

基于 PMU 分解协调的状态估计算法

陈芳¹, 韩学山¹, 李华东^{2,3}

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 哈尔滨工业大学电气工程及其自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
3. 山东省电力研究院, 山东 济南 250012)

摘要: PMU 至少可实现系统局部可观, 此性质必然产生系统的自动划分, 即出现围绕 PMU 配置点集的若干可观测性子系统。基于这一思路, 从状态估计快速性角度出发, 提出电网分解协调的状态估计快速算法, 分解是指依据 PMU 配置的可观测子系统的划分, 协调是指各子系统如何达到无缝的衔接, 在快速估计下达到与整体估计一样的效果。最后, 以 IEEE-39 节点及 IEEE-118 节点系统对算法进行了验证。

关键词: 电力系统; 状态估计; PMU; 分布式估计

Decomposition and coordination state estimation based PMU

CHEN Fang¹, HAN Xue-shan¹, LI Hua-dong^{2,3}

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
3. Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250002, China)

Abstract: One feature of the PMU measurements is that local estimation can be processed, and the system can be divided automatically into a number of observability sub-systems around PMU. From this idea, this paper proposes decomposition and coordination state estimation algorithm in view of quicker calculating speed. Decomposition relies on the location of PMU, and coordination is responsible for linking different sub-systems smoothly, at last the result of estimation is identical to the integrated estimation while quicker speed is achieved. Finally, it uses IEEE 39 and IEEE 118 bus systems as examples to verify the validity of the study and gives conclusions.

Key words: power system; state estimation; PMU; distributed state estimation

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)17-0044-05

0 引言

电力系统状态估计是能量管理系统(EMS)的重要组成部分,是高级应用软件执行的基础^[1],在该领域无论是理论还是工程实践均有大量的研究成果。随着同步相量测量技术,乃至广域系统在电力系统中的应用,使电压和电流相量直接量测得以实现,该技术对状态估计的影响得到广泛关注^[1~16]。

基于广域量测信息所进行的线性估计^[7,8],是理想化的,尚不具有实用性。因此,计及 SCADA 和 PMU 的混合估计研究更符合实际,也一直是研究热点。由 PMU 的电压相量测量信息,直接将电压幅值和相角作为量测方程,虽算法简单,易于实现,但对估计贡献效果不明显^[9]。通过将电压电相量转换成相应的潮流或电流^[9,10]的方式在迭代过程中增加修正方程,扩大了其对信息矩阵的影响,但本质

上利用的还是电压相量量测,对 PMU 间接提供的支路电流相量量测没有充分利用。文献[11]就电流相量对估计影响进行研究,指出其可提高状态估计的精度。在基于电流相量的研究中,采用非线性估计时,将电压、电流相量转换成支路有功、无功潮流形式,或者相邻节点的电压相量;而采用线性量测方程时,SCADA 量测转换成等效的电流量测^[12],而等效量测的计算需要依赖每次计算得到的状态变量,因此算法退化为迭代算法,且电流相量在转换成直角坐标时会带来了数值稳定的问题^[5]。而无论采用哪种方式进行量测转换,均需按误差传递规律计算其相应的间接量测的误差方差分布。文献[13,14]在充分保留传统状态估计研究成果基础上,利用传统估计结果得到的伪量测与 PMU 的线性量测再次进行估计,但在 PMU 配置数量不多时,由此带来计算效果并不明显。以上种种研究表明,PMU 带

来的混合估计使问题求解及模型建立变得更为复杂, 计算规模增大。

然而, 目前电力系统中基于 SCADA 的状态估计完全可以实施, PMU 配置的目的主要是用于电力系统的快过程监测及安全控制, 因此往往配置在关键节点或关键输电断面上, 实现系统局部可观, 便于对系统运行状况做出快速判断^[18]。可见, PMU 的功效不在于状态估计, 但 PMU 使系统产生了自动划分, 似乎可将复杂系统状态估计自然利用分解协调原理进行, 这样无疑可提高状态估计的速度。因此, 本文在传统状态估计基础之上, 利用 PMU 对网络进行分割, 建立分解协调状态估计模型, 并对各子系统参考点及边界点协调处理进行了详细阐述。最后采用 IEEE-39 及 IEEE-118 节点验证了模型的有效性。

1 问题的总体描述

在统一参照系下, 依据 PMU 配置所对应的量测, 其优越性在于系统实现局部可观, 这也是 PMU 引入电力系统的意义所在。在此背景下, 仅基于 SCADA 系统的状态估计, 可以实现局部估计, 以及利用 PMU 特性的分散估计, 这就是本文的基本思想。

根据 PMU 使系统实现局部可观的性质, 必然使系统可实施分散的估计, 即划分为若干可观测岛以实施分解协调的估计方法。系统划分完全依据 PMU 的配置地点, 以给出划分定义:

PMU 可观测岛: 有直接电气连接的 PMU 配置节点集合的割集;

SCADA 可观测岛: 仅含有依据 SCADA 系统量测量, 且不包含 PMU 配置节点的系统部分节点构成的割集;

边界节点: PMU 可观测岛与 SCADA 可观测岛交集所对应的节点。

上述的示意图见图 1 所示。

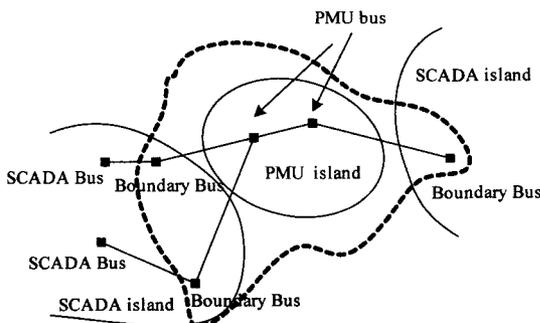


图 1 系统划分示意图

Fig.1 Decomposition of system

根据此解耦方式, 可将系统节点分为三类:

PMU bus, 节点安装有 PMU;

Boundary Bus, 相邻节点至少有一个安装有 PMU;

SCADA Bus, 无 PMU 并且相邻节点也无 PMU。相应节点分别为

$$x_p = [\theta_p \quad V_p]^T$$

$$x_B = [\theta_B \quad V_B]^T$$

$$x_s = [\theta_s \quad V_s]^T$$

将系统量测向量表示为

$$z = [z_s^T \quad z_{bl}^T \quad z_i^T \quad z_{pl}^T \quad z_p^T]^T$$

其中: z_s 为与 SCADA BUS 相关的量测, 包含支路潮流, 节点注入, 节点电压幅值; z_{bl} 为 Boundary Bus 的注入量测及零注入伪量测; z_i 为 PMU Bus 与 Boundary Bus 之间联络线上的潮流量测; z_{pl} 为 PMU Bus 的节点注入; z_{ps} 为 PMU Bus 相关的相量量测, 包括节点电压相量及关联支路电流相量。

依据上述划分, 对 PMU 岛建立量测方程表达式如式 (1)。

$$\begin{bmatrix} z_{ps} \\ z_{pl} \\ z_i \end{bmatrix} = h \begin{bmatrix} x_p \\ x_B \end{bmatrix} + e_a \quad (1)$$

其中: e_a 为量测误差, h 为量测方程的非线性向量函数。

对式(1)进行状态估计, 可得到联络线上潮流 \hat{z}_i , 即相对于 SCADA 岛边界点的注入, 可构造伪量测

$$z_{i-pseudo} = z_{bl} - \hat{z}_i$$

伪量测与其它量测一起形成 SCADA 岛量测方程

$$\begin{bmatrix} z_s \\ z_{i-pseudo} \end{bmatrix} = h \begin{bmatrix} x_s \\ x_B \end{bmatrix} + e_b \quad (2)$$

根据以上分析, 可得到算法流程如下:

(1) 预处理: 根据 PMU 节点安装位置, 对全网进行分割, 得到若干 PMU 及 SCADA 观测岛;

(2) 对 PMU 观测岛进行混合量测估计, 得到联络线上潮流 \hat{z}_i ;

(3) 对 SCADA 岛进行估计;

(4) 协调各子岛参考节及边界点相角, 得到全网统一的状态变量解。

2 几个关键问题的处理

2.1 PMU 局部估计模型

PMU 岛在整个网络中作为独立部分, 可以看做

一个广义节点, 通过该广义节点的割集电流之和为零。

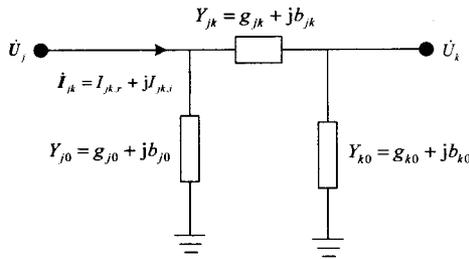


图2 典型π型支路

Fig.2 Typical π-model branch

以典型π型支路为例(图2), 若j,k仅有一端j在岛内, 则流出岛内的电流 $I_c = I_{jk}$ 。

$$\begin{bmatrix} I_{c,r} \\ I_{c,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{jk} + g_{j0} & -(b_{jk} + b_{j0}) & -g_{jk} & b_{jk} \\ b_{jk} + b_{j0} & g_{jk} + g_{j0} & -b_{jk} & -g_{jk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_j \cos \theta_j \\ V_j \sin \theta_j \\ V_k \cos \theta_k \\ V_k \sin \theta_k \end{bmatrix} \quad (3)$$

若jk均在岛内, 该支路流出岛内的电流为

$$\begin{bmatrix} I_{c,r} \\ I_{c,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -g_{j0} & b_{j0} & -g_{k0} & b_{k0} \\ -b_{j0} & -g_{j0} & -b_{k0} & -g_{k0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_j \cos \theta_j \\ V_j \sin \theta_j \\ V_k \cos \theta_k \\ V_k \sin \theta_k \end{bmatrix} \quad (4)$$

当该岛内无注入时, 流出岛内电流代数和为

$$c(x) = \sum I_c = 0 \quad (5)$$

为提高估计精度及收敛速度, 对无注入的PMU岛可建立带有等式约束的状态估计模型

$$\begin{aligned} \min J(x) &= (z - h(x))^T R^{-1} (z - h(x)) \\ \text{s.t. } c(x) &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

式中: R^{-1} 为量测误差阵。

对式(5)构造拉格朗日函数

$$\min L(x) = J(x) + \lambda c(x) \quad (7)$$

式中: λ 为拉格朗日乘子。

对式(7) x, λ 分别求极值, 可得

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial x} &= -H^T R^{-1} (z - h(x)) - C^T \lambda = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} &= -c(x) = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

对该非线性方程组求解, 迭代格式如下:

$$\begin{bmatrix} H^T R^{-1} H & C^T \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^T R^{-1} \Delta z \\ \Delta c \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $\Delta c = -c(x), H = \frac{\partial h(x)}{\partial x}, C = \frac{\partial c(x)}{\partial x}$, 为 $2 \times n$ 维

矢量, n 为岛内待求状态变量个数。

2.2 混合量测匹配问题

在进行状态估计时, 需要指定参考节点, 令其电压相角为 0, 其余节点相角为相对于该参考节点的相角差。对于混合量测系统来说, 增加了 PMU 相角量测, 而该相角量测参考点为全球定位系统 GPS 的参考点, 两者之间需要进行转换。一个简单的方法是在指定安装 PMU 节点做为参考节点, 岛内其它相角量测以该点为参考进行修正

$$\tilde{\delta}_i = \delta_i - \delta_{ref} \quad (10)$$

式中: $\delta_i, \tilde{\delta}_i$ 分别为相角量测绝对值及校正后的值。参与状态估计的相角相应的量测方差则由 σ_i^2 修正为 $2\sigma_i^2$ 。

由于参考节点电压相角没有直接参与状态估计, 亦即没有量测残差, 也就无法采用传统的坏数据识别方法进行识别, 而相角误差对状态估计带来的影响相对于其它量测更为明显, 对于参考节点相角的坏数据可采用文献[17]的方法进行识别。

2.3 参考点的协调

各观测岛分别有自己的参考节点, 并且边界点的状态变量估计值分别由相邻子岛得到多两个不同解, 协调层负责将各岛相角统一到同一参考点上并对边界点进行一次校正。

$$\text{令 } \theta_{co} = [\theta_B^T \quad u^T]^T$$

$u = [u_2 \quad u_3 \quad \dots \quad u_n]$, u_i 是第 i 子岛的参考节点相角, 子岛 1 的参考节点做为全网参考节点 $u_1 = 0$ 。

进而, 协调层估计模型可表达为

$$z_{x\text{-pseudo}} = H_{co} \theta_{co} + e_{co} \quad (11)$$

$z_{x\text{-pseudo}}$ 为各估计子岛的 θ_{co} 估计结果 $\hat{\theta}_{co}$, H_{co} 则是伪量测与状态变量的线性表达, e_{co} 是误差向量, $H_{co} \theta_{co}$ 可详细表述为

$$\theta_{a\text{-pseudo}}^{(i)} = \theta_a - u_i + e_{\theta} \quad (12)$$

$\theta_{a\text{-pseudo}}^{(i)}$ 为 θ_a 在第 i 个子岛的估计结果。各伪量测的量测误差 σ_i^2 为各子岛估计收敛后 G^{-1} 相对应角元素值。

3 算例分析

本文程序为 VC6.0 编制, 程序运行于 cpul.8GHz, 内存 512MB 的 PC 机。分别对 IEEE39 节点及 118 节点系统进行模拟分析。量测数据为系统真值叠加相应的正态分布随机量测误差形成, 量

测误差取自文献 [16] ($\sigma_{\text{voltage}} = 0.004$, $\sigma_{\text{injection}} = 0.01, \sigma_{\text{phasor}} = 0.0001$)。SCADA 量测配置保证可观且无关键量测, 取每条支路两端潮流及节点电压幅值量测。对 IEEE-39 节点系统, PMU 安装位置取自文献[18], 选择节点 1,3,16,18 进行分割, 得到 4 个 SCADA 估计岛, 3 个 PMU 局部估计岛, 见图 3 所示。

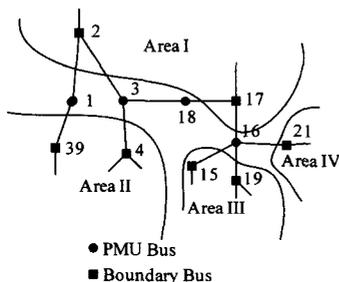


图 3 IEEE-39 Bus 分割图

Fig.3 Decomposition of IEEE-39 bus system

算例分别模拟了无坏数据, 联络线出现一个坏数据; 边界点注入出现坏数据; PMU 电压相角出现坏数据的四种情形。以下为 39 节点系统的详细情况。

case 1: SCADA 量测及 PMU 量测均无坏数据。

对 PMU 量测采用转换成支路潮流量测的方式。系统共有 39 个电压幅值, 92 对潮流量测, 16 对支路潮流间接量测, 总量测数 $m = 255, n = 77$ 。表 1 为集中估计与分布估计结果比较。

表 1 IEEE-39 节点系统估计结果

Tab.1 Result of integrated and coordination SE solutions of IEEE-39 bus system

$J(x)$		运行时间/ms	
集中式	协调估计	集中式	协调估计
16.62	19.14	47	37

分布式估计 $J(x)$ 要大于集中式估计, 这是因为协调层与各子岛之间没有迭代过程产生的, 但由于系统未有坏数据, $J(x)$ 均小于阈值, 在计算时间上, 分布式估计要优于集中式估计。

case 2: 在联络线上产生一个坏数据

联络线 1-2 潮流 P_{12} 真值为 -1.18, 将其替换为 -2.18 进行估计, 在对节点 1 形成的局部 PMU 估计岛进行估计时, $J(x) = 93.9$, 使用最大标准残差法进行识别, P_{12} 的标准残差 $r_N^i = -9.7$, 坏数据被有效识别; 将 P_{12} 的量测替换为 2.18, 得到 $J(x) = 93.39$,

相应的 $r_N^i = 9.67$, 坏数据同样被识别。无论坏数据发生在联络线的哪一端, 在局部估计岛丰富量测条件下, 均可得到校正。

case 3: 边界点注入出现坏数据

在节点 39 处增加一个注入量测, 将真值 $P_{39} = -1.04$ 替换为 -2.04 进行估计, 其中 SCADA 岛估计的目标函数 $J(x) = 58.19$, 相应 $r_N^i = -7.44$, 去掉该坏数据, 重新估计, 目标函数下降为 $J(x) = 1.9$ 。

case 4: PMU 节点电压相角出现坏数据。

节点 3 的相角真值为 $\theta_3 = -0.172204 \text{ rad}$, 当量测数据增加 5° 噪声后进行估计。在使用量测变换的方法进行估计时, $J(x) = 5.4687$, $\hat{\theta}_3 = -0.176646 \text{ rad}$, 估计误差为 0.0044 rad 。如仅使用电压相量进行混合估计 $J(x) = 437.07$, 相角量测标准残差为 $r_N^i = -20.9$ 。说明将直接量测转换为多个相关间接量测时, 相角误差被分摊到多个关联支路上, 降低了对系统的影响。也增加了系统识别坏数据的难度。

在对 118 节点的模拟中, 量测配置仍为支路潮流及节点电压幅值, PMU 配置选取联络线 38-65 两端节点及电机节点 24, 69, 100 共 5 个 PMU。系统分割出 3 个 SCADA 估计岛及 4 个 PMU 估计岛。最大 SCADA 估计岛为 66 个节点。从集中与协调估计结果可以看出, 在无坏数据的情形下, 协调估计目标函数仍然大于集中式估计, 但在计算时间上有明显提高。 H 阵在集中估计时为 908×236 维, 协调估计最大维数 482×137 , 接近集中式估计的一半。

表 2 IEEE-118 节点系统估计结果

Tab.2 Result of integrated and coordination SE solutions of IEEE-118 bus system

$J(x)$		运行时间/ms	
集中式	协调估计	集中式	协调估计
2.43	3.75	312	262

表中协调估计目标函数值略高于集中式估计, 而协调估计的整体收敛速度仍然优于集中式估计。

4 结论

利用 PMU 节点附近量测冗余高及状态量直接可知的特点, 基于 SCADA 系统可观的前提下, 充分考虑当前 PMU 节点安装位置特点, 本文提出了一种基于 SCADA/PMU 混合量测系统的分解协调状态估计方法。经理论研究及算例分析, 该算法有如下特点:

(1) 雅可比矩阵及信息阵规模下降;

- (2) 整体计算速度快;
- (3) 能够处理边界点注入功率;
- (4) 能够协调多观测岛参考点相角。

充分利用传统估计的成果,不需更改程序,只需增加估计前的分割处理及估计结束之后进行各区域之间相角的协调及校正。

由于算法基于分布式计算模式,计算结果与集中混合估计结果不完全相同,但完全能够满足估计精度的要求,在计算速度上,由于本文算例是在单CPU机上进行串行处理,而各SCADA估计岛是完全可以并行处理的,如在可并行处理多任务多cpu机器上运行,其运算速度还可进一步提高。

参考文献

[1] Monticelli. Electric Power System State Estimation[J].Proceedings of the IEEE, 2000,88(2).

[2] Živanović R, et al. Implementation of PMU Technology in State Estimation:an Overview[J]. IEEE Africon, 1996,4(2):24-27.

[3] Thorp J S, et al. Real Time Voltage-phasor Measurements for Stateic State Estimation[J]. IEEE Trans Power Apparatus and Systems, 1985,104(11).

[4] Thorp J S, Phadke A G, Karimi K J. State Estimlatjon with Phasor Measurements[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1986,(1).

[5] 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):104-109. DING Jun-ce, CAI Ze-xiang,WANG Ke-ying. An Overview of State Estimation Based on Wid-area Measurement System[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(7):104-109.

[6] 丁军策, 蔡泽祥, 王克英. 相量测量单元测量值对状态估计中等效电流的量测变换算法的影响[J]. 电网技术, 2005,29 (5) :50-54. DING Jun-ce, CAI Ze-xiang,WANG Ke-ying, Influences of Measured Values From Phasor Measurement Units on Equivalent Current Based Measurement Transform Algorithm In State Estimation[J]. Power System Technology,2005,29(5):50-54.

[7] 李强, 周京阳, 于尔铿, 等. 基于相量量测的电力系统线性状态估计[J].电力系统自动化, 2005,29 (18):28-32. LI Qiang,ZHOU Jing-yang,YU Er-keng,et al.Power System Linear State Estimation Based on Phasor Measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005,29 (18)28-32.

[8] 卫志农,李阳林, 郑玉平, 等.基于混合量测的电力系统线性动态状态估计算法[J].电力系统自动化, 2007, 31(6): 43-47. WEI Zhi-nong, LI Yang-lin, ZHENG Yu-ping. A Mixed Measurement-based Linear Dynamic State Estimation Algorithm for Power Systems[J]. Automaiton of Electric Power Systems, 2007, 31(6): 43-47.

[9] 王克英, 穆钢, 陈学允. 计及 PMU 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): 30-34.

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): 30-34.

[10] 秦晓辉,毕天姝,杨奇逊. 计及 PMU 的混合非线性状态估计新方法[J].电力系统自动化, 2007, 31 (4): 32-36. QIN Xiao-hui, BI Tian-shu, YANG Qi-xun. A New Method for Hybrid Non-linear State Estimation with PMU[J].Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (4): 32-36.

[11] 赵红嘎, 薛禹胜, 汪德星, 等. 计及 PMU 支路电流相量的状态估计模型[J]. 电力系统自动化, 2004,28(17):41-44. ZHAO Hong-ga, XUE Yu-sheng,WANG De-xing,et al. State Estimation Model with PMU Current Phasor Measurements[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004,28(17):41-44.

[12] 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): 58-63. DING Jun-ce,CAI Ze-xiang,WANG Ke-ying. Mixed Measurements State Estimation Based on Wams[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (2): 58-63.

[13] 李强, 周东阳, 于尔铿, 等.基于混合量测的电力系统状态估计混合算法[J].电力系统自动化, 2005, 29 (19): 37-41. LI Qiang,ZHOU Jing-yang,YU Er-keng, et al.A Hybrid Algorithm for Power System State Estimation Based on PMU Measurement and SCADA Measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (19): 37-41.

[14] ZHOU Ming,et al.An Alternative for Including Phasor Measurements in State Estimators[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006,21(4).

[15] JIANG Wei-qing,et al. A Distributed State Estimator Utilizing Synchronized Phasor Measurements[J].IEEE Trans on Power Systems, 2007,22(2).

[16] ZHAO Liang, Abur Ali. Multiarea State Estimation Using Synchronized Phasor Measurements[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007,22(2).

[17] Implementation of Phasor Measurements in State Estimator at Sevillana de Electricidad[Z].

[18] 李大虎, 曹一家.基于 SCADA/PMU 混合量测的广域动态实时状态估计方法[J].电网技术, 2007,31(6):76-82. LI Da-hu,CAO YI-Jia. Wide-area Real-time Dynamic State Estimation Method Based on Hybrid SCADA/PMU Measurements[J]. Power System Technology, 2007,31(6):76-82.

收稿日期: 2008-09-28; 修回日期: 2008-10-23

作者简介:

陈芳(1973-),女,博士研究生,主要从事电力系统调度自动化的研究;E-mail:cfunix@mail.sdu.edu.cn

韩学山(1959-),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统分析与控制的教学和研究工作。