

基于断路器零阻抗特性的 PMU 量测状态估计方法

陈亮, 毕天姝, 薛安成, 杨奇逊

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 互感器和通信系统噪声使得相量测量单元(PMU)量测量存在随机误差,使得 PMU 无法准确监测系统动态过程,因此提出一种动态过程中基于 PMU 量测的状态估计方法。针对故障后网络拓扑改变,集中式状态估计不再可行的问题,提出适用于动态过程的分布式状态估计框架;基于零阻抗特性构造了断路器状态未知情况下的非线性虚拟量测方程,进一步提升冗余度;建立了动态过程中计及断路器零阻抗虚拟量测的状态估计模型,推导了雅可比矩阵的具体形式,并采用非线性加权最小二乘(NWLS)对模型进行求解。仿真分析表明该方法不但能够对节点电压相量和断路器电流相量进行估计,同时能够确定状态未知断路器的开合状态,同时算法满足应用的实时性要求。

关键词: 断路器; 状态估计; 动态过程; 零阻抗特性; 相量测量单元

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.05.016

0 引言

同步相量测量单元 PMU (Phasor Measurement Unit) 能够监测系统动态过程^[1-6],在电力系统动态安全监测中得到了广泛应用。然而,由于互感器和通信系统噪声的影响,PMU 量测量不可避免地存在随机误差,这可能使得 PMU 无法准确监测系统动态过程,甚至导致控制系统给出错误的控制指令。因此,针对 PMU 量测量,开展系统动态过程的状态估计方法研究对进一步推广基于 PMU 的应用具有重要价值。

已有计及 PMU 量测信息的电力系统状态估计研究^[7-10]主要针对 PMU 应用初期系统可观性不足问题,结合测控终端 RTU (Remote Terminal Unit) 的量测,进行混合非线性状态估计。这些方法尝试利用高精度 PMU 量测信息提高传统静态断面状态估计的精度,没有涉及系统动态过程量测信息精度的提升。

近年来,我国 500 kV 及以上电压等级变电站和 100 MW 及以上发电机均装设了 PMU,这使得完全基于 PMU 量测的状态估计成为了可能。文献[11-12]提出一种变电站-调度中心两级分布式线性状态估计的体系结构和方法,但该方法仍针对的是静态状态估计问题,不涉及系统动态过程。

然而 PMU 主要用于系统动态过程监测,而且系统动态条件下电气量变化范围更大、电磁环境更为复杂,PMU 量测受各种干扰因素影响造成随机误差

的可能性更大。因此近年来,基于 PMU 量测的系统动态过程状态估计方法逐渐引起人们的关注。文献[13]给出了一种系统机电暂态过程中分布式发电机动态状态估计方法。由于系统故障后的动态过程中,网络拓扑可能发生变化,且难以实时获得,传统的集中式状态估计方法无法适用。如何提升系统动态过程中变电站内 PMU 量测的精度仍是一个悬而未决的问题。

本文针对故障后网络拓扑改变,集中式状态估计不再可行的问题,提出适用于动态过程的分布式状态估计框架;并在系统发生故障后,断路器状态未知的情况下,根据断路器零阻抗特性构造了断路器的非线性零阻抗虚拟量测方程;进一步建立了动态过程中考虑断路器零阻抗特性的状态估计模型,推导了雅可比矩阵的具体形式,并采用非线性加权最小二乘 NWLS (Nonlinear Weighted Least Square) 对模型进行求解。将所提出的状态估计方法应用于 IEEE 39 节点测试系统,结果表明,该方法不但具有良好的滤波效果,还能够对断路器的状态进行判断。所提算法满足应用的实时性要求,具有一定现实意义。

1 分布式状态估计总体框架

电力系统发生故障后,断路器动作,状态改变,难以实时获得动态状态,传统的在调度中心基于网络拓扑结构进行集中式状态估计的方法已经不再可行。这就需要研究动态过程中,断路器状态未知情况下的电力系统状态估计的框架结构。

针对上述问题,本文构建了一种电力系统动态过程中分布式状态估计框架,如图 1 所示。该框架结构主要包括 3 个部分:发电厂内的发电机状态量动态估计、变电站内的计及零阻抗特性状态估计和调

收稿日期:2013-10-28;修回日期:2014-04-02

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2012-CB215206);国家自然科学基金资助项目(51222703);高等学校博士点基金资助项目(20120036110009);“111”项目(B08013)

Project supported by the Major State Basic Research Development Program of China (973 Program) (2012CB215206), the National Natural Science Foundation of China (51222703), the Doctoral Program Foundation of Institutions of Higher Education of China (20120036110009) and 111 Program (B08013)

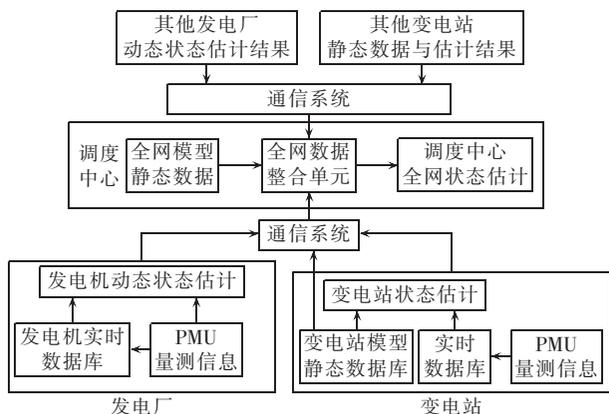


图 1 分布式状态估计架构

Fig.1 Frame of distributed state estimation

度中心全网状态估计。

发电机状态量动态状态估计主要利用系统动态过程中发电机转子内在惯性使得发电机状态量不能突变的特性作为约束,进一步提升估计精度,这部分研究工作已经取得成果^[6]。变电站内状态估计主要针对故障后断路器状态未知情况下,在变电站内利用 PMU 量测信息和断路器零阻抗特性对节点电压和断路器电流相量进行估计并确定断路器状态;将估计后的数据以及静态数据库中的拓扑信息上送至调度中心进行全网状态估计。这部分研究工作将在本文展开。调度中心的全网模型静态数据库含有系统中所有变电站、发电厂以及线路的拓扑信息。调度中心的全网数据整合单元利用这些拓扑信息对各个变电站和发电厂上送的估计结果和变电站模型静态数据进行整合,得到全网的节点-支路拓扑结构以及节点电压和支路电流相量,最后进行全网线性状态估计。全网状态估计的难点在于全网数据整合,后续工作中将对此展开研究。

2 基于零阻抗特性的状态估计模型

2.1 断路器模型

电力系统状态估计的基本原理就是利用量测冗余度对系统状态量进行估计。变电站中存在的断路器阻抗很小,在对其建立数学模型的过程中,可以假设断路器阻抗为 0。如果利用该特性进行状态估计的虚拟量测则可以更进一步提高冗余度,从而提升估计精度。将变电站中每台断路器都作为变电站拓扑结构中的 1 条支路,断路器两侧分别作为 2 个节点建立模型。假设变电站中某断路器编号为 k , 两端节点编号分别为 i 和 j , 其模型如图 2 所示。由于断路器阻抗为 0, 如果仅仅将节点电压相量作为状态变量, 则无法得到电流的估计值。针对该问题, 将断路器两侧节点电压幅值和相角以及断路器支路电流实部和虚部同时作为状态变量, 则状态量 x 为:

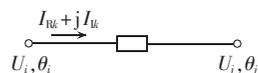


图 2 断路器模型

Fig.2 Model of circuit breaker

$$x = [U_i \ U_j \ \theta_i \ \theta_j \ I_{Rk} \ I_{ik}]^T \quad (1)$$

其中, U_i, U_j 和 θ_i, θ_j 分别为断路器 k 两端节点 i 和 j 的电压幅值和相角; I_{Rk} 和 I_{ik} 分别为流过断路器 k 的电流的实部和虚部, 规定电流正方向为从断路器两侧编号较小的节点流向编号较大的节点。

在系统运行过程中, 断路器有断开与闭合 2 种状态。系统故障后, 断路器状态发生改变, 难以实时获得, 此时, 断路器实际状态未知。根据对断路器状态的掌握情况将断路器分为闭合、断开和状态未知 3 种类型, 数量分别为 N_1, N_2 和 N_3 。分别对这 3 种类型的断路器建立模型。

a. 闭合型断路器 ($k=1, 2, \dots, N_1$)。由于断路器阻抗为 0, 闭合断路器两侧节点电压的幅值差和相角差必然为 0, 即:

$$\begin{cases} U_i - U_j = 0 \\ \theta_i - \theta_j = 0 \end{cases} \quad (2)$$

b. 断开型断路器 ($k=N_1+1, N_1+2, \dots, N_1+N_2$)。流过断开型断路器的电流必然为 0, 即:

$$\begin{cases} I_{Rk} = 0 \\ I_{ik} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

c. 状态未知的断路器 ($k=N_1+N_2+1, N_1+N_2+2, \dots, N$)。发生故障后, 断路器状态发生改变, 如果断路器的实际状态无法实时获得, 则式(2)和(3)的约束条件就无法继续使用。然而, 由于断路器阻抗为 0, 若断路器闭合, 则其两端节点电压的幅值差和相角差为 0; 若断路器断开则没有电流流过, 则其电流实部和虚部为 0。因此, 无论断路器处于何种状态, 断路器电流相量与两端节点电压幅值差和相角差的乘积总是为 0。利用该特性, 将断路器电流实部和虚部与两端节点电压的幅值差和相角差分别相乘, 构造断路器状态未知情况下, 零阻抗约束条件:

$$\begin{cases} (U_i - U_j)I_{Rk} = 0 \\ (U_i - U_j)I_{ik} = 0 \\ (\theta_i - \theta_j)I_{Rk} = 0 \\ (\theta_i - \theta_j)I_{ik} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中, N 为变电站中断路器总数, $N=N_1+N_2+N_3$ 。无论断路器处于断开还是闭合状态, 式(4)都成立。

将断路器在闭合、断开以及状态未知情况下的约束条件作为虚拟量测, 可以进一步提升状态估计量测冗余度, 进而提升估计精度。将节点电压相量和断路器电流相量的 PMU 量测值以及断路器零阻抗虚拟量测量和节点零注入电流虚拟量测量共同作为

状态估计的量测量。给出各量测量的量测方程并求得雅可比矩阵,就可以利用NWLS进行求解,得到估计结果。

2.2 量测方程

状态估计中的量测量包括节点电压幅值和相角、断路器电流实部和虚部以及变电站进出线电流实部和虚部。此外,状态估计中还应考虑节点零注入电流虚拟量测和断路器的零阻抗特性虚拟量测,进一步提升量测冗余度。要利用量测量进行状态估计,需要得到量测量与状态量之间的函数关系,即量测方程。由于考虑了节点零注入电流虚拟量测,将节点分为含有进出线的非零注入节点和零注入节点2类,2类节点的个数分别为 N_4 和 N_5 。

对于非零注入节点,进出线电流实部和虚部量测量分别为 I_{Rinp} 和 I_{Iinp} ,规定注入节点电流为正,则 I_{Rinp} 和 I_{Iinp} 与状态量之间的函数关系为:

$$\begin{cases} I_{Rinp} = \sum_{k \in p} I_{Rk} \\ I_{Iinp} = \sum_{k \in p} I_{Ik} \end{cases} \quad p=1,2,\dots,N_4 \quad (5)$$

其中, I_{Rinp} 和 I_{Iinp} 分别为含有进出线的非零注入节点的电流测量的实部和虚部; $k \in p$ 表示断路器 k 与节点 p 相连。

对于零注入节点,虚拟量测方程为:

$$\begin{cases} 0 = \sum_{k \in q} I_{Rk} \\ 0 = \sum_{k \in q} I_{Ik} \end{cases} \quad q=N_4+1,\dots,N_L \quad (6)$$

其中, N_L 为变电站中节点总数, $N_L=N_4+N_5$; $k \in q$ 表示断路器 k 与节点 q 相连。

电压幅值和相角的量测值 U_{zi} 和 θ_{zi} 与状态量之间的函数关系为:

$$\begin{cases} U_{zi} = U_i \\ \theta_{zi} = \theta_i \end{cases} \quad i=1,2,\dots,N_L \quad (7)$$

断路器的电流实部和虚部的量测 I_{Rzk} 和 I_{Lk} 与状态量之间的函数关系为:

$$\begin{cases} I_{Rzk} = I_{Rk} \\ I_{Lk} = I_{Ik} \end{cases} \quad k=1,2,\dots,N \quad (8)$$

此外,量测方程还包括断路器的零阻抗特性虚拟量测。因此,式(2)—(8)共同构成了基于断路器零阻抗特性的状态估计量测方程:

$$\begin{aligned} z &= h(x) + v \\ z &= [U_z \ \theta_z \ I_{Rz} \ I_{Lz} \ I_{Rin} \ I_{Lin} \ \mathbf{O}]^T \\ x &= [U \ \theta \ I_R \ I_I]^T \\ U_z &= [U_{z1} \ U_{z2} \ \dots \ U_{zN_L}]^T, \ \theta_z = [\theta_{z1} \ \theta_{z2} \ \dots \ \theta_{zN_L}]^T \\ I_{Rz} &= [I_{Rz1} \ I_{Rz2} \ \dots \ I_{RzN}]^T, \ I_{Lz} = [I_{Lz1} \ I_{Lz2} \ \dots \ I_{LzN}]^T \\ I_{Rin} &= [I_{Rin1} \ I_{Rin2} \ \dots \ I_{RinN_4}]^T, \ I_{Lin} = [I_{Lin1} \ I_{Lin2} \ \dots \ I_{LinN_4}]^T \\ U &= [U_1 \ U_2 \ \dots \ U_{N_L}]^T, \ \theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_{N_L}]^T \\ I_R &= [I_{R1} \ I_{R2} \ \dots \ I_{RN}]^T, \ I_I = [I_{I1} \ I_{I2} \ \dots \ I_{IN}]^T \end{aligned} \quad (9)$$

其中, z 为量测向量; h 为非线性量测方程; x 为状态

向量; \mathbf{O} 为零向量,维数为 $1 \times (2N_1+2N_2+4N_3+2N_5)$; v 为量测误差,其满足均值为0、方差为 σ^2 的正态分布。

NWLS状态估计中需要用量测误差方差矩阵的逆矩阵作为权重矩阵。因此,需要得到各量测量的量测误差方差。对于节点电压幅值和相角直接量测,误差方差就是幅值、相角PMU量测误差方差。零注入电流虚拟量测和零阻抗特性虚拟量测通常认为是绝对准确的量测,可以选取一个较小的正数作为量测误差方差。由于PMU电流相量测量为电流幅值和相角,而状态估计中采用的是电流实部和虚部,因此,需要将极坐标下的PMU电流相量测量转化至直角坐标下,相应的量测误差方差也需要根据误差传递公式^[14]进行转换。将PMU量测和虚拟量测误差方差作为对角元素形成量测误差方差矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} R_U & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{In} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, R_U 和 R_I 分别为节点电压和断路器电流量测误差方差阵; R_{In} 为进出线电流量测误差方差阵; R_0 为虚拟量测误差方差阵。

得到量测误差方差矩阵后,对方差矩阵求逆就是NWLS量测量的权重矩阵。对量测方程关于各状态量求偏导数,就可以得到雅可比矩阵,进而就能够利用NWLS进行状态估计。

3 雅可比矩阵的计算

NWLS状态估计中需要利用量测量修正方程对状态量进行迭代修正,最终得到状态量估计值。量测量修正方程为:

$$\begin{aligned} \Delta z &= H \Delta x \\ \Delta z &= [\Delta Z_p \ \Delta I_{Rin} \ \Delta I_{Lin} \ \mathbf{O}_1]^T \\ \Delta x &= [\Delta U \ \Delta \theta \ \Delta I_R \ \Delta I_I]^T \end{aligned} \quad (11)$$

其中, H 为量测方程的 $m \times n$ 维雅可比矩阵, m 和 n 分别为量测量维数和状态量维数; Δz 和 Δx 分别为量测量和状态量的修正量; ΔZ_p 为节点电压幅值和相角以及断路器电流实部和虚部量测量修正量; ΔI_{Rin} 和 ΔI_{Lin} 分别为进出线电流量测量修正量; ΔU 、 $\Delta \theta$ 、 ΔI_R 和 ΔI_I 分别为节点电压和支路电流相量的修正量; \mathbf{O}_1 为 $4N_3 \times 1$ 维零矩阵。将式(11)展开为下列形式:

$$\begin{bmatrix} \Delta Z_p \\ \Delta I_{Rin} \\ \Delta I_{Lin} \\ \mathbf{O}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ H_{inR} \\ H_{inI} \\ H_0 \end{bmatrix} \Delta x \quad (12)$$

$$H_{inR} = [\mathbf{O}_3 \ H_{in} \ \mathbf{O}_4]^T$$

$$H_{inI} = [\mathbf{O}_5 \ H_{in}]^T$$

其中, E_1 为 $2(N_L+N) \times 1$ 维单位矩阵; H_{inR} 和 H_{inI} 分别为进出线电流实部和虚部量测的雅可比矩阵; \mathbf{O}_2 —

\mathbf{O}_5 均为零矩阵, 维数分别为 $2(N_3+N_1+N_2+2N_3) \times 1$ 、 $N_5 \times 2N_L$ 、 $N_5 \times N$ 、 $N_5 \times (2N_L+N)$; \mathbf{H}_0 为虚拟量测的雅可比矩阵, 由零注入电流以及断路器零阻抗特性虚拟量测雅可比矩阵组成, 表达式如式(13)所示。

$$\mathbf{H}_0 = \begin{bmatrix} \mathbf{H}'_{in0} \\ \mathbf{H}'_{BC} \\ \mathbf{H}'_{BO} \\ \mathbf{H}_{BU} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{H}'_{in0} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_6 & \mathbf{O}_6 & \mathbf{H}_{in0} & \mathbf{O}_4 \\ \mathbf{O}_6 & \mathbf{O}_6 & \mathbf{O}_4 & \mathbf{H}_{in0} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H}'_{BC} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{BC} & \mathbf{O}_7 & \mathbf{O}_8 & \mathbf{O}_8 \\ \mathbf{O}_7 & \mathbf{H}_{BC} & \mathbf{O}_8 & \mathbf{O}_8 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H}'_{BO} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_9 & \mathbf{O}_9 & \mathbf{H}_{BO} & \mathbf{O}_{10} \\ \mathbf{O}_9 & \mathbf{O}_9 & \mathbf{O}_{10} & \mathbf{H}_{BO} \end{bmatrix}$$

其中, \mathbf{H}_{in0} 为节点零注入电流实部和虚部虚拟量测雅可比矩阵; \mathbf{H}_{BC} 、 \mathbf{H}_{BO} 和 \mathbf{H}_{BU} 分别为断路器闭合、断开和状态未知情况下虚拟量测的雅可比矩阵; \mathbf{O}_6 — \mathbf{O}_{10} 均为零矩阵, 维数分别 $N_5 \times N_L$ 、 $N_1 \times N_L$ 、 $N_1 \times N$ 、 $N_2 \times N_L$ 、 $N_2 \times N$ 。

对于进出线电流量测量 \mathbf{I}_{R4} 和 \mathbf{I}_{L4} , 式(12)中雅可比矩阵 \mathbf{H}_m 的第 i 行第 k 列元素 h_{imk} 取值为:

$$h_{imk} = \begin{cases} 1 & i < j \\ -1 & i > j \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

其中, i, j 为断路器 k 两端的节点; $i=1, 2, \dots, N_4$ 。

对于式(6)所示的节点零注入电流实部和虚部虚拟量测, 式(13)中雅可比矩阵 \mathbf{H}_{in0} 中的第 i 行第 k 列元素 h_{in0ik} 取值为:

$$h_{in0ik} = \begin{cases} 1 & i+N_4 < j \\ -1 & i+N_4 > j \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

其中, $i+N_4$ 表示断路器 k 的端点; $i=1, 2, \dots, N_5$ 。

对于式(2)所描述的闭合断路器零阻抗虚拟量测, 式(13)中雅可比矩阵 \mathbf{H}_{BC} 的第 k 行第 i 列元素 h_{BCki} 为:

$$h_{BCki} = \begin{cases} 1 & i < j \\ -1 & i > j \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

其中, $k=1, 2, \dots, N_1$ 。

对于式(3)所描述的断路器断开虚拟量测, 式(13)中雅可比矩阵 \mathbf{H}_{BO} 为:

$$\mathbf{H}_{BO} = [\mathbf{O}_{11} \quad \mathbf{E}_2 \quad \mathbf{O}_{12}] \quad (17)$$

其中, \mathbf{O}_{11} 、 \mathbf{O}_{12} 分别为 $N_2 \times N_1$ 维、 $N_2 \times N_3$ 维的零矩阵; \mathbf{E}_2 为 $N_2 \times N_2$ 维单位矩阵。

对于式(4)所描述的断路器状态不确定情况下的虚拟量测雅可比矩阵计算, 先将式(4)写为如下形式:

$$\mathbf{h}_{BU}(\mathbf{x}) = 0 \quad (18)$$

则式(13)中的雅可比矩阵 \mathbf{H}_{BU} 为:

$$\mathbf{H}_{BU} = [\mathbf{H}_{BU}^U \quad \mathbf{H}_{BU}^\theta \quad \mathbf{H}_{BU}^R \quad \mathbf{H}_{BU}^I] \quad (19)$$

$$\mathbf{H}_{BU}^U = \frac{\partial \mathbf{h}_{BU}}{\partial \mathbf{U}}, \quad \mathbf{H}_{BU}^\theta = \frac{\partial \mathbf{h}_{BU}}{\partial \boldsymbol{\theta}}$$

$$\mathbf{H}_{BU}^R = \frac{\partial \mathbf{h}_{BU}}{\partial \mathbf{I}_R}, \quad \mathbf{H}_{BU}^I = \frac{\partial \mathbf{h}_{BU}}{\partial \mathbf{I}_I}$$

其中, \mathbf{H}_{BU}^U 和 \mathbf{H}_{BU}^θ 均为 $4N_3 \times N_L$ 维矩阵; \mathbf{H}_{BU}^R 和 \mathbf{H}_{BU}^I 均为 $4N_3 \times N$ 维矩阵。式(19)中各元素的取值如式(20)~(23)所示。

$$\begin{cases} h_{4k-3,i}^U = I_{Rk+N_1+N_2} \\ h_{4k-3,j}^U = -I_{Rk+N_1+N_2} \\ h_{4k-2,i}^U = I_{Lk+N_1+N_2} \\ h_{4k-2,j}^U = -I_{Lk+N_1+N_2} \end{cases} \quad k=1, 2, \dots, N_3 \quad (20)$$

其中, i, j 表示断路器 $k+N_1+N_2$ 两端的节点。

$$\begin{cases} h_{4k-1,i}^\theta = I_{Rk+N_1+N_2} \\ h_{4k-1,j}^\theta = -I_{Rk+N_1+N_2} \\ h_{4k,i}^\theta = I_{Lk+N_1+N_2} \\ h_{4k,j}^\theta = -I_{Lk+N_1+N_2} \end{cases} \quad k=1, 2, \dots, N_3 \quad (21)$$

其中, i, j 表示断路器 $k+N_1+N_2$ 两端的节点。

$$\begin{cases} h_{4k-3,k+N_1+N_2}^R = U_i - U_j \\ h_{4k-1,k+N_1+N_2}^R = \theta_i - \theta_j \end{cases} \quad k=1, 2, \dots, N_3 \quad (22)$$

其中, i, j 表示断路器 $k+N_1+N_2$ 两端的节点。

$$\begin{cases} h_{4k-2,k+N_1+N_2}^I = U_i - U_j \\ h_{4k,k+N_1+N_2}^I = \theta_i - \theta_j \end{cases} \quad k=1, 2, \dots, N_3 \quad (23)$$

其中, i, j 表示断路器 $k+N_1+N_2$ 两端的节点。

得到量测误差方差矩阵和雅可比矩阵后, 就可以利用 NWLS 对状态量进行迭代计算, 最终得到估计值。迭代计算公式为:

$$\Delta \mathbf{x}_k = (\mathbf{H}_k^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}_k)^{-1} \mathbf{H}_k^T \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}_k)] \quad (24)$$

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \Delta \mathbf{x}_k \quad (25)$$

当 $|\mathbf{x}_k|$ 中最大的元素小于给定值 ε 时, 迭代结束。最后一次迭代得到的状态量就是最终的估计值。

4 仿真研究

利用 IEEE 39 节点测试系统对所提出的状态估计方法进行仿真研究。该测试系统中节点 16 的具体接线形式如图 3 所示, 图中下方的图形为虚线框内部分的放大, 其中断路器左侧箭头表示流过断路器电流的正方向。利用 Matpower 潮流程序计算结果作为真值, 在真值的基础上叠加均值为 0 的高斯白噪声作为量测值。根据电力系统实时动态监测系统技术规范^[15]的规定, PMU 相角量测误差标准差通常为 0.2° , 即 0.0035 rad ; 幅值量测误差标准差为 0.2% , 即 0.002 。因此, 相角和幅值所叠加的高斯白噪声标准差分别为 0.0035 rad 和 0.002 。虚拟量测的误差方差比 PMU 量测低一个数量级, 选为 10^{-8} 。断路器 9 的实际状态为闭合, 计算过程中假设其状态不确定。

状态量估计结果见表 1、2, 其中电流、电压均为标幺值。可以看出, 所有节点的电压幅值和相角估计值都相等, 这是由于考虑了断路器的零阻抗特性。对

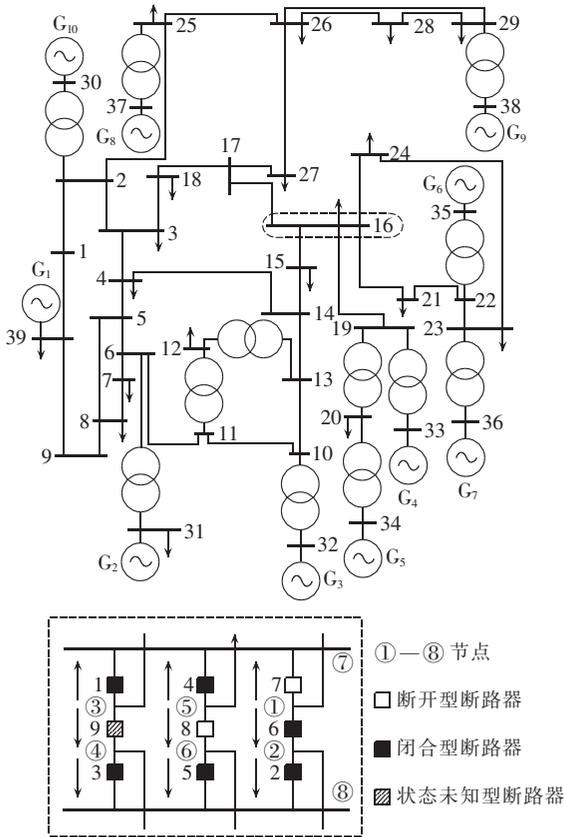


图 3 IEEE 39 节点测试系统
Fig.3 IEEE 39-bus test system

表 1 节点状态量估计结果

Tab.1 Results of nodes state estimation

节点	U	θ/rad
1	1.0317	-0.1758
2	1.0317	-0.1758
3	1.0317	-0.1758
4	1.0317	-0.1758
5	1.0317	-0.1758
6	1.0317	-0.1758
7	1.0317	-0.1758
8	1.0317	-0.1758

表 2 断路器状态量估计结果

Tab.2 Results of breakers state estimation

断路器	I_R	I_I
1	3.0828	-0.8639
2	3.4170	-1.4181
3	-7.6278	2.6948
4	-3.0826	0.8636
5	4.2108	-1.2765
6	0.2433	-0.9995
7	0	0
8	0	0
9	-5.2899	0.8388

于闭合断路器 1—6,其两端节点的电压幅值和相角都相等;对于状态不确定的断路器 9,则一定满足式(4)所示的虚拟量测,由于其实际状态为闭合,因此,其两端节点电压相量也必然相等。同时,流过断路器

7 和 8 的电流实部和虚部的估计结果为 0,这是因为断路器为断开状态,满足式(3)所示的虚拟量测。

此外,由估计结果可以看出,断路器 9 两侧节点的电压幅值和相角均相等,且电流也非零,由此可以判断断路器 9 的状态为闭合。

为了获取量化的估计指标,定义滤波系数 η :

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^M (S_i^E - S_i^T)^2}{\sum_{i=1}^M (S_i^M - S_i^T)^2} \quad (26)$$

其中, M 为量测量个数; S_i^E 、 S_i^T 和 S_i^M 分别为量测量的估计值、真值和测量值。经过 300 次计算取平均值,得到了较为稳定的数值 0.2729。可见,本文提出的状态估计方法能够有效滤除量测量的随机误差。

进一步对算法的实时性和收敛性进行分析。通过 IEEE 39 节点测试系统对本文的方法进行仿真验证,单步计算时间约为 0.0047 s,能够满足系统动态监控的实时性需求。由于本文提出的分布式状态估计是针对每一个变电站单独实施,因此,随着系统规模的扩大,每个变电站内基于零阻抗特性的状态估计计算速度不会发生变化。此外,非线性最小二乘的收敛条件 ε 设置为 10^{-8} ,电压幅值和相角的初值分别设为 1 和 0;电流相量初值均采用量测值。算法经过 2 次迭代就达到收敛条件。2 次迭代状态量残差绝对值最大值 $|\Delta x_k|$ 分别为 0.1762 和 3.2×10^{-10} 。可见,算法具有较强的收敛性。

5 结语

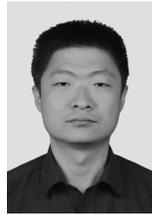
针对故障后网络拓扑结构改变,难以实时获得,传统集中式状态估计不可行的问题,提出了一种系统动态过程中基于 PMU 量测的分布式状态估计框架结构。充分考虑断路器的零阻抗特性约束条件,在变电站内进行状态估计,并将估计结果上送至调度中心。对于故障后状态未知的断路器,利用零阻抗特性对其构造虚拟量测方程,提升冗余度。仿真分析表明,该方法不仅具有较好的滤波效果,同时能够根据估计结果判断出状态未知的断路器的实际开合状态。算法能够满足实时性需求,并可靠收敛,具有一定的现实意义。

参考文献:

[1] BURNETT R O, BUTTS M M, CEASE T W, et al. Synchronized phasor measurements of a power system event[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(3): 1643-1650.
 [2] MARTIN K E, BENMOUYAL G, ADAMIAK M G, et al. IEEE standard for synchrophasors for power systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(1): 73-77.
 [3] 丁剑,白晓民,王文平,等. 电力系统中基于 PMU 同步数据的应用研究综述[J]. 继电器, 2006, 34(6): 78-84.

- DING Jian, BAI Xiaomin, WANG Wenping, et al. Overview of application research based on synchronous data measured by PMUs in power system[J]. Relay, 2006, 34(6): 78-84.
- [4] 刘灏, 毕天姝, 杨奇逊. 数字滤波器对PMU动态行为的影响[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 49-57.
- LIU Hao, BI Tianshu, YANG Qixun. The impact of digital filter on the PMU dynamic performance[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 49-57.
- [5] 刘灏, 毕天姝, 周星, 等. 电力互感器对同步相量测量的影响[J]. 电网技术, 2011, 35(6): 176-182.
- LIU Hao, BI Tianshu, ZHOU Xing, et al. Impact of instrument transformers on synchronous phasor measurement[J]. Power System Technology, 2011, 35(6): 176-182.
- [6] PHADKE A G. Synchronized phasor measurements in power systems[J]. IEEE Computer Applications in Power, 1993, 6(2): 10-15.
- [7] 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 Junce, CAI Zexiang, WANG Keying. An overview of state estimation based on wide area measurement system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7): 98-103.
- [8] 秦晓辉, 毕天姝, 杨奇逊. 计及PMU量测信息的状态估计快速解耦新方法[J]. 华北电力大学学报, 2008, 35(2): 1-5.
- QIN Xiaohui, BI Tianshu, YANG Qixun. Fast decoupling method for state estimation with PMU measurements[J]. Journal of North China Electric Power University, 2008, 35(2): 1-5.
- [9] 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): 37-40.
- ZHAO Hongga, XUE Yusheng, WANG Dexing, et al. State estimation model with PMU current phasor measurements[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(17): 37-40.
- [10] 卢志刚, 徐世范, 史增洪, 等. 部分电压和电流相量可量测时电压相量的状态估计[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(1): 42-44.
- LU Zhigang, XU Shifan, SHI Zenghong, et al. State estimation of voltage phasors based on part of voltage and current phasors measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(1): 42-44.
- [11] YANG Tao, SUN Hongbin, BOSE A. Transition to a two-level linear state estimator: part I architecture[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 46-53.
- [12] YANG Tao, SUN Hongbin, BOSE A. Transition to a two-level linear state estimator: part II algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 54-62.
- [13] 秦晓辉, 毕天姝, 杨奇逊. 基于WAMS的电力系统机电暂态过程动态状态估计[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 19-25.
- QIN Xiaohui, BI Tianshu, YANG Qixun. Dynamic state estimator based on wams during power system transient process[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 19-25.
- [14] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981: 38-44.
- [15] 国家电网公司. Q/GDW131—2006 电力系统实时动态监测系统技术规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

作者简介:



陈亮

陈亮(1984-),男,河北邯郸人,博士研究生,研究方向为电力系统动态状态估计(E-mail: ch.lg@163.com);

毕天姝(1973-),女,河南济源人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统保护与控制、广域同步相量测量技术及其应用等(E-mail: tsbi@ncepu.edu.cn);

薛安成(1979-),男,江苏常熟人,副教授,博士,主要从事电力系统安全分析和控制的工作;

杨奇逊(1937-),男,上海人,中国工程院院士,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统保护与控制、变电站综合自动化的研究工作。

State estimation based on PMU measurements considering zero-impedance characteristics of circuit breaker

CHEN Liang, BI Tianshu, XUE Ancheng, YANG Qixun

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The random errors of PMU (Phasor Measurement Unit) measurements due to the noises existing in transformers and communication system make the precise monitoring of power system during dynamic process impossible. A method of state estimation based on the PMU measurements during dynamic process is proposed, which adopts the distributed state estimation instead of the centralized state estimation due to the change of grid topology because of the fault, establishes the suppositional nonlinear measurement functions for the circuit breakers with unknown states based on the zero-impedance characteristics to further improve the redundancy, builds the dynamic process state estimation model including the suppositional measurements of circuit breakers, deduces the detailed form of Jacobin matrix, and applies the NWLS (Nonlinear Weighted Least Square) to solve the model. The simulative analysis shows that, satisfying the real-time requirement, the proposed method not only estimates the phasors of node voltage and breaker current, but also determines the open-close state of breakers.

Key words: electric circuit breakers; state estimation; dynamic process; zero-impedance characteristics; phasor measurement unit