

基于改进 IGGIII 和快速分解法的电力系统状态估计算法

王冰¹, 李积捷¹, 王春瑛², 刘涛³, 王野藤³

(1. 东北电力大学, 吉林 吉林 132012; 2. 吉林油田电厂, 吉林 吉林 138000;
3. 齐齐哈尔电业局, 黑龙江 齐齐哈尔 161000)

摘要: 快速分解算法具有很好的收敛特性, 既能处理支路上的量测量, 又能处理节点注入型量测量, 计算速度快而又节省内存, 是工程上一种公认的状态估计的优良实用算法, 但它无法处理实际运行的电网自动化系统中存在的少量粗差, 从而使状态估计的结果严重偏离真值。通过分析比较几种典型的抗差估计方法, 将基于 IGGIII 法的抗差估计方法与快速分解算法相结合, 用于抗拒少量粗差对估计值的影响。由于考虑到在粗差较大时, 利用具有淘汰区的 IGGIII 进行抗差估计可能会出现秩亏, 信息矩阵出现奇异现象, 系统不可观, 导致状态估计不能进行, 故该文对 IGGIII 法中的常数选取进行改进。算例结果表明, 该改进算法具有良好的抗粗差能力和可靠的收敛性, 收敛速度快, 并能够将抗粗差和状态估计在计算过程中能同时顺利完成, 不需要进行多次状态估计计算。

关键词: 电力系统; 状态估计; IGGIII 法; 快速分解算法

State estimation algorithm based on the improved method of IGGIII and fast decoupled arithmetic

WANG Bing¹, LI Ji-jie¹, WANG Chun-ying², LIU Tao³, WANG Ye-teng³

(1. Northeast Dianli University, Jilin 132012, China; 2. Jilin Oil-field Hot Power Station, Jilin 138000, China;
3. Qiqihaer Electric Power Bureau, Qiqihaer 161000, China)

Abstract: The fast decoupled arithmetic has a fast calculation speed and a economical memory. It can handle the measurements of the node and branch and is a good and practical arithmetic of state estimation. But it's not efficient in handling gross error which will result in a great deviation from the true value. According to analyze a few typical methods in robust estimation, this paper uses a way which is combined by the robust estimation method of IGGIII and the fast decoupled arithmetic to resist the influence of little outlier resistance to estimation. When the gross errors are too bigger and if the common method of IGGIII is used to estimate, the rank-defect and the singular phenomena of coefficient matrix which may make the estimation stop may occur, so the selection of IGGIII constant is improved in this paper. The results of calculation example show that this method has strong robustness, high convergence speed as well as favorable veracity and numerical stability. The outlier resistance and state estimation can be completed in one calculation process.

Key words: power systems; state estimation; IGGIII method; fast decoupled arithmetic

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)11-0001-04

0 引言

随着电力系统的迅速发展, 为了保证电力系统的安全性和经济性, 要求做到迅速、准确而全面地掌握实际运行状态, 预测和分析系统的运行趋势, 并对运行中发生的各种问题提出对策。

状态估计可以利用实时量测系统的冗余度来提高数据精度, 自动排除随机干扰所引起的错误信息, 估计或预报系统的运行状态。国内外已对状态估计

进行了深入的研究, 并提出了许多状态估计算法^[1]和不良数据的检测、辨识方法^[2-5]。文献[3]和文献[5]分别提出了基于 IGG 法 (IGG 是中国科学院测量与地球物理研究所的英文缩写) 和基于 Huber 的抗差估计方法, 使抗差和状态估计在计算中一次完成, 与传统的算法相比具有明显的优越性。

抗差估计理论在状态估计中的应用是通过等价权将抗差估计原理与状态估计算法有机结合起来。状态估计算法抗差化的关键是建立恰当的权函

数。为了得到既有较强抗差性,又有较高效率的估计值,权函数应包含两方面的内容:(1)观测值的信息区间划分为正常观测值;可利用观测值;粗差观测值;(2)根据这三部分观测值,可以将权划分为:保权区(保证算法的基本效率);降权区(加强算法的效率和可靠性);拒绝区(体现抗差能力)。

IGGIII法是目前常用的抗差估计方法中相对稳定的一种方法。本文将IGGIII抗差估计法与快速分解算法相结合,并对IGGIII法中的常数选取进行改进,防止奇异现象产生,形成了具有良好抗差能力的状态估计混合算法,它不但克服了单一状态估计算法不能抗拒粗差的缺陷,同时也继承了快速分解算法计算速度快,估计精度高,节省内存等优点。

1 快速分解算法

在状态估计中,基本加权最小二乘法的效率较低,无法满足电力系统实时在线的要求。实时程序的设计尽可能的简化计算以提高计算速度和降低内存消耗。在实用中逐渐形成了两种成功而有效的简化方式:

1)有功和无功分解计算:在高压电网正常运行条件下,有功 P 和电压 v 、无功 Q 和电压相角 θ 之间联系很弱,可以将 P - θ 、 Q - v 分开计算,仍然会得到收敛的结果。

2)雅可比矩阵常数化:一般来说,雅可比矩阵在迭代中仅有微小的变化,若作为常数处理仍然得到收敛的结果。

在工程要求的精度范围内,快速分解算法^[6]具有很好的收敛特性,既能处理支路上的量测量,又能处理节点注入型量测量,计算速度快而又节省内存,是一种公认的状态估计的优良实用算法。

将状态量 x 分为电压相角 θ 和幅值 v 两类:

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ v \end{bmatrix}$$

对应量测矢量 z 分为有功 z_a 和无功 z_b 两类:

$$z = \begin{bmatrix} z_a \\ z_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_a(\theta, v) \\ h_r(\theta, v) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_a \\ v_r \end{bmatrix}$$

在高压系统中,可引入上述两项简化假设得:

$$H^T R^{-1} H = \begin{bmatrix} A & \\ & B \end{bmatrix}$$

式中: $A = v_0^4 [(-B_a)^T R_a^{-1} (-B_a)]$ 是 $(n_a \times n_a)$ 阶常数对称矩阵; $B = v_0^2 [(-B_r)^T R_r^{-1} (-B_r)]$ 是 $(n_r \times n_r)$ 阶常数对称矩阵。

根据快速分解法常规潮流的计算经验, B_a 直接取支路电抗的倒数, B_r 取支路导纳的虚部时具有最快的迭代收敛速度。

同理,对 $[H^T R^{-1} (z - h(x))]$ 可化简得:

$$H^T R^{-1} (z - h(x)) = \begin{bmatrix} a^{(l)} \\ b^{(l)} \end{bmatrix}$$

式中: $a^{(l)} = v_0^2 (-B_a)^T R_a^{-1} [z_a - h_a(\theta, v)] \Big|_{\substack{\theta = \theta^{(l)} \\ v = v^{(l)}}}$;

$b^{(l)} = v_0 (-B_r)^T R_r^{-1} [z_r - h_r(\theta, v)] \Big|_{\substack{\theta = \theta^{(l)} \\ v = v^{(l)}}}$ 。

因此,快速分解状态估计算法的迭代公式为:

$$A \Delta \theta^{(l)} = a^{(l)}, \quad B \Delta v^{(l)} = b^{(l)}。$$

2 IGGIII估计法应用于状态估计

2.1 几种典型的权函数简介

选权迭代是一类重要的抗差估计方法,随其权函数的不同形成不同的抗差估计方法,权函数是决定选权迭代法优劣的一个重要的因素。经典的选权迭代法的权函数都是以降权的思路提出的,通过不断迭代,使含粗差项观测值的权趋近少零,相应每种权函数在一定程度上存在着不足。下面就几种经典的权函数做了详细的论述^[7]。

至今,国内外许多学者提出了许多权函数,有Hample权函数、Tukcy权函数、Andrews权函数、李德仁权函数、Huber权函数、丹麦指数权函数、IGG类权函数等。权函数的合适选择是选权迭代法成功与否的关键。权函数以抗差估计目标出发,应该包括三段,即正常段,其权保持原始权;可疑段,降权,使其权小于原始权;淘汰段,应该使其权为零,淘汰掉异常观测值。由于抗差估计的目标是充分利用有用信息,限制利用可疑信息,设法排除有去信息,进而达到观测数据的充分利用以及平差结果的正确性。几种经典的权函数:Huber权函数、丹麦权函数、Tukcy权函数、Andrews的权函数,IGG权函数、Hample权函数等。其中Huber权函数和丹麦权函数缺少淘汰段,这样就会使其减弱抗差能力;Tukcy权函数和Andrews的权函数缺少正常段,这样没有达到充分利用有用信息的目标,不能使抗差效率与抗差能力有效地结合;三个阶段均包括的权函数有IGG类权函数和Hample权函数,但Hample

权函数把可疑段分为两段, 需要大量实际计算, 必要性不大。在粗差较大时, IGGI 和 Hample 的估计值相对较差, 而 IGGIII 相对稳定。存在淘汰区的权函数在进行抗差估计时可能会出现秩亏, 信息矩阵出现奇异现象, 导致状态估计不能顺利地进行。

2.2 IGGIII 估计及其改进方法

IGGIII 法的权函数分为保权区、降权区、淘汰区。实践表明, 可疑量测值和显著异常量测值只占少部分, 观测值的主体仍服从正态分布。在状态估计过程中, 应充分利用主体可靠信息, 使其保持原权值不变; 对可疑量测值依其可信度分别降权处理, 对显著异常量测值则取权值为 0。

从测量误差理论看, 界限 $k\sigma$ 的 k 可取 1.5 (按正态分布, 误差在 $\pm 1.5\sigma$ 之外的概率仅为 0.13), 这个区间以外的观测值既必能完全排除又要限制其有害影响。当余差超出 $\pm 2.5\sigma$ 时 (在正常模式下, 概率为 0.01), 在观测值分布模式可用的情况下, 这部分数据不应作为有用的观测信息, 即取权值为 0。于是 IGGIII 法的权因子为:

$$\omega(u) = \begin{cases} 1, & |u| \leq k_0 \\ (k_0/|u|)(\frac{k_1-|u|}{k_1-k_0})^2, & k_0 < |u| \leq k_1 \\ 0, & |u| > k_1 \end{cases}$$

其中: $|u| = |v/\sigma|$, v 为量测数据残差, σ 为标准差; 通常, 取 $k_0=1.5$, $k_1=2.5$ 。

IGGIII 法属于有淘汰区的 M 估计, 这种估计方案充分地考虑了测量数据的实际情况, 是一种适合处理测量数据的抗差方案。

在 IGGIII 法中, 常数 k_1 的选取既关系到估计的效率, 又直接影响到估计的抗差能力。大量的实验证明, 当粗差较小时, k_1 取值在 2.5 和 8.0 之间是合理的; 但是当粗差较大时, 这样取值可能会使估计过程中的信息矩阵出现奇异现象, 系统变成不可观测, 估计无法进行。如果 k_1 的取值较大, 则抗差能力就明显减弱了。考虑到以上几个方面, 针对第一小节的电力系统状态估计快速分解算法, 提出了一种确定 k_1 取得方法, 即:

$$k_1 = \max(H \Delta x)$$

式中: H 表示有功和无功分别对应的雅可比常数矩阵, Δx 表示电压幅值和相角分别对应的第一次迭代修正值。本文中, 按照快速分解法的特点, 针对有功和无功分别确定对应的 k_1 值, 各自计算。

在电力系统状态估计中, 由于量测量的个数多于状态变量的个数, 根据状态估计的特点可知, 本文 k_1 的取值方法保证了系统的可观, 即 $H^T R^{-1} H$ 可逆, 状态估计一定能顺利进行。

2.3 抗差估计应用于状态估计

本文将 IGGIII 估计理论应用于基于快速分解算法的状态估计, 抗差主要体现在变权上。当每一量测值对应的残差 $r = z - \hat{z}$ 超过限定阈值时, 对该量测量的对应权值进行降权, 不超过则权值保持不变。具体的方法为:

$$P = \omega R$$

式中: ω 为权因子, P 为变权后的等价权, R 为变权前的初始权。

此时, 计算迭代公式为:

$$(H^T P^{-1} H) \Delta x = H^T P^{-1} (z - h(x))$$

2.4 改进算法的计算流程

该改进算法的计算流程如图 1 所示。

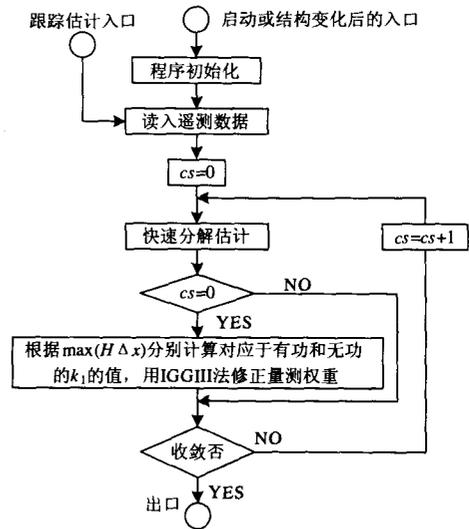


图 1 改进算法的计算流程

Fig.1 Flow chart of the improved algorithm

3 算例分析

为了检验本文提出改进的算法辨别坏数据的能力及估计效果, 采用 IEEE9 节点系统进行试验, 验证该算法的有效性, 具体的系统参数、量测数据等参见文献[8]。

状态估计的原始量测数据是由牛顿法潮流结果加入正态随机误差后得到的。情况 1: 假设网络

中同时出现了两个量测错误,分别为: P_{6-2} 和 Q_{6-2} (分别表示支路 6-2 上从节点 6 流向节点 2 的有功和无功功率), 取值分别为-2.86 和-2.102; 情况 2: 假定 P_5 (表示节点 5 注入的有功功率)出现较大的粗差, 取值为-3.845。用本文改进的算法分别对上述两种情况进行计算, 并将该计算结果和常规快速分解法、Huber 法和 IGGIII 法的计算结果进行比较, 各节点电压状态量见表 1 所示。

表 1 存在粗差情况下估计误差比较

Tab.1 Comparison of the SE error under gross errors

| 估计项 | 情况 1 | | | | 情况 2 | |
|------------|--------|---------|----------|--------|----------------|--------|
| | 常规估计 | Huber 法 | IGGIII 法 | | IGGIII 法 | |
| | | | 改前 | 改后 | 改前 | 改后 |
| V_1 | -0.138 | -0.125 | -0.085 | 0.002 | 产生奇异现象, 估计无法进行 | 0.003 |
| θ_1 | -0.046 | -0.033 | 0.013 | 0.003 | | 0.001 |
| V_2 | -0.138 | -0.125 | -0.085 | 0.002 | | 0.003 |
| θ_2 | -0.069 | -0.054 | -0.002 | 0.003 | | 0.000 |
| V_3 | -0.134 | -0.122 | -0.082 | 0.002 | | 0.003 |
| θ_3 | -0.077 | -0.062 | -0.010 | 0.001 | | -0.001 |
| V_4 | -0.109 | -0.097 | -0.067 | 0.001 | | 0.002 |
| θ_4 | -0.048 | -0.038 | -0.002 | -0.000 | | -0.002 |
| V_5 | -0.109 | -0.098 | -0.067 | 0.002 | | 0.026 |
| θ_5 | -0.039 | -0.029 | 0.004 | -0.000 | | -0.175 |
| V_6 | 0.010 | 0.009 | 0.008 | 0.004 | | 0.004 |
| θ_6 | 0.010 | 0.008 | 0.003 | 0.000 | | 0.000 |
| V_7 | -0.011 | -0.009 | -0.005 | 0.003 | | 0.003 |
| θ_7 | -0.007 | -0.005 | -0.000 | 0.001 | | 0.001 |
| V_8 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.003 | | 0.003 |
| θ_8 | -0.007 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | | 0.000 |
| n | 8 | 7 | 7 | 6 | 5 | |

(附: 表中 n 表示迭代次数)

表 2 存在粗差情况下权重比较

Tab.1 Comparison of the weighting under gross errors

| 权重 | 情况 1 | | | | 情况 2 | |
|-----------|------|---------|----------|----|----------|-------|
| | 常规估计 | Huber 法 | IGGIII 法 | | IGGIII 法 | |
| | | | 改前 | 改后 | 改前 | 改后 |
| R_{P62} | 0.49 | 0.367 | 0.091 | 0 | — | — |
| R_{Q62} | 0.48 | 0.422 | 0.267 | 0 | — | — |
| R_{P5} | — | — | — | — | 0 | 0.025 |

由表 1 可见, 在存在粗差的情况下, 快速分解算法不具备抗御粗差的能力, 估计结果不能接近真实地反映电力系统的运行情况。但是, 用改进的 IGGIII 法得出的结果与电力系统真实的运行情况比较接近, 效果优于 huber 法和 IGGIII 法, 且克服了 IGGIII 法产生奇异现象的可能。由表 1 和 2 中估计误差、迭代次数和权重变化等数据可以说明, 本文改进算法应用于电力系统状态估计达到了良好的抗差效果, 能有效地排除不良数据对电力系统的干扰, 且在不良数据存在的情况下计算的收敛速度比常规

估计算法快。

4 结论与展望

本文对 IGGIII 法中的常数选取进行改进, 防止奇异现象出现, 并与快速分解算法相结合形成具有良好抗差能力的状态估计算法。通过算例的仿真结果表明, 该方法不但具有良好的抗粗差能力和可靠的收敛性, 同时也继承了快速分解算法计算速度快, 估计精度高, 节省内存等优点, 并能够将抗粗差和状态估计在计算过程中同时完成, 不需要进行多次计算。抗差估计理论应用于电力系统状态估计在以下方面还有待深入研究:

- 1) 提高抗差估计算法的抗差能力及速度;
- 2) 量测相关的抗差估计研究;
- 3) 含参数和网络拓扑错误的抗差估计研究;
- 4) 有偏抗差估计等。

参考文献

- [1] Horisberger B P, Richard J C. A Fast Decoupled Static State-estimator for Electric Power System[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1976,95(1):208-216.
- [2] WEI Hua, et al. An Interior Point Method for Power System Weighted Nonlinear in Norm Static State Estimation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(2): 617-623.
- [3] 钱峰, 龚庆武. 基于 IGG 法的电力系统状态估计[J]. 电力系统自动化, 2005,29(3):36-39. QIAN Feng, GONG Qing-wu. State Estimation of Power System Based on IGG Method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005,29(3):36-39.
- [4] 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 Yuan-da. M-estimation and Its Application in Power System State Estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2000,20(9):26-31.
- [5] 李响, 等. 抗差最小二乘法状态估计[J]. 继电器, 2003, 31(7):50-53. LI Xiang, et al. State Estimation with the Least Robustness Square Method[J]. Relay, 2003, 31(7): 50-53.
- [6] Madtharad C. Power System State Estimation Using Singular Value Decomposition[J]. IEEE Transaction, 2003, 67(3): 99-107.
- [7] 李浩军, 等. 抗差估计中几种选权迭代常数选取的探讨[J]. 测绘科学, 2006,31(6):70-72. LI Hao-jun, et al. Discussion for the Selection of Constant in Selecting Weight Iteration Method in Robust Estimation[J]. Science of Surveying and Mapping, 2006, 31(6):70-72.

(下转第 41 页 continued on page 41)

免故障后 SEP 的求解和实际仿真网络与势能计算对应网络不一致的情形, 节省了计算量。

(2) 采用由功角、转速、加速功率以及动能和势能定义的综合判据来判断系统稳定情况, 判据简洁, 物理意义明显, 可以避免失稳模式的识别。

(3) 系统稳定时以系统回摆时对应的指标 $N(\theta) = \|\theta - \theta^{cl}\|_2$ 来表征稳定程度, 该指标除正常的仿真外, 无需额外的计算, 便于快速比较各控制措施对系统稳定的贡献大小。

附录: 功角向量 2 范数对时间导数的推导

由于 $N(\theta) = \|\theta - \theta^{cl}\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\theta_i - \theta_i^{cl})^2}$, 所以

$$\frac{dN(\theta)}{dt} = \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\theta_i - \theta_i^{cl})^2}} \sum_{i=1}^n [2(\theta_i - \theta_i^{cl}) \frac{d\theta_i}{dt}]$$

而 $\frac{d\theta_i}{dt} = \tilde{\omega}_i$, 由 $\frac{dN(\theta)}{dt} = 0$, 得

$$\sum_{i=1}^n (\theta_i - \theta_i^{cl}) \tilde{\omega}_i = 0$$

参考文献

- [1] Maria G A, Tang C, Kim J. Hybrid Transient Stability Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(2): 384-393.
- [2] Tang C K, Graham C E, EIL-kady M, et al. Transient Stability Index from Conventional Time Domain Simulation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(3): 1524-1530.
- [3] Mansour Y, Vaahedi E, Chang A, et al. B.C. Hydro's On-line Transient Stability Assessment (TSA) Model Development, Analysis, and Post-processing[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(1): 241-253.
- [4] Vaaedi E, Mansour Y, Chang A Y, et al. Enhanced "Second Kick" Methods for On-Line Dynamic Security Assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4): 1976-1982.
- [5] Vaahedi E, Mansour Y, Tse E K. A General Purpose Method for On-line Dynamic Security Assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 13(1): 243-249.
- [6] Chan K W, Dunn R W, Daniels A R. On-line Stability Constraint for Large Complex Power Systems[A]. In: Proceedings of the 4th International Conferences on Advances in Power System Control, Operation and Management[C]. Hongkong:1997: 170-175.
- [7] FANG D Z, Chung T S, David A K. Improved Techniques for Hybird Method in Fast Transient Stability Assessment[J]. IEE Proceedings on Gener, Transm and Distrib, 1997, 144(2): 107-112.
- [8] Fang D Z, Chung T S, David A K. Improved Hybrid Approach to Transient Stability Assessment[J]. IEE Proceedings on Gener, Transm, and Distrib, 2005, 152(2): 201-207.
- [9] Ejebe G C, Jing C, Waight J G, et al. Security Monitor for On-line Dynamic Security Assessment[A]. In: Fourth International Conference on Power System Control and Management (Conf. Publ. No. 421)[C]. 1996. 58 - 64.
- [10] Fu C, Bose A. Contingency Ranking Based on Severity Indices in Dynamic Security Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 980-986.
- [11] 余志文, 白雪峰, 郭志忠, 等. 大容量远距离输电网暂态稳定控制方法探讨[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 57-60.
YU Zhi-wen, BAI Xue-feng, GUO Zhi-zhong, et al. Probe on the Transient Stability Control Method for Heavily Stressed Transmission Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 57-60.
- [12] 余志文. 大容量远距离输电网暂态稳定分级控制方法(博士学位论文)[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003. 44-58.
YU Zhi-wen. Multi-level Transient Stability Control Method for Heavily Stressed Long-distance Transmission Network, Doctoral Dissertation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2003.44-58.

收稿日期: 2007-09-22; 修回日期: 2007-12-27

作者简介:

王宗义 (1971-), 男, 博士, 高级工程师, 从事电力交易及电力市场研究工作; E-mail: zywang0531@hotmail.com

余志文 (1974-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电网调度及运行方式工作;

郭志忠 (1961-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 当前主要研究方向为电力系统分析与控制、电力系统光学测量技术、电网网络分析。

收稿日期: 2007-10-11; 修回日期: 2007-11-08

作者简介:

王冰 (1966-), 男, 讲师, 主要从事电力系统自动化及状态估计的研究;

李积捷 (1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统状态估计方向的研究。E-mail: lijijie-011@163.com

(上接第 4 页 continued from page 4)

- [8] 杨武. 电力系统中基于相量测量技术的状态估计仿真[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.

YANG Wu. Simulated State Estimation Based on Phasor Measurement in Power System[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.