

# 计及一次电压波动的电压互感器误差状态 在线评估方法

赵 鹏<sup>1</sup>, 马克琪<sup>2,3</sup>, 李红斌<sup>2</sup>, 周 峰<sup>1</sup>, 陈 庆<sup>2</sup>

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 武汉 430074; 2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 武汉 430074;  
3. 国网浙江省电力有限公司嘉兴供电公司, 嘉兴 314000)

**摘要:** 电压互感器测量准确性直接影响电网的安全稳定和经济运行。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, 提出一种基于差分间距自适应的差分处理(differential processing of adaptive differential interval, DP-ADI)和同相测量一致性(measurement consistency of same phase, MCSP)的电压互感器误差状态评估方法。该方法按照时间序列理论, 将一次电压波动分为由确定因素引起的非平稳波动与随机因素引起的微小缓慢平稳波动, 同时提出了基于差分间距自适应的平稳化方法与基于同相测量一致性的差异性评价指标, 分别削弱一次电压波动中的非平稳波动与微小缓慢平稳波动对状态评估的影响。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 0.1% 的误差异常状态。

**关键词:** 电压互感器; 误差; 一次电压波动; 差分间距自适应; 同相测量一致性; 高维随机矩阵

## On-line Error Evaluation Method of Instrument Voltage Transformers Considering Primary Voltage Fluctuations

ZHAO Peng<sup>1</sup>, MA Keqi<sup>2,3</sup>, LI Hongbin<sup>2</sup>, ZHOU Feng<sup>1</sup>, CHEN Qing<sup>2</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. Jiaxing Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Jiaxing 314000, China)

**Abstract:** Measurement accuracy of instrument voltage transformers directly affects the safety, stability and economic operation of the power grid. In fact, the existing evaluation methods based on large-dimensional random matrix 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 differential processing using adaptive differential interval (DP-ADI) and measurement consistency of same phase (MCSP). According to the time series theory, the primary fluctuation is divided into non-stationary fluctuations caused by definite factors and stable small stationary fluctuations caused by random factors. Moreover, a stabilized method based on adaptive differential interval is put forward to weaken the influence of non-stationary fluctuations. In addition, a difference evaluating indicator based on the measurement consistency of same phase is established to diminish the influence of stationary fluctuations. The simulation experiments and field application results suggest that 0.1% error of voltage transformers can be estimated by using the improved evaluation method based on large-dimensional random matrices.

**Key words:** instrument voltage transformers; error; primary voltage fluctuations; adaptive differential interval; 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<sup>[1-3]</sup>, 是电网状态监控、继电保护、电能计量的数据来源, 其测量准确度直接影响电网的安全

稳定和经济运行。

根据电力互感器检定规程, 电压互感器必须开展周期性停电校验, 以确保其误差满足测量准确度的要求<sup>[1-4]</sup>。传统校验方式计划性停电协调困难, 校验设备的体积大、重量大, 运输困难, 电压互感器的大规模现场校验难度大, 且不能完全反映互感器的实际运行工况。带电校验能反映互感器的实际运

基金资助项目: 国家自然科学基金区域联合基金(U20A20306)。  
Project supported by National Natural Science Foundation of China (U20A20306).

行工况, 但需将标准互感器直接投入高压侧, 存在安全隐患且容易受到环境因素制约<sup>[5-8]</sup>。因此, 迫切需要研究在不停电、无标准互感器条件下的电压互感器误差状态在线评估方法。

文献[9-10]基于信号处理评估电压互感器的运行状态, 但这种评估方法信号源单一, 不能区分电网一次波动与误差异常, 仅能诊断严重故障。文献[11-13]基于数学建模的评估方法评估电压互感器的运行状态, 但由于获得的参数精度较低, 且不能够反映实际运行环境的变化, 不足以支撑0.2级电压互感器误差的准确评估。文献[14-16]以互感器群体间的物理联系作为约束条件, 针对性地研究模型建立和智能计算方法, 以评估电压互感器的误差状态。由于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[14-15]要求输出信号符合正态分布特征, 文献[16]要求有3组及以上电压互感器, 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<sup>[17-18]</sup>, 具有计算简单、建模条件宽泛等大数据分析优点, 广泛应用于电力系统中设备的状态评估<sup>[19-21]</sup>、故障检测与定位<sup>[22]</sup>、相关性分析<sup>[23]</sup>等方面, 适用于全网域电压互感器运行状态在线实时评估。然而, 电压互感器实际运行过程中, 一次电压会因线路参数、有载调压分接头和投切电容器组等确定因素引起非平稳波动和因负荷功率引起的微小缓慢平稳波动<sup>[24-27]</sup>。而高维随机矩阵应用于电压互感器误差状态评估要求电压互感器的输出信号服从平稳分布特征。一次电压波动将影响电压互感器输出信号的平稳分布特征, 进而影响电压互感器误差状态长期评估的精度。因此, 当电压互感器的一次电压存在波动时, 高维随机矩阵难以区分一次电压波动与互感器误差信息。为解决这一问题, 需要有效、可靠的方法削弱一次电压波动对电压互感器误差状态评估的影响。

本文通过对二次输出时间序列进行间距自适应的差分平稳处理, 构建具备平稳分布特征的随机矩阵元素, 满足评估模型要求; 计及微小缓慢平稳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, 削弱微小缓慢平稳波动对状态评估的影响。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 高维随机矩阵理论

### 1.1 高维随机矩阵模型构建

假设表示设备运行状态的特征参量有N类, 每一类数据形成一个时间序列向量  $\mathbf{h}_i \in \mathbb{C}^{1 \times T}$ , 所有参量数据构成原始矩阵  $\mathbf{H}_1$

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1 \\ \mathbf{h}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{h}_N \end{bmatrix} \in \mathbb{C}^{N \times T} \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{h}_i$  表示第  $i$  个特征参量序列。当  $N$  远小于  $T$  时, 难以满足高维随机矩阵收敛性要求, 需要在稀疏条件下对评估矩阵进行矩阵扩展。

首先, 将特征参量序列分为  $l$  段, 每段作为矩阵的一行, 形成一个新的矩阵

$$\mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \mathbf{y}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{y}_{lN} \end{bmatrix} \in \mathbb{C}^{lN \times (T/l)} \quad (2)$$

式中,  $[\mathbf{y}_{(i-1)+1}, \mathbf{y}_{(i-1)+2}, \dots, \mathbf{y}_{(i-1)+l}]^T = \mathbf{h}_i$  ( $i=1, 2, \dots, N$ )。

其次, 将数据复制  $k$  次, 以增加矩阵维数

$$\mathbf{H}_3 = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_2 \\ \mathbf{H}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{H}_2 \end{bmatrix}_{Nlk \times T/l} \quad (3)$$

最后, 在矩阵  $\mathbf{H}_3$  中引入随机噪声得到评估矩阵  $\mathbf{H}_4$ , 以降低重复数据的相关性

$$\mathbf{H}_4 = \mathbf{H}_3 + \mathbf{m} \times \mathbf{R} \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{R} \in \mathbb{C}^{Nlk \times T/l}$  为矩阵元素服从标准正态分布的噪声矩阵;  $\mathbf{m}$  为噪声的幅值。

采用滑动时间窗的方法实时更新时间序列向量及评估矩阵, 即

$$\mathbf{h}_i(t) = [h(t-t_w+1), h(t-t_w+2), \dots, h(t)] \quad (5)$$

式中:  $t_w$  为时间窗大小;  $h(t)$  为  $t$  时刻的采样值。

由式(1)可得  $t$  时刻的原始矩阵  $\mathbf{H}_1(t)$  为

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1(t) \\ \mathbf{h}_2(t) \\ \vdots \\ \mathbf{h}_N(t) \end{bmatrix}_{N \times T} \in \mathbb{C}^{N \times T} \quad (6)$$

将电压互感器输出测量数据作为矩阵元素构建高维随机矩阵, 当电压互感器误差状态发生变化时, 随机矩阵的特征值分布将随之变化, 通过分析随机矩阵谱分布特征的变化, 即可识别其异常状态。

## 1.2 高维随机矩阵评价指标及其阈值

### 1.2.1 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<sup>[28]</sup>(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 重构曲线  $z$ , 即

$$z_{a+1} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \exp(-\|z_a - x_i\|^2 / 2\sigma^2) x_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i \exp(-\|z_a - x_i\|^2 / 2\sigma^2)} \quad (7)$$

式中:  $x_i (i=1, 2, \dots, n)$  为圆环图中的  $n$  个特征值;  $\lambda_i$  由  $x_i$  聚类后的主成分计算得到;  $\sigma$  为核参数;  $z_a$  为第  $a$  次迭代的重构值。

将曲线距原点距离最小值的倒数, 定义为电压互感器误差状态评价指标  $D$

$$D = \frac{1}{\min(\|z\|)} \quad (8)$$

### 1.2.2 评价指标阈值

假设待评估设备正常运行时, 对待评估设备做  $n_1$  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  $\{D_{\text{limit}}\}$ 。鉴于核密度估计方法对未知概率密度的参量具有良好的拟合能力, 而高斯核函数在多个数据点处计算更加便捷<sup>[28]</sup>, 有利于误差状态的实时评估, 本文使用核密度估计方法与高斯核函数获取  $D$  的概率密度函数

$$f_\sigma(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi n_1} \sigma} \sum_{i=1}^{n_1} \exp\left(-\frac{(D - D_i)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (9)$$

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

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。

若  $t_i$  时刻的参考数据集为  $\{D_{\text{limit}}(t_i)\}$ , 根据评估结果, 将待评估设备评估为正常的数据作为参考数据, 实时更新评估模型评价指标阈值。若上一时刻待评估设备的评估结果为异常, 下一时刻的评估阈值不做更新; 否则, 将上一时刻的运行数据作为参考数据, 去掉最开始时刻的数据, 实时更新下一时刻的评估阈值, 如式(10)所示

$$D_{\text{limit}}(t_{i+1}) = \begin{cases} \{D_{\text{limit}}(t_i)\}, & D > D_{\text{limit}} \\ \{D_2, \dots, D_{n_1}, D(t_i)\}, & D < D_{\text{limit}} \end{cases} \quad (10)$$

该评估“标准”相较于固定的评估“标准”, 能够长期有效地评估设备的运行状态。

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, 本章分析了电压互感器一次电压信号特征, 提出基于差分间距自适应的差分处理(differential processing of adaptive differential interval, DP-ADI) 平稳化方法和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 电压互感器一次电压信号特征分析

在电网实际运行过程中, 一次电压  $U_1$  会因多种因素在时序上存在波动, 按照时间序列加法模型, 一次电压  $U_1$  可由以下 5 个部分组成

$$U_1 = U_{1e} + T_r + S + C + I \quad (11)$$

式中:  $U_{1e}$  为额定一次电压;  $T_r$ 、 $S$ 、 $C$  分别为长期趋势、季节变动、循环波动, 这 3 种分量主要是由线路参数、有载调压分接头与投切电容器组等确定因素引起的非平稳序列;  $I$  为不规则波动, 主要是由负荷变化等随机因素引起的微小缓慢的波动。

根据时间序列性质, 一次电压波动由两部分组成: 非平稳成分与微小缓慢平稳波动成分, 电压互感器二次输出  $U_2$  的波动主要由非平稳成分、微小缓慢平稳波动成分与互感器自身误差引起, 即

$$U_2 = k_1 U_{1e} + k_1 N_s + k_1 I + \varepsilon \quad (12)$$

式中:  $N_s$  表示非平稳成分;  $\varepsilon$  表示互感器误差;  $k_1$  表示额定变比。由于误差与微小缓慢平稳波动成分远小于非平稳成分,  $U_2$  的平稳性主要由  $N_s$  决定。

### 2.2 基于 DP-ADI 的平稳化方法

为了削弱一次电压中非平稳成分对状态评估的影响, 本节利用自相关函数与差分方法对二次输出电压时间序列进行差分平稳化处理。

对于电压互感器输出电压时间序列  $U_2(t)$ , 计算其自相关函数  $R$

$$R(K) = \sum_{t=-\infty}^{\infty} U_2(t)U_2(t-K) \quad (13)$$

式中,  $K$  为延迟时间。由于非平稳成分存在特定的趋势变化规律, 其前后时刻存在强自相关性, 自相关函数值极大; 而平稳成分和误差没有固定的趋势变化规律, 前后时刻相关性弱, 自相关函数值接近于 0。因此, 自相关函数的极大值能够体现二次输出电压  $U_2$  的非平稳成分  $N_s$ 。

对于固定长度的时间序列, 相关性体现在极大值间距  $\Delta K$ , 此时  $N_s(t+\Delta K)$  与  $N_s(t)$  的变化基本一致, 因此, 可将  $\Delta K$  作为差分间距对输出电压进行差分计算, 就能够削弱非平稳波动, 使时间序列呈现平稳分布特征, 即

$$\Delta U_2 = k_1 \Delta N_s + k_1 \Delta I + \Delta \varepsilon \quad (14)$$

式中:  $\Delta U_2 = U_2(t+\Delta K) - U_2(t)$ ;  $\Delta I = I(t+\Delta K) - I(t)$ ;  $\Delta \varepsilon = \varepsilon(t+\Delta K) - \varepsilon(t)$ 。

实际电压时间序列经差分平稳处理后, 削弱了一次电压非平稳波动的影响, 而平稳波动成分与误差的变化满足平稳分布特征, 则输出电压时间序列的差分变化量也符合平稳分布特征。

### 2.3 基于 MCSP 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

$$U_1^1 = U_1^2 = \dots = U_1^i (i=1, 2, \dots, L) \quad (15)$$

式中,  $L$  表示同一测量点处共有  $L$  台同相的电压互感器。

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。

若由高维随机矩阵处理平稳特征参量计算得到的电压互感器组的评价指标分别为  $D_1, D_2, \dots, D_L$ , 即

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1^I \\ D_2^I \\ \vdots \\ D_L^I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_1^\varepsilon \\ D_2^\varepsilon \\ \vdots \\ D_L^\varepsilon \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中:  $D^I$  表示由微小缓慢平稳波动引起的评价指标变化;  $D^\varepsilon$  表示由互感器误差引起的评价指标变化。

对于同一测量点处多台同相电压互感器的评价指标  $D$ , 由微小缓慢波动引起的评价指标的变化基本一致, 评价指标的差异性主要是由其自身的误

差引起的。

定义如下差异性矩阵

$$\Delta D = \begin{bmatrix} 0 & D_1 - D_2 & \cdots & D_1 - D_L \\ D_2 - D_1 & 0 & \cdots & D_2 - D_L \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_L - D_1 & D_L - D_2 & \cdots & 0 \end{bmatrix}_{L \times L} \quad (17)$$

由于微小缓慢波动引起的评价指标的变化基本一致, 即

$$D_1^I = D_2^I = \cdots = D_L^I \quad (18)$$

则

$$\Delta D = \begin{bmatrix} 0 & D_1^\varepsilon - D_2^\varepsilon & \cdots & D_1^\varepsilon - D_L^\varepsilon \\ D_2^\varepsilon - D_1^\varepsilon & 0 & \cdots & D_2^\varepsilon - D_L^\varepsilon \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_L^\varepsilon - D_1^\varepsilon & D_L^\varepsilon - D_2^\varepsilon & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

取差异性矩阵的  $\infty$  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

$$\|\Delta D\|_\infty = \max_{1 \leq i \leq L} \sum_{j=1}^L |\Delta D_{ij}| = \max \{\Delta D_1, \Delta D_2, \dots, \Delta D_L\} \quad (20)$$

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(9), 若取  $\|\Delta D\|$  计算得到的差异性评价指标阈值为  $\Delta D_{\text{limit}}$ , 则当某一时刻  $\|\Delta D\| < \Delta D_{\text{limit}}$ , 则该时刻  $L$  台电压互感器的误差状态均正常; 若  $\|\Delta D\| > \Delta D_{\text{limit}}$ , 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。

### 2.4 电压互感器误差状态评估

基于 DP-ADI 和 MCSP 的电压互感器误差状态评估方法步骤如图 1 所示。

- 1) 采集  $L$  台同相电压互感器的输出电压。
- 2) 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  $\Delta D$ 。
- 6) 利用核密度估计方法求得  $L$  台电压互感器组正常运行时的差异性评价指标阈值  $\Delta D_{\text{limit}}$  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  $\Delta D_i > \Delta D_{\text{limit}}$ , 则第  $i$  台电压互感器的误差状态异常。

8) 实时更新评估模型参数, 完成电压互感器误差状态的评估。

### 3 仿真实验验证

#### 3.1 仿真设置

仿真实验验证方案如图 2 所示。采集的实际运行数据分为参考数据集与评估数据, 在评估数据的 4 个时刻(图 3 中分别标记为 1、2、3、4)引入人为的固定偏差或在整个评估数据中引入渐变性误差, 利用本文提出的评估方法对实验引入的固定偏差进行评估, 以验证评估方法的有效性。

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

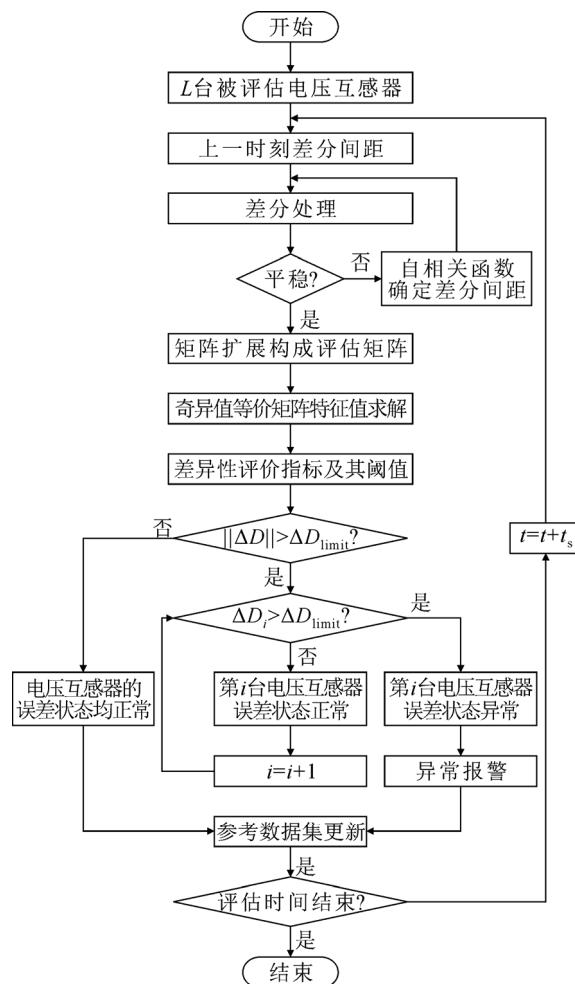


图 1 电压互感器误差状态评估流程图( $t_s$  为步进长度)

Fig.1 Flow chart of error evaluation for voltage transformers  
( $t_s$  is step length)

选取 3 天的数据构成实验数据集, 如图 3 所示。

本文首先对互感器采集数据的分布特征进行检验, 然后利用  $\beta(g,h)$  ( $\beta$  为有界  $\beta$  分布函数;  $g, h$  为函数的参数值) 分布的非正态分布样本剔除异常数据<sup>[29]</sup>, 保证实验数据集的可靠性。

首先利用自相关函数确定差分间距, 随后通过差分方法平稳化输出电压数据。图 4 为输出电压取  $K$  为 1 到 5 000 的自相关函数值。利用 ADF 平稳性检验方法对不同差分间距处理后的数据做平稳性检验, 差分间距取为图 4 中的极大值间距  $\Delta K$  时, 差分结果均符合平稳分布特征(统计量阈值 1.94), 且检验统计量显著大于其他差分间距情况, 如图 5 中标记点所示。即取自相关函数的极大值间距作为差分间距进行差分平稳处理是使得高维随机矩阵输入元素满足平稳分布的最优选择, 能够最大限度地削弱一次电压波动中的非平稳成分影响。

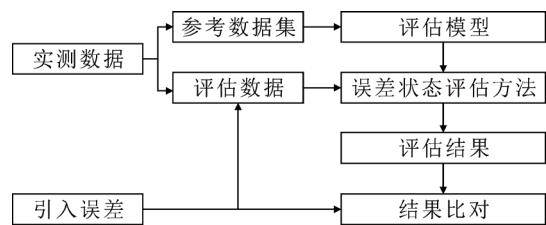


图 2 误差状态评估方法实验验证方案  
Fig.2 Experimental verification scheme for the error evaluation method

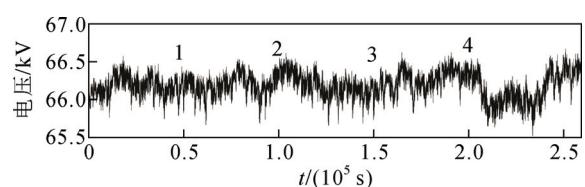


图 3 仿真实验数据集

Fig.3 Experimental data setting

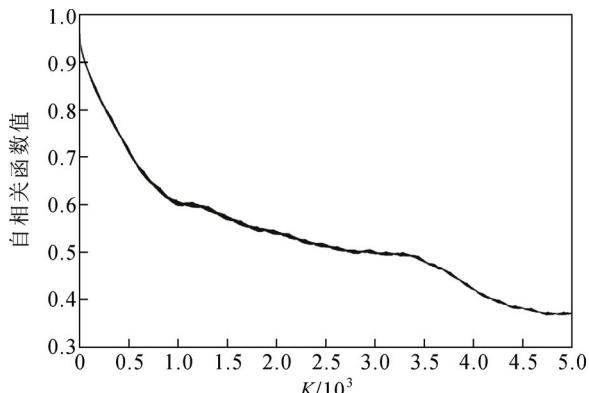


图 4 自相关函数值( $K=1, 2, \dots, 5000$ )

Fig.4 Autocorrelation function value( $K=1$  to 5 000)

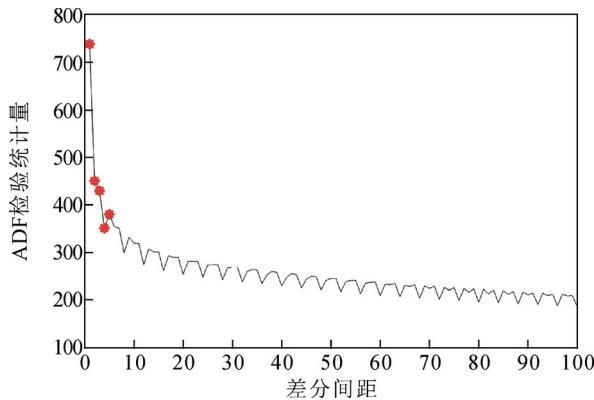


图 5 ADF 平稳性检验结果(差分间距为 1, 2, ..., 100)

Fig.5 ADF stationarity test results (the interval is 1 to 100)

### 3.2 算例分析 1(单台数据)

为比较本文提出的差分方法相较于非差分方法的优势, 本节在上述数据 4 个时刻叠加了不同大小的固定偏差, 如表 1 中算例 1 所示, 比较差分与非差分情况下, 评估结果的差异性。

非差分处理及差分处理情况下的评估结果如图 6 与图 7 所示。

由图 6 与图 7 比较可知, 差分处理后的随机矩阵评估结果能辨识时刻 2 误差大小为 0.2% 的误差异常, 而非差分处理后的评估结果仅能辨识时刻 4 误差大小为 0.4% 的误差异常。

算例分析 1 表明: 对于单台互感器状态评估而言, 基于 DP-ADI 的状态评估方法比基于非差分处理的评估方法具有更高的灵敏性。

### 3.3 算例分析 2(突变性, 同方向误差)

为验证同相差异性评价指标对一次电压中微小缓慢波动的削弱效果, 利用图 3 所示的实验数据, 分析差异性评价指标  $\|\Delta D\|$  相较于单台互感器评价指标  $D$  的优势, 评估结果分别见图 8 和图 9。

实验设置 2 组数据, 2 组数据设置如表 1 中算例 2 所示的固定偏差, 分别记为互感器 1 与互感器 2, 利用本文的方法评估电压互感器的误差状态。

由图 8 与图 9 比较可知, 差异性评价指标能辨识时刻 2 误差大小为 0.1% 的误差异常, 而单组评价指标仅能辨识时刻 3 误差大小为 0.2% 的误差异常。

算例分析 2 表明: 基于 DP-ADI 和 MCSP 的评估比基于 DP-ADI 的评估方法具有更高的灵敏性。

### 3.4 算例分析 3(渐变性误差)

为验证评估方法对渐变性误差评估的效果, 设计如下算例: 1 组数据叠加 1 个带噪声的漂移信号, 1 组数据不叠加误差, 分别记为互感器 1 与 2, 如图

表 1 算例 1 与算例 2 相对误差设置

Table 1 Relative error setting of example 1 and example 2

算例	互感器	误差/%			
		时刻 1	时刻 2	时刻 3	时刻 4
1	1	0.1	0.2	0.3	0.4
2	1	0	0.1	0.2	0.3
	2	0	0	0	0

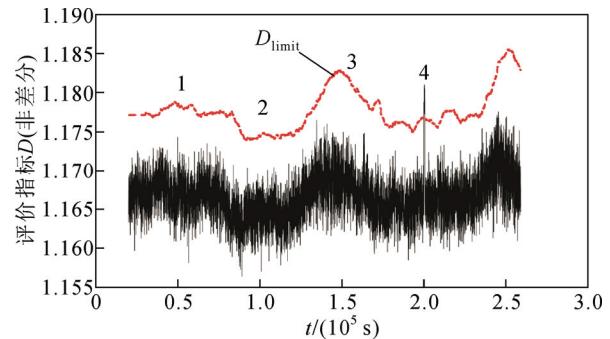


图 6 非差分处理后的评估结果

Fig.6 Evaluation results(no difference)

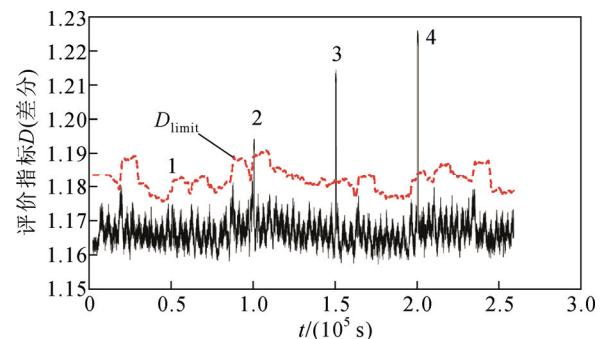


图 7 差分处理后的评估结果

Fig.7 Evaluation results(difference)

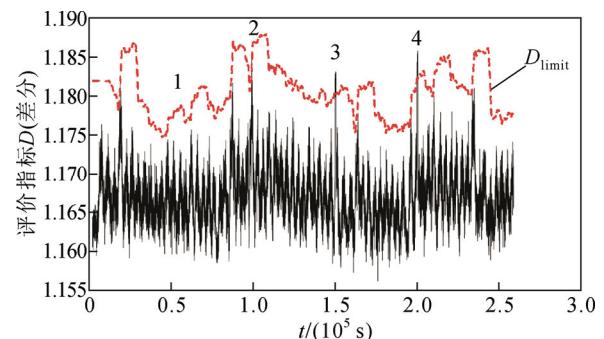


图 8 单组评价指标的评估结果

Fig.8 Evaluation results using indicator D

10, 验证该场景下, 本文方法的适用性。

由图 11 渐变性误差评估结果可知, 当渐变性误差大于 0.1% 时, 差异性评价指标显著大于评估阈值, 且差异性评价指标随渐变性误差的增大而逐渐增大。

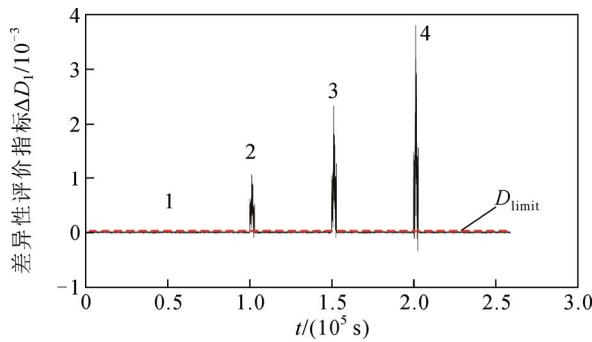


图 9 差异性评价指标的评估结果

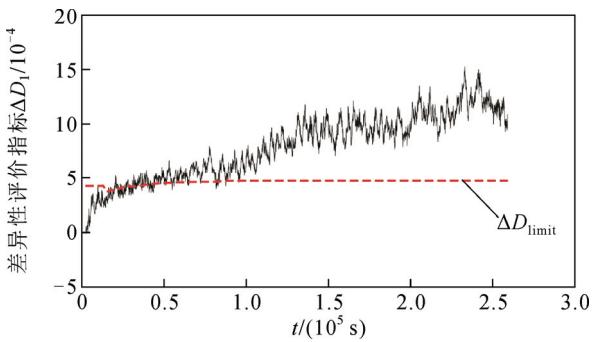
Fig.9 Evaluation results using indicator  $\Delta D$ 

图 11 漂移误差的评估结果

Fig.11 Evaluation results of gradual deviation

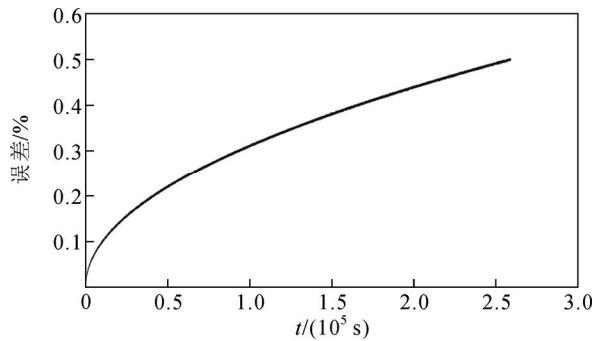


图 10 实测数据引入渐变性误差

Fig.10 Adding gradual deviation to measured data

算例分析 2 和算例分析 3 表明：基于 DP-ADI 和 MCSP 的评估方法适用于互感器突变性误差变化状态和渐变性误差变化状态评估。

### 3.5 算例分析 4(3 台电压互感器)

为了验证评估方法对 3 组以上的电压互感器的误差状态评估效果，本节设置 3 台电压互感器：一组数据叠加一个带有噪声的漂移信号，如图 10 所示，记为互感器 1，其余两组数据不叠加误差，分别记为互感器 2 与互感器 3，验证该场景下，本文方法的适用性。图 12 为 3 组电压互感器的误差状态评估结果，图中  $\Delta D_1$  与  $\|\Delta D\|$  的图像基本重叠， $\Delta D_2$  与  $\Delta D_3$  的图像基本重叠。

当互感器 1 的误差超过 0.1% 时， $\|\Delta D\|$  显著超过评估阈值， $\Delta D_2$  与  $\Delta D_3$  均小于评估阈值，评估结果为互感器 1 误差状态异常，互感器 2 与互感器 3 误差状态均正常，即多组电压互感器误差状态评估结果与本节实验设置情况一致。

算例分析 4 表明：基于 DP-ADI 和 MCSP 的评估方法对于 3 台电压互感器误差状态评估同样适用。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。

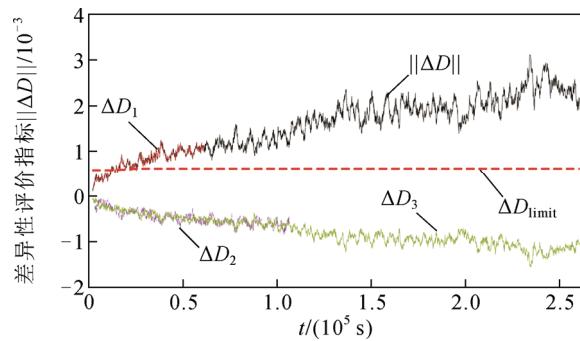


图 12 3 台电压互感器评估结果

Fig.12 Evaluation results of three voltage transformers

## 4 现场应用分析

将本文提出的评估方法应用于江苏某 110 kV 变电站，站内电压互感器一次接线拓扑图如图 13 所示。

110 kV 进线布置有 3 组电压互感器，分别为一组 0.05 级的传统电磁式电压互感器与两组 0.2 级的电子式电压互感器(electronic voltage transformer, EVT)，分别记为 EVT<sub>1</sub> 与 EVT<sub>2</sub>。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。数据的采集时间间隔为 1 s，取前 60 000 点数据用于建立初始评估模型，对后续将近 1 个月的电压互感器开展误差评估。三相 EVT 的评估结果如图 14 所示。

图 14 中，虚线表示评估阈值，实线表示差异性评价指标。评价指标阈值随着评价指标的变化不断更新，随着时间的增加，差异性评价指标波动逐渐增大，这是由 2 组电压互感器的测量数据时刻并不完全一致引起的。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，2 组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  $\Delta D_1$  均显著大于评估阈值, 即在第 3~6 天时间范围内, EVT<sub>1</sub> 的三相误差状态均异常。

为验证评估结果的有效性, 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 15 所示。比对结果表明: 在第 3~6 天范围内, 观察到 EVT<sub>1</sub> 的三相误差异常波动, 但其余时刻的

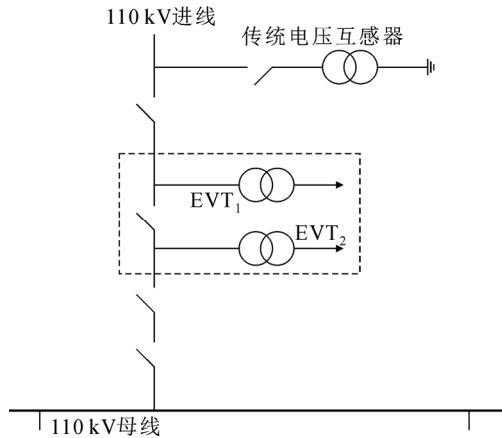


图 13 电压互感器一次接线拓扑图

Fig.13 Topology diagram of primary wiring of voltage  
transformers

误差状态正常; 而 EVT<sub>2</sub> 的三相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。

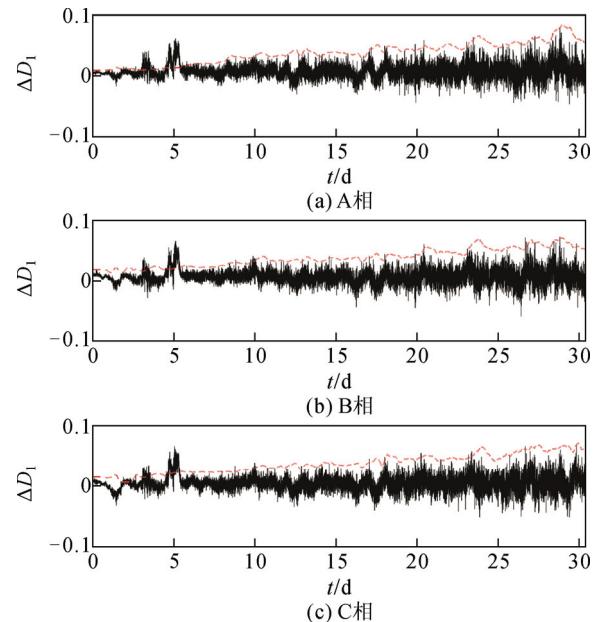


图 14 三相电压互感器评估结果

Fig.14 Evaluation results of three-phase voltage transformer

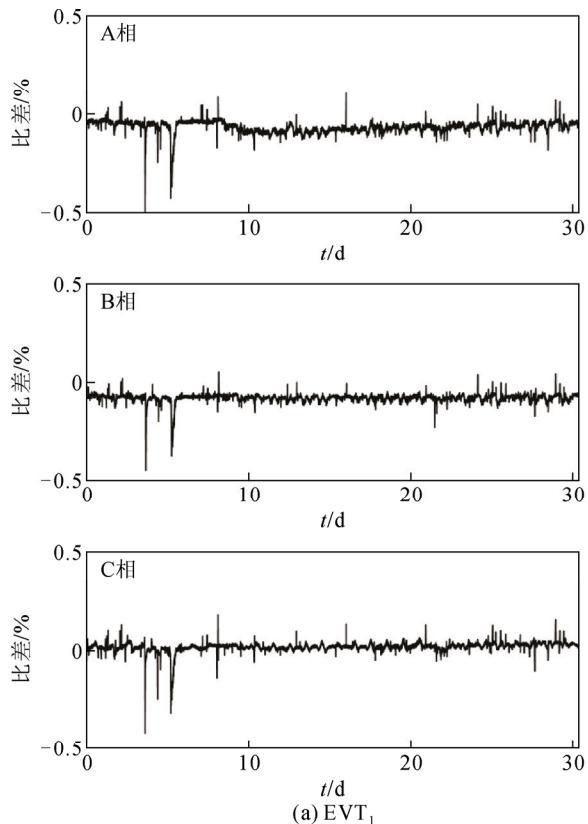
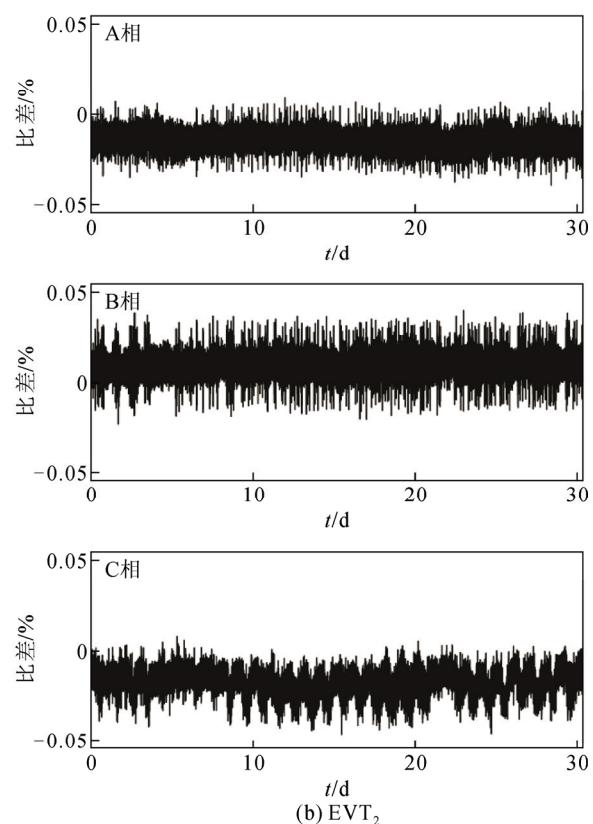


图 15 三相电压互感器比对结果

Fig.15 Comparison results of three-phase voltage transformers



## 5 结论

1) 针对一次电压波动中的非平稳成分, 利用自相关函数与差分方法对输出电压时间序列进行基于 DP-ADI 的平稳化处理, 削弱了一次电压中的非平稳波动对误差状态评估的影响。

2) 针对一次电压波动中的微小缓慢平稳波动成分, 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, 削弱了微小缓慢平稳波动对状态评估的影响。

3) 仿真结果表明, 基于 DP-ADI 的平稳化方法与基于 MCSP 的差异性评价指标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, 能够可靠地评估 0.1% 的误差状态异常, 可推广至全网域电压互感器的误差状态实时评估。

4) 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。

## 参考文献 References

- [1] 国家质量监督检验检疫总局. 电力互感器检定规程: JJG 1021—2007[S]. 北京: 中国质检出版社, 2007.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Verification regulation of instrument transformers in power system: JJG 1021—2007[S]. Beijing, China: China Quality Inspection Press, 2007.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国标准化管理委员会. 互感器: GB/T 20840[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Instrument transformers: GB/T 20840[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2013.
- [3] 李璇, 丁嘉婧, 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.  
LI Xuan, DING Jiajing, LIU Xichao, et al. Error source analysis and compensation of power voltage transformer with automatic voltage regulation function[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2554-2560.
- [4] 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.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Instrument voltage transformers: JJG 314—2010[S]. Beijing, China: China Measurement Press, 2011.
- [5] HU C, CHEN M Z, LI H B, et al. An accurate on-site calibration system for electronic voltage transformers using a standard capacitor[J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(5): 055901.
- [6] LI Z H, YU C Y, ABU-SIADA A, et al. An online correction system for electronic voltage transformers[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 126: 106611.
- [7] LI Z H, LI H B, ZHANG Z, et al. High-accuracy online calibration system for electronic voltage transformers with digital output[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2014, 36(6): 734-742.
- [8] 赵东芳, 赵伟, 荣潇, 等. 高压电能计量设备及其检验技术[J]. 电测与仪表, 2019, 56(23): 1-10.  
ZHAO Dongfang, ZHAO Wei, RONG Xiao, et al. Measurement equipments of high-voltage electrical energy and the testing technology[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(23): 1-10.
- [9] 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.  
CHEN Gang, XU Minrui, MU Xiaoxing, et al. Transformer on-line monitoring and fault diagnosis technology based on improved neural network algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(11): 49-54, 62.
- [10] 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.  
WANG Tao, ZHANG Ning, LIU Lin, et al. Research and application of electronic transformer fault diagnosis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 74-79.
- [11] 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.  
ZHANG Qiuyan, CHENG Hanmiao, LI Hongbin, et al. Multi-parameter degradation model and error evaluation method for digital electrical power metering system[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3202-3207.
- [12] 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.
- [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.  
WANG Hongbin, TANG Kunming, XU Ruilin, et al. Diagnosis of soft fault of electronic transformer in digital substation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 53-58.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] FEINBERG J, SCALETTAR R, ZEE A. “Single ring theorem” and the disk-annulus phase transition[J]. Journal of Mathematical Physics, 2001, 42(12): 5718-5740.
- [18] QIU R C, HU Z, LI H S, et al. Cognitive radio communication and networking: principles and practice[M]. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 2012.
- [19] 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.  
CHENG Hanmiao, LI Hongbin, XU Qing, et al. Research on system condition assessment based on large dimensional random matrices[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(1): 72-78.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.  
CHEN Weibiao, CHEN Yiping, YAO Wei, et al. A random matrix theory-based approach to fault time determination and fault area location[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1655-1664.
- [23] 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.  
HU Chen, ZHANG Zhu, JIAO Yang, et al. Error state correlation analysis based on random matrix theory for electronic transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 45-53.
- [24] 陈刚, 马爱军, 张继红, 等. AVC 分散控制模式下的变电站电压无功控制研究[J]. 电网技术, 2010, 34(12): 187-192.  
CHEN Gang, MA Ajun, ZHANG Jihong, et al. Voltage and reactive power control in substation under decentralized control mode of AVC[J]. Power System Technology, 2010, 34(12): 187-192.
- [25] 赵国鹏, 刘思远, 周昕炜, 等. 基于柔性多状态开关的配电网电压波动平抑策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(4): 1152-1160.  
ZHAO Guopeng, LIU Siyuan, ZHOU Xinwei, et al. Voltage fluctuation suppression strategy based on the flexible multi-state switch in distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1152-1160.
- [26] 屈星, 李欣然, 盛义发, 等. 考虑电池储能系统的配电网广义综合负荷建模[J]. 高电压技术, 2020, 46(2): 490-499.  
QU Xing, LI Xinran, SHENG Yifa, et al. Generalized composite load mode of distribution network considering battery energy storage system[J]. High Voltage Engineering, 46(2): 490-499.
- [27] 罗凤章, 张旭, 杨欣, 等. 基于深度学习的综合能源配电系统负荷分析预测[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 23-32.  
LUO Fengzhang, ZHANG Xu, YANG Xin, et al. Load Analysis and prediction of integrated energy distribution system based on deep learning[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 23-32.
- [28] WEBB A R. Statistical pattern recognition[M]. 2nd ed. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd, 2002: 196-201.
- [29] 谢辉春, 崔翔, 邬雄, 等. 1 000 kV 特高压交流单回输电线路好天气下无线电干扰的统计分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 861-870.  
XIE Huichun, CUI Xiang, WU Xiong, et al. Statistical analysis of 1 000 kV UHV AC single-circuit transmission line radio interference under good weather condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 861-870.

赵 鹏(通信作者)

1963—, 男, 硕士, 教授级高工

主要从事高电压领域相关科研工作

E-mail: zhaopeng1@epri.sgcc.com.cn



ZHAO Peng

Professor

Corresponding author

收稿日期 2021-11-03 修回日期 2021-12-10 编辑 卫李静