

基于测量不确定度的电力系统状态估计

(一) 结果评价

何光宇, 董树锋

(清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京市 100084)

摘要: 在测点真值未知的情况下, 如何对状态估计结果进行科学合理评价, 是进行状态估计研究首先而且必须要解决的问题, 也是现有状态估计研究的难点。文中分析了造成这一困难的原因, 基于测量不确定度理论, 提出了测点正常率概念, 证明了测点正常率较大的状态估计结果更具合理性。给出了衡量状态估计结果合理性的具体方法。对测点正常率与日常运行中常用的测点合格率之间的关系进行了研究。对真值已知情况下状态估计结果评价指标的选取进行了较为详细的讨论。

关键词: 状态估计; 评价; 测量不确定度; 合格率; 正常率

中图分类号: TM734; TM744

0 引言

状态估计是电力系统分析和控制的基础, 其主要任务是根据数据采集与监控(SCADA)系统提供的实时信息, 给出电网内各母线电压(幅值和相角)和功率的估计值, 同时也包括不良数据检测、辨识等功能。

自1970年由Schweppe等人提出状态估计模型和算法^[1]以来, 已有众多学者对状态估计模型和算法进行了研究。根据求解状态变量所采用的目标函数的不同, 状态估计有不同的估计准则, 常用的估计准则包括最小二乘(LS)准则、加权最小二乘(WLS)准则、非二次(non-quadratic)准则^[2]、加权最小绝对值(WLAV)准则^[3-4]、最小中位数平方(least median of squares, LMS)准则和最小截平方(least trimmed squares, LTS)准则等^[5]。这些方法都建立在残差概念基础上。如LS估计或WLS估计以各测点残差加权平方和(2-范数)最小为目标函数; 非二次准则, 如QL(quadratic-linear)和QC(quadratic-constant)准则, 残差较小时也以各测点残差平方和最小为目标函数, 残差较大时特殊处理; WLAV估计则以各测点残差加权绝对值和(1-范数)最小为目标函数。

不良数据检测是判断某次量测量中是否存在不良数据, 而辨识则用来确定哪些量测量为不良数据。目前, 不良数据检测和辨识的主要方法有残差搜索

法^[6]、以非二次准则估计为基础的方法^[7], 以及量测量突变检测法。除量测量突变检测外, 其余方法都建立在残差概念基础上, 而量测量突变检测法有效的前提是相邻采样时刻的电力网络结构不变, 且前一采样时刻的量测数据中的不良数据已经被其他某种不良数据辨识方法(建立在残差概念基础上)检测出来并得到修正。

由上可见, 以往研究方法, 包括状态估计方法和不良数据检测、辨识方法, 大都建立在残差概念基础上。但是, 对某一测点而言, 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, 由于量测误差的客观存在, 片面追求估计值与量测值最为接近反而有可能使估计值远离真值。因而, 以测点残差加权平方和(或其他形式的和)最小作为状态估计准则, 或基于残差分布某些规律来对不良数据进行辨识, 未必是最恰当的。

引起上述困难的主要原因是测点残差局限性, 即由测点残差不能推得测点真值的任何信息, 不能对测量结果的可靠程度进行定量描述。因此, 国际计量学界经过多年的研究指出, 表征测量结果的可靠程度应采用测量不确定度, 它是一个“与测量结果相关联的参数, 表征合理赋予的被测量之值的分散性”^[8]。

测量不确定度与常用的测量误差的概念差别较大。从定义上讲, 误差是测量结果偏离被测量真值的量, 是一个差值, 以被测量真值或约定真值为中心。由于被测量真值是未知的, 因此, 误差是一个理想的概念, 一般不能准确知道, 难以定量和操作。而测量不确定度反映了人们对测量认识不足的程度,

收稿日期: 2009-03-14; 修回日期: 2009-06-05。

国家自然科学基金资助项目(50507013); 国家电网公司重点科技项目。

表示被测量之值的分散性,它以被测量估计值为中心,是一个区间,经过分析和评定得到,可定量确定,便于具体操作。

本文是系列文章(共3篇)首篇,介绍了测量不确定度概念,并基于该理论,提出了在真值未知情况下状态估计结果的评价指标,这是以往研究中的空白点,但也是进行状态估计研究首先而且必须要面对的问题。这一问题不解决,状态估计研究就很难进一步深入。

1 测量不确定度

1.1 测量不确定度概念

1993年由国际标准化组织(ISO)等7个国际组织发布的《测量不确定度表示指南》给出的测量不确定度定义为:与测量结果相关联的参数,表征合理赋予的被测量之值的分散性。测量不确定度反映了可能的误差分布范围,可以近似地理解为一定置信概率下的误差限值。测量不确定度分为2类:标准不确定度和扩展不确定度。

标准不确定度是用标准偏差表示测量结果的不确定度。它分为用A类计算方法得到的标准不确定度和用B类计算方法得到的标准不确定度,以及根据其他一些量值求出的合成标准不确定度。由合成标准不确定度定义^[8]可知,对某一测点*i*,合成标准不确定度为 u_c ,对应不确定度分布为正态分布时,真值 \bar{Z}_i 落在量值区间 $(Z_i - u_c, Z_i + u_c)$ 之内的可能性为68.3%,即

$$P(|\bar{Z}_i - Z_i| \leq u_c) = 68.3\% \quad (1)$$

扩展不确定度是定义测量结果区间的量,用于表示测量结果的置信范围,它由合成标准不确定度 u_c 乘上覆盖因子 k 而得到:

$$U = k u_c \quad k = 2, 3 \quad (2)$$

$k=3$ 且对应的不确定度分布为正态分布时,置信概率 P 为99.7%。

值得指出的是,扩展不确定度概念与具体分布无关,本文方法并不假设也不要求其分布为正态分布。

1.2 测量误差与测量不确定度比较

测量不确定度理论是在误差理论基础上发展起来的,其基本分析和计算方法与测量误差相同,但在概念上存在较大差异:

1)定义不同。测量误差是表明测量结果偏离真值的差值,以真值或约定真值为中心;误差是客观存在的,不以人们的认识程度而转移。测量不确定度表明赋予被测量之值的分散性,是通过测量过程的分析和评定得出一个以测量值为中心的区间;测

量不确定度与人们对被测量、影响量以及测量过程的认识有关,合理赋予被测量的任一个值,均具有相同的测量不确定度。

2)可操作性不同。对于测量误差,由于被测量真值未知,往往不能得到测量误差的真值,用约定真值代替真值时,可得到测量误差的估计值。对于测量不确定度,可根据测量数据、有关材料和仪器的技术指标、检定证书和手册中提供的数据来定量评定,可操作性较强。

3)置信概率不同。对测量误差而言,置信概率不存在;而对测量不确定度而言,当了解分布时,可按置信概率给出置信区间。

由上可见,用测量不确定度代替测量误差表示测量结果,易于了解,便于评定,具有合理性和实用性。

2 真值未知情况下状态估计结果评价

2.1 实际生产运行中的评价方法

真值未知情况下,如何对状态估计结果进行衡量,是以往研究中的空白点。因维护和管理需要,实际生产运行中提出了相应评价指标,介绍如下。

定义1:对测点*i*,若

$$|h_i(\mathbf{x}) - Z_i| \leq \alpha_i \quad (3)$$

则称在状态估计结果 \mathbf{x} 下测点*i*是合格测点,反之则称在 \mathbf{x} 下测点*i*是不合格测点。其中, α_i 为给定常量,各电力公司一般有具体规定。本文采用值参见附录A。

定义2:设系统总测点数为 m ,状态估计结果 \mathbf{x} 下系统中合格测点数为 n ,则 \mathbf{x} 下系统测点合格率为:

$$\mu = \frac{n}{m} \times 100\% \quad (4)$$

在实际运行中,一般采用测点合格率对状态估计结果进行评价。作为实用化验收条件之一,各电网公司对状态估计合格率一般都有考核,如要求合格率为95%或98%以上。这一指标有何依据,这一考核要求是否合理,将在下文讨论。

2.2 基于扩展不确定度的评价方法

在真值未知情况下,如何给出状态估计结果的科学合理评价指标,是以往研究中的难点。造成这一困难的原因是测点残差局限性,即由测点残差不能推得测点真值任何信息,不能对测量结果的可靠程度进行定量描述。与测点残差不同,测量不确定度可以定量评估,可按置信概率给出置信区间。基于不确定度理论可以方便定义状态估计结果的评价指标,介绍如下。

由扩展不确定度概念可知, 真值落在量值区间 $(Z_i - U_i, Z_i + U_i)$ 内的概率为 p , 即

$$P(|h_i(\bar{\mathbf{x}}) - Z_i| \leq U_i) = p \quad \forall i \quad (5)$$

式中: $\bar{\mathbf{x}}$ 为系统真实状态; U_i 为测点 i 的扩展不确定度。

实际运行中, p 取远大于 0.5 的量, 如 0.997 或 0.945, U_i 取与 p 对应的值。

由于真值落在量值区间 $(Z_i - U_i, Z_i + U_i)$ 内的概率很大, 由极大似然原理可推断: 对测点 i , 若其测点估计值落在量值区间 $(Z_i - U_i, Z_i + U_i)$ 内, 则可认为该估计值是合理的, 反之, 则可认为该估计值是不合理的。由此给出如下定义:

定义 3: U_i 为置信概率 p 下测点 i 的扩展不确定度, 对测点 i , 若

$$|h_i(\mathbf{x}) - Z_i| \leq U_i \quad (6)$$

则称在状态估计结果 \mathbf{x} 下测点 i 是正常测点, 反之则称在 \mathbf{x} 下测点 i 是异常测点。

可以看到, 正常测点与合格测点的定义在形式上类似, 但式(3)中 α_i 为给定常量, 没有实际含义, 无法给出真值落在式(3)所对应量值区间内的概率, 而式(4)中 U_i 有实际含义, 真值落在相应量值区间内的概率为置信概率 p 。进一步讨论参见 2.3 节。

定义 4: 对系统中每一个测点, 其置信概率都取同一 p 值, 称 p 为系统测点置信概率。

由式(5), 当系统测点置信概率为 p 时, 可计算系统中特定的 n ($n < m$) 个测点为正常测点, 其余测点为异常测点的概率为:

$$P = p^n (1 - p)^{m-n} \quad (7)$$

定义 5: 设系统中总测点数为 m , 系统测点置信概率为 p , 状态估计结果为 \mathbf{x} , 由定义 1 计算得到 \mathbf{x} 下正常量测数为 n , 则状态估计结果的 \mathbf{x} 测点正常率为:

$$\eta = \frac{n}{m} \times 100\% \quad (8)$$

可以根据测点正常率对状态估计结果做出评价, 测点正常率越高, 状态估计结果越合理。证明如下。

定理 1 设系统中总测点数为 m , 系统测点置信概率为 p , \mathbf{x}^1 和 \mathbf{x}^2 为系统状态估计结果。 \mathbf{x}^1 下系统中有特定的 n_1 ($n_1 < m$) 个测点为正常测点, 其余测点为异常测点; \mathbf{x}^2 下系统中有特定的 n_2 ($n_2 < m$) 个测点为正常测点, 其余测点为异常测点。若 $n_1 > n_2$, 则 \mathbf{x}^1 较 \mathbf{x}^2 更接近系统的真实状态。

证明:

由式(7)知, 系统中有特定的 n_1 个测点为正常测点, 其余测点为异常测点的概率为:

$$P_1 = p^{n_1} (1 - p)^{m-n_1}$$

同理, 系统中有特定的 n_2 个测点为正常测点, 其余测点为异常测点的概率为:

$$P_2 = p^{n_2} (1 - p)^{m-n_2}$$

则有:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left[\frac{p}{1-p} \right]^{n_1-n_2} > 1$$

因此, $P_1 > P_2$, 即系统中有特定的 n_1 个测点为正常测点, 其余测点为异常测点的概率更大, 根据极大似然估计原理, \mathbf{x}^1 较 \mathbf{x}^2 更接近系统真实状态。[证毕]

由定理 1 可知, 当某一系统的 2 个状态估计结果 $\mathbf{x}^1, \mathbf{x}^2$ 的测点正常率相同时, 其状态估计结果具有同等合理性。是否可以对 $\mathbf{x}^1, \mathbf{x}^2$ 合理性做进一步区分呢? 注意到正常测点定义与扩展不确定度 U_i 相关, 而 U_i 又与一定的置信概率 p 相关, 因此, 上述评价只在置信概率 p 下成立; 在另一置信概率下衡量时, $\mathbf{x}^1, \mathbf{x}^2$ 未必有同等合理性。基于此可推导评价状态估计结果 $\mathbf{x}^1, \mathbf{x}^2$ 合理性的方法。

在扩展不确定度取值为 $2U_i/3$ 时, 在该扩展不确定度下状态估计结果 \mathbf{x} 的测点正常率记为 $\eta_{2/3}$; 同样, 在扩展不确定度取值为 $U_i/3$ 时, 状态估计结果 \mathbf{x} 的测点正常率记为 $\eta_{1/3}$ 。则评价状态估计结果 $\mathbf{x}^1, \mathbf{x}^2$ 合理性时, 可以采用如下步骤:

- 1) 比较 η 指标, 该指标较高者, 状态估计结果较为合理, 否则转步骤 2;
- 2) 继续比较 $\eta_{1/3}$ 指标, 该指标较高者, 状态估计结果较为合理, 否则转步骤 3;
- 3) 比较 $\eta_{2/3}$ 指标, 该指标较高者状态估计结果较为合理, 否则认为这 2 个状态估计结果的合理性相同。

2.3 进一步讨论

可以看出, 本文所提出的指标与实际运行中采用的指标在形式上相似, 区别在于一个采用常量 α_i , 一个采用扩展不确定度 U_i 。

两者关系进一步讨论如下。

1) 基于测量不确定度, 可以更好地对状态估计结果进行考核。基于测量不确定度, 可以对系统中出现正常测点个数的概率进行定量计算。由式(7)可知, 系统中正常测点个数为 n ($n < m$) 的概率 P_1 和大于等于 n 的概率 P_2 分别为:

$$P_1 = C_m^n p^n (1 - p)^{m-n} \quad (9)$$

$$P_2 = \sum_{j=n}^m C_m^j p^j (1 - p)^{m-j} \quad (10)$$

式中: C_m^n 为 m 个测点中任取 n 个测点的组合个数。

系统中正常测点个数期望值为:

$$E = m[1 \times p + 0 \times (1 - p)] = mp \quad (11)$$

在实际生产运行中,对状态估计系统的合格率有硬性规定,如要求合格率在 98% 以上,但合格率能否达到要求与 α_i 取值相关,而 α_i 应如何取值并无相关文献进行研究。如果用 U_i 取代 α_i ,由于出现正常测点个数的概率可定量计算,就可提出科学合理的考核指标。

2)以测点合格率作为状态估计结果评价指标有一定合理性。由扩展不确定度概念可知,真值落在量值区间 $(Z_i - U_i, Z_i + U_i)$ 内的概率为 p ,因而,真值落在量值区间 $(Z_i - \alpha_i, Z_i + \alpha_i)$ 内的概率也较大。仿照定理 1 可以近似推知,若某一状态估计结果的系统测点合格率较大,则该状态估计结果更为合理。

可见,以测点合格率作为状态估计结果评价指标有一定合理性。在无法测量不确定度的情况下,甚至可以用测点合格率代替测点正常率,对状态估计结果合理性进行评价。

3 真值已知情况下状态估计结果评价

实际运行中,真值是未知的,但在研究过程中,可以人为设定真值和量测值,然后再进行状态估计研究。在这种情况下,对状态估计结果采用真值进行定量评价显得更为可信,其评价指标如下。

3.1 已有评价指标

文献[9]用 1-范数和无穷范数对估计值与真值之间距离进行衡量:

$$S_1 = \sum |x_i - \bar{x}_i| \quad (12)$$

$$S_2 = \max |x_i - \bar{x}_i| \quad (13)$$

式中: x_i 和 \bar{x}_i 分别为状态估计结果 x 的第 i 个分量的估计值和真值; S_1 和 S_2 分别用来衡量状态估计结果整体偏差和最大偏差。

但实际运行中,用户对节点注入功率、线路有功功率、无功功率等量测值的关心超过对功角等状态量的关心,所以建议采用如下指标来衡量状态估计结果整体偏差和最大偏差:

$$S_1 = \sum |\hat{Z}_i - Z_i| \quad (14)$$

$$S_2 = \max |\hat{Z}_i - Z_i| \quad (15)$$

式中: \hat{Z}_i 和 Z_i 分别为量测 i 的估计值和真值。

3.2 新的评价指标

实际应用中,往往更为关心每个测点估计值靠近真值程度,因而可以用不同标准下估计值靠近真值测点个数来衡量估计值与真值之间距离。基于这一想法定义如下指标。

设系统中估计值与真值之差绝对值在 3 倍标准

差、2 倍标准差、1 倍标准差之内测点个数分别为 $N_{3\sigma}$, $N_{2\sigma}$, N_{σ} ,进一步定义:

$$\xi_{3\sigma} = \frac{N_{3\sigma}}{m} \times 100\% \quad (16)$$

$$\xi_{2\sigma} = \frac{N_{2\sigma}}{m} \times 100\% \quad (17)$$

$$\xi_{\sigma} = \frac{N_{\sigma}}{m} \times 100\% \quad (18)$$

$\xi_{3\sigma}$, $\xi_{2\sigma}$, ξ_{σ} 表征了在不同标准下系统中测点估计值与真值靠近程度。

因而,在真值已知情况下对 2 个状态估计结果进行比较时,可以采用如下步骤:

1)比较 $\xi_{3\sigma}$ 指标,该指标较高者,状态估计结果较为合理,否则转步骤 2;

2)继续比较 $\xi_{2\sigma}$ 指标,该指标较高者,状态估计结果较为合理,否则转步骤 3;

3)比较 ξ_{σ} 指标,该指标较高者状态估计结果较为合理,否则认为这 2 个状态估计结果合理性相同。

可以看到,这一方法与第 2 节提出的真值未知情况下状态估计结果评价方法也是对应的。

4 结语

在真值未知情况下,如何给出状态估计结果的科学合理评价指标,是进行状态估计研究首先而且必须要解决的问题,也是以往研究中的难点。造成这一困难的原因是,由于真值未知,被测量真值和测量误差这 2 个在以往研究中被广泛采用的概念仅具有理论上的意义,实际上是难以操作的未知量。

与测量误差不同,测量不确定度可以定量评估,可按置信概率给出置信区间。基于不确定度理论,本文提出了测点正常率概念,证明了测点正常率较大的状态估计结果更具合理性,给出了衡量状态估计结果合理性的具体算法。本文也对真值已知情况下状态估计结果评价指标的选取进行了讨论。

值得指出的是,本文所提出的评价指标和评价方法不但适用于电力系统状态估计问题,对其他系统(如航空系统)的状态估计问题也适用。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] SCHWEPPE F C, WILDES J, ROM D B. Power system static-state estimation: Part I, II, III. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1970, 89(1): 120-125; 125-130; 130-135.

(下转第 35 页 continued on page 35)

Risk Assessment Based Maintenance Technology for Electric Transmission Equipment

ZHAO Mingxin¹, LU Zongxiang¹, WU Linlin¹, YU Shaofeng²

(1. State Key Laboratory of Power Systems, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Zhejiang Electric Power Test & Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In view of the maintenance management of electric transmission equipment, a new maintenance technology based on risk assessment is proposed. Through the procedure of risk assessment and the method of decision-making, the basic technical framework that applies risk-based maintenance (RBM) to the maintenance of electric transmission equipment is developed. By employing the risk assessment theory and interval analysis, the technology has not only made maintenance decision-making much more economical but also greatly enhanced technology operability. Application of the technology in an actual regional power grid shows that it can comprehensively evaluate the risk to equipment and make expeditious decision-making, signaling good application prospects for the technology proposed.

Key words: electric transmission equipment; risk assessment; maintenance decision-making; risk-based maintenance (RBM); interval analysis

(上接第 24 页 continued from page 24)

- [2] BALDICK R, CLEMENTS K A, PINJO-IAZIGAL Z, et al. Implementing non-quadratic objective functions for state estimation and bad data rejection. *IEEE Trans on Power Systems*, 1997, 12(1): 376-382.
- [3] CELIK M K, ABUR A. A robust WLAV state estimator using transformations. *IEEE Trans on Power Systems*, 1992, 7(1): 106-113.
- [4] SINGH H, ALVARADO F L, LIU W H E. Constrained LAV state estimation using penalty functions. *IEEE Trans on Power Systems*, 1997, 12(1): 383-388.
- [5] MILI L, CHENIAL M G, ROUSSEUW P J. Robust state estimation of electric power systems. *IEEE Trans on Circuits and Systems; Fundamental Theory and Applications*, 1994, 41(5): 349-358.
- [6] HANDSCHIN E, SCHWEPPE F C, KOHLAS J, et al. Bad data analysis for power system state estimation. *IEEE Trans on Power Apparatus and Systems*, 1975, 94(2): 329-337.
- [7] MILI L, CUTSEM T V, RIBBENS-PAVELLA M. Hypothesis testing identification; a new method for data analysis in power system state estimation. *IEEE Trans on Power Apparatus and Systems*, 1984, 103(11): 3239-3252.
- [8] BIPM, IEC, IFCC, et al. Guide to the expression of uncertainty in measurement. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 1993.
- [9] KOTIGUA W W, VIDYASGAR M. Bad data rejection properties of weighted least absolute value techniques applied to static state estimation. *IEEE Trans on Power Apparatus and Systems*, 1982, 101(4): 844-853.

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

董树锋(1982—),男,博士研究生,主要研究方向:电力系统状态估计和优化运行。

Power System Static-state Estimation Based on Uncertainty of Measurement

Part One Result Evaluation

HE Guangyu, DONG Shufeng

(State Key Laboratory of Power Systems, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Under the circumstance that true values of measuring points are unknown, how to evaluate result of state estimation is the first and foremost problem to be resolved. This is also a difficult task in state estimation research. The reason causes the difficulty is analyzed, and the concept of normal rate of measuring point based on the theory of uncertainty of measurement is introduced. It is proven that the estimation result with higher normal rate is more rational, and the indices of judging the rational level of state estimation result are proposed. Moreover, a study on the relationship between normal rate and qualification rate which is used in practice is given. Detailed discussion is also given on the evaluation indices of state estimation result under the circumstance where true values of measuring points are known.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50507013) and State Grid Corporation of China.

Key words: static-state estimation; evaluation; uncertainty of measurement; qualification rate; normal rate