基于灵敏度分析的多区域互联电力系统状态估计

王 永[1]，郭志忠[1,2]，彭茂君[3]，任江波[4]
(1. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院，黑龙江省哈尔滨市 150001；2. 许继电力科学研究院，北京市 100085)
(3. 北京电力公司，北京市 100031；4. 河北省电力调度中心，河北省石家庄市 050021)

摘要： 研究了多区域互联电力系统的状态估计问题，提出了基于灵敏度分析的互联电力系统的状态估计方法。该方法将互联系统联络线两端子系统状态估计独立计算所得线路功率不匹配量作为各子系统的虚拟变化量测量，基于各子系统量测量、状态量和功率估计值之间的灵敏度关系，计算修正各子系统状态量和功率估计值，迭代求解互联系统状态估计解。仿真试验结果充分说明该状态估计方法计算结果准确、速度快，且在互联系统计算中心无法获得部分子系统数据情况下，能够最大限度地准确给出互联的可观测系统状态估计解。

关键词： 状态估计；多区域互联系统；灵敏度分析；变化量测；加权最小二乘法

中图分类号： TM744；TM732

0 引言

随着电力系统的发展和区域电网互联，多个区域电力系统间能量交换和统一调度需要得到包括多个独立调度中心的广域电力系统的状态估计解。对于大规模互联电力系统，整体式状态估计算法[1-3]存在因量测冗余度较难满足而导致整个系统状态估计无法进行、计算速度慢和无法充分利用各区域系统现有状态估计软硬件条件等不足。

如何在充分利用各区域电力系统调度中心现有状态估计程序和量测配置的前提下，利用较少的数据传输，较快地完成互联系统的状态估计，一直以来受到广泛关注[4-9]。文献[4-6]采用了分层式状态估计的方法，将整个系统的状态估计计算分为 2 层，计算中心将第 1 层的各子系统估计结果和由联络线与边界节点组成的上层系统的量测一同作为量测量，再对上层系统进行一次估计计算，从而得到整个系统估计结果。但以上文献并未考虑 2 层状态估计器在边界节点的估计结果如何协调的问题。文献[7-9]将分布式计算方法引入互联电力系统的状态估计计算。分布式状态估计计算在经济性、可靠性和灵活性等方面具有一定的优越性[7]，相关研究工作也取得了一定的成果，但文中计算相对较复杂，且对于计算环境的要求较高。

本文提出了一种基于灵敏度分析的多区域互联电力系统状态估计方法。各子系统之间没有数据传输，且只需向系统计算中心传输各自的计算结果。互联系统计算中心仅对子系统的计算结果进行迭代修正计算，即使互联系统中部分子系统不可观，计算不受影响，仍然能够准确计算互联的可观测部分系统的状态和功率估计值。

1 互联电力系统状态估计数学模型

分别具有独立状态估计器的区域电力系统之间通过 1 条或多条联络线互相连接形成多区域互联电力系统。子系统状态估计计算时系统拓扑包括与其相连的所有联络线的对端节点。将子系统拓扑中节点划分为内部节点、边界节点及外部节点 3 类，从而各子系统边界节点及联络线将被本系统和其他系统状态估计程序分别计算。本文把 2 次估计的线路功率不匹配量看做虚拟变化量测量[10]，基于各子系统状态量对量测量的灵敏度和功率估计值对状态量的灵敏度矩阵迭代修正子系统状态估计结果。根据 2 次估计的各子系统边界节点状态量计算子系统参考点与互联系统公共参考点之间相角差，得到基于公共参考点的多区域互联系统状态估计结果。

1.1 子系统状态估计模型

对于具有 n_i 个节点和 b_i 条支路的子系统 i，在给定网络接线、支路参数和量测系统的条件下，非线性量测方程如下：

$$\boldsymbol{z}_i = \boldsymbol{h}_i(\boldsymbol{x}_i) + \boldsymbol{v}_i \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{z}_i$ 为 m_i 维量测向量，包含与其他子系统相连的联络线上的线路有功和无功量测量；$\boldsymbol{x}_i$ 为 $2n_i-1$ 维状态向量；$\boldsymbol{h}_i$ 为 m_i 维非线性函数向量；$\boldsymbol{v}_i$ 为 m_i 维量测误差向量。

本文假设各子系统都采用加权最小二乘(WLS)算法，目标函数为：

收稿日期：2007-01-12；修回日期：2007-05-24。

$$J_i(\boldsymbol{x}_i) = (\boldsymbol{z}_i - \boldsymbol{h}_i(\boldsymbol{x}_i))^{\mathrm{T}} \boldsymbol{R}_i^{-1} (\boldsymbol{z}_i - \boldsymbol{h}_i(\boldsymbol{x}_i)) \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{R}_i$ 为 $m_i \times m_i$ 维量测误差方差阵。

设 $\hat{\boldsymbol{x}}_i$ 为使目标函数 $J_i(\boldsymbol{x}_i)$ 达到最小的 $\boldsymbol{x}_i$ 的值。状态估计向量求解的迭代公式[11]为：

$$\hat{\boldsymbol{x}}_i^{(k+1)} = \hat{\boldsymbol{x}}_i^{(k)} + \Delta\hat{\boldsymbol{x}}_i^{(k)} \tag{3}$$

式中：$\Delta\hat{\boldsymbol{x}}_i^{(k)} = (\boldsymbol{H}_i^{\mathrm{T}}(\hat{\boldsymbol{x}}_i^{(k)}) \boldsymbol{R}_i^{-1} \boldsymbol{H}_i(\hat{\boldsymbol{x}}_i^{(k)}))^{-1} \boldsymbol{H}_i^{\mathrm{T}}(\hat{\boldsymbol{x}}_i^{(k)}) \cdot \boldsymbol{R}_i^{-1}(\boldsymbol{z}_i - \boldsymbol{h}_i(\hat{\boldsymbol{x}}_i^{(k)}))$，$\boldsymbol{H}_i(\hat{\boldsymbol{x}}_i^{(k)}) = \left.\dfrac{\partial \boldsymbol{h}_i(\boldsymbol{x}_i)}{\partial \boldsymbol{x}_i}\right|_{\boldsymbol{x}_i = \hat{\boldsymbol{x}}_i^{(k)}}$。

$\Delta\hat{x}_{i,j}^{(k)}$ 为 $\Delta\hat{\boldsymbol{x}}_i^{(k)}$ 的第 j 个分量，当 $\hat{\boldsymbol{x}}_i^{(k)}$ 满足收敛判据 $\max\limits_j |\Delta\hat{x}_{i,j}^{(k)}| < \varepsilon_{xi}$，则为所求得的状态估计向量 $\hat{\boldsymbol{x}}_i$。

1.2 子系统灵敏度分析

完整的状态估计计算过程是根据量测量估计出状态量，再由状态量进一步求得完整的估计值。本节基于 WLS 算法，推导状态量、量测量以及功率估计值之间的灵敏度关系。

第 i 个子系统功率（包括节点注入功率和支路功率）与状态量之间存在如下关系：

$$\boldsymbol{z}_{ai} = \boldsymbol{h}_{ai}(\boldsymbol{x}_i) \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{z}_{ai}$ 为 M_i 维功率向量，功率包括各节点注入功率 $2n_i$ 个和各支路首末端功率 $4b_i$ 个，即 $M_i = 2n_i + 4b_i$；$\boldsymbol{h}_{ai}$ 为功率向量与状态量之间的非线性函数。

设初始量测向量为 $\boldsymbol{z}_{i0}$，初始状态向量为 $\boldsymbol{x}_{i0}$，初始功率向量为 $\boldsymbol{z}_{ai0}$。假设量测向量发生了一个较小的变化 $\Delta\boldsymbol{z}_i$，设状态向量相应发生了一个较小的变化量 $\Delta\boldsymbol{x}_i$，基于 WLS 算法研究 $\Delta\boldsymbol{x}_i$ 与 $\Delta\boldsymbol{z}_i$ 的灵敏度关系。首先对 $\boldsymbol{h}_i(\boldsymbol{x}_i)$ 进行线性化假设，在 $\boldsymbol{x}_{i0}$ 附近将 $\boldsymbol{h}_i(\boldsymbol{x}_i)$ 进行泰勒展开，忽略二次以上非线性项之后，得到：

$$\boldsymbol{h}_i(\boldsymbol{x}_i) \approx \boldsymbol{h}_i(\boldsymbol{x}_{i0}) + \boldsymbol{H}_i(\boldsymbol{x}_{i0}) \Delta\boldsymbol{x}_i \tag{5}$$

将式(5)代入式(2)中，由于 $\boldsymbol{z}_i = \boldsymbol{z}_{i0} + \Delta\boldsymbol{z}_i$，得

$$\begin{aligned} J_i(\boldsymbol{x}_i) = {} & [\Delta\boldsymbol{z}_i + (\boldsymbol{z}_{i0} - \boldsymbol{h}_i(\boldsymbol{x}_{i0})) - \boldsymbol{H}_i(\boldsymbol{x}_{i0})\Delta\boldsymbol{x}_i]^{\mathrm{T}} \cdot \\ & \boldsymbol{R}_i^{-1}[\Delta\boldsymbol{z}_i + (\boldsymbol{z}_{i0} - \boldsymbol{h}_i(\boldsymbol{x}_{i0})) - \\ & \boldsymbol{H}_i(\boldsymbol{x}_{i0})\Delta\boldsymbol{x}_i] \end{aligned} \tag{6}$$

令 $\boldsymbol{L}_i = \Delta\boldsymbol{z}_i + (\boldsymbol{z}_{i0} - \boldsymbol{h}_i(\boldsymbol{x}_{i0}))$，将式(6)展开，并经配方后可以得到：

$$\begin{aligned} J_i(\boldsymbol{x}_i) = {} & \boldsymbol{L}_i^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{R}_i^{-1} - \boldsymbol{R}_i^{-1}\boldsymbol{H}_i(\boldsymbol{x}_{i0})\boldsymbol{F}(\boldsymbol{x}_{i0})\boldsymbol{H}_i^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}_{i0}) \cdot \\ & \boldsymbol{R}_i^{-1})\boldsymbol{L}_i + (\Delta\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{F}(\boldsymbol{x}_{i0})\boldsymbol{H}_i^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}_{i0})\boldsymbol{R}_i^{-1}\boldsymbol{L}_i)^{\mathrm{T}} \cdot \\ & \boldsymbol{F}^{-1}(\boldsymbol{x}_{i0})(\Delta\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{F}(\boldsymbol{x}_{i0})\boldsymbol{H}_i^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}_{i0})\boldsymbol{R}_i^{-1}\boldsymbol{L}_i) \end{aligned} \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{F}(\boldsymbol{x}_{i0}) = (\boldsymbol{H}_i^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}_{i0})\boldsymbol{R}_i^{-1}\boldsymbol{H}_i(\boldsymbol{x}_{i0}))^{-1}$。

式(7)等号后第 1 项与 $\Delta\boldsymbol{x}_i$ 无关。因此，欲使 $J_i(\boldsymbol{x}_i)$ 极小，等号后第 2 项应为 0，从而得到：

$$\begin{aligned} \Delta\boldsymbol{x}_i = {} & \boldsymbol{F}(\boldsymbol{x}_{i0})\boldsymbol{H}_i^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}_{i0})\boldsymbol{R}_i^{-1}\boldsymbol{L}_i = \boldsymbol{F}(\boldsymbol{x}_{i0})\boldsymbol{H}_i^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}_{i0}) \cdot \\ & \boldsymbol{R}_i^{-1}[\Delta\boldsymbol{z}_i + (\boldsymbol{z}_{i0} - \boldsymbol{h}_i(\boldsymbol{x}_{i0}))] \end{aligned} \tag{8}$$

由于真值 $\boldsymbol{x}_{i0}$ 未知，近似用 $\hat{\boldsymbol{x}}_{i0}$ 代替，从而有：

$$\boldsymbol{z}_{i0} - \boldsymbol{h}_i(\boldsymbol{x}_{i0}) \approx \hat{\boldsymbol{z}}_{i0} - \boldsymbol{h}_i(\hat{\boldsymbol{x}}_{i0}) = \boldsymbol{0}$$

因此，状态量对量测量的 $(2n_i - 1) \times m_i$ 维灵敏度矩阵为：

$$\boldsymbol{S}_{x_i z_i} = \boldsymbol{F}(\boldsymbol{x}_{i0})\boldsymbol{H}_i^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}_{i0})\boldsymbol{R}_i^{-1} \tag{9}$$

接下来，为得到功率估计值与状态量之间的灵敏度关系，在 $\boldsymbol{x}_{i0}$ 附近将 $\boldsymbol{h}_{ai}(\boldsymbol{x}_i)$ 进行泰勒展开，忽略非线性项之后，得到：

$$\begin{aligned} \boldsymbol{z}_{ai} \approx {} & \boldsymbol{h}_{ai}(\boldsymbol{x}_{i0}) + \boldsymbol{H}_{ai}(\boldsymbol{x}_{i0})\Delta\boldsymbol{x}_i = \\ & \boldsymbol{z}_{ai0} + \boldsymbol{H}_{ai}(\boldsymbol{x}_{i0})\Delta\boldsymbol{x}_i \end{aligned} \tag{10}$$

于是有：

$$\Delta\boldsymbol{z}_{ai0} = \boldsymbol{H}_{ai}(\boldsymbol{x}_{i0})\Delta\boldsymbol{x}_i \tag{11}$$

因此，功率估计值对状态量的 $M_i \times (2n_i - 1)$ 维灵敏度矩阵为：

$$\boldsymbol{S}_{z_{ai} x_i} = \boldsymbol{H}_{ai}(\boldsymbol{x}_{i0}) \tag{12}$$

1.3 迭代求解

以第 i 个子系统为例，来说明互联系统状态估计的迭代修正计算过程。

设在采样时刻 t_0，各子系统基于各自量测数据 $\boldsymbol{z}_i$，独立进行状态估计，可得到本系统及与其相连的所有联络线的状态量 $\hat{\boldsymbol{x}}_i^{(0)}$ 及功率估计值 $\hat{\boldsymbol{z}}_{ai}^{(0)}$。

互联系统中所有联络线的状态量和线路首末端功率分别被其两端子系统估计器计算得到。设系统 i 通过 l_i 条联络线与其他系统相连，在 t_0 采样时刻各子系统独立状态估计计算结束以后，系统 i 状态估计器计算出的第 m 条联络线首端和末端（分别用 a，b 表示）线路功率表示为 $\hat{P}_{ab,m,i}^{(k)}$，$\hat{Q}_{ab,m,i}^{(k)}$，$\hat{P}_{ba,m,i}^{(k)}$，$\hat{Q}_{ba,m,i}^{(k)}$，其中 k 表示互联系统计算中心迭代修正计算的第 k 次迭代。由于各子系统状态估计结果为互联系统计算中心迭代计算初值，此处 $k=0$，即 $\hat{P}_{ab,m,i}^{(0)}$，$\hat{Q}_{ab,m,i}^{(0)}$，$\hat{P}_{ba,m,i}^{(0)}$，$\hat{Q}_{ba,m,i}^{(0)}$ 为子系统 i 的功率估计值 $\hat{\boldsymbol{z}}_{ai}^{(0)}$ 的相应分量。其他系统估计器计算出的系统 i 的第 m 条联络线首末端线路功率表示为 $\hat{P}_{ab,m,j}^{(k)}$，$\hat{Q}_{ab,m,j}^{(k)}$，$\hat{P}_{ba,m,j}^{(k)}$，$\hat{Q}_{ba,m,j}^{(k)}$。同理，此处 $k=0$。

令联络线两端功率估计值的不匹配量为：

$$\begin{cases} \Delta P_{ab,m}^{(k)} = \hat{P}_{ab,m,j}^{(k)} - \hat{P}_{ab,m,i}^{(k)} \\ \Delta Q_{ab,m}^{(k)} = \hat{Q}_{ab,m,j}^{(k)} - \hat{Q}_{ab,m,i}^{(k)} \\ \Delta P_{ba,m}^{(k)} = \hat{P}_{ba,m,j}^{(k)} - \hat{P}_{ba,m,i}^{(k)} \\ \Delta Q_{ba,m}^{(k)} = \hat{Q}_{ba,m,j}^{(k)} - \hat{Q}_{ba,m,i}^{(k)} \end{cases} \tag{13}$$

本文将式(13)中所示任意联络线首端有功功率估计值的不匹配量与首端有功功率估计值比值的绝对值小于收敛标准 ε 作为互联系统状态估计计算的收敛判据，即

$$\max_{m=1,2,\cdots,l_i} \left| \frac{\Delta P_{ab,m}^{(k)}}{\hat{P}_{ab,m,i}^{(k)}} \right| < \varepsilon \tag{14}$$

如果互联系统收敛条件（式(14)）不满足，则将系统 i 所有联络线的功率估计不匹配量的 1/2 作为系统 i 的变化量测量，且认为除联络线功率量测外

的所有量测量未发生变化,按子系统状态估计器中量测向量中各量测量的顺序排列,可得到子系统 i 的虚拟变化量测向量为:$\Delta \boldsymbol{z}_i^{(k)} = \frac{1}{2}(0,\cdots,\Delta P_{ab,1}^{(k)},\Delta Q_{ab,1}^{(k)},\Delta P_{ba,1}^{(k)},\Delta Q_{ba,1}^{(k)},\cdots,\Delta P_{ab,l_i}^{(k)},\Delta Q_{ab,l_i}^{(k)},\Delta P_{ba,l_i}^{(k)},\Delta Q_{ba,l_i}^{(k)},\cdots,0)^{\mathrm{T}}$。基于式(9)和式(12)的灵敏度矩阵即可得到修正的状态量和功率估计值。状态量和功率估计值迭代公式如下:

$$\begin{cases} \boldsymbol{x}_i^{(k+1)} = \boldsymbol{x}_i^{(k)} + \boldsymbol{S}_{x_i z_i} \Delta \boldsymbol{z}_i^{(k)} \\ \hat{\boldsymbol{z}}_{ai}^{(k+1)} = \hat{\boldsymbol{z}}_{ai}^{(k)} + \boldsymbol{S}_{z_{ai} x_i} \Delta \boldsymbol{x}_i^{(k)} \end{cases} \tag{15}$$

当互联系统中所有联络线上的功率估计值满足式(14)时,互联系统状态估计收敛,得到估计结果。但通过式(15)计算得到的状态量的估计值是分别相对于各自系统参考点的值。

1.4 参考点相角差的计算

互联系统状态估计计算应该给出基于系统公共参考点的全系统状态估计结果。本文使用图 1 所示 3 区域互联电力系统说明多区域互联电力系统中各子系统参考点相对于系统参考点的相角差 δ_i 的计算,图中各子系统的参考点分别为 Ref1,Ref2 和 Ref3。

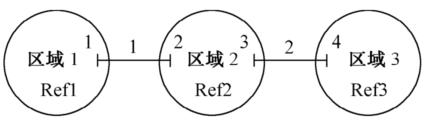

图 1 3 区域电力系统
Fig. 1 Three areas power system

互联系统状态估计迭代计算结束后,分别由子系统 1 和子系统 2 的状态估计器所计算得到的节点 2 的电压相角为 $\theta_{2,\mathrm{ref1}}$ 和 $\theta_{2,\mathrm{ref2}}$。节点 2 电压相量的实际相角为 θ_2,参考点 1、参考点 2 的相角分别为 θ_{ref1} 和 θ_{ref2},各相角之间的关系如图 2 所示。

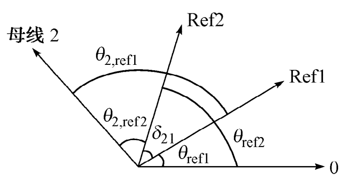

图 2 参考点相位
Fig. 2 Phasor diagram of reference points

从图 2 可以看出:

$$\begin{cases} \delta_{21} = \theta_{\mathrm{ref2}} - \theta_{\mathrm{ref1}} = \theta_{2,\mathrm{ref1}} - \theta_{2,\mathrm{ref2}} \\ \theta_{\mathrm{ref1}} = \theta_{\mathrm{ref2}} - (\theta_{2,\mathrm{ref1}} - \theta_{2,\mathrm{ref2}}) \end{cases} \tag{16}$$

从而对于系统 2 中所有电压及电流相量,如果以系统 1 的参考点作为参考点,只要将相角加上参考点相角差 δ_{21} 即可:

$$\theta_{i,\mathrm{ref1}} = \theta_i - \theta_{\mathrm{ref1}} = \theta_{i,\mathrm{ref2}} + (\theta_{2,\mathrm{ref1}} - \theta_{2,\mathrm{ref2}}) \tag{17}$$

同理可以得到子系统 3 和子系统 2 之间的参考点角度差 δ_{32},如果指定系统参考点就是子系统 1 的参考点,则基于系统参考点的全系统状态即可确定。

如果系统 1 有 m 个边界节点通过联络线与系统 2 相连,则可通过平均值来计算子系统间的参考点相角差:

$$\delta_{21} = \frac{\sum_{i=1}^{m} (\theta_{i,\mathrm{ref1}} - \theta_{i,\mathrm{ref2}})}{m} \tag{18}$$

式(16)~式(18)是基于 Ref1 的相角超前于 Ref2 的相角前提下推导所得,但完全适用于滞后的情况。各子系统按上述方法计算出来的本系统参考点与系统参考点之间相角差的精度受较多因素的影响:①联络线上功率量测的精度;②联络线模型的精度;③相连区域之间的联络线数量;④各区域之间连接的情况。

联络线的量测和线路等值模型越精确,所计算出来的相角差也就越精确。2 个区域之间互联线路较多时,根据每条线路计算出的相角差取平均值,所得结果精度好于仅依据 1 条联络线的计算结果。与系统参考点所在的子系统相隔的区域越多,计算本子系统参考点与系统参考点之间相角差需要经过其他子系统转换的次数增多,误差也相应增大。

另外,本节对于参考点相角差的推导完全基于联络线的一端节点进行,为了提高精度、减少误差,还可以利用联络线另一端点进行同样计算,并取 2 次计算的均值作为最终结果。

2 互联系统状态估计计算流程

t_0 采样时刻多区域互联电力系统状态估计计算过程如图 3 所示。

各子系统的状态估计完全独立,可充分利用子系统调度中心现有状态估计程序,在各自状态估计程序后加入基于本系统状态估计算法的灵敏度矩阵计算模块即可,不需要改动原有状态估计程序。互联系统计算中心迭代修正计算程序只需要获得 t_0 采样时刻各可观测子系统的估计结果和灵敏度矩阵相应元素,根据互联的可观测子系统之间联络线数量和连接情况,即可进行迭代修正计算。单次迭代运算的运算量仅取决于联络线数量,而多区域互联电力系统的联络线总数相对较少,互联系统计算中心的迭代修正计算速度非常快。

3 算例分析

本文以 IEEE 118 节点网络为例,在 MATLAB 7.1 平台上对所提出的基于灵敏度分析的多区域互

联电力系统状态估计方法进行仿真模拟计算。分别对各子系统对于互联系统计算中心完全可观测(条件1)和部分子系统不可观测(条件2)2种情况进行仿真计算,并与互联系统使用传统的WLS整体式状态估计算法进行比较。

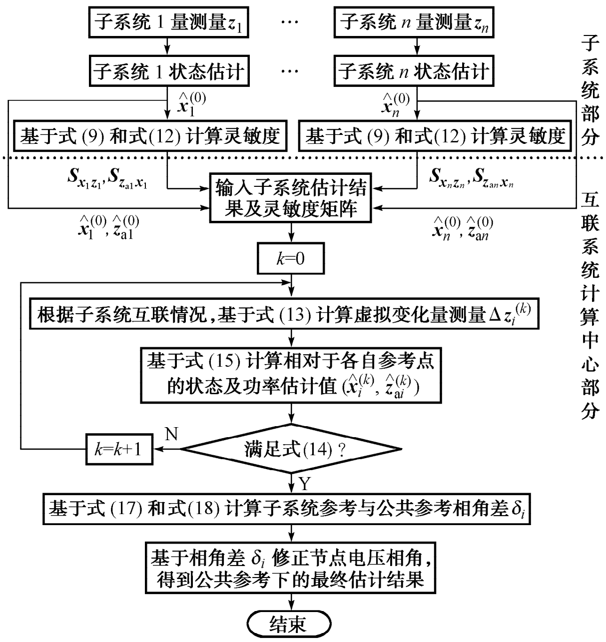

图3　多区域互联系统状态估计流程
Fig. 3　State estimation flow chart of multi-area interconnected power system

试验系统子区域的划分如图4所示。

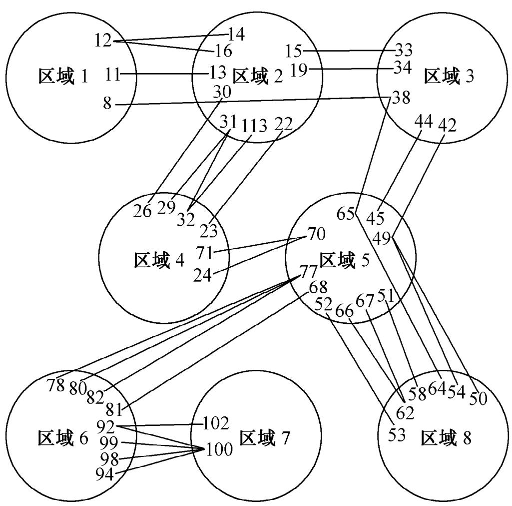

图4　IEEE 118节点系统子区域划分示意
Fig. 4　Subsystem division of IEEE 118-bus system

仿真中真值由潮流计算得到,量测值通过在真值上注入正态分布的量测噪声获得,量测噪声均值为0,标准差为真值的1%。各联络线的首末端都配置功率量测,各子系统统一采用WLS估计算法。

表1为本文所提出的状态估计方法(算法1)和整体式WLS状态估计(算法2)所计算出的所有节点幅值和相角及所有支路线路首端有功功率的估计值与各自真值之间绝对误差的最大值和平均值。在计算中心可获得所有子系统数据的情况下,2种估计方法计算精度非常接近。在计算中心无法获得部分子系统(本例中为子系统1和子系统7)数据的情况下,由于计算中心无法获得2个子系统的量测数据,整个互联系统处于不可观测状态,无法进行互联系统的整体式WLS状态估计。而本文方法并不要求全系统完全可观测,能够最大限度地计算出其他可观测互联系统的状态,且计算精度和正常情况时整体式WLS状态估计算法计算精度仍然非常接近。与所有子系统完全可观测情况的本文算法计算精度相比,由于计算中无法考虑到互联的不可观系统对可观系统的影响,计算精度略有微小差别。表1的比较结果充分说明了本文方法的有效性和计算的准确性,具有一定工程实用意义。

表1　2种算法计算精度比较
Table 1　Computational precision comparison between two algorithms

条件	算法	电压误差		相角误差/rad		线路首端有功误差	
		最大	平均	最大	平均	最大	平均
1	1	0.001 82	0.000 42	0.002 85	0.000 58	0.029 38	0.002 78
	2	0.001 61	0.000 29	0.002 04	0.000 63	0.029 93	0.002 79
2	1	0.001 82	0.000 45	0.002 74	0.000 61	0.026 63	0.002 60

表2为不考虑各子系统与互联系统计算中心之间数据信息通信延迟时间的情况下,各仿真算例计算耗时情况和迭代次数。由于节点数量的减少,各子系统独立进行状态估计的时间大大减少,且本文所提出的估计算法中互联系统计算中心的迭代修正计算部分的单次迭代计算的计算量只与为数较少的联络线总数有关,耗时非常小。因此,本文算法2个部分计算耗时不到整体式状态估计计算耗时的1/10,计算速度非常快。

表2　2种算法计算时间和迭代次数比较
Table 2　Comparison of computation time and iteration for two algorithms

算法	条件	最大节点数	子系统最大耗时/ms	计算中心耗时/ms	总耗时/ms	迭代次数
2	1	118		1 766.98	1 766.98	4
1	1	34	94.294	26.124	120.418	10
1	2	34	94.294	17.885	112.179	3

4　结语

本文研究了多区域互联电力系统的状态估计问题,提出了基于灵敏度分析的多区域互联电力系统

状态估计方法。基于 WLS 算法推导子系统状态量、量测量和功率估计值之间的灵敏度关系。通过各子系统独立状态估计器求取的状态估计结果及状态量对量测量灵敏度矩阵和功率估计值对状态量灵敏度矩阵，迭代修正求解全系统状态估计解。仿真计算充分说明了本文所提出的多区域互联电力系统状态估计方法有效、准确、速度快，具有工程实用性。在部分子系统不可观测的情况下，能够最大限度地准确给出互联的可观测系统所有状态及功率估计值，具有较好的抗灾特性。

参考文献

[1] 丁军策，蔡泽祥，王克英. 极坐标下的快速等效电流量测变换状态估计方法. 电力系统自动化，2005，29(5)：31-33.
DING Junce, CAI Zexiang, WANG Keying. Fast state estimation method in polar coordinates based on equivalent current measurement transformation. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(5): 31-33.

[2] 李强，周京阳，于尔铿，等. 基于向量量测的电力系统线性状态估计. 电力系统自动化，2005，29(18)：24-28.
LI Qiang, ZHOU Jingyang, YU Erkeng, et al. Power system linear state estimation based on phasor measurement. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(18): 24-28.

[3] 李强，周京阳，于尔铿，等. 基于混合量测的电力系统状态估计混合算法. 电力系统自动化，2005，29(19)：31-35.
LI Qiang, ZHOU Jingyang, YU Erkeng, et al. A hybrid algorithm for power system state estimation based on PMU measurement and SCADA measurement. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 31-35.

[4] ABDEL-RAHMAN K, MILI L, PHADKE A, et al. Internet based wide area information sharing and its roles in power system state estimation// Proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting: Vol 2, Jan 28-Feb 1, 2001, Columbus, OH, USA: 470-475.

[5] 王力哲，王心丰，范正刚，等. 电力系统中厂站/全网双层状态估计. 电网技术，2001，25(2)：6-9.
WANG Lizhe, WANG Xinfeng, FAN Zhenggang, et al. Hierarchical state estimation of plants/whole network for power systems. Power System Technology, 2001, 25(2): 6-9.

[6] ZHAO Liang, ABUR A. Multiarea state estimation using synchronized phasor measurements. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(2): 611-617.

[7] 王耀瑜，余贻鑫. 分布式能量管理系统(DEMS)状态估计分布式异步迭代算法. 中国电机工程学报，1996，15(3)：160-164.
WANG Yaoyu, YU Yixin. A distributed asynchronous state estimation algorithm for distributed energy management system (DEMS). Proceedings of the CSEE, 1996, 15(3): 160-164.

[8] EBRAHIMIAN R, BALDICK R. State estimation distributed processing. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(4): 1240-1246.

[9] 刘辉乐，刘天琪，彭锦新. 基于 PMU 的分布式电力系统动态状态估计新算法. 电力系统自动化，2005，29(4)：34-39.
LIU Huile, LIU Tianqi, PENG Jinxin. New distributed power system dynamic state estimation algorithm based on PMU. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(4): 34-39.

[10] 任江波，于尔铿，郭志忠，等. 变化量测触发方式下的状态估计算法分析. 电力系统自动化，2007，31(1)：53-56.
REN Jiangbo, YU Erkeng, GUO Zhizhong, et al. Analysis on state estimation algorithm under changed measurement triggering mode. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1): 53-56.

[11] 于尔铿，王世缨，相年德，等. 电力系统状态估计. 北京：水利电力出版社，1985.
YU Erkeng, WANG Shiying, XIANG Niande, et al. Power system state estimation. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1985.

王 永(1981—)，男，博士研究生，研究方向为电力系统状态估计。E-mail：powerfactor@163.com

郭志忠(1961—)，男，教授，博士生导师，研究方向为电力系统分析与控制、电力市场、光电互感器、数字化电力系统等。

彭茂君(1981—)，女，硕士，研究方向为电力系统状态估计、电力系统负荷预测。

State Estimation of a Multi-area Interconnected Power System Based on Sensitivity Analysis

WANG Yong[1], *GUO Zhizhong*[1,2], *PENG Maojun*[3], *REN Jiangbo*[4]

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(2. Xuji Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China)

(3. Beijing Electric Power Corporation, Beijing 100031, China)

(4. Hebei Electric Power Dispatch Center, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: The state estimation in a multi-area interconnected power system is investigated and a new approach based on sensitivity analysis is presented. The state estimators of subsystems at both ends of tie lines carry out individual calculation. And the mismatch power obtained is taken as the virtual variation of measurement. Based on the relations between the sensitivity among state variables, measurements and power estimates, the state vector and power estimates of the interconnected power system are resolved in the computation center by iteration. Test results show that the calculation is very accurate and rapid. Even with part of the subsystem data unavailable, this approach can still provide the state estimation solution for the interconnected power system composed of the observable subsystems.

Key words: state estimation; multi-area interconnected system; sensitivity analysis; changed measurements; weighted least squares (WLS) method