

一种新的分布式电力系统状态估计算法

李阳林¹, 卫志农², 万军彪¹

(1. 江西省电力科学研究院, 江西 南昌 330006; 2. 河海大学电气工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 随着电力系统的发展, 区域电网互联, 形成了规模更大的系统。为了适应这一趋势, 电力系统状态估计应采用分布式算法。在配置少量 PMU 的基础上, 将分区后的边界等式约束条件通过拉格朗日乘子计入整体目标函数, 将分布式状态估计的问题转化为一个带等式约束的最优化问题, 实现了电力系统状态估计的分布式计算。该算法不仅提高了状态估计的速度, 而且可在不必改动原有状态估计模块的基础上, 很容易地加入等式约束的修正模块。最后通过 IEEE14 节点和 IEEE30 节点系统的模拟仿真, 验证了该算法的有效性和优越性。

关键词: 电力系统; 状态估计; 等式约束; 分布式处理; 相量量测单元

A new algorithm for the distributed state estimation of power systems

LI Yang-lin¹, WEI Zhi-nong², WAN Jun-biao¹

(1. Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330006, China;

2. School of Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: With the development of power system, power networks have become very large through interconnected local networks. The distributed parallel state estimation algorithm of power systems is used to accommodate to this development. In the paper, equality constraints after networks distributed are included into objective function with Lagrange multiplier based on PMUs, so the problem of the distributed state estimation is changed into optimization problem with equality constraints, realized the distributed parallel state estimation algorithm of power systems indeed. This algorithm not only improves the calculating speed of state estimation, but also can easy add equality constraints into the conventional state estimation program without changing the mode of state estimation. At last, the results of IEEE14 and IEEE30 test systems demonstrates its advantage.

Key words: power system; state estimation; equality constraints; distributed processing; phase measurement unit(PMU)

中图分类号: TM744

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)20-0013-04

0 引言

随着电力系统的发展, 区域电网互联, 形成了规模更大的系统。我国将逐步实现全国联网, 但各区域电网相对独立, 且有各自相对独立的调度中心。对于如此庞大的系统, 过去的状态估计算法因没有考虑分区的特点而维数过大, 不易获得满足系统可观性的足够信息而不再适用。为了适应这种分区管理模式, 电力系统状态估计必须采用分布式算法。各区相对独立地实现状态估计, 不仅可以加快计算速度、提高状态估计精度, 而且便于实施和管理。早期的状态估计并行算法主要集中在分层估计上^[1,2], 这种只有一个中心控制节点的分层估计算法受到“瓶颈”和可靠性问题的影响, 随后又出现了一些新的方法^[3~5]。本文提出了一种新的分布式电力系统状态估计算法, 该算法一方面通过配置少量的 PMU 实现各区参考节点的转化, 另一方面将分区后

的边界等式约束条件通过拉格朗日乘子计入整体目标函数, 将分布式状态估计问题转化为一个带等式约束的最优化问题, 实现了区域之间的解耦。该算法不仅提高了状态估计的速度, 而且可在不必改动原有状态估计模块的基础上, 很容易地加入等式约束的修正模块, 有较强的实用性。

1 电力系统的分区

以图 1 所示的 2 个相邻子系统 A、B 为例来说明分布式状态估计模型^[6]。

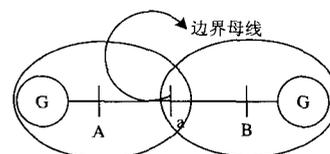


图 1 相邻系统 A 和 B

Fig.1 Adjacent system A and B

如图 1 所示, 对系统分区主要考虑边界母线 a 的处理。采用如图 2 所示的方法, 设想在 a 中间存在零阻抗支路, 将边界母线 a 分成 a 和 a', 线路上有潮流 P_a, Q_a , 电压 $V_a, V_{a'}$ 。将零支路阻抗切断, 就实现了 A,B 两系统的分割。

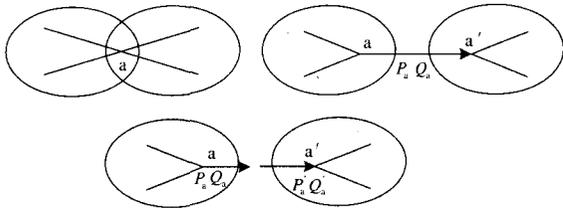


图 2 边界母线 a 的处理

Fig.2 Method of handling border bus a

由分区的过程可知, 下面的式子需成立:

$$\begin{cases} V_a = V_{a'} \\ \theta_a = \theta_{a'} \end{cases} \quad (1)$$

在划分区域时边界母线数量要尽量少, 并假设区域内搭接点无注入量测量。若节点有注入量测量, 则应采用一无注入的虚拟节点与实际节点相连, 通过一条零阻抗支路将实际节点划分到搭接点外^[7]。

由以上的分区过程发现, 边界母线等式成立的条件是应以同一参考节点(全网的参考节点)为参考。但实现分区后, 每个子系统都有自己的参考母线, 故式(1)中电压相角相等的条件在局部参考母线条件下不再成立。为此引入 G 变量, 以实现参考节点的转化^[8]。

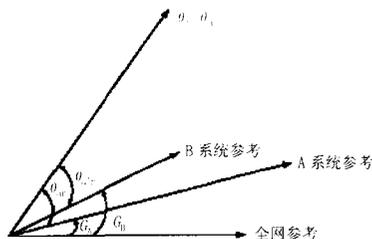


图 3 全网参考和各子系统参考节点的相量示意图
Fig.3 Relation of global reference and local reference

由图 3 可知, 以各子系统为参考节点的相邻系统的边界母线电压相角应进行如下转化:

$$G_A + \theta_{ar} = G_B + \theta_{a'r} \quad (2)$$

PMU 可测得节点电压的相角, 即电压相角可作为量测量, 而且其精度较高^[9,10]。因此, 可在各子系统的参考节点处配置 PMU, 通过其量测值来确定各子系统的 G, 实现各子系统相角与全系统的参考节点的转化。

2 分布式状态估计算法

分区后, 基于加权最小二乘法的分布式状态估计问题就变成了一个带等式约束的最优化问题。假设系统被分成了 k 个区。

约束条件可写成如下矩阵形式:

$$c(x) = Ax = 0 \quad (3)$$

其中: A 为 $l \times (n+l)$ 维矩阵, 其非零元素是 1 或 -1, l 为边界节点的数目, 注意边界节点要重复计及 1 次, x 为 $(n+l) \times 1$ 维状态变量矩阵。

故目标函数可表述为:

$$\min \left\{ J(x) = \sum_{i=1}^k J_i(x) = \sum_{i=1}^k [Z_i - h_i(x)]^T R_i^{-1} [Z_i - h_i(x)] \right\}$$

S.t. $c(x) = 0$ (4)

其中: 目标函数中边界节点是重叠的。

对于以上等式约束的极值可通过拉格朗日多项式进行求解, 极值函数可表示为:

$$L(x) = J(x) + \lambda^T c(x) \quad (5)$$

式中: $L(x)$ 为等式约束下的目标函数; λ 为 l 维约束条件向量。

根据极值求解步骤, 可得极值函数的矩阵表达式为:

$$\begin{bmatrix} H^T R^{-1} H & C^T \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^T R^{-1} \Delta z \\ -\Delta c \end{bmatrix} \quad (6)$$

或
$$\begin{cases} H^T R^{-1} H \Delta x + C^T \lambda = H^T R^{-1} \Delta z \\ C \Delta x = -\Delta c \end{cases} \quad (7)$$

式中: C 为 $l \times (n+l)$ 维矩阵, 且有 $C = \frac{\partial c(x)}{\partial x}$; $-\Delta c$ 边界条件的残差矢量。

对矩阵 x 中的元素按区编号为:

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_k]^T$$

相应地有 $A = [A_1, A_2, \dots, A_k]$, 其中 A_i 为 $l_i \times n_i$ 维矩阵, $i = 1, 2, \dots, k$ 。(数字下标 i 代表第 i 区的参数, 以下类同。)

假设分区后各区之间相互没有联系, 则可将矩阵 H 分区解耦为如下形式:

$$H = \frac{\partial h(x)}{\partial x} = \begin{bmatrix} H_1 & & & \\ & H_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & H_k \end{bmatrix}$$

式中: H_i 为 $m_i \times n_i$ 维矩阵, $i = 1, 2, \dots, k$;

$C = \frac{\partial c(x)}{\partial x} = [A_1, A_2, \dots, A_k]$, 相应的残差矢量也

可分区写为: $\Delta \mathbf{z} = [\Delta \mathbf{z}_1, \Delta \mathbf{z}_2, \dots, \Delta \mathbf{z}_k]^T$ 。

由此, 式(7)中的第一个式子就可分区解耦为:

$$\begin{cases} \mathbf{H}_1^T \mathbf{R}_1^{-1} \mathbf{H}_1 \Delta \mathbf{x}_1 + \mathbf{A}_1^T \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{H}_1^T \mathbf{R}_1^{-1} \Delta \mathbf{z}_1 \\ \mathbf{H}_2^T \mathbf{R}_2^{-1} \mathbf{H}_2 \Delta \mathbf{x}_2 + \mathbf{A}_2^T \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{H}_2^T \mathbf{R}_2^{-1} \Delta \mathbf{z}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{H}_k^T \mathbf{R}_k^{-1} \mathbf{H}_k \Delta \mathbf{x}_k + \mathbf{A}_k^T \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{H}_k^T \mathbf{R}_k^{-1} \Delta \mathbf{z}_k \end{cases} \quad (8)$$

对于区域 i 而言, 与区域 i 相关的边界条件残差矢量只与本区域的边界节点有关, 所以也可将式(7)的第二个式子分区解耦为:

$$\begin{cases} \mathbf{A}_1 \Delta \mathbf{x}_1 = -\Delta \mathbf{c}_1 \\ \mathbf{A}_2 \Delta \mathbf{x}_2 = -\Delta \mathbf{c}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{A}_k \Delta \mathbf{x}_k = -\Delta \mathbf{c}_k \end{cases} \quad (9)$$

其中: $-\Delta \mathbf{c}_i$ 为 i 区域边界节点残差矢量, $i=1, 2, \dots, k$ 。

由式(8)、(9)可得到如下分区解耦的形式:

$$\begin{cases} \mathbf{H}_i^T \mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{H}_i \Delta \mathbf{x}_i + \mathbf{A}_i^T \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{H}_i^T \mathbf{R}_i^{-1} \Delta \mathbf{z}_i \\ \mathbf{A}_i \Delta \mathbf{x}_i = -\Delta \mathbf{c}_i \end{cases} \quad (10)$$

其中: $i=1, 2, \dots, k$ 。

从式(10)可看出各区可独立地进行状态估计, 区域之间唯一交换的数据为 $-\Delta \mathbf{c}_i$ 。下面以 i 区为例来说明求解步骤^[11,12]。

当网络可观时, $\mathbf{H}_i^T \mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{H}_i$ 的逆矩阵存在, \mathbf{A}_i 矩阵的秩等于边界节点的数目, 其行向量必线性无关, 因此 $\mathbf{A}_i [\mathbf{H}_i^T \mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{H}_i]^{-1} \mathbf{A}_i^T$ 的逆矩阵必然存在。根据以上说明可通过式(10)消去中间变量 $\boldsymbol{\lambda}$, 有:

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{x}_i &= [\mathbf{H}_i^T \mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{H}_i]^{-1} \mathbf{H}_i^T \mathbf{R}_i^{-1} \Delta \mathbf{z}_i - \\ &[\mathbf{H}_i^T \mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{H}_i]^{-1} \mathbf{A}_i^T [\mathbf{A}_i [\mathbf{H}_i^T \mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{H}_i]^{-1} \mathbf{A}_i^T]^{-1} \times \\ &(\mathbf{A}_i [\mathbf{H}_i^T \mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{H}_i]^{-1} \mathbf{H}_i^T \mathbf{R}_i^{-1} \Delta \mathbf{z}_i + \Delta \mathbf{c}_i) \end{aligned} \quad (11)$$

定义:

$$\Delta \mathbf{x}_{i1} = [\mathbf{H}_i^T \mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{H}_i]^{-1} \mathbf{H}_i^T \mathbf{R}_i^{-1} \Delta \mathbf{z}_i \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{x}_{i2} &= [\mathbf{H}_i^T \mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{H}_i]^{-1} \mathbf{A}_i^T [\mathbf{A}_i [\mathbf{H}_i^T \mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{H}_i]^{-1} \mathbf{A}_i^T]^{-1} \times \\ &(\mathbf{A}_i [\mathbf{H}_i^T \mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{H}_i]^{-1} \mathbf{H}_i^T \mathbf{R}_i^{-1} \Delta \mathbf{z}_i + \Delta \mathbf{c}_i) \end{aligned} \quad (13)$$

则有: $\Delta \mathbf{x}_i = \Delta \mathbf{x}_{i1} - \Delta \mathbf{x}_{i2}$ (14)

假如已计算出 $\Delta \mathbf{x}_{i1}$, 且有 $\mathbf{x}_{i1} = \mathbf{x}_{i0} + \Delta \mathbf{x}_{i1}$, \mathbf{x}_{i0} 表

示每次迭代的初值。对 $\Delta \mathbf{c}_i$ 进行泰勒展开:

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{c}_i(\mathbf{x}_0) &= \Delta \mathbf{c}_i(\mathbf{x}_{i0} + \Delta \mathbf{x}_{i1} - \Delta \mathbf{x}_{i2}) = \\ &\Delta \mathbf{c}_i(\mathbf{x}_{i1}) - \mathbf{A}_i \Delta \mathbf{x}_{i2} \end{aligned} \quad (15)$$

根据式(12)、(15), 则式(13)变为:

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{x}_{i2} &= [\mathbf{H}_i^T \mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{H}_i]^{-1} \mathbf{A}_i^T [\mathbf{A}_i [\mathbf{H}_i^T \mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{H}_i]^{-1} \mathbf{A}_i^T]^{-1} \cdot \\ &\Delta \mathbf{c}_i(\mathbf{x}_{i1}) \end{aligned} \quad (16)$$

然后利用式(16)的计算结果去修正式(14), 可得:

$$\Delta \mathbf{x}_i' = \mathbf{x}_{i1} - \Delta \mathbf{x}_{i2} \quad (17)$$

这样, 就可得到独立子区的带等式约束的状态估计模型:

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{x}_i^{(kk)} = [\mathbf{H}_i^T \mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{H}_i]^{-1} \mathbf{H}_i^T \mathbf{R}_i^{-1} \Delta \mathbf{z}_i(\mathbf{x}_i^{(kk)}) \\ \mathbf{x}_i^{(kk+1)} = \mathbf{x}_i^{(kk)} + \Delta \mathbf{x}_i^{(kk)} \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{x}_i^{(kk)} = [\mathbf{H}_i^T \mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{H}_i]^{-1} \mathbf{A}_i^T [\mathbf{A}_i [\mathbf{H}_i^T \mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{H}_i]^{-1} \mathbf{A}_i^T]^{-1} \cdot \\ \Delta \mathbf{c}_i(\mathbf{x}_i^{(kk+1)}) \\ \mathbf{x}_i^{(kk+1)} = \mathbf{x}_i^{(kk+1)} - \Delta \mathbf{x}_i^{(kk)} \end{cases} \quad (19)$$

其中: kk 代表迭代次数, $i=1, 2, \dots, k$ 。

假设 ε_x 为状态变量的收敛判据, ε_r 为边界节点残差的门槛值。其具体的算法流程为:

- (1)置初值 $\mathbf{x}_i^{(0)}$, 迭代次数 $kk=0$ 。
- (2)根据约束条件确定矩阵 \mathbf{A}_i , 并置最大误差为 0 和 $\Delta \mathbf{c}_i(\mathbf{x}_i^{(0)})=0$ 。
- (3)计算 $[\mathbf{H}_i^T \mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{H}_i]$ 、 $\mathbf{A}_i [\mathbf{H}_i^T \mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{H}_i]^{-1} \mathbf{A}_i^T$ 和残差 $\Delta \mathbf{z}(\mathbf{x}_i^{(kk)})$ 。
- (4)利用式(18)计算 $\Delta \mathbf{x}_i^{(kk)}$, $\mathbf{x}_i^{(kk+1)}$, 最大误差为 $\max |\Delta \mathbf{x}_i^{(kk)}|$ 。
- (5)根据相邻区域边界节点信息确定边界节点残差矢量 $\Delta \mathbf{c}_i(\mathbf{x}_i^{(kk+1)})$, 并判断 $\max |\Delta \mathbf{c}_i(\mathbf{x}_i^{(kk+1)})|$ 是否小于 ε_r , 若是, 转至下一步; 否则, 利用式(19)计算 $\Delta \mathbf{x}_i^{(kk)}$, $\mathbf{x}_i^{(kk+1)}$, 并计算最大误差。
- (6)判断最大误差是否小于 ε_x , 若是, 则结束; 否则 $kk=kk+1$, 转至步骤(3)。

3 算例仿真

本文对 IEEE 14 和 IEEE 30 节点系统进行了模拟仿真计算。两个系统分别分为 2 和 3 个子系统, 各子系统的参数如表 1 所示。

表 1 IEEE 节点系统分区表

Tab.1 Decomposition details of the IEEE-bus test system

IEEE 节点系统	区域	节点数	边界节点数	支路数	冗余度
IEEE 14	1	5	2	7	2.2
节点	2	11	2	14	2.2
IEEE 30	1	8	2	10	2.2
节点	2	14	3	17	2.2
	3	12	3	14	2.2

模拟仿真过程中记录下各区每次迭代所需时间和边界节点残差矢量值,将每次迭代所需时间累加得到总的运行时间。图 4 和图 5 分别给出了 IEEE14 节点系统中 4 号边界节点和 IEEE 30 节点系统中 6 号边界节点残差矢量的变化趋势。由于边界节点残差矢量初值取为零,所以从图中可看出边界节点残差先有一个增加然后再逐渐收敛至精度要求范围之内。

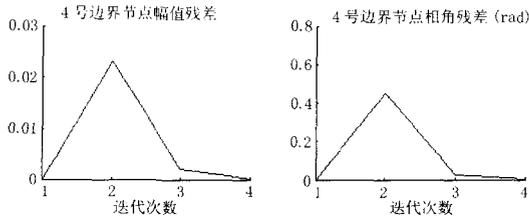


图 4 IEEE14 节点系统中 4 号边界节点残差的变化趋势
Fig.4 The movement uptrend of boundary node 4 in IEEE14 node network

为了验证本文算法的性能,用传统的整体式状态估计算法和普通的分区算法^[3]与本文算法进行比较,结果如表 2 所示。

表 2 IEEE 节点系统下各算法性能比较结果

Tab.2 The comparative result of properties obtained by the different algorithms(IEEE node network)

IEEE 节点系统	算法	运行时间/s	迭代次数	J(x)	协方差矩阵平均值
IEEE-14 节点	本文算法	0.3836	4/4	3.1919	0.3598
	普通算法	0.3625	3/3	/6.9350	/0.3912
	普通算法			3.9170/7.4230	0.3901/0.4076
	整体算法	0.7172	4	9.5258	0.3958
IEEE-30 节点	本文算法	0.7834	5/5	5.1400/9.7977	0.4367/0.4802
	普通算法	0.7568	3/4	/8.8976	/0.4564
	普通算法			5.5561/10.3591	0.4439/0.4932
	整体算法	1.3131	4	21.8646	0.4796

注:“3/4/4”分别表示各个子区的数值。

从表 2 可看出,采用分区算法可明显地提高估计的速度,与普通的分区算法比较,本文算法由于

计及约束条件迭代次数略有增加,但估计精度得到了提高。

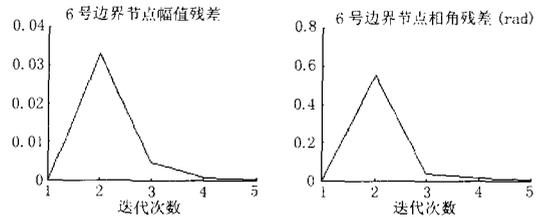


图 5 IEEE30 节点系统 6 号边界节点残差的变化趋势
Fig.5 The movement uptrend of boundary node 6 in IEEE30 node network

4 结论

本文把分区后的约束条件通过拉格朗日乘子计入目标函数,将分布式状态估计问题转变为一个带等式约束的最优化问题,从而实现了电力系统状态估计的分布式计算。该算法明显提高了状态估计的计算速度,适用于大规模的系统。另外,该算法可在不必改动原有状态估计模块的基础上,很容易地加入等式约束的修正模块,有较强的实用性。

参考文献

- [1] Th. Van Cutsem. A Two-Level State Estimation for Electric Power Systems[J]. IEEE Trans on PAS, 1981, 100(8): 3722-3732.
- [2] Kurzyn M S. Real-Time State Estimation for Large-Scale Power Systems[J]. IEEE Trans on PAS, 1983, 102(7):2055- 2063.
- [3] 邱家驹.分布式状态估计[J].电力系统自动化,1988, 12(6):35-42.
- [4] 韩富春,任先成.电力系统状态估计的分布式并行处理[J].太原理工大学学报,2003,34(6):664-667.
- [5] 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[J].电力系统自动化,2005,29(4): 34-39.
- [6] LIU Hui-le,LIU Tian-qi,PENG Jin-xin.New Distributed Power System Dynamic State Estimation Algorithm Based on PMU[J].Automaton of Electric Power Systems,2005,29(4):34-39.
- [6] Ebrahimian R, Baldick R. State Estimation Distributed Processing[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000,15(4): 1240-1246.

(下转第 22 页 continued on page 22)

- mination of Modal Content and Equivalent Models Measured Power System Response[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991,6(3): 1062-10 68.
- [5] Grund C E,Paserba J J,Hauer J F,et al.Comparison of Prony and Eigenanalysis for Power System Control Design[J] IEEE Trans on Power Systems,1993,8(3): 964-971.
- [6] Trudnowski D J,Smith J R,Short T R,et al.An Application of Prony Methods in PSS Design for Multimachine Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems,1991,6(1): 118-126.
- [7] Bounou M,Lefebvre S, Malhame R P. A Spectral Algorithm for Extracting Power System Modes from Time Recordings[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992,7(2):665-671.
- [8] 刘红超, 李兴源. 基于Prony辨识的交直流并联输电系统直流阻尼控制[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 54-57.
LIU Hong-chao,LI Xing-yuan. Study of DC Damping Control in AC/DC Transmission Systems Based on Prony Method[J]. Proceedings of the CSEE,2004,22(7):54-57.
- [9] 肖晋宇, 谢小荣, 胡志祥. 基于在线辨识的电力系统广域阻尼控制[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(24): 22-27.
XIAO Jin-yu,XIE Xiao-rong,HU Zhi-xiang. Power Systems Wide-area Damping Control Based on Online System Identification[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(7):22-27.
- [10] 丁军策, 蔡泽祥, 王克英. 基于广域测量系统的状态估计研究综述[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(7): 98-103.
DING Jun-ce, CAI Ze-xiang, WANG Ke-ying. An Overview of State Estimation Based on Wide-area Measurement System[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(7):98-103.
- [11] 丁军策, 蔡泽祥, 王克英. 基于广域测量系统的混合量测状态估计算法[J]. 中国电机工程学报, 2006,26(2): 58-62
DING Jun-ce, CAI Ze-xiang, WANG Ke-ying. Mixed Measurements State Estimation Based on WAMS[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(2): 58-62.
- [12] 菊平, 谢欢, 孟远景. 基于广域测量信息的在线辨识低频振荡[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 56-60.
JU Ping, Xie Huan, MENG Yuan-jing. On Line Identification of Low-frequency Oscillation Based on Wide-area Measurements[J]. Proceedings of the CSEE, 2005,25(22): 56-60.
- [13] 李大虎, 曹一家. 基于模糊滤波和Prony算法的低频振荡模式在线辨识算法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 14-19.
LI Da-hu,CAO Yi-jia. An Online Identification Method for Power System Low frequency Oscillation Based on Fuzzy Filtering and Prony Algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(1):14-19.
- [14] 刘豹. 现代控制理论[M]. 北京: 机械工业出版社,2002.
- [15] 张明友, 吕明, 等. 近代信号处理理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社,2005.
- [16] 黄甫堪, 陈建文. 现代数字信号处理[M]. 北京: 电子工业出版社,2003.
-
- 收稿日期: 2007-05-14; 修回日期: 2007-06-12
作者简介:
陈树恒(1974-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail:chenshuheng_scu@163.com
李兴源(1945-), 男, 教授, 博士生导师, 中国电机工程学会理事, IEEE 高级会员, 从事电力系统稳定与控制方面的研究工作。
-
- (上接第 16 页 continued from page 16)
- [7] Monticelli A, Garcia A. Modeling Zero Impedance Branches in Power System State Estimation[J]. IEEE Trans on power Systems, 1991,6(4):1561-1570.
- [8] Contreras J,Losi A,Russo M et al. Simulation and Evaluation of Optimization Problem Solutions in Distributed Energy Management Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems ,2002,17(1):1257-1262.
- [9] 郑相华, 米增强, 赵洪山, 等. 基于PMU的状态估计研究[J]. 继电器, 2004,32(17):16-19.
ZHENG Xiang-hua, MI Zeng-qiang, ZHAO Hong-shan et al. Research on State Estimation Based on PMU[J]. Relay, 2004,32(17):16-19.
- [10] 王克英, 穆刚, 陈学允. 计及PMU的状态估计精度分析及配置研究[J]. 中国电机工程学报, 2001,21(8):29-33.
WANG Ke-ying, MU Gang, CHEN Xue-yun. Precision Improvement and PMU Placement Studies on State Estimation of a Hybrid Measurement System with PMUs[J]. Proceedings of the CSEE, 2001,21(8):29-33.
- [11] LIN W M,Teng J H. State Estimation for Distribution Systems with Zero-injection Constraints[J]. IEEE Trans on Power Systems ,1996,11(1):34-38.
- [12] 倪小平, 张步涵. 一种带有等式约束的状态估计新算法[J]. 电力系统自动化, 2001,10(5):42-44.
NI Xiao-ping, ZHANG Bu-han. New State Estimation Algorithm with Equality Constraints[J]. Automation of Electric Power Systems,2001,10(5):42-44.
-
- 收稿日期: 2007-03-28
作者简介:
李阳林(1983-), 男, 硕士, 主要从事高电压与绝缘技术方面的工作; E-mail:yanglin_li@163.com
卫志农(1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析、运行和控制, 配电网自动化等;
万军彪(1968-), 男, 高级工程师, 长期从事高电压与绝缘技术方面的工作。