

基于 PMU 的状态估计的研究

郑相华,米增强,赵洪山,梁海平

(华北电力大学电力工程系,河北 保定 071003)

摘要: 传统的状态估计是基于单相纯正弦模型的,但实际电力系统的三相并不是完全对称,这就导致了传统的状态估计存在着固有的误差。随着基于 GPS 同步相量测量单元(PMU)的应用和计算机技术的发展,该文提出了一种以 PMU 为基础的三相状态估计和谐波状态估计算法以消除这种固有误差。利用 PMU 的电压幅值测量值和相角测量值与 SCADA 原有的测量值构成的混和量测系统一起用于状态估计,从而提高网络的可观测性及状态估计的精度,来弥补传统状态估计的不足。所以这种算法可根本解决系统三相不平衡和状态向量非纯正弦带来的误差问题。最后讨论了对该算法的评估方法。

关键词: 相量测量单元(PMU); 状态估计; 谐波; 电力系统

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)17-0016-04

0 引言

电力系统状态估计自从 20 世纪 60 年代应用于电力系统以来,日益受到人们的重视。当前调度自动化水平正在不断提高,状态估计已经成为 EMS 或 DMS 管理软件的重要组成部分。但传统的状态估计限于技术的原因,在进行状态估计时,对网络结构进行了简化。它是基于单相单频非同步模式的。这种模式基于以下两种假设:

- 1) 所有的电压、电流的频率固定,波形是纯正弦的。
- 2) 系统运行在三相平衡条件下,系统网络是只有正序的三相对称系统。

但是,实际电力系统大都是运行在三相不完全平行、结构不完全对称的状态下。所以,传统状态估计模型与系统的实际情况并不完全符合。这就导致了传统状态估计其本身所固有的缺陷。

随着 GPS 技术及基于 GPS 的 PMU 测量技术的发展和数字采样传输技术的进步,本文提出了一种新的状态估计方法。这种方法是基于三相同步测量模型的,它要求对电压电流的波形同步测量。GPS 可应用于同步,它可提供小于 1 μs 的精确量,这样就可有效地避免时间偏差。由于基于 PMU 的状态估计能够记录系统波形的扰动变化,对存在谐波的非纯正弦状态量的状态能进行精确的估计,同时应用三相同步测量装置,系统的不平衡性也可得到记录。所以这种模型可以从根本上弥补传统状态估计固有的缺陷,极大地提高了状态估计的精确度。

1 传统状态估计——最小二乘法状态估计 (Least Squares)

1.1 传统状态估计模型^[1]

目前应用的状态估计大都基于传统的最小二乘法及其改进方法。这是一个数学处理过程,它由传统的量测量 P 、 Q 、 V 来得到系统当时的状态。

假设量测误差服从正态分布,且互不相关。设 m 个量测量 $z(P, Q, V)$ 与 n 个状态量 x 之间的函数关系(即量测方程)为:

$$z = h(x) \tag{1}$$

一般 $m > n$,所以,问题的实质就是求解一个超定非线性实变量方程组。应用最小二乘法原理,确定目标函数

$$\min J(x) = \sum_{i=1}^m \left[\frac{z_i - h_i(x)}{i} \right]^2 = [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] \tag{2}$$

即对于给定的量测矢量 z ,状态估计矢量 x 是使目标函数 $J(x)$ 为最小的 x 的值。对上式线性化处理,量测量的修正方程为:

$$z = H x \tag{3}$$

式(3)中 H 为量测方程的 $m \times n$ 维雅可比矩阵。从而得到基本加权最小二乘法状态估计的迭代修正公式为

$$x = [H^T R^{-1} H]^{-1} H^T R^{-1} z \tag{4}$$

其中: $H^T R^{-1} H$ 为 $n \times n$ 维量测增益矩阵即信息矩阵。

当量测量为 b 条支路成对测量的有功潮流和无功潮流时,修正方程为:

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M & F \\ G & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V/V \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: M、F、G、N 均为雅可比子矩阵,元素结构与支路-节点关联矩阵相同,即每行只有 2 个非零元素,支路 ij 对应的非零元素位于第 i 列和第 j 列,非零元素的数值与网络结构参数及运行参数有关。当以母线注入功率为观测量时,状态估计的修正方程与以支路潮流为观测量的状态估计的修正方程形式完全相同,只是雅可比矩阵的元素有所变化,其元素结构与节点导纳阵相同。

1.2 状态估计的误差分析

如果模型精确,量测误差符合标准正态分布,最小二乘法状态估计在理论上是一种无偏状态估计。但这两个条件不太可能在一个实际的系统中存在。因为通常系统是运行在三相不完全平衡的条件下的,系统的三相物理结构也是不完全对称的,尤其是传输线。每一相的阻抗值并不完全和其它两相相等,所以传统的只应用正序模型的状态估计存在着固有的误差。

另外,传统的状态估计是基于量测误差为正态分布的状态估计。在量测装置中,主要应用 P 、 Q 、 V 的测量互感器。当这些测量元件被准确校对时,量测误差可被认为满足正态分布。但是,随着测量通信技术的发展,特别是 FACTS 设备的应用,使系统中产生了大量的谐波。而量测装置中的大部分采样传输设备又大都是在工频下设计的,这只能保证了在工频下其采样传输的波形才不会失真。但对于其中的谐波分量的量测,由其频率特性可知,将有一个严重的失真。这也是传统的基于纯正弦的状态估计的固有缺点。

所以,由于传统的以正序纯正弦网络为模型的状态估计存在着固有的缺点,本文将给出以三相不平衡和波形非纯正弦网络为模型的状态估计。

2 基于 PMU 的状态估计

基于 GPS 的同步相量测量单元 (PMU) 是一种新型的高精度测量装置,它能够测量母线电压向量。由于 GPS 可提供精确的同步时钟,PMU 通过把远方各点电压波形的过零时刻或相对于某一时刻的初相角传到调度中心,通过比较波形过零时刻或初相角而得到各母线的电压相角。这样,相角的直接测量成为可能。如果在电力系统的所有节点均装设 PMU,则系统各节点电压幅值和相角将可直接测得,从而使 EMS 中的状态估计完全成为状态测量。但

由于经济和技术等原因,目前不可能在系统的所有节点均装设 PMU。所以将 PMU 的电压幅值测量值和相角测量值与 SCADA 原有的测量值构成的混和量测系统一起用于状态估计,从而提高网络的可观测性及状态估计精度,以弥补传统状态估计的不足。

Thorp 和 Phadke 等人研究 PMU 在状态估计中的应用时^[2],取电压幅值和相角的量测方程分别为 $V_m = V_e$ 和 $\theta_m = \theta_e$ 。其中 V_m 和 θ_m 分别为电压向量的幅值测量值和相角测量值。 V_e 和 θ_e 分别为电压向量的幅值估计值和相角估计值。在这种模型中,对配置了 PMU 的母线,量测雅可比矩阵只增加了 2 行,且每行只有一个取值为 1 的非零元素。这种模型只引入了 PMU 测量值的最小信息。因此对状态估计的精度不明显,且仍然是单相正序模型的状态估计。

下面根据状态估计的量测修正方程建立一种引入 PMU 测量值的三相状态估计模型以解决估计精度和三相不平衡状态估计问题。

首先对线路不平衡度较大或对平衡要求较高的三相母线配置 PMU,把量测修正方程修改为

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ x_e \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中: x_m 和 x_e 分别为配置 PMU 的母线电压向量的状态偏差和没有配置 PMU 的母线电压向量的状态偏差,对配置了 PMU 的母线电压取三相电压向量,即对于这样的一条母线对应于 $2 \times 3 = 6$ 个状态,即 $a、b、c、V_a、V_b、V_c$ 。

对于配置了 PMU 的母线,我们取其三相状态偏差 x_m 为量测值和估计值之差,利用该偏差可以构造相应的支路潮流的附加修正量

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} \\ J_{12} \end{bmatrix} x_m \quad (7)$$

这相当于利用 PMU 的测量值建立了以下的附加量修正方程

$$\begin{bmatrix} P_{a,b,c} \\ Q_{a,b,c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{a,b,c} & F_{a,b,c} \\ G_{a,b,c} & N_{a,b,c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a,b,c \\ V_{a,b,c}/V_{a,b,c} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, $P_{a,b,c}$ 即为 $[P_a \ P_b \ P_c]^T$, $Q_{a,b,c}$ 即为 $[Q_a \ Q_b \ Q_c]^T$, a,b,c 即为 $[a \ b \ c]^T$, $V_{a,b,c}$ 即为 $[V_a \ V_b \ V_c]^T$

式中当任意支路 ij 两端只有节点 i 配以 PMU 时, $M_{a,b,c}$ 、 $F_{a,b,c}$ 、 $G_{a,b,c}$ 、 $N_{a,b,c}$ 对应的行矢量中只有 1 个非零元素位于第 i 列,而当支路 ij 两端只有节点 j 配以 PMU 时, $M_{a,b,c}$ 、 $F_{a,b,c}$ 、 $G_{a,b,c}$ 、 $N_{a,b,c}$ 对应的行矢量中也只有 1 个非零元素位于第 j 列,当支路 i

j 两端的节点 i 和 j 均配以 PMU 时, $M_{a,b,c}$ 、 $F_{a,b,c}$ 、 $G_{a,b,c}$ 、 $N_{a,b,c}$ 中对应的行矢量与 M 、 F 、 G 、 N 中对应的行矢量完全相同。

由此可建立以下的状态估计模型

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \\ P_{a,b,c} \\ Q_{a,b,c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M & F \\ G & N \\ M_{a,b,c} & F_{a,b,c} \\ G_{a,b,c} & N_{a,b,c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V/\sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (9)$$

PMU 测量值的引入不仅使三相状态都可估计,而且也增加了冗余度,从而提高了状态估计解的精确度和稳定性。

同理,类似以三相状态估计的方法,由于 PMU 可对电压波形进行采样,所以可以应用傅里叶分解的方法,提取出各次谐波分量,并把各次谐波分别作为一个状态,进行状态估计,以弥补电压非纯正弦时的估计精度。

首先,假设采集的电压 U 可傅里叶分解为各次谐波之和,即

$$U = \sum_{i=1}^j U_i \sin(i t + \varphi_i) + U_i \cos(i t + \varphi_i) \quad (10)$$

又因为函数列 $\{1, \sin t, \cos t, \sin 2 t, \cos 2 t, \dots, \sin k t, \cos k t, \dots\}$ 两两正交,所以对式(10)左右两边同乘以 $\cos k t$ 得

$$U \cos k t = \left\{ \sum_{i=1}^j U_i \sin(i t + \varphi_i) + U_i \cos(i t + \varphi_i) \right\} \cos k t \quad (11)$$

对式(11)展开,并应用正交性可得:

$$U \cos k t = U_k (\cos \varphi_k + \sin \varphi_k) \cos^2 k t \quad (12)$$

同理,式(10)左右两边同乘以 $\sin k t$ 得

$$U \sin k t = \left\{ \sum_{i=1}^j U_i \sin(i t + \varphi_i) + U_i \cos(i t + \varphi_i) \right\} \sin k t \quad (13)$$

对式(13)展开,并应用正交性可得:

$$U \sin k t = U_k (\cos \varphi_k - \sin \varphi_k) \sin^2 k t \quad (14)$$

对式(12)左右两边进行积分运算,因为 PMU 对电压 U 的采样为离散量,所以采用分步积分法, t 为步长。得

$$\begin{aligned} \text{左边} &= \int_0^T U \cos k t dt = \int_0^T \sum_{j=0}^{T/t} u_j \cos(k \cdot j t) dt = A \\ \text{右边} &= \int_0^T U_k (\cos \varphi_k + \sin \varphi_k) \cos^2 k t dt = \end{aligned}$$

$$\frac{T}{2} U_k (\cos \varphi_k + \sin \varphi_k)$$

$$\text{所以} \quad A = \frac{T}{2} U_k (\cos \varphi_k + \sin \varphi_k) \quad (15)$$

同理,由式(14)左右两边进行积分运算,可得

$$\text{左边} = \int_0^T U \sin k t dt = \int_0^T \sum_{j=0}^{T/t} u_j \sin(k \cdot j t) dt = B$$

$$\text{右边} = \int_0^T U_k (\cos \varphi_k - \sin \varphi_k) \sin^2 k t dt = \frac{T}{2} U_k (\cos \varphi_k - \sin \varphi_k)$$

$$\text{所以} \quad B = \frac{T}{2} U_k (\cos \varphi_k - \sin \varphi_k) \quad (16)$$

由式(15)、(16)得

$$U_k = \sqrt{2(A^2 + B^2)} / T \quad \varphi_k = \arctan \frac{A - B}{A + B} \quad (17)$$

这样,由式(17)就得到各次谐波的状态值,把各次谐波状态值作为状态量,相当于给各次谐波都装设了 PMU。参照式(9),得到谐波状态估计的修正方程式

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \\ P_{1 \sim m} \\ Q_{1 \sim m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M & F \\ G & N \\ M_{1 \sim m} & F_{1 \sim m} \\ G_{1 \sim m} & N_{1 \sim m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V/\sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中,下标 $1 \sim m$ 表示取基波至 m 次谐波

所以基于 PMU 的谐波状态估计可以解决非纯正弦波形的状态向量的估计问题,提高了状态估计的精确度。

3 对 PMU 状态估计的评估

对 PMU 状态估计的精度可用置信度的概念进行评估。因为目标函数式(2)符合自由度为 $m - n$ 的 X^2 分布。文献[4]描述了用置信度定量的评估测量质量和结果误差的方法。由目标函数可知 x^* 可使得 J 取得最小值,设为 J^* 。其它的向量 x 得出的值将大于 J^* 值,其概率 $P_r(J > J^*)$ 可由自由度为 $m - n$ 的 X^2 分布求得。这个概率 P_r 就刻划了状态估计模型和实际系统的适合程度。

综上,置信度可用下列算法计算:

- 1) 根据上述算法得到状态向量 x^* 。
- 2) 计算 $J^* = (h(x^*) - z)^T R^{-1} (h(x^*) - z) = a$
- 3) 计算 $P_r = 1.0 - P(a, m - n)$ 。在这里,

$P(a, m - n)$ 表示自由度为 $m - n$ 的 X^2 分布的 J 的概率。

4 结论

传统的状态估计因其基于纯正弦单相的数学模型,所以存在着固有的误差。随着技术的进步,特别是以 GPS 高精度同步定时技术和先进的计算机数据采集技术为基础的相角测量单元(PMU)的应用,使电压向量波形的采集成为可能。本文提出的以应用 PMU 量测的三相状态估计和谐波状态估计可以从根本上解决系统三相不对称和电压非纯正弦所带来的误差影响。这种部分基于传统量测,部分基于 PMU 三相同步量测的混杂量测方法是本文算法的基础。

参考文献:

- [1] 于尔铿(YU Er-keng). 电力系统状态估计(Power System State Estimation) [M]. 北京:水利电力出版社(Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 1985.
- [2] Thorp J S, Phadke A G, et al. Real Time Voltage phasor Measurements for Static State Estimation[J]. IEEE Trans on PAS, 1985, 104(11):3098-3106.
- [3] 王克英,穆钢,陈学允(WANG Ke-ying, MU Gang, CHEN Xue-yun). 计及 PMU 的状态估计精度分析及配置研究

(Precision Improvement and PMU Placement Studies on State Estimation of a Hybrid Measurement System with PMU) [J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 2001, 21(8):29-31.

- [4] Sakis Meliopoulos A P, Papalexopoulos A D. Interpretation of Soil Resistivity Measurements: Experience with the Model SOMIP[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1986, 10:142-151.
- [5] 卢志刚,等(LU Zhi-gang, et al). 部分电压和电流相量可测量时电压相量的状态估计(State Estimation of Voltage Phasors Based on Parts of Voltage and Current Phasors Measurements) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(1):42-44.
- [6] 于尔铿(YU Er-keng). 能量管理系统(Energy Management System) [M]. 北京:科学出版社(Beijing: Science Press), 1998.

收稿日期: 2004-01-04; 修回日期: 2004-03-30

作者简介:

郑相华(1978 -),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统状态估计研究和混杂控制理论的分析研究; E-mail: zzh.cn @163.com

米增强(1960 -),男,教授,主要研究方向为电力系统自动化以及电力系统混杂控制研究;

赵洪山(1965 -),男,副教授,主要研究方向为电力系统混杂控制研究和电力系统离散事件动态性能分析。

Research on state estimation based on PMU

ZHENG Xiang-hua, MI Zeng-qiang, ZHAO Hong-shan, LIANG Hai-ping
(North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The conventional state estimation based on network of single phase and pure sinusoids voltage waveforms has inherent biases. With the application of Phase Measurement Unit(PMU) based on GPS, this paper provides three-phase state estimation and harmonic state estimation algorithms based on PMU for solving inherent biases. The proposed algorithms utilize the measurement system that is made of voltage amplitude measurement value and phase measurement value of PMU and the existing measurement value of SCADA to state estimation, which can raise observation of network and precision of state estimation and compensate the deficiency of traditional state estimation. This algorithms can essentially solve the error because of unsymmetric three-phase and impure state vector. The evaluation method to the algorithms is also discussed.

Key words: phase measurement unit(PMU); state estimation; harmonic; power system

许继集团入选首批全国工农业旅游示范点

国家旅游局日前公布了首批 306 个全国工农业旅游示范点名,河南省共有 22 家榜上有名,总数居全国前列。许昌市申报的四家单位全部入选。

它们是:许继集团有限公司、河南瑞贝卡发制品股份有限公司、河南黄河旋风股份有限公司三家单位入选全国工业旅游示范点;鄯陵国家花木博览园区入选全国农业旅游示范点。

据了解,在今年创建全国工农业旅游示范点的过程中,许昌市四家单位充分利用自身优势,走产品化建设和产业化发展的道路,取得了良好的经济效益和社会效益。