

# 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

王欢<sup>1,3</sup>, 王忠东<sup>2</sup>, 卢树峰<sup>2</sup>, 陆子刚<sup>2</sup>, 刘俭<sup>1</sup>

(1. 中国电力科学研究院有限公司武汉分院, 武汉 430074; 2. 国网江苏省电力有限公司营销服务中心, 南京 210019; 3. 华中科技大学, 武汉 430074)

**摘要:** 电容式电压互感器 (CVT) 的内绝缘状态是保证其计量准确性和运行稳定性的关键因素。然而, 在长期运行过程中, 电老化、热老化以及系统过电压等因素会导致 CVT 的内绝缘状态出现劣化。针对此问题, 文中提出了一种数据驱动的 CVT 内绝缘状态评价方法。该方法利用高压 CVT 群体之间的电气连接关系构建 CVT 误差状态的特征参量, 基于 CVT 误差状态与内绝缘状态的相关性, 通过模糊分析方法匹配 CVT 的误差状态与内绝缘状态, 实现了在线评价 CVT 异常内绝缘状态的异常程度和异常类型。

**关键词:** 电容式电压互感器; 误差状态; 内绝缘状态; 模糊分析

**DOI:** 10.19753/j.issn1001-4390.2024.04.011

中图分类号: TM451

文献标识码: B

文章编号: 1001-4390(2024)04-0073-08

## Internal insulation condition evaluation method for capacitor voltage transformer based on fuzzy analysis of error condition

WANG Huan<sup>1,3</sup>, WANG Zhongdong<sup>2</sup>, LU Shufeng<sup>2</sup>, LU Zigang<sup>2</sup>, LIU Jian<sup>1</sup>

(1. Wuhan Branch, China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China.  
2. Marketing Service Center, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210019, China.  
3. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The internal insulation condition of capacitor voltage transformer (CVT) is a key factor to ensure its measurement accuracy and operation stability. However, during the long-term operation, the internal insulation condition of CVT would be degraded by electrical aging, thermal aging and system overvoltage. Aiming at this problem, a data-driven CVT internal insulation condition evolution method is proposed in this paper. This method constructs the feature parameters of error condition based on the electrical connection relationship between the high-voltage CVT groups, and the fuzzy analysis is utilized to match the internal insulation condition and error condition of CVTs according to their correlations, therefore, the degree and type of CVT abnormal internal insulation could be evaluated online.

**Keywords:** capacitor voltage transformer, error condition, internal insulation condition, fuzzy analysis

### 0 引言

电容式电压互感器 (capacitor voltage transformer, CVT) 是当前高压电力系统中应用最为广泛的电压互感器<sup>[1-3]</sup>。CVT 的内部结构较为复杂, 在长期运行过程中, 不仅热老化和电老化会导致 CVT 的绝缘性能出现劣化, 电力系统过电压以及 CVT 内部的局部放电还会对 CVT 的内绝缘结构造成不可逆的伤害, 导致 CVT 不仅无法准确将一次电压转换为二次电压, 且存在严重的安全隐患。因此, 对 CVT 的内绝缘状态进行实时监测, 并及时评价异常内绝缘状态的异常类别和异常程度, 对保证 CVT 的长期稳定运行具有重要意义。

为评价 CVT 的内绝缘状态, 传统电桥法在 CVT 停电退出运行的情况下, 将数字电桥和被检 CVT 同时接入试验电压信号, 比对被检 CVT 和标准电容器中的容性电流, 计算被检 CVT 的电容量和介质损耗因数<sup>[4]</sup>。电桥法在测试时需要将 CVT 停电退出运行并拆除一次引线, 且对于最常见的叠装式 CVT, 若未设计中间电压测试抽头, 在 CVT 投运后无法直接接入数字电桥测试分压电容的内绝缘性能。为此, DL/T 474.3—2018《现场绝缘试验实施导则 介质损耗因数  $\tan\delta$  试验》推荐采用自激法现场测试 CVT 的电容量和介质损耗<sup>[5]</sup>, 该方法从 CVT 的输出绕组施加测试电压, 以中间变压器作为升压器, 实现了在不拆解 CVT 的条件下分别测

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5600-201918181A-0-0-00)

试高压电容和中压电容的内绝缘性能。该方法仍然需要被检 CVT 停电退出运行,无法实时监测 CVT 的内绝缘状态,且可能导致 CVT 出现内部谐振和中间变压器二次绕组电流超限,对 CVT 造成损害<sup>[6-10]</sup>。

针对传统 CVT 内绝缘状态评价方法的缺陷,目前已有若干在线评价方法。文献[11]基于 CVT 现场试验经验,认为正常情况下三相 CVT 输出电压的幅值大小应当类似,若某台 CVT 的输出电压出现异常变动,则认为该 CVT 出现内绝缘异常的可能性较大。该方法缺乏理论依据,故障诊断结果的可信度较低。文献[1]和文献[12]提出了基于信号分析的 CVT 绝缘状态在线评价方法。此类方法通常需要额外加装传感器采集电容分压器的容性电流、剩余绕组的输出电压等信号。然而加装传感器可能会破坏 CVT 外壳的密封性,对 CVT 的安全运行造成一定隐患。为了在不拆解 CVT、不加装其他传感器的情况下实现 CVT 内绝缘性能的在线评价,相关学者提出了数据驱动的 CVT 内绝缘状态评价方法,实现了数据驱动的评价方法的探索性研究。文献[13]提出了一种基于证据理论的 CVT 内绝缘状态老化监测方法,该方法以初始内绝缘状态正常的三相 CVT 作为评价群体,以群体输出电压的正序分量、负序分量、零序分量以及帕克变换结果作为特征参量,通过 Dempster-Shafer 证据理论将各个参量转化为证据片段,该方法认为基于上述参量的证据片段仅与 CVT 的内绝缘劣化情况有关,因此通过比较在线评价时的证据片段与正常证据片段,可实时评价 CVT 的内绝缘状态。根据该文献中的实验结果,该方法仅仅实现了 CVT 电容量变化较低精度的在线监测,若电容分压器中被击穿的电容小于 3 个,则该方法无法识别出 CVT 内绝缘状态的异常变化。此外, CVT 的主要内绝缘参数除分压电容器的容量外,还包括分压电容器的介质损耗。该方法不仅忽视了电容器介质损耗对特征参量的影响,且由于特征参量中均包含了 CVT 输出电压的幅值信息和相位信息,导致该方法无法分辨 CVT 分压电容器击穿和介质损耗异常,在实际工程应用中可能出现 CVT 内绝缘异常类型误判。

文中以 CVT 误差状态与内绝缘状态的相关性作为切入点,提出了一种基于误差状态模糊分析的 CVT 内绝缘状态评价方法。通过 CVT 的等效物理模型得到 CVT 不同程度分压电容器容量异常和介质损耗异常对应的附加误差,与正常内绝缘状态下 CVT 的输出电压数据结合,构建包含多种典型异常内绝缘状态的典型状态样本集。基于 CVT 群体的输出电压数据,分别构建表征 CVT 比差状态和角差状态的特征参量。利用模糊聚类分析方法,匹配 CVT 误差状态的特征参量与典型状态样本,从而在不停电且不加装其他传感器的条

件下,对 CVT 内绝缘状态是否发生异常、异常类型及异常程度进行准确评价。

### 1 CVT 内绝缘性能与误差状态的相关性

CVT 主要由电容分压器、补偿电抗器、中间变压器和阻尼器组成。其中,中间变压器可被视作一次电压较低的 PT,一般情况下其内绝缘性能是可靠且稳定的。对于电容分压器,若 CVT 的外部绝缘密封性良好,则分压电容器的绝缘性能几乎不受环境因素影响。但是在 CVT 长期运行过程中,电容分压器内部的局部升温、局部放电、一次过电压等影响因素导致的热老化和电老化会造成 CVT 分压电容器的内绝缘性能出现长期且缓慢的变化<sup>[14-18]</sup>,而一旦外部绝缘的密封性出现异常,绝缘油泄漏或外部水气侵入将使得电容器的内绝缘性能出现严重劣化。

将 CVT 高压电容和中压电容的介质损耗分别等效为并联电阻,以 T 型等效电路代表中间变压器,可得到计及内绝缘参数的 CVT 等效电路模型,如图 1 所示。

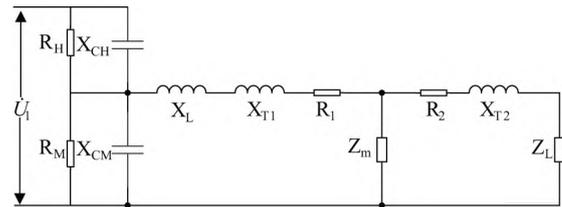


图 1 计及内绝缘参数的 CVT 等效电路模型  
Fig. 1 CVT equivalent circuit model considering internal insulation parameters

图 1 中  $X_{CH}$  和  $X_{CM}$  分别为高压分压电容和中压分压电容的等效容抗,  $R_H$  和  $R_M$  分别为二者介质损耗的等效电阻,  $X_L$  为补偿电抗器,  $X_{T1}$ 、 $X_{T2}$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  均为中间变压器的等效参数,  $Z_m$  为中间变压器的励磁电抗,  $Z_L$  为折算至中间变压器一次侧的等效二次负载。将  $Z_m$  和  $Z_L$  视为无穷大,即电容分压器的输出端口视作开路,以介质损耗角正切代表介质损耗等效电阻,此时计及内绝缘参数的 CVT 二次输出电压为:

$$\dot{U}_2 = K \dot{U}_1 \frac{C_H \tan \sigma_H + jC_H}{C_H \tan \sigma_H + C_M \tan \sigma_M + j(C_H + C_M)} \quad (1)$$

若 CVT 的内绝缘性能出现异常变化,此时 CVT 的附加比差和角差为:

$$f = \left[ \frac{\sqrt{(C_{Hi} \tan \sigma_{Hi})^2 + C_{Hi}^2}}{\sqrt{(C_{Hi} \tan \sigma_{Hi} + C_{Mi} \tan \sigma_{Mi})^2 + (C_{Hi} + C_{Mi})^2}} - \frac{C_H}{C_H + C_M} \right] \times 100\% \quad (2)$$

$$\delta = \tan^{-1} \left( \frac{1}{\tan \sigma_H} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{C_H + C_{Mi}}{C_H \tan \sigma_{Hi} + C_{Mi} \tan \sigma_{Mi}} \right) \quad (3)$$

式中  $C_{Hi}$ 、 $C_{Mi}$ 、 $\tan\sigma_{Hi}$  和  $\tan\sigma_{Mi}$  均为异常内绝缘参数。如表 1 所示,参考某型号 110 kV CVT 的器件参数,量化分析高压电容、中压电容容量及介质损耗变化对 CVT 比差、角差的影响,仿真计算结果如图 2 和图 3 所示。

表 1 某型号 110 kV CVT 额定参数

Tab. 1 Rated parameters of a 110 kV CVT

参数	单位	数值
高压电容	$\mu\text{F}$	0.012
中压电容	$\mu\text{F}$	0.063
电容器介质损耗	%	0.075
补偿电抗器	H	132.68
$R_m$	k $\Omega$	14 428.24
$X_m$	k $\Omega$	33 948.80
$R_1, R_2$	k $\Omega$	3.20
$X_{T1}, X_{T2}$	k $\Omega$	753.98

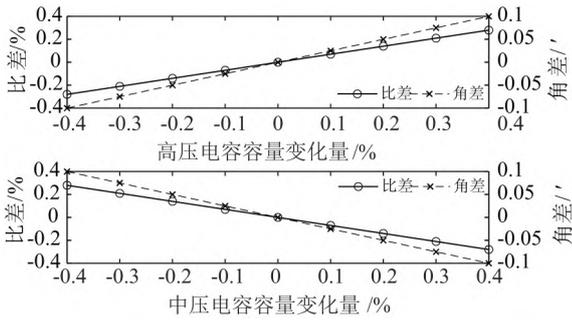


图 2 分压电容容量变化造成的附加误差

Fig. 2 Additional error caused by the variation of voltage-dividing capacitance

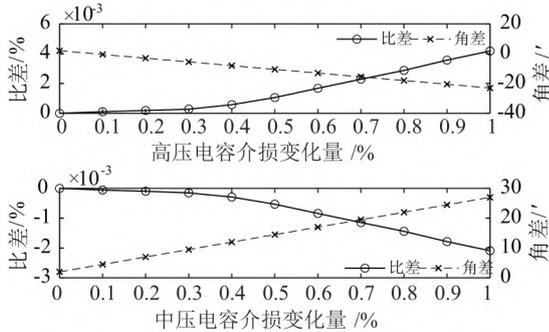


图 3 分压电容介质损耗变化造成的附加误差

Fig. 3 Additional error caused by dielectric loss variation of voltage-dividing capacitance

由图 2 和图 3 可以看出,在其他参数不变的情况下, CVT 分压电容器的容量变化对角差影响较小,而对比差的影响十分显著。当高压电容容量增大时 CVT 的比差向正向偏移;中压电容容量增大时,比差向负相偏移; CVT 分压电容器的介质损耗变化对比差影响很小,对角差的影响极大。当高压电容的介质损耗增大时 CVT 的角差会向负相偏移;中压电容介质损耗增大时 CVT 的角差会向正向偏移。

## 2 CVT 误差状态特征参量

受到电力系统运行方式和 CVT 群体之间电气连接关系的约束,变电站内同一电压等级多台 CVT 的一次电压之间必然存在稳定的电气物理关联性,而多台 CVT 的误差状态之间无任何关联性。因此,可以基于 CVT 群体之间稳定的电气物理相关性,从 CVT 群体的输出电压数据中分离一次电压信息和误差信息,构建特征参量表表征 CVT 个体的误差状态。

通常情况下,高压变电站内双母线接线的两组母线为并列运行状态,二分之三接线的所有断路器闭合,所有母线均投入运行,即同一电压等级的 CVT 的一次电压均与母线电压相同,而输出电压中不仅包含母线电压信息,还包含 CVT 自身的误差信息。第  $i$  组 CVT 二次电压的幅值、相位可分别表示为:

$$V_{oi} = (1 + \varepsilon_i) \frac{V_{pi}}{k_r} \quad (4)$$

$$\varphi_{oi} = \varphi_{pi} + \rho_i \quad (5)$$

在同相 CVT 均为同型号的前提下,同一电压等级下所有同相 CVT 的输出电压幅值、相位分别具有如下关系:

$$\begin{cases} \frac{V_{o1}}{V_{o2}} = \frac{1 + \varepsilon_1}{1 + \varepsilon_2} \\ \frac{V_{o2}}{V_{o3}} = \frac{1 + \varepsilon_2}{1 + \varepsilon_3} \\ \dots \\ \frac{V_{o(i-1)}}{V_{oi}} = \frac{1 + \varepsilon_{(i-1)}}{1 + \varepsilon_i} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \varphi_{o1} - \varphi_{o2} = \rho_1 - \rho_2 \\ \varphi_{o2} - \varphi_{o3} = \rho_2 - \rho_3 \\ \dots \\ \varphi_{o(i-1)} - \varphi_{oi} = \rho_{(i-1)} - \rho_i \end{cases} \quad (7)$$

式中 CVT 随机波动的一次电压信息均被消去,仅存的变量为各个 CVT 的比差、角差,即以上两式的变化能够反映相关 CVT 的误差状态变化。

对于高压变电站内同一电压等级下的多组三相 CVT,上述特征参量的维度可进一步扩展为:

$$A_{zj} = \begin{pmatrix} \frac{V_{A1}}{V_{A2}} \frac{V_{B1}}{V_{B2}} \frac{V_{C1}}{V_{C2}} \\ \frac{V_{A2}}{V_{A3}} \frac{V_{B2}}{V_{B3}} \frac{V_{C2}}{V_{C3}} \\ \dots \\ \frac{V_{Ai}}{V_{A(i+1)}} \frac{V_{Bi}}{V_{B(i+1)}} \frac{V_{Ci}}{V_{C(i+1)}} \\ \dots \\ \frac{V_{A(n-1)}}{V_{An}} \frac{V_{B(n-1)}}{V_{Bn}} \frac{V_{C(n-1)}}{V_{Cn}} \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\varphi_{zj} = \begin{pmatrix} \varphi_{A1} - \varphi_{A2} \ \varphi_{B1} - \varphi_{B2} \ \varphi_{C1} - \varphi_{C2} , \\ \varphi_{A2} - \varphi_{A3} \ \varphi_{B2} - \varphi_{B3} \ \varphi_{C2} - \varphi_{C3} , \\ \dots , \\ \varphi_{Ai} - \varphi_{A(i+1)} \ \varphi_{Bi} - \varphi_{B(i+1)} \ \varphi_{Ci} - \varphi_{C(i+1)} , \\ \dots , \\ \varphi_{A(n-1)} - \varphi_{An} \ \varphi_{B(n-1)} - \varphi_{Bn} \ \varphi_{C(n-1)} - \varphi_{Cn} \end{pmatrix} \quad (9)$$

正常情况下,  $A_{zj}$ 、 $\varphi_{zj}$  中所有的特征参量均与 CVT 的一次电压幅值、相位波动无关, 当第  $i$  组 CVT 的比差出现异常时,  $V_{o(i-1)}/V_{oi}$  和  $V_{oi}/V_{o(i+1)}$  将偏离正常值, 且二者的偏离方向相反。类似地, 若第  $i$  组 CVT 的角差出现异常,  $\varphi_{o(i-1)} - \varphi_{oi}$  和  $\varphi_{oi} - \varphi_{o(i+1)}$  将偏离正常值, 且二者的偏离方向相反。

以某 220 kV 变电站为例, 220 kV 侧采用双母线接线方式, 共有两组三相 CVT 分别监测两段母线的电压状态。采用 0.05 级高精度电压采集装置同步采集 CVT 连续三天的输出电压幅值、相位数据, 期间两段母线始终保持并列运行状态, 采样频率为 4 次/h, 特征参量  $V_{oA1}/V_{oA2}$  和  $\varphi_{oA1} - \varphi_{oA2}$  每天的平均值和标准差如表 2 所示。

表 2 CVT 误差状态特征参量监测结果

Tab. 2 Monitoring results of feature parameters of CVT error condition

时间	$V_{oA1}/V_{oA2}$		$\varphi_{oA1} - \varphi_{oA2}$	
	平均值	标准差	平均值/ $^\circ$	标准差/ $^\circ$
第一天	1.000 0	$4.2315 \times 10^{-5}$	0.005 2	0.003 0
第二天	1.000 0	$4.6041 \times 10^{-5}$	0.005 1	0.003 0
第三天	1.000 0	$4.4207 \times 10^{-5}$	0.005 1	0.003 0

从表 2 可以看出, 在变电站正常运行的情况下, 由多组同相 CVT 二次输出电压数据得到的误差状态特征参量十分稳定, 不受随机波动的一次电压影响。

### 3 基于误差状态模糊分析的 CVT 内绝缘状态评价方法

由前文的分析可知, 内绝缘性能劣化是导致 CVT 误差状态异常的主要原因, 不同的内绝缘性能劣化形式对应着不同的误差异常形式。同时, 基于 CVT 群体的输出电压数据, 可构建多组表征 CVT 误差状态的特征参量。因此, 将典型异常内绝缘状态造成的附加误差与 CVT 内绝缘状态正常时的输出电压数据结合, 可得到包含多种典型内绝缘状态的典型状态样本集。应用模糊聚类方法计算特征参量与各类内绝缘状态之间的归属关系, 可实现评价 CVT 内绝缘状态的异常类型与异常程度。

#### 3.1 模糊聚类基本原理

模糊数学将事物对某一类别的归属程度定义为“隶属度”, 使用“隶属度”表示样本对类的归属关系的聚类方法被称作“模糊聚类”<sup>[19-22]</sup>。通过模糊聚类分

析样本与类的亲疏程度得到了定量描述。

可能性模糊  $c$  均值聚类算法 (PFCM) 同时使用“隶属度”和“典型性”两个指标综合表征样本对类的归属程度<sup>[23-25]</sup>。在进行设备状态评价时, 首先使用 PFCM 对典型状态样本进行分类, 状态样本中应包含设备运行状态正常时的相关数据和尽可能多种类型的异常运行状态数据, PFCM 的模糊聚类结果即为典型状态簇, 每个状态簇对应一种典型状态。此后通过迭代优化目标函数计算在线监测运行数据相对于每个典型状态簇的“隶属度”和“典型性”, 二者综合即可获知在线监测数据相对于每种典型簇的归属程度, 归属程度最高的典型状态即为被评价设备当前的运行状态。

#### 3.2 CVT 内绝缘状态评价方法

在图 1 的 CVT 等效模型中, 正常状态对应的电容分压器等效电容量以及介质损耗正切值、补偿电抗器的等效电感均由 CVT 生产厂家在交付用户时提供, 中间变压器等效电路中的短路电抗可通过短路试验得到, 负载电抗  $Z_L$  由 CVT 的实际二次负载决定。将不同内绝缘异常状态对应的等效参数带入 CVT 等效模型, 分别将模型输出电压与内绝缘状态正常时模型的输出电压比对, 可获得对应的 CVT 附加误差。将 CVT 内绝缘状态正常时的输出电压数据分别与各类附加误差叠加, 得到适用于内绝缘状态评价的典型状态样本数据集。以站内同一电压等级下其他 CVT 作为评价辅助 CVT, 以被评价 CVT 的典型状态样本集和辅助 CVT 的输出电压数据构建包含多种误差状态特征参量的典型状态参量组, 利用模糊聚类方法将典型状态参量组转换为典型状态数据簇, 之后, 将在线评价时 CVT 群体输出电压数据构成的误差状态特征参量组分别与典型状态数据簇进行匹配, 即可获得被评价 CVT 的内绝缘状态。评价方法的详细流程如图 4 所示。

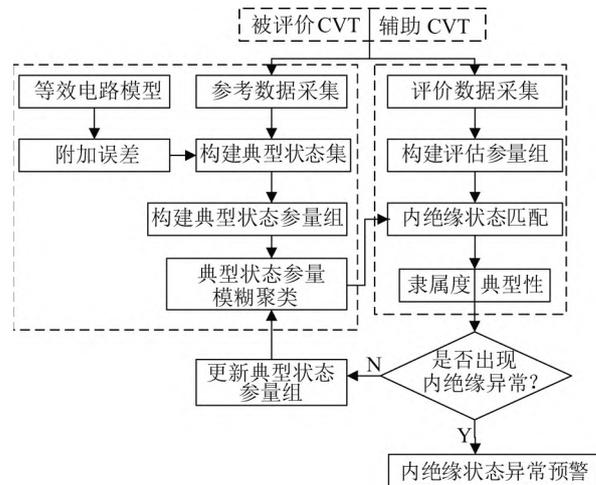


图 4 CVT 内绝缘状态评价方法流程图

Fig. 4 Flow chart of CVT internal insulation evaluation method

具体步骤说明如下:

1) 参考数据采集: 在变电站内同一电压等级下所有 CVT 的内绝缘均为正常状态的前提下, 以其中某一台 CVT 作为评价对象, 同组其他两相 CVT 和同一电压等级下其他两组三相 CVT 作为辅助 CVT, 同步采集上述所有 CVT 的输出电压, 分别构建二次电压幅值数据集  $V_r = [V_{i-1}, V_i, V_{i+1}]$  和相位数据集  $\varphi_r = [\varphi_{i-1}, \varphi_i, \varphi_{i+1}]$ , 数据集中  $V_i = [V_{iA}, V_{iB}, V_{iC}]$ ,  $\varphi_i = [\varphi_{iA}, \varphi_{iB}, \varphi_{iC}]$ ;

2) 典型附加误差生成: 基于被评价 CVT 的器件参数建立等效电路模型, 仿真计算该 CVT 不同类型、不同程度内绝缘异常状态导致的附加误差;

3) 构建典型状态集: 以评价第  $i$  组三相 CVT 中的 A 相为例, 通过等效模型仿真获得  $m$  种典型异常内绝缘状态对应的附加误差, 将参考数据集中该 CVT 的输出电压数据复制  $m$  次, 分别叠加不同类型的附加误差, 得到  $[V_{iA1}, V_{iA2}, \dots, V_{iAm}]^T$ 、 $[\varphi_{iA1}, \varphi_{iA2}, \dots, \varphi_{iAm}]^T$ 。对于辅助 CVT, 直接将正常内绝缘状态时 CVT 的输出电压数据复制  $m$  次, 与包含典型附加误差的被评价 CVT 输出数据集组合, 得到内绝缘状态评价的典型状态集:

$$S = \begin{bmatrix} V_{(i-1)0} & V_{i0} & V_{(i+1)0} & \varphi_{(i-1)0} & \varphi_{i0} & \varphi_{(i+1)0} \\ V_{(i-1)1} & V_{i1} & V_{(i+1)1} & \varphi_{(i-1)1} & \varphi_{i1} & \varphi_{(i+1)1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ V_{(i-1)j} & V_{ij} & V_{(i+1)j} & \varphi_{(i-1)j} & \varphi_{ij} & \varphi_{(i+1)j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ V_{(i-1)m} & V_{im} & V_{(i+1)m} & \varphi_{(i-1)m} & \varphi_{im} & \varphi_{(i+1)m} \end{bmatrix} \quad (10)$$

4) 构建典型状态参量: 将典型状态集转换为包含多种误差状态特征参量的典型状态参量组:

$$C = \begin{bmatrix} A_{z0} & A_{z1} & \dots & A_{zj} & \dots & A_{zm} \\ \varphi_{z0} & \varphi_{z1} & \dots & \varphi_{zj} & \dots & \varphi_{zm} \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

其中第  $j$  行向量由典型状态集  $S$  的第  $j$  行向量计算得到。更具体地, 典型状态参量组的第  $j$  行向量中, 幅值比参量组为:

$$A_{zj} = \left( \frac{V_{A(i-1)j}}{V_{Aij}}, \frac{V_{B(i-1)j}}{V_{Bij}}, \frac{V_{C(i-1)j}}{V_{Cij}}, \frac{V_{Aij}}{V_{A(i+1)j}}, \frac{V_{Bij}}{V_{B(i+1)j}}, \frac{V_{Cij}}{V_{C(i+1)j}} \right) \quad (12)$$

相位差参量组为:

$$\varphi_{zj} = \left( \varphi_{A(i-1)j} - \varphi_{Aij}, \varphi_{B(i-1)j} - \varphi_{Bij}, \varphi_{C(i-1)j} - \varphi_{Cij}, \varphi_{Aij} - \varphi_{A(i+1)j}, \varphi_{Bij} - \varphi_{B(i+1)j}, \varphi_{Cij} - \varphi_{C(i+1)j} \right) \quad (13)$$

5) 典型状态参量模糊聚类: 采用 PFCM 对典型状态参量组  $C$  进行聚类分析, 得到  $(m+1)$  个聚类中心及  $(m+1)$  个数据簇, 每个聚类中心和数据簇分别对应一种典型内绝缘状态;

6) 评价数据采集: 在线评价时持续同步采集上述所有 CVT 的输出电压数据, 构成幅值数据集  $V_m$  和相位数据集  $\varphi_m$ , 评价数据集的结构与参考数据集完全相同;

7) 构建评价参量: 以评价数据集为基础构建在线评价状态下 CVT 的评价参量组  $C' = [A_z, \varphi_z]$ , 评价参量组中仅包含被评价 CVT 当前的运行状态;

8) 内绝缘状态判断: 采用模糊聚类方法计算评价参量组  $C'$  相对于每个典型数据簇的“隶属度”和“典型性”, 基于二者判断评价参量组与典型状态数据簇的匹配程度。

若对应正常状态的  $\mu_{0k}$  和  $t_{0k}$  均低于最优值, 则认为 CVT 群体中存在内绝缘状态异常的 CVT 个体, 进入判断流程。此时若仅有  $\mu_{mk}$  和  $t_{mk}$  接近于最优值, 则认为 CVT 群体中被评价 CVT 个体的内绝缘状态出现异常, 典型状态样本集中第  $m$  类典型内绝缘状态即为被评价 CVT 当前的内绝缘状态; 若所有“典型性”指标均接近零, 且所有“隶属度”指标均接近于  $1/c$ , 此时存在两种可能性: 1) 被评价 CVT 的内绝缘状态出现异常且异常状态不属于典型状态样本; 2) 参与构造“特征参量”的辅助 CVT 出现异常。由于变电站的 CVT 群体中内绝缘状态正常的 CVT 为绝大多数, 而内绝缘状态异常的 CVT 仅为少数, 因此可以从同一电压等级下其余 CVT 中随机选择互感器作为辅助 CVT, 重新构建典型状态集和评价参量组, 对内绝缘状态疑似异常的 CVT 进行评价。若评价结果正常, 则认为初始评价时辅助 CVT 中存在异常互感器; 若被评价 CVT 的内绝缘状态仍不属于典型状态集, 则认为被评价 CVT 的内绝缘状态出现异常且典型状态集中不包含此类异常。

## 4 实验验证

### 4.1 实验方案设计

为验证所提出的 CVT 内绝缘状态评价方法, 参照高压变电站中 CVT 群体的电气连接关系与某型号 CVT 的器件参数, 设计了模拟 CVT 内绝缘状态劣化实验平台。平台共包含 6 组模拟三相 CVT, 由高精度采集卡同步采集所有模拟 CVT 的输出电压。实验平台采用 PLC 控制电容器两端的继电器模拟不同数量的分压电容器被击穿, 同时控制电容器的并联等效电阻, 模拟不同程度的分压电容器介质损耗异常。平台的关键参数如表 3 所示, 平台结构图如图 5 所示。

表 3 实验平台参数表

Tab. 3 Parameters of testing platform

参数	单位	数值	参数	单位	数值
额定输入电压	V	110	电容额定耐压	V	150
额定输出电压	mV	100	额定介质损耗	%	0.05
$C_1$	$\mu\text{F}$	0.25	$C_4$ & $C_5$	$\mu\text{F}$	194.46
$C_2$ & $C_3$	$\mu\text{F}$	50.20	$C_6$	$\mu\text{F}$	0.99
补偿电抗器	H	8.25	PT 额定变比	V/mV	13/57.74

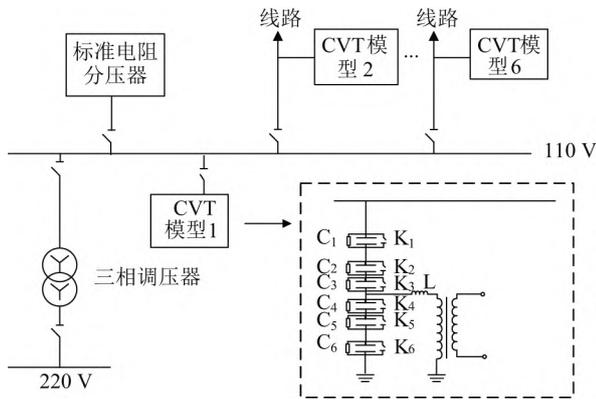


图 5 实验平台结构图

Fig. 5 Structure diagram of testing platform

提出的 CVT 内绝缘状态评价方法的典型状态集中包含有限类型的异常内绝缘状态,因此若被评价 CVT 的内绝缘状态出现异常,一种情况是典型状态集中包含当前发生的异常状态,另一种情况是典型状态集中不包含当前发生的异常状态。针对以上两种情况,利用实验平台对所提出的评价方法进行验证。

#### 4.2 评价方法验证

根据模拟 CVT 的器件参数建立等效电路模型,分别模拟计算不同程度的分压电容击穿和介质损耗异常状态对应的附加误差,结果如表 4 所示。

表 4 异常内绝缘状态对应的附加误差

Tab. 4 Additional error corresponding to abnormal internal insulation conditions

异常类型	附加比差 / %	附加角差 / ′
C <sub>2</sub> 击穿	0.393 8	0.263 3
C <sub>2</sub> & C <sub>3</sub> 击穿	0.789 4	0.225 4
C <sub>4</sub> 击穿	-0.402 6	0.254 8
高压电容介质损耗 0.1%	-0.034 1	-6.415 7
高压电容介质损耗 0.2%	-0.035 8	-13.715 4
高压电容介质损耗 0.3%	-0.037 7	-19.951 3

设置实验平台中所有模拟 CVT 均为正常内绝缘状态,并使用 NI-9502 16 位高精度多通道采集卡同步采集实验平台中所有模拟 CVT 输出电压的幅值、相位数据,采集频率为 1 次/s,采样时间持续 1 h,电压数据长度为 3 600。以第一组模拟 CVT 中的 A 相作为评价对象,将评价对象的输出电压数据复制 6 次并分别叠加表 4 中的附加误差。以第一组三相 CVT 中的 B 相和 C 相、第二组三相 CVT 和第三组三相 CVT 作为辅助 CVT,构建包含上述异常内绝缘状态和正常内绝缘状态的典型状态集,并计算典型状态参量组。采用 PFCM 方法对典型状态参量组进行模糊聚类分析,得到代表正常内绝缘状态以及 6 种异常内绝缘状态的数据簇,典型状态参量相对于典型状态的“隶属度”和“典型性”如图 6 所示。

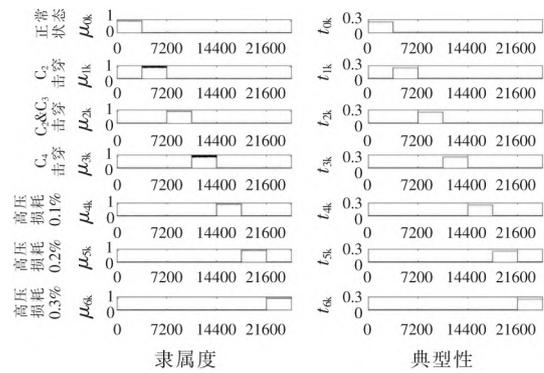


图 6 典型状态参量组的聚类结果

Fig. 6 Clustering result of typical condition parameters

可见,典型状态参量的模糊聚类效果良好,对应各类典型状态的数据片段的“隶属度”指标均几乎达到 1,而对应的“典型性”指标均几乎达到最优值(设置  $a=2$   $b=3$   $m=\eta=2$ ,典型性最优值为 0.25),各个数据簇能够代表相应的内绝缘状态。

#### 4.2.1 异常内绝缘状态识别

设置第一组 A 相模拟 CVT 的高压电容 C<sub>2</sub> 在第 1 800 个采样点处被击穿,即评价数据集中前 1 800 个数据点应归属于正常内绝缘状态,其余数据点应归属于典型状态集中第一种异常状态。基于评价数据集构建评价参量组,评价参量组相对于各个典型数据簇的“隶属度”和“典型性”指标如图 7 所示。

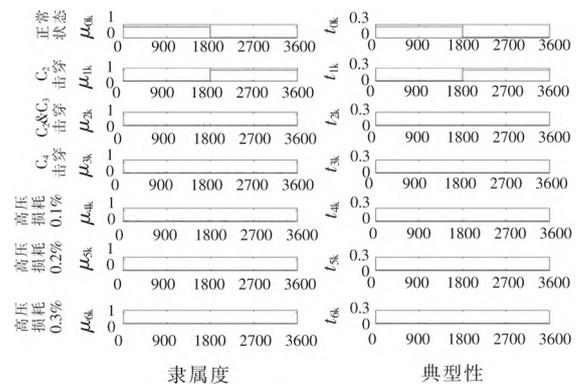


图 7 C<sub>2</sub> 被击穿时的评价结果

Fig. 7 Evaluation result when C<sub>2</sub> breakdown

在图 7 中,当被评价 CVT 的内绝缘状态正常时,对应正常内绝缘状态的  $\mu_{0k}$  和  $t_{0k}$  均保持在最优值附近,且其他评价指标均保持接近于零。在被评价 CVT 的内绝缘状态出现异常后,  $\mu_{0k}$  和  $t_{0k}$  均从最优值变为零,而对应“C<sub>2</sub> 击穿”的  $\mu_{2k}$  变化至接近于 1,  $t_{2k}$  变化至接近于 0.25,其他异常状态的评价指标仍保持在零附近。可见,文中方法准确评价出了被评价 CVT 内绝缘状态的异常类型和异常程度。

为验证文中方法对典型状态集之外的异常状态的

评价有效性,本节在评价过程中设置被评价 CVT 高压电容的介质损耗正切值在第 1 800 个采样点处变化为 0.5%,即评价数据集中前 1 800 个采样点对应正常内绝缘状态,而其余数据点对应异常内绝缘状态,且异常程度大于最大典型异常状态。评价参量组相对于各个典型数据簇的“隶属度”和“典型性”指标如图 8 所示。

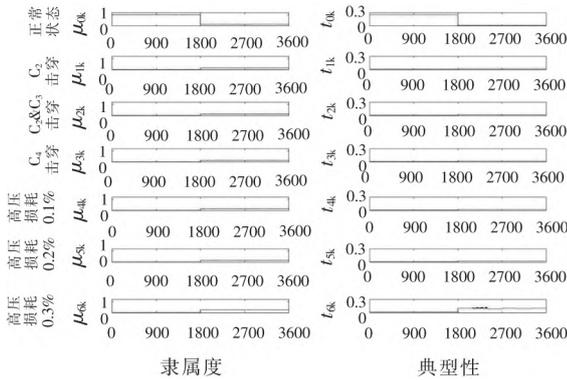


图 8 高压电容介质损耗 0.5% 时的评价结果  
Fig. 8 Evaluation result corresponding to 0.5% dielectric loss of HV capacitors

在图 8 中评价对象 CVT 的内绝缘状态发生异常后,  $\mu_{0k} \sim \mu_{6k}$  均在第 1 800 个采样点处跳变至接近 1/7,可见此时“隶属度”指标的变化情况与理论相符,依靠“隶属度”指标已无法判断 CVT 的内绝缘状态。

对于“典型性”指标,在图 8 中  $t_{0k}$  在第 1 800 个采样点处变化至几乎为零,而其他指标均几乎保持不变,仅有  $t_{6k}$  略大于  $t_{1k} \sim t_{5k}$ 。由此可初步得出结论:用于构建评价特征参量的 CVT 群体中存在内绝缘状态异常的 CVT,评价结果倾向于评价对象 CVT 介质损耗异常,且异常程度大于典型状态集中的最大异常,但是具体异常 CVT 个体还需判断。从实验平台中重新选取用于内绝缘状态评价的辅助 CVT。以第四组模拟 CVT 的 B 相和 C 相、第五组三相模拟 CVT 以及第六组三相模拟 CVT 作为辅助 CVT,与被评价 CVT 一同重新构建典型状态集和评价数据集,评价目标 CVT 的内绝缘状态,评价结果如图 9 所示。

可以看出,更换辅助 CVT 后的评价结果与更换前相同,所有“隶属度”指标均接近于 1/7,“典型性”指标中仅有  $t_{6k}$  略大于零,其它“典型性”指标均接近于零。由此可得出结论:内绝缘状态异常的互感器是被评价 CVT 而非辅助 CVT,且异常状态的类型偏向于介质损耗异常,异常程度已超过典型状态集中的最大异常状态,与实验平台的设置相符。

#### 4.2.2 评价方法验证实验小结

1) 对于包含多种典型异常内绝缘状态的典型状态参量组,PFCM 方法能够准确将其分类为多个典型数据簇,每个数据簇对应一种典型内绝缘状态;

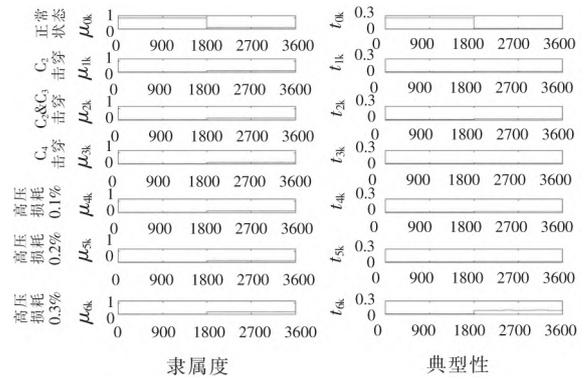


图 9 更换辅助 CVT 后高压电容介质损耗 0.5% 时的评价结果

Fig. 9 Evaluation result corresponding to 0.5% dielectric loss of HV capacitors after changing assistant CVT

2) 若典型状态集中包含当前发生的异常状态,则该方法可直接对异常状态的异常类型和异常程度做出正确评价;若典型状态集中不包含当前发生的异常状态,该方法仍然能够及时有效地识别出被评价 CVT 的异常状态;

3) 该方法对于 CVT 分压电容器容量异常和介质损耗异常都具有良好的适应性,能够在 CVT 运行过程中准确评价出上述异常内绝缘状态。

#### 5 结束语

提出了一种基于误差状态模糊分析的 CVT 内绝缘状态评价方法。该方法以 CVT 的等效物理模型计算典型异常内绝缘状态造成的附加误差,将附加误差与 CVT 正常输出电压数据结合构建典型内绝缘状态样本集,利用可能性模糊聚类方法,匹配 CVT 误差状态的特征参量与典型内绝缘状态,实现了在电力系统复杂工况条件下评价 CVT 异常内绝缘状态的异常类型和异常程度。

为了验证 CVT 内绝缘状态评价方法的有效性,文章参考高压变电站内 CVT 群体的电气连接结构,设计了模拟 CVT 内绝缘状态劣化实验平台,通过模拟不同程度的分压电容器容量异常以及介电损耗异常,证明了该方法能够即时、准确地判断 CVT 的内绝缘状态,实现了对 CVT 内绝缘状态的实时在线评价。

#### 参考文献

[1] 黄嘉鹏,陈贤顺,张福州,等. 电容式电压互感器绝缘在线监测系统设计与应用[J]. 电测与仪表,2016,53(15A): 33-37.  
HUANG Jiapeng, CHEN Xianshun, ZHANG Fuzhou, et al. Design and application of on-line monitoring system for capacitor voltage transformer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(15A): 33-37.

[2] 王欢,汪本进,邓万婷,等. 电容式电压互感器误差分析方法研究[J]. 电测与仪表,2016,53(11): 39-44.  
WANG Huan, WANG Benjin, DENG Wanting, et al. Research on error analysis method of capacitor voltage transformer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(11): 39-44.

[3] 韦家富,强文渊,刘友波,等. CVT 故障快速辨识的实用化方法

- [J]. 电测与仪表, 2019, 56(12): 20-25.  
WEI Jiafu, QIANG Wenyuan, LIU Youbo, et al. Practical method of fast identification on fault of CVT[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(12): 20-25.
- [4] GB/T 4703-2007, 电容式电压互感器[S].
- [5] DL/T 474.3-2018, 现场绝缘试验实施导则 介质损耗因数  $\tan\delta$  试验[S].
- [6] 王永军. CVT 的介损和电容值测试研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.  
WANG Yongjun. Measuring method study and application of CVT dielectric loss and capacitance[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [7] 盛况, 吴细秀, 周纯, 等. 应用于 CVT 在线校验的 LVQB 型电流互感器的悬浮电位暂态特性分析[J]. 电测与仪表, 2020, 57(5): 20-25.  
SHENG Kuang, WU Xixiu, ZHOU Chun, et al. Study on the floating voltage transient characteristics of the LVQB current transformer occurring on the CVT on-line calibration[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(5): 20-25.
- [8] 郭亮, 李哲, 李骁, 等. 雷电过电压引发电容式电压互感器铁磁谐振特性分析与防护研究[J]. 电瓷避雷器, 2019(6): 147-151, 158.  
GUO Liang, LI Zhe, LI Xiao, et al. Analysis and prevention research of ferroresonance in capacitor voltage transformer caused by lightning over-voltage[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(6): 147-151, 158.
- [9] 谢施君, 雷汉坤, 王乃会, 等. 基于 BP 神经网络的 CVT 暂态电压传递特性补偿技术[J]. 高压电器, 2022, 58(2): 149-157.  
XIE Shijun, LEI Hankun, WANG Naihui, et al. Compensation technology on transient voltage transfer characteristics of cvt based on bp neural network[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(2): 149-157.
- [10] 童涛, 徐碧川, 袁思凡, 等. 一起电容式电压互感器二次电压异常事故分析[J]. 电瓷避雷器, 2022(2): 98-104.  
TONG Tao, XU Bichuan, YUAN Sifan, et al. A CVT secondary voltage abnormal accident[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(2): 98-104.
- [11] 付炜平, 霍春燕. CVT 早期故障监测方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2009, 30(2): 29-31.  
FU Yiping, HUO Chunyan. Earlier fault monitoring method of CVT[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2009, 30(2): 29-31.
- [12] 蔡冰冰. 基于多参数的 CVT 带电检测技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.  
CAI Bingbing. On-line detection for CVT based on multi-parameter[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [13] SEYEDI H, DARYANI N. Evidence theory-based identification of aging for capacitive voltage transformers[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(14): 3646-3653.
- [14] MACH P, HORAK M, STANCU C. Thermal ageing of polypropylene film capacitors[C]// 2015 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Eger: IEEE, 2015: 272-276.
- [15] SCHNEUWLY A, GRONING P. Breakdown behavior of oil-impregnated polypropylene as dielectric in film capacitors[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 1998, 5(6): 862-868.
- [16] 冉鹤蔓. 基于等效电路模型的油纸绝缘设备受潮状态评估研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.  
RAN Liman. Research on the moisture evaluation of oil-paper-insulated equipment based on equivalent circuit model[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [17] 邢超, 赵军, 刘涛, 等. 基于容性设备接地电流的金属氧化物避雷器阻性电流现场检测方法[J]. 电瓷避雷器, 2022(1): 113-117.  
XING Chao, ZHAO Jun, LIU Tao, et al. On-site detection method for resistive current of metal-oxide surge arrester based on ground current of capacitive equipment[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(1): 113-117.
- [18] 吴旭涛, 周秀, 周童浩, 等. 基于电场耦合原理和差分输入结构的电压传感器设计与实验[J]. 高压电器, 2022, 58(4): 172-178, 188.  
WU Xutao, ZHOU Xiu, ZHOU Tonghao, et al. Design and experiment of voltage transformer based on electric field coupling principle and differential input structure[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(4): 172-178, 188.
- [19] 梁保松, 曹殿立. 模糊数学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [20] 欧阳翰, 吕林, 刘俊勇, 等. 考虑可再生能源不确定性的热电联供型微网随机鲁棒经济调度[J]. 电力建设, 2022, 43(1): 19-28.  
OUYANG Han, LV Lin, LIU Junyong, et al. Stochastic robust economic dispatch of combined heat and power microgrid considering renewable energy uncertainty[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(1): 19-28.
- [21] 陈向群, 杨茂涛, 刘谋海, 等. 基于模糊聚类分析的电能质量扰动模式识别方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(2): 79-85.  
CHEN Xiangqun, YANG Maotao, LIU Mouhai, et al. Disturbance pattern recognition method of power quality based on the fuzzy clustering analysis[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(2): 79-85.
- [22] 邬浩泽, 朱晨旭, 张贻山, 等. 一种基于改进模糊聚类算法的自适应典型日选取方法[J]. 智慧电力, 2022, 50(1): 60-67.  
WU Haoze, ZHU Chenxuan, ZHANG Yishan, et al. Adaptive method for selecting typical days based on improved fuzzy clustering algorithm[J]. Smart Power, 2022, 50(1): 60-67.
- [23] BEZDEK J. Fuzzy mathematics in pattern classification[D]. New York: Cornell University, 1973.
- [24] RAGHU K, JAMES K. A possibilistic approach to clustering[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1993, 1(2): 98-110.
- [25] PAL N, PAL K, JAMES K, et al. A possibilistic fuzzy c-means clustering algorithm[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2005, 13(4): 517-530.

作者简介:



王欢(1984—)女, 通信作者, 博士, 高级工程师, 主要从事互感器运维及测量方面的技术研究。  
Email: wanghuanwuhan@163.com

王忠东(1969—)男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事电能计量技术与管理、数字信号处理研究。Email: 2199231981@qq.com  
卢树峰(1972—)男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事电能计量、互感器校验技术研究。Email: 448111762@qq.com  
陆子刚(1984—)男, 博士, 高级工程师, 主要从事电力系统运行分析、电能计量研究。Email: njluzigang@163.com  
刘俭(1994—)男, 硕士, 工程师, 主要从事互感器误差测量技术研究。Email: 2411756356@qq.com

收稿日期: 2021-11-05; 修回日期: 2022-05-25  
(田春雨 编发)