

基于集合论估计的电网状态辨识

(一)建模

何光宇¹, 常乃超², 董树锋³, 王 彬⁴

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海市 200240; 2. 国家电网公司国家电力调度控制中心, 北京市 100031;
3. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 4. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东省广州市 510600)

摘要: 状态估计作为电力系统分析与控制的基础,是能量管理系统的重要组成部分。文中通过对已有状态估计方法(包括最小二乘法、经典抗差估计方法以及近年来涌现的新的估计方法)的特点的研究,分析了现有研究存在的主要问题,并指出引入集合论估计可有效解决该问题,以提升估计结果可信性。基于集合论估计的基本思想,研究了基于集合论估计理论的电网状态辨识的模型。该模型可明确系统真实状态和辨识结果的关系,理论上保证了结果的可信性。文中对模型中的属性集合进行了数学描述,并提出了基于区间的解集描述,保证了模型的可求解性和可应用性。

关键词: 状态估计; 集合论估计; 可信性; 电力系统

0 引言

电力系统状态估计^[1]利用现场量测、网络拓扑、网络参数及其他可用信息,依靠量测冗余过滤量测过程中不可避免的噪声,检测并识别坏数据,是电力系统分析和控制的基础。能量管理系统(EMS)中高级应用程序的有效运行在很大程度上依赖于状态估计系统的稳定性及其所提供结果的可信性。

对于状态估计的研究已有四十多年,众多专家学者在这一领域辛勤研究,取得了大量丰硕成果。电力系统状态估计最初由 F. C. Schweppe 提出^[2-4],估计方法采用加权最小二乘法。随后,为弥补加权最小二乘法的不足,产生了抗差估计理论^[5]。早期的抗差估计主要包括 M 估计^[6]、广义 M 估计^[7-9]、高崩溃污染率估计^[10]、顺序统计量线性组合型估计(L 估计)^[6]、非参数型秩检验估计(R 估计)^[6]、自适应抗差估计^[11-13]等,其中,M 估计、广义 M 估计、高崩溃污染率估计已应用于电力系统状态估计领域。近年来,在抗差状态估计方面也涌现出较多的研究成果,如指数型目标函数抗差状态估计^[14]、基于最大指数平方的抗差状态估计^[15]、基于 Gauss-Markov 模型的 t 型抗差状态估计^[16]和电力系统量测噪声自适应抗差状态估计^[17]等抗差状态估计方法。此外,基于信息论的状态估计方法试图从量测

中提取更多信息或尽量使信源和信道的信息损失最小,包括最大相关熵估计、最小信息损失状态估计等。在状态估计领域的最新进展则是近年来出现的基于“最多测点赞同的状态为最合理状态”这一理念的一类估计方法^[18-25]。

然而在具体实践中,仍然可以发现实时数据的可信性尚不能满足闭环控制的要求。根本问题在于现有状态估计方法难以确定估计值与真值的关系。为解决此问题,本系列论文提出了基于集合论估计的状态辨识的理论框架和求解方法。在状态估计中引入集合论估计的基本思想,对运行中与电网运行状态相关的可用信息进行梳理、分析,建立基于集合的模型,并进一步计算得到与所有信息相一致的可行状态集合,该集合必然包含电网的真实状态。

表征网络拓扑的开关数据(遥信数据)与表征电压和功率水平的量测数据(遥测数据)具有时变性,因此本系列论文重点研究此两者的不确定性。基于各个击破的思路,本系列论文通过求解混合整数规划模型来辨识出可能的拓扑错误;通过分层分级搜索算法,来识别所有离群点;通过区间分析和求解优化模型的方法,来求解可行解集。理论和算例表明,本系列论文所提方法可同时处理量测错误和拓扑错误,较为高效地求得可信的、低保守性的状态集合。从而更为有效地认知系统的真实运行状态,并为实现闭环自动控制提供支撑。

本文是系列论文首篇,在对状态估计已有方法及其存在的问题进行调研分析的基础上,结合智能

收稿日期: 2015-05-29; 修回日期: 2016-01-06。

上网日期: 2016-01-19。

国家自然科学基金资助项目(51207136)。

电网中实现闭环自动控制的需要,将集合论估计引入电力系统状态估计中,建立了基于集合论估计的电网状态辨识模型,以期为后续研究奠定基础。

1 电力系统状态估计已有研究分析

1.1 存在的根本问题

经过近半个世纪的研究,电力系统状态估计取得了丰硕的研究成果,然而现有状态估计系统的可靠性及所提供结果的可信性仍然难以满足闭环自动控制系统对数据可信度的要求。根本问题在于难以确定估计值与真值的关系。在理论上,现有状态估计方法往往是基于统计学上的渐进理论,但是它对大样本的要求在电力系统中并不满足;在方法上,现有状态估计方法往往追求量测残差的某种形式最小,而残差最小,并不意味着估计结果和真实状态就越相近。其次,状态估计的准则函数选取具有一定的主观性,往往建立在对量测误差的统计特性的假设基础上,而这些假设在工程实践中未必成立。最后,现有状态估计方法基于潮流方程建立优化模型,由于潮流方程的非线性、优化模型的非凸性,导致无法得到全局最优解,存在数值稳定性问题,在恶劣情况下可能不收敛。如果这些问题不解决,基于现有状态估计的结果进行闭环自动控制,其可靠性是得不到保障的。

具体而言,可将已有方法分为如下两大类。

1) 第一类:加权最小二乘法及针对其的各种改进方法。这类方法的特点是,其所利用的原始信息仅包括测点量测值,致力于由一组有冗余的量测值求得估计值,可看作是量测空间中一个点到状态空间一个点的映射(量测空间的维度即为测点数目)。由于量测值并不显式包含真值的任何信息,由此得到的状态估计结果,抗差性有所不足,容易受坏数据影响。

当存在个别量测错误时基于“残差最小”理念算法得到的结果如图1所示。可见,当存在个别量测错误时,由于此类算法均建立在“残差最小”理念基础上,因此,状态估计结果受到了较严重的影响。由此可见,正如文献[21]指出“对某测点而言,其残差最小,只能说明该测点估计值与量测值较为接近,而不能说明该测点估计值与真值较为接近。而且,由于量测误差客观存在,片面追求估计值与量测值最为接近,反倒有可能使估计值远离真值。”

2) 第二类:基于“最多测点赞同的状态为最合理状态”理念的状态估计方法。这类方法引入了测量不确定度等先验信息,而测量不确定度是以测量值为中心的一个区间(集合),测点真值以一定置信概

率落在这一区间内。这一类方法致力于由一组以量测值为中心的集合求得估计值,可看作是量测空间中一个集合到状态空间中一个点的映射。与第一类方法相比,这类方法在理论上有较大改进,不追求对量测值的精确拟合,而是通过引入包括真值信息的先验知识,求解最多测点赞同的状态,所得状态更加合理,合格率和解的抗差性都有明显提升。其中,基于测量不确定理论的状态估计方法,所建模型及所提求解方法利于快速计算,便于工程应用,已被应用于多个实际电力系统,应用效果良好。

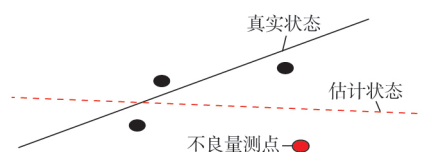


图1 当存在个别量测错误时基于“残差最小”理念算法得到的结果
Fig.1 Results based on concept of “minimum residual” algorithm when measurement errors exist

当存在个别量测错误时基于“最多测点赞同”理念算法得到的结果如图2所示。可见,采用全新理念“落在以量测值为中心的给定大小区间内测点数目最多”的状态估计新方法在实际应用中提升了状态估计的合格率。然而,基于这一全新理念进行状态估计的结果应用于闭环控制仍存在较大风险,这是由于给出的估计结果仅为系统的一个可能状态,这一状态恰是系统真实状态的可能性非常小。也就是说,估计结果与真值总存在偏差,且偏差大小未知。

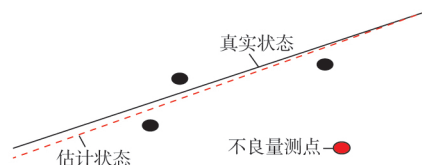


图2 当存在个别量测错误时基于“最多测点赞同”理念算法得到的结果
Fig.2 Results based on concept of “most measuring point approved” algorithm when measurement errors exist

事实上,对测点 i ,设其量测值、估计值和真值分别为 $z_i, \hat{z}_i, \tilde{z}_i$,由测量不确定度理论,可推出真值 $\tilde{z}_i$ 落在以 z_i 为中心的一个区间内的概率;但目前电力系统状态估计理论,无法推断估计值 $\hat{z}_i$ 与真值 $\tilde{z}_i$ 的关系。这可能也就是在实际运行中,人们更加信任、更愿意使用量测值(而非状态估计结果)的深层原因。

1.2 可行的解决思路

上述两类方法有一个共同特点,即所求得的估

计结果,与真值没有显式关系(即前文指出的状态估计结果与真值总存在偏差,且偏差大小未知)。这一特点导致了估计结果的可信性饱受运行调度人员质疑;但也启示我们,要提高估计结果的可信性,估计结果必须与真值有关。根据测不准原理,系统真值不可知,恰好测得、求得系统真值均不可能。那么,是否可以借鉴第二类方法思路,将状态估计结果也表示为一个包含真值的集合呢?若这一思路成立,就得到了一类新的状态估计研究方法,这类方法可看作是量测空间中一个集合到状态空间中一个集合的映射。由于利用了包含真值的先验知识,这类方法抗差性会较强;同时,由于估计结果表示为一个包含真值的集合,估计结果与真值的最大偏差可以界定,估计结果可信性得到了质的提升。基于此,称这一类状态估计方法为状态辨识,下面介绍其建模方法和解集描述方法。

2 状态辨识建模

2.1 基于集合论估计的统一模型

首先,分析可用信息。在传统状态估计中利用的信息主要包括网络拓扑 τ 、网络参数 p 、量测数据 Z ,量测方程 $Z=h(x,\tau,p)+e$,以及物理约束 $g(x,\tau,p)=0$ 和 $l(x,\tau,p)\geq 0$,其中 x 为状态向量。

其次,对信息以集合的形式进行描述。以量测误差 e 为例,假设其存在某一特性(如果不具有任何特性,则量测数据提供不了任何信息),且具有该特性的所有向量组成集合 E ,从而 $e\in E$ 。同理,可假设存在集合 T 和 P ,使得 $\tau\in T$ 以及 $p\in P$ 。

最后,建立集合论估计模型。该模型的解集 X 为:

$$X=\{x\in\mathbb{R}^n\mid Z=h(x,\tau,p)+e,g(x,\tau,p)=0, l(x,\tau,p)\geq 0,e\in E,\tau\in T,p\in P\} \quad (1)$$

其中,集合 E 、集合 T 和集合 P 分别称为量测误差、网络拓扑和网络参数的属性所构成的集合, X 即为可信状态集合。

若不考虑网络参数 p 的不确定性,即认为参数已知,则集合 P 为元素个数为 1 的集合,上述模型可退化为:

$$X=\{x\in\mathbb{R}^n\mid Z=h(x,\tau)+e,g(x,\tau)=0, l(x,\tau)\geq 0,e\in E,\tau\in T\} \quad (2)$$

进一步,若不考虑网络拓扑 τ 的不确定性,即认为拓扑已知,则集合 T 为元素个数为 1 的集合,此时模型可进一步退化为:

$$X=\{x\in\mathbb{R}^n\mid Z=h(x)+e,g(x)=0, l(x)\geq 0,e\in E\} \quad (3)$$

在传统状态估计中,求解量测变量的估计值 $\hat{z}$ 是非常重要的功能。相应地,在状态可信辨识中,可转化为求解量测变量的取值集合 Z ,具体表示为:

$$Z=\{z\in\mathbb{R}^m\mid z=h(x),\forall x\in X\} \quad (4)$$

对于式(3)和式(4),讨论如下。

1)对于状态量的真值 x_t ,显然满足 $g(x_t)=0$, $l(x_t)\geq 0$,因此只要对误差集合 E 的描述是准确的,即满足 $Z-h(x_t)\in E$,则 $x_t\in X$,即集合 X 是可信的。同理,对于量测量的真值 z_t ,同样满足 $z_t\in Z$,即集合 Z 是可信的。

2)对于量测量 z ,在给定误差集合 E 的情况下,其初始集合 Z_0 可确定为:

$$Z_0=\{z\in\mathbb{R}^m\mid z=Z-e,e\in E\} \quad (5)$$

然而,由于 E 是由量测点对应误差本身的特性所决定的,是局部信息,因此 Z_0 仅仅是由局部信息确定的。相比而言,集合 Z 是由包含全网量测、全网物理约束等在内的全局信息所确定的,因此必然存在 $z\in Z_0$,但 $z\notin Z$,即两者满足:

$$Z\subseteq Z_0 \quad (6)$$

2.2 与传统状态估计模型的比较

本节通过两节点系统的简单算例,来具体说明状态辨识模型与传统状态估计模型在结果可信性上的区别。该两节点系统的具体形式和真实潮流分布参见图 3,在潮流数据基础上添加 2% 的均匀分布的噪声得到量测数据,具体参见图 4。图 3 和图 4 中, S_{12} , S_{21} 和 S_{12}' , S_{21}' 分别为支路功率的真值和量测值, Z 为支路阻抗, S_1 和 S_2 分别为节点 1 和节点 2 的注入功率,各数据均为标么值。

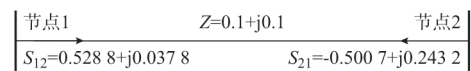


图3 两节点系统示意图
Fig.3 Schematic diagram of 2-bus system

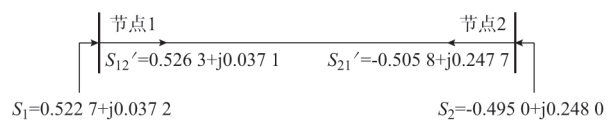


图4 两节点系统的量测数据
Fig.4 Measurement data of 2-bus system

该系统的量测数据中并不存在不良数据,采用加权最小二乘估计(WLS)、加权最小绝对值估计(WLAV)、非二次准则估计(QC)这3种估计准则对其进行状态估计,选取节点1作为参考节点,估计结果参见表1。表中,节点1电压幅值 v_1 的真值和量测值分别为 1(标么值)和 0.986,节点2电压幅值 v_2 的真值和量测值分别为 1.05 和 1.034,节点1和

2 电压相角 θ_1 和 θ_2 的真值分别为 0° 和 -30° 。该简单算例说明: ①传统状态估计的计算结果具有主观性, 估计准则的不同、量测权重的不同等都会得到不同的估计结果, 而真值是客观的; ②传统状态估计的计算结果与真值存在偏差, 在一般情况下, 量测精度较高, 此偏差较小, 故传统状态估计的实用性较好, 但在某些情况下, 此偏差较大(如算例所示), 此时基于其结果进行优化控制, 可能带来严重后果, 这也是传统状态估计一直无法真正为闭环控制所用的原因。传统状态估计方法应用于电网分析具有较高的实用性, 但其结果的可靠性无从保证(无法明确估计结果与真值的关系), 其应用于闭环控制, 仍存在不足。

表 1 两节点系统的状态估计结果
Table 1 State estimation results of 2-bus system

估计准则	v_1	$\theta_1/(^\circ)$	v_2	$\theta_2/(^\circ)$
WLS	0.987 1	0	1.040 7	-30.555
WLAV	0.986 9	0	1.040 4	-30.548
QC	0.987 6	0	1.041 1	-30.536

采用蒙特卡洛仿真方法求解该系统中所有满足式(3)的可行解, 其中假定所有量测误差均不大于幅值的 2%, 对于电压幅值, 样本最小步长为 0.000 5, 对于电压相角, 样本最小步长为 0.000 2 rad, 总样本数为 993 141 个。经测试, 存在 4 017 个样本, 其对应状态满足式(3), 即为可行状态。图 5 给出了所有可行状态中 v_1 和 v_2 的散布图, 图 6 则给出了所有可行状态中 v_2 和 θ_2 的散布图。从图 5 和图 6 可以看出, 可行状态集合包含系统的真实状态, 从而说明该集合是可信的。

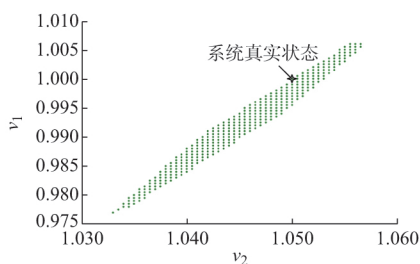


图 5 节点电压幅值之间的散布图
Fig.5 Scatter diagram between bus voltage amplitudes

上述算例说明了本文所提状态辨识模型和已有状态估计模型的本质区别: 已有状态估计模型得到“单一”的估计结果, 其结果具有主观性, 可信性无从保证; 本文所提状态辨识模型得到满足所有先验信息的可行解, 其构成的集合必然包含系统的真实状态, 因此该集合是可信的。

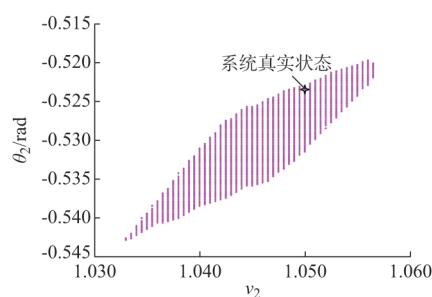


图 6 节点电压幅值与电压相角之间的散布图
Fig.6 Scatter diagram between bus voltage amplitude and phase angle

3 属性集合和基于区间的解集描述

3.1 属性集合的描述

在系列研究中暂不考虑网络参数 p 的不确定性, 即认为网络参数已知, 因此本节考察量测误差集合 E 和网络拓扑集合 T 的描述形式。

3.1.1 量测误差集合的描述

在电力系统中, 绝大部分量测的量测误差很小, 可认为在给定的界内, 即量测误差有界。但仍然存在少部分的量测, 在特定时段其量测误差偏大。结合电力系统量测系统的上述特点, 分两步对误差集合进行描述。首先认为量测误差有界, 即量测误差均在已知的范围内, 此时误差集合为:

$$E = \{e \in \mathbb{R}^m \mid e^- \leq e \leq e^+\} \quad (7)$$

式中: e^- 和 e^+ 分别为误差下限值向量和误差上限值向量, 且 $e^- \leq 0, e^+ \geq 0$ 。

其次, 考虑量测误差不在界内的测点。定义离群点的概念: 对于测点 i , 其量测值为 z_i , 真值为 $\bar{z}_i$, 量测误差为 $\bar{e}_i = z_i - \bar{z}_i$, 对应的误差上限和下限分别为 e_i^+ 和 e_i^- , 若满足式(8), 则称测点 i 为离群点。

$$\bar{e}_i > e_i^+ \text{ 或 } \bar{e}_i < e_i^- \quad (8)$$

显然, 若存在离群点, 则由式(7)定义的误差集合 E 不能有效描述真实的误差特性。由于量测真值未知, 哪些测点是离群点并未可知。但可知离群点的数量很少(相比于测点总数), 因此可假设至多存在多少个离群点, 即离群点数量的上限已知。定义变量 $t_i(e)$ 为:

$$t_i(e) = \begin{cases} 1 & e_i^- \leq e_i \leq e_i^+ \\ 0 & e_i > e_i^+ \text{ 或 } e_i < e_i^- \end{cases} \quad (9)$$

若离群点数量的上限为 c , 则误差集合为:

$$E = \left\{ e \in \mathbb{R}^m \mid \sum_{i=1}^m t_i(e) \geq m - c \right\} \quad (10)$$

特殊地, 若已知离群点的数量 b , 则误差集合为:

$$E = \left\{ e \in \mathbb{R}^m \mid \sum_{i=1}^m t_i(e) = m - b \right\} \quad (11)$$

在上述误差集合的描述中,待定参数包括误差界 e_i^+ 和 e_i^- ,以及离群点的数量 b 或数量的上限 c 。

其中量测误差的界值可根据设备测量过程中评定的测量不确定度^[26]来给定。测量不确定度反映了量测误差可能的分布范围,因此可近似理解为一定置信概率下的误差限值。在电力系统中,针对电能表、电压互感器、电流互感器等量测仪表的不确定度评定已经取得了一定的成果^[27-31],因此在可预见的未来,测量不确定度将在各级电力调度中心中得到应用。在未知测量不确定度的情况下,可根据运行和维护经验,人为评定相关量测设备对应量测结果的置信水平。比如可将目前广泛应用的测点合格区间作为一定置信概率下的误差限值。

在测量不确定度的基础上,可采用概率方法计算给定置信概率下可能的离群点数量及其上限值。

假设测点 i 在置信概率 p 下的置信区间为 U_i ,即

$$P(|z_i - \bar{z}_i| \leq U_i) = p \quad (12)$$

测点总数为 m ,所有测点均采用相同的置信概率 p ,各测点相互独立,则根据离群点的定义,可知系统中存在 b 个离群点的概率为:

$$P_b = C_m^b p^{m-b} (1-p)^b \quad (13)$$

进一步,系统中离群点数量不大于上限 c 的概率为:

$$P_c = \sum_{b=0}^c C_m^b p^{m-b} (1-p)^b \quad (14)$$

式(14)中概率 P_c 和数量上限 c 具有单调递增性,因此,若给定置信区间的置信概率 p 和离群点数量的置信概率 P_c ,可根据上式反推出离群点数量的上限 c 。虽然式(14)无法解析地求解,但可采用逐次校验法,依次增加 c 的取值,直到得到满足条件的上限 c 。逐次校验法虽然计算量较大,但好在对于固定量测数量的系统,只需进行一次计算即可,因此可离线完成。表2列出了量测点数量从100个到1000个变化时在3种不同置信概率(0.95, 0.97, 0.99)下离群点数量上限的取值(其中 $p = P_c$)。

表2 不同量测数量和置信概率下离群点数量上限的取值
Table 2 Upper limit of number of outliers with different measurement quantities and confidence probabilities

量测点 数量/个	离群点数量/个			量测点 数量/个	离群点数量/个		
	0.95	0.97	0.99		0.95	0.97	0.99
100	9	7	4	600	39	26	12
200	15	11	6	700	45	30	14
300	21	15	8	800	50	33	15
400	27	19	9	900	56	37	17
500	33	23	11	1000	62	41	18

3.1.2 拓扑集合的描述

在实际电网中,绝大部分网络拓扑的连接关系是已知且准确的,但存在少量遥信数据未采集或采集上送错误,导致少部分网络拓扑的连接关系是未知或不正确的。该部分连接关系存在不确定性的拓扑构成的集合为 Γ 。假设集合 Γ 已知,则拓扑集合 T 可描述为:

$$T = \{\tau \mid \tau_k \in \{0, 1\}, \forall k \in \Gamma; \tau_k = \tau_k^{(0)}, \forall k \notin \Gamma\} \quad (15)$$

式中: $\tau_k^{(0)}$ 为由遥信数据确定的初始连接状态。

3.2 基于区间的解集描述

对于式(3)和式(4)而言,由于非线性映射 h, g, l 的存在,使得状态集合 X 和量测量集合 Z 的几何形状十分复杂(参见图5和图6),且一般不存在解析的表达形式,为集合的求解和后续应用带来了很大的困难。

为简化起见,可将求解集合 X 转化为求解集合 X 的区间壳 $[X]$ (参见图7中实线围成的矩形),即求解状态变量的下限值向量 x^- 和上限值向量 x^+ ,使得对于任意 $x \in X$,均满足 $x \in [X] = [x^-, x^+]$ 。同理,可求解量测变量的下限值向量 z^- 和上限值向量 z^+ ,使得对于任意 $z \in Z$,均满足 $z \in [Z] = [z^-, z^+]$ 。最终,状态辨识的结果可用区间向量对 $([X], [Z])$ 来描述。

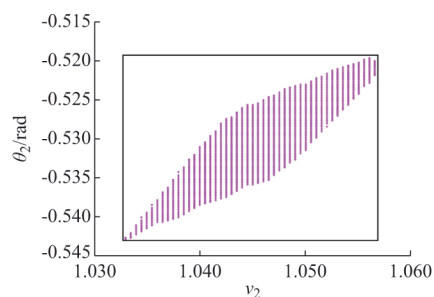


图7 状态解集的区间壳示意图
Fig.7 Interval shell of state estimation results

对于解集,由于潮流方程的非线性,其形状往往是不规则的。如果要准确描述该解集,只能通过一系列不断二分的区间来描述(该系列区间称之为子块石面路集^[32]),此描述方法存在形式复杂、应用性差、不便于求解的问题。如果仅采用一个包裹该集合的区间来描述,形式简单,便于求解和应用,但会带来保守性(称之为区间包裹效应^[30]),即存在 $x \in [X]$,使得 $x \notin X$ 。然而,区间包裹效应只带来了保守性,不会遗失解,仍可保证真值在解集中,从而不影响结果的可信性。因此本文采用区间的形式来描述解集。

4 研究思路 and 主要工作

系列文章后续几篇将对状态辨识模型的求解方法进行详细的研究。本着由易入难的原则,首先针对网络拓扑确定而量测存在不确定性的情况。对于可能存在离群点的误差有界模型,可首先识别出可能的离群点,将相应的离群点从测点集合中去除,则问题转化为严格意义上的误差有界模型。对于误差有界模型,所谓的界一则为区间的形式,此时可用区间分析的方法来求解可行解集,二则为上下限的形式,此时可将求解可行集的问题转化为求解待求变量的极大值和极小值的问题,即为优化问题。

对于离群点的识别,由于真值未知,真实的离群点未知,为保证结果的可信性,可行的方案是找到所有满足模型的离群点,此问题本质上为搜索加校验的问题,求解的关键在于如何消减搜索空间,避免出现组合爆炸的情况。对于同时存在拓扑不确定性和量测不确定性的情况,关键在于如何辨识出可能的拓扑错误。拓扑可用离散变量表征,而量测量为连续变量,因此可建立混合整数规划模型来综合考虑两者同时存在不确定性的情况,然而混合整数规划模型的求解较为复杂,因此如何简化模型以便于高效求解是问题的关键。

根据上述研究思路,系列论文的主要工作及其与后续章节的关联,如图8所示。

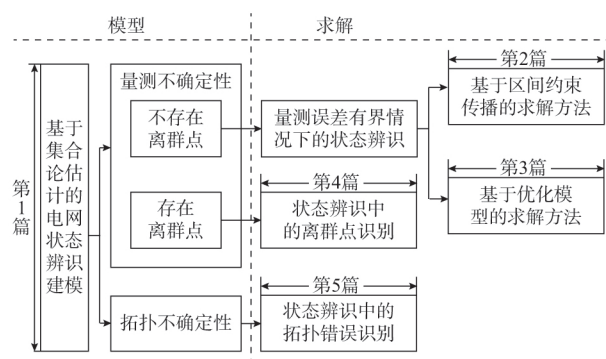


图8 系列论文的组织框架
Fig.8 Organization framework of series of papers

参考文献

- [1] 于尔铿.电力系统状态估计[M].北京:水利水电出版社,1985.
- [2] SCHWEPPE F C, WILDES J. Power system static state estimation: Part I exact model[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and System, 1970, PAS-89(1): 120-125.
- [3] SCHWEPPE F C, ROM D B. Power system static state estimation: Part II approximate model[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and System, 1970, PAS-89(1): 125-130.
- [4] SCHWEPPE F C. Power system static state estimation: Part III implementation[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and

System, 1970, PAS-89(1): 130-135.

- [5] HUBER P J, RONCHETTI E M. Robust statistics[M]. 2nd ed. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 2009.
- [6] HUBER P J. Robust estimation of a location parameter[J]. Annals of Mathematical Statistics, 1964, 35(1): 73-101.
- [7] HAMPEL F R, RONCHETTI E M, ROUSSEUW P J, et al. Robust statistics: the approach based on influence functions[M]. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 1986.
- [8] HANDSCHIN E, SCHWEPPE F C, KOHLAS J, et al. Bad data analysis for power system state estimation[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1975, PAS-94(2): 329-337.
- [9] MILI L, CHENIAE M G, VICHARE N S, et al. Robust state estimation based on projection statistics[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2): 1118-1127.
- [10] ROUSSEUW P J, LEROY A M. Robust regression and outlier detection[M]. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 1987.
- [11] STONE C J. Adaptive maximum likelihood estimators of a location parameter[J]. The Annals of Statistics, 1975, 3(2): 267-284.
- [12] SACKS J. An asymptotically efficient sequence of estimators of a location parameter[J]. The Annals of Statistics, 1975, 3(2): 285-298.
- [13] BERAN R. Asymptotically efficient adaptive rank estimates in location models[J]. The Annals of Statistics, 1974, 2(1): 63-74.
- [14] 吴文传, 郭焱, 张伯明.指数型目标函数电力系统抗差状态估计[J].中国电机工程学报, 2011, 31(4): 67-71.
WU Wenchuan, GUO Ye, ZHANG Boming. A robust state estimation method with exponential objective function[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 67-71.
- [15] WU W, GUO Y, ZHANG B, et al. Robust state estimation method based on maximum exponential square[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2011, 5(11): 1165-1172.
- [16] 颜全椿, 卫志农, 徐泰山, 等.基于 Gauss-Markov 模型的电力系统 t 型抗差状态估计[J].电力自动化设备, 2014, 34(6): 135-140.
YAN Quanchun, WEI Zhinong, XU Taishan, et al. Robust t-type state estimation based on Gauss-Markov model for power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 135-140.
- [17] 陈艳波, 马进, 文一宇.一种电力系统量测噪声自适应抗差状态估计方法[J].电力系统自动化, 2015, 39(8): 66-73. DOI: 10.7500/AEPS20140402006.
CHEN Yanbo, MA Jin, WEN Yiyu. An adaptive robust state estimation approach for measurement noise[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 66-73. DOI: 10.7500/AEPS20140402006.
- [18] AL-OTHMAN A K, IRVING M R. Robust state estimator based on maximum constraints satisfaction of uncertain measurement[J]. Measurement, 2007, 40(3): 347-359.
- [19] IRVING M R. Robust state estimation using mixed integer programming[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2008, 23(3): 1519-1520.

- [20] IRVING M R. Robust algorithm for generalized state estimation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(4): 1886-1887.
- [21] 何光宇,董树锋.基于测量不确定度的电力系统状态估计:(一)结果评价[J].电力系统自动化,2009,33(19):21-24.
HE Guangyu, DONG Shufeng. Power system static-state estimation based on uncertainty of measurement: Part one result evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(19): 21-24.
- [22] 何光宇,董树锋.基于测量不确定度的电力系统状态估计:(二)方法研究[J].电力系统自动化,2009,33(20):32-36.
HE Guangyu, DONG Shufeng. Power system static-state estimation based on uncertainty of measurement: Part two a new method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(20): 32-36.
- [23] 何光宇,董树锋.基于测量不确定度的电力系统状态估计:(三)算法比较[J].电力系统自动化,2009,33(21):28-31.
HE Guangyu, DONG Shufeng. Power system static-state estimation based on uncertainty of measurement: Part three algorithms compared [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(21): 28-31.
- [24] HE Guangyu, DONG Shufeng, QI Junjian, et al. Robust state estimator based on maximum normal measurement rate[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(4): 2058-2065.
- [25] 常乃超,王彬,何光宇,等.以测点正常率最大为目标的状态估计改进算法[J].电力系统自动化,2014,38(11):62-67.DOI: 10.7500/AEPS20130528006.
CHANG Naichao, WANG Bin, HE Guangyu, et al. An improved algorithm for state estimation based on maximum normal measurement rate[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 62-67. DOI: 10.7500/AEPS20130528006.
- [26] International Organization for Standardization. Guide to the expression of uncertainty in measurement: ISBN 92-67-10188-9[S]. 1993.
- [27] 叶瑞贞.0.01级三相电能表标准装置检定或校准结果的测量不确定度评定与验证[J].电测与仪表,2011,48(12):86-89.
YE Ruizhen. Evaluation and verification of measurement uncertainty for the test results of grade 0.01 3-phase meter test equipments[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2011, 48(12): 86-89.
- [28] 邹伟.电压互感器标准检定装置不确定度的评定[J].华中电力,2008,21(3):52-54.
ZOU Wei. Analysis on uncertainty of the standard equipment of voltage transformer [J]. Central China Electric Power, 2008, 21(3): 52-54.
- [29] 张崇利.电力互感器不确定度评定[J].吉林电力,2010,38(6):24-27.
ZHANG Chongli. Uncertainty evaluation for instrument transformer in power system[J]. Jilin Electric Power, 2010, 38(6): 24-27.
- [30] 孙国银,周尚礼.电流互感器检定装置测量不确定度的评定与验证[J].广东输电与变电技术,2009(5):26-29.
SUN Guoyin, ZHOU Shangli. Evaluation and verification of measurement uncertainty of current transformer calibration apparatus[J]. Guangdong Power Transmission Technology, 2009(5): 26-29.
- [31] 刘锐,李金忠,张书琦,等.大型电力变压器损耗测量不确定度分析[J].电网技术,2012,36(7):155-160.
LIU Rui, LI Jinzhong, ZHANG Shuqi, et al. Uncertainty analysis of loss measurement for large-scale power transformer [J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 155-160.
- [32] JAULIN L, KIEFFER M, DIDRIT O, et al. Applied interval analysis[M]. London, UK: Springer-Verlag, 2001.

何光宇(1972—),男,通信作者,博士,教授,主要研究方向:电力系统经济运行及优化理论在电力系统中的应用。E-mail: gyhe@sjtu.edu.cn

常乃超(1977—),男,博士,高级工程师,主要研究方向:电力系统安全经济运行。E-mail: changnaichao@sina.com.cn

董树锋(1982—),男,博士,讲师,主要研究方向:电力系统状态估计和优化运行。E-mail: dongshufeng@zju.edu.cn

(编辑 万志超)

Power System State Identification Based on Set Theory Estimation Part One Modelling

HE Guangyu¹, CHANG Naichao², DONG Shufeng³, WANG Bin⁴

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. National Electric Power Dispatching and Control Center, State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China;

3. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

4. Electric Power Dispatching Control Center of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510600, China)

Abstract: As the basis of analysis and control of the power system, state estimation is an important component part of the energy management system. According to the state estimation methods available (including weighted least squares estimation, classical robust estimation and new estimation methods that have sprung up in recent years), this paper analyzes the main problems in current researches. In addition, it is pointed out that the introduction of set theory estimation can not only solve these problems effectively, but improve the credibility of estimation results significantly as well. Then, based on the main idea of set theory estimation, a power system state identifying model is studied. This model can define the relationship between the true state of system and the identification results, ensuring the credibility of the results. Property sets of this model are described mathematically and solution sets based on intervals are proposed, guaranteeing the solvability and applicability of this model.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51207136).

Key words: state estimation; set theory estimation; credibility; power system