

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201207

基于等值信息交换的分布式抗差估计算法

王 帅, 张海波

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 提出了一种基于等值信息交换的分布式抗差状态估计算法。各子系统通过等值计算将自身量测信息浓缩成等值信息, 协调层收集各子系统的等值信息计算出边界状态量进而实现分布式状态估计。此外, 在分布式算法基础上实现了分布式抗差估计。采用等价权原理将指数型目标函数抗差估计方法转换成变权重的加权最小二乘估计, 并基于不动点迭代的方法进行求解。在求解过程中, 等值信息随着权重值的变化而不断更新, 子系统得以综合全系统信息进行抗差估计。最后, 构造了多子系统算例和含不良数据的算例对算法进行测试。测试结果表明分布式抗差估计算法具有很高的计算精度和很好的抗差性能。

关键词: 分布式状态估计; 等值信息; 抗差估计; 双线性状态估计

A distributed robust estimation algorithm based on equivalent information exchange

WANG Shuai, ZHANG Haibo

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: A distributed robust state estimation algorithm based on equivalent information exchange is proposed. Each subsystem condenses its own measurement information into equivalent information through equivalent calculation, and the coordinator collects the equivalent information of each subsystem to calculate the boundary state variables, and then realizes the distributed state estimation. In addition, distributed robust estimation is achieved based on the distributed algorithm. Based on the principle of equivalent weight, the robust estimation method with exponential objective function is transformed into weighted least square estimation with variable weight, and the solution is arrived at based on the fixed point iteration method. In the process of solving, the equivalent information is updated with the change of the weight, and the subsystem can synthesize the whole system information for robust estimation. Finally, a multi subsystem example and an example with bad data are constructed to test the algorithm. The test results show that the distributed robust estimation algorithm has high calculation accuracy and good robustness.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51777069).

Key words: distributed state estimation; equivalent information; robust state estimation; bilinear state estimation

0 引言

电力系统状态估计是能量管理系统(Energy Management System, EMS)的重要功能, 在电力系统运行、控制等方面具有重要意义^[1]。当前, 电网规模日益增大, 区域电网间的联系越来越紧密, 这给传统估计方法带来不小挑战。传统集中式状态估计(Integrated State Estimation, ISE)要求控制中心收集全网量测信息并对全系统进行状态估计, 而由于互

联电网的垂直化管理以及商业保密等原因, 区域电网的拓扑、量测信息难以实时共享^[2], 数据收集面临着困难。另外, 直接对规模巨大的电网进行集中式估计仍然还面临着增益矩阵条件数过大, 数值稳定性差等问题。对网络进行分区并进行分布式状态估计, 这对电网 EMS 完成实时监测和控制功能至关重要^[3]。

文献[4]提出了一种两层分布式状态估计模型, 第一层由各子系统并行执行本地状态估计, 第二层由协调层将边界状态量估计值和边界量测联合起来重新估计边界状态量。文献[5]也具有相似的两层式

计算架构, 且对文献[4]中第二层估计方法进行了改进, 有效减少了协调层的计算量。早期的这种分层式状态估计算法主要着重于边界状态量的协调, 缺乏对子系统内部估计结果的修正, 导致整体的估计精度不高。

状态估计本质上属于优化问题, 因此可应用分布式优化技术来进行分布式计算。文献[6]提出了一种基于交替方向乘子法的分布式状态估计算法, 但其边界区域交换信息量较多。文献[7]指出交替方向乘子法在严格凸优化条件的才能可靠收敛, 因此考虑双线性状态估计中的两阶段线性模型来应用该方法。文献[8]基于拉格朗日松弛技术, 将边界状态量等式约束与分区目标函数结合, 降低了求解难度。文献[9]将全网划分为若干个子区域和一个边界区域, 并基于拉格朗日乘子法实现了分布式算法。文献[10]基于矩阵分解实现了分布式状态估计。在该算法中, 各子系统只与其相邻子系统进行信息交换, 属于完全分布式计算。文献[11]基于分布式优化技术将全网估计问题分解成多个子优化问题, 从而实现了分布式状态估计。

以上算法大多基于迭代层面的协调, 而其他角度的研究同样值得关注。文献[12]中, 子系统根据本地估计结果计算灵敏度函数并将其上传至协调层, 协调层收集各子系统的灵敏度函数并以此更新边界状态量, 通过分布式计算得到了和集中式计算相一致的计算结果。文献[13]所提异步迭代算法通过构建不动点迭代格式修正外网等值, 并将等值注入功率作为等值量测来修正子系统估计。文献[14]在子系统处建立外网浓缩等值模型, 基于节点状态量和等值注入功率的灵敏度关系构建了外层迭代格式。文献[15]将全网估计问题的 KKT(Karush Kuhn Tucker)条件分解为分区侧问题和协调侧问题, 用协调侧计算出的边界状态量对分区侧的状态估计结果进行修正。

目前, 分布式状态估计算法大多基于分布式优化技术实现, 这存在一些可改进的地方。例如, 在 SCADA 量测系统下的常规状态估计模型是一非凸优化模型^[7], 这会导致某些分布式优化技术的不适用。另外, 这类算法大多基于迭代层面上的协调, 子系统之间信息交换频繁, 不仅造成较大的通信压力, 也会导致代码实现上的困难^[16]。

本文基于双线性状态估计模型^[17](Bilinear State Estimation, BSE)实现了一种两层分布式状态估计算法。本算法具有以下优势:

1) 不考虑抗差估计时, 子系统和协调层仅需交换两次信息就可在本地取得全局最优解, 避免了迭

代层面上的协调, 通信复杂度很低。

2) 分布式算法在理论上与集中式算法等价, 而且是直接传递了精确的等值信息, 所以具备很高的计算精度。

3) 算法具有很强的扩展性, 可以方便地与抗差估计方法相结合以实现分布式抗差估计。

4) 算法具有鲁棒性, 当子系统因故无法参与分布式计算时不影响其他子系统的正常计算。

1 双线性状态估计简介

通常, 电力系统采用加权最小二乘法进行状态估计^[18], 并将节点电压幅值、相角选为状态量, 量测方程是非线性的。BSE 仍以加权最小二乘法为目标函数, 但通过定义新的状态量将量测方程转化成线性方程以实现线性状态估计。BSE 主要包含三个阶段, 即第一阶段线性估计(Linear State Estimation 1, LSE-1)、非线性变换以及第二阶段线性估计(Linear State Estimation 2, LSE-2)。在 LSE-1 中, 定义三种新的状态量如式(1)。

$$\begin{cases} J_i = V_i^2 \\ K_{ij} = V_i V_j \cos \theta_{ij} \\ L_{ij} = V_i V_j \sin \theta_{ij} \end{cases} \quad (1)$$

式中, V_i 、 θ_{ij} 分别为节点电压的幅值和节点相角差。常规量测对新状态量的量测方程为线性方程。对 LSE-1 的估计值进行非线性变换, 可得到 LSE-2 的量测数据。

$$\begin{cases} \alpha_i = \ln \hat{J}_i \\ \alpha_{ij} = \ln(\hat{K}_{ij}^2 + \hat{L}_{ij}^2) \\ \theta_{ij} = \arctan\left(\frac{\hat{L}_{ij}}{\hat{K}_{ij}}\right) \end{cases} \quad (2)$$

式中, 带“^”的变量代表最优估计值。LSE-2 相应量测方程为

$$\begin{cases} \alpha_i = 2 \ln V_i \\ \alpha_{ij} = 2 \ln V_i + 2 \ln V_j \\ \theta_{ij} = \theta_i - \theta_j \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\ln V_i$ 和 θ_i 定义为 LSE-2 的状态量。LSE-2 中量测方程也都是线性方程。

2 分解协调计算方法

2.1 子系统建模

参与分布式状态估计的子系统是异地控制中心的 EMS 系统。本文中, 子系统沿用 EMS 的建模习

量(即联络线的 K_{ij} 、 L_{ij})，其估计值会经过非线性变换转化成 LSE-2 中的重复边界量测(α_{ij} 、 θ_{ij})。这时，LSE-2 的集中式估计模型为

$$\min J(X) = \sum_{i=1}^3 [Z_i - A_i X]^T W_i [Z_i - A_i X] - [Z_B^0 - A_B^0 X]^T W_B^0 [Z_B^0 - A_B^0 X] \quad (11)$$

式中： $Z_B^0 \in \mathbf{R}^{m_B^0 \times 1}$ 为重复边界量测向量； $A_B^0 \in \mathbf{R}^{m_B^0 \times n}$ 为重复边界量测的量测矩阵； $W_B^0 \in \mathbf{R}^{m_B^0 \times m_B^0}$ 为相应的权重矩阵。其中 m_B^0 是全网的重复边界量测的数目。

设 G_{BB}^0 和 S_B^0 代表重复边界量测所对应的分块信息矩阵和分块信息向量。此时全局边界等值信息由下面的算式给出：

$$\begin{cases} \tilde{G}_{BB} = \sum_{i=1}^3 \tilde{G}_{i,BB} - G_{BB}^0 \\ \tilde{S}_B = \sum_{i=1}^3 \tilde{S}_{i,B} - S_B^0 \end{cases} \quad (12)$$

与式(10)不同，上式不便进行分布式计算。另设 $G_{i,BB}^0$ 和 $S_{i,B}^0$ 代表子系统 i 的重复边界量测所对应的信息矩阵和信息向量。由于重复边界量测一定只会出现在两个子系统中，可得出如式(13)的关系。

$$\begin{cases} 2G_{BB}^0 = \sum_{i=1}^3 G_{i,BB}^0 \\ 2S_B^0 = \sum_{i=1}^3 S_{i,B}^0 \end{cases} \quad (13)$$

应用式(13)，可以将式(12)改写为便于进行分布式计算的格式。

$$\begin{cases} \tilde{G}_{BB} = \sum_{i=1}^3 \left(\tilde{G}_{i,BB} - \frac{1}{2} G_{i,BB}^0 \right) \\ \tilde{S}_B = \sum_{i=1}^3 \left(\tilde{S}_{i,B} - \frac{1}{2} S_{i,B}^0 \right) \end{cases} \quad (14)$$

3.2 相位参考点的选择问题

分布式算法中，参考相位的选择是需要考虑的重要问题，本文采用由协调层统一指定参考节点的做法来确定参考相位。具体做法是：在 LSE-2 中，各子系统不对量测矩阵做修改，即不指定参考节点，直接计算内部等值信息。协调层综合所有子系统的内部等值信息后得出式(8)所示方程组，此时协调层需要在边界节点中选择一个参考节点才能计算出边界状态量。而当子系统根据式(9)计算内部状态量时，其参考节点实际上自动确定为协调层所选的边界节点。

3.3 分布式状态估计算法流程图(图 2)

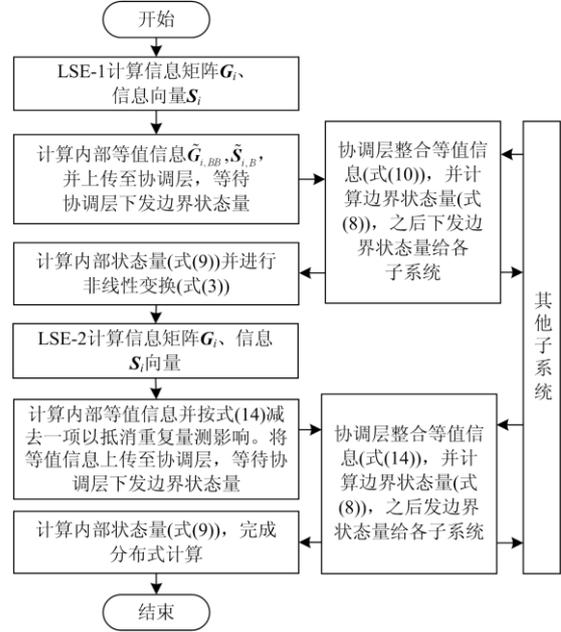


图 2 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of the algorithm

4 分布式抗差估计算法的实现

4.1 基于等价权原理的抗差估计方法

抗差估计方法能够自动抑制不良数据的影响，近年来已得到众多学者的关注^[19]。文献[20]提出了一种指数型目标函数(Maximum Exponential Square, MES)的抗差估计方法。本文采用该方法来实现分布式抗差估计。在量测方程为线性时，MES 的目标函数为

$$\min J(x) = -\sum_{i=1}^m \exp \left[-\frac{\left(z_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \right)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (15)$$

式中： a_{ij} 为线性量测方程的系数； σ 代表 parzen 窗函数的宽度，在计算过程中需要不断调整至限值以避免模型陷入局部最优，相关细节可参见文献[20]。

MES 模型的求解涉及求解非线性方程组，不便于和前面所述分布式计算方法相结合，因此本文基于等价权原理^[21]将 MES 模型转换为变权重的 WLS 估计模型。根据等价权原理，上述 MES 估计模型等价于下面的变权重 WLS 估计。

$$\min_x \sum_{i=1}^m \exp \left[-\frac{\left(z_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \right)^2}{2\sigma^2} \right] \left(z_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \right)^2 \quad (16)$$

式(16)可以采用不动点迭代法来进行求解。

$$\mathbf{X}^{l+1} = \left[\mathbf{A}^T \mathbf{W}(\mathbf{X}^l) \mathbf{A} \right]^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W}(\mathbf{X}^l) \mathbf{Z} = \left[\mathbf{G}(\mathbf{X}^l) \right]^{-1} \mathbf{S}(\mathbf{X}^l) \quad (17)$$

式中：变量的上标 l 代表迭代次数； $\mathbf{W}(\mathbf{X}^l)$ 表示权重值由状态量决定，如式(16)的权函数所示。

4.2 分布式抗差估计算法的流程

基于等价权原理计算 MES 时，量测的权重值根据估计值计算。根据前述分布式状态估计算法，权重值包含在内部等值信息中，因此只需要在权重值更新之后，相应地更新等值信息就可以实现分布式抗差估计。对 BSE 来说，通常在 LSE-1 中进行抗差估计^[22]。此时，分布式抗差估计总体计算流程图如图 3 所示。

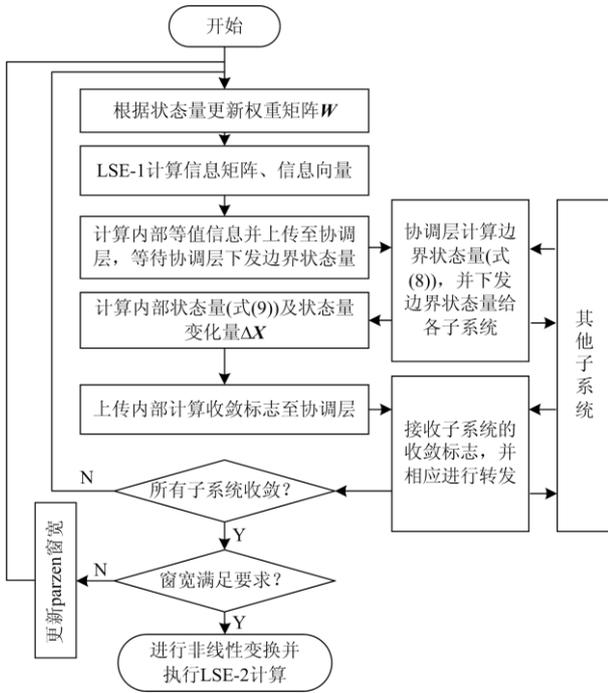


图 3 分布式抗差估计的流程图

Fig. 3 Flow chart of distributed robust state estimation

5 算例分析

5.1 多子系统算例分析

用联络线将 8 个 IEEE118 节点系统用联络线顺次串接起来，并在子系统 8 和子系统 1 之间添加联络线，形成一个环形互联系统。为保证子系统的可观测性，量测配置如下：各个节点都配置节点注入量测、电压幅值量测，支路仅首端配置潮流量测。量测数据从精确的潮流计算结果中叠加标准差为 0.001 的高斯噪声形成。集中式状态估计采用 BSE 方法。分布式计算下各子系统的电压幅值与集中式计算结果的对比如图 4 所示。

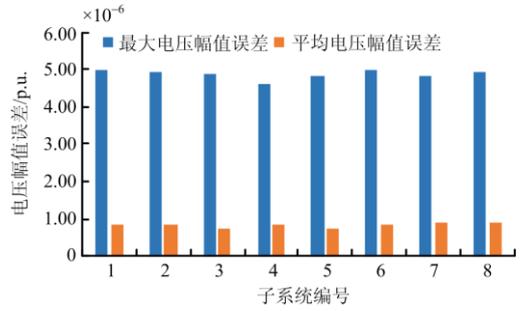


图 4 分布式算法和集中式算法的结果对比

Fig. 4 Result comparison of distributed algorithm and integrated algorithm

从图中可以看出，分布式计算结果和全网集中式计算结果相差很小，计算精度很高。此外，在分布式计算过程中子系统只同协调层交换了两次数据，比常规分布式算法的通信复杂度要低很多。

5.2 含不良数据的算例分析

将 3 个 IEEE118 节点系统用联络线互联在一起组成测试系统(两两之间都存在联络线)，并进行分布式抗差估计的测试。其中，量测配置的方法与 5.1 节一致。

首先，对边界量测出现错误的情况进行分析。在子系统 1 的边界量测中设置 3 个错误量测：

- 1) 内边界节点 103 处的有功注入量测值反转。
- 2) 联络线 5(1)-129(2)的支路有功量测叠加标准差为 0.1 的高斯噪声。括号内为子系统编号。
- 3) 联络线 23(1)-150(2)的支路有功量测值反转。

分别在子系统 1 进行分布式抗差估计和子系统 1 独立进行抗差估计的情况下进行了测试，表 1 给出了错误量测的真实值(由潮流计算结果给出)、错误量测值以及两种情况下的量测估计值。

表 1 边界处不良数据的分析

Table 1 Analysis of bad data of boundary measurement

错误量测位置	真实值/ p.u.	量测值/ p.u.	分布式抗差 估计量测估 计值/p.u.	独立抗差估 计量测估计 值/p.u.
边界节点 103	0.17	-0.169 33	0.166 70	-0.170 70
联络线 5(1)-129(2)	0.324 64	0.423 85	0.324 27	0.393 01
联络线 23(1)-150(2)	0.750 41	-0.751 10	0.751 53	-0.754 54

根据表 1 可以看出，即使边界量测存在错误，但子系统 1 仍通过分布式抗差估计取得了很好的估计结果：边界量测的估计值与真实值接近，而没有受到坏量测数据的影响。相比之下，由于缺少外网信息，子系统 1 独立进行抗差估计时并不能识别出

边界处的错误量测, 而是将错误量测当成正常量测进行处理, 这时会造成比较大的估计误差。上述结果证明了分布式抗差估计算法能够处理边界处的错误量测。

此外, 还分析了算法在较高比例坏数据下的计算效果。采用文献[23]的方法, 在正常量测值上再叠加一个高斯噪声以模拟坏数据, 该高斯噪声的标准差是正常噪声的100倍(正常噪声标准差为0.001, 坏数据标准差为0.1)。设置坏数据比例为量测数目的3%, 分别采用分布式抗差估计算法和集中式抗差估计算法进行计算, 表2给出了测试结果。

表2 分布式算法和集中式算法的结果对比

Table 2 Result comparison of distributed algorithm and integrated algorithm

电压幅值误差	子系统1的 值/p.u.	子系统2的 值/p.u.	子系统3的 值/p.u.
平均电压幅值误差	7.98×10^{-7}	8.49×10^{-7}	8.12×10^{-7}
最大电压幅值误差	4.94×10^{-6}	4.60×10^{-6}	4.84×10^{-6}

分布式抗差估计和集中式抗差估计的计算结果十分接近, 实现了分布式计算的目标。另外, 参照文献[24]构造评价指标来评价估计结果。

$$\begin{cases} C_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{V}_i - V_i^*| \\ C_2 = \frac{N_{3\sigma}}{N} \times 100\% \end{cases} \quad (18)$$

式中: \hat{V}_i 是节点电压幅值的估计值; 而 V_i^* 是节点电压幅值的真实值; 指标 C_1 值越小, 说明估计效果越好; $N_{3\sigma}$ 是量测的估计值和真实值之差位于 $\pm 3\sigma$ 范围内的量测数; N 是量测总数目; 指标 C_2 的值越大意味着估计效果越好。表3、表4列出了两种算法下的指标值大小情况。

表3 不同算法下指标 C_1 的值Table 3 Value of index C_1 under different algorithms

算法	子系统1指标 值 C_1 /p.u.	子系统2指标 值 C_1 /p.u.	子系统3指标 值 C_1 /p.u.
分布式抗差估计	9.92×10^{-5}	1.56×10^{-4}	7.56×10^{-5}
直接分布式估计	5.91×10^{-4}	9.93×10^{-4}	0.20×10^{-2}

表4 不同算法下指标 C_2 的值Table 4 Value of index C_2 under different algorithms

算法	子系统1 指标值 C_2 /%	子系统2 指标值 C_2 /%	子系统3 指标值 C_2 /%
分布式抗差估计	93.931 2	92.252 3	93.387 7
直接分布式估计	55.072 5	49.459 5	35.779 1

从表3、表4可知, 直接进行分布式状态估计的估计效果很差, 而在分布式抗差估计计算中, 坏数据的影响被抑制, 体现了其抗差效果。

图5展示了各子系统的最大状态量变化值随子系统内部计算次数的变化。

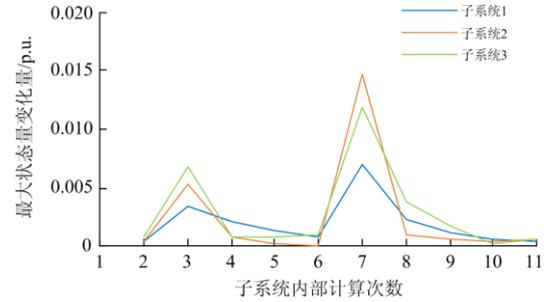


图5 LSE-1 最大状态量变化量的变化

Fig. 5 Evolution of LSE-1 maximum variation of state variables

子系统第一次计算时, 无法得出状态量变化量, 所以在图中没有值。观察上图, parzen 窗宽调整前后的权重值变化较大, 所以形成了图中的“波峰”。计算过程中一共调整了两次窗宽, 每次调整窗宽后子系统均能快速收敛, 说明基于等价权原理构造的不动点迭代求解格式具有不错的收敛性。值得指出, 应用抗差估计方法时, 算法迭代次数将会增多, 但以通信复杂度为代价换取了更好的估计结果。

5.3 算法鲁棒性测试

分布式算法应具有鲁棒性, 即当某子系统发生通信故障而无法参与分布式计算时, 其他子系统仍能够正常进行分布式计算且仍应具有一定的精确度。仍以5.2节互联系统为例进行测试, 观察子系统1在不同外部子系统发生通信故障情况下的分布式状态估计效果。

表5中, 前两项是子系统1电压幅值和集中式计算结果的对比。根据表5可知, 当所有子系统正常参与分布式计算时, 子系统1的结果和集中式计算结果几乎一致, 且估计效果也是最好的。当外部相邻子系统存在通信故障时, 子系统1估计结果将与集

表5 不同外部故障情况下子系统1的结果

Table 5 Results of subsystem 1 under different

外部子系统情况	external fault conditions		
	平均电压幅值 误差/p.u.	最大电压幅值 误差/p.u.	边界状态量 匹配情况
其他子系统都发生通信故障	$2.370 50 \times 10^{-5}$	$1.793 77 \times 10^{-4}$	—
仅子系统2通信故障	$1.332 07 \times 10^{-5}$	$1.773 35 \times 10^{-4}$	和子系统3匹配
仅子系统3通信故障	$1.090 05 \times 10^{-5}$	$1.422 44 \times 10^{-4}$	和子系统2匹配
无子系统通信故障	$8.515 10 \times 10^{-7}$	$4.885 49 \times 10^{-6}$	全匹配

中式计算结果有明显差别,但此时的结果又要略好于外部子系统全部通信故障的情况,而且至少能够保证和相邻正常子系统的边界状态量的匹配。

此外,对8个IEEE118节点系统顺次串接而成的系统进行测试,观察子系统8发生通信故障对其他子系统的影响。

图6的纵坐标是分布式计算(分为子系统8正常和故障两种情况)和集中式计算对比的平均电压幅值差值,其中集中式计算采用全网信息进行计算。从图6可以看出,子系统发生通信故障后,对自身相邻的子系统影响较大,而对其他子系统影响较小,说明子系统通信故障影响的范围较有限,不至于造成太恶劣的影响。

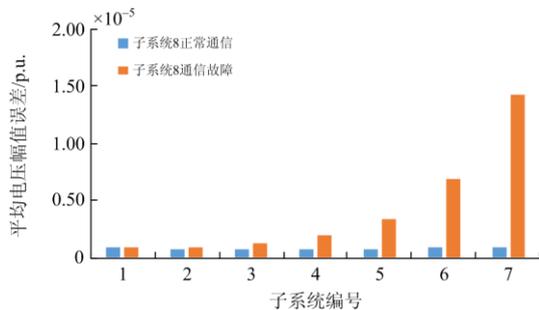


图6 子系统通信故障对其他子系统的影响

Fig. 6 Influence of communication failure of subsystem on other subsystems

6 结论

本文基于双线性状态估计,结合电力系统等值计算的思想实现了分布式状态估计。多子系统算例测试的结果表明,本算法具有很高的计算精度,而且分布式计算只需要进行两次信息交换,通信复杂度很低。与此同时,不用考虑收敛性问题也是一个优势。此外,还基于等价权原理和MES抗差估计实现了分布式抗差估计,算例测试表明,分布式抗差估计结果和集中式抗差估计结果几乎一致,而且具有很好的抗差效果。最后,本分布式算法具有鲁棒性,当某些子系统由于通信故障无法参与分布式计算时,其他子系统仍然可以联合起来进行分布式计算,能够最大限度利用正常子系统的量测信息。同时,一个子系统发生通信故障时的影响范围并不大,不至于造成恶劣的影响。

参考文献

[1] 刘建戈,张鹏宇,姜蒙娜,等. 适应电网运行模式的电力通信管理系统演进分析[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(9): 111-117.

- LIU Jiange, ZHANG Pengyu, JIANG Mengna, et al. Evolution analysis of power communication management system adapted to power grid operation mode[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(9): 111-117.
- [2] 张大波,连帅,陶维青,等. 基于PMU的电网等值在互联网运行可靠性评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 40-47.
- ZHANG Dabo, LIAN Shuai, TAO Weiqing, et al. Application of PMU-based grid equivalent model in operation reliability evaluation of interconnected power grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 40-47.
- [3] 杜祥伟,沈艳霞,李静. 基于模型预测控制的直流微电网混合储能能量管理策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 69-75.
- DU Xiangwei, SHEN Yanxia, LI Jing. Energy management strategy of DC microgrid hybrid energy storage based on model predictive control[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 69-75.
- [4] CUTSEM T V, HORWARD J L, RIBBENS-PAVELLA M. A two-level static state estimator for electric power systems[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1981, PER-1(8): 3722-3732.
- [5] KURZIN M S. Real-time state estimation for large-scale power systems[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, PAS-102(7): 255-263.
- [6] KEKATOS V, GIANNAKIS G B. Distributed robust power system state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1617-1626.
- [7] 陈胜,卫志农,郭晓敏,等. 基于交替方向乘子法的分布式双线性状态估计[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20): 84-90.
- CHEN Sheng, WEI Zhinong, GUO Xiaomin, et al. Distributed bilinear state estimation based on alternating direction method of multipliers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 84-90.
- [8] 刘科研,盛万兴,何开元,等. 基于拉格朗日松弛技术的复杂有源配电网分布式状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 125-132.
- LIU Keyan, SHENG Wanxing, HE Kaiyuan, et al. Distributed state estimation of complex active distribution network based on Lagrange relaxation technique[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 125-132.
- [9] KORRES G N. A distributed multiarea state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 73-84.
- [10] MINOT A, LU Y M, LI N. A distributed Gauss-Newton

- method for power system state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3804-3815.
- [11] CARO E, CONEJO A J, MINGUEZ R. Decentralized state estimation and bad measurement identification: an efficient Lagrangian relaxation approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2500-2508.
- [12] GUO Y, TONG L, WU W C, et al. Hierarchical multi-area state estimation via sensitivity function exchanges[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1): 442-453.
- [13] 张海波, 易文飞. 基于异步迭代模式的电力系统分布式状态估计方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 125-131.
ZHANG Haibo, YI Wenfei. Distributed state estimation method for power system based on synchronous iteration mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 125-131.
- [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 and external network concentration equivalence[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 23-29.
- [15] 王建, 陈颖, 黄少伟, 等. 基于 KKT 条件分解的互联电网分布式状态估计算法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(19): 31-36.
WANG Jian, CHEN Ying, HUANG Shaowei, et al. A distributed state estimation method for interconnected power grid based on decomposition of KKT condition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 31-36.
- [16] 马平川, 沈沉, 陈颖, 等. 基于伪量测型协调变量的分布式状态估计算法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3170-3177.
MA Pingchuan, SHEN Chen, CHEN Ying, et al. Distributed state estimation based on the pseudo-measurement coordination variables[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3170-3177.
- [17] GOMEZ-EXPOSITO A, GOMEZ-QUILES C, JAEN A D L V. Bilinear power system state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1): 493-501.
- [18] KHODAPARAST J, KHEDERZADEH M. Least square and Kalman based methods for dynamic phasor estimation: a review[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 1-18. DOI: 10.1186/s41601-016-0032-y.
- [19] 郭伟, 单渊达. M 估计方法及其在电力系统状态估计中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 26-31.
GUO Wei, SHAN Yuanda. M-estimation and its application in power system state estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 26-31.
- [20] 吴文传, 郭焯, 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.
- [21] 李碧君, 薛禹胜, 顾锦汶, 等. 基于权函数的电力系统状态估计算法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(8): 32-34.
LI Bijun, XUE Yusheng, GU Jinwen, et al. Weight function based power system estimation algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(8): 32-34.
- [22] 张明, 嵇文路, 潘小辉, 等. 基于矩阵变换的双线性 WLAV 状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 1-6.
ZHANG Ming, JI Wenlu, PAN Xiaohui, et al. Bilinear WLAV state estimation based on matrix transformation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 1-6.
- [23] 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 Boming, WU Wenchuan. Solution and performance analysis to a robust state estimation method with exponential objective function[J]. Proceedings of CSEE, 2011, 31(7): 89-95.
- [24] 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.

收稿日期: 2020-10-07; 修回日期: 2021-01-14

作者简介:

王 帅(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统状态估计; E-mail: wsncepu@126.com

张海波(1975—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统调度自动化及电力系统仿真研究。E-mail: zhb@ncepu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)