 即为已知。此时,若已知 P_i 、 T_{si} 、 T_{ri} 三者中任何两个量,即可确定第三个量,也就是状态量个数减1。根据冗余度的定义,此时量测量不变的前提下,状态量数目减少,此时冗余度变大。随着耦合元件增多,冗余度也随之变大,也越有利于状态估计。

3 算例分析

本文电热综合能源系统算例由IEEE 14节点电网和2个独立供热网络构成,如图1和图2所示。热网包括2个CHP机组以及14个热负荷节点。热源节点CHP1和CHP2分别对应电网中的2号和3号节点。在热力网

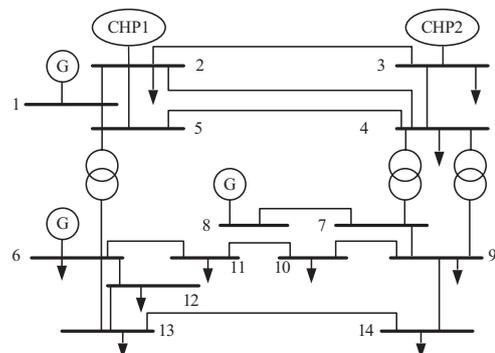
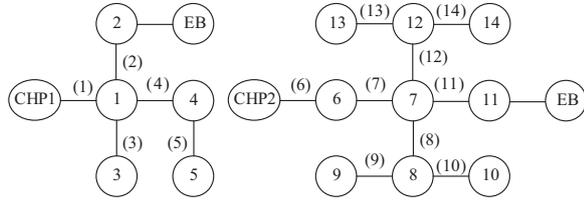


图1 IEEE14节点拓扑图

Fig. 1 IEEE 14-bus topology diagram



(注: CHP1,CHP2 是热源节点; 1,2,..., 14 是热负荷节点; (1),(2),..., (14) 是管道支路编号。)

图2 供热网络结构图

Fig. 2 Heat supply network structure diagram

络2号和11号节点安装了EB, 分别对应电网节点6和节点8。该系统详细参数可参见文献[24]。

为验证本文所提方法的有效性, 采用MATLAB R2016b平台进行仿真, 仿真测试的计算机配置为Intel Core i5-8250 U @1.80 GHz CPU, 内存为8 GB, 操作系统为Win10, 仿真用时0.87 s。

量测数据以潮流计算结果为真值的基础上叠加2%的误差构成。在验证抗差性能的过程中, 人为随机添加坏数据, 本文设置坏数据的方式有置零、取反、减小一半、增大一倍4种, 如表1所示。

表1 坏数据设置方式

Table 1 Setting method of bad data

量测量	z_i	z_i	z_i	z_i
修改后	0	$-z_i$	$z_i/2$	$2z_i$

本文使用平均误差 E_M 和最大误差 E_{MA} 评价抗差性能, 定义如下:

$$E_M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \hat{x}_i| \quad (22)$$

$$E_{MA} = \max\{|x_1 - \hat{x}_1|, |x_2 - \hat{x}_2|, \dots, |x_n - \hat{x}_n|\} \quad (23)$$

式中: x_i 是状态量真值; \hat{x}_i 是状态量的估计值。

电力侧电压幅值与相角误差结果如图3和图4所示, 热力侧节点压强与供热、回热温度误差结果如图5、图6和图7所示。图示结果为电网、热网所有节点上的误差平均值; 对比的WLS估计算法未考虑不良数据辨识环节。

由图3可知, Huber估计相比于WLS估计, 对电压幅值和相角具有很好的抗差效果, 能够有效抑制粗误差对电压幅值和相角平均误差的影响。从图4中可以看出, Huber估计在降低电压幅值与相角最大误差方面, 性能不如降低平均误差优异, 但也能有效降低最大误差。

在图5中, 2种估计方法的压强平均误差和最大误差增长趋势大致相同, Huber估计随着坏数据比例的上升, 降低误差的效果也越来越明显。从图6、图7可

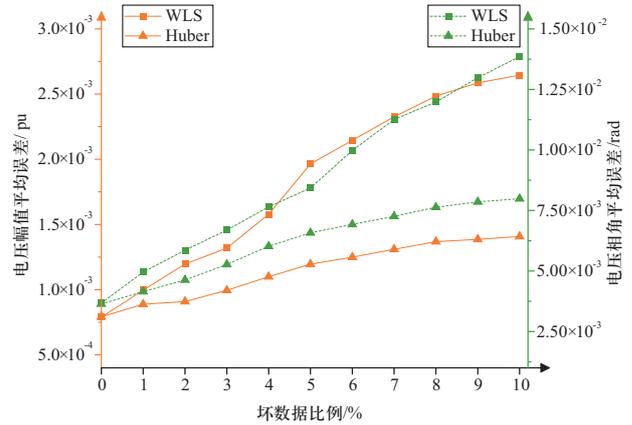


图3 电压幅值与相角平均误差

Fig. 3 ME of voltage amplitude and phase angle

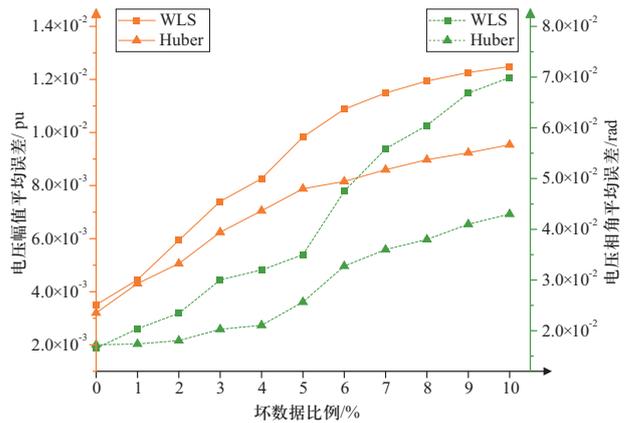


图4 电压幅值与相角最大误差

Fig. 4 MAE of voltage amplitude and phase angle

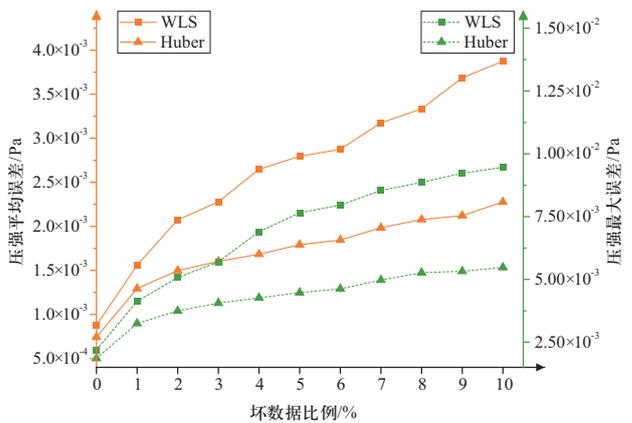


图5 压强平均误差与最大误差

Fig. 5 ME and MAE of pressure

以看出, 热网供热、回热温度的误差相差不大, 平均误差和最大误差随坏数据比例的增长趋势也基本一致, 抗差效果相似, Huber估计的平均误差和最大误差相较于WLS均显著降低。

从图3—图7可以看出, 在没有坏数据的情况下, Huber估计与WLS估计的估计误差相差不大。当坏数

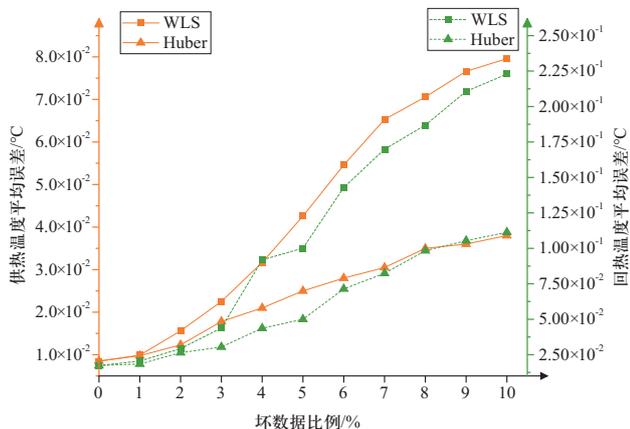


图6 供热温度与回热温度平均误差

Fig. 6 ME of water supply temperature and water return temperature

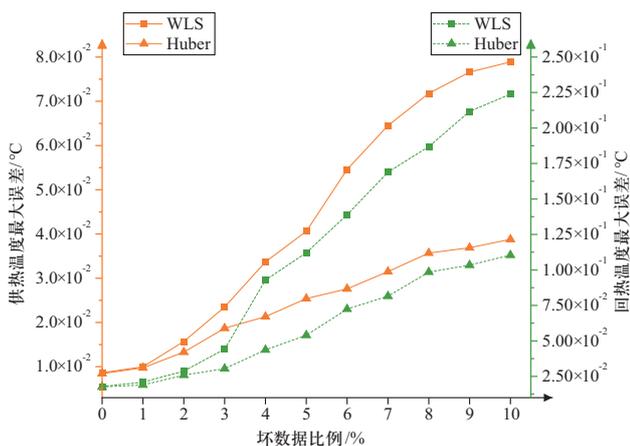


图7 供热温度与回热温度最大误差

Fig. 7 MAE of water supply temperature and water return temperature

据比例较低时,抗差效果并不明显。随着坏数据比例逐渐增大,2种方法的平均误差与最大误差均随之增大,但Huber估计能有效降低状态量的平均误差和最大误差。在最大坏数据比例下,电压幅值、相角的平均误差分别下降49.7%、43.4%,压强平均误差下降40.9%。图6中供热温度、回热温度平均误差分别下降52.7%、48.9%,图7中供热温度、回热温度最大误差分别下降50.2%、49.8%,均可获得良好的抗差效果。因此,Huber估计方法总体上具有良好的抗差性,能有效抵御坏数据对IES状态估计结果的不良影响。

4 结论

本文提出一种考虑量测误差的电热综合能源系统抗差状态估计方法,以抵御量测数据中的坏数据对状态估计结果精度的影响。算例仿真结果表明,本文采用的Huber估计方法相比于WLS估计,可在坏数据比例增大时显著降低状态估计的平均误差与最大误差,且随着坏数据占比提高,抗差效果越突出。综上,本

文提出的抗差估计方法可以有效降低坏数据对系统状态估计精度的影响,提升“双碳”背景下综合能源系统状态感知的能力,保障系统的安全运行。

本文只考虑了包含2种能量形式的电热综合能源系统,后续研究中还可以考虑更多能量形式的耦合系统。另外,针对不良数据的相关性强弱差异进行算法抗差性能分析,以及热网的动态时变特性也将在未来工作中进一步研究。

参考文献

- [1] LI J X, WANG D, JIA H J, et al. Prospects of key technologies of integrated energy systems for rural electrification in China[J]. *Global Energy Interconnection*, 2021, 4(1): 3-17.
- [2] 江冰. 构建面向30·60的新型电力系统: 中国电力4.0的思考[J]. *全球能源互联网*, 2021, 4(6): 534-541.
JIANG Bing. Building new power system for 30·60—reflections on China's electricity 4.0[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2021, 4(6): 534-541(in Chinese).
- [3] LU X J, WANG J, LIU G, et al. Station-and-network-coordinated planning of integrated energy system considering integrated demand response[J]. *Global Energy Interconnection*, 2021, 4(1): 39-47.
- [4] 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(in Chinese).
- [5] 李延真, 郭英雷, 彭博, 等. 基于多时间尺度状态估计的配电网实时态势预测[J]. *电力工程技术*, 2020, 39(2): 127-134.
LI Yanzhen, GUO Yinglei, PENG Bo, et al. Real-time situation prediction of distribution network based on multi-time scale state estimation[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2020, 39(2): 127-134(in Chinese).
- [6] 高正平, 刘昊宇, 李璇, 等. 从变电站到能源综合服务站: 演化路径探讨[J]. *全球能源互联网*, 2021, 4(4): 411-423.
GAO Zhengping, LIU Haoyu, LI Hu, et al. From substation to integrated energy service station: discussion on the evolutionary path[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2021, 4(4): 411-423(in Chinese).
- [7] 王玲, 邓志, 马明, 等. 基于状态估计残差比较的配电网故障区段定位方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(14): 132-139.
WANG Ling, DENG Zhi, MA Ming, et al. A method for locating fault sections in distribution networks based on the comparison of state estimation residual errors[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(14): 132-139(in Chinese).
- [8] 肖飞, 叶康, 邓祥力, 等. 基于最优编码集及智能状态估计的电网故障诊断方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(2): 89-97.
XIAO Fei, YE Kang, DENG Xiangli, et al. A fault diagnosis method of a power grid based on an optimal coding set and intelligent state estimation[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(2): 89-97(in Chinese).
- [9] 李静, 李幸芝, 韩蓓, 等. 考虑分布式电源不确定性与相

- 关性的配电网状态估计[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(3): 231-237.
- LI Jing, LI Xingzhi, HAN Bei, et al. State estimation in distribution systems considering distributed generation uncertainties with correlations[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(3): 231-237(in Chinese).
- [10] 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(in Chinese).
- [11] 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(in Chinese).
- [12] DU Y X, ZHANG W, ZHANG T T. Distributed bilinear state estimation based on ADMM for integrated energy system combining electricity, heat and gas[C]//2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting. August 4-8, 2019, Atlanta, GA, USA. IEEE, 2019: 1-5.
- [13] 牛胜锁, 张达, 梁志瑞, 等. 基于抗差总体最小二乘法的电力系统谐波状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 106-111.
- NIU Shengsu, ZHANG Da, LIANG Zhirui, et al. Power system harmonic state estimation based on robust total least squares[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 106-111(in Chinese).
- [14] 沈甜甜, 黄启建, 吴常胜, 等. 考虑零注入约束的双线性WLAV状态估计[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(6): 556-561.
- SHEN Tiantian, HUANG Qijian, WU Changsheng, et al. Power system state estimation using bilinear WLAV method with zero injection constraints[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(6): 556-561(in Chinese).
- [15] 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(in Chinese).
- [16] 郭焯, 张伯明, 吴文传. 指数型目标函数电力系统抗差状态估计的解法与性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7): 89-95.
- GUO Ye, ZHANG Bomeng, WU Wenchuan. Solution and performance analysis to a robust state estimation method with exponential objective function[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7): 89-95(in Chinese).
- [17] 吴在军, 徐俊俊, 余星火, 等. 主动配电网状态估计技术评述[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 182-191.
- WU Zaijun, XU Junjun, YU Xinghuo, et al. Review on state estimation technique of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 182-191(in Chinese).
- [18] 肖润龙, 王刚, 郝晓亮, 等. 静态状态估计中权重矩阵确定的方法研究[J]. 计算机仿真, 2018, 35(9): 391-396.
- XIAO Runlong, WANG Gang, HAO Xiaoliang, et al. Method for determining the weight matrix in static state estimation[J]. Computer Simulation, 2018, 35(9): 391-396(in Chinese).
- [19] 颜伟, 段磊, 杨焕燕, 等. 基于智能电表量测的三相四线制配网抗差估计[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 60-67.
- YAN Wei, DUAN Lei, YANG Huanyan, et al. Robust state estimation for three-phase four-wire distribution system using smart meters measurement data[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 60-67(in Chinese).
- [20] 牛胜锁, 刘颖, 梁志瑞, 等. 基于广域测量和抗差最小二乘法的电力系统谐波状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 10-14.
- NIU Shengsu, LIU Ying, LIANG Zhirui, et al. Power system harmonic state estimation based on generalized measurement and robust least squares[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 10-14(in Chinese).
- [21] 李响, 刘玲群, 郭志忠. 抗差最小二乘法状态估计[J]. 继电器, 2003, 31(7): 50-53.
- LI Xiang, LIU Lingqun, GUO Zhizhong. State estimation with the least robustness square method[J]. Relay, 2003, 31(7): 50-53(in Chinese).
- [22] 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(in Chinese).
- [23] LIU X Z, WU J Z, JENKINS N, et al. Combined analysis of electricity and heat networks[J]. Applied Energy, 2016, 162: 1238-1250.
- [24] 刘述欣. 电热联合系统潮流及最优潮流研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

收稿日期: 2021-10-19; 修回日期: 2022-03-07。



李晓

作者简介:

李晓(1994), 男, 硕士, 工程师, 从事电力信息物理系统、综合能源系统态势感知、运行优化等研究工作。通信作者, E-mail: lixiao5@sgepri.sgcc.com.cn。

李满礼(1989), 男, 硕士, 工程师, 从事电力信息物理系统、综合能源系统、电网安全稳定控制等研究工作, E-mail: limanli@sgepri.sgcc.com.cn。

胡云龙(1997), 男, 硕士, 研究方向为综合能源系统、状态估计等, E-mail: hu_yunlong1997@163.com。

刘国静(1988), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电网规划、储能规划、能源经济等, E-mail: liu.guojing@qq.com。

倪明(1969), 男, 博士, 高级工程师(研究员级), 从事电力信息物理系统、电力系统安全稳定控制等研究工作, E-mail: ni-ming@sgepri.sgcc.com.cn。

(责任编辑 张宇)