

DOI: 10.7667/PSPC170753

电力系统分区和解耦状态估计研究综述

孙江山, 刘敏, 邓磊, 应丽云

(贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 电力系统状态估计已经成为电网 EMS/DMS 监测与控制的核心功能之一。有效的状态估计方法可以提高状态估计的精度、提升计算效率及改善估计结果的数值稳定性。首先介绍了当前电网分区准则, 分析了各类分区方法需要研究的核心问题, 并对基于网络拓扑和地理位置、AMI、MAS 的电力系统分区状态估计的优缺点进行评述。然后从提高区域内部输配电网计算速度角度, 指出基于快速解耦和相序解耦方法是处理当前三相平衡与三相不平衡系统的状态估计的有效解决方案。最后总结了分区和解耦状态估计研究存在的问题, 并对今后进一步的研究方向提出建议。

关键词: 状态估计; 分区; 解耦; AMI; MAS

Review of the research on the partition and decoupled state estimation of power system

SUN Jiangshan, LIU Min, DENG Lei, YING Liyun

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Power system state estimation has been one of the heart function of monitoring and control in power grid EMS/DMS. The correct methods of SE not only improve the accuracy and calculation efficiency of state estimation, but also enhance the numerical stability of estimation results. Firstly, the current grid partition criteria are introduced. And the core research problems of various partition methods are analyzed. Moreover, the advantages and disadvantages of power system partition state estimation based on network topology and geographical location, AMI and MAS are reviewed. After that, the state estimation based on the fast decoupling and the phase sequence decoupling are the current effective solution for handling the state estimation of three-phase balance and three-phase unbalanced power system from the point of view of increasing the calculation speed of regional transmission and distribution network. Finally, the existing research problems on the partition and decoupling of state estimation are summarized, then some suggestions for further research are proposed.

This work is supported by Science and Technology Foundation of Guizhou Province (No. [2012]2157) and Innovation Foundation for Graduates of Guizhou University (No. 2017064).

Key words: state estimation; partition; decoupling; AMI; MAS

0 引言

随着智能电网的建设与发展, 大规模集成的分布式发电(Distributed Generation, DG)和灵活多变负荷(如电动汽车)接入电网以及区域电网之间的互联性增强, 使电力系统网络规模扩大, 节点数量剧增^[1-2], 对 EMS/DMS^[3]中状态估计的计算效率、数据存储和数据传输带来了巨大的挑战。分区有效降低网络

规模, 提高状态估计计算效率和数值稳定性; 解耦进一步提高状态估计计算速度。分区和解耦状态估计对电网 EMS/DMS 完成实时监测与控制功能至关重要。

在电力系统中, 如相量测量单元(Phasor Measurement Units, PMU)、高级量测体系(Advanced Metering Infrastructure, AMI)、变电站电子智能设备等量测装置, 不仅提高系统量测冗余, 同时增加了现有分区方式的灵活性^[4-5]; 通过对这些智能量测优化配置, 能提高网络可观性^[6]。通过对电网进行分区, 设计对任务分解处理的多代理系统, 实现电网分块

基金项目: 贵州省科学技术基金项目(黔科合J字[2012]2157号); 贵州大学研究生创新基金(研理工 2017064)

处理系统参数和量测数据, 避免集中式数据处理繁琐的问题。针对区域内部输电网计算速度慢, 占用内存大的问题, 利用快速分解的思想, 实现输电网 PQ 解耦; 利用坐标变换的思想, 实现 ABC 三相解耦。提升电网子区域计算时间, 继而提升电力系统整体的计算效率。

目前, 国内外关于电力系统分区和解耦状态估计的相关理论研究和实际应用取得较大发展, 本文对其进行研究综述。首先从降低网络规模、减轻通信负担角度, 综述了以下分区状态估计研究现状: 基于网络拓扑和地理位置分区、基于 AMI 量测分区、基于多代理系统(Multi-Agent System, MAS)分区。然后从电网分区后, 提升区域内部的状态估计计算速度角度, 对快速解耦和相序解耦的输电网状态估计研究现状进行综述。最后总结了分区和解耦状态估计研究存在的问题, 并对进一步研究提出建议。

1 电力系统分区状态估计

1.1 分区准则和依据

当前电力系统网架结构主要以 500 kV 分层输电、220 kV 分区供电为主, 在对大电网进行分区时, 应保证网架的安全运行、保证供电可靠性、各分区内应有电源和电压支撑、区域电网之间应有相互支援的能力(如相邻区域内发生大规模停电时, 应及时给予供电支持)。在满足上述分区运行条件时, 根据电网拓扑结构和地理位置特点, 充分利用电网现有量测配置, 电力系统分区状态估计可以具体分为以下几类: 1) 基于网络拓扑和地理位置分区^[7]。对于区域内系统规模相对较小的网络, 又可以分为辐射型子网、简单环网和复杂环网^[8]。2) 基于 AMI 全量测分区^[4]。在配电网中低压侧, 配置的 AMI 全量测点为分区提供了技术条件, 进一步降低了配电网规模。3) 基于多代理系统分区^[9-10]。对区域多级划分, 利用计算机技术对复杂的状态估计问题进行分解, 实现分布式并行计算; 对于分区状态估计, 尽管各类方法切入点不同, 以下核心问题都是其共有属性:

- 1) 边界状态信息之间的交换问题;
- 2) 全网状态估计统一协调问题如电压相角;
- 3) 相邻区域通信能力;
- 4) 子区域的规模和独立性、可观性问题。

1.2 基于网络拓扑和地理位置分区状态估计

大规模高渗透率的分布式电源接入电网以及网络之间互联趋势增强(如西电东送、南北互供), 依据网络拓扑和地理位置对重要的多机断面进行分区。在分区边界主要存在两种类型: 边界区域非重

叠(如图 1(a)所示)和边界区域重叠(又称为搭接式^[11], 如图 1(b)所示)。

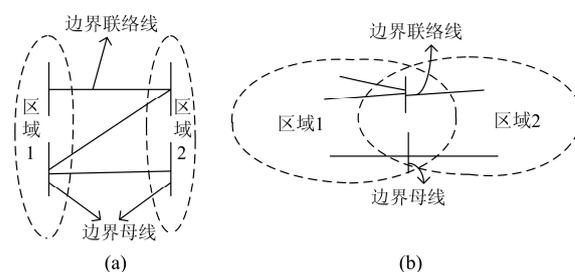


图 1 2 区域电力系统

Fig. 1 Two-area power system

1.2.1 边界重叠分区状态估计

边界重叠区域划分思想主要是: 对重要的边界节点进行分区, 如 220 kV 或 110 kV 变电站。在分区边界, 状态估计约束条件是节点电压相量相等。对于子区域边界节点连接线路的支路功率可以不作约束处理, 求解目标函数较为容易。

搭接式分区状态估计可以不用考虑相邻区域边界联络线无支路功率量测的情况^[12], 在部分量测不富裕的地区也可以进行分区执行状态估计。以往电力系统状态估计针对重叠区域的节点状态量以及联络线功率进行协调处理, 并没有对子区域内部节点做调整, 例如全网的电压相角参考节点不一致, 导致区域内部状态估计精度不高。针对以上问题, 文献[13]利用零阻抗支路对搭接式区域进行解列。把重叠节点的电压幅值和电压相角作为目标函数的等式约束, 通过拉格朗日乘子法对其求解。在各子区域内将 PMU 实时量测的电压相角与全网的相角参考值进行转换, 实现状态估计的参考节点统一。但是该目标函数自身就是一个最优化求解的问题, 状态估计存在多次迭代以及结果次优等不足。由此文献[11]分析量测变化和状态量变化的灵敏度矩阵, 减少了目标函数约束。在状态估计执行时, 利用各区域得到的重叠母线估计值, 修正联络线首末两端的电压幅值和相角。继而利用功率不匹配量对各区域内部节点状态量进行修正, 减少迭代的同时提高子系统状态估计的精度。

在以搭接式分区的电力系统中, 各子区域独自执行本地的状态估计, 对于相邻区域运行时产生的影响则忽略, 只有在全网进行状态估计统一协调时才给予考虑。这样处理对于在线状态估计的精度影响很大。文献[14]提出建立外网的浓缩等值模型。当子系统执行本地状态估计时, 把相邻区域的影响也考虑进来。在通信故障条件下, 估计精度也能满足要求。

电力系统中量测量可能由于量测设备故障和通信传输数据丢失等问题,随机产生不良数据。针对区域内存在的不良数据,如果不能有效处理,将对相邻区域甚至全网的状态估计精度产生影响。对此,文献[15]在利用搭接式对电网分区后,提出通过检查各子区的累积偏差,将区域分为可靠区域和可疑区域。对可疑区域发送到可靠区域的信息,在可靠区域要逐渐降低其权重,在状态估计后要返回该信息到可疑区域进行修正,直到各子区域都收敛。避免了不良数据对整体状态估计的影响。

1.2.2 边界非重叠分区状态估计

边界非重叠分区的主要划分依据是:只需对联络线上的支路功率进行约束。对于分区边界,量测一般都比较充裕,现有变电站母线的出线支路都能实时监测支路功率,且大多配置有 PMU。

在对电网分区后,各子区域状态估计的边界母线电压相角是基于本地的参考节点计算得到的。这使全网的相角估计值没有实现统一,对估计精度影响较大。PMU 实时快速的电压相量量测成为解决上述问题的重要手段^[16]。文献[17]把边界 PMU 的电压相角量测作为各子区域状态估计的参考节点,然后对 PMU 电压相角量测和全网的参考节点进行转化,实现全网参考节点一致,提高状态估计精度。

对边界母线非重叠分区,同样具有外部电网等值模型精确性的问题。外部网络实时模型是状态估计误差的主要来源^[18],外网模型精确度越高,状态估计结果越好。文献[19]对联络线两端的子区域作戴维南电路等值。利用边界 PMU 量测作为边界条件后,计算联络线任意一侧子系统的状态估计。然后把子系统自身内阻抗连同边界节点的戴维南等值电压初值,得到相邻区域外网的戴维南等值模型。通过边界电压初始值不断迭代修正该模型,提高了外网模型的精度,实现大规模电网的分布式状态估计。

在边界交换量测和状态估计信息时,常需要考虑通信传输限制^[20]等问题。文献[21]以通信成本为约束,建立起最小边界交换信息为目标函数的状态估计模型。在设定的通信下界约束时,必须使子系统具有可观性。电网量测由于量测设备因素或数据传输过程中存在通信失效,常伴有数据丢失的现象,这对状态估计精度造成很大影响。文献[22]通过伯努利分布建立起数据包缺失模型。在原有量测函数模型基础上,加入 0-1 伯努利分布,把数据丢失的问题纳入到模型中给予分析。并利用均方误差原理,确定了本地和相邻区域的卡尔曼滤波增益,实现在数据丢失时的分布式动态状态估计。

1.2.3 含 DG 的配电网分区

配电网中 DG 接入分散,和输电网的大规模集群方式接入有很大区别,以地理位置划分则需要考虑 DG 并网特性^[23]。文献[24]对分布式电源并网建模分析后,根据地理分区准则对配电网馈线分区。若在分区边界,存在本地子区域可观,相邻区域不可观的特殊情况。将本区域的边界估计值作为相邻区域母线的伪量测^[25],增强网络可观性。

对主动配电网分区,降低网络求解规模,可增强算法鲁棒性。针对配电网三相不平衡严重,负荷灵活多变的特点,文献[26]提出子区域规模均衡、量测冗余和伪量测平均误差三类指标,使子系统规模更加合理。并设置网络可观等式约束和分区数目不等式约束,综合考虑各目标函数最优,为主动配电网分区状态估计提供了解决思路。

1.2.4 调度中心-变电站两级分区

传统变电站通信差且存在标准不一致的情况,现阶段发展的数字变电站,具备如下特点^[27]: 1) 操作方便,通信接口统一; 2) 变电站内便可实现监视与控制功能,调度中心可以远程读写相关数据。

基于变电站智能化,文献[28]提出在变电站内进行三相状态估计,调度中心对各区域变电站上传的数据进行全网协调处理,数据传输与通信周期同步,实时接口对接较为方便,对减轻调度中心数据处理困难贡献很大。文献[29]进一步研究多调度中心状态估计分解协调的问题。对大电网利用节点分裂法实时动态分区,实现高电压等级 500 kV/220 kV 的省调和 110 kV 的地调分区,使各子区域独立。通过灵敏度矩阵协调边界量测和零注入量测,解决零注入处理困难的问题;省调电压相角参考节点作为全网的参考节点,分别对各子区域的地调相角进行修正,实现全网状态统一估计。实用前景好。

1.3 基于 AMI 分区状态估计

考虑子区域内部电压等级低,实时量测不足,网络结构复杂的配电网,进一步对其分区改善状态估计计算效率,提高配网自动化水平,为其他高级应用如故障定位和无功优化控制提供实时运行状态。

AMI 具有较好的量测和通信功能,主要量测量为节点有功和无功功率、电压幅值、电能量。同时 AMI 量测又称为全量测点。传统配电网中低压负荷节点大多没有实时量测,而是基于历史负荷数据预测补充伪量测。而 AMI 的发展改善了这种局面,可以得到 15 min 间隔的负荷数据,可以通过招读和冻结两种方式读取该数据^[30]。对于现阶段的配电网状态估计,由于量测更新速率和现有实时量测冗余低等特点,AMI 数据可作为实时量测数据或 15 min

内的伪量测处理。

通过 AMI 量测点可以实现对配电网进行分区。文献[4]通过 AMI 分区后, 对网络无量测的负荷节点, 利用 AMI 实时量测进行功率分配, 产生负荷预测伪量测。并设计了配电网分区的并行计算模式, 提高系统的计算效率。但网络参考节点没有实现全网一致, 估计精度受到影响。文献[31]通过配电网全量测点实现网络分区。引入消息中间件技术后, 构建了配电网状态估计的分布式计算平台。对状态估计进行任务分解, 各子区域并行计算, 最后在执行端对全网状态进行协调处理。避免了参考节点不一致的问题。

1.4 基于 MAS 的分区状态估计

主动配电网由于 DG 的接入, 会出现双向潮流、节点电压越限、随机负荷波动大和预测难度大等一系列难题。实现主动配电网的自愈技术, 对电压和无功进行控制, 首要得到的是系统运行的状态信息。利用多代理系统对配电网状态估计进行任务分解, 实现分区状态估计, 是提高配电网状态估计计算速度和估计精度的有效手段。通过研究发现, 对电网分区不仅有利于状态估计, 同时对网络电压控制、故障分析诊断和保护也有较大优势^[32-33]。

基于多代理系统通过其基本构成单元 Agent 将复杂问题进行分解, 实现分布式处理, 其核心理念是: 每个 Agent 具有独立处理任务及与其他 Agent 信息交互的能力, 以期共同完成对复杂系统处理的任务。

在主动配电网中, 引入计算机多代理技术实现对 DG 以及重要观测点的分区状态估计, 对电网稳定安全运行是十分有效的。文献[34]对配电网分割成子网后, 首次建立起配电子网与 Agent 的八元素结构模型。利用配电子网的 Agent 执行本区域的状态估计, 然后通过管理员 Agent 对全网状态估计进行协调处理。研究发现应用 Agent 通信延迟远小于状态估计计算时间。该分布式状态估计的算例分析都是三相不平衡配电网, 实际应用价值高。

通过 MAS 对电网的分区, 对静态和动态状态估计都有较快的计算速度和收敛性。针对区域内部可能出现量测欠定, 导致网络不可观的情况, 文献[9]通过设定代理使本地所有状态元素与相邻区域完全共享, 利用可观区域的数据来修正不可观区域的量测。改善了传统区域互联系统之间数据限制的问题, 提高了基于 Agent 的静态状态估计收敛性。在现有电网中, PMU 配置不足以全网覆盖, 这也是不经济的。故此文献[35]提出多代理动态状态估计, 建立有/无 PMU 和远程终端单元(RTU)混合量测模

型。区域内无 PMU 量测时, 只需利用 RTU 数据执行传统的动态状态估计。区域内有 PMU 量测时, 则以 PMU 量测刷新频率为动态状态估计启动执行时间。利用 MAS 使电网分区执行 RTU/PMU 混合数据的动态状态估计, 计算时间小于 RTU 测量数据刷新频率, 更加符合实际电网的运行管理。

2 电力系统解耦状态估计

电力系统解耦状态估计可以分为两类: 1) 快速分解状态估计; 2) 相序解耦状态估计。第一种在输配电网研究应用比较多, 第二种主要针对配电网三相不平衡难以处理的问题进行研究。本节将对这两类方法进行综述。

2.1 输电网快速解耦状态估计

电网正常运行时, 负荷在额定范围内运行或者轻载运行, 各节点相互之间的相角差值很小, 则可以假设参考节点的电压相角为零, 可由递推关系得到全网的节点电压相角近似为零, 故存在关系: $\cos \theta_i = 1, \sin \theta_i = 0$, 使量测雅克比矩阵能常数化, 提高了每次迭代的计算效率。这是 PQ 解耦的核心思想。

PQ 解耦算法逻辑分析容易、编程简单, 但是大系统也会出现多次迭代、收敛性差的问题。系统考虑 PMU 量测后, 会增加修正方程的维数, 据此文献[36]对混合量测下的雅克比矩阵进行详细分析, 通过简化处理节点之间的电压相角和支路参数, 使量测信息矩阵变成常数, 节省内存, 提高计算效率。文献[37]提出非线性快速解耦状态估计新算法。既保留了量测方程的非线性, 同时利用了改进的正交变换法, 有效地克服病态条件下方程的收敛性, 提高估计结果的鲁棒性。文献[38]结合快速分解法的优势, 引入 IGG 法并进行改进, 实现了对电力系统抗差状态估计。但由于 IGG 中的常数选取不当, 可会出现信息矩阵不满秩, 导致状态估计失败。文献[39]针对这些病态情形, 进一步研究了奇异值分解和等效电流量测变换的状态估计方法, 奇异值分解无需对系统进行可观性分析, 直接避开了信息矩阵奇异的问题, 增强了系统的稳定性。

2.2 配电网解耦状态估计

基于 PQ 解耦算法以及诸多改进方法在输电网状态估计中得到广泛研究与应用, 而配电网解耦状态估计主要基于快速解耦和基于坐标变换的相序解耦法。配电网要实现解耦, 面临着两大难题: ① R/X 比值较大, 不能像输电网一样使用成熟的 PQ 解耦法; ② 三相网络不平衡、实时量测少, 不能将三相状态估计等效成单相计算。

2.2.1 基于快速解耦状态估计

配电网状态估计在选取系统状态变量后，量测方程是关于状态变量的非线性函数，选取支路电流或功率作为系统状态变量，利用量测变换技术将使非线性函数线性化，简化计算的复杂性。

在处理类型不同的量测时，会出现以下问题：

A、电流幅值量测与状态量之间存在非线性关系；B、电压幅值量测无法处理；C、功率量测成对出现且权重设置相同。

对于 A 类问题，利用状态估计进行第一次前推回代计算得到系统相角信息后，将电流幅值量测作为电流状态量测参与迭代计算^[40-41]，使量测函数全部线性化，而且可使信息矩阵和支路阻抗无关，进一步提高估计值的数值稳定性。

对于 B 类问题，电压幅值在配电网中虽然少但精度高，传统舍弃这类量测的处理方式使得估计结果表现不佳。文献[42]提出对任意节点电压可以用支路参数和支路电流、根节点电压表示，将支路电流和母线电压联系起来。考虑线路参数的自阻抗总是远大于耦合关系的互阻抗，解耦了基于支路电流状态估计的电压和功率量测雅克比矩阵，提高了状态估计精度和计算效率。

对于 C 类问题，文献[43]提出两个约束条件，在满足约束的前提下，对 PQ 量测可以不作处理，而且对量测赋予不同权重，保持支路电流优点的同时，增强了算法的实用性。对 T 型节点考虑虚拟量测提高量测冗余的同时考虑电流约束，解决了大量短支路无量测的问题，算法鲁棒性更好^[41]。

2.2.2 基于相序解耦法

配电网由于三相不平衡特性，在状态估计中分析网络元件都是三相模型，这导致计算过程中系统维数较大，占用存储较多。而配网三相解耦，将减少矩阵的维数，极大提高状态估计计算速度，并减轻计算机计算时的存储负担。

相序解耦状态估计法的核心是：坐标变换^[44]。文献[44]在引入旋转变换后，对量测方程进行相应的解耦变换，使信息矩阵的非对角元素严格为零，该方法对于电压量测以及功率权重可以不作特殊处理，不足之处在于需要 PQ 量测成对出现。在此基础上，文献[45]进一步引入阻抗移相角，减少了 R/X 的比值，使其能满足 PQ 解耦的基本条件。但对于基准相角在进行复数域标么化过程时，选取原则还比较模糊，处理大规模网络不平衡还需继续深入分析。文献[46]提出混合量测变换将电流、电压幅值

变换成平方的形式，建立相坐标下的三相不平衡电流解耦-补偿模型，并利用特勒根定理求解，实现简单。

3 总结和展望

3.1 总结

分区的意义在于将集中式网络规模大的电网转化为多个小规模各区域独立的子网求解。本文首先介绍了电力系统分区准则和依据，然后对各类分区状态估计进行综述。继而从区域内部提升状态估计计算速度角度考虑，综述了输配电网解耦状态估计的研究现状。现将电力系统分区和解耦状态估计研究中存在的问题进行总结。

1) 基于各类分区方法中，没有研究具体分区指标，分区后子区域的规模是否合理还需要继续研究；在对电网分区后，构建并行计算框架和机制仍处于探索阶段。

2) 现有分区方法中，边界交换状态和量测信息都需要有效的通信支撑。当传输数据容量大于通信容量，导致数据传输失败或是数据丢失时，如何分析相邻区域数据最小化传输问题还没有确切的解决方案。

3) 在现有的量测配置条件下，全网和子网的量测最优协同配置还没有研究；使区域量测最优和保证子系统可观性的约束还没有建立；对于边界母线存在零注入量测时的情况还未能有效解决，一般都是避开处理或做简化处理。

4) 现有配电网三相解耦方法对三相不平衡严重的网络还不能有效处理，仍需要研究适用性更好的解决方法。

3.2 展望

大规模互联电网状态估计发展趋势是分区和解耦计算。综合上述分区和解耦状态估计研究现状和存在的问题，本文对今后状态估计研究的方向提出如下几点建议：

1) 对大规模电网分区时，提出具体分区指标有利于控制子系统的规模和可观性。在分区边界，分析具体的量测配置和通信水平，提高边界交换信息的可靠性。

2) 建立分区边界的零注入量测约束与求解模型，提高区域状态估计的精度；子区域和全网相角如何实现参考点一致值得深入研究。

3) 对配电网量测不足以及通信支撑薄弱区域，依据地理分区或开关对配电网分区降低网络规模；借助相坐标变换的思想，使含分布式电源的配电网三相不平衡解耦，研究适应不平衡度更高的算法。

参考文献

- [1] 宋璇坤, 韩柳, 鞠黄培, 等. 中国智能电网技术发展实践综述[J]. 电力建设, 2016, 37(7): 1-11.
SONG Xuankun, HAN Liu, JU Huangpei, et al. A review on development practice of smart grid technology in China[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(7): 1-11.
- [2] 王良. 智能配电网自动化应用实践的几点探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 12-16.
WANG Liang. Discussion on application practice of distribution automation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 12-16.
- [3] MELIPOULOS A P S, POLYMENEAS E, TAN Z, et al. Advanced distribution management system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4): 2109-2117.
- [4] 侯雨伸, 白雪峰, 郭志忠. 计及 AMI 的配网分层状态估计及伪量测计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(8): 71-76.
HOU Yushen, BAI Xuefeng, GUO Zhizhong. Layered method for distribution system state estimation and pseudo measurement calculation considering AMI[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(8): 71-76.
- [5] 陈芳, 韩学山, 李华东. 基于 PMU 分解协调的状态估计算法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(17): 44-48.
CHEN Fang, HAN Xueshan, LI Huadong. Decomposition and coordination state estimation based PMU[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(17): 44-48.
- [6] 戴桂木, 吴在军, 徐俊俊, 等. 有源配电网 FTU 优化布置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 86-93.
DAI Guimu, WU Zaijun, XU Junjun, et al. Study of FTU optimal placement in the active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 86-93.
- [7] 王涛, 李渝, 顾雪平, 等. 考虑地理分区边界优化的电网关键输电断面辨识[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 220-228.
WANG Tao, LI Yu, GU Xueping, et al. Identification of the key transmission sections considering optimization of geographical partition boundary for power grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 220-228.
- [8] 童钧, 沈策, 项波, 等. 考虑电网分区的两阶段状态估计方法[J]. 电气应用, 2012(2): 54-58.
- [9] NORDMAN M M, LEHTONEN M. Distributed agent-based State estimation for electrical distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 652-658.
- [10] ALAM S M S, NATARAJAN B, PAHWA A. Agent based state estimation in smart distribution grid[C] // IEEE Latin-America Conference on Communications, November 24-26 2013, Santiago, Chile: 1-7.
- [11] 邓颖, 兰华, 郝红艳. 计及 PMU 的搭接式分布状态估计[J]. 电力科学与工程, 2010, 26(1): 19-22.
DENG Ying, LAN Hua, HAO Hongyan. Distributed state estimation based on the PMU and overlapped[J]. Electric Power Science & Engineering, 2010, 26(1): 19-22.
- [12] 邱家驹. 分布式状态估计[J]. 电力系统自动化, 1988, 12(6): 37-44.
- [13] 李阳林, 卫志农, 万军彪. 一种新的分布式电力系统状态估计算法[J]. 继电器, 2007, 35(20): 13-16.
LI Yanglin, WEI Zhinong, WAN Junbiao. A new algorithm for the distributed state estimation of power systems[J]. Relay, 2007, 35(20): 13-16.
- [14] 卢志刚, 张静, 程慧琳, 等. 基于分解协调及外网浓缩等值的多代理状态估计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 23-29.
LU Zhigang, ZHANG Jing, CHENG Huilin, et al. Multi-agent state estimation based on decomposition and coordination external network concentration equivalence[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 23-29.
- [15] JIANQIAO W, CAILIAN C, XINPING G. An overlapping distributed state estimation and detection method in smart grids[C] // International Conference on Wireless Communications & Signal Processing, October 15-17, 2015, Naging, China: 1-5.
- [16] JIANG W, VITTAL V, HEYDT G T. A distributed state estimator utilizing synchronized phasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(2): 563-571.
- [17] KORRES G N. A distributed multiarea state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 73-84.
- [18] 黄滔, 卢建刚, 张辉. 广东省调提高状态估计计算精度的措施[J]. 电网技术, 2004, 28(16): 78-81.
HUANG Tao, LU Jiangang, ZHANG Hui. Measures to improve state estimation calculation accuracy in Guangdong provincial power dispatching center[J]. Power System Technology, 2004, 28(16): 78-81.
- [19] 许卫东, 张友军, 李鹏. PMU 在多区域互联系统状态估计中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(5): 46-50.
XU Weidong, ZHANG Youjun, LI Peng. Using PMU for state estimates for multi-area interconnected power system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2009, 21(5): 46-50.

- [20] KARIMIPOUR H, DINAHAHI V. Parallel domain-decomposition-based distributed state estimation for large-scale power systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(2): 1265-1269.
- [21] MA H, YANG Y H, CHEN Y, et al. Distributed state estimation in smart grid with communication constraints[C] // Signal & Information Processing Association Summit and Conference, December 3-6, 2012, Hollywood, USA: 1-4.
- [22] RANA M, LI L, SU S W. Distributed state estimation over unreliable communication networks with an application to smart grids[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2017, 1(1): 89-96.
- [23] 巨云涛, 林毅, 王晶, 等. 考虑分布式电源详细模型的配电网多相状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 147-152.
JU Yuntao, LIN Yi, WANG Jing, et al. Multi-phase distribution state estimation considering detailed models of distributed generators[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 147-152.
- [24] 卫志农, 陈胜, 孙国强, 等. 含多类型分布式电源的主动配电网分布式三相状态估计[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 68-74.
WEI Zhinong, CHEN Sheng, SUN Guoqiang, et al. Distributed three-phase state estimation for active distribution network integrated with different types of distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 68-74.
- [25] CONEJO A J, TORRE S D L, CANAS M. An optimization approach to multiarea state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 213-221.
- [26] 马健, 唐巍, 徐升, 等. 基于多准则分区和 WLS-PDIPM 算法的有源配电网状态估计[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 28-36.
MA Jian, TANG Wei, XU Sheng, et al. State estimation of active distribution network based on multi-criteria partition and WLS-PDIPM algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 28-36.
- [27] 蔡骥然, 郑永康, 周振宇, 等. 智能变电站二次设备状态监测研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 148-154.
CAI Jiran, ZHENG Yongkang, ZHOU Zhenyu, et al. A survey of research on secondary device condition monitoring in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 148-154.
- [28] 李青芯, 孙宏斌, 王晶, 等. 变电站—调度中心两级分布式状态估计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 44-50.
LI Qingxin, SUN Hongbin, WANG Jing, et al. Substation-dispatch center two-level distributed state estimation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 44-50.
- [29] 罗玉春, 王毅, 戴则梅, 等. 基于多调度控制中心的分解协调状态估计[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1516-1521.
LUO Yuchun, WANG Yi, DAI Zemei, et al. Decomposition and coordination state estimation for multi dispatching and control centers[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1516-1521.
- [30] 林佳颖, 秦超, 栾文鹏, 等. 考虑 AMI 量测特性的配电网状态估计[J]. 南方电网技术, 2016, 10(10): 3-10.
LIN Jiaying, QIN Chao, LUAN Wenpeng, et al. Distribution network state estimation considering measurement characteristics of AMI[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(10): 3-10.
- [31] 黄伟, 庞琳, 曹彬, 等. 基于分区解耦的配电网状态估计的分布式并行计算[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 45-51.
HUANG Wei, PANG Lin, CAO Bin, et al. Parallel and distributed computing for an area-decoupled state estimation method for distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 45-51.
- [32] RAHMAN M H, XU L, YAO L. Protection of large partitioned MTDC networks using DC-DC converters and circuit breakers[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 170-178. DOI: 10.1186/s41601-016-0030-0.
- [33] 张玮亚, 王紫钰. 智能配电系统分区电压控制技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 146-154.
ZHANG Weiya, WANG Ziyu. Review of zonal-voltage control techniques of smart distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 146-154.
- [34] 徐臣, 余贻鑫, 贾宏杰. 基于 MAS 的配电网三相状态估计[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2010, 43(2): 95-101.
XU Chen, YU Yixin, JIA Hongjie. MAS based distribution network three-phase state estimation[J]. Journal of Tianjin University (Science and Engineering), 2010, 43(2): 95-101.
- [35] SHARMA A, SRIVASTAVA S C, CHAKRABARTI S. Multi-agent-based dynamic state estimator for multi-area power system[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(1): 131-141.
- [36] 秦晓辉, 毕天姝, 杨奇逊, 等. 计及 PMU 量测信息的状态估计快速解耦新方法[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2008, 35(2): 1-5.
QIN Xiaohui, BI Tianshu, YANG Qixun, et al. Fast

- decoupling method for state estimation with PMU measurements[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science), 2008, 35(2): 1-5.
- [37] 韩富春, 任先成. 快速解耦状态估计算法研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(6): 45-48.
HAN Fuchun, REN Xiancheng. A new state estimation based on fast decoupling and retaining nonlinearity[J]. Proceedings of CSU-EPSA, 2003, 15(6): 45-48.
- [38] 王冰, 李积捷, 王春瑛, 等. 基于改进 IGGIII和快速分解法的电力系统状态估计算法[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(11): 1-4.
WANG Bing, LI Jijie, WANG Chunying, et al. State estimation algorithm based on the improved method of IGGIII and fast decoupled arithmetic[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(11): 1-4.
- [39] 王韶, 江卓翰. 基于奇异值分解和等效电流量测变换的电力系统状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 111-115.
WANG Shao, JIANG Zhuohan. Power system state estimation based on singular value decomposition and equivalent current measurement transformation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 111-115.
- [40] 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[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(10): 39-44.
LI Jian, WANG Xinfeng, DUAN Gang, et al. State estimation method for distribution systems based on equivalent power transformation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10): 39-44.
- [41] BARAN M E, KELLEY A W. A branch-current-based state estimation method for distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(1): 483-491.
- [42] TENG J H. Using voltage measurements to improve the results of branch-current-based state estimators for distribution systems[J]. IET Proceedings-Generation Transmission and Distribution, 2002, 149(6): 667-672.
- [43] 孙宏斌, 张伯明. 基于支路功率的配电状态估计方法[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(8): 12-16.
SUN Hongbin, ZHANG Boming. A branch-power-based state estimation method for distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(8): 12-16.
- [44] 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[J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(4): 6-9.
WEI Zhinong, WANG Fangzhong, HE Hua, et al. A new fast decoupled state estimation method for distribution systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2002, 14(4): 6-9.
- [45] 周佳伟, 卫志农, 孙国强, 等. 基于复数域标幺化的配电网三相不对称快速分解状态估计算法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 19-24.
ZHOU Jiawei, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Fast decoupled state-estimation algorithm based on complex normalization for three-phase asymmetrical distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 19-24.
- [46] 刘琳, 和敬涵. 广义特勒根求解的配电网混合变换三相解耦状态估计算法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3734-3741.
LIU Lin, HE Jinghan. A new algorithm for distribution network state estimation considering three-phase decoupling based on Tellegen's Theorem solving[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3734-3741.

收稿日期: 2017-05-19; 修回日期: 2017-07-15

作者简介:

孙江山(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: 2663103973@qq.com

刘敏(1972—), 女, 通信作者, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力投资规划、电力市场、风险管理、智能配电网等。

(编辑 葛艳娜)