

## 改进的零注入约束双线性 WLAV 状态估计

胥峥<sup>1</sup>, 周洪益<sup>1</sup>, 沈甜甜<sup>2</sup>, 钱婧<sup>2</sup>, 卫志农<sup>2</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司盐城供电分公司, 江苏 盐城 224000;

2. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:**实际电网中存在许多注入功率严格为零的零注入节点,零注入节点的注入功率量测为绝对准确的量测量,但这些测量并没有得到充分利用。因此,通过注入功率为零的节点建立功率约束方程作为对状态估计的约束条件,再对极坐标系下的电力系统非线性量测方程进行两步线性化,得到计及零注入约束的双线性抗差状态估计方程,用约束方程对第一步线性过程结果进行修正。最终结果证明该算法在提高估计精度的基础上,不会增加系数矩阵的阶数,且改进后的算法仍然拥有较高的计算效率。国内某实际省网以及选取的 IEEE 标准系统的仿真结果证明了该方法能有效提高计算精度和计算效率。

**关键词:**状态估计;双线性;零注入;等式约束

中图分类号:TM711

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)04-0106-06

### 0 引言

电力系统状态估计<sup>[1-5]</sup>能利用能量管理系统收集到的数据,估算出更加精确的状态量以及系统所处的实时运行状态。实际电力系统中存在大量理论上吸收功率和发出功率恒定为零的节点,称为零注入节点<sup>[6-8]</sup>。该类节点注入功率量测实际上为绝对准确的量测量,有助于提高状态估计的计算精度。

目前使用的大权重法<sup>[1-3]</sup>视零注入节点的注入功率为精确的量测量,并对其赋以较大的权重,但会导致信息矩阵条件数过大,计算结果无法保证收敛等问题。将零注入功率方程作为等式约束条件和目标函数联立,采用拉格朗日乘子法进行求解<sup>[9-11]</sup>也是一种处理零注入节点的方法,例如 Hachtel 增广矩阵法<sup>[12]</sup>和 Cholesky 分解法<sup>[13]</sup>等。此外,文献[6-8]提出了一种修正牛顿法,用电力系统网络方程对零注入约束进行处理,在每次迭代中,零注入约束都会对零注入节点的状态量进行修正。加权最小绝对值(weighted least absolute value, WLAV)是一种可以计及等式约束的抗差状态估计方法<sup>[14-16]</sup>,但采用非线性内点法会导致计算效率较低。文献[17-18]提出双线性抗差状态估计法,即引入中间变量,将非线性量测方程两步线性化,提高了计算效率,但计算精度略有降低。

文中首先给出了对电力系统状态估计的量测方程进行分步线性化后的线性方程;然后将文献[6-8]中的修正思想引入到双线性抗差状态估计

中,对第一步线性过程的计算结果进行修正;最后对国内某实际省网以及选取的 IEEE 标准系统进行算例分析,验证了双线性抗差状态估计的实用性。

### 1 双线性 WLAV 状态估计

电力系统状态估计的主要目标是由从电力系统中实时采集的量测向量估计电力系统当前的运行状态,即电力系统各个节点的电压相角和幅值大小,其中量测量包括节点注入有功量测、节点注入无功量测、各支路的潮流量测以及节点电压幅值量测。电力系统状态估计的量测方程可表示为:

$$z = g(\mathbf{x}) + \mathbf{E} \quad (1)$$

式中: $z$ 为量测量,即 $m$ 维列向量; $\mathbf{x}$ 为状态量,即 $n$ 维列向量( $m > n$ ); $g(\mathbf{x})$ 为非线性函数; $\mathbf{E}$ 为量测误差噪声向量。

对量测方程进行两步线性化处理,在第一步线性化后求解新引入的中间变量,再进行第二步线性化,非线性方程(1)线性化后被分解为<sup>[17-18]</sup>:

$$z = \mathbf{A}\mathbf{y} + \mathbf{E} \quad (2)$$

$$\mathbf{y}' = g(\mathbf{y}) \quad (3)$$

$$\mathbf{y}' = \mathbf{B}\mathbf{x}' + \mathbf{E}_y' \quad (4)$$

$$\mathbf{x} = t(\mathbf{x}') \quad (5)$$

式中: $\mathbf{y}$ 为第一步线性化中新引入的中间变量; $\mathbf{y}'$ 为变量代换后的中间变量; $\mathbf{x}'$ 为第二步线性化中新引入的中间变量; $g(\mathbf{y})$ 和 $t(\mathbf{x}')$ 为非线性函数; $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}$ 为线性化后常系数雅可比矩阵; $\mathbf{E}_y'$ 为中间变量 $\mathbf{y}'$ 的误差噪声向量。

文中选取节点电压量测、节点功率量测以及支路潮流量测这3种量测类型作为双线性抗差的状态

估计量测量,在极坐标系下,其计算方程为:

$$\begin{cases} O_i = V_i^2 \\ P_i = \sum_{j \in i} (V_i V_j \cos \theta_{ij} G_{ij} + V_i V_j \sin \theta_{ij} B_{ij}) \\ Q_i = \sum_{j \in i} (-V_i V_j \cos \theta_{ij} B_{ij} + V_i V_j \sin \theta_{ij} G_{ij}) \\ P_{ij} = -V_i V_j \cos \theta_{ij} g_{ij} - V_i V_j \sin \theta_{ij} b_{ij} + V_i^2 g_{ij} \\ Q_{ij} = V_i V_j \cos \theta_{ij} b_{ij} - V_i V_j \sin \theta_{ij} g_{ij} - V_i^2 (b_{ij} + y_c) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $V_i$ 为节点*i*的电压幅值; $P_i$ 为节点*i*的注入有功功率; $Q_i$ 为节点*i*的注入无功功率; $P_{ij}$ 、 $Q_{ij}$ 分别为支路*ij*上节点*i*流向节点*j*的有功和无功功率; $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$ 分别为节点*i*和节点*j*之间的互电导和互电纳; $g_{ij}$ 、 $b_{ij}$ 、 $y_c$ 分别为支路*ij*的 $\pi$ 形等效电路串联电导、串联电纳和对地电纳; $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ ,为支路两端相角差。设中间变量 $\mathbf{y}$ 如式(7)所示:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} O_i \\ M_{ij} \\ N_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_i^2 \\ V_i V_j \cos \theta_{ij} \\ V_i V_j \sin \theta_{ij} \end{bmatrix} \quad (7)$$

代入式(6)可得:

$$\begin{cases} V_i^2 = O_i \\ P_i = \sum_{j \in i, j \neq i} (M_{ij} G_{ij} + N_{ij} B_{ij}) + O_i G_{ii} \\ Q_i = \sum_{j \in i, j \neq i} (-M_{ij} B_{ij} + N_{ij} G_{ij}) - O_i B_{ii} \\ P_{ij} = -M_{ij} g_{ij} - N_{ij} b_{ij} + O_i g_{ij} \\ Q_{ij} = M_{ij} b_{ij} - N_{ij} g_{ij} - O_i (b_{ij} + y_c) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $G_{ii}$ 、 $B_{ii}$ 分别为节点*i*的自电导和自电纳。

由式(8)可得 $\mathbf{A}$ 矩阵各量测量对各中间变量求偏导所得值如表1所示。

表1 常系数矩阵 $\mathbf{A}$

中间变量	$\partial V_i^2 / \partial y$	$\partial P_i / \partial y$	$\partial Q_i / \partial y$	$\partial P_{ij} / \partial y$	$\partial Q_{ij} / \partial y$
$y = M_{ij}$	0	$G_{ij}$	$-B_{ij}$	$-g_{ij}$	$b_{ij}$
$y = N_{ij}$	0	$B_{ij}$	$G_{ij}$	$-b_{ij}$	$-g_{ij}$
$y = O_i$	1	$G_{ij}$	$-B_{ij}$	$g_{ij}$	$-b_{ij} - y_c$

式(3)中进行变量代换的函数为:

$$\mathbf{y}' = g(\mathbf{y}) = \begin{bmatrix} \ln O_i \\ \ln(M_{ij}^2 + N_{ij}^2) \\ \arctan(N_{ij}/M_{ij}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \ln V_i \\ 2 \ln V_i + 2 \ln V_j \\ \theta_i - \theta_j \end{bmatrix} \quad (9)$$

将式(2)所得结果 $\mathbf{y}$ 代入式(9)中即可求得 $\mathbf{y}'$ 。令中间变量 $\mathbf{x}'$ 为:

$$\mathbf{x}' = \begin{bmatrix} \ln V \\ \boldsymbol{\theta} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{V}$ 为节点电压幅值向量; $\boldsymbol{\theta}$ 为节点电压相角向量。在变量 $\mathbf{y}'$ 与 $\mathbf{x}'$ 之间建立第二步线性方程:

$$\mathbf{y}' = \mathbf{B}\mathbf{x}' + \mathbf{E}'_y = \begin{bmatrix} 2|\mathbf{S}^T| & 0 \\ \mathbf{S}_r^T & 0 \\ 0 & 2\mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ln V \\ \boldsymbol{\theta} \end{bmatrix} + \mathbf{E}'_y \quad (11)$$

式中: $\mathbf{I}$ 为单位矩阵; $\mathbf{S}$ 为节点关联矩阵; $\mathbf{S}_r$ 为删除平衡节点后的节点关联矩阵。由下式对 $\mathbf{x}'$ 进行变量代换求出 $\mathbf{x}$ :

$$\mathbf{x} = t(\mathbf{x}') = \begin{bmatrix} e^{\ln V} \\ \boldsymbol{\theta} \end{bmatrix} \quad (12)$$

## 2 改进的零注入约束双线性抗差状态估计

由于计及零注入量测,双线性模型中式(2)的量测量 $\mathbf{z}$ 也包含零注入节点的注入有功和无功功率,其真实值为0。分别用 $\mathbf{z}_B$ 和 $\mathbf{z}_N$ 表示零注入节点注入功率量测和其他量测,同时将状态量 $\mathbf{y}$ 中的元素分为与零注入量测相关性高的部分 $\mathbf{y}_B$ ,以及与零注入量测相关性低的部分 $\mathbf{y}_N$ ,并对 $\mathbf{y}$ 中的元素进行排序,上半为 $\mathbf{y}_B$ ,下半为 $\mathbf{y}_N$ ,为了确保等式成立, $\mathbf{C}$ 矩阵也需按列进行相应地排序,排序后得到的量测方程为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{z}_B \\ \mathbf{z}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{BB} & \mathbf{A}_{BN} \\ \mathbf{A}_{NB} & \mathbf{A}_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{y}_B \\ \mathbf{y}_N \end{bmatrix} + \mathbf{E} \quad (13)$$

由零注入量测严格为零可得:

$$\mathbf{A}_{BB}\mathbf{y}_B + \mathbf{A}_{BN}\mathbf{y}_N = \mathbf{0} \quad (14)$$

因此,零注入约束可表示为:

$$\mathbf{y}_B = -\mathbf{A}_{BB}^{-1}\mathbf{A}_{BN}\mathbf{y}_N \quad (15)$$

则计及零注入约束的WLAV状态估计模型可表示为:

$$\begin{cases} \min \mathbf{w}^T(\mathbf{l} + \mathbf{u}) \\ \text{s.t. } \mathbf{z}_N - [\mathbf{A}_{NB} \quad \mathbf{A}_{NN}] \begin{bmatrix} \mathbf{y}_B \\ \mathbf{y}_N \end{bmatrix} + \mathbf{l} - \mathbf{u} = \mathbf{0} \\ \mathbf{y}_B = -\mathbf{A}_{BB}^{-1}\mathbf{A}_{BN}\mathbf{y}_N \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\mathbf{w}$ 为权重向量; $\mathbf{l}$ 和 $\mathbf{u}$ 为松弛变量,值大于等于0。式(16)中包含两条等式约束,但两条等式约束的作用并不相同,第一条等式约束在构造拉格朗日函数时须考虑在内,第二条等式约束在每次迭代中单独计算,用于对迭代结果中的 $\mathbf{y}_B$ 进行修正。基于以上前提,由式(16)中的目标函数和等式约束列出相应的拉格朗日函数为:

$$\mathbf{L} = \mathbf{w}^T(\mathbf{l} + \mathbf{u}) - \boldsymbol{\eta}^T \left( \mathbf{z}_N - [\mathbf{A}_{NB} \quad \mathbf{A}_{NN}] \begin{bmatrix} \mathbf{y}_B \\ \mathbf{y}_N \end{bmatrix} + \mathbf{l} - \mathbf{u} \right) - \boldsymbol{\alpha}^T \mathbf{l} - \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{u} \quad (17)$$

式中: $\boldsymbol{\alpha}$ 、 $\boldsymbol{\beta}$ 、 $\boldsymbol{\eta}$ 为不同的拉格朗日乘子。

由式(17)的 KKT (karush-kuhn-tucker) 条件可以获得如下 KKT 方程:

$$\begin{cases} L_y = -[A_{NB} & A_{NN}]^T \eta = 0 \\ L_l = w - \eta - \alpha = 0 \\ L_u = w + \eta - \beta = 0 \\ L_\eta = z_N - [A_{NB} & A_{NN}] \begin{bmatrix} y_B \\ y_N \end{bmatrix} + l - u = 0 \\ L_\alpha^\mu = CL_e - \mu e = 0 \\ L_\beta^\mu = D U e - \mu e = 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $C, D, L, U$  分别为以  $\alpha, \beta, l, u$  为主对角线元素的对角阵;  $\mu$  为扰动因子;  $e$  为单位列向量。

对式(18)应用泰勒展开,忽略二阶项,可得 KKT 方程的修正方程:

$$-[A_{NB} \quad A_{NN}]^T d\eta = -L_y \quad (19)$$

$$-[A_{NB} \quad A_{NN}] dy + dl - du = -L_\eta \quad (20)$$

$$-d\eta - d\alpha = -L_l \quad (21)$$

$$-d\eta - d\alpha = -L_u \quad (22)$$

$$C dl + L d\alpha = -L_\alpha^\mu \quad (23)$$

$$D du - U d\beta = -L_\beta^\mu \quad (24)$$

取初值  $\eta = 0, \alpha = \beta = w$  则  $L_l = L_u = 0$ , 式(21)~式(24)可化为:

$$\begin{cases} d\alpha = -d\eta \\ d\beta = d\eta \\ dl = -C^{-1}(-L d\eta + L_\alpha^\mu) \\ du = -D^{-1}(U d\eta + L_\beta^\mu) \end{cases} \quad (25)$$

将式(25)代入式(19)~式(20),可得到修正方程的矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} 0 & -A'^T \\ -A' & C^{-1}L + D^{-1}U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dy \\ d\eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_y \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (26)$$

其中:

$$A' = [A_{NB} \quad A_{NN}] \quad (27)$$

$$\gamma = -L_\eta + C^{-1}L_\alpha^\mu - D^{-1}L_\beta^\mu \quad (28)$$

求解修正方程(26)可得到中间变量  $y$  的修正量,从而求得  $y$  的值,  $y$  值由  $y_B$  和  $y_N$  两部分组成。求解第二条等式约束即式(15),并对由式(26)求出的  $y$  进行修正,即用式(15)求得  $y_B$  取代式(26)求出的  $y$  中的与零注入量测相关度高的部分  $y_B$ ,即用零注入约束修正状态估计的结果,每次迭代都要进行修正。迭代求解可得到最终的  $y$  值,并将  $y$  中元素的顺序恢复到重新排序之前的状态。

第二步线性化中不计及第一步等式约束的影响,在得到中间变量的结果  $y$  后按照双线性抗差状态估计的第二步线性化过程求解  $x$  即可。

综上,改进的零注入约束双线性抗差状态估计

需要对中间变量以及系数矩阵等进行排序,过程相对复杂,其估计流程如图1所示,具体如下:

(1) 程序初始化,读入量测数据和系统参数值,设置状态量初值;

(2) 取中间变量  $y = [V_i^2 \quad V_i V_j \cos \theta_{ij} \quad V_i V_j \sin \theta_{ij}]^T$ ;

(3) 根据电网参数及拓扑结构,计算双线性模型中式(2)和式(4)中的常系数矩阵  $A$  和  $B$ ;

(4) 将量测量  $z$  分为两部分  $z_B$  和  $z_N$ ,  $z_B$  和  $z_N$  分别表示零注入量测和非零注入量测,同时将状态量  $y$  的元素进行排序分为  $y_B$  和  $y_N$ ,为了确保等式成立,  $A$  矩阵也需按列进行相应地排序;

(5) 计算对偶间隙  $G_{gap}$ ,如果门限值大于对偶间隙,则转步骤(8),否则进行步骤(6);

(6) 求解式(26)得到中间变量  $y$  的值;

(7) 求解式(15)得到  $y_B$  的值,对  $y$  进行修正,并转步骤(5);

(8) 将  $y$  中元素的排序恢复到排序前的状态即  $y = [V_i^2 \quad V_i V_j \cos \theta_{ij} \quad V_i V_j \sin \theta_{ij}]^T$ ;

(9) 求解第二步线性 WLAV 模型,并经过第二步非线性变换得到状态量  $x$  的值;

(10) 输出结果,程序结束。

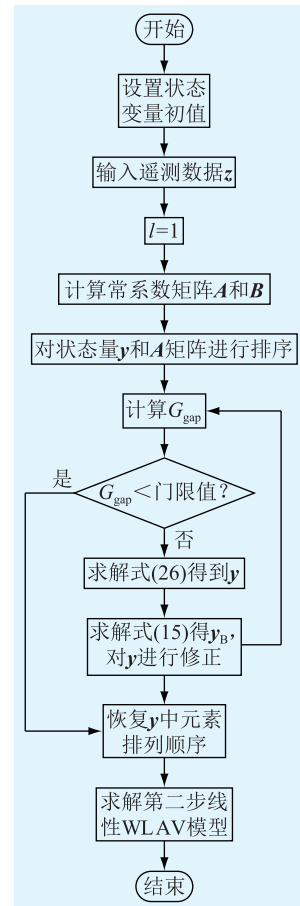


图1 算法流程

Fig.1 Algorithm flow chart

### 3 算例测试

针对文中提出的改进的零注入约束双线性抗差状态估计算法的估计精度及计算效率等问题,对包含 IEEE 14、IEEE 57、IEEE 118 节点系统和华东某省网(含 736 个节点)等多个节点系统算例,进行算例测试分析。通过修改大权重法算例数据中注入节点功率为零的量测量的权重来重新进行量测配置,其权重数值取为其余节点功率量测权重的 10 倍,剩余量测量的权重保持不变。为表述方便,后文用方法 I 表示双线性抗差状态估计;方法 II 表示零注入节点取大权重用双线性抗差状态估计求解的方法;文中方法即改进的零注入约束双线性抗差状态估计;方法 III 表示基于原对偶内点法的抗差状态估计方法。

电力系统的量测值为实际潮流计算所得真值加上满足正态分布的随机误差,节点电压量测的误差标准差为 0.005,功率量测的误差标准差为 0.01,权重取方差的倒数。量测量主要包括节点功率量测量,支路的潮流量测量(只取单侧,763 节点系统部分支路取双侧)和节点电压量测量。各个方法采用同样的收敛判据。

#### 3.1 精度测试

文中方法分别与方法 II 和方法 III 进行计算精度对比研究,因为采用大权重法的双线性抗差状态估计相比于不采用大权重法的双线性抗差状态估计在计算精度方面更具优势,所以文中不再对方法 I 的计算精度进行测试。首先对算例测试的系统量测量的冗余度进行分析,具体如表 2 所示。

表 2 各节点系统的量测冗余度  
Table 2 Measurement redundancy of each node system

系统	无零注入	含零注入
IEEE 14	2.333 3	2.444 4
IEEE 57	2.044 2	2.309 7
IEEE 118	2.472 3	2.634 0
实际省网	2.236 6	2.804 9

表 2 各个算例中含零注入节点的量测冗余度均高于不含零注入节点的量测冗余度,且量测冗余度皆为 2~3,较为接近实际系统。为了得到更加精确的状态估计结果,文中所有测试算法均采用含零注入节点的量测进行算例测试。

图 2—图 5 为方法 II 和文中方法对各节电系统的估计结果。2 种方法都考虑了零注入约束,由图 2—图 5 可以看出,对比仅给零注入量测赋以大权重

而不对算法进行修改的方法 II,直接用零注入约束对估计结果进行修正的文中方法的估计精度有明显提升。其中 IEEE 14 及 IEEE 57 节点系统,零注入节点较少,方法 II 和文中方法都是基于双线性抗差状态估计方法进行估算的,所以估计精度差距不大;IEEE 118 节点及实际省网的估计结果显示,文中方法的平均误差及最大误差皆小于方法 II,估计精度明显提高。

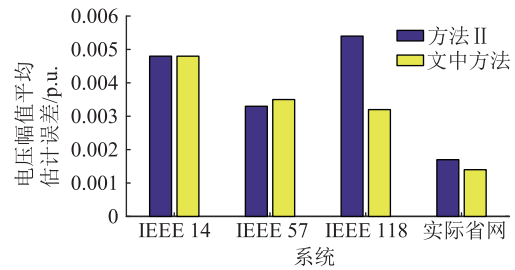


图 2 各节电系统的电压幅值平均估计误差

Fig.2 The average estimation error of voltage amplitude of each power-saving system

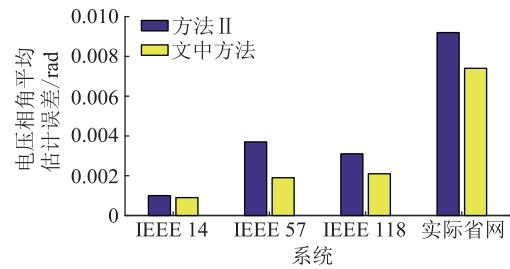


图 3 各节电系统的电压相角平均估计误差

Fig.3 The average estimation error of voltage phase Angle for each power-saving system

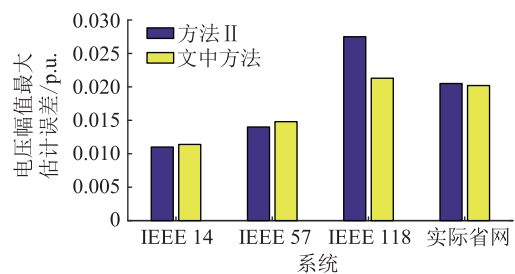


图 4 各节电系统的电压幅值最大估计误差

Fig.4 The maximum estimation error of voltage amplitude of each power-saving system

为进一步验证文中方法对不同比例坏数据的抗差效果,对 IEEE 118 节点系统构造了坏数据比例分别为 0%~10% 的 11 个算例组,文中方法与方法 3 仿真对比如图 6 所示。和方法 III 相比,文中方法虽然在计算精度上略微有所降低,但处理不同比例坏数据时的计算精度都能够保持在同一个量级上,满足工程应用的需求。

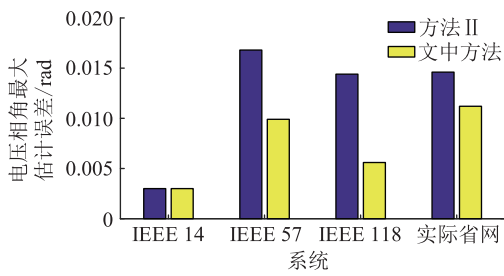


图5 各节电系统的电压相角最大估计误差

Fig.5 The maximum estimation error of voltage phase angle for each power-saving system

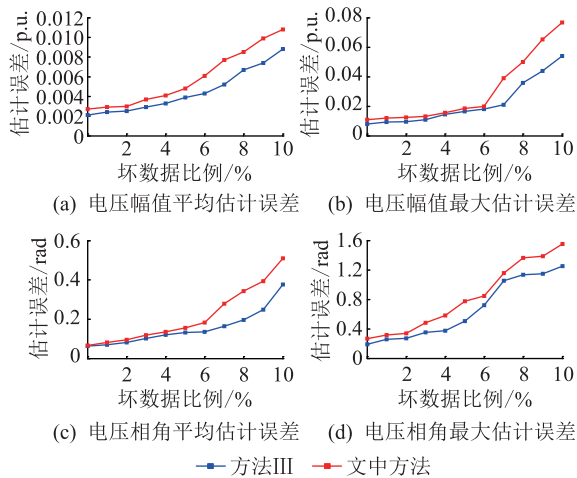


图6 IEEE118节点系统仿真结果

Fig.6 IEEE118 node system simulation results

### 3.2 效率测试

为了测试文中算法的计算效率,对方法 I,方法 II,文中方法及方法 III 的计算效率进行比较测试,选取的算例包括一实际省网以及 IEEE 标准系统,测试结果如表 3 所示。

表3 4种方法的迭代次数和计算时间

Table 3 The number of iterations and calculation time of the four methods

系统	项目	方法 I	方法 II	文中方法	方法 III
IEEE14	迭代次数	2+3	2+3	2+3	12
	时间/s	0.005 8	0.007 6	0.008 2	0.041 9
IEEE57	迭代次数	2+3	13+15	2+3	16
	时间/s	0.011 4	0.035 2	0.014 3	0.139 6
IEEE118	迭代次数	15+3	16+15	16+3	18
	时间/s	0.057 9	0.083 3	0.063 6	0.716 9
实际省网	迭代次数	21+3	23+3	21+3	20
	时间/s	0.389 4	0.724 1	0.420 2	5.362 1

表3显示,文中方法保留了双线性抗差算法计算时间短、迭代次数少的优点,计算效率远高于非线性内点法;由于考虑了零注入约束,增加了一定的计算量,因而对比不考虑零注入约束的双线性抗

差状态估计,计算效率有所降低;不过,虽然考虑了零注入约束,但其作用是修正第一步线性过程的估计结果,不会增加系数矩阵的阶数,对计算量的影响较低,测试结果也表明文中方法的计算效率明显高于会增加系数矩阵阶数的大权重法。

## 4 结论

文中提出了一种处理零注入约束的方法,用零注入约束来修正第一步线性方程的结果,通过对 IEEE 14、IEEE 57、IEEE 118 节点系统以及华东某省网实际系统进行算例测试,验证了该方法的实用性和有效性,得到以下结论:

(1) 文中方法在模型推导上相对复杂,对程序的修改也较多,但不会造成系数矩阵阶数的增加,而零注入约束的阶数较少,即使考虑了零注入约束,也不会对状态估计的计算效率产生较大影响;

(2) 文中方法充分利用了电力系统中绝对准确的零注入节点功率注入量测,提高了状态估计精度,计算精度优于大权重法;

(3) 文中方法具有良好的抗差性能,与基于原对偶内点法的抗差状态估计相比,处理不同比例坏数据时的计算精度能够保持同一量级。

### 参考文献:

- [1] SCHWEPPE F C, WILDES J. Power system static-state estimation, part I: exact model[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1970, 89(1): 120-125.
- [2] SCHWEPPE F C, ROM D B. Power system static-state estimation, part II: approximate model [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1970, 89(1): 125-130.
- [3] SCHWEPPE F C. Power system static-state estimation, part III: implementation [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1970, 89(1): 130-135.
- [4] 于尔铿. 电力系统状态估计 [M]. 北京: 水利水电出版社, 1985.  
YU Erkeng. Power system estimation [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1985.
- [5] HOLTEN L, GJELSVIK A, AAM S, et al. Comparison of different methods for state estimation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(4): 1798-1806.
- [6] 郭焯, 张伯明, 吴文传, 等. 直角坐标下含零注入约束的电力系统状态估计修正牛顿法 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 96-100.  
GUO Ye, ZHANG Boming, WU Wenchuan, et al. Power system state estimation solution with zero injection constraints using modified Newton method [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 96-100.
- [7] 郭焯, 吴文传, 张伯明, 等. 极坐标下含零注入约束的电力系统状态估计的修正牛顿法与快速解耦法 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22): 113-117.

- GUO Ye, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Power system state estimation solution with zero injection constraints using modified Newton method and fast decoupled method in polar coordinate[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(22):113-117.
- [8] GUO Ye, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. An efficient state estimation algorithm considering zero constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3):2651-2659.
- [9] ASCHMONET F C, PETERSON N M, ADRIAN E C. State estimation with equality constraints [C] // Proceedings 10th PICA Conference Toronto, Canada, 1977:427-430.
- [10] WU F F, LIU W H E, LUN S M. Observability analysis and bad data processing for state estimation with equality constraints [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(2):541-548.
- [11] 杜正春, 牛振勇, 方万良. 基于分块 QR 分解的一种状态估计算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8):50-55.  
DU Zhengchun, NIU Zhenyong, FANG Wanliang, et al. A block QR based power system state estimation algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8):50-55.
- [12] GJELSVIK A, AAM S, HOLTEN L. Hachtel's augmented matrix method—a rapid method improving numerical stability in power system static state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(11):2987-2993.
- [13] KORRES G N. A robust algorithm for power system state estimation with equality constraints [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(3):1531-1541.
- [14] 颜全椿, 王志农, 徐泰山, 等. 基于主导与非主导参数的非线性加权最小绝对值参数估计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(20):71-76.  
YAN Quanchun, WEI Zhinong, XU Taishan, et al. Nonlinear weighted absolute least value parameter estimation based on dominant and non-dominant parameter [J]. Automation of Electric Power System, 2013, 37(20):71-76.
- [15] RAMIREZ J M, BAROCIO E E. Solving state estimation in power system by an interior point method [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2000, 22(5):355-365.
- [16] WEI Hua, SASAK H, KUBOKAWA J, et al. An interior point method for power system weighted nonlinear  $L_1$  norm static state estimation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(2):617-623.
- [17] 厉超, 王志农, 倪明, 等. 基于变量代换内点法的加权最小绝对值抗差状态估计[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(6):48-52, 106.  
LI Chao, WEI Zhinong, NI Ming, et al. WLAV robust state estimation based on variable substitution interior point method [J]. Automation of Electric Power System, 2015, 39(6):48-52, 106.
- [18] LI Chao, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Bilinear WLAV power system state estimation based on interior point method [J]. 2014 International Conference on Power System Technology (Powercon 2014), 2014:158-163.

#### 作者简介:



胥峥

胥峥(1986),男,硕士,工程师,从事电力系统稳定与控制、新能源并网技术等方面的研究工作(E-mail:1799738565@qq.com);

周洪益(1983),男,硕士,高级工程师,从事电网规划技术等方面的研究工作;

沈甜甜(1993),女,硕士,从事输电网状态估计方面的研究工作。

## Modified bilinear WLAV state estimation with zero injections

XU Zheng<sup>1</sup>, ZHOU Hongyi<sup>1</sup>, SHEN Tiantian<sup>2</sup>, QIAN Qiang<sup>2</sup>, WEI Zhinong<sup>2</sup>

(1. Yancheng Power Supply Company of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Yancheng 224000, China;

2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** There are many zero injection nodes with zero injection power in the actual power grids, and the injection power of zero injection nodes is measured as absolute accurate measurement, but these measurements are not fully utilized. In the state estimation, the result of the first step linear process of the bilinear WLAV state estimation is modified by the zero injection constraint, which not only improves the estimation accuracy, but also does not increase the order of the coefficient matrix, and the improved algorithm still has a higher computational efficiency. Simulation results based on the IEEE standard systems and a real provincial network verify the effectiveness of the proposed method in improving the computation accuracy and computing efficiency.

**Keywords:** state estimation; bilinear; zero injection; equality constraints

(编辑 方晶)