

基于补偿修正粒子群的电流互感器在线校准方法

曲朝阳¹, 徐绮^{1*}, 曲楠², 曹杰¹, 徐晓宇¹, 董运昌³

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林省 吉林市 132012; 2. 国网江苏省电力有限公司南京供电分公司, 江苏省 南京市 210000; 3. 国网吉林省电力有限公司电力科学研究院, 吉林省 长春市 130000)

Online Calibration Method for Current Transformer Based on Compensated Modified Particle Swarms

QU Zhaoyang¹, XU Qi^{1*}, QU Nan², CAO Jie¹, XU Xiaoyu¹, DONG Yunchang³

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, Jilin Province, China;

2. Nanjing Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000, Jiangsu Province, China;

3. Power Science Research Institute of State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd., Changchun 130000, Jilin Province, China)

ABSTRACT: Aiming at the problem of large calculation error of current transformer online calibration caused by the unsynchronization of metering devices and the volatility of line loss current, this paper proposes a current transformer online calibration method based on compensation correction particle swarm. Firstly, a current transformer online calibration model based on the derivation of the error relationship is constructed, and the factors affecting the error calculation are considered from the dimensions of data, error relationship and solution to realize the online calibration of the current transformer; secondly, an adaptive sliding window preprocessing method for the average current data is proposed, and by introducing the relative rate of change of the current and the threshold of the sliding window, the average current of the smooth interval is calculated, and the problem of sudden change of current data is solved; then, the method of compensating correction particle swarm based on the online calibration of the current transformer is proposed. Next, an error relationship derivation method is given to account for the periodicity of the current, and on this basis, an error solving algorithm based on compensation correction particle swarm is designed to suppress the effect of loss current volatility on the error solving by using the particle swarm algorithm with constant compensation and remove the anomalies and center-of-mass-weighted correction of the error, so as to get the error results of the current transformer; finally, the validity of the model is verified by case analysis. Finally, the validity of the model is verified by case analysis.

KEY WORDS: current transformer; online calibration; adaptive sliding window; compensation correction; particle swarm algorithm

摘要: 针对计量装置不同步及线路损耗电流波动性导致电流互感器在线校准计算误差偏大的问题, 该文提出基于补偿修正粒子群的电流互感器在线校准方法。首先, 构建基于误差关系推导的电流互感器在线校准模型, 从数据、误差关系及求解等维度考虑影响误差计算的因素, 实现电流互感器在线校准; 其次, 提出自适应滑动窗口的平均电流数据预处理方法, 通过引入电流相对变化率及滑动窗口的阈值, 计算平稳区间的平均电流, 解决了电流数据的突变问题; 接着, 给出计及电流周期性的误差关系推导方法, 并在此基础上, 设计基于补偿修正粒子群的误差求解算法, 使用常数补偿的粒子群算法抑制损耗电流波动性对误差求解的影响, 并对误差进行异常点去除及质心加权修正, 得到电流互感器误差结果; 最后, 通过算例分析验证模型的有效性。

关键词: 电流互感器; 在线校准; 自适应滑动窗口; 补偿修正; 粒子群算法

0 引言

随着电力体制改革的不断深化, 厂网分开作为体制改革的重点, 电能计量装置的准确可靠和公平公正涉及经济利益和社会效益, 成为厂网等多方共同关注的问题^[1-2]。电流互感器作为变电站重要的辅助测量装置^[3], 其误差对电能计量装置的计量产生重要影响^[4-5]。目前电流互感器校准通常采用离线校准方法, 该方法将待测电流互感器与标准电流互感器串联到模拟实际运行的线路中, 通过互感器校验仪测量两者的电流大小, 计算得到待测电流互感器

基金项目: 国家自然科学基金项目(52377081)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52377081).

的误差^[6-8]。然而,电流互感器离线校准需要花费大量的人力物力,同时断电操作会对居民用电造成影响^[9-10],为此许多学者开展电流互感器在线校准方法研究^[11-12],期望在线路不停电的情况下,实现对电流互感器的误差测量。

电流互感器在线校准是指在电流互感器正常运行的状态下,通过与标准电流互感器数据对比或者基于历史电力数据计算待测电流互感器的误差。电流互感器在线校准方法分为3类:第1类是标准电流互感器对比法,该方法将开口式的标准电流互感器接入到线路上,并使用互感器校验仪测量待测电流互感器误差。文献[13]提出电流互感器校准方案,通过减小负载的方法提高钳形标准互感器的精度,其误差在0.2%内。第2类是基于外部环境的电流互感器误差预测。文献[14-17]考虑外部环境对于电流互感器误差的影响,通过计算外部环境因素与电流互感器误差的相关性,从而根据外部环境数据,实现对电流互感器误差的预测。文献[18]考虑到电流的波动性,通过构建期望信号及小波变换的维纳滤波器,去除数据的随机噪声,并构建数据中心点及不确定域的二维特征数据,通过快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)算法计算电流互感器比差和角差。第3类是基于数据驱动的电流互感器误差校准。文献[19-20]针对电流互感器误差之间的关联性,提出了基于数据驱动的误差预测方法,以基尔霍夫为理论核心,通过电流之间的关系推导出电流互感器误差之间的关系,从而得到电流互感器误差结果。

综上,已有的电流互感器在线校准研究大多使用标准电流互感器对比法,该方法对电流互感器的校准需要带电操作,存在一定的安全隐患,且仍需花费大量的人力物力。而基于外部环境的电流互感器误差预测主要考虑外部环境的影响,对于电流互感器长期运行导致的误差^[21-24]考虑相对较少,因此,电流互感器误差预测存在一定偏差。基于数据驱动的电流互感器在线校准主要存在以下问题:

1) 电能计量装置时钟不完全同步导致采集的电流数据不满足基尔霍夫电流定律; 2) 交流电电流大小随时间呈周期性变化,电能计量装置采集的电流数据为有效值而非瞬时值,无法直接使用有效值进行电流互感器误差关系构建; 3) 误差关系求解受电流数据及损耗电流波动性影响,存在较大计算误差。

为解决上述问题,本文提出基于补偿修正粒子群的电流互感器在线校准方法。通过构建基于误差

关系推导的电流互感器在线校准模型,从数据、误差关系及求解等维度出发,针对影响电流互感器误差计算的主要因素,对数据预处理、误差关系推导及误差求解算法进行改进。在数据预处理上,针对电流突变导致相位角发生较大变化的问题,提出自适应滑动窗口的平均电流数据预处理方法,为误差求解提供平稳数据;在误差关系上,以基尔霍夫电流定律(kirchhoff's current law, KCL)及变电站接线图为基础,考虑电流互感器因误差导致的二次侧测量数据与一次侧实际数据之间的关系问题,推导电流互感器误差之间的关系;在误差求解上,采用基于补偿修正粒子群的误差求解算法,通过忽略局部误差对误差关系中的常数项进行补偿,进而抑制损耗电流对误差计算的影响,从而完成电流互感器误差校准。

1 基于误差关系推导的电流互感器在线校准模型

基于数据驱动的电流互感器误差在线校准方法主要依据基尔霍夫电流定律进行误差求解,存在电流数据不同步和损耗电流波动性导致的计算不准确问题。为此,本文从数据、误差关系、求解修正等维度出发,设计基于关系推导及求解修正的电流互感器在线校准模型,模型包含3个部分:电流数据预处理、误差关系推导、误差求解修正。模型结构如图1所示,首先,将电力数据进行电流数据预处理,得到线路电流整体平稳时段及每条线路电流平稳时段的平均电流数据;随后,依据变电站接线图,综合考虑误差的电流互感器传输方程和交流电的周期性变化及相角关系,进行电流互感器误差关系推导;最后,根据平均电流数据及误差关系,在粒子群算法的基础上,通过常数补偿抑制损耗电流波动性对于模型求解的影响,并对求解结果进行异常点去除及质心加权来修正求解的结果,最终得到各线路电流互感器误差。

2 自适应滑动窗口的平均电流数据预处理方法

由于电能计量装置采集时钟不完全同步^[25-26],将该电流作为实验数据不满足基尔霍夫电流定律,进而影响电流互感器误差的求解。为此,首先通过引入滑动窗口的电流变化率及阈值,根据阈值自适应调整窗口大小,得到电流时刻数据的平稳时段;然后,根据电流的平稳时段,构建对应的电流平稳

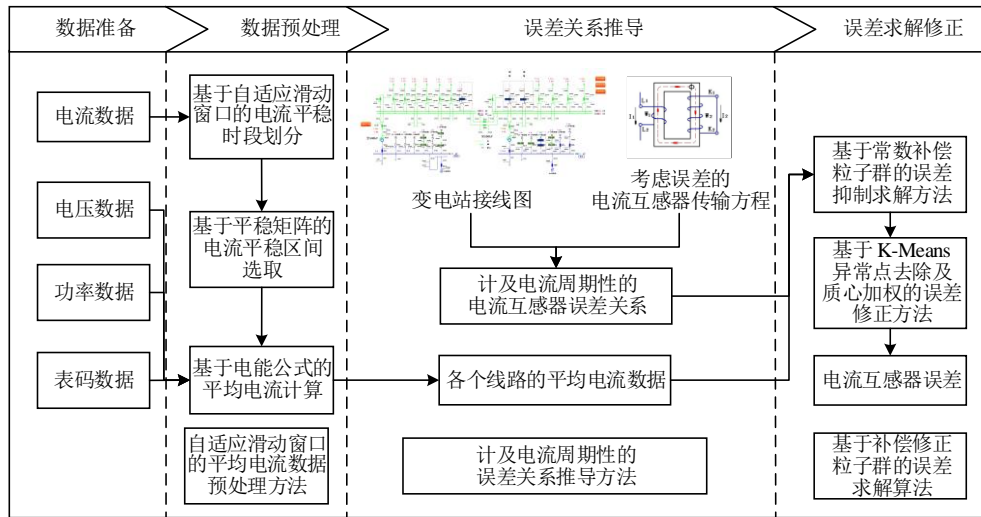


图 1 基于误差关系推导的电流互感器在线校准模型结构

Fig. 1 Structure of online calibration model for current transformer based on error relation derivation

矩阵，并对其进行统计，得到电流的整体平稳区间；最后，根据表码数据及电能公式，得到平稳区间的平均电流。

2.1 基于自适应滑动窗口的电流平稳时段划分

传统的滑动窗口方法通过定义固定大小的窗口，逐步移动窗口遍历整个序列，并对每个窗口数据计算统计量，得到数据的局部特征^[27]。使用传统的滑动窗口对电流平稳时段划分时，由于窗口大小的固定，导致对电流数据统计的灵活性不足。为此，本文根据历史电流数据的波动性，定义电流数据的相对变化率，并设定窗口大小的阈值，通过对比电流数据变化率及阈值，自适应调整窗口大小以提高数据统计的灵活性，从而实现电流最大平稳时段的划分。具体流程图如图 2 所示。

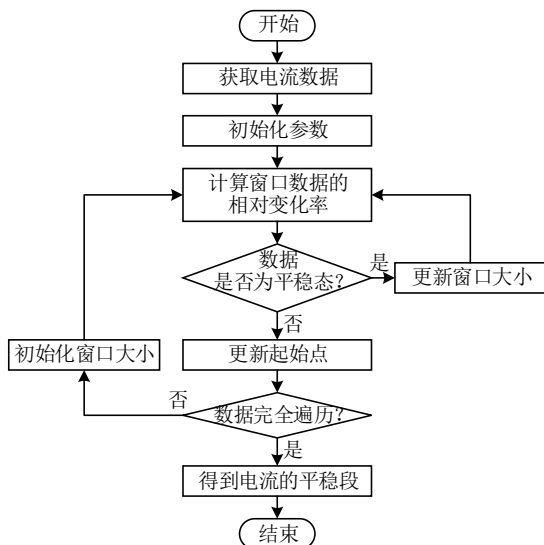


图 2 基于自适应滑动窗口的平稳时段划分流程图

Fig. 2 Flowchart of smooth time period segmentation based on adaptive sliding window

基于自适应滑动窗口的平稳时段划分的具体步骤如下：

1) 步骤 1。根据一天的电流数据 $I = \{I_0, I_1, \dots, I_{95}\}$ ，初始化起始点 t 、窗口大小 w 、步长 s 及相对变化率阈值 T 。其中以 0 时刻作为起始点，电流采集装置的最小采样时间间隔为 15 min，将其作为窗口大小及步长，相对变化率阈值为默认值。

2) 步骤 2。计算 t 时刻窗口大小为 w 的电流数据极差比率 R_t 及相对变化率 S_t ，可表示为：

$$R_t = \frac{\max_{t \leq i \leq t+w} I_i - \min_{t \leq i \leq t+w} I_i}{\max_{t \leq i \leq t+w} I_i} \quad (1)$$

$$S_t = \frac{I_{t+w} - I_{t+w-s}}{I_{t+w-s}} \quad (2)$$

式中 $\max I_i$ 、 $\min I_i$ 分别为 t 时刻窗口大小为 w 中电流数据的最大值和最小值。

3) 步骤 3。根据窗口数据相对变化率及阈值，判断窗口电流数据是否处于稳定态，电流数据状态判别式 $\text{judge}(R_t)$ 如式(3)所示。若处于平稳态，说明当前平稳时段不是 t 时刻的最大平稳时段，则对窗口大小进行更新，更新后的窗口大小 $w' = w + s$ ，并转至步骤 2)；若处于非平稳态，说明窗口终止点的电流数据不满足平稳态要求，则转至步骤 4)。

$$\text{judge}(R_t, S_t) = \begin{cases} \text{平稳态}, & \max(R_t, S_t) \leq T \\ \text{非平稳态}, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

4) 步骤 4。更新滑动窗口的起始点 $t' = t + s$ ，并得到 t 时刻电流数据的最大平稳时段区间为 $[t, t + w' - s]$ 。

5) 步骤 5。判断是否完成对所有时刻的最大平

稳时段划分,若没完成全时段的划分,则初始化滑动窗口大小,并转至步骤2);若完成全时段的划分,则算法结束,得到所有时刻的最大平稳时段区间。

2.2 基于平稳矩阵的电流平稳区间选取

针对不同日期、不同线路的电流数据平稳时段存在差异性,为确保选取的平稳区间尽可能多的线路处于平稳态,根据自适应滑动窗口划分的电流平稳时段区间,建立日电流平稳矩阵 $M_{d,x}(i,j)$, $M_{d,x}(i,j)$ 为 96×96 的二维矩阵,用于表示日电流数据每个时刻所对应的电流平稳时段区间。将日电流平稳矩阵 $M_{d,x}(i,j)$ 表示为

$$M_{d,x}(i,j) = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & m_{i,j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:主对角线为电流时刻数据的起始点,默认该点为平稳态; d 为电流数据的日期; x 为线路的编号; $m_{i,j}$ 为电流数据的平稳状态,其判别式可表示为

$$m_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{处于平稳段} \\ 0, & \text{处于非平稳段} \end{cases} \quad (5)$$

式中: i 为电流数据的起始时刻; j 为电流数据的下一时刻;当 j 处于以 i 为起始时刻的平稳时段区间内时,则 $m_{i,j}$ 为 1,否则值为 0。

根据日电流平稳矩阵,通过累加得到整体电流平稳矩阵 M ,整体电流平稳矩阵 M 计算公式为

$$M = \sum M_{d,x}(i,j) \quad (6)$$

根据整体平稳矩阵 M ,通过计算整体平稳矩阵主对角线上每列数据的总和 $\text{sum}(j)$,并选择 $\text{sum}(j)$ 的递增区间,该递增区间即为整体电流数据的平稳时段区间。 $\text{sum}(j)$ 可表示为

$$\text{sum}(j) = \sum_{i=0, i \leq j}^n M[i][j] \quad (7)$$

2.3 基于电能公式的平均电流计算

根据选择的电流平稳区间,计算平稳区间的平均电流有效值。电能计量装置从 i 时刻到 j 时刻内的电能 $W_{i,j}$,可表示为

$$W_{i,j} = \int_{t=i}^j P_t dt \quad (8)$$

式中 P_t 为 t 时刻的瞬时有功功率,可表示为

$$P_t = U_t I_t \cos \varphi \quad (9)$$

式中: I_t 为 t 时刻电流的瞬时值; U_t 为 t 时刻电压的瞬时值; $\cos \varphi$ 为功率因数得到, φ 为电流和电压的

相位差,可表示为

$$\varphi = \varphi_U - \varphi_I \quad (10)$$

式中: φ_U 为电压的相位角; φ_I 为电流的相位角。在电力系统稳态运行条件下,电压与电流为同频率正弦量(频率 50 Hz),因此二者的相位差为常数。

在变电站 220 kV 线路中电压保持相对稳定,因此采用算术平均值计算从 i 时刻到 j 时刻的平均电压有效值 $\bar{U}_{i,j}$,可表示为

$$\bar{U}_{i,j} = \frac{1}{j-i} \sum_{t=i}^j U_t \quad (11)$$

因此,通过式(8)—(11)可以推出从 i 时刻到 j 时刻平稳时段区间的平均电流有效值 $\bar{I}_{i,j}$,可表示为

$$\bar{I}_{i,j} = \frac{W_{i,j}}{\bar{U}_{i,j} t_{i,j} \cos \varphi} \quad (12)$$

3 计及电流周期性的误差关系推导方法

针对交流电瞬时电流大小呈周期性变化,电能计量装置采集的电流数据为有效值,而非瞬时值,电流的有效值不满足基尔霍夫电流定律,无法直接使用有效值进行电流互感器误差关系构建。为此,本文基于变电站的接线图及基尔霍夫电流定律,将所有与母线相接的线路视作一个闭合面,并考虑电流周期性、损耗电流及误差对电流互感器输出信号的影响,推导计及电流周期性的电流互感器误差关系。

基尔霍夫电流定律是指在任一瞬间时,流入某一结点的电流之和应该等于由该节点流出的电流之和,其电流关系可表示为

$$\sum_{n=1}^N I_n = 0 \quad (13)$$

式中 I_n 为节点的第 n 条线路的瞬时电流,用数值的正负表示当前的电流方向,正值表示线路电流为流入状态,负值表示线路电流为流出状态。

将 220 kV 线路整体看作一个闭合面,进而构建 220 kV 的线路电流关系模型,可表示为

$$\sum_{n=1}^N I_n + I_{\text{损}} = 0 \quad (14)$$

式中 $I_{\text{损}}$ 为电流在线路中受站内设备及对地杂散电容导致的电流损耗。

交流电呈正弦波形态,其大小及方向随时间变换,电流 $I(t)$ 可表示为

$$I(t) = I_{\text{max}} \sin(2\pi ft + \varphi) \quad (15)$$

式中： $I(t)$ 为在 t 时刻时的电流，正负表示电流的流入流出状态； I_{\max} 为电流幅值； f 为交流电的频率； φ 为电流的相位角，表示电流波形相对时间轴的偏移。

由于变电站线路为大电流、大电压，计量采集装置无法直接接入一次侧，因此通过电流互感器、电压互感器将大电流大电压转化为小电流小电压，通过测量二次侧数据，从而推算一次侧线路实际的电力数据。在不考虑误差的情况下，一次侧电流 I_n 可表示为

$$I_n = i_n N_n \quad (16)$$

式中： i_n 为第 n 条线路上电流互感器二次侧的瞬时电流； N_n 为第 n 条线路上电流互感器的变比。

实际的电流互感器受制造工艺、结构特性及长期使用等原因，其存在一定误差，电流互感器相对误差 ε_n 由2部分组成，包括比差和角差，比差为实际二次侧电流与理想二次侧电流之间幅值的相对误差，角差为实际二次侧电流与理想二次侧电流之间相位的差距。因此，在考虑电流互感器误差的情况下，一次侧电流可表示为

$$I_n(t) = \frac{I_{\max} \sin(2\pi ft + \varphi + \varphi_{\varepsilon_n}) \cdot N_n}{1 + N_{\varepsilon_n}} \quad (17)$$

式中： φ_{ε_n} 为第 n 条线路上电流互感器的角差； N_{ε_n} 为第 n 条线路上电流互感器的比差。

采用角差和比差建立电流互感器误差关系，其求解易受电流数据影响，因此将电流互感器误差看作一个整体，其整体误差 ε_n 可表示为

$$\varepsilon_n = \frac{i_n N_n - I_n}{I_n} \quad (18)$$

电流互感器相对误差受角差影响，呈周期性变化，因此在交流电的一个周期内，电流互感器平均整体误差 $\bar{\varepsilon}_n$ 可表示为

$$\bar{\varepsilon}_n = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{i_n N_n - I_n}{I_n} dt \quad (19)$$

为更好地反映交流地电流及电压数据，计量装置采集的电流及电压数据通常为有效值，而非瞬时值，因为交流电呈正弦波动，所以电流有效值 i_{eff_n} 与电流幅值 I_{\max} 之间的关系可表示为

$$I_{\max} = \sqrt{2} i_{\text{eff}_n} \quad (20)$$

根据式(16)—(20)，在考虑电流互感器误差及计量装置测量值为二次侧电流有效值的情况下，在 t

时刻一次侧电流大小 I_n 与二次侧电流有效值 i_{eff_n} 的关系式如下：

$$I_n = \frac{\sqrt{2} i_{\text{eff}_n} \sin(100\pi t + \varphi_n) \cdot N_n}{1 + \bar{\varepsilon}_n} \quad (21)$$

将220 kV线路的电流关系模型与考虑误差的电流互感器传输方程结合，得到计及电流周期性的电流互感器误差关系模型表达式如下：

$$\sum_{n=1}^{12} \frac{\sqrt{2} i_{\text{eff}_n} \sin(100\pi t + \varphi_n) \cdot N_n}{1 + \bar{\varepsilon}_n} + I_{\text{损}} = 0 \quad (22)$$

4 基于补偿修正粒子群的误差求解算法

电流数据及损耗电流的波动性是导致误差求解不准确的主要原因，为此本文所提基于补偿修正粒子群的误差求解修正算法，通过忽略局部误差，对损耗电流进行常数补偿，以抑制损耗电流对误差求解的影响，并在K-Means算法的基础上添加异常点去除模块，以避免异常数据对聚类中心造成的偏差，最后通过聚类中心的加权计算得到电流互感器误差。

4.1 基于常数补偿粒子群的误差抑制求解方法

由于损耗电流过小，且无法对其进行实际测量，因此在建模时将其视为定值。但电流互感器误差关系模型求解受损耗电流波动性影响，存在电流互感器误差被放大的问题。为此提出基于常数补偿粒子群的误差抑制求解方法，在粒子群算法的基础上，通过忽略局部误差，进行常数补偿，以降低损耗电流波动性对误差求解的影响，从而提高电流互感器误差求解的准确性。具体流程图如图3所示。

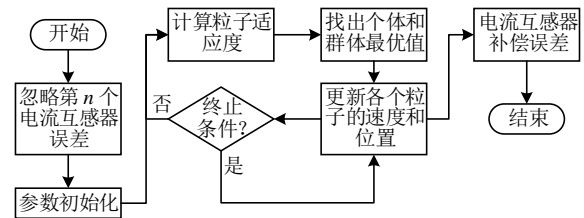


图3 基于常数补偿粒子群的误差抑制求解方法流程图

Fig. 3 Flowchart of error suppression solution method based on constant compensation particle swarms

基于常数补偿粒子群的误差抑制求解方法具体流程图如下。

1) 步骤1。根据电流互感器误差关系模型，假设某个电流互感器误差为0，因此得到除该电流互感器以外的其他电流互感器误差关系模型，误差关

系模型可表示为

$$\sqrt{2}i_{\text{eff}_i} \sin(100\pi t + \phi_i) \cdot N_i + \sum_{n=1, n \neq i}^N \frac{\sqrt{2}i_{\text{eff}_n} \sin(100\pi t + \phi_n) \cdot N_n}{1 + \varepsilon_n} + I_{\text{损}} = 0 \quad (23)$$

通过忽略第 i 个电流互感器误差, 得到的误差关系模型。根据忽略电流互感器误差的不同, 将误差关系模型运行在不同的节点下, 以提高计算效率。

2) 步骤 2。在初始化粒子群参数时, 采用随机生成的方式确保粒子的随机性, 针对电流互感器误差范围小的特点, 初始位置及速度随机范围设定在 3% 以内, 并要求搜索空间范围在 10% 以内, 以尽可能符合实际情况, 减少随机范围过大导致的求解时间, 提高电流互感器误差求解精度。

3) 步骤 3。根据电流互感器误差关系模型, 提供多组电流有效值数据, 计算粒子的适应度。

4) 步骤 4。根据粒子适应度, 找出个体和群体最优解, 并判断当前位置的适应度是否优于原来的个体最佳位置, 并对个体最佳位置及全局最佳位置进行更新。

5) 步骤 5。根据当前速度、个体最佳位置及全局最佳位置, 更新各个粒子的速度和位置, 使粒子向适应度更优的方向移动, 速度关系和位置关系更新公式可表示为:

$$v_i^{k+1} = wv_i^k + c_1r_1(p_i - x_i^k) + c_2r_2(g_{\text{best}} - x_i^k) \quad (24)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (25)$$

式中: v_i^{k+1} 为粒子 i 在 $k+1$ 次迭代后的粒子速; w 为惯性权重, 用于控制粒子运动的惯性, 其默认值一般在 $[0.4, 0.9]$, 用于平衡全局搜索和局部搜索; c_1 、 c_2 为学习因子, 用于控制个体经验和群体协同的影响; k 为更新次数; p_i 为粒子 i 个体的最优位置; g_{best} 为整个粒子群的全局最优位置; x_i^k 为粒子 i 在第 k 次更新时的位置。

6) 步骤 6。判断迭代次数是否满足最大迭代次数。若不满足终止条件, 则转至步骤 3), 若满足终止条件, 则得到忽略某电流互感器误差时, 其他电流互感器补偿后的误差。

4.2 基于 K-Means 异常点去除及质心加权的误差修正方法

粒子群算法^[28]在使用不同数据进行误差求解时, 存在解集陷入局部最优的问题。为此, 提出基

于 K-Means 异常点去除及质心加权的误差修正方法, 该方法在 K-Means 算法^[29]的基础上, 添加异常点去除模块, 以减低异常点对聚类中心的影响, 同时根据常数补偿的差异性, 对聚类中心进行加权计算, 得到电流互感器误差结果, 从而完成电流互感器误差在线校准。基于异常点去除及质心加权的求解误差修正方法, 具体流程图如图 4 所示。

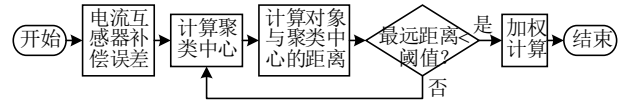


图 4 基于 K-Means 异常点去除及质心加权的误差修正方法

Fig. 4 Error correction method based on K-Means anomaly removal and center of mass weighting

1) 步骤 1。根据补偿常数及电流互感器的不同, 对求解的误差数据进行分类, 得到电流互感器补偿后的误差数据。

2) 步骤 2。根据电流互感器补偿后的误差, 计算补偿后误差的聚类中心 c , 可表示为

$$c = \frac{1}{|C|} \sum_{x_i \in C} x_i \quad (26)$$

式中: C 为所有电流互感器的补偿误差数据点; c 为 C 的聚类中心; x_i 为补偿误差的数据点; $|C|$ 为 C 中数据点的数量。

3) 步骤 3。计算电流互感器补偿误差数据点 x_i 及聚类中心 C 之间的距离 $d(x_i, c)$, 可表示为

$$d(x_i, c) = \sqrt{(x_i - c)^2} \quad (27)$$

4) 步骤 4。根据电流互感器误差设定距离阈值, 将数据点到聚类中心的距离进行排序, 选择数据点到聚类中心的最大值, 比较距离阈值与距离最大值的大小, 若距离最大值大于阈值, 说明该数据对为异常点, 将异常点从聚类数据点中去除, 并转至步骤 2); 若聚类最大值小于阈值, 则说明数据符合要求, 得到不同常数补偿的情况下, 电流互感器的误差数据。

5) 步骤 5。由于粒子群算法导致陷入局部最优的问题, 为此根据聚类结果进行加权计算, 得到电流互感器互感器的计算误差, 电流互感器误差加权可表示为

$$\varepsilon'_n = - \sum_{n=1}^N w_{i,n} \varepsilon_{i,n} \quad (28)$$

式中： ε'_n 为第 n 个电流互感器的误差结果； $\varepsilon_{i,n}$ 为在忽略第 n 个电流互感器误差情况下，常数补偿及异常去除后计算的第 i 个电流互感器误差； $w_{i,n}$ 为在忽略第 n 个电流互感器误差情况下，第 i 个电流互感器误差权重，可表示为

$$w_{i,n} = \frac{i_i N_i}{i_n N_n} \quad (29)$$

式中： i_i 为第 i 个电流互感器二次侧电流； N_i 为第 i 个电流互感器变比。

5 实验

5.1 数据集的构建

数据来源于某省电力公司变电站二次侧计量装置采集的电力数据。电力数据包含 1 年 220kV 变电站的电力数据及变电站对应的接线图。电力数据类型、说明及精度等如表 1 所示。

表 1 电力数据及类型
Table 1 Electricity data and types

数据类型	说明	精度
电流	数据采集间隔 15 min/次， 分别是 A、B、C 相电流	3 位小数
电压	数据采集间隔 15 min/次， 分别是 A、B、C 相电压	一位小数
表码	数据采集间隔 15 min/次， 正向有功总电量、反向有功总电量	两位小数
功率	数据采集间隔 15 min/次， 有功功率、无功功率	4 位小数
功率因数	数据采集间隔 15 min/次， 分别是 A、B、C 相	一位小数
电流互感器变比	固定	整数
电压互感器变比	固定	整数

基于数据驱动的电流互感器误差校准效果受电流波动性的影响，将线路电流数据按天划分成固定大小的处理单位，对其采用基于自适应滑动窗口方法进行电流平稳时段划分，根据不同起始时刻和电流波动，划分成不同长度的平稳时段。电流波动性与平稳区间长度关系如图 5 所示。

根据自适应滑动窗口划分的平稳时段长度转换为电流平稳矩阵，电流平稳状态热力图如图 6 所示，深色区域表示电流的平稳区间。

对一年所有线路的平稳矩阵进行累加，得到电流整体平稳矩阵，电流整体平稳状态热力图如图 7 所示，图中区域颜色越深表明在 1 年所有线路的电

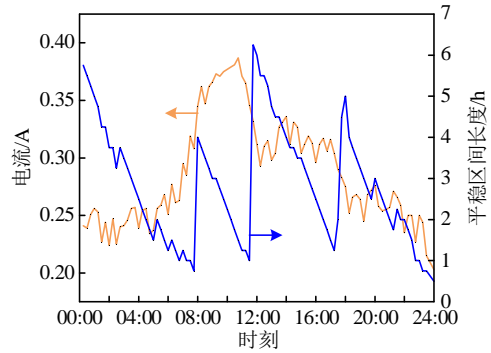


图 5 电流波动性与平稳区间长度关系

Fig. 5 Current volatility versus smooth interval length

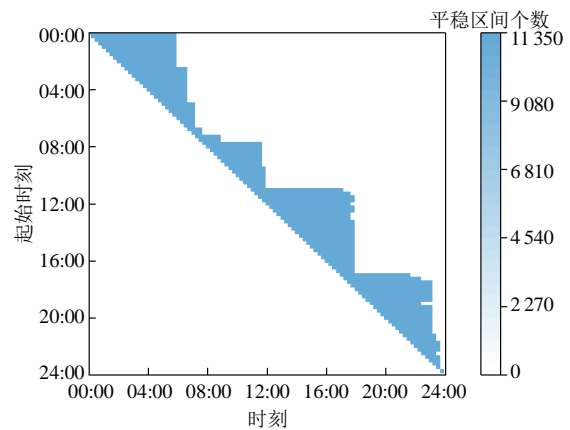


图 6 电流平稳状态热力图

Fig. 6 Current steady state thermogram

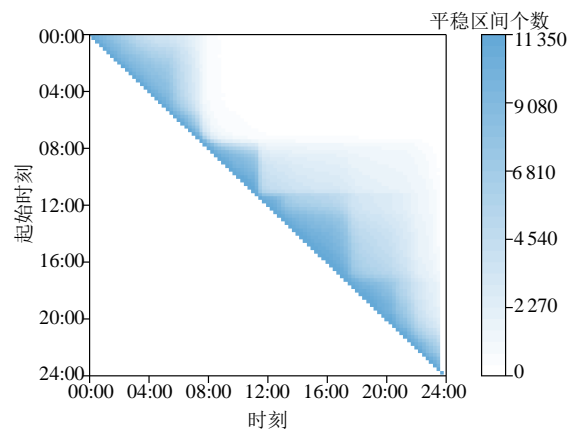


图 7 电流整体平稳状态热力图

Fig. 7 Thermogram of the overall smooth state of the current

流在该时段越平稳。

最后，计算电流整体平稳矩阵不同时刻的平稳区间个数，电流整体平稳个数折线图如图 8 所示，当平稳个数递增时，表示电流处于平稳区间，通过折线图可知电流在 00:00—05:15、08:15—11:15、11:45—17:00 和 17:45—20:15 电流相对稳定。并根据表码数据求解平稳区间的平均电流。

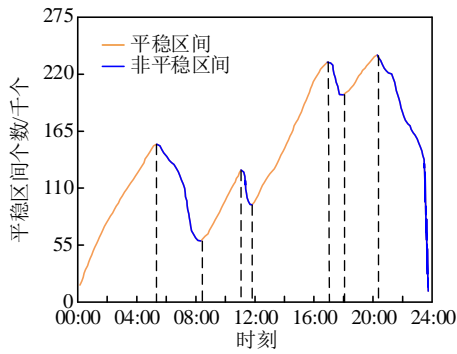


图 8 电流整体平稳个数折线图

Fig. 8 Line graph of the number of overall current smoothing

5.2 训练参数设置

实验设置粒子群的粒子数为 120, 随机初始化位置区间 $[-0.3, 0.3]$, 惯性权重为 0.4, 随机初始化速度区 $[-0.03, 0.03]$, 学习因子分别为 2 和 0.1。

在对比实验中, 随机初始化解的范围区间在 $[-0.3, 0.3]$ 。蚁群算法的蚁群数量为 200, 信息素强度为 1, 信息素挥发系数为 0.5, 启发因子权重和期望因子权重分别为 1 和 2。退火算法的初始温度为 50, 降温系数为 0.85, 最小温度为 0.02。遗传算法的种群规模 200, 交叉率 0.7, 突变率 0.1。

实验平台为一台 CPU 为 5600X 的 Windows11 电脑上运行, 使用 Python 平台。

5.3 模型性能分析

为对在线校准模型进行定量分析, 本文采用平均绝对误差来评价模型的性能, 平均绝对误差值越大, 说明模型计算的电流互感器误差结果与实际的误差偏差越大, 模型越不准确。

采用基于补偿修正粒子群的误差求解算法对电流互感器误差关系进行求解, 电流互感器误差与计算结果柱形图如图 9 所示。由图可知, 基于混合粒子群的电流互感器在线校准方法计算的电流互感器绝对误差最大值在 0.3% 内。

求解算法在训练过程中的平均绝对误差曲线如图 10 所示, 实验结果表明, 改进后的求解算法计算的电流互感器平均绝对误差随迭代次数稳定下降。在前 20 次迭代中, 求解算法计算的电流互感器平均绝对误差迅速减小, 这是因为粒子群算法在进行全局最优解搜索。在第 20—40 次迭代过程中, 求解算法的电流互感器平均绝对误差下降速度逐渐减低, 但仍有小幅度的下降, 在 40 次迭代以后, 电流互感器平均绝对误差基本保持不变, 模型计算的平均绝对误差收敛于 0.3%。

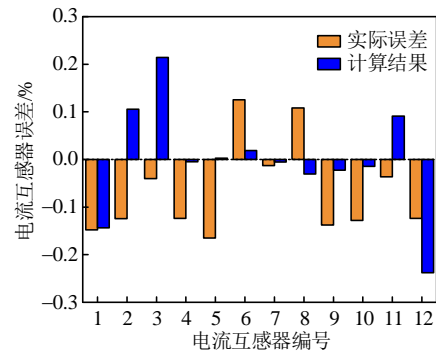


图 9 电流互感器误差与计算结果柱状图

Fig. 9 Current transformer errors and calculated results bar chart

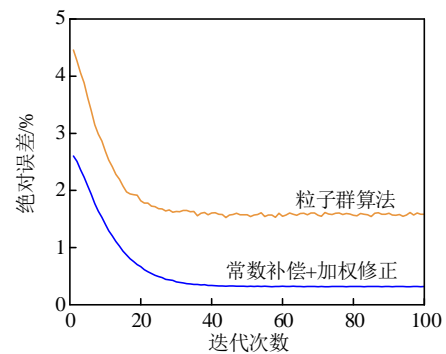


图 10 电流互感器平均绝对误差曲线

Fig. 10 Average absolute error curve of current transformer

5.4 消融实验

为评估各部分模块的有效性, 分析不同模块对于模型做出的贡献, 本文对比在粒子群的基础上, 分别添加各部分模块, 分别对比电流互感器平均绝对误差, 平均绝对误差越小说明模型计算越准确。消融实验如图 11 和表 2 所示。可以看出, 添加常数补偿模块的粒子群算法在前 15 次迭代中, 其平稳绝对误差小于粒子群算法, 但由于忽略部分误差, 导致其平均绝对误差大于粒子群算法。添加加权修正模块的粒子群算法, 其平均绝对误差相较于粒子群算法有所降低, 但效果不明显。而添加有常数补偿及加权修正的粒子群算法, 其误差明显降低, 从侧面说明常数补偿模型能够有效减低计算时误差的波动性。

为探究常数补偿及加权修正对计算结果造成的影响, 对粒子群算法、粒子群算法及加权修正算法和常数补偿及加权修正算法的实验计算结果分布进行统计, 粒子群算法及加权修正算法计算结果分布如图 12 所示。可以看出, 粒子群算法后进行加权修正后的计算结果没有太大变化, 这说明粒子

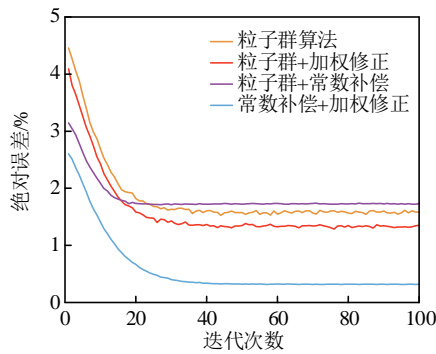


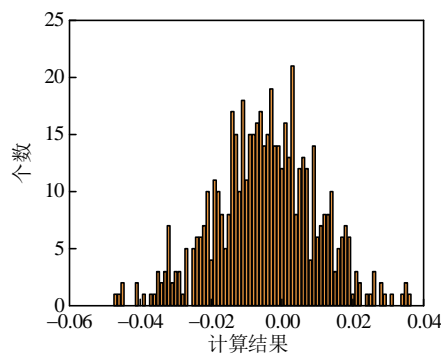
图 11 消融实验

Fig. 11 Ablation experiment

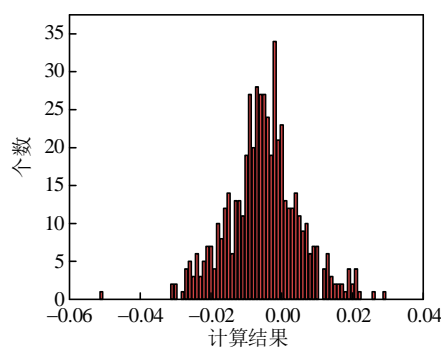
表 2 消融实验

Table 2 Ablation experiment

粒子群	常数补偿	聚类加权	平均绝对误差/%
√			1.583
√	√		1.730
√		√	1.352
√	√	√	0.318



(a) 粒子群算法



(b) 粒子群+加权修正

图 12 粒子群算法及加权修正算法计算结果分布

Fig. 12 Particle swarm algorithm and weighted correction algorithm calculation result distribution

群算法其计算结果的误差波动性较强，粒子群算法受损耗电流波动性较强。

常数补偿及加权修正算法计算结果如图 13 所示。可以看出，基于常数补偿的粒子群算法能够有

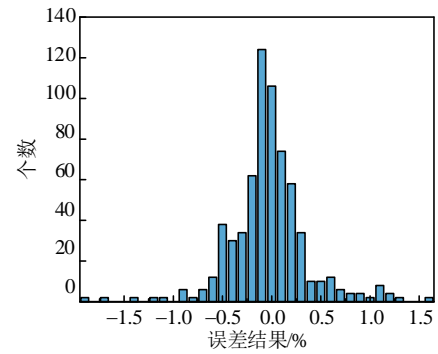


图 13 常数补偿及加权修正算法计算结果分布

Fig. 13 Distribution of results calculated by constant compensation and weighted correction algorithm

效降低损耗电流波动性带来的影响，采用加权修正即可得到相对准确的计算结果。

5.5 对比实验

为分析本文所提模型的优势，选择主流的 4 种求解算法进行对比，在同一电流数据集和电流互感器误差关系下，求解电流互感器误差。不同算法的绝对误差如图 14 所示，可以看出，本文所提模型计算的电流互感器绝对误差最小，能够有效地计算电流互感器误差，且偏差在 0.3% 内。

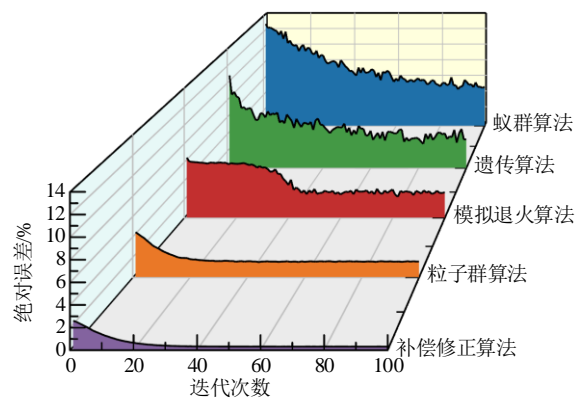


图 14 对比实验

Fig. 14 Comparison experiment

6 结论

本文提出一种新的电流互感器误差在线校准模型，通过实际电流数据进行分析验证，得出结论如下：

1) 基于误差关系推导的电流互感器在线校准模型从数据预处理、关系推导及误差求解等维度进行改进，有效地降低了电流及其损耗波动性对电流互感器误差计算结果的影响。

2) 自适应滑动窗口的平均电流数据预处理方法通过设置相对变化率和阈值，计算平稳区间的平

均电流, 在整体平稳区间划分及个数选择方面均优于固定大小的滑动窗口算法, 可有效避免电流数据的波动性问题。

3) 计及电流周期性的误差关系推导方法可在220 kV线路上实现电流互感器误差关系的推导, 为电流互感器误差在线求解提供理论依据。

4) 基于补偿修正粒子群的误差求解算法在实际的电流数据集上具有较高的计算精度, 算法受损耗电流波动性影响不大, 不需要精细计算损耗电流大小即可完成电流互感器误差校准。

综上, 本文所提模型在误差在线校准的精度上存在一定优势, 适用于220 kV变电站线路中对电流互感器的在线校准, 并在未来的研究中, 将考虑更多影响计算精度的因素, 设计出更加准确的电流互感器在线校准方法。

参考文献

- [1] 李安香, 沈庆飞, 周鑫, 等. 基于能源计量提高数据中心PUE准确性的方法[J]. 计量科学与技术, 2021, 65(9): 44-47.
LI Anxiang, SHEN Qingfei, ZHOU Xin, et al. A method to improve the accuracy of data center PUE based on energy measurement[J]. Metrology Science and Technology, 2021, 65(9): 44-47(in Chinese).
- [2] QI Ruobin, ZHENG Jun, LUO Zhirui, et al. A novel unsupervised data-driven method for electricity theft detection in AMI using observer meters[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 2513010.
- [3] 程养春, 刘向东, 问耀文, 等. 变压器绕组频响电流信号带电检测中工频电流干扰抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(10): 4090-4100.
CHENG Yangchun, LIU Xiangdong, WEN Yaowen, et al. Method to suppress power frequency current interference in on-line detection of frequency response current signal in transformer windings[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(10): 4090-4100(in Chinese).
- [4] 胡应宏, 沈禹辰, 尹光祖, 等. 计及电磁式电流互感器测量环节高频特性的柔性直流输电孤岛空载建模与谐振机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(18): 7136-7148.
HU Yinghong, SHEN Yuchen, YIN Guangzu, et al. Modeling and resonance mechanism analysis of MMC-HVDC under unload condition considering the high frequency characteristics of electromagnetic current transformer measurement link[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(18): 7136-7148(in Chinese).
- [5] 亓臻康, 王浩宗, 董新洲, 等. 不依赖GNSS的输电线路双端行波故障测距[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(10): 3766-3776.
QI Zhenkang, WANG Haozong, DONG Xinzhou, et al. A GNSS-independent two-terminal traveling wave fault location scheme for transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(10): 3766-3776(in Chinese).
- [6] MEISEL J. Current instrument transformer error calculations[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1963, 82(69): 1082-1085.
- [7] 骆晓清, 孟庆亮. 电子式互感器校准方法和校准系统研究[J]. 广西电力, 2019, 42(1): 15-19.
LUO Xiaoqing, MENG Qingliang. Study on a calibration method and system for electronic transformers[J]. Guangxi Electric Power, 2019, 42(1): 15-19(in Chinese).
- [8] 王毓琦, 李红斌, 向鑫, 等. 电力互感器检定与评估方法综述[J]. 高压电器, 2020, 56(4): 95-101, 107.
WANG Yuqi, LI Hongbin, XIANG Xin, et al. Review of verification and evaluation methods of power transformers[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4): 95-101, 107(in Chinese).
- [9] 陈海滨, 杨姝楠, 陈丽雯, 等. 基于现场信号仿真技术的电流互感器误差测试技术研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(2): 133-138.
CHEN Haibin, YANG Shunan, CHEN Liwen, et al. Research on current transformer error testing technology based on field signal simulation technology[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(2): 133-138(in Chinese).
- [10] KACZMAREK M, STANO E. Challenges of accurate measurement of distorted current and voltage in the power grid by conventional instrument transformers[J]. Energies, 2023, 16(6): 2648.
- [11] KUN W, HU L, HUAN L, et al. Error model and forecasting method for electronic current transformers based on LSTM[J]. Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette, 2023, 30(2): 399-407.
- [12] BALLAL M S, WATH M G, SURYAWANSHI H M. Measurement current transformer error compensation by ANN methodology[J]. Journal of The Institution of Engineers (India): Series B, 2020, 101(3): 261-271.
- [13] VOLOVICH G I, KIRPICHNIKOVA I M, TOPOLSKIY D V. Experimental operation of the adaptive electronic instrument transformer of current and voltage[C]//2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). St. Petersburg: IEEE, 2017: 1-5.
- [14] 裴婷婷. 电子式电流互感器的误差及在线试验分析[J]. 机械工程与自动化, 2023(3): 132-134.
PEI Tingting. Error and on-line test analysis of electronic current transformer[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2023(3): 132-134(in Chinese).

- [15] 李振华, 陈兴新, 蒋伟辉, 等. 基于弹性网络的空心线圈电流互感器误差预测[J]. 高压电器, 2022, 58(9): 134-141.
LI Zhenhua, CHEN Xingxin, JIANG Weihui, et al. Error prediction of air-core-coil current transformer based on elastic network[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 134-141(in Chinese).
- [16] 李振华, 郑严钢, 李振兴, 等. 基于传递熵和小波神经网络的电子式电压互感器误差预测[J]. 电测与仪表, 2021, 58(3): 146-152.
LI Zhenhua, ZHENG Yangang, LI Zhenxing, et al. Error prediction of electronic voltage transformer based on transfer entropy and wavelet neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(3): 146-152(in Chinese).
- [17] 杨信强, 李振华, 钟悦, 等. 基于变分模态分解和 CNN-GRU-ED 的超短期互感器误差预测[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(12): 68-77.
YANG Xinqiang, LI Zhenhua, ZHONG Yue, et al. Ultra-short term transformer error forecast based on variational mode decomposition and CNN-GRU-ED[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(12): 68-77(in Chinese).
- [18] 陈刚, 李志新, 徐敏锐, 等. 考虑电力系统随机噪声的电流互感器在线校验方法[J]. 自动化与仪器仪表, 2023(8): 329-332.
CHEN Gang, LI Zhixin, XU Minrui, et al. On-line calibration method of current transformer considering random noise in power system[J]. Automation & Instrumentation, 2023(8): 329-332(in Chinese).
- [19] GOKLANI H, GAJJAR G, SOMAN S A. Instrument transformer calibration and robust estimation of transmission line parameters using PMU measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 1761-1770.
- [20] NASERI F, KAZEMI Z, FARJAH E, et al. Fast detection and compensation of current transformer saturation using extended Kalman filter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(3): 1087-1097.
- [21] XIONG Kui, YUE Changxi, ZHOU Feng, et al. The development and performance of dual-core DC tolerant current transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(3): 1521-1533.
- [22] 李岩松, 郭志忠, 杨以涵, 等. 自适应光学电流互感器的基础理论研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 21-26.
LI Yansong, GUO Zhizhong, YANG Yihan, et al. Research on the basic theory of adaptive optical current transducer[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 21-26(in Chinese).
- [23] 王佳颖, 郭志忠, 张国庆, 等. 光学电流互感器长期运行稳定性的试验研究[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 37-41.
WANG Jiaying, GUO Zhizhong, ZHANG Guoqing, et al. Experimental investigation on optical current transducer's long-term operation stability[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 37-41(in Chinese).
- [24] 陈金玲, 李红斌, 刘延冰, 等. 比较式光学电流互感器的分析设计与试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(36): 114-118.
CHEN Jinling, LI Hongbin, LIU Yanbing, et al. Design and test research of COCT based on theory analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(36): 114-118(in Chinese).
- [25] 徐凯, 毕天姝, 郭津瑞, 等. 卫星同步授时偏差对 PMU 量测的影响[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1323-1328.
XU Kai, BI Tianshu, GUO Jinrui, et al. Impact of time service synchronization deviation on PMU measurement [J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1323-1328(in Chinese).
- [26] YAO Wenxuan, LIU Yong, ZHOU Dao, et al. Impact of GPS signal loss and its mitigation in power system synchronized measurement devices[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1141-1149.
- [27] FENG Binbin, DING Zhijun, JIANG Changjun. FAST: a forecasting model with adaptive sliding window and time locality integration for dynamic cloud workloads[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2023, 16(2): 1184-1197.
- [28] 冯茜, 李擎, 全威, 等. 多目标粒子群优化算法研究综述[J]. 工程科学学报, 2021, 43(6): 745-753.
FENG Qian, LI Qing, QUAN Wei, et al. Overview of multiobjective particle swarm optimization algorithm[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(6): 745-753(in Chinese).
- [29] ROHENDI G F, SUARNA N, LESTARI G D. Analisis rumah tidak layak huni menggunakan algoritma X-means[J]. Jurnal Janitra Informatika dan Sistem Informasi, 2023, 3(1): 18-29.



曲朝阳

在线出版日期: 2025-10-15。

收稿日期: 2024-08-12。

作者简介:

曲朝阳(1964), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力大数据处理、电力信息物理融合系统的安全评估与预警技术等, 824937289@qq.com;

*通信作者: 徐绮(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力大数据处理、电流互感器在线校准, 1944614919@qq.com。

(编辑 刘雪莹)