

基于 RFC-SAGA-RBF 的直流偏磁下 CT 畸变电流反衍方法

王波¹, 尹仕红¹, 肖勇^{2,3}, 胡珊珊^{2,3}, 范小飞¹, 潘深琛¹, 王保帅^{2,3}

(1. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518001; 2. 南方电网科学研究院, 广州 510663; 3. 广东省电网智能量测与先进计量企业重点实验室, 广州 510663)

摘要: 线路中的直流偏磁电流易引起计量用电流互感器(current transformer, CT)饱和, CT在饱和状态下输出的二次侧电流含有的谐波分量将导致电能计量误差增大。为了提高直流偏磁下电流互感器测量的准确性, 提出了CT畸变电流的反衍方法。该方法将直流偏磁下CT畸变电流反衍过程分为离网和在网两个阶段。离网阶段, 首先通过改变CT的运行环境生成数据样本集, 然后利用随机森林分类(random forest classification, RFC)算法对CT的饱和程度进行分类, 最后针对每一子类分别训练, 经模拟退火遗传算法优化的径向基神经网络(simulate anneal genetic algorithm-radial basis function, SAGA-RBF)模型对饱和电流进行反衍; 在网阶段, 通过小波变换对二次侧电流波形进行饱和数据段提取, 再将饱和数据段输入离线模型实现二次侧畸变电流反衍一次侧电流。仿真结果表明, 所提方法在各种工况下均能对CT一次侧电流进行反衍, 并提高CT的计量准确度。

关键词: 电磁式电流互感器; 直流偏磁; 饱和电流重构; 小波变换; 随机森林分类算法

Inverse Propagation Method of CT Distortion Current Under DC Bias Based on RFC-SAGA-RBF

WANG Bo¹, YIN Shihong¹, XIAO Yong^{2,3}, HU Shanshan^{2,3}, FAN Xiaofei¹, PAN Shenchen¹,
WANG Baoshuai^{2,3}

(1. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518001, China; 2. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Measurement and Advanced Metering of Power Grid, Guangzhou 510663, China)

Abstract: The DC bias current in the transmission line can easily cause the saturation of current transformer (CT) and the harmonic components contained in the secondary current output of CT in saturation state will lead to an increase in power energy metering error. In order to improve the accuracy of current transformer measurement under DC bias, an inverse propagation method is proposed for CT distortion current. In this method, the inverse propagation process of CT distortion current under DC bias is divided into two stages: off-grid and on-grid. In the off-grid stage, the data sample set is generated by changing the operating environment of CT, and then the saturation degree of CT is classified by random forest classification (RFC) algorithm. Finally, a simulate anneal genetic algorithm-radial basis function (SAGA-RBF) model is trained for each subclass to simulate the saturation current. In the on-grid stage, the saturation data segment of the secondary current waveform is extracted by wavelet transform, and then the saturation data segment is input into the off-line model to realize the inverse propagation of the secondary distorted current. The simulation results show that the proposed method can realize the inverse propagation of the primary side current, and improve the measurement accuracy of CT.

Key words: electromagnetic current transformer; DC bias; saturation current reconstruction; wavelet transform; RFC algorithm

基金项目: 广东省科技计划资助项目(2021B1212050014); 中国南方电网有限责任公司科技项目(090000KK52220012)。

Foundation item: Supported by the Science and Technology Plan Project of Guangdong Province(2021B1212050014); the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (090000KK52220012).

0 引言

随着高压直流输电快速发展,单极-大地回路的运行方式下直流分量经中性点接地变压器侵入交流系统^[1-4]。此外地铁杂散电流与地磁风暴也会使得系统中的一次侧电流信号呈现出交直流共存的特征^[5],严重影响电磁式电流互感器的计量精度。电磁式电流互感器是电力系统中计量和保护的重要设备,广泛应用于电力系统。当大电流和直流分量流经CT时,将使得常规单铁心的CT工作点处于饱和区,由于铁磁材料的非线性磁化特征,饱和状态下的CT计量准确度降低^[6]。因此,对运行中的CT进行饱和检测以及对畸变电流进行反衍,提高CT在宽变化范围和交直流共存环境下的测量精度具有非常重要的意义。

为了使CT在复杂工况下仍线性传变一次侧电流,常采用的做法是增加铁心尺寸或更换铁心材料,但这两种做法都会使得制造成本增加。因此,一些基于智能算法对CT饱和情况下输出的二次侧畸变电流进行校正,以反衍一次侧电流的方法被提了出来。在CT的饱和检测方面,文献[7]通过检测谐波含量的大小及谐波与基波的比例来判断CT的饱和度,但该方法需至少一个周波的电流数据进行傅里叶变换,检测的饱和时段与实际值之间的时效性较差。文献[8]提出对二次侧电流进行差分变换,通过比较二阶和三阶的差分值与阈值的大小判断CT进出饱和时间点并提取饱和和区间,但该方法在CT轻度饱和时的准确率较低。文献[9]提到了对饱和状态下的CT使用Lanczos滤波器,尽管这种方法的计算量小,但当饱和端点处存在平滑的电流变化时它们可能无法准确地检测到某些饱和的结束。针对CT的饱和电流重构,文献[10]将励磁电流确定为CT测量误差的根本原因,提出将计算的励磁电流与二次侧电流相加可以产生实际的一次侧电流,但该方法忽略了铁心中剩余磁通的影响,导致计算过程复杂。文献[11]提出利用支持向量机回归(support vector machine regression, SVR)进行电流补偿,但只讨论了电流幅值引起的CT饱和。文献[12]提出使用决策树和小波变换对CT饱和度进行了深入的分析,基于特征提取对饱和度类型(无饱和、轻度饱和和重度饱和)进行了分类,以实现CT饱和度分类的高精度。然而,并未进一步

研究不同饱和状态下CT畸变电流的反衍问题。文献[13]提出利用K-means聚类算法对于数据进行预处理,利用训练径向基函数神经网络模型预测CT的传变性能,但该方法无法对饱和CT一次侧电流进行反衍。

因此,本文针对直流偏磁下计量用CT饱和检测和一次侧电流重构,提出一种直流偏磁下CT畸变电流反衍方法。该方法主要分为离网和在线两个阶段。一是离网阶段,首先利用PSCAD/EMTDC建立不同工况下CT一、二次侧电流信号作为样本数据集;其次按照比差大小对二次侧电流进行饱和程度划分,计算其波形不对称系数、总谐波含量及2~5次谐波含量,建立各特征量与饱和程度映射关系的RFC模型;最后针对每一饱和程度分别构建SAGA-RBF模型对饱和和电流重构。二是在线阶段,先对二次侧电流波形进行饱和数据段提取,再将饱和数据段输入离线模型进行电流重构。实例仿真结果表明,本文方法能在较短的时限内对直流偏磁影响下的电流互感器畸变电流进行重构,精度满足0.5 S级CT的计量要求;同时该方法不受CT饱和程度的影响,能满足不同工况下CT的计量要求。

1 直流偏磁下电磁式互感器传递误差分析

1.1 输电线路中直流含量实测

为了研究实际交流电网中直流分量的分布情况,本文采用能同时测量线路中交流电流和直流电流数值的高精度交直流钳形万用表,在南网深圳地区10 kV交流配电网系统中选取部分工业园区、居民生活区和专变用户进行测试,共收集数据408条。现场测试情况如图1所示,测试点的直流含量分布如表1所示,部分测试点直流含量见表2。其中,直流含量大于1%的线路约占85.1%,大于3%的约占17.2%。可见,电力线路电流中存在的直流含量必须重视。

1.2 直流偏磁对CT传变性能影响分析

常规单铁心电流互感器等效电路如图2所示。图2中, Z_1 、 Z_0 、 Z'_2 和 Z'_L 分别为CT的一次侧阻抗、励磁阻抗及二次侧折算到一次侧的漏阻抗和负荷阻抗; i_1 、 i_0 、 i'_2 分别为一次侧电流、励磁电流和二次侧折算到一次侧的电流; $\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}'_2$ 分别为一次侧感应电动势和二次侧折算到一次侧的感应电动势^[14-15]。

电流互感器由于需要励磁电流建立一、二次侧

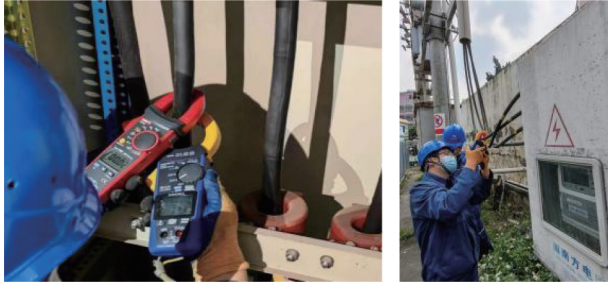


图 1 现场测试示意图

Fig. 1 On-site testing schematic diagram

表 1 测试点直流含量分布

Tab. 1 DC content distribution at test point

直流电流含量/%	数量	占比/%
0~3	338	82.9
3~6	61	15.0
6~9	7	1.71
9~11	2	0.49

表 2 典型场景直流含量

Tab. 2 DC content in typical scenarios

测试点	直流含量/%
沙头角第二生活区综合房	0.17
盐田林场公用配电站	0.57
沙井新二工业村	1.4
石岩街道塘头菜市场	-2.03
佳利五金制造厂主变	-3.8

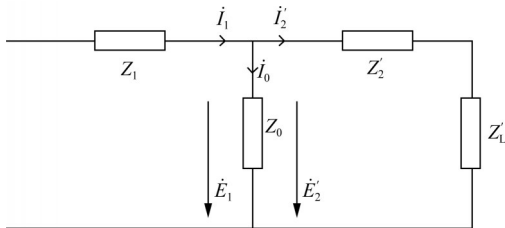


图 2 电流互感器的等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of current transformer

电流传变的励磁磁场, 且铁心中存在损耗。因此, 一、二次侧电流间存在传变误差, 比差 ε 和角差 δ 分别为^[16]:

$$\varepsilon = \frac{I_c |Z_2|}{2\pi f \mu S N_2^2} \sin(\theta + \varphi) \times 100\% \quad (1)$$

$$\delta = \frac{I_c |Z_2|}{2\pi f \mu S N_2^2} \cos(\theta + \varphi) \times 100\% \quad (2)$$

式中: I_c 为 CT 铁心等效磁路长度; S 为 CT 铁心等效截面面积; N_2 为二次绕组匝数; f 为交流电流频率; μ 为铁心磁导率; θ 为二次侧总负荷阻抗角; φ

为铁心损耗角; $|Z_2|$ 为折算后二次侧总阻抗模值,

$$|Z_2| = \sqrt{(Z_2')^2 + (Z_L')^2}.$$

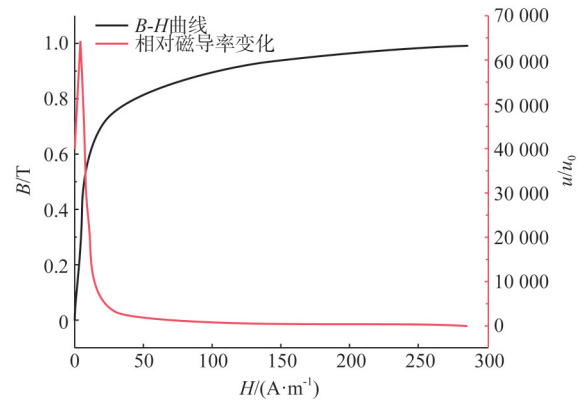
电流互感器的传变性能不仅与其结构参数有关, 还与铁心磁导率 μ 有关。在实际中, 磁导率 μ 常近似为^[17]:

$$\mu = \frac{B_m}{H_m} \quad (3)$$

式中 B_m 和 H_m 分别为磁密和磁场强度最大值。

图 3 为铁心的 $B-H$ 曲线和 $\mu-H$ 曲线。当一次侧为额定电流且初级线圈中没有直流分量时, 铁心磁场强度 H 接近于 0, 磁感应强度 B 随 H 快速增长, μ 值较大。根据式(1)—(2)可以得出, 电流互感器的传变误差较小。

当一次侧电流中直流分量增加时, H 会相应增大导致磁导率 μ 迅速降低, 使得 CT 的传变误差增大, 造成严重的计量误差。

图 3 铁心的 $B-H$ 和 $\mu-H$ 曲线Fig. 3 $B-H$ and $\mu-H$ curves of the iron core

PSCAD 中基于 J-A 理论的电流互感器模型对于磁化过程的解释符合磁滞现象, 且模型简单, 计算速度快, 目前被广泛应用于电磁式电流互感器的建模^[18-20]。参照适用于额定电压为 0.66 kV 的 LMZ2D-500/5 0.2 S 级计量用电流互感器, 设置电流互感器仿真参数如表 3 所示。

分别选取一次侧电流有效值占额定电流有效值 (I/I_N) 的 1%、5%、20%、100% 和 120% 以及直流分量占额定电流有效值 (K_{dc}) 的 1%~5% 的条件进行仿真, 得到比差和角差如表 4—5 所示。

为了对比验证仿真条件下直流偏磁对于电流互感器传变特性的影响, 搭建了如图 4 所示的实验电路。测得 LMZ2D-500/5 0.2 S 级计量用电流互感器

表 3 电流互感器仿真参数

Tab. 3 Simulation parameters of current transformers

参数	数值
匝数比	100/1
一次侧额定电流/A	500
铁心横截面积/cm ²	10.53
二次侧负载/ Ω	0.32+j0.24
铁心磁路长度/cm	24.56

表 4 直流偏磁下 CT(500/5,0.2S)比差仿真结果

Tab. 4 Simulation results of CT(500/5,0.2S) ratio difference under DC bias

$(I/I_N)/\%$	K_{dc}				
	1%	2%	3%	4%	5%
1	0.019	0.06	0.09	0.06	0.12
5	0.15	0.09	0.14	0.12	0.16
20	0.10	0.13	-0.13	-0.33	-0.50
100	-0.12	-0.41	-0.79	-1.27	-1.87
120	-0.09	-0.78	-0.92	-1.54	-1.96

表 5 直流偏磁下 CT(500/5,0.2S)角差仿真结果

Tab. 5 Simulation results of CT(500/5,0.2S) phase difference under DC bias

$(I/I_N)/\%$	K_{dc}				
	1%	2%	3%	4%	5%
1	-3.73	4.61	7.69	12.11	2.33
5	2.71	4.58	18.57	17.25	30.50
20	21.47	90.03	116.31	153.16	217.49
100	52.92	89.28	136.17	187.24	233.47
120	50.06	108.86	151.20	217.49	232.06

在不同直流和交流分量下的比差和角差如表 6—7 所示。

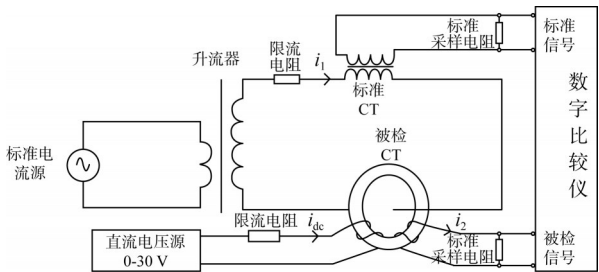


图 4 直流偏磁误差测试电路
Fig. 4 Test circuits of DC bias error

由表 4—7 可见，本文所设置的仿真模型能较好地模拟 LMZ2D-500/5 0.2 S 级 CT 在直流偏磁下的传递性能。仿真和实验结果均表明，当一次回路

表 6 直流偏磁下 CT(500/5,0.2S)比差实验结果

Tab. 6 Experimental results of CT(500/5,0.2S) ratio difference under DC bias

$(I/I_N)/\%$	K_{dc}				
	1%	2%	3%	4%	5%
1	0.05	0.05	0.09	0.08	0.09
5	0.10	0.10	0.09	0.12	0.11
20	0.12	0.15	-0.11	-0.28	-0.46
100	-0.08	-0.45	-0.83	-1.22	-1.88
120	-0.06	-0.79	-0.95	-1.55	-1.96

表 7 直流偏磁下 CT(500/5,0.2S)角差实验结果

Tab. 7 Experimental results of CT(500/5,0.2S) phase difference under DC bias

$(I/I_N)/\%$	K_{dc}				
	1%	2%	3%	4%	5%
1	3.10	4.21	5.04	6.32	8.24
5	4.99	9.26	15.1	22.12	31.3
20	26.2	88.6	117	148.6	223
100	48.8	92.6	142	186.7	227
120	52.7	106.7	155	210.55	239

中交流分量较小时，直流分量对于互感器误差的影响较小。随着直流分量的增加，互感器比差向负方向偏移，角差向正方向偏移。当一次回路中交流分量为额定电流时，一次线路中 3% I_N 的直流分量会使得 CT 比差超过 0.2 S 级 CT 的计量精度要求。

2 直流偏磁下 CT 畸变电流的反衍方法

直流偏磁下 CT 畸变电流的反衍方法算法流程如图 5 所示，算法分为离网和在网两个阶段。

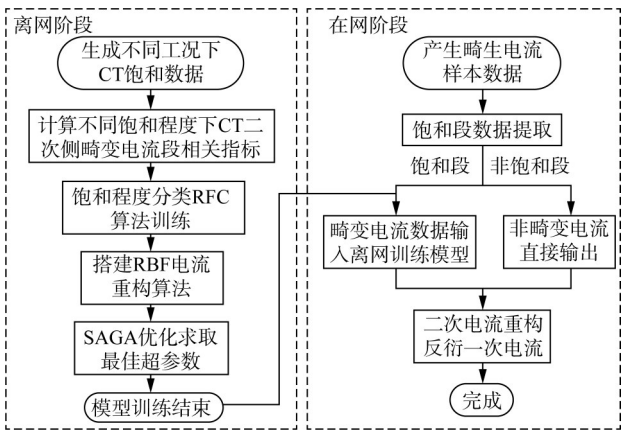


图 5 饱和电流反衍算法流程图

Fig. 5 Flow chart of saturation current inverse propagation algorithm

离网阶段, 首先基于实地测量数据建立 PSCAD/EMTDC 仿真模型, 在各工况下获得直流偏磁下 CT 一、二次侧电流样本数据, 计算二次侧电流波形的不对称度、谐波含量和特定谐波次数的含量, 建立电流互感器饱和程度判断的 RFC 分类模型。其次将每一类饱和程度下的二次侧电流作为输入数据, 一次侧电流作为输出数据, 建立 SAGA-RBF 非线性回归模型。

在网阶段, 首先通过小波变换对存在直流偏磁的二次侧电流进行饱和和区间识别; 然后计算畸变的二次侧电流相关指标, 输入多分类模型进行饱和类型判断; 最后将采用 SAGA-RBF 模型校正后的畸变电流段与未发生畸变的电流段进行合并, 作为模型最终输出结果。

2.1 训练样本的生成方法

考虑影响 CT 传变性能的主要因素: 直流分量与额定电流比值 K_{dc} 、工频交流有效值占额定电流比例 K_{ac} 和偏磁电流极性 P 。为了更好地描述本文产生数据训练集的方法, 定义“ $F \sim r \sim L$ ”为一种样本数据生成方式。其中, F 、 L 分别为样本的起始和截止数据, r 为数据生成的步长。

1) 根据现场实测数据主要集中在 0~3%, 将 K_{dc} 以 0%~0.2%~3% 和 3%~1%~11% 进行样本数据生成。

2) 由于当 CT 一次侧电流较小时直流偏磁对其计量误差影响较弱。因此, 将 K_{dc} 以 10%~5%~200% 遍历, 在小电流情况下仅取 0.1%、1% 及 5% 三个测试点。

3) 考虑偏磁电流极性 P 对于 CT 传变性能的影响。对上述各参数的取值进行组合, 可得 N 种不同工况下 CT 的一、二次侧电流采样值。

$$N = N_{K_{dc}} N_{K_{ac}} N_p \quad (4)$$

式中 $N_{K_{dc}}$ 、 $N_{K_{ac}}$ 、 N_p 分别对应每种参数的遍历次数, 其中 $N_p=2$ 。

根据式(4)共生成 2016 种可能引起 CT 计量误差的潜在工况, 作为离网训练的样本数据。

2.2 饱和时段提取方法

当一次线路中含有直流分量时, 会使 CT 二次侧电流波形畸变, 畸变电流波形与正常波形存在一定的奇异性^[21]。根据信号奇异性检测理论, Lipschitz 指数是表征信号奇异性的重要参数, 其正则性与小波变换幅值随尺度的衰减性相关^[22-24]。信

号 $f(x)$ 在任意一点处的 Lipschitz 指数的正则性依赖于该点临域中小波系数模 W 在细节尺度下的衰减。

$$W(a, x) = a^n \frac{d^n}{dx^n} [f(x) \Psi(x)] \quad (5)$$

式中: $\Psi(x)$ 为一个母小波; a 和 x 分别为该小波的伸缩因子和平移因子; n 为导数阶数。

$$|W(a, x)| \leq |W(a, x_0)| \quad (6)$$

若在 x_0 的临域 $(x_0 - m\Delta x, x_0 + m\Delta x)$ 内式(6)均成立, 则 x_0 是小波变换模极大值点, 也是 $f(x)$ 的信号奇异点。其中, m 为数据窗大小, Δx 为间隔时间。

当 $n=1$ 时, 小波系数模值与一阶导数值成正比。因此, 通过对细节尺度下信号模极大值进行识别, 就能判断出信号奇异点存在的位置, 即识别出 CT 饱和和时间段。

本文选取了具有低相位失真及对突变信号敏感的第 2 代小波基 Bior3.1 作为小波变换的母小波, 用于识别信号奇异点。设置数据窗大小 $m=16$ 。对 CT 处于额定电流和额定电流叠加 5% I_N 直流偏磁两种情况进行 3 层小波变换分解、重构, 并以第一层细节信号上的模极大值作为 CT 进出饱和的判别依据, 得到的结果如图 6 所示。

由图 6 可知, 在 CT 的饱和进出点处第一层小波细节图上均出现了明显的模极大值, 最大时间误差为 0.125 ms, 具有较高的检测精度。此外, 小波变换模极大值两侧呈衰减性, 数据窗的运用避免了将由于信号衰减产生的伪极大值识别成极大值点的问题。

2.3 基于 RFC 对 CT 畸变电流按饱和程度分类

通过小波变换检测出互感器的饱和和区间后需要对互感器饱和和区间的畸变电流数据进行校正。在采用智能算法对于电流互感器畸变电流校正时常出现的问题是由于数据样本过大导致校正时间过长和单一模型难以兼备泛化性和精确性。因此, 本文将样本划分成若干簇以降低校正算法的训练难度。

2.3.1 CT 畸变电流波形特征提取

当互感器饱和时, 其二次侧电流将呈现出不同程度的波形缺损和畸变。这导致二次侧电流不仅包含基波分量, 而且随着饱和的加剧, 谐波含量也会相应的增加^[25]。因此, 本文采用总谐波失真(total harmonic distortion, THD)和二次侧电流波形中特

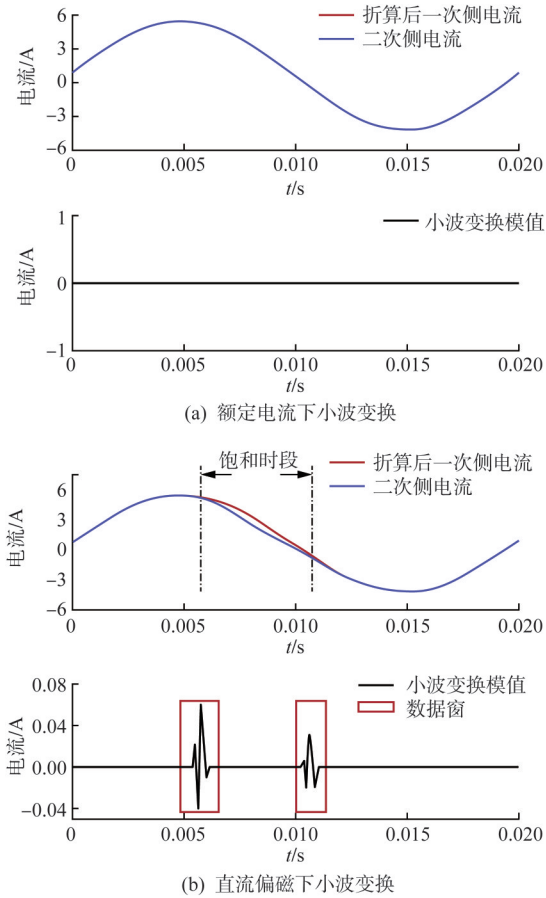


图6 不同工况下CT二次电流小波变换结果

Fig. 6 Results of CT secondary current wavelet transform under different working conditions

定谐波阶数的含量(2~5次谐波)作为指标来评估CT饱和程度。在直流偏磁下CT中的饱和电流将表现出正半波和负半波的不对称性。这是因为直流偏置磁通与相同极性的交流磁通叠加,增加了相同极性交流电流的幅值。相反,它使相反极性的交流磁通消磁,减小了相反极性交流电流的幅值。

为了定量分析直流偏压对二次电流波形不对称性的影响,引入了波形不对称系数 σ 。使用Simpson积分公式^[26]计算正半波和负半波中每3个采样点相对于时间轴 t 所包围的面积 A 。

$$A = \int_{t_n}^{t_{n+2}} i_2(t) dt \quad (7)$$

$$= \frac{\Delta t}{3} [i_2(t_n) + 4i_2(t_{n+1}) + i_2(t_{n+2})]$$

式中: $i_2(t)$ 为二次侧采样电流瞬时值; $t_n = n \times \Delta t$; Δt 为采样时间间隔。

对一个周期的采样点进行遍历,分别计算出正半波和负半波中每3个采样点和时间轴所包围的最

大面积,两者的比值即为波形不对称系数 σ 。

$$\sigma = \frac{A_+}{A_-} \quad (8)$$

式中 A_+ 和 A_- 分别为正半波和负半波最大面积。

因此,本文综合选择二次侧电流总谐波失真、2~5次谐波含量和波形不对称系数作为指标来评估CT饱和程度。

2.3.2 RFC算法

基于国家标准 GB/T 20840.2—2014^[27]对计量用0.2S级互感器按基波比差 ε^{fun} (式(9)所示)和程度分为4类,CT各工况对应的饱和情况如表8所示。

$$\varepsilon^{\text{fun}} = \frac{K_n I_2^{\text{fun}} - I_1}{I_1} \times 100\% \quad (9)$$

式中: I_2^{fun} 为经FFT分解后二次侧电流信号中基波幅值; I_1 为一次正弦电流信号幅值; $K_n = N_1/N_2$, N_1 为一次侧绕组匝数, N_2 为二次侧绕组匝数。

表8 饱和程度分类

Tab. 8 Classification of saturation degrees

饱和程度	编号	样本数量	比差范围/%
轻度	1	745	$\varepsilon^{\text{fun}} \leq 0.2$
中度	2	485	$0.2 \leq \varepsilon^{\text{fun}} \leq 0.5$
重度	3	410	$0.5 \leq \varepsilon^{\text{fun}} \leq 1$
深度	4	376	$\varepsilon^{\text{fun}} \geq 1$

由表8可知,CT不同工况下的饱和程度分类数据明显不同。因此本文采用具有分类准确率高、抗过拟合能力强和不易受数据不平衡影响等优势^[27]的随机森林分类算法建立CT不同工况下饱和程度分类预测模型。

RFC算法首先采用bootstrap法在初始样本集 M 中进行有放回的 l 次抽样,形成长度相等的样本子集 $\{M_1, M_2, \dots, M_l\}$;然后,随机选取特征量并针对每一样本子集建立决策树模型;最后,用测试集的数据对 l 个决策树进行测试,对于得到的 l 个结果采用多数投票法进行选择^[28],可以得到随机森林输出的最终分类结果 γ_{pre} 。流程如图7所示。

$$\gamma_{\text{pre}} = \arg \max_{j=1}^l g(\gamma_j = I) \quad (10)$$

式中: γ_{pre} 为随机森林输出的最终分类结果; γ_j 为单个决策树输出的分类结果; $g(\cdot)$ 为判断函数,当决策树输出的类别等于输出变量 I 时,其值为1,否则为0; $\arg \max(\cdot)$ 为统计测试样本中随机森林输出值最多的统计函数。

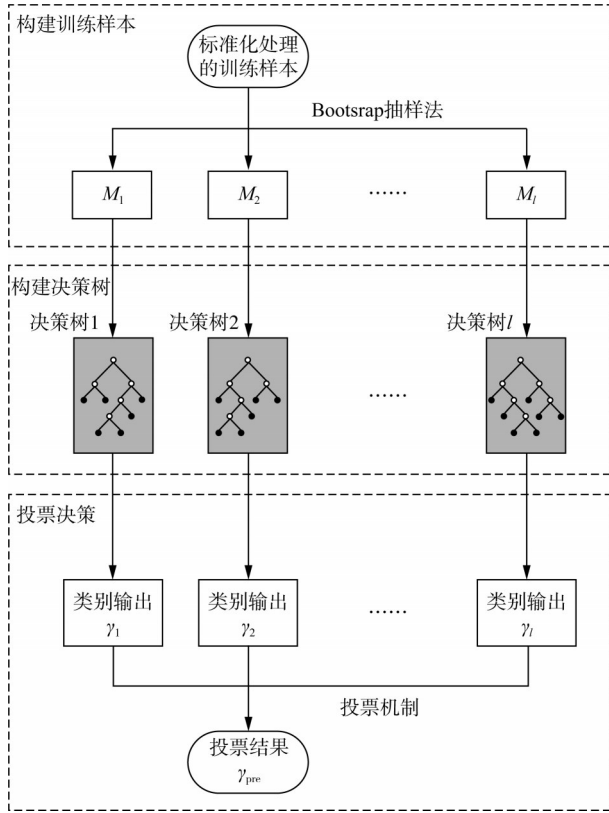


图 7 随机森林算法流程图

Fig. 7 Flow chart of random forest algorithm

2.4 基于 SAGA-RBF 饱和电流反衍方法

针对每一类饱和程度下的样本数据分别建立 RBF 模型, 实现二次侧畸变电流和一次侧电流间的映射关系。RBF 神经网络是一种基于径向基函数的前向型神经网络, 该算法具有良好的泛化性能和模型训练简单的特点^[29]。RBF 神经网络的结构框图如图 8 所示。

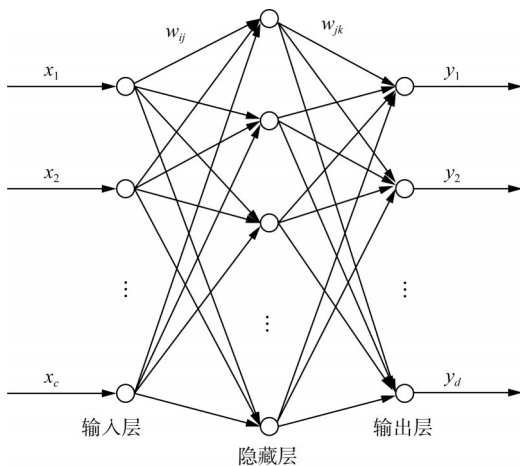


图 8 RBF 神经网络结构

Fig. 8 Neural network structure of RBF

图 8 中, \$\{x_1, x_2, \dots, x_c\}\$ 是 RBF 神经网络的输入值, \$\{y_1, y_2, \dots, y_d\}\$ 是 RBF 神经网络的预测值, \$c, d\$ 分别为输入层和预测层的维数。\$w_{ij}, w_{jk}\$ 分别为 RBF 神经网络第 \$i\$ 个输入层和第 \$j\$ 个隐藏层及第 \$j\$ 个隐藏层和第 \$k\$ 个输出层之间的权值。

隐藏层中的径向基函数 \$G_j(\tau)\$ 为高斯函数, 其表达式为:

$$G_j(\tau) = \exp\left(-\frac{1}{2\lambda^2}\|\tau - c_j\|^2\right) \quad (11)$$

式中: \$\|\tau - c_j\|\$ 为欧式范数; \$c_j\$ 为高斯函数的中心, \$j=1, 2, \dots, h\$; \$h\$ 为中心数量; \$\lambda\$ 为高斯函数的宽度。

从而得到 RBF 神经网络的输出函数为:

$$y_i(\tau) = \sum_{j=1}^h w_{ij} \times G_j(\tau) \quad (12)$$

由式(11)–(12)可知, \$\lambda, c_j\$ 和 \$w_{ij}\$ 对于 RBF 神经网络的预测效果起决定性作用。因此, 本文采取 SAGA 对 RBF 的 3 个参数进行优化, 确定最优参数组合, 具体步骤如下。

1) 初始化遗传种群参数, 种群大小为 50, 选择交叉概率 \$P_c=90\%\$, 变异概率 \$P_m=5\%\$, 最大种群迭代数为 200; 初始化模拟退火参数, 退火初始温度 \$T_0=1\ 000\ ^\circ\$, 降温系数 \$q=90\%\$, 终止温度 \$T_{end}=0.001\ ^\circ\$; 生成初始解 \$Q^{(0)} = (\lambda^{(0)}, c_j^{(0)}, w_{ij}^{(0)})\$;

2) 建立 SAGA-RBF 仿真模型, 计算第 \$K\$ 次迭代下 \$Q^{(K)} = (\lambda^{(K)}, c_j^{(K)}, w_{ij}^{(K)})\$ 下的适应度值;

$$f(Q^{(K)}) = \frac{1}{b} \sum_{i=1}^b \frac{|f_i - \hat{f}_i|}{\hat{f}_i} \quad (13)$$

式中: \$\hat{f}_i\$ 为训练集第 \$i\$ 个样本的实测值; \$f_i\$ 为训练集第 \$i\$ 个样本的预测值; \$b\$ 为训练集样本总数量。

3) 对遗传个体进行选择、交叉和变异操作^[30], 生成新解 \$Q^{(K+1)} = (\lambda^{(K+1)}, c_j^{(K+1)}, w_{ij}^{(K+1)})\$;

4) 计算当前解 \$Q\$ 和新解 \$Q^{(K+1)}\$ 之间的能量差 \$\Delta f\$, 计算式为 \$\Delta f = f(Q^{(K+1)}) - f(Q)\$;

5) 若 \$\Delta f < 0\$, 则接受新解, 令 \$Q = Q^{(K+1)}\$; 否则按照 Metropolis 准则以概率 \$p\$ 接受较差解, 计算式为 \$P(T) = \exp(-\Delta f/T)\$, \$T\$ 为当前温度;

6) 判断当前温度 \$T\$ 是否小于 \$T_{end}\$, 不满足返回步骤 3); 判断当前迭代数 \$K\$ 是否大于 200, 不满足返回步骤 2); 满足则退出循环, 将当前解作为 RBF 神经网络的参数。用于构建畸变电流与一次侧电流

之间的非线性映射关系,实现畸变电流的校正。

算法流程图如图9所示。

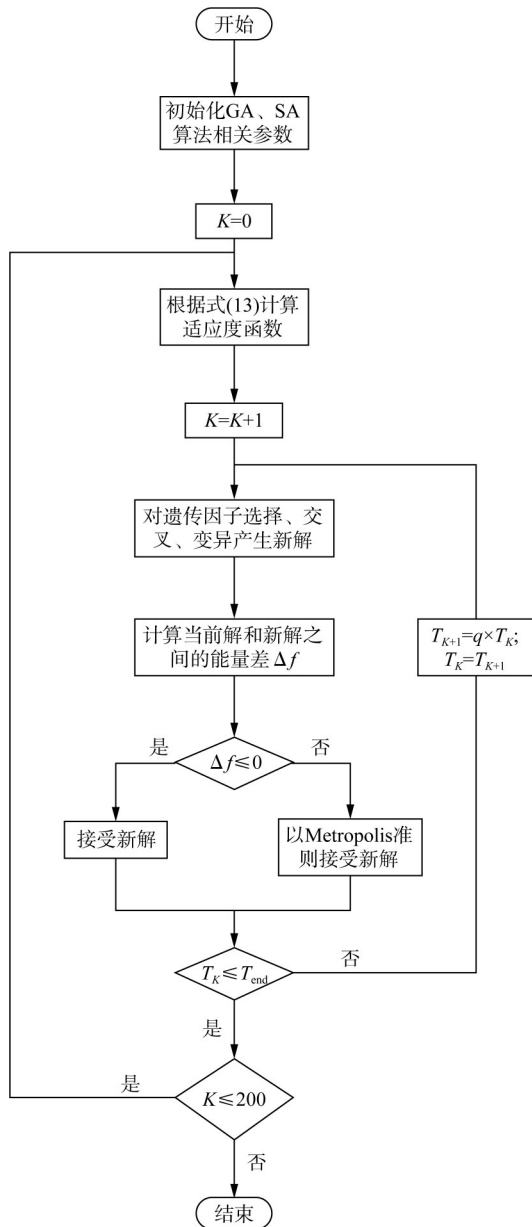


图9 SAGA算法流程图

Fig. 9 Flow chart of SAGA

3 仿真算例

在PSCAD/EMTDC仿真平台中搭建仿真电路如图10所示。以直流电源模拟偏磁电流,从中性点接地的变压器注入系统中。交流电源频率为50 Hz,阻抗为 $(1.2+j1.6) \Omega$,CT参数设置如表3所示,采样频率 $f_s=8$ kHz,仿真时间为0.5 s。

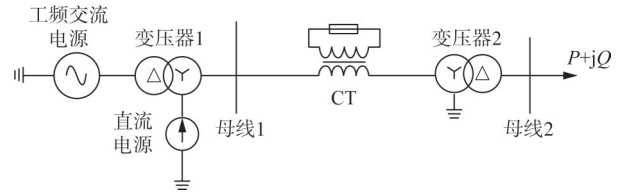


图10 直流偏磁对电流互感器影响分析

Fig. 10 Analysis of the effect of DC bias on current transformer

3.1 算法评价指标选取和数据预处理

基于各工况条件下的CT一、二次侧电流信号,从均方根误差(RMSE)、平均基波比差($\varepsilon_{\text{ave}}^{\text{Fun}}$)、平均基波角差($\delta_{\text{ave}}^{\text{Fun}}$)和单周波平均校正时间(t_{ave})5个维度对比本文所提方法与RBF、SVM-SVR、SVM-RBF及RFC-RBF算法校正效果。

为消除二次侧电流特征不同量纲对于模型预测准确度的影响并提高收敛速度,对各特征量进行标准化处理,使各特征数据经过式(14)线性变换后均分布在 $[0, 1]$ 内。

$$y^* = \frac{y - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}} \quad (14)$$

式中: y 和 y^* 分别为标准化处理前后的值; $y_{\min}$ 和 $y_{\max}$ 分别为各特征样本的最小值及最大值。

3.2 饱和电流反衍方法校正准确度

将标准化后的数据集分为80%的训练集和20%的测试集,分别进行模型的训练和测试。经过仿真测试,当RFC中决策树数量 n_{tree} 为100,每棵分类树上叶子节点最小样本数 m_{split} 设置为5,CT畸变电流分类准确率最高。

利用准确率对RFC和SVM分类效果进行评判,得到两种算法的测试集分类的混淆矩阵如图11所示。

从图11中可以看出,1)本文所采用的RFC分类算法的分类效果明显优于SVR分类算法,RFC分类准确度(97.13%)比SVM分类准确度(85.6%)提高了11.53%。2)RFC分类算法对于每类饱和程度的分类准确率高于95%,每一子类分类效果均优于SVM算法,但其仍存在将饱和程度标签误分的情况,这是由于误分数据处于不同饱和程度的临界位置,致使算法不能有效区分。

针对每一饱和程度下的电流数据分别训练SAGA-RBF模型,校正效果如表9—10所示。

结合表9—10的各项数据可以看出,相较于单一的RBF模型,采用分类改进后的模型在平均校正

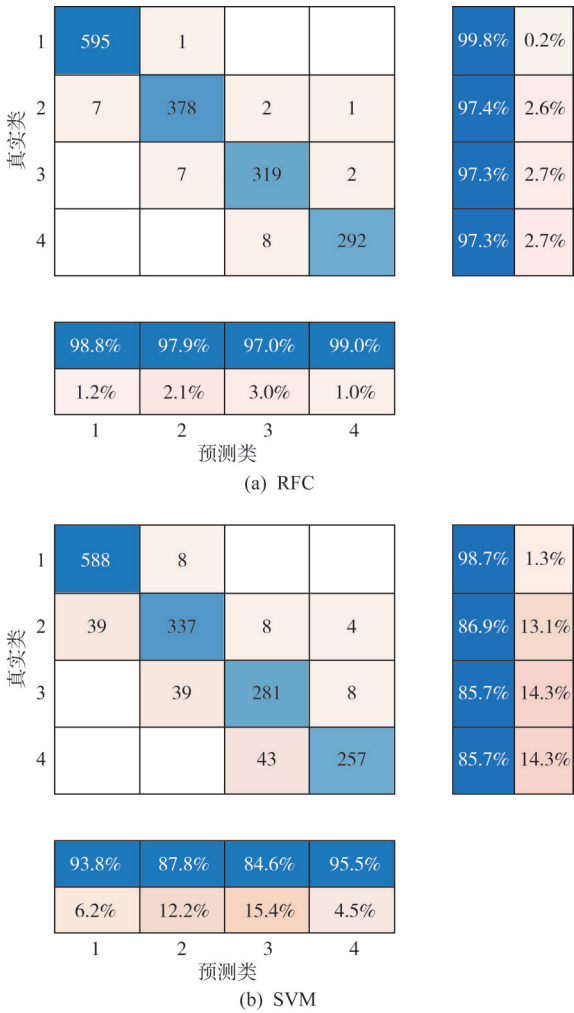


图 11 两种算法的分类混淆矩阵

Fig. 11 Classification confusion matrices of two algorithms

表 9 RFC-SAGA-RBF 模型对样本数据校正效果

Tab. 9 RFC-SAGA-RBF model's correction effects on sample data

计量标准	达标数目占比/%
0.2S 级 CT	92.4
0.5S 级 CT	96.8
1.0S 级 CT	99.9
抗直流 CT	100

时间 t_{ave} 和均方根误差 RMSE 上均明显降低。这说明对二次侧电流按照饱和程度进行分类, 并对每一类进行模型训练, 能有效降低模型的训练难度, 提高预测效果。此外, 经过 SAGA 优化的 RBF 模型具有较强的数据挖掘能力, 在对 CT 畸变电流的反衍效果上优于其他算法。RFC-SAGA-RBF 模型针对各工况下的 CT 计量误差均有明显的改善, 经过校

表 10 RFC-SAGA-RBF 与其他方法的性能对比

Tab. 10 Performance comparisons between RFC-SAGA-RBF and other methods

饱和程度 编号	模型	RMSE	$\varepsilon_{ave}^{Fun}/\%$	$\delta_{ave}^{Fun}/(^\circ)$	t_{ave}/ms
1	RFC-SAGA-RBF	31.3	0.11	15	17
	SVM-SVR	55.3	0.19	23	34
	SVM-RBF	88.1	0.21	42	55.6
	RFC-RBF	62.6	0.15	27	45.1
	RBF	95.6	1.22	59	67.8
2	RFC-SAGA-RBF	45.7	0.15	13	12.6
	SVM-SVR	69.3	0.44	16	22
	SVM-RBF	77.4	0.51	27	18.6
	RFC-RBF	96.8	0.32	64	36.7
	RBF	114	0.98	77	97.6
3	RFC-SAGA-RBF	27.9	0.12	32	14.7
	SVM-SVR	43.2	0.62	26	19
	SVM-RBF	48.3	0.31	29	23.4
	RFC-RBF	55.7	0.33	31	44.7
	RBF	85.8	1.56	62	86.7
4	RFC-SAGA-RBF	25.6	0.17	24	9.8
	SVM-SVR	31.6	0.39	32	12.2
	SVM-RBF	25.4	0.44	40	18.7
	RFC-RBF	50.3	0.30	41	18.9
	RBF	62.4	1.26	45	62.7

正的训练集样本数据中 92.4% 工况满足了 0.2 S 级 CT 的计量要求、96.8% 满足了 0.5 S 级 CT 的计量要求。

4 结论

针对直流偏磁下计量用 CT 易陷入饱和造成计量误差增大的问题, 本文提出了一种基于 RFC-SAGA-RBF 的直流偏磁下 CT 畸变电流反衍方法。研究结果如下。

- 1) 基于 Bior3.1 的小波变换能有效提取 CT 饱和时段, 且该方法不受 CT 饱和程度的影响, 具有良好的适用性。
- 2) SAGA-RBF 模型能有效建立二次侧畸变电流与一次侧基波电流之间的映射关系。仿真结果表明, 基于 SAGA-RBF 的反衍方法对畸变电流的重构精度较高, 相较于同类方法具有精度高、时间短的优点。
- 3) 本文方法在 92.4% 的工况下满足了 0.2 S 级 CT 的计量要求, 96.8% 的工况下满足 0.5 S 级

CT的计量要求。

本文方法能有效针对直流偏磁下CT畸变电流进行反衍,有效提高了CT的计量性能。但缺乏对于含噪声电流信号的反衍分析,难以直接运用于实际线路中,后续还需对算法进行改进。

参考文献

- [1] 马书民,戎子睿,林湘宁,等.直流偏磁影响下继电保护的误拒动机理分析及对策研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(8):86-98.
MA Shumin, RONG Zirui, LIN Xiangning, et al. Analysis and countermeasures of relay protection false rejection mechanism under the influence of DC bias [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50 (8): 86 - 98
- [2] 王鸿志.直流偏磁在线监测及其对换流变压器差动保护的影响研究[D].济南:山东大学,2022.
- [3] 彭伟款,郭紫娟,张先勇,等.基于NSGA-II和模糊决策的交直流混合微电网多目标优化调度[J].广东电力,2023,36(2):42-51.
PENG Weikuan, GUO Zijuan, ZHANG Xianyong, et al. Multi-objective optimal dispatching of AC/DC hybrid microgrid based on NSGA-II and fuzzy decision-making [J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(2): 42 - 51.
- [4] 李星成,鞠善忠,郑太英.基于粒子群算法的变压器直流偏磁隔直装置安装策略[J].南方电网技术,2023,17(10):13-21,41.
LI Xingcheng, JU Shanzhong, ZHENG Taiying. Installation strategy of transformer DC bias blocking device based on PSO algorithm [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17 (10): 13 - 21, 41.
- [5] 吴泳聪,蔡汉生,胡上茂,等.地铁牵引系统对地表电位影响时域仿真[J].南方电网技术,2023,17(6):80-89.
WU Yongcong, CAI Hansheng, HU Shangmao, et al. Time domain simulation of the influence of metro traction system on ground potential [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(6): 80 - 89.
- [6] DMITRENKO M A, ZHURAVLEV P D. On the requirements of current transformers in differential protection of transformers at electric power stations[J]. Power Technology and Engineering, 2017, 50(6): 662 - 667.
- [7] 袁金晶,孙国菊,朱德省,等.电流互感器饱和特性分析及其补偿[J].电测与仪表,2012,49(S1):165-169,176.
YUAN Jinjing, SUN Guojun, ZHU Desheng, et al. Analysis of saturation characteristics of current transformer and compensation [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49 (S1): 165 - 169, 176.
- [8] 许峰,李开成,金波,等.电流互感器的饱和区间定位研究[J].电测与仪表,2016,53(17):1-5,17.
XU Feng, LI Kaicheng, JIN Bo, et al. Research on locating saturation of current transformer [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(17): 1 - 5, 17.
- [9] SCHETTINO B M, DUQUE C A, SILVEIRA P M, et al. A new method of current-transformer saturation detection in the presence of noise. [J] Power Delivery, 2014, 29(4): 1760 - 1767.
- [10] PAN J P, VU K, HU Y. An efficient compensation algorithm for current transformer saturation effects [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(4): 1623 - 1628.
- [11] 刘杰,裴杰,田明,等.基于支持向量机的电流互感器非线性校正方法研究[J].电机与控制学报,2020,24(10):130-138.
LIU Jie, PEI Jie, TIAN Ming, et al. Research on nonlinear correction method of current transformer based on support vector machine [J]. Electric Machines and Control, 2020, 24 (10): 130 - 138.
- [12] SHENG Y, ROVNYAK S M. Decision trees and wavelet analysis for power transformer protection [J]. IEEE Power Engineering Review, 2002, 22(2): 62 - 62.
- [13] 胡琛,张竹,杨爱超,等.电子式电流互感器误差模型及误差状态预测方法[J].电力工程技术,2020,39(4):187-193.
HU Chen, ZHANG Zhu, YANG Aichao, et al. Error model and forecasting method for electronic current transformers [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39 (4): 187 - 193.
- [14] 王飞翔.直流偏磁对电流互感器的影响分析[D].兰州:兰州理工大学,2017.
- [15] 李敏,靳绍平,宋宏天,等.直流分量下常规CT和抗直流CT计量性能对比研究[J].电力系统保护与控制,2019,47(24):154-160.
LI Min, JIN Shaoping, SONG Hongtian, et al. Research on difference of conventional CT & anti-DC CT [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47 (24): 154 - 160.
- [16] 湛洪江.直流偏磁对计量用电流互感器影响研究[D].南昌:南昌大学,2016.
- [17] 卢树峰,杨世海,蔡霖霖,等.直流偏磁对电流互感器的作用机理研究[J].电测与仪表,2014,51(14):6-11.
LU Shufeng, YANG Shihai, CAI Jilin, et al. Action principle of DC magnetic bias to current transformer [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51 (14): 6 - 11.
- [18] 王亮,曾伟杰,田娟,等.直流分量和谐波分量对电流互感器传输特性影响[J].电机与控制学报,2023,27(5):1-8.
WANG Liang, ZENG Weijie, TIAN Juan, et al. Influence of DC component and harmonic component on transmission characteristics of current transformer [J]. Electric Machines and Control, 2023, 27 (5): 1 - 8.
- [19] 刘任,李琳.基于损耗统计理论与J-A磁滞模型的直流偏磁下磁性材料损耗计算方法[J].高电压技术,2019,45(12):4062-4069.
LIU Ren, LI Lin. Loss prediction of magnetic material under DC bias based on the statistical theory of losses and Jiles-Atherton hysteresis model [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45 (12): 4062 - 4069.
- [20] 田晓倩.直流偏磁对电流互感器及电能计量的影响研究[D].保定:华北电力大学,2014.
- [21] 胡红利,崔晨辉,员鹏宇,等.电流互感器饱和检测以及畸变电流补偿[J].西北大学学报(自然科学版),2022,52(1):52-59.
HU Hongli, CUI Chenhui, YUAN Pengyu, et al. Current transformer saturation detection and distortion current compensation [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2022, 52 (1): 52 - 59.
- [22] 刘晓明,赵洋,曹云东,等.基于小波变换的交流系统串联电弧故障诊断[J].电工技术学报,2014,29(1):10-17.
LIU Xiaoming, ZHAO Yang, CAO Yundong, et al. Series arc fault diagnosis based on wavelet transform in AC system [J].

- Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29 (1): 10 – 17.
- [23] 陈伟根,龙震泽,谢波,等.不同气隙尺寸的油纸绝缘气隙放电特征及发展阶段识别[J].电工技术学报,2016,31(10):49 – 58.
- CHEN Weigen, LONG Zhenze, XIE Bo, et al. Characteristics and development stage recognition of air-gap discharge within oil-paper insulation considering effect of cavity size [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31 (10): 49 – 58.
- [24] 刘国强,李国春,郝亚楠,等.低压直流配电网强弱电弧特征及检测算法[J].中国电力,2024,57(2):94 – 102.
- LIU Guoqiang, LI Guochun, HAO Yanan, et al. Characteristics and detection algorithm of strong and weak arc in low voltage DC distribution network [J]. Electric Power, 2024, 57(2): 94 – 102.
- [25] SOPHEAP K, CHANGSUNG K, KWANGJAE S, et al. Fast detection of current transformer saturation using stacked denoising autoencoders[J]. Energies, 2023, 16(3): 1528 – 1528.
- [26] 许晓红,倪春峰,颜晓青.基于组合辛普森积分的振动测试时域积分方法[J].计量学报,2020,41(6):704 – 709.
- XU Xiaohong, NI Chunfeng, YAN Xiaoqing. Time domain integral method for vibration test based on combined simpson integral [J]. Acta Metrologica Sinica, 2020, 41 (6): 704 – 709.
- [27] 全国互感器标准化技术委员会.互感器 第2部分:电流互感器的补充技术要求:GB/T 20840.2 – 2014 [S].北京:中国标准出版社,2014:9.
- [28] 李蔚,吴恺逾,陈坚红,等.基于非线性自回归神经网络和随机森林算法的核电汽轮机组出力优化[J].中国电机工程学报,2021,41(2):409 – 416.
- LI Wei, WU Kaiyu, CHEN Jianhong, et al. Output optimization of nuclear power steam turbine based on nonlinear autoregressive neural network and random forest algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41 (2): 409 – 416.
- [29] 何耀耀,许启发,杨善林,等.基于RBF神经网络分位数回归的电力负荷概率密度预测方法[J].中国电机工程学报,2013, 33(1):93 – 98.
- HE Yaoyao, XU Qifa, YANG Shanlin, et al. A power load probability density forecasting method based on RBF neural network quantile regression [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33 (1): 93 – 98.
- [30] 李艳波,李若尘,史博,等.基于改进模拟退火遗传算法的高速公路服务区自洽能源系统高能效优化[J].西安交通大学学报,2024,58(1):197 – 207,216.
- LI Yanbo, LI Ruochen, SHI Bo, et al. Optimization of high energy efficiency for self-consistent energy system in highway service area via simulated annealing algorithm-genetic [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58 (1): 197 – 207, 216.

收稿日期:2023-09-06;网络首发日期:2024-04-28

作者简介:

王波(1973),男,高级工程师,博士,研究方向为电能计量设备检测技术,13509602033@139.com;

尹仕红(1978),女,高级工程师,学士,研究方向为电能计量设备检测技术,13699762862@139.com;

胡珊珊(1981),女,通信作者,高级工程师,硕士,研究方向为电能计量技术,hushanshan@csg.cn。

广 告

南方电网公司电网仿真重点实验室……………封二
南方电网科技创新中心……………封三
《南方电网技术》杂志……………封底

南方电网电力科技股份有限公司……………A2
许继电气股份有限公司……………A3