

交直流混合系统状态估计算法研究与分析

刘崇茹

(华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 北京 102206)

摘要: 采用最小二乘法对交直流输电系统的状态估计问题做了详细的分析和评价。在四种典型的交直流系统状态估计算法的基础上, 增加了一类处理交直流系统之间关系的状态估计方法。针对五种算法对交流、直流系统的处理方法, 采用一含有双端直流输电系统的14节点算例和一含有两条直流输电线路的300节点系统算例, 进行多样本采样计算, 从算法的优化效果、估计误差、迭代次数、对量测系统的适应性和计算速度等方面进行了详细的对比分析, 总结了五种算法在不同的交流、直流系统量测配置情况下的计算性能, 详细分析了几种算法的优缺点和实用性。针对电力系统状态估计的研究现状和现场需求, 提出了直流系统状态变量的选取原则, 对每个换流站只需选择两个状态变量即可, 一个是直流电压, 另一个是换流器控制角或换流变压器分接头。归纳出直流系统量测配置的特殊问题, 即直流系统量测方程中必须包括无功量测或者触发电角(熄弧角)量测, 否则交直流混合系统状态估计发散的可能性比较大。

关键词: 电力系统; 交直流; 状态估计; 加权最小二乘法; 量测配置

Research and analysis on algorithm of state estimation of AC/DC systems

LIU Chong-ru

(North China Electric Power University, Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education, Beijing 102206, China)

Abstract: Power system state estimation is analyzed and evaluated by using Weighed Least Square (WLS) method in this paper. Upon four typical AC/DC State Estimation (SE) methods, another AC/DC SE algorithm is presented. Two test systems, one is a 14-bus with a High Voltage Direct Current (HVDC) system and another is a 300-bus with two HVDC systems, are used to contrast to the five methods in the aspects of optimal effect, estimation error, iteration times, the adaptation of measurement system and calculation speed. The calculation performances of these five SE methods under different measurement configuration of AC systems and HVDC systems are summarized in this paper. The merit/demerit and practicability of these five methods are analyzed too. Aiming at the status in quo of power system SE and the practice requirement, a principle of selecting the state parameters of DC system is presented that each converter should have two state parameters: one is DC voltage and the other is ignition (extinction) angle or converter transformer tap. In addition, an especial problem of configuring measurement system is concluded. That is, the positive power measure or the ignition (extinction) angle measure should be included in the system measurement functions. Otherwise the hybrid power system SE may be likely to diverge.

Key words: power system; AC/DC; state estimation; weighed least square method; measure configuration

中图分类号: TM721 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)06-0014-06

0 引言

交流系统状态估计算法的发展主要集中在解决提高估计精度和加快收敛速度两个主要方面。交直流混合电力系统状态估计问题是基于交流系统状态估计的经验和成果^[1], 着手解决如何更好地处理直流系统和交流系统之间的相互影响关系。

处理交流系统和直流系统之间的相互关系主要有两种方式: 一种是同时求解, 也就是将直流系统和交流系统共同建模, 将直流量测和交流量测方

程不特意区分, 用统一的状态估计算法进行计算。由于直流系统和交流系统的耦合性, 采用这种思路能够保证状态估计的收敛性, 但在实际应用中, 很难利用已有的交流系统状态估计程序。另一种是解耦求解法, 将直流系统与交流系统分别求解, 在不断的交替迭代过程中传递实际存在的耦合关系。这种算法一定程度上满足了直接利用已有交流系统状态估计程序的要求, 同时能够减小状态估计维数, 但这种算法的收敛性较前者稍差。

Roy 等人在文献[2]中提出了同时求解法, 将交

直流混合系统看作一个整体, 建立混合系统量测方程, 并用加权最小二乘法 WLS (Weighed Least Square method) 同时对其求解。这个方法可靠且具有良好的收敛性, 对初值的要求没有解耦求解法严格。但在应用领域有一种普遍的看法, 认为采用这种算法很难方便地利用交流系统状态估计程序。

Sinha 等人在文献[3]中提出将信息矩阵中的非对角元素移到量测方程的右侧, 从而将交流和直流解耦, 用交替迭代形式计算交直流混合系统状态估计。文献[4]针对交流和直流系统解耦的算法提出了改进措施, 保留直流系统泰勒展开式中的高阶项, 获得了较好的收敛性。由于解耦过程忽略了直流和交流系统之间的相互影响, 虽然直流方程采用精确的泰勒展开式, 但收敛性的好坏跟初值的关系很大, 如果初值距离真值较远, 收敛性能将变差。文献[5]借鉴有功和无功解耦的推导过程, 运用数学方法对同时求解法的计算方程进行分块和对角化, 在一定程度上保证了算法的收敛性。

本文采用最小二乘算法, 在常见的四种典型交直流混合系统状态估计算法基础上提出了一种新的处理交直流耦合关系的算法 (算法五), 该方法直接将统一迭代方程 $[H^T R^{-1} H] \Delta x = H^T R^{-1} \Delta z$ 进行数学变换, 目的是使得交流状态修正量和直流状态修正量之间无数学形式上的耦合关系, 得到一种新的交替迭代的形式。针对直流系统的特殊性, 提出直流系统状态变量的选择方案, 并针对仿真结果和数学分析指出, 直流系统量测方程中应该包括换流站无功量测或者整流器触发角 (逆变器熄弧角) 量测, 否则交直流混合系统状态估计可能发散。针对五种交直流混合电力系统状态估计算法进行比较, 从估计质量、计算速度、对量测系统的适应性以及计算耗时这四个方面分析几种算法的优缺点及实用性。

1 常用算法

1.1 算法一^[2]

认为交直流系统是一个整体, 采用 WLS 进行计算, 迭代公式为:

$$\begin{aligned} \Delta z^{(l)} &= z - h(x^{(l)}) \\ \Delta x^{(l)} &= [H^T R^{-1} H]^{-1} H^T R^{-1} \Delta z^{(l)} \\ x^{(l+1)} &= x^{(l)} + \Delta x^{(l)} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: x 是状态变量, z 是量测向量, $h(x)$ 为量测方程, R 是由量测方差构成的对角阵, H 是量测方程的雅克比矩阵, 上标 l 表示迭代次数。

1.2 算法二^[3]

将状态变量分为交流系统状态变量 x_{ac} 和直流系统状态变量 x_{dc} , 记 $H^T R^{-1} H = G$, $H^T R^{-1} = K$, 将 WLS 求解方程写成分块矩阵的形式:

$$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_{ac} \\ \Delta x_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} \Delta z \quad (2)$$

将非对角元子块移至等号右边:

$$\begin{bmatrix} G_{11} \Delta x_{ac} \\ G_{22} \Delta x_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} \Delta z - \begin{bmatrix} G_{12} \Delta x_{dc} \\ G_{21} \Delta x_{ac} \end{bmatrix} \quad (3)$$

就可以得到这种算法的迭代形式:

$$\begin{aligned} \Delta z^{(l)} &= z - h(x^{(l)}) \\ \Delta x_{ac}^{(l+1)} &= G_{11}^{-1} (K_1 \Delta z^{(l)} - G_{12} \Delta x_{dc}^{(l)}) \\ \Delta x_{dc}^{(l+1)} &= G_{22}^{-1} (K_2 \Delta z^{(l)} - G_{21} \Delta x_{ac}^{(l+1)}) \\ x^{(l+1)} &= x^{(l)} + \Delta x^{(l+1)} \end{aligned} \quad (4)$$

1.3 算法三^[4]

忽略交直流系统间相互影响, 认为:

$$H = \begin{bmatrix} H_{11} & \\ & H_{22} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中: $H_{11} = \partial h_{ac}(x) / \partial x_{ac}^T$, $H_{22} = \partial h_{dc}(x) / \partial x_{dc}^T$ 。状态变量 $x = [x_{ac}^T \ x_{dc}^T]^T$, 得到状态估计迭代形式为:

$$\begin{aligned} \Delta z_{ac}^{(l)} &= z_{ac} - h_{ac}(x^{(l)}) \\ \Delta x_{ac}^{(l)} &= [H_{11}^T R_{11}^{-1} H_{11}]^{-1} H_{11}^T R_{11}^{-1} \Delta z_{ac}^{(l)} \\ x_{ac}^{(l+1)} &= x_{ac}^{(l)} + \Delta x_{ac}^{(l)} \\ \Delta z_{dc}^{(l)} &= z_{dc} - h_{dc}(x^{(l)}) \\ \Delta x_{dc}^{(l)} &= [H_{22}^T R_{22}^{-1} H_{22}]^{-1} H_{22}^T R_{22}^{-1} \Delta z_{dc}^{(l)} \\ x_{dc}^{(l+1)} &= x_{dc}^{(l)} + \Delta x_{dc}^{(l)} \end{aligned} \quad (6)$$

为了提高收敛速度, 将雅克比矩阵 H 常数化能够减少因子分解所用的计算时间, 但如果初值偏离真值较远, 则常数化 H 会影响算法的收敛性。本文仿真结果表明, 由于计算机技术的不断发展, 是否将 H 常数化并不显著影响算法的计算时间, 因此本文算例中并不将 H 常数化。

1.4 算法四^[5]

将算法一中求解方程 $H^T R^{-1} H \Delta x = H^T R^{-1} \Delta z$ 等价于求解超定方程 $R^{-1/2} H \Delta x = R^{-1/2} \Delta z$ 。借鉴交流系统 PQ 解耦的方法^[6]进行数学变换, 可以得到:

$$\begin{bmatrix} R_{11}^{-1/2} \hat{H}_{11} & 0 \\ 0 & R_{22}^{-1/2} H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_{ac} \\ \Delta x_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11}^{-1/2} \Delta z_{ac} - R_{11}^{-1/2} H_{12} (H_{22}^T R_{22}^{-1} H_{22})^{-1} H_{22}^T R_{22}^{-1} \Delta z_{dc} \\ R_{22}^{-1/2} \Delta z_{dc} - R_{22}^{-1/2} H_{21} \Delta x_{ac} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中: $\hat{H}_{11} = H_{11} - H_{12} (H_{22}^T R_{22}^{-1} H_{22})^{-1} H_{22}^T R_{22}^{-1} H_{21}$ 。经过数学推导^[5], 得到两步迭代形式为:

$$\begin{aligned} \Delta z_{dc}^{(l)} &= z_{dc} - h_{dc}(x^{(l)}) \\ \Delta x_{dc}^{(l)} &= [H_{22}^T R_{22}^{-1} H_{22}]^{-1} H_{22}^T R_{22}^{-1} \Delta z_{dc}^{(l)} \\ x_{dc}^{(l+1)} &= x_{dc}^{(l)} + \Delta x_{dc}^{(l)} \\ \Delta z_{ac}^{(l)} &= z_{ac} - h_{ac}(x_{ac}^{(l)}, x_{dc}^{(l+1)}) \\ \Delta x_{ac}^{(l)} &= [\tilde{H}_{11}^T R_{11}^{-1} \tilde{H}_{11}]^{-1} \tilde{H}_{11}^T R_{11}^{-1} \Delta z_{ac}^{(l)} \\ x_{ac}^{(l+1)} &= x_{ac}^{(l)} + \Delta x_{ac}^{(l)} \end{aligned} \quad (8)$$

可以看出, 算法四和算法三在直流部分的迭代形式完全相同, 只是交流部分迭代形式有所差别。

1.5 算法五

算法四是将求解 $H^T R^{-1} H \Delta x = H^T R^{-1} \Delta z$ 等价于求解超定方程 $R^{-1/2} H \Delta x = R^{-1/2} \Delta z$, 借鉴交流系统 PQ 解耦的方法进行数学变换得到的交替迭代形式。能否不进行方程等价, 直接对 $H^T R^{-1} H \Delta x = H^T R^{-1} \Delta z$ 进行数学变换呢? 本文针对这一想法, 提出了一种新的交替迭代形式。对式(2)进行数学变换, 从数学表达式上解除交流系统状态修正量 Δx_{ac} 和直流系统状态修正量 Δx_{dc} 之间的耦合关系。将式(2)展开, 即:

$$G_{11} \Delta x_{ac} + G_{12} \Delta x_{dc} = K_1 \Delta z \quad (a) \quad (9)$$

$$G_{21} \Delta x_{ac} + G_{22} \Delta x_{dc} = K_2 \Delta z \quad (b)$$

进行数学变换, (a) - $G_{12} G_{22}^{-1}$ (b), 得到:

$$(G_{11} - G_{12} G_{22}^{-1} G_{21}) \Delta x_{ac} = (K_1 - G_{12} G_{22}^{-1} K_2) \Delta z \quad (10)$$

(b) - $G_{21} G_{11}^{-1}$ (a), 得到:

$$(G_{22} - G_{21} G_{11}^{-1} G_{12}) \Delta x_{dc} = (K_2 - G_{21} G_{11}^{-1} K_1) \Delta z \quad (11)$$

由式(10)和式(11)可以得到算法的迭代形式为:

$$\begin{aligned} \Delta z^{(l)} &= z - h(x^{(l)}) \\ \Delta x_{ac}^{(l)} &= [G_{11} - G_{12} G_{22}^{-1} G_{21}]^{-1} [K_1 - G_{12} G_{22}^{-1} K_2] \Delta z^{(l)} \\ \Delta x_{dc}^{(l)} &= [G_{22} - G_{21} G_{11}^{-1} G_{12}]^{-1} [K_2 - G_{21} G_{11}^{-1} K_1] \Delta z^{(l)} \\ x^{(l+1)} &= x^{(l)} + \Delta x^{(l)} \end{aligned} \quad (12)$$

2 选择状态变量

选择节点电压相角 δ 和幅值 v 作为交流系统状态变量 x_{ac} 。本文选取状态变量时不需要剔除平衡节点, 所有节点的电压相角和幅值均作为状态变量。如果配置了 PMU 量测单元, 则增加相应的相角量测方程, 如果没有 PMU 量测单元, 则指定某一节点的相角为 0, 并增加该相角的伪量测方程 $\delta^m = 0$ 。

直流输电系统状态变量 x_{dc} 如何选取, 是一个值得考虑的问题。目前的做法^[4,5]是: 对任一个换流站 i 选择 $x_{dc i} = [V_{di}, I_{di}, T_i, \cos \theta_i, I_{di}, \varphi_i]^T$ 作为直流系统状态变量。其中, V_{di} 为换流器 i 的直流电压; I_{di} 为换流器 i 的直流电流, 流出节点为正; T_i 为换流变压器变比; θ_i 为换流器 i 的触发角(整流)或熄弧角(逆变);

I_{ai} 为交流注入电流; φ_i 为换流站 i 的功率因数角。一个换流站对应的状态变量有 6 个, 并且状态变量之间没有成对出现的关系, 很难利用分块吉文斯旋转的快速状态估计算法^[7], 计算量比较大。

本文认为每个换流站只需要选择两个状态变量即可。换流站 i 的稳态特性方程为^[8]:

$$\begin{aligned} V_{di} &= 3\sqrt{2}/\pi \cdot B_i T_i V_k \cos \theta_i - 3/\pi \cdot X_{ci} I_{di} B_i \lambda_{signi} \\ P_{di} &= V_{di} I_{di} \end{aligned} \quad (13)$$

$$Q_{di} = I_{di} \lambda_{signi} \sqrt{\left(3\sqrt{2}/\pi \cdot B_i T_i E_{aci}\right)^2 - V_{di}^2}$$

其中: V_k 为换流器 i 的换流变压器高压端对应的交流母线 k 的电压幅值; B_i 为换流器 i 的桥数; P_{di} 为换流器 i 直流侧有功功率; Q_{di} 为换流器 i 需要的无功功率; X_{ci} 为单桥换流电抗; λ_{signi} 是符号量, 1 表示整流器, -1 表示逆变器。

式(13)中, V_k 是交流系统状态变量, $B_i, X_{ci}, \lambda_{signi}$ 是已知量, 每个换流站对应 6 个待求量, 分别为 $V_{di}, I_{di}, T_i, \cos \theta_i, P_{di}, Q_{di}$ 。用 I_d 表示直流系统电流向量, G_d 表示直流系统节点导纳矩阵, V_d 表示直流系统电压向量, 由直流输电系统网络方程^[8] $I_d = G_d V_d$ 可知, 如果知道直流系统电压, 就可以方便的求出直流系统电流。也就是说, 如果状态变量选择直流电压, 只需要从 $T_i, \cos \theta_i, Q_{di}$ 中再选择一个量作为状态变量, 就可以通过式(13)求出直流系统全部参数。为计算方便, 选择 $V_{di}, \cos \theta_i$ 或 V_{di}, T_i 作为直流系统状态变量均可。

表 1 量测系统配置

Tab.1 Configuration of measurement system

量测配置	名称	说明
交流系统	1 支路型	量测包含所有线路的支路潮流, 以及某一个参考节点的电压幅值和相角
	2 注入型	量测包含所有节点的注入功率, 以及某一个参考节点的电压幅值和相角
	3 混合型	随机选取支路潮流量测的 70%, 选取注入量测的 60%, 电压量测选取发电机节点电压的 60% ¹
直流系统	4 全面型	量测包括所有线路的支路潮流、所有节点的注入功率、所有发电机的节点电压
	1 控制型	包含直流系统控制参数设定值和换流变压器变比, 例如, 对定电压控制器选择直流电压和换流变压器变比, 对定电流控制选择直流电流和换流变压器变比。每个换流站还包含直流换流站控制角量测
	2 完整型	直流系统量测配置完整, 即包含直流电压、直流电流、换流变压器变比、换流站无功、线路有功、控制角等
	3 集合型	控制型的全部与完整型的 50% 构成的集合
4 一般型	实际的交直流混合系统的量测配置通常包括直流电压、直流电流、换流站有功和换流站控制角量测	

注: 1、如果遇到不可观测的情况, 则重新配置量测

3 量测配置

3.1 量测配置类型

本文设定的交直流系统量测配置情况见表 1。

量测误差 S_{ei} 服从正态分布 $S_{ei} \sim \sigma_i \cdot N(0,1)$, 量测误差的标准差取值与量测值的真值 S_{fi} 和仪表满刻度值 S_{fi} 有关^[9], 即 $\sigma_i = (a_{mi}S_{fi} + b_{mi}S_{fi})/3$, 误差系数 a_{mi} 和 b_{mi} 的取值见表 2。

表 2 误差系数
Tab.2 Error factors

	功率	电压	电流	角度
a_{mi}	0.02	0.003	0.005	0.003
b_{mi}	0.0035	0.003	0.01	0.003

3.2 量测配置特殊说明

本文仿真过程中发现, 如果直流系统量测方程不包含换流站无功或者控制角, 状态估计就会发散。通过分析也不难得出这样的结论。这是因为状态估计的雅克比矩阵 H 是表征量测量与状态量之间关系的重要桥梁, 如果直流系统量测方程 $h_{dc}(x)$ 中不包含无功或相角量测, 则 $\partial h_{dc}(x)/\partial x_{dc}^T = 0$, 也就是说 H 阵中没有反映出交流系统电压的变化对直流系统的影响, 迭代过程中 $\sqrt{18B_i^2 T_i^2 V_k^2 / \pi^2 - V_{di}^2}$ 可能为虚数, 从而使得直流系统无功为虚数。因此在配置直流量测方程时, 每个换流站的量测方程至少要有无功量测或者控制角量测。实际系统中, 换流站的控制角比无功功率更容易获得。

3.3 量测方程描述

本文在进行状态估计算法比较时, 选择 δ 和 v 作为交流系统状态变量 x_{ac} , 选择 v_d 和 T 作为直流系统状态变量 x_{dc} 。交流系统的量测方程在许多文献中都介绍过^[10], 这里不再赘述, 但需要注意, 交直流连接节点的注入量测方程要根据直流系统功率的表达式进行修正。直流系统各类量测的表达式为:

$$\begin{aligned}
 T_i^m &= T_i + v_{T_i} \\
 V_{di}^m &= V_{di} + v_{V_{di}} \\
 I_{di}^m &= \sum_{j=1}^{N_{dc}} g_{dij} V_{dj} + v_{I_{di}} \\
 P_{di}^m &= V_{di} \sum_{j=1}^{N_{dc}} g_{dij} V_{dj} + v_{P_{di}} \\
 Q_{di}^m &= \left(\sum_{j=1}^{N_{dc}} g_{dij} V_{dj} \right) \cdot \lambda_{\text{sign}i} \cdot \sqrt{18B_i^2 T_i^2 V_k^2 / \pi^2 - V_{di}^2} + v_{Q_{di}} \\
 \cos \theta_i^m &= \frac{V_{di} + 3/\pi \cdot X_{ci} \left(\sum_{j=1}^{N_{dc}} g_{dij} V_{dj} \right) B_i \cdot \lambda_{\text{sign}i}}{3\sqrt{2}/\pi \cdot B_i T_i V_k} + v_{\theta_i} \\
 P_{dij}^m &= -V_{di} g_{dij} (V_{di} - V_{dj}) + v_{P_{dij}} \\
 I_{dij}^m &= -g_{dij} (V_{di} - V_{dj}) + v_{I_{dij}}
 \end{aligned} \tag{14}$$

其中: 上标 m 表示该值为量测值; g_{dij} 表示 G_d 第 i 行第 j 列元素; v 表示量测误差; P_{dij} 和 I_{dij} 分别表示支路 ij 从 i 流向 j 的有功功率和电流。

4 几种算法的性能比较

本文采用加入一条直流线路的 IEEE14 节点和加入两条直流线路的 IEEE300 节点两个测试系统^[11]对五种算法进行比较, 量测误差由数学模拟的方式给出。系统规模见表 3, 量测配置见表 4。交直流混合系统状态估计的收敛误差为 10^{-5} 。

表 3 仿真的电力系统规模

Tab.3 The scale of the simulation systems

名称	交流子系统规模		直流子系统规模		状态变量数	
	母线	支路	发电机	换流站		
14 节点	14	19	5	2	1	34
300 节点	300	411	69	4	2	608

表 4 量测系统配置

Tab.4 Configurations of measurement systems

算例	量测配置	量测系统					量测误差
		交流量测类型	直流量测类型	交流测点数	直流测点数	采样数	
14 节点	11	支路型	控制型	78	6	100	0.99
	22	注入型	完整型	30	12	20	0.97
	34	混合型	一般型	76	8	50	0.99
	41	全面型	控制型	114	6	80	0.99
	12	支路型	完整型	78	12	60	0.99
	23	注入型	集合型	30	9	30	0.98
300 节点	31	混合型	控制型	1592	10	10	0.95
	42	全面型	完整型	2382	24	20	0.97
	13	支路型	集合型	1646	18	40	0.99
	32	混合型	完整型	1592	24	10	0.95
	43	全面型	集合型	2382	18	10	0.95
	44	全面型	一般型	2382	16	20	0.97

4.1 估计质量

可以通过目标函数值比较状态估计优化效果, 从表 5 可以看出, 五种算法的目标函数值基本都接近量测冗余度, 说明五种算法的优化结果都比较好。

表 5 目标函数值统计

Tab.5 Statistic of destination function value

算例	量测配置	量测冗余度	目标函数值				
			算法一	算法二	算法三	算法四	算法五
14 节点	11	50	50.75	51.73	53.08	51.47	50.57
	22	8	6.26	—	9.01	6.98	—
	34	50	50.44	49.40	51.38	53.53	49.50
	41	86	86.53	88.44	103.92	99.61	87.24
	12	56	54.51	54.22	54.23	54.70	53.70
	23	5	5.05	—	8.58	6.63	—
300 节点	31	996	902.33	—	1002.86	996.71	—
	42	1798	1715.18	—	1909.72	1910.23	—
	13	1056	1035.59	1020.72	1084.59	1085.68	1026.86
	32	1008	895.48	907.24	1004.88	1030.21	903.28
	43	1792	1619.76	—	1775.91	1808.51	—
	44	1790	1700.69	—	1902.07	1918.74	—

算法二和算法五在几种量测配置的多次采样中存在不收敛的情况,在表 5 和表 6 中用“—”表示。

从表 6 可以看出,在交流系统只有注入量测没有线路潮流量测的情况下,估计误差偏大,滤波质量不高。虽然算法一得到的估计误差小于 1,表明这种情况下仍能够提高数据精度,但从每个单独样本来看,有多个样本的估计误差都大于 1,说明当交流系统只有母线注入量测而没有线路潮流量测时,不论直流系统量测如何配置,混合系统状态估计都会出现滤波失败的情况。

表 6 估计误差和迭代次数

Tab.6 Statistic of estimation error and iteration times

算例	量测配置	估计误差					迭代次数				
		SF1	SF2	SF3	SF4	SF5	SF1	SF2	SF3	SF4	SF5
14 节点	11	0.62	0.62	0.63	0.64	0.62	3	12.1	4	4	9.9
	22	0.91	—	0.97	0.96	—	3	—	7.2	4.1	—
	34	0.59	0.61	0.62	0.64	0.60	3	18.2	6.7	4	7.7
	41	0.51	0.50	0.64	0.60	0.51	3	22.3	6.8	4	18.1
	12	0.63	0.62	0.66	0.66	0.63	3	20.2	4	4	15.5
	23	0.96	—	1.02	1.04	—	3	—	7.1	4.0	—
	31	0.58	—	0.64	0.65	—	4	—	6	5	—
300 节点	42	0.50	—	0.58	0.58	—	4	—	6	5	—
	13	0.60	0.61	0.64	0.64	0.61	5	17.0	5	5	10.5
	32	0.60	0.60	0.66	0.65	0.60	4	28	6	5	29.3
	43	0.48	—	0.56	0.56	—	4	—	6	5	—
	44	0.49	—	0.57	0.58	—	4	—	6	5	—

注: SF1、SF2、SF3、SF4 和 SF5 表示算法一、算法二、算法三、算法四和算法五。

迭代次数以算法一为最优,其次是算法四。算法四通过对超定方程的数学推导,在解耦过程中将交直流系统的关系表现在交流部分的迭代公式中,收敛效果较算法三为好。但算法三能够最有效地利用原有的交流系统计算程序,对原交流系统状态估计程序修改量最小。

4.2 计算速度

本文采用 PC 机进行计算, CPU1.8 MHz, 1 G 内存, 60 G 硬盘, 硬盘转速 7 200。取两个模拟系统中量测量最多的情况比较算法的计算时间,见表 7。

表 7 计算用时统计

Tab.7 Statistic of calculating time

算例	量测配置	测点数	计算用时 (s)				
			算法一	算法二	算法三	算法四	算法五
14 节点	41	120	0.015	0.113	0.032	0.027	0.104
300 节点	42	2406	0.145	0.445 ¹	0.214	0.215	>1 ¹

注: 这两种算法量测配置方式为 42 时发散, 这里取 13 配置时所用的时间。

随着计算机的发展,内存已经不是大问题,由于算法一采用同时求解法,迭代过程考虑了交直流系统间的耦合作用,迭代次数少,用时最短。算法三和算法四的用时差不多。算法二和算法五迭代次数多,计算时间长,可以预见,如果系统规模更大,这种算法的计算时间可能超过实际工程允许运行的时间,本文认为这两种算法在实际工程中不可取。

4.3 对量测系统的适应性

算法二和算法五对量测系统的适应性不好,在本文设置的 12 种交直流系统量测配置的情况下,只适应其中的 50%,从这个方面也说明,算法二和算法五不适合工程实际应用。

分析表 6、表 7 可以得出这样的结论:当交流系统只有注入量测而没有支路量测时,滤波效果差;算法一、算法三和算法四对其他各种量测配置的适应性都比较好。

表 8 对这三种算法的量测适应性做了简单排序,可以看出,虽然三种算法的量测适应性都比较好,但根据估计的最优性能比较,算法一最好,算法四次之,算法三排在第三位。

表 8 对直流系统量测类型的适应性

Tab.8 Adaptability to measurement system

算法	交流量测配置		直流量测配置			
	注入型	其它	控制型	完整型	集合型	一般型
算法一		良好	最好	第三	最好	最好
算法三	滤波效果差	良好	第三	第二	第三	第二
算法四		良好	第二	最好	第二	第三

在采用 WLS 对交直流系统状态估计的处理方法中,同时求解法效果最好。在解耦求解的方法中,对雅克比矩阵 H 常数化或者数学变换比对信息阵 G 进行数学变换的效果要好的多。通过对多种量测配置的多次采样仿真发现,对方程 $Gx = Kz$ 进行交、直流分解时,容易导致迭代过程中 Δx 反复振荡及 Δx 过小的现象,迭代次数过多,并且可能出现即使迭代超过 30 次也不能收敛到 10^{-5} 的现象。

大量的仿真计算表明,尽管同时求解法不能充分利用已有的交流系统状态估计程序,但由于这种算法的性能最好,可以考虑重新编写交直流状态估计程序以提高混合系统状态估计的准确性。

算法三是最能够充分利用原有交流系统程序的算法,对原有程序只需要修正 H 阵中交直流连接节点对应的对角元,并额外增加一个模块实现直流部分的迭代即可。算法四需要重新形成交流系统计算部分的迭代矩阵 \bar{H}_{11} ,程序编写量较算法三多,但总体性能优于算法三。

5 结论

总结了目前常用的交直流混合系统状态估计算法,从三个方面对交直流系统状态估计问题进行了研究:

1) 分析了直流系统状态变量的选取方案,认为直流输电系统每个换流站需要选择两个状态变量,其中一个应该是直流电压,另一个需要在整流器触发角(或逆变器熄弧角)和换流变压器变比中选择其一,才能保证用最少的变量表征出直流系统所有的变量。

2) 通过仿真和分析,总结出直流系统量测配置的特殊性,认为直流输电系统的量测方程中应该含有换流站无功量测或者换流器触发角(熄弧角)量测,二者至少有一,否则交直流混合系统状态估计发散概率比较大。

3) 对大量样本进行仿真计算,比较了五种交直流混合电力系统状态估计算法的特性,主要从估计质量、计算速度、对量测系统的适应性以及计算耗时这四个方面指出这几种算法的优缺点及实用性。

参考文献

- [1] 李碧君,薛禹胜,顾锦汶,等. 电力系统状态估计问题的研究现状和展望[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(11): 53-60.
LI Bi-jun, XUE Yu-sheng, GU Jin-wen, et al. Status Quo and Prospect of Power System State Estimation[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(11): 53-60.
- [2] Roy L, Sinha A K, Srivastava H N. Static State Estimation of Multiterminal DC/AC Power System in Rectangular Coordinates[J]. Electric Machines and Power Systems, 1991, 19: 69-80.
- [3] Sinha A K, Roy L, Srivastava H N. A Decoupled Second Order State Estimator for AC-DC Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(3): 1485-1491.
- [4] 邹贵彬,江世芳. 保留非线性的交直流联合系统状态估计算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(9): 15-19.
ZOU Gui-bin, JIANG Shi-fang. State Estimation Algorithm Retaining Nonlinearity for AC/DC Combination System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9): 15-19.
- [5] 张伯明,丁奇峰,钟德成. 多端交直流系统状态估计

[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(11): 62-67.

ZHANG Bo-ming, DING Qi-feng, ZHONG De-cheng. AC/MTDC Power System State Estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(11): 62-67.

- [6] Monticelli A, Garcia A. Fast Decoupled State Estimation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(2): 556-564.

- [7] 郭瑞鹏,邵学俭,韩祯祥. 基于分块吉文斯旋转的电力系统状态估计[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 26-31.

GUO Rui-peng, SHAO Xue-jian, HAN Zhen-xiang. A Blocked Givens Rotations Based Algorithm for Power System State Estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 26-31.

- [8] 刘崇茹,张伯明,孙宏斌,等. 多种控制方式下的交直流系统潮流算法改进[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(21): 25-31.

LIU Chong-ru, ZHANG Bo-ming, SUN Hong-bin, et al. Advanced AC-DC Power Flow Algorithm Considering Various Controls[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(21): 25-31.

- [9] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.

YU Er-keng. State Estimation of Power Systems[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1985.

- [10] 李先彬. 电力系统自动化(第四版)[M].北京: 中国电力出版社, 2004.

LI Xian-bin. Power System Automation, Fourth Edition[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.

- [11] 刘崇茹. 交直流混合输电系统稳态运行特性及其调控研究(博士学位论文)[D]. 北京: 清华大学, 2006.

LIU Chong-ru. Study on Steady State Operation Performance and Control of AC-HVDC Hybrid Power Systems, Doctoral Dissertation[D]. Beijing: Tsinghua University, 2006.

收稿日期: 2007-08-13; 修回日期: 2007-11-13

作者简介:

刘崇茹(1977-),女,讲师,博士,主要从事交直流混合电力系统分析与仿真、运行与控制等方面的科研和教学工作。E-mail: chongru.liu@ncepu.edu.cn