

WAMS 错误数据的快速辨识及恢复方法

陈亦平¹, 陈伟彪², 姚 伟², 廖诗武², 文劲宇², 侯云鹤², 苗世洪²

(1. 中国南方电网电力调度通信中心, 广东 广州 510623;

2. 华中科技大学 电气与电子工程学院 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 统计分析基于相量测量单元(PMU)的电力系统广域测量系统(WAMS)在实际应用中出现的监测数据的错误类型, 提出基于模式识别的 WAMS 错误数据快速辨识及恢复方法。该方法通过对同一 PMU 上传的监测数据进行特征量提取, 并与预先设置的时序相对变化量变化趋势矩阵和时序数值矩阵进行模式匹配, 实现错误数据的实时辨识, 并使用错误出现最近时刻的正常数据进行数据快速恢复。所提方法在实测的监测数据中的应用验证了其可行性。

关键词: 电力系统; 广域测量系统; 相量测量单元; 错误数据辨识; 数据恢复

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.12.015

0 引言

20 世纪 90 年代以来, 以同步相量测量技术为标志的广域测量系统(WAMS)^[1]在电网动态监视^[2-4]、动态安全评估^[5-7]、电网实时控制^[8-9]等方面得到广泛的应用。它通过分布于全网的相量测量单元(PMU)采集包括电压、电流、功率、频率等信息, 并基于全球定位系统(GPS), 将其折算到统一时间参考点坐标下, 可以在相同的时标下记录电力系统不同位置的相量信息。目前, PMU/WAMS 已经成为电力调度自动化系统必要的组成部分^[10]。然而, 在实际系统应用中时常出现上传的相量数据偶有错误的现象, 影响了基于 WAMS 监测数据的各类功能的实现效果。以电网故障诊断为例, 由于数据不稳定、可靠性有待提高, 导致在线故障诊断实用化程度一直不高, 实际运行中容易出现故障的漏判和误判, 从而降低在线故障诊断的正确率, 使在线故障诊断功能失去可信度, 影响了调度员对事故的正确判断^[11]。

目前, 电力系统不良数据检测和辨识方法大致可分为 2 类: 一类是基于状态估计的传统方法^[12-13]; 一类是基于数据挖掘技术的新方法^[14]。传统的数据检测与辨识方法主要是将加权残差或者标准残差作为特征值, 假设其服从某一概率分布, 按照一定的置信水平确定一个门槛值, 然后进行假设检验。文献[15]利用状态估计、残差检测和突变量检测进行两两结合, 克服了残差污染和残差淹没现象, 并能区分不良数据与突变量。文献[16]提出利用量测变换的方法将 SCADA 数据与 WAMS 量测组成混合量测系统实施混合状态估计, 实现不良数据的检测和辨识。传

统不良数据检测与辨识方法存在残差污染和残差淹没、非线性残差方程的计算量大、实时性难以保证、多错误数据、易误诊等缺点。基于数据挖掘技术的不良数据检测与辨识方法主要有模糊数学法^[17-18]、神经网络法^[19]、间隙统计法^[20-21]等。文献[21]将聚类分析和间隙统计算法结合起来, 利用间隙统计算法来确定最佳的聚类个数, 再利用聚类方法把正常数据和不良数据分类, 实现对不良数据的检测与辨识。上述各类不良数据检测和辨识方法主要应用于采样频率较低的 SCADA 数据, 应用于 WAMS 数据(采样频率较高, 一般不低于 25 帧/s^[11])时面临计算量大、实时检测与辨识困难等问题。而目前针对 WAMS 数据的不良数据检测与辨识方法较少, 主要是对由于通信问题导致的错误数据采取使用相邻时间段的数值填充或相邻时间段数据平均值填充的处理方式^[22]。为此有必要寻找便于实施、计算量小、准确度高的 WAMS 不良数据的检测与辨识方法。

本文以基于 OPEN3000 的 WAMS 主站的实际监测数据为分析对象, 统计分析了监测数据的常见错误类型, 提出了基于模式识别的 WAMS 错误数据快速辨识方法, 并根据错误数据快速辨识结果进行数据恢复工作。最后以实际电网中 PMU 数据为例, 验证了本文所提 WAMS 的错误监测数据的快速辨识及恢复方法的正确性和可行性。

1 常见 WAMS 数据错误类型

通过对实际电网 WAMS(该系统目前已在 125 个 220 kV 和 500 kV 变电站、97 个电厂及 12 个直流换流站装设 PMU 设备, 并基本实现基于 WAMS 数据的各类在线应用功能)运行过程中获取的 PMU 数据进行统计, 发现上传到主站的个别子站 PMU 数据会有持续数十秒钟乃至数分钟的错误数据, 进而导致主

收稿日期: 2015-12-09; 修回日期: 2016-09-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51577075)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51577075)

站应用功能(如扰动识别、低频振荡在线检测、多直流协调系统等)^[23]无法正常发挥应有的作用。对出现错误的子站 PMU 数据进行分析,发现 WAMS 错误数据有以下特点:三相电压、三相电流、功率等电气量存在同步跳变的现象;上述电气量监测数值不在正常运行范围内,且明显与实际运行状态不符。根据其数据错误的不同规律进行分类,结果如表 1 所示,表中统计结果来自于 2015 年 3 月 26 日至 2015 年 4 月 22 日、2015 年 5 月 14 日至 2015 年 5 月 18 日共 33 天的 PMU 数据中的 100 组错误数据样本,每个样本时长在 30 s 至 3 min 不等。

表 1 广域测量系统数据错误类型
Table 1 Types of wrong data existed in WAMS

序号	WAMS 数据 错误类型	各错误类型占总 错误数据比重/%	电压、电流、功率 变化特点
1	短暂数值尖峰	4.5	同步变化, 变化趋势相同
2	在正常运行值与 零值间跳变	50	同步变化, 变化趋势相同
3	一段时间内零值	45	同步变化, 变化趋势相同
4	一段时间内极大值(或极 小值)后恢复正常运行值	0.5	同步变化, 变化趋势相同

图 1 所示为某电厂 1 号机组 PMU 上传的三相电流及三相电压幅值波形,图 2、图 3 分别为对应的 WAMS 和 SCADA 记录的该机组功率数据。根据 SCADA 数据和调度日志记录,发现 WAMS 上传数据有误,且由此导致基于 WAMS 数据的故障辨识系统在 07:00:8.520 误报切机事故(图中箭头所指位置),此时对应于表 1 提及的数据错误类型中的第 3 种类

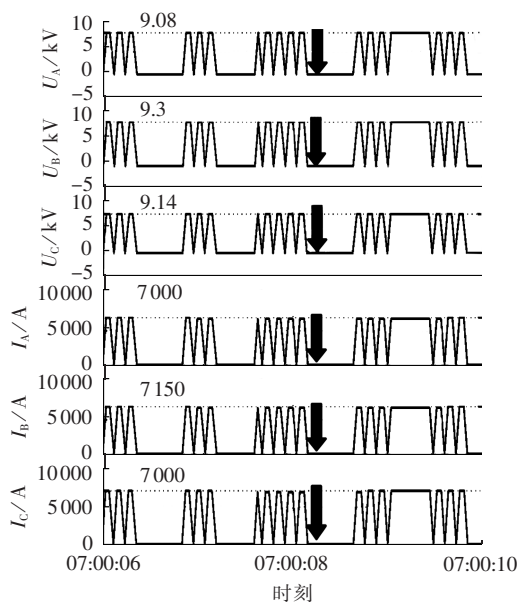


图 1 某电厂 1 号机组三相电压、电流幅值波形
(WAMS 数据错误类型 3)

Fig.1 Three-phase voltage and current waveforms of Generator 1 in a power plant(type 3 of wrong WAMS data)

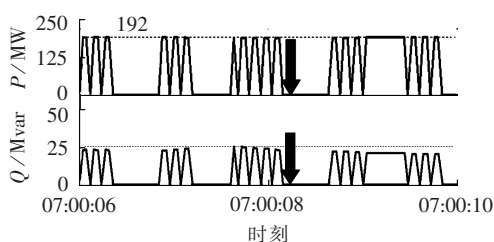


图 2 某电厂 1 号机组功率波形(WAMS 数据错误类型 3)

Fig.2 Power waveforms of Generator 1 in a power plant (type 3 of wrong WAMS data)

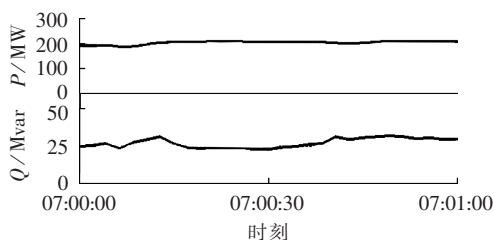


图 3 某电厂 1 号机组功率波形(SCADA 数据)

Fig.3 Power waveforms of Generator 1 in a power plant(SCADA data)

型。类似的错误数据的出现及其导致的频繁的故障漏判及误判情况很大程度上影响了调度员对事故的判断,反而在一定程度上加大了调度员的工作难度。

2 基于模式识别的 WAMS 错误数据快速辨识与恢复方法

为了正确辨识上述错误数据,提高数据可靠性,本文基于模式识别^[24]的思想提出了一种错误数据的快速辨识方法,该方法是一个由模式空间映射到特征空间再映射到类型空间的过程。通过提取 WAMS 监测数据的特征量,并与 WAMS 错误数据对应的标准模式进行匹配来实现错误数据类型(模式)的识别过程,从而完成正常与错误 WAMS 数据的分类。

2.1 特征提取

由于全网 PMU 数据量测量点较多,不同安装地点 PMU 量测量也略有不同,为使本文提出的方法具有较好的适应性,选取各 PMU 监测点的三相电压幅值、三相电流幅值进行特征提取,获取表征数据变化量特征的各个分量,形成相对变化量标准模式矩阵。以下对全网 PMU 所选数据进行如下处理方式。

a. 各相电压:采用式(1)所示的电压相对变化量 $\Delta U_\phi[t]$ 。它表征了电压在每个采样时刻的变化程度。若当前时刻 $\Delta U_\phi[t]$ 为正,则表明电压上升; $\Delta U_\phi[t]$ 为负,则表明电压下降。

$$\Delta U_\phi[t] = \frac{U_\phi[t] - U_\phi[t - \Delta t]}{\max(|U_\phi[t]|, |U_\phi[t - \Delta t]|) \Delta t} \quad (1)$$

其中, t 为当前时间点; Δt 为 2 个采样点的时间间隔; $\phi = A, B, C$ 。

b. 各相电流:采用式(2)所示的电流相对变化量 $\Delta I_\phi[t]$ 。它表征了电流在每个采样时刻的变化程度。若当前时刻 $\Delta I_\phi[t]$ 为正,则表明电流上升; $\Delta I_\phi[t]$ 为负,则表明电流下降。

$$\Delta I_\phi[t] = \frac{I_\phi[t] - I_\phi[t - \Delta t]}{\max(|I_\phi[t]|, |I_\phi[t - \Delta t]|) \Delta t} \quad (2)$$

特征提取完成后,对结果进行组合得到每个 PMU 节点对应的 t 时刻模式状态矩阵 $\mathbf{X}$,格式如式(3)所示。为了便于比较,将状态向量 $\mathbf{X}$ 根据式(4)转换为衡量量测量变化程度的逻辑矩阵 $\mathbf{Y}_1$ 。当对应的分量 $y_1(i, j)$ 为 1 时,表示该电气量升高;当对应的分量 $y_1(i, j)$ 为 0 时,表示该电气量无变化;当对应的分量 $y_1(i, j)$ 为 -1 时,表示该电气量下降。

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \Delta U_A[t-2\Delta t] & \Delta U_A[t-\Delta t] & \Delta U_A[t] \\ \Delta U_B[t-2\Delta t] & \Delta U_B[t-\Delta t] & \Delta U_B[t] \\ \Delta U_C[t-2\Delta t] & \Delta U_C[t-\Delta t] & \Delta U_C[t] \\ \Delta I_A[t-2\Delta t] & \Delta I_A[t-\Delta t] & \Delta I_A[t] \\ \Delta I_B[t-2\Delta t] & \Delta I_B[t-\Delta t] & \Delta I_B[t] \\ \Delta I_C[t-2\Delta t] & \Delta I_C[t-\Delta t] & \Delta I_C[t] \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

$$y_1(i, j) = \begin{cases} 1 & x(i, j) > k_{s_up} \\ 0 & k_{s_low} \leq x(i, j) \leq k_{s_up} \\ -1 & x(i, j) < k_{s_low} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $y_1(i, j)$ 为逻辑矩阵 $\mathbf{Y}_1$ 第 i 行 j 列的数值; k_{s_up} 、 k_{s_low} 分别为逻辑转换中的上限值和下限值,本文中 k_{s_low} 取值为 $-2.5/s$, k_{s_up} 取值为 $2.5/s$ 。

同时,为了提高辨识的准确性,将如式(5)所示的数值矩阵 $\mathbf{W}$ 根据式(6)转换为衡量量测量绝对值大小的逻辑矩阵 $\mathbf{Z}_1$ 。当对应的分量 $z_1(i, j)$ 为 1 时,表示该电气量出现异常极值;当对应的分量 $z_1(i, j)$ 为 0 时,表示该电气量在正常运行范围内;当对应的分量 $z_1(i, j)$ 为 -1 时,表示该电气量出现零值。

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} U_A[t-2\Delta t] & U_A[t-\Delta t] & U_A[t] \\ U_B[t-2\Delta t] & U_B[t-\Delta t] & U_B[t] \\ U_C[t-2\Delta t] & U_C[t-\Delta t] & U_C[t] \\ I_A[t-2\Delta t] & I_A[t-\Delta t] & I_A[t] \\ I_B[t-2\Delta t] & I_B[t-\Delta t] & I_B[t] \\ I_C[t-2\Delta t] & I_C[t-\Delta t] & I_C[t] \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

$$z_1(i, j) = \begin{cases} 1 & |w(i, j)| > x_{lim_up} \\ 0 & x_{lim_low} \leq |w(i, j)| \leq x_{lim_up} \\ -1 & |w(i, j)| < x_{lim_low} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $z_1(i, j)$ 为逻辑矩阵 $\mathbf{Z}_1$ 第 i 行 j 列的数值; x_{lim_up} 、 x_{lim_low} 分别为逻辑转换中的上限值和下限值。

2.2 错误数据快速辨识(模式识别)

经过 2.1 节的特征提取后,每一个 PMU 监测点数据都可以转换为相应的模式状态矩阵(即 $\mathbf{Y}_1$ 和 $\mathbf{Z}_1$),完成从模式空间到特征空间的映射。表 1 所示的 4 种 WAMS 数据错误类型通过上述转换得到对应的

标准模式状态矩阵,即时序相对变化量变化趋势矩阵 $\mathbf{Y}_{set}(p)$ 和时序数值矩阵 $\mathbf{Z}_{set}(p)$ ($p=1, 2, \dots$)。通过模式状态矩阵 $\mathbf{Y}_1$ 和 $\mathbf{Z}_1$ 与各类错误数据类型对应的标准模式状态矩阵 $\mathbf{Y}_{set}(p)$ 和 $\mathbf{Z}_{set}(p)$ 的比较来确定错误数据类型,实现 WAMS 错误数据类型(模式)的识别(分类),从而完成错误数据的辨识工作。

该方法的核心在于 WAMS 错误数据时序相对变化量变化趋势矩阵 $\mathbf{Y}_{set}(p)$ 和时序数值矩阵 $\mathbf{Z}_{set}(p)$ ($p=1, 2, \dots$) 的制定。这 2 组参数的确定主要是根据实际系统运行过程中获取的 WAMS 错误数据进行特征量提取和归纳得到。就 4 种常见 WAMS 数据错误类型所制定的 2 种矩阵的具体形式如式(7)~(23)所示。

$$\mathbf{Y}_{set}(1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{Y}_{set}(2) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{Y}_{set}(3) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{Y}_{set}(4) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{Y}_{set}(5) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{Y}_{set}(6) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{Y}_{set}(7) = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{Y}_{set}(8) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{Y}_{set}(9) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{Y}_{set}(10) = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$Y_{\text{set}}(11)=\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$Y_{\text{set}}(12)=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$Z_{\text{set}}(1)=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$Z_{\text{set}}(2)=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$Z_{\text{set}}(3)=\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$Z_{\text{set}}(4)=\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$Z_{\text{set}}(5)=\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

表 2 对 4 种常见 WAMS 数据错误类型对应的标准模式状态矩阵进行小结。以图 1 所示波形为例说明矩阵的获取方式。对 07:00:8.000—07:00:8.600 间的三相电压幅值、三相电流幅值数据采用式(3)—(6)进行特征提取,得到式(15)、(16)、(19)、(20)所示的标准模式状态矩阵,对应波形示意图见图 4。需要说明的是,这里是为简练表示 PMU 波形变化规律与对应的标准模式状态矩阵的关系,图中 y 表示三

相电压和电流幅值的相对大小,1 表示正常运行值,0 表示零值。

2.3 错误数据快速恢复

在对 WAMS 错误数据进行辨识后,辨识得到的错误数据需要进行快速恢复。恢复的方法是使用错误数据出现前的正常数据取代错误数据进行快速恢复。假定某 PMU 的量测量包括三相电压 U_ϕ 、三相电流 I_ϕ 、有功功率 P 及无功功率 Q ,恢复公式为:

$$\begin{cases} U_\phi[t-2\Delta t]=U_\phi[t-3\Delta t] \\ U_\phi[t-\Delta t]=U_\phi[t-3\Delta t] \\ U_\phi[t]=U_\phi[t-3\Delta t] \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} I_\phi[t-2\Delta t]=I_\phi[t-3\Delta t] \\ I_\phi[t-\Delta t]=I_\phi[t-3\Delta t] \\ I_\phi[t]=I_\phi[t-3\Delta t] \end{cases} \quad (25)$$

$$\begin{cases} P[t-2\Delta t]=P[t-3\Delta t] \\ P[t-\Delta t]=P[t-3\Delta t] \\ P[t]=P[t-3\Delta t] \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} Q[t-2\Delta t]=Q[t-3\Delta t] \\ Q[t-\Delta t]=Q[t-3\Delta t] \\ Q[t]=Q[t-3\Delta t] \end{cases} \quad (27)$$

基于模式识别的 WAMS 错误数据快速辨识与恢复方法的流程图如图 5 所示,具体步骤如下。

a. 从各 PMU 站点获取实时 WAMS 量测量数据,并提取三相电压、电流幅值数据作为算法输入数据。

b. 根据式(3)—(6)对输入数据进行特征提取,得到对应的模式状态矩阵(即 Y_i 和 Z_i)。

c. 将上一步得到的模式状态矩阵 Y_i 和 Z_i 与标准模式状态矩阵(即 $Y_{\text{set}}(p)$ 和 $Z_{\text{set}}(p)$)进行匹配,根据表 2 中的对应关系得到辨识结果,并设置对应的错误数据类型标识符(0 表示无错误数据,1—4 分别表示出现错误类型 1—4)。

d. 若错误数据类型标识符等于 0,表示无错误数据出现,直接进入下一步;若错误数据类型标识符不等于 0,表示有错误数据出现,并采用式(24)—(27)进行数据的快速恢复。

e. 重新进入步骤 a。

3 实例分析

本文将基于模式识别的 WAMS 错误数据快速辨识及恢复方法应用于实际电网 PMU 上传的错误监测数据中,原始三相电流、电压幅值数据如图 6 所示,错误数据辨识结果如图 7 所示,恢复后的三相电流、电压幅值数据如图 8 所示。所提算法在一台配备 Intel Core(TM) i7 3.30 GHz 处理器,16 GB 运行内存的计算机上实现。

图 6 中的错误数据包含表 1 中的类型 2 和 3,这点从图 7 的标识符示意图中也可得到验证。从图

表 2 WAMS 数据错误类型与标准模式状态矩阵关系表
Table 2 Type of wrong WAMS data and corresponding standard mode state matrix

序号	WAMS 数据错误类型	标准模式状态矩阵
1	短暂数值尖峰	$Y_{\text{set}}(1)-Y_{\text{set}}(4)$
2	在正常运行值与零值间跳变	$Y_{\text{set}}(5)-Y_{\text{set}}(12),$ $Z_{\text{set}}(1)-Z_{\text{set}}(3)$
3	一段时间内零值	$Z_{\text{set}}(4)$
4	一段时间内极大值(或极小值)后恢复正常运行值	$Z_{\text{set}}(5)$

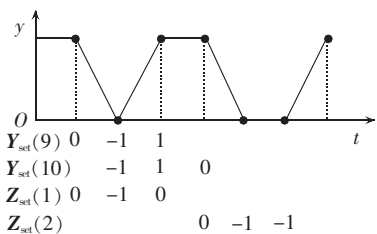


图 4 WAMS 错误类型 2 波形示意图(1)
Fig.4 Schematic waveform of type 2 of wrong WAMS data(1)

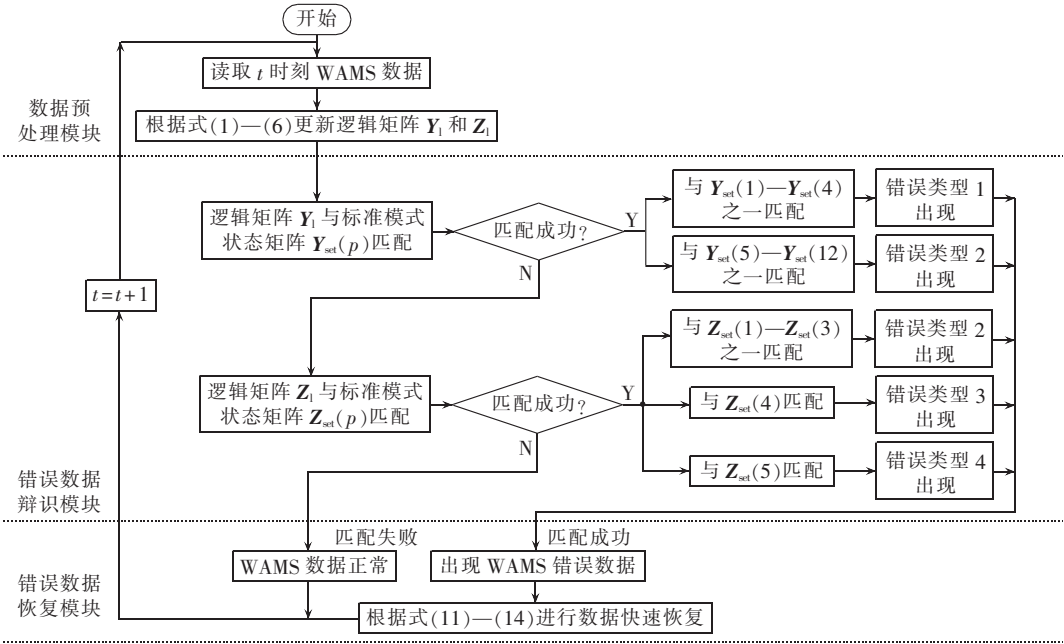


图 5 基于模式识别的广域测量系统错误数据快速辨识方法流程图

Fig.5 Flowchart of rapid wrong WAMS data identification based on pattern recognition

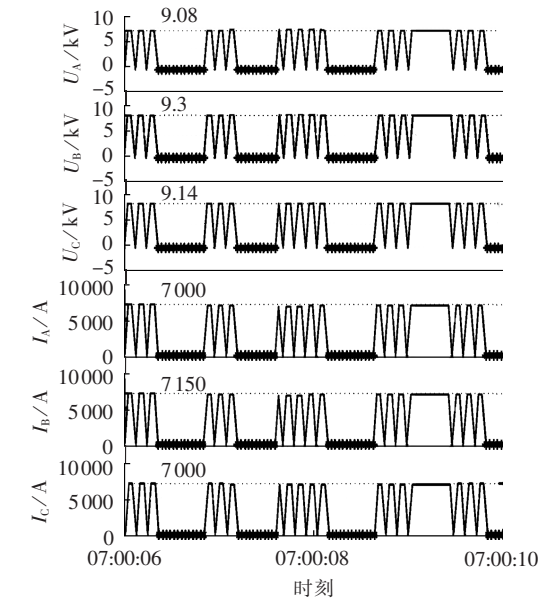


图 6 某电厂 1 号机组三相电压、电流幅值波形 (原始 WAMS 波形)

Fig.6 Three-phase voltage and current waveforms of Generator 1 in a power plant (original WAMS signals)

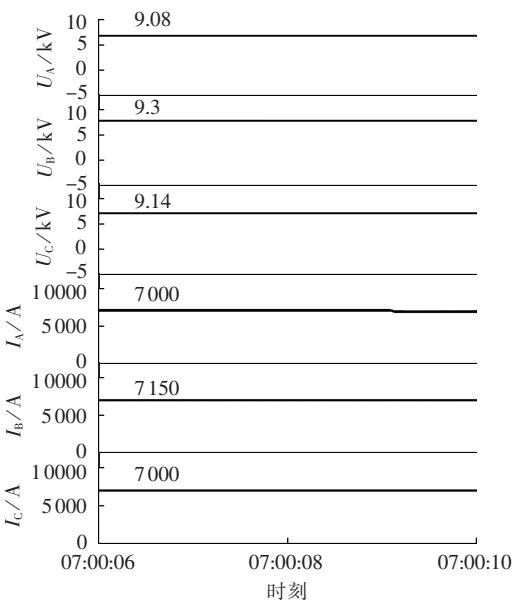


图 8 某电厂 1 号机组三相电压、电流幅值波形 (修复 WAMS 波形)

Fig.8 Three-phase voltage and current waveforms of Generator 1 in a power plant(recovered WAMS signals)

速辨识及恢复方法能够快速准确地对符合 WAMS 错误数据时序相对变化量变化趋势矩阵 $Y_{set}(p)$ 和时序数值矩阵 $Z_{set}(p)$ ($p=1,2,\dots$) 的错误数据进行判别及恢复工作。另选取 45 组 WAMS 错误数据 (每组数据时间长度为 3 min) 和 15 组常见事故 WAMS 数据 (每组数据时间长度为 1 min) 作为测试样本检验本文所提方法,结果如表 3 所示。WAMS 错误数据样本的辨识中未辨识成功的错误数据占总数据比例仅为 0.68%,基本不会对后续基于 WAMS

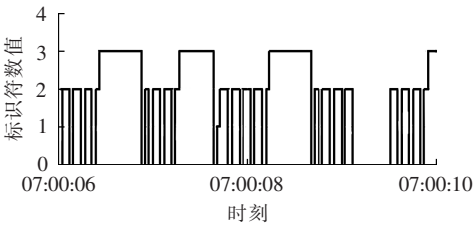


图 7 错误数据类型标识符示意图

Fig.7 Schematic diagram of type tags of wrong data

8 的恢复结果可知,本文所述的 WAMS 错误数据快

表 3 样本辨识结果
Table 3 Results of sample identification

测试样本组别	样本数	总数据点数	总错误数据数	辨识结果	辨识成功率/%
WAMS 错误数据	45	202500	154305	152916	99.1
常见事故 WAMS 数据	15	22500	0	0	—

数据的高级应用的正常使用产生影响。表中针对常见事故(包括线路短路、发电机正常切机、发电机故障切机等)WAMS 数据的处理结果表明,该方法不会对正常的故障数据造成影响。从辨识结果可知,该方法具有辨识成功率高、针对性强等特点。

为了说明所提方法的快速性,记录每组 WAMS 错误数据的算法所需时间,计算得到每组 WAMS 错误数据的平均耗时,进而根据采样频率(本文中, $f_s=25$ Hz)得到每个采样点的平均耗时和最大耗时,如表 4 所示。从表中结果可知,所提方法的每个采样点的平均计算时间和最大计算时间均远小于采样间隔(40 ms),可以快速地实现对 WAMS 错误数据的辨识及恢复。

表 4 所提方法计算时间

Table 4 Execution times of proposed method

样本数	每组样本平均耗时/s	单个采样点平均耗时/s	单个采样点最大耗时/s	采样时间/s
45	9.742	2.165×10^{-3}	2.227×10^{-3}	4.000×10^{-2}

4 结论

本文根据实际运行的 WAMS 上传的 PMU 监测数据的特点,总结了 WAMS 数据的常见错误类型,据此提出了基于模式识别的 WAMS 错误数据快速辨识及恢复方法,并将其应用于实际运行的监测数据上,结果表明该方法能够快速准确地判别错误数据并实现恢复工作,有效地提高了 PMU 数据的质量水平,为后续基于 WAMS 数据的各类应用功能的实现提供了正确的数据来源。

参考文献:

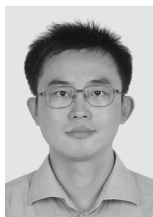
- [1] 鞠平,郑世宇,徐群,等. 广域测量系统研究综述[J]. 电力自动化设备,2004,24(7):37-40.
JU Ping,ZHENG Shiyu,XU Qun,et al. Survey of wide area measurement system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004,24(7):37-40.
- [2] 郑涛,高伏英. 基于 PMU 的机组一次调频特性参数在线监测[J]. 电力系统自动化,2009,33(11):57-61.
ZHENG Tao,GAO Fuying. On-line monitoring and computing of unit PFR characteristic parameter based on PMU [J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(11):57-61.
- [3] 曹一家,刘毅,高振兴,等. 一种大规模电网故障诊断的多智能体信息融合模型与方法[J]. 电力自动化设备,2010,30(7):14-18.
CAO Yijia,LIU Yi,GAO Zhenxing,et al. Model and method of

large scale grid fault diagnosis based on multi-agent system and information fusion technology[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(7):14-18.

- [4] ZHONG Z,XU C,BILLIAN B J,et al. Power system frequency monitoring network(FNET) implementation[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2005,20(4):1914-1921.
- [5] 李虹,李卫国,赵书强,等. 利用 WAMS 的电力系统动态状态估计结果校正[J]. 中国电机工程学报,2010,30(25):74-80.
LI Hong,LI Weiguo,ZHAO Shuqiang,et al. Results correction for power system dynamic state estimation based on WAMS[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(25):74-80.
- [6] 顾卓远,汤涌,孙华东,等. 一种基于转速差-功角差变化趋势的暂态功角稳定辨识方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(31):65-72.
GU Zhuoyuan,TANG Yong,SUN Huadong,et al. An identification method for power system transient angle stability based on the trend of rotor speed difference-rotor angle difference[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(31):65-72.
- [7] 刘道伟,谢小荣,穆钢,等. 基于同步相量测量的电力系统在线电压稳定指标[J]. 中国电机工程学报,2005,25(1):13-17.
LIU Daowei,XIE Xiaorong,MU Gang,et al. An on-line voltage stability index of power system based on synchronized phasor measurement[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(1):13-17.
- [8] 薛禹胜,徐伟,DONG Zhaoyang,等. 关于广域测量系统及广域控制保护系统的评述[J]. 电力系统自动化,2007,31(15):1-5.
XUE Yusheng,XU Wei,DONG Zhaoyang,et al. A review of wide area measurement system and wide area control system[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(15):1-5.
- [9] 刘新东,江全元,黄志光,等. 基于广域测量系统的功角稳定预测与发电机失步保护的协调控制[J]. 电力自动化设备,2009,29(7):52-55.
LIU Xindong,JIANG Quanyuan,HUANG Zhiguang,et al. Coordination between rotor angle stability and out-of-step protection based on WAMS[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009,29(7):52-55.
- [10] 段刚,严亚勤,谢晓冬,等. 广域相量测量技术发展现状与展望[J]. 电力系统自动化,2015,39(1):73-80.
DUAN Gang,YAN Yaqin,XIE Xiaodong,et al. Development status quo and tendency of wide area phasor measuring technology[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(1):73-80.
- [11] 闪鑫,赵家庆,张剑,等. 基于三态数据的电网在线综合故障诊断[J]. 电力系统自动化,2012,36(23):78-81.
SHAN Xin,ZHAO Jiaqing,ZHANG Jian,et al. On-line comprehensive fault diagnosis of power grid based on three-state data [J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(23):78-81.
- [12] BALDICK R,CLEMENTS K A,PINJO D Z,et al. Implementing non-quadratic objective functions for state estimation and bad data rejection[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1997,12(1),376-382.
- [13] 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):72-78.
LI Dahu,CAO Yijia. Wide-area real-time dynamic state estimation method based on hybrid SCADA/PMU measurements [J]. Power System Technology,2007,31(6):72-78.
- [14] CRISTINA O,LOUIS W. Data mining[J]. IEEE Computer

- Application in Power, 1999, 46(6): 19-25.
- [15] 刘浩. 电力系统状态估计、检测及辨识[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(4): 36-38.
- LIU Hao. State estimation and detection and identification of power system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 1999, 11(4): 36-38.
- [16] 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.
- [17] 刘浩, 刘玉田. 模糊数学在状态估计不良数据检测辨识中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 1996, 8(3): 50-57.
- LIU Hao, LIU Yutian. The application of fuzzy mathematics at bad data detection and identification of state estimation [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 1996, 8(3): 50-57.
- [18] 卫志农, 张云岗, 郑玉平. ISODATA 方法在配网状态估计不良数据辨识中的应用[J]. 河海大学学报, 2002, 30(2): 97-100.
- WEI Zhinong, ZHANG Yungang, ZHENG Yuping. The application of ISODATA in the bad data identification of the state estimate of the distribution power system[J]. Journal of Hohai University, 2002, 30(2): 97-100.
- [19] SALEHFAR H, ZHAO R. A neural network pre-estimation filter for bad data diction and identification in power system state estimation[J]. Electric Power Systems Research, 1995, 34(9): 127-134.
- [20] TIBSHIRANI R, WALTHER G, HASTIE T. Estimating the number of clusters in a data set via the gap statistic [J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology), 2001, 63(2): 411-423.
- [21] 张斌. 基于 GSA 的数据挖掘在电力系统不良数据辨识中的应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2003.
- ZHANG Bin. Application of GSA-based data mining for identifying bad data of power system [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2003.
- [22] 曲朝阳, 朱莉, 张士林. 基于 Hadoop 的广域测量系统数据处理[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4): 92-97.
- QU Zhaoyang, ZHU Li, ZHANG Shilin. Data processing of Hadoop-based wide area measurement system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 92-97.
- [23] 温才权. 相量测量装置故障分析[J]. 南方电网技术, 2012, 6(4): 76-78.
- WEN Caiquan. Analysis on common faults of phasor measurement unit[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(4): 76-78.
- [24] 宋晓娜, 毕天姝, 吴京涛, 等. 基于 WAMS 的电网扰动识别方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(5): 24-28.
- SONG Xiaona, BI Tianshu, WU Jingtao, et al. Study on WAMS based power system disturbance identifying method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(5): 24-28.

作者简介:



陈亦平

陈亦平(1978—), 男, 河南镇平人, 高级工程师, 博士, 研究方向为电网调度运行(E-mail: chenyi-ping@csg.cn);

陈伟彪(1991—), 男, 广东汕头人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制;

姚伟(1983—), 男, 湖北黄冈人, 副教授, 博士, 通信作者, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制、柔性直流输电系统及其控制、风力发电系统的非线性控制(E-mail: w.yao@hust.edu.cn)。

Rapid identification and recovery of wrong WAMS data

CHEN Yiping¹, CHEN Weibiao², YAO Wei², LIAO Shiwu², WEN Jinyu², HOU Yunhe², MIAO Shihong²

(1. CSG Power Dispatching & Communication Centre, Guangzhou 510623, China;

2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The types of wrong monitoring data existed in the WAMS(Wide Area Measurement System) based on PMU(Phasor Measurement Unit) are statistically analyzed and a method based on pattern recognition is proposed for the rapid identification and recovery of wrong data, which extracts the features from the data monitored by a PMU, carries out the pattern matching according to the pre-set time-series relative variation matrix and time-series measurement matrix to identify the wrong data in real time, and takes the corresponding recent correct data to rapidly recover them. The proposed method is applied to the actual monitoring data for verifying its feasibility.

Key words: electric power systems; WAMS; PMU; wrong data identification; data recovery