

配电网状态估计研究综述

董树锋¹, 何光宇², 王雅婷³, 胡雅月¹, 张 高¹

(1. 浙江大学 电气工程学院 杭州 310027; 2. 清华大学 电机系电力系统国家重点实验室 北京 100084;
3. 中国电力科学研究院 北京 100192)

摘 要: 配电网状态估计是配网管理系统的重要组成部分, 本文对配电网状态估计问题研究的现状进行了总结和分析。主要论述了配电网中最小二乘估计器和抗差估计器的研究情况, 讨论了分布式电源接入配电网后传统状态估计功能所面临的挑战, 并对进一步值得研究的方向进行了展望。

关键词: 状态估计; 配电网; 综述; 分布式电源

作者简介: 董树锋(1982-) 男, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统状态估计和优化运行。

中图分类号: TM727 **文献标志码:** B **文章编号:** 1001-9529(2013)08-1586-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51207136); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20120101120157)

A Research Survey on Distribution Network State Estimation

DONG Shu-feng¹, HE Guang-yu², WANG Ya-ting³, HU Ya-yue¹, ZHANG Gao¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 300027, China;

2. State Key Lab of Power Systems, Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Electric Power Research Institute of China, Beijing 100192, China)

Abstract: Distribution state estimation (DSE) is an important part of the distribution management system (DMS). This paper reviews the research status of distribution network state estimation. Least Square (LS) estimators and robust estimators are emphatically discussed. The challenges are analyzed for the traditional state estimation function after more distributed energy resources (DERs) have been connected to distribution networks. Some valuable research directions for distribution state estimation are proposed.

Key words: state estimation; distribution network; survey; distributed energy resource (DER)

Foundation items: The National Natural Science Foundation of China(51207136); Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China(20120101120157)

随着用户对电能供应质量和可靠性要求的提高, 配电管理系统(Distribution Management System, DMS)得以快速发展。配电状态估计(Distribution State Estimator, DSE)在配电管理系统中起“滤波”的作用, 过滤了SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition)系统传来的低精度、不完整的“生数据”, 剔除不良数据, 将不可观的数据补齐, 从而保证完整可靠的数据进入数据库。其主要任务是利用从SCADA系统中获取的遥测、遥信数据, 分析系统的拓扑结构, 建立网络模型, 对不可观的测点补充伪量测, 以保证冗余度, 进而估计得到系统的状态; 同时利用计算结果分析系统的运行状态, 提高全网的可观测性, 为系统的分析计算提供完整可靠的数据库。状态估计是

配电系统高级应用中最基础的功能之一。

配电网状态估计近30年的发展使理论研究取得了不少成果, 但在工程应用方面尚处于起步阶段。随着配电网量测水平和自动化水平的不断提高, 各种新理论和新技术的不断涌现, 为中低压配电网实现状态估计在线应用提供了有利条件。同时, 随着分布式电源的接入, 对配电网状态估计也提出了新的要求和挑战。本文就配电网状态估计的研究现状和进一步研究方向进行了阐述。

1 最小二乘估计器

加权最小二乘(Weighted Least Square, WLS)估计器是被研究和应用地最广泛的一类估计器, 其数学模型为

$$\min J(x) = (z - h(x))^T W (z - h(x)) \quad (1)$$

式中 z = 量测向量;

x = 状态向量;

h = 量测方程;

W = 量测权重。

式(1)对 x 求导,并置为 0 得到

$$\frac{\partial J(x)}{\partial x} = H^T W [z - h(x)] = 0 \quad (2)$$

其中 $H(x) = \partial h(x) / \partial x$ 被称为雅可比矩阵,使用牛顿法求解式(2)的迭代公式

$$H^T W H \Delta x = H^T W [z - h(x)] \quad (3)$$

根据式(1)中待求状态变量的不同,主要可分为以节点电压、支路电流、支路功率为状态量的 3 类算法。

1.1 节点电压作为状态量

这类算法建立在牛顿法潮流的基础上,以节点电压作为状态变量,建立相应的状态估计数学模型。该类方法能够处理电压幅值、电流幅值、支路潮流、节点注入功率量测等各种量测,具有求解环网的能力。但是该方法内存使用量大,且雅可比矩阵每次迭代时都需要计算,计算量大^[1-3]。

为了解决雅可比矩阵计算量大的问题,一种思路是在极坐标下,引入一些假设条件,使雅可比矩阵常数化。文献[4]引入变换矩阵简化量测函数,并假设节点电压标幺值近似为 1、相邻节点间电压相角差近似为零,使电压幅值和功率量测对应的雅可比元素为常数,一定程度上提高了计算速度,但电流幅值量测对应的雅可比元素无法常数化。文献[5]假设馈线段两端节点电压相角相差并不大,推导出功率量测所对应的雅可比部分为常数形式,但电压幅值量测对应的雅可比元素无法常数化。

另外一种思路是引入量测变换^[6-8],将功率、电流幅值变换成等效电流实部、虚部量测,使用电压向量实部和虚部作为状态变量,量测方程变成节点电压电流为基础的方程式。采用量测变换后,虽然可以使雅可比矩阵常数化,但是变换之后的支路电流在迭代过程中发生了较大的变化,从而影响收敛性。文献[9]在上述研究基础上将电压幅值量测变换成等效电压实部和虚部量测,使算法具有处理电压幅值量测的能力,提高了估计精度。

1.2 支路电流作为状态量

自 1995 年 Mesut E. Baran 和 Arthur W. Kelly 提出基于支路电流的配电网状态估计方法后^[10],此法就成为研究的热点。其基本思路是:使用支路电流的实部和虚部作为待求状态量,将各种量测量转换成等效的复电流量测,量测方程的实部虚部解耦,线性化程度高,计算速度快,编程简单。Baran 最初提出的方法要求有功和无功量测成对出现且权重相同;对电流幅值量测不做量测变换,当存在大量电流幅值时,量测方程呈非线性,计算复杂;处理环网时,雅可比矩阵无法写成分块对角阵形式,解耦性差。不少研究者在上述几个方面做了进一步改进^[11-13]。

Whei-Min Lin 和 Jen-Hao Teng 在文献[11]中将电流幅值量测在每次迭代时变换成等效电流实部和虚部量测,实现雅可比矩阵常数化;在假设馈线相间互感比自感小得多的条件下,将雅可比矩阵结构优化后变成分块对角阵形式。与之前方法几乎都用电流向量实部和虚部作为待求状态量不同,Haibin Wang 与 Noel N. Schulz 在[12]中使用支路电流的幅值和相角作为待求状态量,提出了新的估计模型,该方法不需要做量测变换就能处理常见的量测,同时信息矩阵三相解耦,但每次迭代都要重新生成雅可比矩阵,计算量大。

1.3 支路功率作为状态量

与基于等效支路电流量测变换的思想相同,这类方法^[14]使用量测变换将能节点注入功率变换成等效支路功率量测,得到三相解耦的常数雅可比矩阵,因此,能够高效地处理功率量测,且不要求有功和无功成对出现。但是这类方法最早提出的时候只适用于系统只存在实时功率量测的情况,没有给出考虑电压和电流量测的处理方法^[15]。一些学者研究了这种方法的改进形式,文献[16]提出了电流和电压幅值量测变换成等效功率变换的方法,增强了这类方法的量测处理能力。

1.4 各类 WLS 算法比较

文献[17]比较了上述几种典型配电网 WLS 状态估计算法在运算速度和量测量处理能力等方面的差异。本文从处理环网能力和估计精度方面进行比较。

(1) 以潮流方程式为基础的算法 这类方法状态量为节点电压,功率量测的量测方程与潮流方程式相同,能够处理环网,不需要量测变换,估

计精度高。

(2) 以节点电压电流方程式为基础的算法 这类方法一般以节点电压的实、虚部为状态变量,需要量测变换,有环网时会导致实部虚部无法解耦,处理环网能力较弱,由于量测变换,估计精度较低。

(3) 基于支路电流的算法 这类方法以支路电流为状态量,通过量测变换将所有量测变换成等效电流量测,难以处理电压量测,估计精度较低。有环网时三相无法解耦,处理环网能力较弱。

(4) 基于支路功率的算法 这类方法以支路功率为状态量,难以处理功率量测之外的其他量测类型,估计精度低,目前还没有该方法应用于环网的研究。

结合文[17]中的研究结论,将各个 WLS 估计算法的比较结果汇总成表 1。

表 1 各类 WLS 估计器比较

计算方法	以潮流方程为基础	以节点电压电流方程为基础	基于支路电流	基于支路功率
运算速度	慢	较快	快	快
量测处理能力	强	较强	较弱	弱
处理环网能力	强	较弱	较弱	—
估计精确性	高	较高	较低	低

1.5 基于 WLS 的其他研究

有些学者从不同方面研究 WLS 估计器。

文献[18~20]研究了基于支路估计的状态估计实用化算法,其核心思想是将整个配电网的状态估计分解成各支路的状态估计子问题,每个子问题只需要求解几个低阶的最小二乘问题即可,该方法利用配电网辐射状的特点,由下自上递推估计,计算速度快。

除了牛顿法求解最小二乘问题外,还有一些学者研究新的求解算法。文献[21]讨论了用人工神经元算法求解配电网状态估计问题。文献[22,23]设计了多智能体系统求解 WLS 问题。文献[24]使用了差分进化算法(Differential Evolution Algorithm, DEA)并行求解状态估计问题。

2 抗差估计器

2.1 经典抗差估计器

最小二乘状态估计作为最基本的状态估计方法,具有收敛性好、估计质量高等优点,但是它处理粗差的能力比较差,数据粗差会严重影响状态

估计的结果。所谓粗差,即离群的误差,由失误、观测模式差、分布模式差得来,实际中是不可避免的。所谓抗差估计,即在粗差不明显的情况下,所选择的状态估计方法能尽可能地减少粗差对于估计值的影响,从而得到最佳估计值。

比较经典的抗差估计方法是 1964 年 Huber 提出的 M 估计,即广义极大似然估计^[25]。M 估计包括 LAV (Least Absolute Value)、WLAV (Weighted Least Absolute Value)、QL (Quadratic-Linear)、QC (Quadratic-Constant) 等。M 估计最早由 Merrill 和 Schweppeh 以非二次准则的形式引入电力系统状态估计研究中^[26]。

在配电网状态估计领域,对加权最小绝对值估计(WLAV)的研究最为活跃:文献[27]采用改进的 WLAV,可估计负荷数据和电流量测,同时抑制了伪量测中一些坏数据对结果的不良影响;文献[28~30]在传统 WLS 方法的基础上,给不同精度的量测量以不同的量测权重因子,减小低精度量测对估计结果的影响,从而抑制粗差;文献[29],[30]对实测值仍采用以测量精度作为权重的常规方法,对伪量测则采用权值随残差变化的权函数,目标函数表达式中对于量测数据采用的是 WLS 估计,而对于伪量测数据采用的是具有抗粗差能力的 WLAV 估计;文献[31]用模糊集表示配电网的量测信息,提出了模糊匹配潮流状态估计方法,该方法考虑了伪量测的模糊约束,得到的状态估计解虽不具有最优但具有满意的 WLAV 估计意义,该方法的求解过程只是在传统前推回代过程中增加了一次求解线性规划的步骤,编程实现比较方便。

除了 WLAV 估计器在配电网中有一些研究和应用外,其他抗差估计器在配电网中的应用非常少见。

2.2 基于测点投票思想的抗差估计器

近年来出现了一类新的抗差估计方法^[15,32-37],其思想是不再用某种范数来衡量估计值和量测值之间的距离,而是考虑量测本身的不确定性。与以往方法相比,这类方法不追求对量测值的精确拟合,而是增加了由先验知识确定的区间信息,求解最多量测赞同的状态,很大程度上避免了坏数据的影响,所求状态比较合理。

Stefano 和 Gastoni 提出了最多测点赞成状态估计方法^[32],对于某个状态,若某测点的估计值

在量测值为中心的一个区间里,认为该测点赞成该状态,最多个测点赞成的状态为最后所求状态。该方法对于坏数据和杠杆量测都具有抗差性,但是计算效率较低。文献[33-36]基于测量不确定度理论,提出了最大测点正常率状态估计模型和算法,该方法思想与最多约束满足的状态估计方法有相通之处,但在处理方法上,通过将测点评价函数转换为光滑函数使状态估计问题变成一个非线性规划问题,采用内点法求解,在保证抗差性的同时,计算效率也大幅提高,该方法已经应用于辐射状配电网状态估计中^[37]。

上述方法不足之处的在于,其优化模型为非凸非线性规划问题,利用牛顿法或内点法无法保证总能求得全局最优解,即无法保证总能得到最多量测赞同的系统状态。另外,可能有多个具有相同或极为接近的目标函数值的系统状态,而且这些状态之间相差较大,即估计模型可能无法保证状态的全局可辨识,优化算法只能求出其中一个状态而无法指出其他可能。

3 对 DSE 现状的讨论

3.1 传统 DSE 的问题

已有配电网状态估计研究主要基于最小二乘及其改进算法展开,其数学模型简洁、计算方法简单,对严格服从正态分布的数据为最小方差无偏估计。然而,最小二乘方法有其固有的不足,例如处理坏数据的能力较差,易出现残差污染现象^[38];实际配电网中量测误差分布与正态分布相去甚远,导致加权最小二乘法失去其优良特性。另外,由于目前配电网实时量测少,需要补充伪量测,普遍的做法是认为实时量测是准确的,伪量测误差较大,实时量测和伪量测被赋予的权重相差较远,容易使雅可比矩阵病态,造成收敛困难。

目前,配电网状态估计中常用的量测变换技术有利于量测函数的线性化和解耦性,加快计算速度。然而,采用量测变换技术后:①等效量测由每次迭代时的状态量决定,估计结果和初值选择有关,估计结果不是原最小二乘问题的最优解;②应用该技术,不是对量测配置有要求(比如要求功率量测成对出现),就是要对某些量测类型做特殊处理,甚至要放弃一些量测,在实时量测非常宝贵的配电网中,这种代价是十分昂贵的。该技术是以牺牲估计精度为代价获得高运算效率^[17]。

3.2 分布式电源带来的影响

随着分布式发电、储能设备在全球迅速发展,这些分布式电源在大电网供电的基础上,接在靠近用户侧的配电网中,可以有效的缓解电力资源的急缺,同时还能充分利用可再生资源,清洁少污染,对环境保护也能起到不小的作用。分布式电源的接入对环境和可持续发展带来种种好处的同时,对传统配电网状态估计功能也带来了巨大的挑战,主要体现在以下几个方面:

(1) 配电系统在接入分布式电源后就成为了一个多电源的系统,会出现多电源环网和模型参数具有不确定性等传统配电网状态估计方法较难处理的问题。

(2) 随着波动性和随机性较大的风电、太阳能发电等新能源大规模接入,电网运行方式变得更加复杂、变化也更为快速,基于突变量检测的坏数据处理方法难以应用,同时要求状态估计执行周期更短;

(3) 大量分布式电源接入后,配电系统安全、经济运行对闭环自动控制系统依赖性大为加强。在这种情况下,要求状态估计计算更加快速、准确、可靠,否则后续的分析和控制将无法得到及时、准确的系统状态,造成严重的后果。

分布式电源接入后增加了系统的复杂性和动态性,传统基于静态或准静态系统模型的状态估计分析方法难以达到实时监控和分析的目的^[39,40]。因此,应尽快开展针对分布式电源接入后有源配电网状态估计问题的研究。

4 展望

总体来讲,中低压配电网状态估计还处于起步阶段,一方面,如何把输电网中成熟的状态估计技术运用到配电网中,进而开发有成效的配电网状态估计方法,是配电网状态估计的一个重要研究方向^[41];另一方面,越来越多分布式电源接入到配电网的新形势下,配电网状态估计应考虑分布式电源的模型以及模型参数不确定性等问题。

综合上述因素,我们认为以下方向有重要的研究价值:(1) 考虑负荷模型、模型参数不确定性等因素,完善配电网状态估计模型;(2) 针对大系统,开发计算速度快、数值稳定性高的求解算法;(3) 抗差估计在配电网中进一步研究,开发应用

于实际工程的抗差估计软件; (4) 针对分布式电源接入后配电网状态估计问题的研究, 研制有源配电网状态估计实用软件。

参考文献:

- [1] WU F F, NEYER A F. Asynchronous Distributed State Estimation for Power Distribution Systems. Proceedings of the 10th Power System Computation Conference, Graz, Austria, August 1990.
- [2] Hansen, C. W, A. S Debs. Power System State Estimation Using Three-Phase Models. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(2): 818-824.
- [3] Ke Li. State Estimation for Power Distribution System and Measurement Impacts. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(2): 911-916.
- [4] Baran, M. E, A, W, Kelley. State Estimation for Real-Time Monitoring of Distribution Systems. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(3): 1601-1608.
- [5] 卫志农, 顾 杵, 鞠 平, 等. 三相辐射配网状态估计方法. 中国电机工程学报, 2000, 20(3): 84-87.
WEI Zhi-nong, GU Chu, JU Ping, et al. A Three-Phase Radical Distribution System State Estimation Algorithm. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(3): 84-87.
- [6] C. N. Lu, J. H. Teng, W-HE. Liu, Distribution System State Estimation. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(1): 229-240.
- [7] W. M. Lin, H. Teng. Distribution Fast Decoupled State Estimation by Measurement Pairing. IEE Proceedings-Generation Transmission and Distribution, 1996, 143(1): 43-48.
- [8] 卫志农, 汪方中, 何 桦, 等. 一种新的快速解耦配电网状态估计方法. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(4): 6-9.
WEI Zhi-nong, WANG Fang-zhong, HE Hua, et al. A New Fast Decoupled State Estimation Method for Distribution Systems. Proceedings of the EPSA, 2002, 14(4): 6-9.
- [9] J. H. Teng. Using Voltage Measurements to Improve the Results of Branch-Current-Based State Estimators for Distribution Systems. IEE Proceedings-Generation Transmission and Distribution, 2002, 149(6): 667-672.
- [10] Baran, M. E., and A. W, Kelley. A Branch Current Based State Estimation Method for Distribution Systems. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(1): 483-491.
- [11] Whei-Min Lin, Jen-Hao Teng, Shi-Jaw Chen. A Highly Efficient Algorithm in Treating Current Measurements for the Branch-Current-Based Distribution State Estimation. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(3): 433-438.
- [12] Haibin Wang, Noel N. Schulz. A Revised Branch Current-Based Distribution System State Estimation Algorithm and Meter Placement Impact. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(1): 207-214.
- [13] 吴为麟, 侯 勇, 方鹏飞. 基于支路电流的配电网状态估计. 电力系统及其自动化学报, 2001, 13(6): 13-19.
WU Wei-lin, HOU Yong, FANG Ge-fei. Status Estimation of Distribution System Based on Branch Currents. Proceedings of the EPSA, 2001, 13(6): 13-19.
- [14] 孙宏斌, 张伯明, 相年德. 基于支路功率的配电状态估计方法. 电力系统自动化, 1998, 22(8): 12-16.
SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, XIANG Nian-de. A Branch-Power-Based State Estimation Method for Distribution Systems. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(8): 12-16.
- [15] 巨云涛, 吴文传, 张伯明. 支持大规模电流量测的配网抗差状态估计方法. 中国电机工程学报, 2011, 31(19): 82-89.
JU Yun-tao, WU Wen-chuan, ZHANG Bo-ming. A New Method for Distribution State Estimation Accommodating Current Measurements. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(19): 82-89.
- [16] 李 建, 王心丰, 段 刚, 等. 基于等效功率变换的配电网状态估计算法. 电力系统自动化, 2003, 27(10): 39-44.
LI Jian, WANG Xin-feng, DUAN Gang, et al. A State Estimation Method for Distribution Systems Based on Equivalent Power Transformation. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10): 39-44.
- [17] 辛开远, 高赐威, 杨玉华. 配电网状态估计中的量测变换技术. 电网技术, 2002, 26(9): 67-70.
XIN Kai-yuan, GAO Ci-wei, YANG Yu-hua. A Discussion on Measurement Transformation Technology in State Estimation for Distribution Network. Power System Technology, 2002, 26(9): 67-70.
- [18] Youman Deng, Boming Zhang. A Branch-Estimation-Based State Estimation Method for Radial Distribution Systems. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(4): 1057-1062.
- [19] 刘 明, 周双喜, 邓佑满, 等. 配电系统状态估计区域解耦算法. 电力系统自动化, 2005, 29(6): 79-83.
LIU Ming, ZHOU Shuang-xi, DENG You-man, et al. An Area-Decoupled State Estimation Method for Distribution Systems. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 79-83.
- [20] 杨成龙, 高晓萍. 基于支路带节点功率估计的配网状态估计实用算法. 电网技术, 2003, 27(10): 87-91.
YANG Cheng-long, GAO Xiao-ping. A Practical State Estimation Algorithm for Distribution Network Based on Branch With Node Power Estimation. Power System Technology, 2003, 27(10): 87-91.
- [21] D. M. Vinod, Kunar S. C, Srivaatava S, Ahah S. Mathur. Topology Processing and Static State Estimation Using Artificial Neural Networks. IEEE Transaction and Measurement, 1996, 143(1): 99-105.
- [22] Mikael M. Nordman, Matti Lehtonen. Distributed Agent-

- Based State Estimation for Electrical Distribution Networks. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 652-658.
- [23] 徐 臣, 余贻鑫, 贾宏杰. 基于 MAS 的配电网三相状态估计. 天津大学学报, 2010, 43(2): 95-101.
XU Chen, YU Yi-xin, JIA Hong-jie. MAS Based Distribution Network Three-Phase State Estimation. Journal of Tianjin University, 2010, 43(2): 95-101.
- [24] Nazia Nusrat, Malcolm Irving, Gareth Taylor. Development of Distributed State Estimation Methods to Enable Smart Distribution Management Systems. IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2011, Gdansk.
- [25] HUBER P J. Robust Estimation of a Location Parameter. Annals of mathematical statistics, 1964, 35(1): 73-101.
- [26] MERRILL H M, SCHWEPPE F C. Bad Data Suppression in Power System State Estimation. IEEE Trans on Power Apparatus, 1971, 90(6): 2718-2735.
- [27] IRVING M R, MACQUEEN C N. Robust Algorithm for Load Estimation in Distribution Networks. IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1998, 145(5): 499-504.
- [28] THUKARAM D, JEROME J, SURAPONG C. A Robust Three-Phase State Estimation Algorithm for Distribution Networks. Electric Power Systems Research, 2000, 55(3): 191-200.
- [29] 李 慧, 杨明皓. 配电网非量测负荷的最小二乘估计. 电网技术, 2003, 27(7): 47-51.
LI Hui, YANG Ming-hao. Least-Square State Estimation of Pseudo-Measured Loads in Distribution Systems. Power System Technology, 2003, 27(7): 47-51.
- [30] 李 慧, 杨明皓. 一种处理杠杆量测的配电网抗差估计算法. 电力系统自动化, 2005, 29(3): 31-35.
LI Hui, YANG Ming-hao. Robust Estimation Algorithm for Distribution System Leverage Measurements. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(3): 31-35.
- [31] 陈得治, 郭志忠. 配电网模糊匹配潮流状态估计方法分析. 电力系统自动化, 2005, 29(13): 34-39.
CHEN De-zhi, GUO Zhi-zhong. Analysis of Distribution Fuzzy Matching Power Flow State Estimation Method. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(13): 34-39.
- [32] Stefano Gastoni, Gianpietro Granelli, Mario Montagna. Robust State-estimation Procedure Based on the Maximum Agreement between Measurements. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(4): 2038-2043.
- [33] 何光宇, 董树锋. 基于测量不确定度的电力系统状态估计(1): 结果评价. 电力系统自动化, 2009, 33(19): 21-24, 35.
HE Guang-yu, DONG Shu-feng. Power system static-state estimation based on uncertainty of measurement (1): result evaluation. Automation of Electrical Power System, 2009, 33(19): 21-24, 35.
- [34] 何光宇, 董树锋. 基于测量不确定度的电力系统状态估计(2): 方法研究. 电力系统自动化, 2009, 33(20): 26-32.
HE Guang-yu, DONG Shu-feng. Power system static-state estimation based on uncertainty of measurement (2): new method. Automation of Electrical Power System, 2009, 33(20): 26-32.
- [35] 何光宇, 董树锋. 基于测量不确定度的电力系统状态估计(3): 算法比较. 电力系统自动化, 2009, 33(21): 28-31, 71.
HE Guang-yu, DONG Shu-feng. Power system static-state estimation based on uncertainty of measurement (3): Compare of Algorithms. Automation of Electrical Power Systems, 2009, 33(21): 28-31, 71.
- [36] Guangyu He, Shufeng Dong, Junjian Qi, Yating Wang. Robust State Estimator Based on Maximum Normal Measurement Rate. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2058-2065.
- [37] 王雅婷, 何光宇, 董树锋. 基于测量不确定度的配电网状态估计新方法. 电力系统自动化, 2010, 34(7): 40-44.
WANG Ya-ting, HE Guang-yu, DONG Shu-feng. Novel Method for Distribution State Estimation Based on Uncertainty of Measurement. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7): 40-44.
- [38] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [39] LIU Jun-qi, BENIGNI A, OBRADOVIC D, et al. State Estimation and Branch Current Learning Using Independent Local Kalman Filter With Virtual Disturbance Model. IEEE Transactions on Instrumentation And Measurement, 2011, 60(9): 3026-3034.
- [40] Sungyun Choi, Beungjin Kim, COKKINIDES G J, et al. Feasibility Study: Autonomous State Estimation in Distribution Systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2109-2117.
- [41] M. E Baran. Challenges in State Estimation on Distribution Systems[C]. Power Engineering Society Summer Meeting, Vancouver, BC, Canada, 2001.

收稿日期: 2013-04-09

本文编辑: 杨林青