

WAMS/SCADA 混合测量状态估计数据兼容性分析

李大路, 李蕊, 孙元章

(武汉大学电气工程学院, 湖北省 武汉市 430072)

Data Compatibility Analysis of WAMS/SCADA Hybrid Measurements State Estimation

LI Da-lu, LI Rui, SUN Yuan-zhang

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China)

ABSTRACT: Aiming at the problem that more and more studies used hybrid data of wide area measurement system (WAMS) and supervisory control and data acquisition (SCADA) to improve the traditional state estimation, a new method to solve the compatibility problem of WAMS/SCADA hybrid data was proposed. Firstly, the differences between WAMS and SCADA are analyzed, and through the built WAMS/SCADA hybrid data model, we can conclude that time synchronization and measure weights are the main factors which affect the compatibility of hybrid data. Therefore, data dependence analysis is used to implement the synchronization of WAMS and SCADA data, and to re-quantify the measure weights by considering the delay distribution of measure data. The simulation results of standard test system show the accuracy of compatibility analysis and the validity of compatibility method.

KEY WORDS: phasor measurements unit (PMU); wide area measurement system (WAMS); power system; state estimation; hybrid measurement; compatibility

摘要: 针对越来越多的研究利用由广域测量系统(wide area measurement system, WAMS)和监控及数据采集系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)组成的混合测量来改善传统状态估计的情况,在分析 WAMS/SCADA 混合测量数据兼容性的基础上,提出一种可行的兼容方案解决混合测量的数据兼容问题。研究从 WAMS 和 SCADA 的数据差异入手,建立混合测量模型,分析得出 2 种数据的时间同步性和测量权值为影响混合测量数据兼容的主要因素,进而提出兼容方案,实现 WAMS 和 SCADA 数据的同步,并重新量化测量权值。在标准测试系统上的仿真验证了关于 WAMS/SCADA 混合测量状态估计数据兼容性分析的正确性和兼容方案的有效性。

关键词: 相量测量单元; 广域测量系统; 电力系统; 状态估计; 混合测量; 兼容

0 引言

由广域测量系统(wide area measurement system, WAMS)和监控及数据采集系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)组成的混合测量状态估计是改善以单一 SCADA 为测量的传统电力系统状态估计的有效手段。由于 SCADA 和 WAMS 采用的是不同的技术平台,2 种测量数据存在很多差异,不经过处理即将二者结合为混合测量数据为状态估计服务,会出现一系列的数据兼容问题,导致引入的 WAMS 测量不但不能发挥其最大作用,甚至还会降低传统状态估计的性能,因此,需要对混合测量状态估计的数据兼容问题加以重视。

应用于状态估计的 WAMS 和 SCADA 数据主要有以下 4 种差异: 1) 数据成分不同; 2) 数据刷新频率不同; 3) 数据传输延时不同; 4) 数据的精度不同。数据成分差异决定了 WAMS/SCADA 混合测量状态估计数据结合方法的不同,其他 3 种差异决定了混合测量数据的兼容性。目前的研究主要集中在 WAMS/SCADA 混合测量状态估计数据结合方法^[1-10],而关于 WAMS/SCADA 数据兼容性分析和兼容方案的研究很少,然而,数据兼容问题是混合测量状态估计相关研究的前期工作,必须优先予以解决。

在 WAMS 和 SCADA 数据差异中,数据刷新频率和传输延时可以结合成数据时间同步性问题进行统一考虑。SCADA 和 WAMS 测量数据在采样、发送、通信、接收、存储及应用等环节上的延时都不同,并且二者的数据刷新频率也不相同,因此导

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划重大项目(2008BAA13B04)。
Key Project of the National Eleventh-Five Year Research Program of China (2008BAA13B04).

致了 WAMS 和 SCADA 测量数据的时间同步性很差,如果要应用混合测量进行状态估计,其时间同步性必须得到保证。关于状态估计数据时间同步性的研究主要分为 2 类: 1) 被动地利用特定的状态估计方法去削弱数据同步问题带来的影响^[11-12]; 2) 建立关于数据时间同步性的数学模型,应用兼容方案主动地改善数据的时间同步性^[13-14]。第 2) 类研究可以揭示数据同步性问题的本质,更有利于解决混合测量数据兼容问题。

影响混合测量数据兼容的因素中,还有 WAMS 和 SCADA 测量精度的差异。由于是两代技术,SCADA 和 WAMS 测量精度相差很多,在技术规范中二者相差一个数量级^[15-16],而测量精度决定了其在状态估计中的权值。高精度的 WAMS 相量测量对应的是高权值,有时高权值也带来隐患: 如果混合测量数据时间同步性差,WAMS 的高权值就会降低状态估计性能。目前,关于状态估计权值的研究大多只考虑了测量误差,而未涉及到由于数据时间不同步而产生的误差。

本文针对 WAMS/SCADA 混合测量系统数据的兼容性问题建立数学模型,分析 2 种数据的时间同步性和权值对状态估计的影响,通过数据相关性分析使 WAMS 和 SCADA 数据同步,并考虑测量时差的影响,对混合测量的权值重新进行量化,形成一套可行的数据兼容方案,确保 WAMS/SCADA 混合测量状态估计的稳定性和正确性。

1 数据同步性对混合测量状态估计的影响

由于通信等技术的限制,目前 SCADA 数据的刷新频率为 0.1~5 帧/s,而 WAMS 按 50 帧/s、甚至 100 帧/s 传送数据^[16]; 另外,SCADA 和 WAMS 在各个环节的延时不同,导致控制中心收到的数据来自不同时刻。上述的这 2 种情况均影响了混合测量数据的时间同步性。

下文从状态估计结果反演来讨论 SCADA 和 WAMS 数据的时间同步性给状态估计带来的影响。

测量量的估计误差可表示为

$$z - \hat{z} = z - h(\hat{x}) \approx H(\hat{x})(x - \hat{x}) \quad (1)$$

式中: z 和 \hat{z} 分别为测量量的真实值和估计值; $H(x)$ 为测量函数 $h(x)$ 的雅克比矩阵; x 和 \hat{x} 分别为状态变量的真实值和估计值。

根据式(1)可以求得测量的估计方差:

$$E[(z - \hat{z})(z - \hat{z})^T] = E\{[H(\hat{x})(x - \hat{x})][H(\hat{x})(x - \hat{x})]^T\} = H(\hat{x})E[(x - \hat{x})(x - \hat{x})^T]H^T(\hat{x}) \quad (2)$$

式中: E 表示数学期望; $E[(x - \hat{x})(x - \hat{x})^T]$ 被称为状态估计的信息矩阵。

信息矩阵实质是状态变量的估计方差,可以表示为

$$E[(x - \hat{x})(x - \hat{x})^T] = [H^T(\hat{x})R^{-1}H(\hat{x})]^{-1} \quad (3)$$

式中 R 为测量量相对真实值的误差方差矩阵。

如果同时考虑测量误差以及 WAMS 和 SCADA 数据时间同步性误差, R 可以表示为

$$R = R_m + R_t \quad (4)$$

式中: R_m 为测量误差方差; R_t 为由于时间不同步产生的误差方差。

进而,信息矩阵(3)可以表示为

$$E[(x - \hat{x})(x - \hat{x})^T] = \Sigma_m(x) + \Sigma_t(x) \quad (5)$$

$$\Sigma_m(x) = [H^T(\hat{x})R_m^{-1}H(\hat{x})]^{-1} \quad (6)$$

$$\Sigma_t(x) = [H^T(\hat{x})R_t^{-1}H(\hat{x})]^{-1} \quad (7)$$

式中 Σ_m 和 Σ_t 分别为测量误差和时间同步性引起的状态向量估计方差。

将式(5)代入式(2),得

$$E[(z - \hat{z})(z - \hat{z})^T] = H(\hat{x})\Sigma_m(x)H^T(\hat{x}) + H(\hat{x})\Sigma_t(x)H^T(\hat{x}) \quad (8)$$

令 $F = I - H(\hat{x})[H^T(\hat{x})H(\hat{x})]^{-1}H^T(\hat{x})$, 其中, I 为单位阵。可以验证, $F^2 = FF = F$, 即说明 F 为幂等矩阵^[17], 于是可得

$$\text{diag}\{H(\hat{x})\Sigma_m(x)H^T(\hat{x})\} < R_m \quad (9)$$

为了判断状态估计的滤波效果,通常用估计误差方差与测量误差方差 R_m 相比较,即

$$\begin{cases} \text{diag}\{E[(z - \hat{z})(z - \hat{z})^T]\} < R_m \\ \text{diag}\{E[(z - \hat{z})(z - \hat{z})^T]\} = R_m \\ \text{diag}\{E[(z - \hat{z})(z - \hat{z})^T]\} > R_m \end{cases} \quad (10)$$

当估计值误差方差小于原始测量误差方差时,说明状态估计起到了滤波的效果; 等于时,说明状态估计没有起到滤波效果; 大于时,说明状态估计精度低于测量精度。

由于式(8)中含有关于时间不同步引起的误差方差 $H(\hat{x})\Sigma_t(x)H^T(\hat{x})$, 所以测量估计方差 $\text{diag}\{E[(z - \hat{z})(z - \hat{z})^T]\}$ 并不是一定小于原始测量误差方差 R_m , 即不能确保状态估计的滤波效果。

将以上结论具体应用于 WAMS/SCADA 混合测量系统,则可得出以下结论: 当具有统一时标的 WAMS 测量与 SCADA 测量时间同步性较差时,由同步性引起的误差方差 $\text{diag}\{H(\hat{x})\Sigma_t(x)H^T(\hat{x})\}$ 的数值会增大,进而削弱了状态估计的滤波作用,当

使测量估计误差方差 $E[(z - \hat{z})(z - \hat{z})^T]$ 数值大于 R_m 时,混合测量非但没有改进,反而降低了以 SCADA 测量为基础的传统状态估计的性能。

对权值来说,理论上应该是测量值相对真实值的误差方差倒数,如果考虑数据时间同步性因素,上述方差则由设备自身的测量方差和数据时间同步性引起的误差方差 2 部分组成。而当前权值的确定仅仅依据测量设备的精度,忽略了数据时间同步性误差带来的影响,这就造成了权值选取不当。由状态估计理论可知^[18],权值选取不当会削弱状态估计的滤波效果。混合测量数据时间同步性越差,给状态估计的精度带来的负面影响越大,同时也使测量权值偏离实际越远,而偏离实际的权值进一步削弱了状态估计的作用。

2 混合测量状态估计数据兼容方案

2.1 状态估计基准时刻的确定

具有时标的 WAMS 测量与无时标的 SCADA 测量相结合的第一步是将二者在时间上同步。应用数据相关度分析理论,使 WAMS 数据与 SCADA 数据相关度最大,从而达到同步的目的。

测量在短时间内,可以认为是相对平稳的,衡量不同测量信号在时域上的同步关系的常用方法是求取不同测量的相关系数^[19]:

$$\rho_{sw}(t_1, t_2 - \tau) = \frac{C_{sw}(t_1, t_2 - \tau)}{\sqrt{C_{ss}(t_1, t_2)C_{ww}(t_2 - \tau, t_2 - \tau)}} \quad (11)$$

式中: ρ_{sw} 为 SCADA 测量 z_s 和 WAMS 测量 z_w 的相关系数; t_1 为当前 SCADA 测量的时刻,因为 SCADA 测量彼此时刻互不统一,并且没有时标,所以 t_1 数值未知; t_2 为当前 WAMS 测量序列的截止时刻; τ 为当前 WAMS 测量序列的时间序列; C 为互协方差函数,以 C_{sw} 为例,其表达式为

$$C_{sw}(t_1, t_2 - \tau) = E\{[z_s(t_1) - \mu_s] \cdot$$

$$[z_w(t_2 - \tau) - \mu_w]^T\} = R_{sw}(t_1, t_2 - \tau) - \mu_s \mu_w^T \quad (12)$$

式中: μ_s 和 μ_w 分别为 z_s 和 z_w 的一段时间内的均值; R_{sw} 为测量 z_s 和 z_w 互相关系数函数,表达式为

$$R_{sw}(t_1, t_2) = E\{z_s(t_1)[z_w(t_2)]^T\} \quad (13)$$

$\rho_{sw}(t_1, t_2 - \tau)$ 是一系列按时间顺序排列的 WAMS 测量向量与 SCADA 测量向量的相关系数矩阵,其中相关度最高的列向量所对应的 WAMS 测量时刻,即是 WAMS/SCADA 混合测量系统的当前基准测量时刻:

$$\rho_{sw}(t_1, t_2 - \tau_t) = \max[\rho_{sw}(t_1, t_2 - \tau)] \quad (14)$$

$$t = t_2 - \tau_t \quad (15)$$

式中: τ_t 为相关度最高列所对应的时刻; t 为混合测量系统的基准测量时刻。

2.2 考虑时间同步性的权值

测量数据的精度决定权值的大小,混合测量状态估计的精度由装置的测量精度和数据与状态估计基准时刻的偏差 2 部分因素决定:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{e}_t + \boldsymbol{e}_m \quad (16)$$

式中: $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为测量数据的整体误差; \boldsymbol{e}_t 为时间同步性引起的误差; \boldsymbol{e}_m 为装置测量误差。

时间同步性引起的误差 \boldsymbol{e}_t , 由被测量的变化率和与基准时刻的偏差 2 部分因素决定:

$$\boldsymbol{e}_t = k\boldsymbol{t}_d \quad (17)$$

式中: k 为被测量量的变化率; \boldsymbol{t}_d 为测量时刻与基准时刻的偏差。

装置测量误差已知,要得到整体误差,首先要得到时间同步性引起的误差。WAMS 测量数据具有时标,由时间同步性可知,SCADA 测量时延 t_d 可以认为服从以下概率密度:

$$f(t_d) = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} e^{-(t_d - t)^2 / (2\sigma_t^2)} \quad (18)$$

式中: σ_t^2 为 t_d 的方差; t 为基准时刻。

由于装置测量误差和同步性误差相互独立,所以整体误差的方差可以表示为

$$E[\boldsymbol{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}^T] = E[\boldsymbol{e}_m\boldsymbol{e}_m^T] + E[\boldsymbol{e}_t\boldsymbol{e}_t^T] = E[\boldsymbol{e}_m\boldsymbol{e}_m^T] + k^2 E[\boldsymbol{t}_d\boldsymbol{t}_d^T] \quad (19)$$

式中: $k^2 E[\boldsymbol{t}_d\boldsymbol{t}_d^T]$ 为同步性误差方差 σ_t^2 ; $E[\boldsymbol{e}_t\boldsymbol{e}_t^T]$ 为装置测量误差方差 σ_m^2 。这 2 种方差为事先通过实验统计求得。

所以考虑时间同步性的权值矩阵可以表示为

$$\boldsymbol{R}^{-1} = \frac{1}{E[\boldsymbol{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}^T]} \quad (20)$$

3 仿真算例

3.1 仿真系统及评价指标介绍

算例采用 IEEE 14 节点母线系统,如图 1 所示。用于状态估计的 SCADA 测量包括全网所有线路送端和受端的有功和无功、所有母线的电压幅值、负荷与发电机的有功和无功。数据刷新频率设置为 10 帧/min。测量值服从标准差为 0.02、误差均值为 0 的正态分布;其测量延时服从标准差为 0.1 s、均值为 0.1 的正态分布。算例中 PMU 配置情况为:母线 2、5、8、11 和 14 安装 PMU,应用于状态估

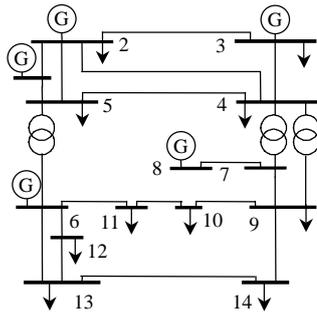


图 1 IEEE 14 节点母线系统
Fig. 1 IEEE 14 bus test system

计的 PMU 测量包括该母线的电压相量和所有出线的电流相量。数据传输设置为 50 帧/s。幅值测量服从标准差为 0.005、误差均值为 0 的正态分布, 相角测量服从标准差为 0.002、误差均值为 0 的正态分布^[15]。

在仿真中, 状态估计算法采用传统的最小二乘法^[18]; WAMS 与 SCADA 测量相结合时, 将 WAMS 测量中的电压幅值与相角不做任何处理, 直接加入状态估计测量向量^[3]。

系统中所有负荷的有功和无功变化如图 2 所示, 为了保持系统功率的平衡, 所有发电机随之等比例增长。在仿真时段内具有 4 种变化模式: 时段 I, 系统处于稳态, 负荷与发电机保持功率不变; 时段 II, 此时间段内负荷与发电机功率加速增长; 时段 III, 此段时间内负荷与发电机功率增速变缓; 时段 IV, 此段时间内发电机随着负荷减少而降低出力。

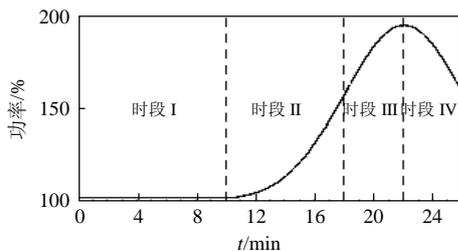


图 2 系统负荷变化曲线
Fig. 2 Load curve of test system

仿真中对以下 3 种案例进行对比和分析:

- 1) 案例 1, 单一 SCADA 测量下进行状态估计。
- 2) 案例 2, 未使用兼容方案情况下的混合测量状态估计。
- 3) 案例 3, 使用兼容方案下的混合测量状态估计。

3.2 稳态系统中数据兼容性仿真

当仿真系统处于图 2 中时段 I 时, 系统处于平稳状态, 未受到扰动, 并且发电机与负荷功率均未发生变化。状态估计在该时段中, 3 种案例的仿真

结果如图 3 所示, 该仿真结果以系统中所有节点电压相角和幅值估计的标准差均值表示。

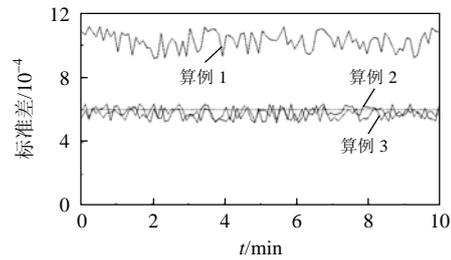


图 3 时段 I 中仿真比较

Fig. 3 Simulation comparison of time interval I

由图 3 可知: 当系统处于稳态时, 混合测量状态估计在应用数据兼容方案前后差别不大。这主要是因为兼容性问题源于 WAMS 和 SCADA 的时间同步性和每个测量对应的权值, 而在稳态下测量值并不发生变化, 不受到 WAMS 和 SCADA 测量时间同步性的影响, 同时, 稳态时的测量变化率接近于 0, 由式(19)可知, 测量权值也不会发生变化; 另一方面, 从图中还可以看出, 混合测量状态估计优于 SCADA 测量状态估计。

以上是对全局的分析, 下文对单个节点的仿真结果进行局部分析, 时段 I 中 3 个案例的仿真结果如表 1 所示, 该仿真结果以该时段内单个节点电压相角和幅值估计误差的标准差均值表示。从表中可以看出, 案例 2 和案例 3 中单个节点的估计精度都十分接近, 并且好于案例 1, 与全局分析结果一致。

表 1 时段 I 中 3 种案例稳态估计标准差
Tab. 1 State estimation results of time interval I

母线编号	案例 1 估计 标准差/ 10^{-3}	案例 2 估计 标准差/ 10^{-3}	案例 3 估计 标准差/ 10^{-3}
1	0.802 0	0.554 5	0.551 2
2	1.002 6	0.697 5	0.697 5
3	0.916 3	0.630 8	0.632 4
4	0.944 1	0.620 0	0.620 5
5	0.851 1	0.564 5	0.564 6
6	0.880 7	0.630 0	0.626 7
7	0.950 8	0.683 5	0.680 1
8	1.051 4	0.666 6	0.661 3
9	0.867 1	0.652 0	0.655 6
10	0.953 5	0.649 0	0.650 0
11	0.914 4	0.579 5	0.588 0
12	0.873 9	0.596 0	0.596 0
13	0.844 0	0.566 0	0.564 2
14	0.886 2	0.520 6	0.520 2

综上: 无论从整个系统, 还是从局部来看, 稳态情况下, 兼容性问题对混合测量状态估计的精度影响不大; 而 WAMS 信息的引入, 提高了传统状

态估计的精度。

在时段I中, 共用产生 100 帧 SCADA 测量数据和 30000 帧 WAMS 测量数据, 1 帧 SCADA 数据对应 300 帧 WAMS 数据, 为了描述通过上述数据来计算兼容方案基准时刻的过程, 表 2 列出了一部分 SCADA 数据与 WAMS 测量数据的相关度。

表 2 时段I中 WAMS 与 SCADA 测量数据相关度
Tab. 2 Relevance of WAMS and SCADA measurements in time interval I

SCADA 数据时刻/s	与 WAMS 数据序列的相关度					
	1	2	3	4	5	6
6	0.909 76	0.969 72	0.940 48	0.918 80	0.979 04	0.798 78
12	0.984 52	0.943 04	0.918 76	0.985 72	0.924 52	0.843 23
18	0.905 28	0.987 85	0.993 05	0.990 01	0.905 18	0.976 67
24	0.844 96	0.960 98	0.816 63	0.919 99	0.938 68	0.935 36
30	0.957 10	0.915 57	0.817 26	0.950 68	0.823 95	0.887 06
36	0.943 92	0.826 22	0.934 59	0.876 24	0.991 12	0.980 30
42	0.982 07	0.955 05	0.845 52	0.870 40	0.740 44	0.830 31
48	0.922 85	0.845 21	0.962 49	0.972 18	0.932 45	0.927 40
54	0.905 66	0.721 32	0.979 23	0.978 29	0.990 42	0.920 75
60	0.859 24	0.909 23	0.923 44	0.936 93	0.998 32	0.939 66

由表 2 的数据可知, 系统处于稳态时, WAMS 和 SCADA 数据相关度十分接近, 并且只受到测量误差的影响, 因此, 计算基准时刻时就会出现误差。但是, 稳态系统下, 混合测量状态估计数据兼容问题不会影响估计效果, 基准时刻的计算误差不会影响兼容方案的有效性。

3.3 动态系统中数据兼容性的仿真

当测试系统的负荷变化曲线处于图 2 中时段 II、III 和 IV 内时, 系统处于动态, 图 4 所示为这些时间段内 3 个案例的全局仿真结果, 该仿真结果仍然以系统中所有节点电压相角和幅值估计误差的标准差均值表示。

由图 4 可以看出, 当测量量不断变化时, 案例 1、案例 2 和案例 3 的滤波效果都会受到影响, 但是, 案例 2 相对于案例 1 和案例 3 变化更为明显, 更容易受到系统测量变化的影响。在所有仿真时段

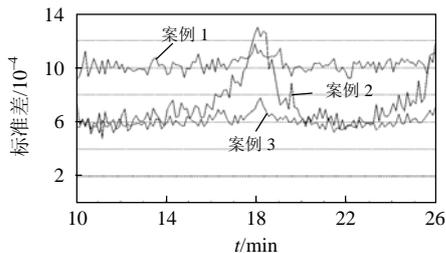


图 4 时段 II、III 和 IV 的仿真比较

Fig. 4 Simulation comparison of time interval II, III and IV

内, 案例 3 的估计精度都高于案例 1 和案例 2; 案例 2 在大部分时间内估计精度高于案例 1, 但在短时间内出现了低于案例 1 的情况。

为了更清晰地表示仿真结果, 分别对每个典型环节进行放大, 如图 5 所示。

图 5(a)描述了时段 II 内的仿真结果。该时段内, 负荷和发电机出力都在增加, 且增加的速率越来越快。从图中可以看到, 案例 1、案例 2 和案例 3 的估计精度处于不断下降的趋势。

图 5(b)描述了时段 II 和时段 III 交界处的仿真结果。在此时段内, 系统变化率达到了峰值, 图 5(b)表明, 案例 1、案例 2 和案例 3 的估计精度都下降到了最低点, 甚至出现了案例 2 的估计精度劣于案例 1 的情况。

图 5(c)描述了时段 III 内的仿真结果。该时段内, 虽然负荷和发电机出力都在增加, 但是其变化率却在降低。由图可知, 案例 1、案例 2 和案例 3 的估计精度由下降趋势转变为逐步提高的趋势。

图 5(d)描述了时段 IV 内的仿真结果。此段时间内, 负荷和发电机出力都由增加变为减少, 但是变化率却由减小变为增大。如图所示, 案例 1、案例 2 和案例 3 的估计精度又由提高趋势转变为下降趋势。

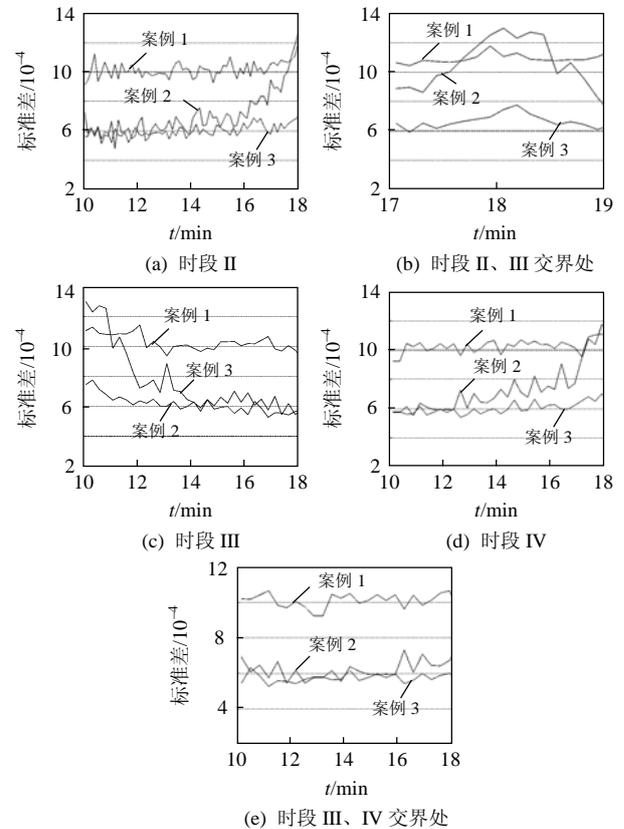


图 5 时段 II、III 和 IV 的仿真局部图

Fig. 5 Simulation details of time interval II, III and IV

图 5(e)描述了时段 III 和 IV 交界处的仿真结果。该时段内, 负荷和发电机出力由增加变为减少, 短暂存在变化率为 0 的时刻。由图可以看出, 案例 1、案例 2 和案例 3 的估计精度出现了类似于平稳状态下的仿真结果。

上述现象说明: 1) 在未使用兼容方案的混合测量状态估计中, 不断增大的测量变化率, 导致时间同步性误差的增大, WAMS 测量的高权重又加大了时间同步性误差对状态估计的影响; 2) 混合测量确实有改善传统状态估计的作用, 但数据兼容问题会在系统变化剧烈时突显出来; 3) 兼容性问题的突显和隐藏取决于测量的变化率, 并不取决于测量的变化趋势; 4) 未使用兼容方案的混合测量状态估计对系统变化更加敏感, 当系统变化率达到一定程度时, 状态估计结果甚至比以单一 SCADA 为测量的传统方法更差; 5) 本文提出的兼容方案较好地抑制了混合测量状态估计对测量变化率的敏感程度, 保证了混合测量状态估计的稳定性和可靠性。

在时段 II、III 和 IV 中, 选取部分 WAMS 和 SCADA 测量数据来描述计算兼容方案基准时刻的过程, 表 3 列出了这些测量数据的相关度。

在表 3 中, 每行数据的最大值几乎都出现在第 5 列, 说明基准时刻的计算与仿真中设置 SCADA 延时均值为 0.1s 一致。少数行的相关系数最大值没有出现在第 5 列, 其原因是在第 10 min(600 s)和第

表 3 时段 II-IV 中 WAMS 与 SCADA 测量数据相关度
Tab. 3 Relevance of WAMS and SCADA measurements in time interval II-IV

SCADA 数据时刻/s	与 WAMS 数据序列的相关度					
	1	2	3	4	5	6
600	0.986 31	0.997 72	0.868 42	0.916 21	0.919 73	0.985 43
660	0.898 44	0.888 94	0.969 85	0.849 77	0.999 17	0.983 10
720	0.706 15	0.718 72	0.840 04	0.918 08	0.937 24	0.917 80
780	0.652 19	0.699 09	0.821 99	0.906 54	0.984 56	0.908 17
840	0.463 81	0.599 54	0.839 71	0.896 84	0.941 93	0.893 41
900	0.352 22	0.371 70	0.605 72	0.868 21	0.869 38	0.821 81
960	0.367 83	0.271 02	0.597 61	0.720 37	0.897 65	0.739 20
1 020	0.212 24	0.275 27	0.493 22	0.630 92	0.922 22	0.661 93
1 080	0.131 95	0.178 11	0.391 82	0.595 80	0.916 61	0.570 04
1 140	0.276 66	0.210 13	0.423 30	0.667 60	0.941 33	0.627 60
1 200	0.576 05	0.435 78	0.521 87	0.749 35	0.993 43	0.743 50
1 260	0.787 43	0.881 96	0.733 96	0.897 14	0.998 77	0.837 83
1 320	0.982 03	0.928 21	0.864 86	0.990 06	0.972 30	0.966 45
1 380	0.739 49	0.869 86	0.786 36	0.888 36	0.844 14	0.887 69
1 440	0.696 31	0.445 11	0.583 32	0.731 08	0.829 74	0.789 72
1 500	0.270 47	0.295 58	0.429 48	0.611 67	0.953 10	0.624 68

22 min(600s)时, 系统的变化率最低, 基准时刻的计算产生了误差, 但不影响兼容方案的有效性。

3.4 数据时间同步性对兼容性的影响

WAMS 和 SCADA 测量的时间同步性是影响混合测量数据兼容性的重要因素, 本节仿真针对时段 II 进行, 设置了不同的 WAMS 与 SCADA 测量时差, 对应用兼容方案前后混合测量状态估计的效果进行对比, 仿真结果如表 4 所示。

表 4 不同测量同步性下混合测量状态估计结果

Tab. 4 Results of hybrid measurements state estimation in various synchronous conditions

WAMS 与 SCADA 测量时差/s	案例 2 估计 误差标准差/ 10^{-4}	案例 3 估计 误差标准差/ 10^{-4}
1.0	12.24	6.67
0.9	11.57	6.67
0.8	11.06	6.67
0.7	10.78	6.67
0.6	10.33	6.67
0.5	9.71	6.67
0.4	9.28	6.67
0.3	8.64	6.67
0.2	8.02	6.67
0.1	7.76	6.67

从表 4 的数据可以看出, 案例 2 的估计精度随着 WAMS 与 SCADA 测量时差的增大而降低, 而案例 3 的估计精度则保持不变。说明兼容方案的应用使混合测量状态估计不再受到 WAMS 与 SCADA 测量时间同步性的影响。

4 结论

WAMS/SCADA 混合测量是改善传统 SCADA 测量状态估计的有效手段, 然而, 混合测量状态估计的数据兼容问题可能使其估计性能低于传统状态估计。针对此情况建立了混合测量数学模型, 得出以下结论: 1) WAMS 和 SCADA 测量数据的时间同步性是影响数据兼容性的重要因素; 2) 测量权值应考虑测量同步性因素, 否则会加大由时间同步性误差对混合测量状态估计的影响; 3) 测量变化率与混合测量状态估计的数据兼容问题息息相关, 变化率越大, 兼容问题越严重。

本文在混合测量兼容性分析的基础上, 提出的数据兼容方案如下: 1) 将混合测量数据进行相关性分析, 可以确保 WAMS 和 SCADA 测量数据达到同步; 2) 考虑测量时差的概率分布, 重新进行测量权值的量化, 可以使权值更加接近实际情况。

仿真案例验证了关于 WAMS/SCADA 混合测

量状态估计数据兼容性分析的正确性和兼容方案的有效性。

参考文献

- [1] Phadke A G. Synchronized phasor measurements in power systems [J]. IEEE Computer Applications in Power, 1993, 6(2): 10-15.
- [2] Phadke A G, Pickett B, Adamiak M, et al. Synchronized sampling and phasor measurements for relay and control[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1994, 9(1): 442-452.
- [3] Thorp J S, Phadke A G, Karimi K J, et al. Real time voltage-phasor measurements for static state estimation[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1986, 1(1): 233-241.
- [4] 虞芹婕, 王晓茹, 游家训, 等. 基于相测量量的等式约束二阶段状态估计模型[J]. 电网技术, 2007, 31(10): 84-88.
Yu Qinjie, Wang Xiaoru, You Jiaxun, et al. Equality constraints two-step state estimation model based on phasor measurements [J]. Power System Technology, 2007, 31(10): 84-88(in Chinese).
- [5] 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(in Chinese).
- [6] 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): 28-32.
Qin Xiaohui, Bi Tianshu, Yang Qixun. A new method for hybrid nonlinear state estimation with PMU[J]. Automation of Power Systems, 2007, 31(4): 28-32(in Chinese).
- [7] 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 Junce, Cai Zexiang, Wang Keying. Mixed measurements state estimation based on WAMS[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 58-63(in Chinese).
- [8] 卢志刚, 郝玉山, 康庆平, 等. 电力系统实时相角监控系统结构研究[J]. 电网技术, 1998, 22(5): 18-20.
Lu Zhigang, Hao Yushan, Kang Qingping, et al. Research of the structure of phase angle monitoring and controlling system in electric power system[J]. Power System Technology, 1998, 22(5): 18-20(in Chinese).
- [9] 王克英, 穆刚, 陈学允. 计及 PMU 的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): 29-33.
Wang Keying, Mu Gang, Chen Xueyun. Precision improvement and pmu placement studies on state estimation of a hybrid measurement system with PMUs[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 29-33(in Chinese).
- [10] 王克英, 穆刚, 韩学山, 等. 使潮流方程直接可解的 PMU 配置方案研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(10): 14-16,41.
Wang Keying, Mu Gang, Han Xueshan, et al. Placement of phasor measurement unit for direct solution of power flow[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(10): 14-16,41(in Chinese).
- [11] Su C L, Lu C N. Interconnected network state estimation using randomly delayed measurements[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2001, 16(4): 870-878.
- [12] Su C L, Lu C N, Hsiao T Y. Simulation study of internet based inter control center data exchange for complete network modeling[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2002, 17(4): 1177-1183.
- [13] 赵红嘎, 薛禹胜, 高翔, 等. 量测量的时延差对状态估计的影响及其对策[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(21): 12-16.
Zhao Hongga, Xue Yusheng, Gao Xiang, et al. Impacts of the difference between measurement transmission delays on state estimation and the countermeasures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(21): 12-16(in Chinese).
- [14] 毛安家, 郭志忠. 与 SCADA 互补的 WAMS 中 PMU 的配置及数据处理方法[J]. 电网技术, 2005, 29(8): 71-74.
Mao Anjia, Guo Zhizhong. A practical placement of PMU in WAMS complementary to SCADA and data processing method[J]. Power System Technology, 2005, 29(8): 71-74(in Chinese).
- [15] Power System Relaying Committee of the IEEE Power Engineering Society. IEEE standard for synchrophasors for power systems [S]. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2005.
- [16] 国家电网公司. 电力系统实时动态监测系统技术规范[S]. 北京: 国家电网公司, 2006.
State Grid Corporation of China. Technical specification for WAMS[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2006(in Chinese).
- [17] Horn R A, Johnson C R. Matrix analysis[M]. London: Cambridge University Press, 1985: 277-283.
- [18] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985: 62-64.
Yu Erkeng. Power system state estimation[M]. Beijing: China Water Power Press, 1985: 62-64(in Chinese).
- [19] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 7-18.
Zhang Xianda. Modern signal processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 7-18(in Chinese).



李大路

收稿日期: 2010-04-01。

作者简介:

李大路(1981—), 男, 博士研究生, 研究方向为基于 WAMS 的电力系统状态估计, lidalubenjamin@163.com;

李蕊(1974—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统安全经济运行和电力市场等;

孙元章(1954—), 男, 教授, 博士生导师, 长江学者, 研究方向为电力系统非线性控制、电力系统安全经济控制等。

(责任编辑 刘浩芳)