

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2313182

基于同相测量一致性的电压互感器误差 状态在线评估方法*

马克琪 周刚 史建勋 江政昕 陈浩

(国网浙江省电力有限公司嘉兴供电公司 嘉兴 314000)

摘要: 针对一次电压波动下高维随机矩阵评估方法无法可靠评估电压互感器误差状态的问题,提出一种基于同相测量一致性的电压互感器误差状态评估方法。该方法结合核主成分分析及其重构算法,构造灵敏度更高的评价指标,并计及一次电压波动下多台电压互感器评价指标变化的相似性,构造基于测量同相的多台电压互感器差异性评估指标,削弱一次电压波动对状态评估准确度的影响,并根据差异性评价指标的正负此判断误差极性。仿真实验及现场应用结果表明:改进后的高维随机矩阵评估方法能够可靠地评估电压互感器0.2%的误差异常状态。

关键词: 电压互感器;误差;一次电压波动;同相测量一致性;高维随机矩阵

中图分类号: TM451 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510

On-line error evaluation method of instrument voltage transformers based on MCSP

Ma Keqi Zhou Gang Shi Jianxun Jiang Zhengxin Chen Hao

(Jiaxing Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Jiaxing 314000, China)

Abstract: The existing evaluation methods based on large-dimensional random matrices cannot reliably evaluate transformers due to the influence of primary voltage fluctuations, this paper proposes a method for evaluating the error condition of voltage transformers based on measurement consistency of same phase. The paper use kernel principal component analysis (KPCA) and reconstruction algorithm to establish evaluating indicators with higher sensitivity. Considering the similarity of the evaluating indicators of same phase, a difference evaluating indicator of voltage transformers based on measuring same phase is established to diminish the influence of stationary fluctuations and judge the polarity of errors by judging whether the difference evaluating indicators are positive or negative. The simulation experiments and field application results suggest that 0.2% error of voltage transformers can be estimated using the improved evaluation method based on large-dimensional random matrices.

Keywords: instrument voltage transformers; error; primary voltage fluctuations; measurement consistency of same-phase; large-dimensional random matrices

0 引言

电压互感器是一种广泛应用于变电站的电压测量装置^[1-2],其测量准确性会影响测控保护和计量装置的正常运行^[3-4],直接影响电网的安全稳定和经济运行^[5]。

为保证电压互感器的测量准确性,需要及时、准确地评估电压互感器的误差状态。现有的电压互感器在线评估方法可以分为两大类,一种是集中于对互感器个体与环境参量、输变电参数的精细化研究,包括信号处理法^[6-7]和精确建模法^[8-9],其中信号处理法是对单台互感器输出信号进行

变换、分类和提取,但仅能诊断严重故障,不能实现互感器误差状态评估,而精确建模法是通过挖掘互感器内部及外部的温度、湿度、电场、磁场等参数的变化,来感知互感器的运行状态,但其工程适用性差、准确度不高,不足以支撑0.2级的电压互感器的误差状态评估^[10]。另一种数据驱动的在线评估方法是集中于对互感器群体的评估研究,以互感器群体间的物理联系作为约束条件^[11-12],针对性的研究模型建立和智能计算方法^[13],实现互感器误差的在线评估,但该类方法一般要求互感器的输出信号符合特定条件,如文献^[11-12]要求互感器输出信号符合正态分布特征、文

收稿日期:2023-03-23

献[13]要求有 3 组及以上的电压互感器,而实际运行条件下,电压信号分布特征复杂多样,同一线路处一般仅配置 2 组电压互感器,该类评估方法建模条件苛刻,应用场景受限。综上所述,现有的技术路线无法满足电压互感器的误差状态评估要求。

电压互感器误差状态评估涉及大数据规模与适用性问题。高维随机矩阵理论作为对复杂系统进行统计分析的大数据方法之一^[14-15],具有计算简单、建模条件宽泛等大数据分析优点^[16-17],适用于全网域电压互感器运行状态在线实时评估^[18]。鉴于现有的高维随机矩阵评估方法评价指标灵敏度不高,难以区分一次电压波动与互感器误差信息且无法判断误差极性的问题^[19],本文考虑误差的长期变化,结合核主成分分析及其重构算法,构造灵敏度更高的评价指标,并计及一次电压波动下多台电压互感器评价指标变化的相似性,构造基于测量同相的多台电压互感器差异性评估指标,削弱一次电压波动对状态评估的影响,并据此判断误差异常时的误差极性。仿真及现场应用结果表明,改进后的高维随机矩阵评估方法能够可靠地评估电压互感器的误差状态。

1 高维随机矩阵评价指标及其阈值

1.1 评价指标

为准确地描述高维随机矩阵极限谱分布中特征值的整体情况,本文利用核主成分分析^[20](kernel principal component analysis, KPCA)及其重构算法对极限谱分布圆环图中的特征值点进行聚类分析与迭代计算,得到 KPCA 重构数据 z ,如图 1 所示为对一圆环图进行处理所得的重构数据。

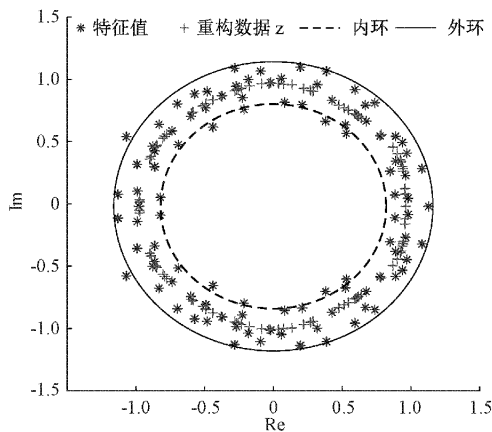


图 1 圆环图及其重构数据

鉴于高维随机矩阵圆环律只是反映电压互感器某一时刻误差的变化,无法反映误差的渐变性误差变化,对此,本文取重构数据距原点距离最小值的倒数与原始矩阵 H_1 元素平均值的乘积作为电压互感器误差状态评价指标 D :

$$D = \frac{\text{avg}(H_1)}{\min(\|z\|)} \quad (1)$$

式中: $\text{avg}(H_1)$ 定义为原始矩阵 H_1 所有元素的平均值。

1.2 评价指标阈值

假设电压互感器正常运行时,对电压互感器做 n_1 次评估,得到 n_1 个评价指标 D_1, D_2, \dots, D_{n_1} ,将正常运行时的评价指标作为计算评估阈值的参考数据集 $\{D_{\text{limit}}\}$ 。并利用计算便捷的核密度估计方法^[19]与高斯核函数获取 D 的概率密度函数:

$$f_{\sigma}(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}n_1\sigma} \sum_{i=1}^{n_1} \exp\left[-\frac{(D-D_i)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2)$$

设定显著性水平为 τ , D_{limit} 为判别阈值,即 $f_{\sigma}(D_{\text{limit}}) = \tau$, $D_{\text{limit}} = f^{-1}(\tau)$ 。

若 $D < D_{\text{limit}}$,表明设备的运行状态正常,若 $D > D_{\text{limit}}$,表明设备的运行状态异常。

由于电压互感器输出测量数据中存在一次电压波动成分,直接由测量数据作为高维随机矩阵元素计算得到的评价指标 D 不能区分一次电压波动与互感器自身误差变化。

2 电压互感器状态评估模型构建

针对一次电压波动对高维随机矩阵评估方法的影响,本章基于电压互感器一次电压的一致性,提出基于同相测量一致性(measurement consistency of same phase, MCSP)的差异性评价指标,削弱了一次电压波动对误差状态评估准确性的影响。

2.1 基于同相测量一致性的差异性评价指标

为了满足变电站内的冗余配置要求,通常有多台电压互感器连接到变电站中的同一传输线、母线和电力变压器的同一相。此时,连接到同一相的电压互感器测量的是同一电压,即:

$$U_1^i = U_2^i = \dots = U_L^i, i = 1, 2, \dots, L \quad (3)$$

式中: U_1^i 表示第 i 组电压互感器的一次电压, L 表示同一测量点处共有 L 台同相的电压互感器,则 L 组电压互感器的输出电压为:

$$\begin{bmatrix} U_2^1 \\ U_2^2 \\ \vdots \\ U_2^L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 U_1^1 \\ k_1 U_1^2 \\ \vdots \\ k_1 U_1^L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: U_2^i 表示第 i 组电压互感器的二次侧输出电压, k_1 表示电压互感器变比, ϵ_i 表示第 i 组电压互感器的误差。

因此,同一测量点处的电压互感器的二次输出包含的一次电压波动信息基本相同,其差异性主要表现为误差信息的差异性。此时由多组电压互感器计算得到的评价指标 D 的差异性主要是由其自身的误差引起的。

此时,可定义如下差异性矩阵:

$$\Delta \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & D_1 - D_2 & \cdots & D_1 - D_L \\ D_2 - D_1 & 0 & \cdots & D_2 - D_L \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_L - D_1 & D_L - D_2 & \cdots & 0 \end{bmatrix}_{L \times L} \quad (5)$$

由于一次电压波动引起的评价指标的变化基本一致,则:

$$\Delta \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & D_1^e - D_2^e & \cdots & D_1^e - D_L^e \\ D_2^e - D_1^e & 0 & \cdots & D_2^e - D_L^e \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_L^e - D_1^e & D_L^e - D_2^e & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: D_i^e 表示第 i 组电压互感器中由误差引起的评价指标分量。

取差异性矩阵的 ∞ 范数作为多台电压互感器误差状态评估的差异性评价指标,即:

$$\|\Delta \mathbf{D}\|_{\infty} = \max_{1 \leq i \leq L} \left| \sum_{j=1}^L \Delta D_{ij} \right| = \max\{|\Delta D_1|, |\Delta D_2|, \dots, |\Delta D_L|\} \quad (7)$$

式中: $\Delta D_{ij} = D_i - D_j, \Delta D_i = \sum_{j=1}^L \Delta D_{ij}$ 。

考虑实际工况下多台电压互感器的误差差异性,若 L 台电压互感器的误差状态均正常,则 L 台电压互感器的差异性评价指标极小;反之,差异性评价指标将显著增大。

由式(7),若取 $\|\Delta \mathbf{D}\|_{\infty}$ 计算得到的差异性评价指标阈值为 ΔD_{limit} ,则当某一时刻 $\|\Delta \mathbf{D}\|_{\infty} < \Delta D_{limit}$,则该时刻 L 台电压互感器的误差状态均正常,取此时刻的评价指标更新参考数据集 $\{D_{limit}\}$;若 $\|\Delta \mathbf{D}\|_{\infty} > \Delta D_{limit}$,则该时刻 L 台电压互感器中存在误差状态异常的电压互感器。此时,可根据 L 台电压互感器评价指标的相对大小,定位误差状态异常的电压互感器:若 $|\Delta D_i| > \forall |\Delta D_j| (j=1, 2, \dots, L, j \neq i)$,即 L 台电压互感器的差异性评价指标中, $|\Delta D_i|$ 为最大值,则第 i 台电压互感器的误差状态异常。根据差异性评价指标的正负,判断误差的极性:当第 i 组电压互感器误差状态异常时,若 $\Delta D_i > 0$,判断为正极性误差状态异常,否则为负极性误差状态异常。

2.2 电压互感器误差状态评估

基于 MCSP 的电压互感器误差状态评估方法步骤如图 2 所示。

- 1) 采集 L 台同相电压互感器的输出电压。
- 2) 不断差分处理输出电压时间序列,得到符合平稳分布特征的特征参量。
- 3) 将特征参量序列作为矩阵元素构建高维随机矩阵。
- 4) 计算随机矩阵极限谱分布圆环图特征值。
- 5) 利用 KPCA 重构算法计算得到 L 台电压互感器的评价指标 D_1, D_2, \dots, D_L 与差异性矩阵 $\Delta \mathbf{D}$ 。
- 6) 利用核密度估计方法求得 L 台电压互感器正常运行时的差异性评价指标阈值 ΔD_{limit} ,进而评估 L 台电压互

感器的误差状态。

7) 若 L 台电压互感器中存在误差状态异常的电压互感器,根据 L 台电压互感器评价指标的相对大小,定位误差状态异常的电压互感器:若 $|\Delta D_i| > \forall |\Delta D_j| (j=1, 2, \dots, L, j \neq i)$,即 L 台电压互感器的差异性评价指标中, $|\Delta D_i|$ 最大,则第 i 台电压互感器的误差状态异常。

8) 根据差异性评价指标的正负,判断误差的极性:当第 i 组电压互感器误差状态异常时,若 $\Delta D_i > 0$ 为正极性误差状态异常,否则为负极性误差状态异常。

9) 实时更新评估模型参数,完成电压互感器误差状态的评估。

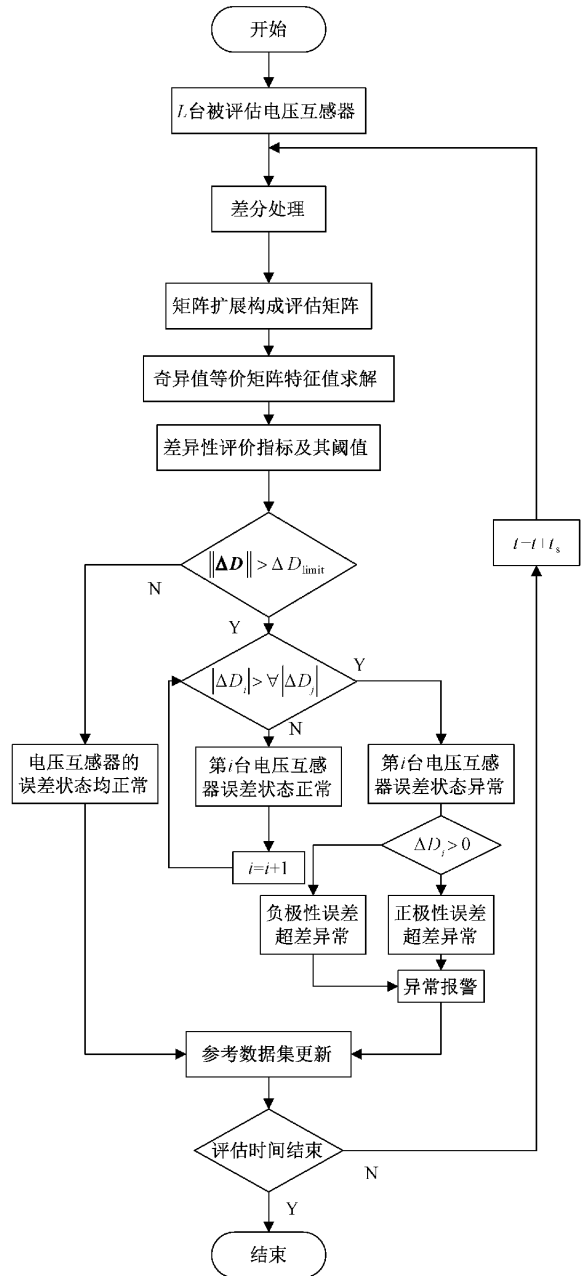


图 2 电压互感器误差状态评估流程图 (t_s 为步进长度)

3 仿真实验验证

本节设置评价指标可靠性分析实验与渐变性误差分析实验分别验证本文提出的高维矩阵评价指标相较于已有的评价指标具有更高的灵敏度,且能通过差异性评价指标准确、可靠地评估电压互感器的误差状态。

3.1 仿真设置

实测数据来源于江苏某 110 kV 变电站,数据采集依靠变电站中控室内安装的 0.05 级高精度采集装置实现,利用该装置采集电子式电压互感器二次输出电压信号,提取其基波电压幅值。从采集数据中选取 3 天的数据构成实验数据集,如图 3 所示。

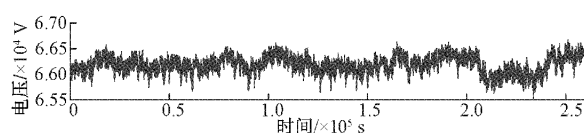


图 3 仿真实验数据集

3.2 评价指标可靠性分析

为验证本文提出的基于 KPCA 的评价指标相较于已有的评价指标具有更高的灵敏度,本节在仿真实验数据集某一段设置 0%~0.2% 逐渐增大的固定偏差,如图 4 所示。

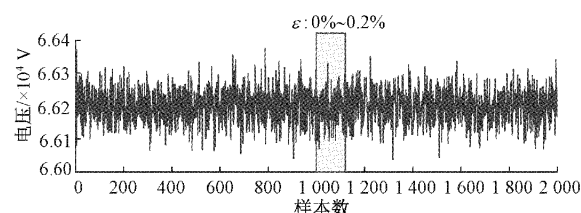


图 4 相对误差设置

设置矩阵大小为 40×50 ,分别按照已有的评价指标计算方法与本文提出的评价指标计算方法,得到平均值 MSR、最大值 λ_{\max} 、最小值 λ_{\min} 、内环中特征值个数 n_{in} 与本文提出的评价指标 D ,比较不同评价指标随固定偏差的变化情况。

由图 5 可知,随着引入的固定偏差的逐渐增大,由 KPCA 重构算法计算得到的评价指标逐渐增大,而现有评价指标,不论是平均值 MSR、最大值 λ_{\max} 、最小值 λ_{\min} ,还是内环中特征值个数 n_{in} ,这些评价指标变化均不明显,不能够反映引入的固定偏差大小的变化,即本文提出的利用 KPCA 重构算法计算得到的评价指标具有更高的灵敏度,能有效的评估电压互感器误差状态的变化。

评价指标可靠性分析表明:KPCA 重构算法计算得到的评价指标相较于已有的评价指标具有更高的灵敏度。

3.3 渐变性误差分析

为验证评估方法对渐变性误差与多组电压互感器的评估效果,设计如下算例:在仿真实验数据集中分别叠加 0~0.5% 变化的正极性与负极性渐变性误差,如图 6 所示,将原始数据、正极性误差、负极性误差分别记为互感器 1、互

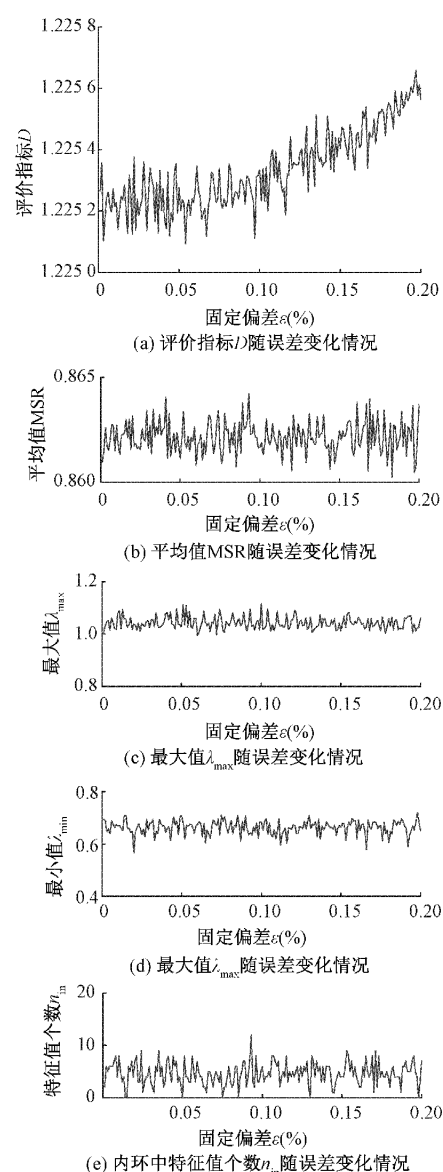


图 5 评价指标可靠性分析评估结果

感器 2 与互感器 3,分别如图 6(a)、(b)和(c)所示。设置矩阵大小为 40×50 ,步进长度 t_s 为 1,显著性水平 τ 为 0.05,评价指标个数 $n_1=100$,验证该场景下,本文方法对评估电压互感器最为关注的渐变性误差的适用性。

由图 7 可知,当渐变性误差逐渐增大时,第二台电压互感器的差异性评价指标显著增大,第三台电压互感器的差异性评价指标显著减小,且两台电压互感器的差异性评价指标变化相反,即本文提出的方法能够可靠评估互感器渐变性误差的变化,且能通过评价指标的绝对大小,辨别渐变性误差的正负极性。

渐变性误差分析表明:基于同相测量一致性的评估方法适用于互感器渐变性误差变化状态评估且能辨别渐变性误差的正负极性。理论上可以推广至站域甚至全网域电压互感器群体状态评估。

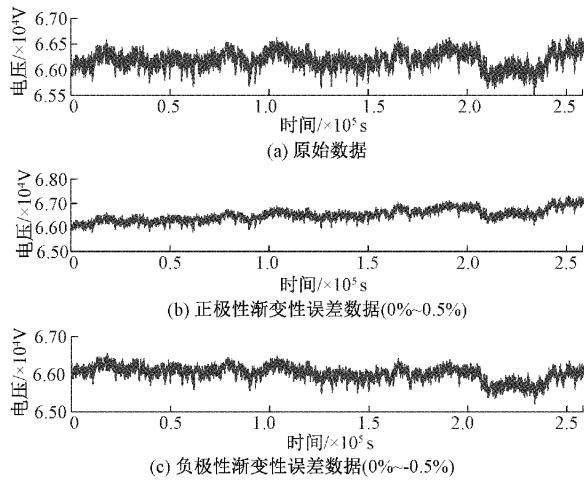
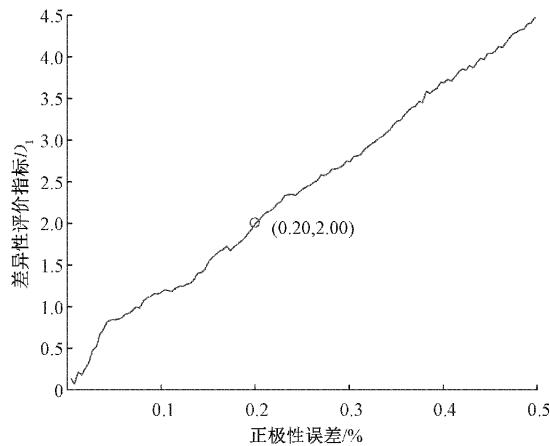
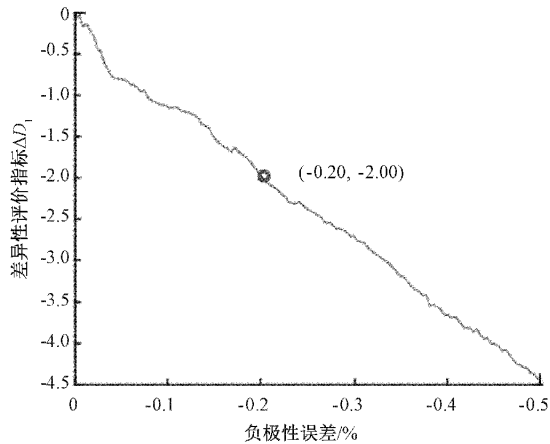


图 6 实测数据引入渐变性误差



(a) 正极性渐变性误差评估结果



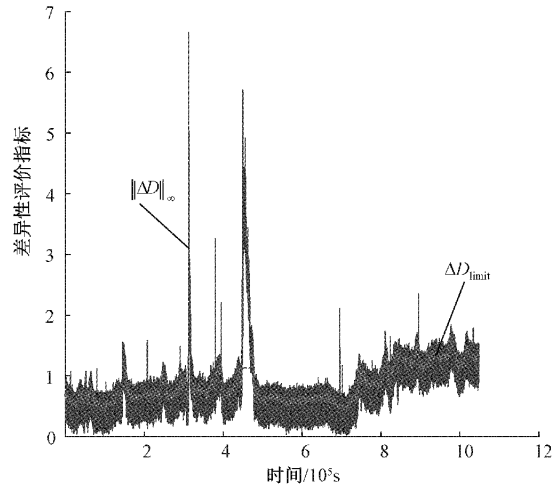
(b) 负极性渐变性误差评估结果

图 7 渐变性误差的评估结果

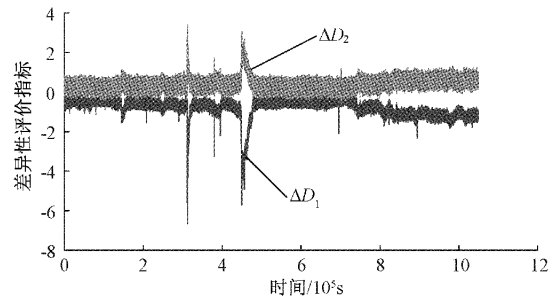
4 现场应用分析

将本文提出的评估方法应用于某 110 kV 变电站,在 110 kV 进线的 A 相布置有一台 0.05 级的电磁式电压互感器,在站内主变、母线上布置有三台 0.2 级的电子式电压互

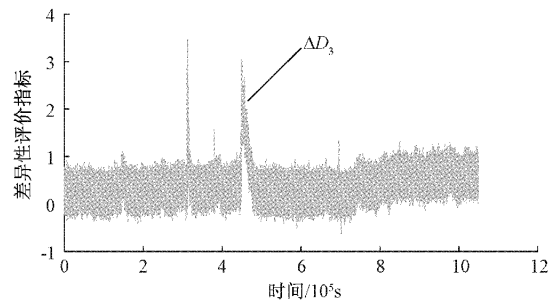
感器 (electronic voltage transformer, EVT), 分别记为 EVT_1 、 EVT_2 与 EVT_3 。基于本文提出的评估方法分析电子式互感器的误差状态,电磁式互感器和电子式互感器的比对结果作为参考验证。3 组 EVT 的评估结果如图 8 所示。



(a) 整体评价指标与阈值



(b) EVT_1 与 EVT_2 评价指标与阈值



(c) EVT_3 评价指标与阈值

图 8 3 台电压互感器评估结果

图 8(a)中,虚线表示评估阈值,实线表示差异性评价指标。在绝大多数时刻,评估阈值均大于差异性评价指标,即这些时刻,3 台电压互感器的误差状态均正常;在第 3~6 天时间范围内,三相差异性评价指标 $\|\Delta D\|_{\infty}$ 均显著大于评估阈值,即在第 3~6 天时间范围内,3 台电压互感器中存在误差状态异常的电压互感器。

由图 8(b)、(c)知,误差异常时刻, ΔD_2 与 ΔD_3 图像基本重合,而 $|\Delta D_1|$ 取最大值,即第一台电压互感器的误差状

态异常,由 $\Delta D_1 < 0$,判断第一台电压互感器为负极性误差状态异常。

为验证评估结果的准确性,以站内电磁式电压互感器为参考标准,比对获取 EVT 的相对误差,如图 9 所示。

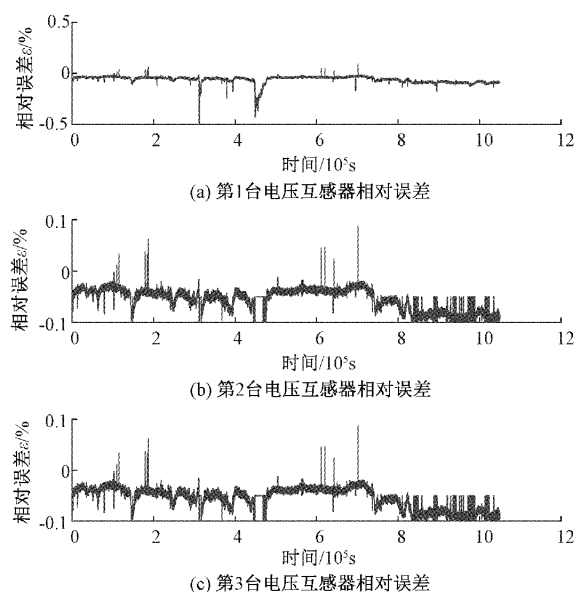


图 9 3 台电压互感器比对结果

比对结果表明:在第 3~6 天范围内,观察到第 1 台电压互感器存在负极性误差异常波动,但其余时刻的误差状态正常;而第 1 台电压互感器与第 2 台电压互感器的电压在所监测时间段内的误差状态均正常。比对结果与评估结果一致,验证了评估方法的有效性。

5 结 论

针对现有的高维随机矩阵评价指标灵敏度低的问题,考虑误差的长期性变化,结合 KPCA 重构算法,构造了灵敏度更高的评价指标。

针对无法区分一次电压波动与误差信息且无法判断误差极性的问题,计及多台电压互感器评价指标的变化规律,构造基于 MCSP 的差异性评价指标,削弱了一次电压波动对状态评估的影响,并根据评价指标的正负判断误差极性。

仿真结果表明,基于 MCSP 的差异性评价指标灵敏度更高,能够有效地削弱一次电压波动对高维随机矩阵误差状态评估的影响,能够判断 0.1% 的误差异常,且能够判断误差异常时的误差极性,可推广至全网域电压互感器的误差状态实时评估。

在某 110 kV 变电站开展工程试点应用,研究分析了评估方法对 0.2 级电压互感器误差评估的效果,所得结果与电磁式互感器的比对结果一致。

本文提出的评估方法并没有考虑多台电压互感器同时出现异常,这对于极端异常情况是可能出现的,后续的研究需要继续分析这种异常情况对评估体系的影响。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 互感器:GB/T 20840[S]. 北京:中国标准出版社,2013.
- [2] 李璿,丁嘉靖,刘西超,等. 具有电压自动调整功能的供电型电压互感器误差来源分析及补偿[J]. 高电压技术,2020,46(7):2554-2560.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局. 测量用电压互感器:JJG 314—2010[S]. 北京:中国计量出版社,2011.
- [4] 徐龙彬,欧阳姬. 电压互感器温度场计算研究[J]. 电子测量技术,2019,42(6):52-56.
- [5] 赵双双,黄清,李志新,等. 电子式互感器状态评价及可靠性分析[J]. 国外电子测量技术,2018,37(5):46-50.
- [6] 陈刚,徐敏锐,穆小星,等. 基于改进神经网络算法的互感器在线监测和故障诊断技术[J]. 电测与仪表,2020,57(11):49-54,62.
- [7] 王涛,张宁,刘琳,等. 有源电子式互感器故障诊断技术的研究与应用[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(18):74-79.
- [8] 张秋雁,程含渺,李红斌,等. 数字电能计量系统误差多参量退化评估模型及方法[J]. 电网技术,2015,39(11):3202-3207.
- [9] KHANDEPARKAR K V, SOMAN S A, GAJJAR G. Detection and correction of systematic errors in instrument transformers along with line parameter estimation using PMU data[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4):3089-3098.
- [10] 王洪彬,唐昆明,徐瑞林,等. 数字化变电站电子式互感器渐变故障诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(24):53-58.
- [11] ZHANG Z, LI H B, TANG D P, et al. Monitoring the metering performance of an electronic voltage transformer on-line based on cyber-physics correlation analysis[J]. Measurement Science and Technology, 2017,28(10):105015.
- [12] ZHANG Z, CHEN Q, HU C, et al. Evaluating the metering error of electronic transformers on-line based on VN-MWPCA[J]. Measurement, 2018, 130: 1-7.
- [13] ZHANG C J, LI H B, YANG J, et al. Detecting measurement error drifts of a capacitor voltage transformer on-line and its field application [J]. Measurement Science and Technology, 2019, 30(10): 105109.
- [14] 程含渺,李红斌,徐晴,等. 基于高维随机矩阵的系统状态评估方法研究[J]. 电力工程技术,2018,37(1):72-78.
- [15] HE X, AI Q, QIU R C, et al. A big data architecture design for smart grids based on random matrix theory[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017,

- 8(2):674-686.
- [16] YAN Y J, SHENG G H, QIU R C, et al. Big data modeling and analysis for power transmission equipment: A novel random matrix theoretical approach[J]. IEEE Access, 2018, 6: 7148-7156.
- [17] 陈伟彪,陈亦平,姚伟,等. 基于随机矩阵理论的故障时刻确定和故障区域定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2018,38(6):1655-1664.
- [18] 胡琛,张竹,焦洋,等. 基于随机矩阵理论的电子式互感器误差状态相关性分析方法[J]. 电力自动化设备, 2018,38(9):45-53.
- [19] 赵鹏,马克琪,李红斌,等. 计及一次电压波动的电压互感器误差状态在线评估方法[J]. 高电压技术,2022,48(3):1042-1051.
- [20] WEBB A R. Statistical pattern recognition[M]. 2nd ed. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd, 2002: 196-201.

作者简介

马克琪, 硕士, 主要研究方向为电力设备状态监测、电力设备智能运维。

E-mail:2870662798@qq.com

周刚, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为电网智能运维、电力设备智能检修。

E-mail:1498848626@qq.com