

DOI: 10.13715/j.issn.2096-644X.20250417.0001

引用格式:汪攀,杨正兰,刘海波,等.数据驱动的电压互感器误差在线监测方法[J].湘潭大学学报(自然科学版),2026,48(2):60-72.

Citation: WANG Pan, YANG Zhenglan, LIU Haibo, et al. Data-driven online monitoring method for voltage transformer errors [J]. Journal of Xiangtan University (Natural Science Edition), 2026,48(2):60-72.

数据驱动的电压互感器误差在线监测方法*

汪攀¹, 杨正兰¹, 刘海波², 徐虎¹, 赵言涛¹

(1. 威胜集团有限公司 湖南省电测仪表工程技术研究中心, 湖南长沙 410000;

2. 湖南科技大学 机械设备健康维护湖南省重点实验室, 湖南湘潭 411100)

摘要:【目的】针对高压电容式电压互感器需定期停电校验、现场检测不便的技术难题, 该文提出一种新型电容式电压互感器误差在线监测与定量评估方法. 该方法无需接入物理标准器, 仅通过对电容式电压互感器二次侧采样数据进行分析, 即可实现其误差的定量计算. 【方法】首先, 以三相电容式电压互感器为基本计算单元, 采用主成分分析 (PCA) 构建表征互感器误差特征的残差子空间, 并计算各组 Q 统计量, 选取 Q 统计量最小的一组电压互感器为虚拟标准比对互感器. 然后, 基于电压互感器集群的同相约束关系, 建立电容式电压互感器同相误差约束方程. 最后, 结合虚拟标准互感器求解约束方程, 得到所有通道电容式电压互感器的定量误差. 【结果】现场数据验证表明: 所提方法可有效实现电容式电压互感器误差在线定量计算, 比值误差计算偏差小于 0.03%, 具备较高精度与工程实用性. 【结论】该文有望解决电容式电压互感器断电检修时难以实施, 导致大量在运电容式电压互感器存在超差风险的行业难题.

关键词: 电压互感器; 误差评估; 智能运维; 状态监测

中图分类号: TM93

文献标志码: A

文章编号: 2096-644X(2026)02-0060-13

Data-driven online monitoring method for voltage transformer errors

WANG Pan¹, YANG Zhenglan¹, LIU Haibo², XU Hu¹, ZHAO Yantao¹

(1. Weisheng Group Co., Ltd., Hunan Provincial Engineering Research Center for Electrical Measurement Instruments, Changsha 410000, China; 2. Hunan University of Science and Technology. Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment, Xiangtan 411100, China)

Abstract: 【Objective】Aiming at the technical problems of regular power-off calibration and inconvenient on-site detection for high-voltage capacitive voltage transformer, this paper proposes a novel method for on-line monitoring and quantitative evaluation of capacitive voltage transformer error. Without the need for physical standard devices, the method can realize quantitative calculation of capacitive voltage transformer error only by analyzing the sampling data on the secondary side of capacitive voltage transformer. 【Method】Firstly, taking three-phase capacitive voltage transformers as the basic calculation unit, principal component analysis (PCA) is adopted to construct a residual subspace characterizing the error characteristics of the transformers, and the Q -statistic of each group is calculated. The group of voltage transformers with the minimum Q -statistic is selected as the virtual standard reference transformer. Then, based on the in-phase constraint relationship of the transformer cluster, an in-phase error constraint equation of capacitive voltage transformers is established. Finally, combined with the virtual standard transformer, the constraint equation is solved to obtain the quantitative errors of all channel capacitive voltage transformers. 【Result】

* 收稿日期: 2025-04-17

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFB2403800) 湖南省科技创新湖湘青年英才 (2023RC3231)

通信作者: 汪攀 (1987-), 男, 湖北孝感人, 博士后, 高级工程师. E-mail: wangp2007@hnu.edu.cn

Field data verification shows that the proposed method can effectively realize the on-line quantitative calculation of capacitive voltage transformer error, with the ratio error calculation deviation less than 0.03%, which has high accuracy and engineering practicability. 【Conclusion】 This paper is expected to address the industry challenge of the difficulty in implementing power-off maintenance for capacitive voltage transformers, which leads to the risk of excessive deviations in a large number of in-service capacitive voltage transformers.

Key words: voltage transformer; error evaluation; intelligent operation and maintenance; condition monitoring

0 引言

电容式电压互感器 (CVT) 是电能测量系统中广泛使用的一种电压互感器, 它将电力系统一次侧高电压成比例降低, 并传送至二次侧测量仪表和继电保护设备, 实现电力测量。由于其具有绝缘性能好、体积小、重量轻、可避免电磁式电压互感器 (PT) 因铁心饱和引起电网谐振现象等特点^[1-2], 而被广泛应用于 110 kV 及以上的高压电网中^[3-4]。但电容式电压互感器的等效电路较传统电磁式电压互感器更为复杂, 增加了电容分压器、补偿电抗器等部件, 因此其计量准确度会受到更多因素影响。长时间挂网运行以后, 电容式电压互感器容易出现绝缘性能下降、超差、故障率高等问题^[5-6]。针对电容式电压互感器的超差 (误差水平超过正常水平) 检测, 普遍采用的方法是通过高精度的标准仪器设备, 在停电的条件下, 对互感器进行离线的检修与诊断^[7-8]。该种诊断方法存在明显的局限性: 首先是停电检修流程复杂、成本高、耗时长、效率低; 其次, 停电的检定方法, 检定的是离线状态下电力互感器的误差状态, 不能全面反映运行误差的动态变化; 最后, 高精度的标准设备存在体积大、灵活性差的特点, 而变电站等地的电力互感器分布, 具有数量多、范围广的特点。

综上所述, 亟需提出一种电容式电压互感器误差在线监测方法, 在不需要标准器的前提下, 对电容式电压互感器的误差状态进行实时在线监测。国内外学者对此进行了深入的研究与探索。第一类是基于信号处理的互感器误差评估方法, 该类方法是对传感器输出的信号进行异常识别, 通过特征提取、分类与识别, 实现互感器误差评估。熊小伏等^[9]提出一种基于小波变换的电子式互感器突变故障诊断方法, 通过小波分析识别互感器信号突变, 该方法主要适用于突变误差, 而实际应用中更多的是随时间缓慢变化的渐变误差。杨学东^[10]提出一种基于小波分形理论的互感器在线评估方法, 利用小波变换在降噪和检测奇异值方面的优势对互感器输出信号进行变换、分解和重构, 提取故障特征, 然后利用分形理论对处理后的信号进行盒维数计算, 根据盒维数对各类故障进行定量分析。但是该方法同样对渐变型故障不敏感, 并且评估灵敏度无法满足 0.2 级准确度互感器的要求。贺永泽^[11]提出一种基于小波能谱熵的互感器在线评估方法, 该方法利用小波变换对互感器二次输出信号进行多尺度分解, 求取各层小波系数的能谱熵值, 利用支持向量机完成故障分类与识别, 但是该方法仅限于在电网一次电压稳定的前提下, 这一前提条件在实际工程应用中难以满足。这类方法是基于电网一次侧信号稳定的前提下, 提取异常特征, 但实际电网受负荷动态变化的影响, 波动范围远大于 0.2%, 因此该方法不适合实际应用。第二类是基于模型的误差评估方法, 对设备的物理模型进行精确建模, 通过理论分析评估互感器误差。王欢等^[12]提出基于误差状态模糊分析的电容式电压互感器内绝缘状态评价方法, 通过建立内绝缘参数 (电容值、介质损耗) 与计量误差的物理模型, 再利用仿真生成典型异常状态样本集, 通过模糊聚类匹配异常状态。该方法需精确等效模型, 计算复杂, 而在实际应用过程中, 上述参数很难获取, 且是实时变化的。王洪彬等^[13]研究一种电子

式互感器渐变性故障诊断方法,该方法对电力系统进行建模,通过对比观测模型的输出值与实际值,判断互感器的误差,该方法在建模时需要一系列假设条件,对于复杂的应用现场,相关参数是不断变化的.基于模型的误差评估方法需要精准电力系统模型参数,而实际上很多参数无法准确获取,或是受环境因素不断变化的,因此该方法仅限于理论仿真,暂无法实现工程应用.第三类是基于物理信息相关性的互感器状态评估方法,根据多通道互感器之间的约束关系,识别互感器集群中的异常信号,实现互感器误差评估.Li等^[14]通过构建基于典型变量分析的互感器测量误差评估模型,以多个互冗余互感器的组相关性为约束条件,构建 T2 统计数据,实现互感器测量误差的准确评估.Li等^[15]提出了一种基于递归主成分分析(PCA)的电压互感器误差评估方法,通过递归 PCA,计算 Q 统计量,实现电压互感器的在线监测.Zhang等^[16]通过对同相位电压互感器进行 PCA,解决了由于电网三相不平衡、电压互感器三相内部相关性不稳定导致计算偏差较大的问题.张竹^[17]提出在电力系统三相对称运行特性约束下,基于 PCA 的电容式电压互感器测量误差监测方法,该方法首先对采样数据进行 PCA,再在残差空间计算互感器集群的 Q 统计量,实现电压互感器误差超差识别,该方法在多个 220 kV 变电站实施试点应用,具有一定的应用效果,但仅限于对电容式电压互感器误差状态进行定性判断,无法对超差的电容式电压互感器进行定位,也无法精确评估电容式电压互感器的误差值.

为了解决上述问题,本文提出一种数据驱动的电容式电压互感器误差在线监测方法.该方法在文献 [17] 提出的方法基础上,引入电容式电压互感器同相位通道误差约束关系,通过理论推导,得到同相位互感器通道误差约束方程.通过 Q 统计量确定虚拟标准比对互感器,结合电容式电压互感器误差的约束方程,求解各通道电容式电压互感器的误差.

1 算法流程

1.1 相关定义

定义 1 电压互感器运行误差:电压互感器的误差包括比值差和角差,比值差是电压互感器幅值对应的误差,其计算公式为(测量值 - 标准值)/标准值,单位为%,角差为电压互感器相角对应的误差,其计算公式为测量值减标准值,单位为分.

定义 2 电压互感器误差状态:根据国网企标 Q/GDW 12006-2019 电压互感器误差特性在线检测仪技术条件可知,电压互感器的误差状态包含正常、警告、异常 3 种.当电压互感器比值差的绝对值 $\leq 0.2\%$,且角差的绝对值 $\leq 10'$ 时,电压互感器的状态为正常;当电压互感器比值差绝对值 $> 0.2\%$ 且 $\leq 0.3\%$,或相位差绝对值 $> 10'$ 且 $\leq 20'$ 时,电压互感器的状态为警告;当电压互感器比值差绝对值 $> 0.3\%$,或相位差绝对值 $> 20'$ 时,电压互感器的状态为异常.

定义 3 三相:三相指的是 A, B, C 三相.本文算法验证采集的是某 220 kV 变电站 4 组三相电容式电压互感器,即 12 通道的电压信号.

定义 4 同相:多组三相电容式电压互感器中,相同相位的通道,如 4 组三相电容式电压互感器的 A 相.

定义 5 计算单元:将采样通道中的部分通道视为一个单元单独进行分析.

1.2 实现流程

本文提出的电容式电压互感器误差监测算法实现流程包含模型训练阶段与模型应用阶段,具体流程如下(假设 m 组三相电容式电压互感器,即通道数 $n = 3m$).

模型训练阶段:

1) 采集 m 组三相电容式电压互感器的二次侧采样数据,将其作为训练数据 \mathbf{X}_0 ,对 \mathbf{X}_0 进

行归一化处理, 得到归一化的数据 X_1 ;

2) 以一组三相电容式电压互感器为计算单元, 对每一组三相电容式电压互感器二次侧采样数据进行 PCA, 得到相应的特征值及其对应的特征向量;

3) 根据贡献率阈值 (本文阈值取 90%), 确定主成分向量 P_x 与残差向量 P_e , 即得到表征电网一次侧电压波动的主元空间投影矩阵 $M_x = P_x P_x^T$ 与表征电容式电压互感器自身误差的残差空间投影矩阵 $M_e = P_e P_e^T$, 即每一组三相电容式电压互感器对应一个投影矩阵 $M_i^e (i = 1, 2, \dots, m)$.

模型应用阶段:

1) 采集 m 组三相电容式电压互感器的二次侧采样数据, 将其作为误差评估数据 Y_0 , 对 Y_0 进行归一化处理, 得到归一化的数据 Y_1 ;

2) 以一组电容式三相电压互感器为计算单元, 将采样数据投影至残差空间, 即得到表征电压互感器误差信息的 Q 统计量, $Q_i = \text{tr}[(Y_1^i M_i^e)(Y_1^i M_i^e)^T] (i = 1, 2, \dots, m)$. Q_i 越大, 意味着电压互感器超差的概率越大.

3) 比较 m 组三相电容式电压互感器的误差信息统计量 Q_1, Q_2, \dots, Q_m , 得到最小值, 假设最小值为 Q_j , 即第 j 组三相电容式电压互感器对应的误差统计量最小, 以此判断第 j 组三相电容式电压互感器为正常状态. 此时将第 j 组三相电容式电压互感器作为虚拟标准互感器;

4) 多组共母线的电容式电压互感器, 存在同相刚性约束关系, 利用刚性约束关系, 建立同相位电容式电压互感器误差值之间的关系;

5) 根据步骤 3) 确定的虚拟标准互感器及步骤 4) 建立的约束关系, 求解所有通道的电容式电压互感器误差值.

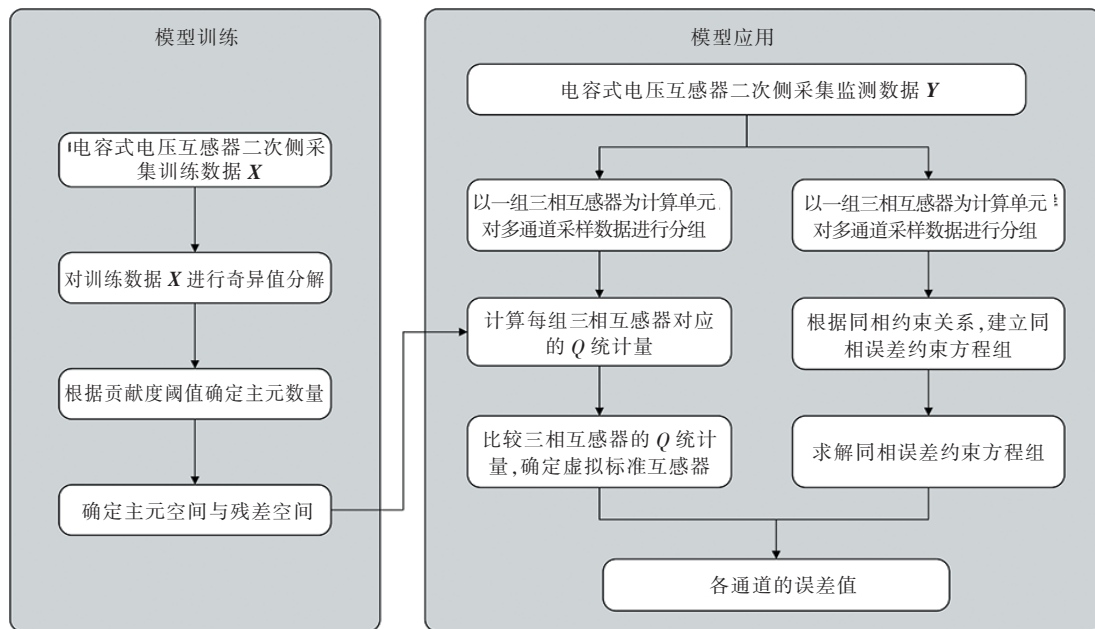


图 1 误差评估算法实现流程图

Fig. 1 Implementation flowchart of error assessment algorithm

2 算法原理

分别介绍了基于 PCA 的电容式电压互感器误差状态监测方法、同母线电容式电压互感器同相位约束关系、基于 Q 统计量的虚拟标准互感器识别方法、误差定量计算实例.

2.1 PCA

由于电力系统固有的三相不平衡特性,多组共母线的三相电容式电压互感器二次侧测量数据之间存在特定的关联性和相互制约关系,这种相关性主要体现在幅值、相位等电气参数的相互影响上.PCA是一种常见的相关分析方法,PCA通过将高维的多变量数据按照方差大小依次投影至低维正交空间,从而达到消除数据相关性的目的.取其中方差较大的部分作为主元成分,构成主元子空间,剩余部分作为残差成分,构成残差子空间.主元子空间表征原始数据信息,在本文表征电网一次侧电压在二次侧的表达,残差子空间表征噪声或误差等数据信息.电容式电压互感器二次侧信号融合了电网一次侧信号与电容式电压互感器自身的误差,通过主元子空间与残差子空间可实现电容式电压互感器一次侧信号波动与自身误差的分离.

将多组电容式电压互感器二次侧采样数据归一化,得到数据 \mathbf{X} , 做如下分解:

$$\mathbf{X} = \mathbf{u}_1 \mathbf{p}_1^T + \mathbf{u}_2 \mathbf{p}_2^T + \cdots + \mathbf{u}_n \mathbf{p}_n^T = \mathbf{U} \mathbf{P}^T, \quad (1)$$

式中: $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \cdots, \mathbf{u}_n]$ 为得分矩阵; $\mathbf{P} = [\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \cdots, \mathbf{p}_n]$ 为载荷矩阵. 由于三相电压互感器的采样数据 \mathbf{X} 具有较强的相关性, 那么 \mathbf{X} 主要由最大的几个载荷向量来表达, 而其他载荷向量的投影将会很小, 则数据 \mathbf{X} 可进行以下分解:

$$\mathbf{X} = \hat{\mathbf{X}} + \mathbf{E}, \quad (2)$$

式中: $\hat{\mathbf{X}}$ 为主元载荷矩阵; \mathbf{E} 为残差矩阵; 主元载荷矩阵 $\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{U}_x \mathbf{P}_x$, 残差载荷矩阵 $\mathbf{E} = \mathbf{U}_e \mathbf{P}_e$, 其中 \mathbf{U}_x 为主元得分矩阵, \mathbf{P}_x 为主元载荷矩阵, 分别在得分矩阵 \mathbf{U} 和载荷矩阵 \mathbf{P} 中取前 m 个向量得到, 剩下的 $n - m$ 个向量即为 \mathbf{U}_e 、 \mathbf{P}_e .

载荷矩阵 \mathbf{P} 的求解方法为:

$$\mathbf{R} = \frac{\mathbf{X}^T \mathbf{X}}{n-1} = [\mathbf{P}_x \mathbf{P}_e] \mathbf{\Lambda} [\mathbf{P}_x \mathbf{P}_e]^T, \quad (3)$$

式中: 左侧 \mathbf{R} 为协方差矩阵; 右侧为奇异值分解; $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_n)$ 为协方差矩阵 \mathbf{R} 的特征值构成的矩阵, 并且排列顺序满足 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_n$; 此时得出的特征向量矩阵 $[\mathbf{P}_x \mathbf{P}_e]$ 即为载荷矩阵 \mathbf{P} .

主元个数目前主要采用方差累计贡献率百分比法 (CPV):

$$\delta_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^n \lambda_j}, \quad (4)$$

$$\eta_m = \sum_{i=1}^m \delta_i. \quad (5)$$

方差贡献率 δ_i 描述的是第 i 个主元对总信息的相对贡献量, 累计方差贡献率 η_m 描述的是前 m 个主元所含信息对总信息的相对贡献量. 一般情况下, 主元数量 m 的选取标准是: 选取 m 个主元, 使得 $\eta_m \geq 90\%$. 上述方法也被称为方差累计贡献率百分比法. 模型训练的最终目的是得到残差空间投影矩阵 $\mathbf{M}_e = \mathbf{P}_e \mathbf{P}_e^T$.

在模型应用阶段, 当电压互感器的计量误差状态存在异常变化时, 实时采集的电压互感器二次侧信号数据在主元子空间和残差子空间中的投影将发生一定的偏离, 可以通过建立统计量判断异常变化的偏离程度, 实现电压互感器误差状态的定性评估.

常用的方法可在主元空间采用 T2 统计量或在残差空间采用 Q 统计量的方式. T2 统计量

是评价监测数据在主元空间的信息, 主要体现的是电网一次侧电压信号的波动, Q 统计量是评价监测数据在残差空间的信息, 通过 Q 统计量进行异常点监测是更为常见的一种检测方式, Q 统计量的计算方式如下:

$$Q = \text{tr}[(\mathbf{X}\mathbf{M}_e)(\mathbf{X}\mathbf{M}_e)^T] \leq Q_c, \quad (6)$$

式中, Q_c 为显著水平为 α 对应的阈值, α 可取 95%。当监测数据 Q 统计量超过阈值 Q_c 时, 互感器的误差存在超差风险^[17]。

上述方法可以有效地判别电容式电压互感器是否超差, 实现电容式电压互感器误差状态的定性判断, 但无法实现多通道电容式电压互感器超差通道的定位, 也无法实现电容式电压互感器误差的定量计算。

下面介绍多组共母线电容式电压互感器群组之间, 同相位电容式电压互感器的约束关系, 从而建立电容式电压互感器误差值之间的方程组, 该方程组无法直接求解。此时以一组三相电容式电压互感器为计算单元, 计算每一组三相电容式电压互感器表征误差信息的 Q 统计量, 将 Q 统计量最小的一组三相电容式电压互感器作为虚拟标准互感器, 即可用上述方程组, 得到所有通道电容式电压互感器的误差值。

2.2 约束条件

电容式电压互感器是电能测量系统中广泛使用的一种电压互感器, 它将电力系统一次侧高电压成比例降低, 并传送至二次侧测量仪表和继电保护设备, 实现电力测量。由于互感器自身必然存在的计量误差, 电容式电压互感器的一次电压与二次电压的实际转换关系为:

$$U_2 = (1 + \varepsilon) \frac{U_1}{k_r}, \quad (7)$$

式中: U_1 、 U_2 分别为电容式电压互感器一次侧电压与二次侧电压测量值; k_r 为电容式电压互感器的额定变比; ε 为互感器的误差。

对于同相多通道的电容式电压互感器, 以 2 通道为例, 则有:

$$A_{12} = (1 + \varepsilon_1) \frac{A_{11}}{k_r}, \quad (8)$$

$$A_{22} = (1 + \varepsilon_2) \frac{A_{21}}{k_r}. \quad (9)$$

式中: A_{12} 、 A_{11} 分别为电容式电压互感器 A_1 的二次侧电压测量值与一次侧电压测量值; ε_1 为电容式电压互感器 A_1 对应的误差; A_{22} 、 A_{21} 分别为电容式电压互感器 A_2 的二次侧电压测量值与一次侧电压测量值; ε_2 为电容式电压互感器 A_2 对应的误差。由于电网一次侧电压值较为稳定, 即电容式电压互感器 A_1 、 A_2 对应的一次侧电压 A_{11} 与 A_{21} 相等, 将两式相除得:

$$\frac{A_{12}}{A_{22}} = \frac{(1 + \varepsilon_1)}{(1 + \varepsilon_2)}, \quad (10)$$

ε_1 与 ε_2 为互感器的误差, 为一个接近于 0 的较小的数, 由泰勒公式得:

$$\frac{1}{(1 + \varepsilon_2)} = 1 - \varepsilon_2, \quad (11)$$

则有:

$$(1 + \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2) = \frac{A_{12}}{A_{22}}, \quad (12)$$

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \varepsilon_2 + 1 = \frac{A_{12}}{A_{22}}, \quad (13)$$

忽略 2 阶小量, 则有:

$$\epsilon_1 - \epsilon_2 = \frac{A_{12}}{A_{22}} - 1. \quad (14)$$

式 (14) 即为同相电容式电压互感器二次侧电压测量值与其对应误差的约束关系. 对于同相两通道电容式电压互感器, 其等式右侧为二次侧采样数据, 为已知量, 左侧为两通道误差的差值, 该误差值无法由式 (14) 直接求解, 但是计算的互感器误差值必须满足该式, 式 (14) 也称为互感器误差刚性约束.

2.3 虚拟标准互感器

2.1 小节介绍了基于 PCA 的电容式电压互感器误差状态在线监测方法, 以 4 组三相电容式电压互感器为例, 该方法首先采集 4 组三相电容式电压互感器的二次侧运行数据作为训练数据进行 PCA, 建立表征电网一次侧电压波动的主元空间与表征电容式电压互感器自身误差信息的残差空间. 在模型应用阶段, 通过统计监测数据在残差空间的信息, 判断电容式电压互感器是否发生了误差超差, 该方式为定性判断, 只能判断 4 组即 12 个通道的电容式电压互感器中存在误差超差现象, 但无法确定是哪些通道的电容式电压互感器超差.

为了定量计算所有通道电容式电压互感器的误差值, 本文取一组三相电容式电压互感器为分析计算单元, 然后计算每一组三相电容式电压互感器表征误差信息的 Q 统计量, 比较每一组三相电压互感器的 Q 统计量, 将 Q 统计量最小的一组电容式电压互感器视作虚拟的“标准互感器”, 在实际应用中, 电容式电压互感器群组中, 超差的比例是较小的, 通过上述方式, 可以有效地识别虚拟的“标准互感器”.

下面以两组三相电容式电压互感器为例进行说明, 验证其中一组电容式电压互感器超差以后, 其 Q 统计量大于另一组. 设两组电容式电压互感器的采样数据依次为 $A_1, B_1, C_1, A_2, B_2, C_2$, 假设 A_2 通道误差超差, 误差值为 ϵ_{A_2} , 此时两组三相电容式电压互感器的统计量分别为 Q_1, Q_2 , 则有:

$$Q_1 = \text{tr}[(\mathbf{Y}_1 \mathbf{P}_e \mathbf{P}_e^T)(\mathbf{Y}_1 \mathbf{P}_e \mathbf{P}_e^T)^T], \quad (15)$$

式中, $\mathbf{Y}_1 = [A_1 B_1 C_1]$, 对于 Q_1 , 由于各通道没有误差, \mathbf{Y}_1 在残差空间的误差信息近似于训练数据在残差空间的误差信息, 即约等于 0.

$$Q_2 = \text{tr}[(\mathbf{Y}_2 \mathbf{P}_e \mathbf{P}_e^T)(\mathbf{Y}_2 \mathbf{P}_e \mathbf{P}_e^T)^T], \quad (16)$$

式中, $\mathbf{Y}_2 = [A_2(1 + \epsilon_{A_2}) B_2 C_2]$, 令 $\Delta \mathbf{Y} = [A_2 \epsilon_{A_2} 0 0]$, 则有从 $\mathbf{Y}_2 = \mathbf{Y}_1 + \Delta \mathbf{Y}$, 由于 \mathbf{Y}_1 与 $\Delta \mathbf{Y}$ 相互独立, 因此有:

$$Q_2 = \text{tr}[(\mathbf{Y}_2 \mathbf{P}_e \mathbf{P}_e^T)(\mathbf{Y}_2 \mathbf{P}_e \mathbf{P}_e^T)^T] = Q_1 + \text{tr}[(\Delta \mathbf{Y} \mathbf{P}_e \mathbf{P}_e^T)(\Delta \mathbf{Y} \mathbf{P}_e \mathbf{P}_e^T)^T]. \quad (17)$$

对比 Q_1 与 Q_2 可知 $Q_2 > Q_1$, 当电容式电压互感器的计量性能发生改变, 如某通道的误差超差时, 其对应的 Q 统计量比误差变化前对应的 Q 统计量大, 因此可以通过 Q 统计量信息定位有误差的互感器通道.

2.4 误差定量计算

以 4 组 12 通道电容式电压互感器为例进行说明, 首先利用 2.3 节介绍的方法, 计算每一组三相电容式电压互感器的 Q 统计量并取最小值, 假设为第 2 组. 以 A 相为例, 根据 2.2 节的约束条件, 即可建立如下方程组:

$$\epsilon_{A1} - \epsilon_{A2} = \frac{A_{12}}{A_{22}} - 1, \quad (18)$$

$$\epsilon_{A3} - \epsilon_{A2} = \frac{A_{32}}{A_{22}} - 1, \quad (19)$$

$$\epsilon_{A4} - \epsilon_{A2} = \frac{A_{42}}{A_{22}} - 1, \quad (20)$$

式中: ϵ_{A1} , ϵ_{A2} , ϵ_{A3} , ϵ_{A4} 分别为第 1 组至第 4 组 A 相电容式电压互感器的误差值; A_{12} , A_{22} , A_{32} , A_{42} 分别为 4 组 A 相电容式电压互感器的二次侧采样数据, 为已知量, 其中第 2 组三相电容式电压互感器为虚拟标准互感器, 即误差值可近似为 0, 从而可求得 ϵ_{A1} , ϵ_{A3} , ϵ_{A4} , 即得到 A 相所有通道电容式电压互感器的误差值, 同理可求得 B 相、C 相所有通道电容式电压互感器的误差值。

3 算法验证

在实际应用中, 只有少数电容式电压互感器超差, 国网企标 Q/GDW 12006—2019 电压互感器误差特性在线检测仪技术在对相关技术进行可行性与准确性验证时, 也只模拟少数通道的电容式电压互感器超差。依托本文介绍的方法开发的电压互感器误差特性在线检测仪已取得国网计量中心、湖北计量研究院、湖南计量研究院、浙江计量研究院等机构的第三方测试报告, 开发的产品已在国网区域多个 220 kV 变电站、发电厂应用, 实现了电容式电压互感器误差在线监测。2023 年国家电网有限公司开展 153 台次异常 220 kV 电容式电压互感器 (二次回路) 现场核查工作, 电容式电压互感器误差在线评估与现场核查一致性为 94.8%, 年累计纠偏电量 2 245 万 kW·h, 实施效果显著。

为了验证本文提出方法的有效性与实用性, 采集了某 220 kV 变电站 4 组三相电容式电压互感器 12 通道的现场运行数据, 对本文提出的方法进行验证, 在现场应用过程中, 电容式电压互感器超差时, 大多为比值差超差, 因此本文以互感器幅值为例进行验证 (角差的计算方式类似)。三相电容式电压互感器二次侧采样数据如图 2 所示。

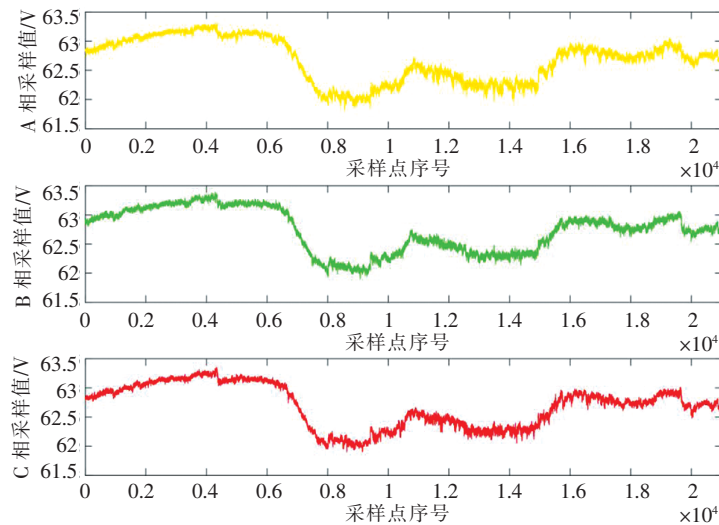


图 2 某组三相电容式电压互感器二次侧现场采样数据示意图

Fig. 2 Schematic diagram of on-site sampling data on the secondary side of three-phase capacitive voltage transformers

为了验证本文提出的算法, 现对第 2, 3, 4 组三相电容式电压互感器随机叠加比值误差

(Q/GDW 12006—2019 电压互感器误差特性测试技术条件采用同样的方式进行, 即任意选择几个通道叠加误差), 叠加的误差值如表 1 所示:

表 1 4 组三相电容式电压互感器误差设置

Tab. 1 Error setting of four sets of three-phase capacitive voltage transformers

相序	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组
A	0	0	0.15	0.05
B	0	0.1	-0.12	-0.14
C	0	0.3	0.25	0

每通道共有 21 456 个采样点, 叠加误差采样点的序号为 2 000, 叠加以后的示意图如图 3 所示, 从图中可以看出, 叠加误差以后同相的采样数据出现了明显的偏离, 但是无法确定是由哪些通道的误差导致的。

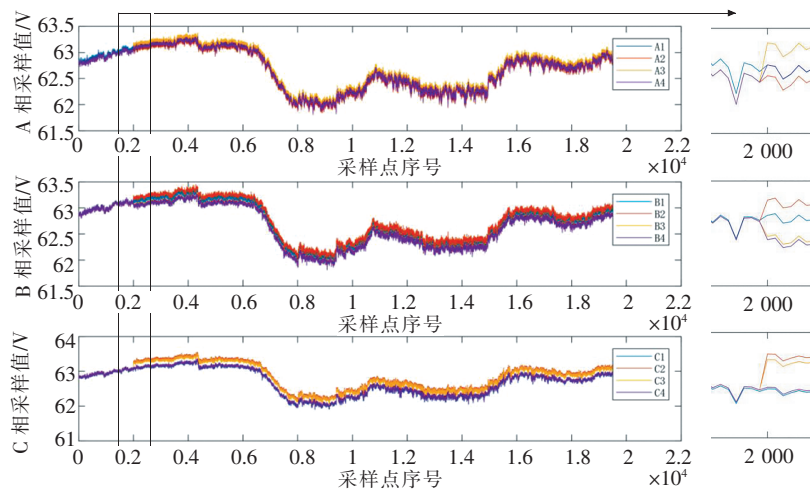


图 3 叠加误差后 4 组三相电容式电压互感器二次侧现场采样数据

Fig. 3 Four sets of on-site sampling data on the secondary side of three-phase capacitive voltage transformers after adding errors

以一组三相电容式电压互感器为计算单元, 分析 4 组三相电容式电压互感器二次侧采样数据在残差空间的误差统计信息 Q 统计量, 分析结果如图 4 所示。

从图中可以看出, 第 1 组三相电容式电压互感器二次侧采样数据对应的 Q 统计量明显小于其他 3 组, 由此判定第 1 组三相电容式电压互感器无误差, 此时以第 1 组三相电容式电压互感器为标准对比器, 计算同相其他通道电容式电压互感器的误差, 计算结果如图 5 所示。

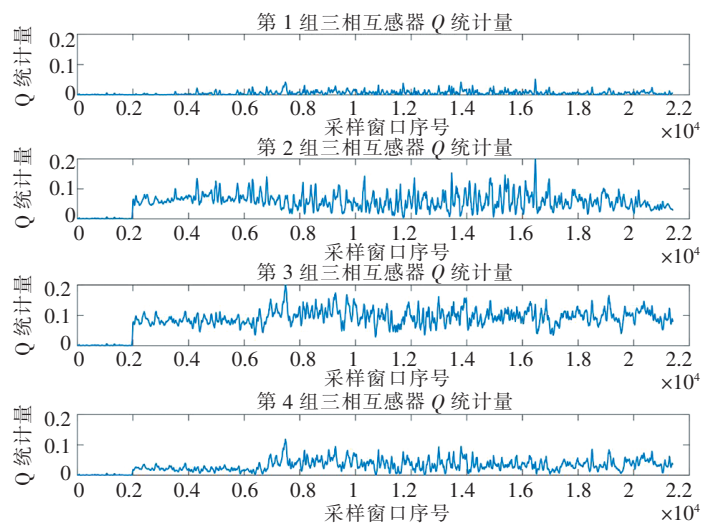


图 4 4 组三相电容式电压互感器的 Q 统计量

Fig. 4 Q statistics of four sets of three-phase capacitive voltage transformers

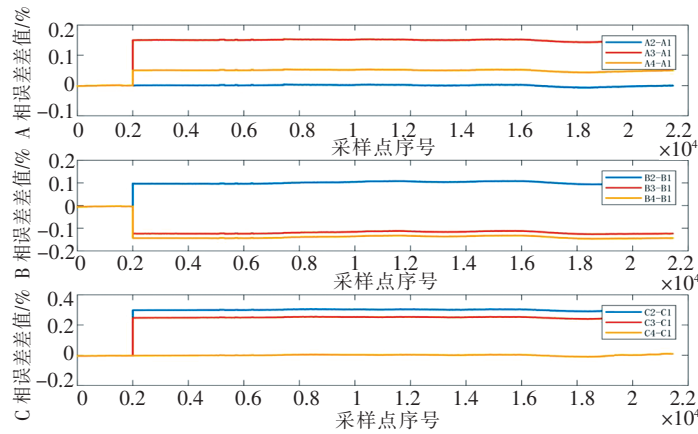


图 5 电容式电压互感器同相误差差值示意图

Fig. 5 Schematic diagram of in-phase error difference of capacitive voltage transformer

从图中可以看出, 以第 1 组三相电容式电压互感器为标准比对器, 计算的误差与设置的误差基本一致, 将评估结果取均值, 并与设置的误差对比, 对比结果如表 2 所示:

表 2 4 组三相电容式电压互感器误差设置与算法评估对比

Tab. 2 Comparison of error setting and algorithm evaluation for four three phase capacitive voltage transformers

相序	第 1 组			第 2 组			第 3 组			第 4 组		
	设置误差	评估误差	偏差	设置误差	评估误差	偏差	设置误差	评估误差	偏差	设置误差	评估误差	偏差
A	0	0	0	0	0.03	0.03	0.15	0.14	-0.01	0.05	0.04	-0.01
B	0	0	0	0.1	0.09	-0.01	-0.12	-0.11	0.01	-0.14	-0.13	0.01
C	0	0	0	0.3	0.27	-0.03	0.25	0.23	-0.02	0	0.01	0.01

从表 2 中可以看出, 本文提出的算法可以准确评估电容式电压互感器的运行误差, 幅值误差评估偏差小于 0.03%, 完全满足现场应用需求.

为了验证本文算法对误差变化过程的识别精度, 本文模拟了多种误差曲线, 针对电容式电压互感器的缓变误差, 本文提出的算法仍然可以精确定量, 计算结果如图 6 所示:

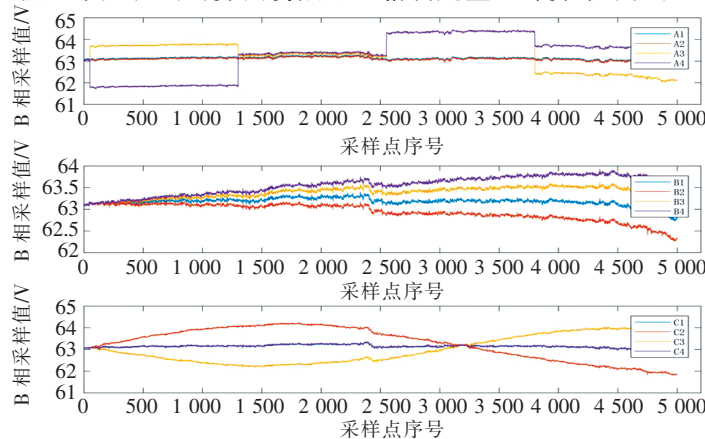


图 6 模拟缓变误差的 4 组三相电容式电压互感器二次侧现场采样数据

Fig. 6 Four sets of secondary side field sampling data of three-phase capacitive voltage transformers simulating slow-changing errors

从图 7 中可知: 第 1 组三相电压互感器对应的 Q 统计量几乎为 0, 文献 [17] 则仅能通过第 2, 3, 4 组电压互感器对应的 Q 统计量大于给定的阈值, 判断第 2, 3, 4 组电压互感器中存在互感器超差现象, 无法定位超差通道, 也无法定量计算互感器误差. 而本文提出的方法, 则可实现互感器误差的定量计算, 计算结果如图 8~图 10 所示.

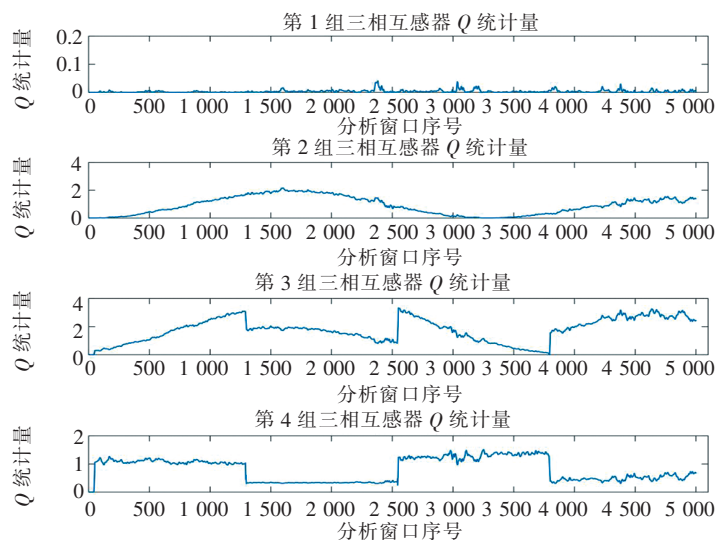


图 7 4 组三相电容式电压互感器的 Q 统计量

Fig. 7 Q statistics of four sets of three-phase capacitive voltage transformers

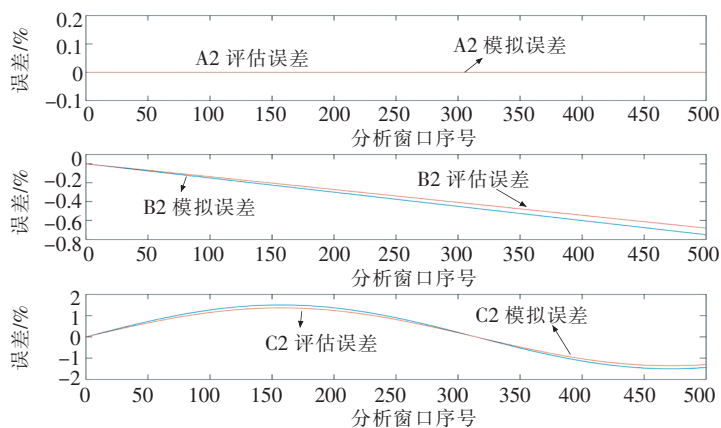


图 8 第 2 组电容式电压互感器误差定量计算结果

Fig. 8 Quantitative calculation results of error for the second group of capacitive voltage transformers

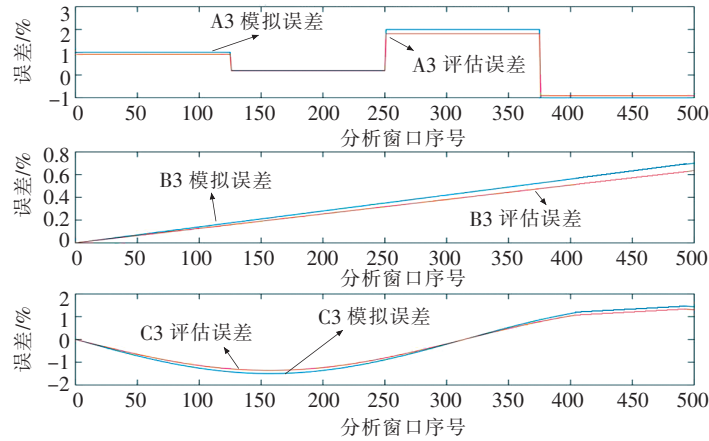


图 9 第 3 组电容式电压互感器误差定量计算结果

Fig. 9 Quantitative calculation results of error for the third group of capacitive voltage transformers

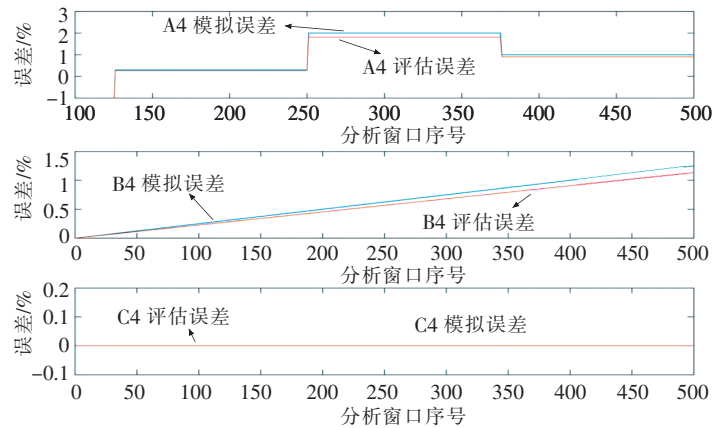


图 10 第 4 组电容式电压互感器误差定量计算结果

Fig. 10 Quantitative calculation results of error for the fourth group of capacitive voltage transformers

进一步分析可知, 模拟误差曲线与计算的误差值几乎重合, 偏差小于 0.05% , 可以准确评估电容式电压互感器在现场应用过程中误差的缓慢变化过程.

4 结论

本文提出一种电容式电压互感器误差在线监测与定量评估方法. 在不需要标准互感器的条件下, 实时采集电容式电压互感器二次侧数据, 通过数据建模与分析, 实现对电容式电压互感器误差的定量计算, 解决了电容式电压互感器断电检修难以实施导致大量在运电容式电压互感器存在超差风险的行业难题.

相对于文献 [17] 电容式电压互感器误差状态定性判断, 本文引入了多组电容式电压互感器同相约束条件, 建立电容式电压互感器误差值之间的关系, 通过计算 Q 统计量, 确定虚拟标准互感器, 从而求解所有通道的误差值. 利用某 220 kV 变电站现场采集数据对本文提出的算法进行了验证, 计算结果表明静态幅值误差的评估偏差小于 0.03% , 缓变幅值误差的评估偏差小于 0.05% , 满足现场应用需求, 具有较大的应用价值.

参 考 文 献

- [1] 时德钢,刘晔,张丽平等. 高电压等级电压互感器综述[J]. 变压器, 2003, 40(6):11-14.
- [2] 凌子恕. 高压互感器技术手册[M]. 北京:中国电力出版社, 2005
- [3] 梅成林,张超树. 电压互感器铁磁谐振分析[J]. 电网技术, 2008,32(增刊 2):311-313.
- [4] KUMAR B S A,ERTEM S. Capacitor voltage transformer induced ferroresonance-causes, effects and design considerations[J]. Electric Power Systems Research, 1991, 21(1):23-31.
- [5] 王文洪,侯慧. 220kV 电容式电压互感器的缺陷分析和故障预防[J]. 武汉大学学报(工学版), 2006, 39(1):97-100.
- [6] 陈斌. 电容式电压互感器的误差特性分析及评估[D]. 重庆:重庆大学,2017.
- [7] 国家市场监督管理总局. JJG 314—2010 测量用电压互感器[S]. 北京:中国质检出版社,2011.
- [8] 国家市场监督管理总局. JJG 1021—2007 电力互感器检定规程[S]. 北京:中国质检出版社,2007.
- [9] 熊小伏,何宁,于军,等. 基于小波变换的数字化变电站电子式互感器突变性故障诊断方法 [J]. 电网技术, 2010, 34(7): 181-185.
- [10] 杨雪东. 基于小波一分形理论的电子式互感器故障诊断方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.
- [11] 贺永泽. 基于小波能谱熵的电子式互感器故障诊断[D]. 武汉:武汉科技大学,2019.
- [12] 王欢,王忠东,卢树峰,等. 基于误差状态模糊分析的电容式电压互感器内绝缘状态评价方法[J]. 电测与仪表,2024,61(4):73-80.
- [13] 王洪彬,唐昆明,徐瑞林,等. 数字化变电站电子式互感器渐变性故障诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(24):53-58.
- [14] LI B, LU H, HUANG J, et al. Online evaluation method for measuring error of Fiber Optical Current Transformer based on Canonical Variable Analysis[C]//2024 4th International Conference on Electrical Engineering and Control Science (IC2ECS), 2024: 895-899.
- [15] LI Z, ZHENG Y, ABU-SIADA A, et al. Online evaluation for the accuracy of electronic voltage transformer based on recursive principal components analysis[J]. Energies, 2020, 13(21): 5576.
- [16] ZHANG C, LI H, 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.
- [17] 张竹. 电容式电压互感器计量误差状态评估和预测方法研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2018.

(责任编辑:夏金玉、朱碧云)