

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250231

# 基于 U-I 象空间分布的 CT 饱和识别及畸变电流重构方法

李振兴<sup>1,2</sup>, 张星宇<sup>1</sup>, 朱益<sup>1</sup>, 翁汉琍<sup>1,2</sup>, 李振华<sup>1,2</sup>, 周吉安<sup>1</sup>

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 新能源微电网湖北省  
协同创新中心(三峡大学), 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 电流互感器(current transformer, CT)是各类差动保护的核心元件,但在复杂故障电流特性及幅值显著提升的工况下极易发生饱和。首先,融合测点处电压互感器(potential transformer, PT)提供的电压量信息,通过建立电压-电流耦合关系在二维象空间中绘制以电流量为横轴、电压量为纵轴的轨迹曲线,从而抑制 CT 饱和导致的单一信号失真对状态辨识的干扰。基于轨迹畸变程度与标准椭圆的量化偏差,实现饱和状态的识别及严重程度的分级评估。最后,在线性传变区间内筛选采样点并结合改进的椭圆拟合算法完成象空间分布的整合及畸变电流的重构。在 PSCAD/EMTDC 平台搭建 220 kV 输电线路模型及新能源电源接入模型,仿真结果显示,在 CT 不同饱和类型及严重程度下,所提方法能高效、精确地实现 CT 饱和状态识别及二次畸变电流的重构。

**关键词:** 电流互感器; 饱和识别; 线性传变; 椭圆拟合算法; 电流重构

## CT saturation identification and distorted current reconstruction method based on U-I image spatial distribution

LI Zhenxing<sup>1,2</sup>, ZHANG Xingyu<sup>1</sup>, ZHU Yi<sup>1</sup>, WENG Hanli<sup>1,2</sup>, LI Zhenhua<sup>1,2</sup>, ZHOU Ji'an<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Microgrid, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** Current transformers (CTs) are core components of various differential protection, but they are prone to saturation under complex fault current characteristics and significantly increased current amplitudes. First, voltage information provided by potential transformers (PTs) at measurement points is integrated, and a voltage-current coupling relationship is established to plot trajectory curves in a two-dimensional image space, with current on the horizontal axis and voltage on the vertical axis. This approach mitigates the interference of single-signal distortion caused by CT saturation on state identification. Based on the deviation of the degree of trajectory from a standard ellipse, saturation states are identified and the severity of saturation is graded. Finally, sampling points within the linear transmission interval are selected, and an improved ellipse-fitting algorithm is applied to integrate the image space and reconstruct the distortion current. A 220 kV transmission line model with new energy integration is constructed on the PSCAD/EMTDC platform. Simulation results show that the proposed method can efficiently and accurately identify CT saturation and reconstruct secondary distorted currents under different types and severities of CT saturation.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077120).

**Key words:** current transformer; saturation recognition; linear transmission; ellipse-fitting algorithm; current reconstruction

## 0 引言

电流互感器(current transformer, CT)作为电力系统领域最重要的测量设备,直接反映了测点处电流变化情况<sup>[1-4]</sup>。在新能源大规模并网、故障电流特

性日益复杂的背景下,提升 CT 抗饱和及畸变电流重构能力显得尤为迫切<sup>[5-7]</sup>。对测点处电流工况的精准传达,直接决定了相关差动保护的正确识别与动作<sup>[8-11]</sup>,对维护整个电网系统的稳定运行都起到至关重要的作用。

CT饱和现象一般由故障大电流引起,饱和状态又可以划分为暂态饱和与稳态饱和<sup>[12]</sup>,前者主要受

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52077120)

故障电流中包含的衰减型非周期分量影响, 后者故障电流幅值更大但基本不包含非周期分量, 因此两者的二次畸变电流波形特征存在共性与差异性。为准确识别 CT 饱和现象的发生, 国内外学者已进行大量详实有效的工作。文献[13-14]深入分析了 CT 饱和机理, 并提出了一种缩小保护范围的母线保护新原理。文献[15]考虑时差法在严重饱和情况下因采样率受限而造成保护漏判的情况, 提出利用差流半波积分特征的饱和识别方法, 一定程度上提升了饱和出现后差动保护的灵敏性。在此基础上, 文献[16]通过 Hausdorff 距离算法识别 CT 饱和初期线性传变的区间范围, 利用该区间采样数据解决 CT 饱和时零序方向元件误判问题, 但两者均只考虑暂态饱和情况, 且并没有解决饱和和电流畸变的问题。文献[17-18]推导了 CT 在两种饱和工况下一、二次侧电流的表达式, 以定量的形式分析了畸变电流产生的原因及主要影响因素, 同时以 Jiles Atherton(JA)模型为例在 PSCAD/EMTDC 平台搭建 CT 电磁模型, 为进一步仿真研究提供思路。

饱和发生后畸变电流的重构还原是另一个重要的研究方向。文献[19]明确指出即使在深度饱和工况下, 一个周波内仍存在一定的线性传变区, CT 二次电流仍能准确对应一次电流情况, 挖掘该段区间内电流的信息能有效实现畸变电流重构。文献[20-21]提出采用泰勒级数展开结合递推最小二乘法对故障电流进行拟合预测。文献[22]则进一步结合线性传变区间的磁通变化趋势, 提出一种综合饱和识别与电流重构的方案, 然而该类方法对数据窗长度及采样率提出了较高要求, 同时在饱和程度较深时重构效果及准确度大幅下降, 难以实现电流的准确传变。文献[23]利用电磁互感器等铁磁元件饱和后出现的“波形塌陷”特征, 建立了一周波内的紧邻集以及基准比较量, 提升了饱和识别能力, 但未涉及饱和情况下的电流波形重构问题。文献[24]采用扩展卡尔曼滤波器(extended Kalman filter, EKF), 通过对故障电流各次分量建立状态空间模型来进行饱和区电流的重构, 具有较高的精度, 但其应用条件较为苛刻, 且抗噪声和谐波干扰的能力有待验证。

新能源电源接入背景下, 线路故障特性更为复杂, 也给 CT 饱和识别及电流重构带来新的挑战。文献[25]考虑风电接入场景下的 CT 饱和电流重构方法, 将仿真数据作为长短期记忆网络(long short-term memory, LSTM)训练的样本集从而构建一、二次电流间的映射模型, 在线阶段使用故障后的半周二次电流作为输入来重构整周一次电流, 具有较高的重构精度, 但该方法涉及样本集极为庞大, 计算

量与计算速度是否合适仍有待商榷。

综合上述研究成果考量, 在故障大电流影响下 CT 饱和现象将不可避免地出现, 而现有的饱和识别、重构方法仅考虑单一电流量, 重构精度仍有待提高。CT 测点处往往同时装设电压互感器(potential transformer, PT), 且 PT 不会因为故障大电流而引起饱和, 这意味着可以考虑使用准确的电压量辅助 CT 二次饱和电流的识别及重构。本文提出一种基于 U-I 象空间分布的饱和状态识别及畸变电流重构方法, 利用分布特征与椭圆曲线的相似性, 提取线性传变区少量的采样点完成畸变电流的重构, 并通过 PSCAD/EMTDC 搭建 220 kV 输电线路模型与新能源并网模型, 验证了该方法的适应性及重构精度。

## 1 CT 饱和机理及 U-I 曲线特征

### 1.1 电流互感器饱和机理分析

电流互感器能将大幅值的一次电流转换为幅值较小的二次电流, 是电力系统中必不可少的测量、保护元件。以工程实际中应用最为广泛的铁磁式互感器为例, 其物理模型及等效电路如图 1 所示。

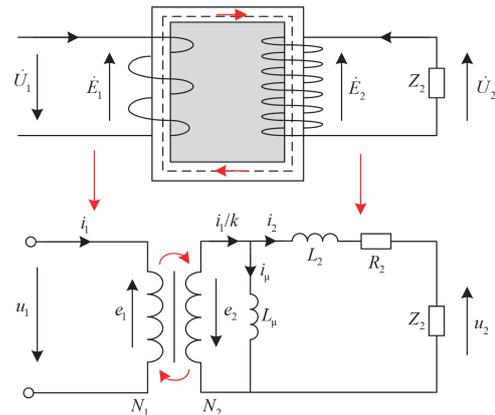


图 1 CT 模型及等效电路

Fig. 1 CT model and equivalent circuit

图 1 中:  $u_1$ 、 $i_1$ 、 $e_1$  分别为一次电压、一次电流及感应电动势;  $i_1/k$  ( $k = N_2/N_1$ )、 $i_\mu$ 、 $i_2$  分别为一次传变全电流、励磁电流及二次电流;  $L_\mu$ 、 $L_2$ 、 $R_2$  及  $Z_2$  分别为励磁支路电感、二次绕组电感、二次绕组电阻及二次侧负荷阻抗;  $N$ 、 $e$  分别为匝数和感生电动势。根据等效电路, 可列回路方程如式(1)所示。

$$\frac{L_\mu}{k} \cdot \frac{di_1}{dt} = (R_2 + Z_2)i_2 + (L_\mu + L_2) \frac{di_2}{dt} \quad (1)$$

理想情况下, 一次电流为正弦周期性电流,  $i_1 = I_m \sin(\omega t)$ , 忽略二次侧所接负荷的阻抗  $Z_2$  及绕组匝数变比  $k$  的影响, 有

$$\begin{cases} i_2 = I_m \sin(\omega t) - \frac{I_m}{\omega T_2} e^{-\frac{t}{T_2}} \\ i_\mu = -\frac{I_m}{\omega T_2} \cos(\omega t) + \frac{I_m}{\omega T_2} e^{-\frac{t}{T_2}} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $I_m$  为一次电流幅值;  $T_2$  为二次回路的时间常数, 可见励磁电流  $i_\mu$  及二次电流  $i_2$  均包含非周期分量。正常运行状态下, 励磁支路电感  $L_\mu$  值较大且波动很小, 使得时间常数  $T_2$  很大, 励磁电流  $i_\mu$  几乎为 0, 此时一、二次侧电流可视作满足线性传变关系。

线路出现相间短路故障时, CT 一次电流骤然抬升, 短路电流中包含大量非周期分量, 其中绝大多数无法通过 CT 内部绕组准确传变至二次侧, 反而涌入励磁支路, 此时励磁电流表示为

$$i_\mu = \frac{I_m T_1}{T_2 - T_1} (e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_1}}) - \frac{I_m}{\omega T_2} \sin(\omega t) \quad (3)$$

式中:  $T_1$  为一次回路时间常数。随着 CT 内部铁芯磁通的累加, 铁芯向饱和状态趋近。励磁电感  $L_\mu$  不断减小, 则二次回路时间常数不断降低, 励磁支路电流进一步扩大, 自然导致二次侧电流  $i_2$  不断减小, 一、二次侧电流  $i_1$ 、 $i_2$  不再满足线性传变关系, 从而产生了极大的传变误差。

### 1.2 不同 CT 暂、稳态饱和程度特征分析

系统运行过程中的短路故障引起一次电流激增, 故障暂态初期包含大量衰减的非周期分量, 这是引起 CT 暂态饱和的主要原因。在 CT 既定参数及二次回路阻抗角不变的情况下, 一次电流不同的故障初相角、幅值大小、回路时间常数等因素均将影响电流畸变程度, 引发不同程度的 CT 饱和现象。以标准正弦周波为基准, 定义 4 种不同 CT 暂态饱和程度, 其定义及典型波形分别如表 1 和图 2 所示。

图 2 所示为 ABC 相间故障情况下 A 相 CT 所测二次电流波形情况, 受叠加的直流分量影响, 故障暂态过程中波形明显偏向坐标轴正侧(此种故障工况下 B、C 相电流均偏向坐标轴负侧), 二次电流失去了正负半周对称的特点。

表 1 不同 CT 暂态饱和程度定义

Table 1 Different CT saturation definitions

CT 暂态饱和程度	二次电流畸变率/%	二次电流饱和拐点时刻	二次电流线性传变时长/ms
轻微	0~25	3/4~1 周波	15~20
中度	25~50	1/2~3/4 周波	10~15
较重	50~75	1/4~1/2 周波	5~10
重度	75~90	1/10~1/4 周波	2~5

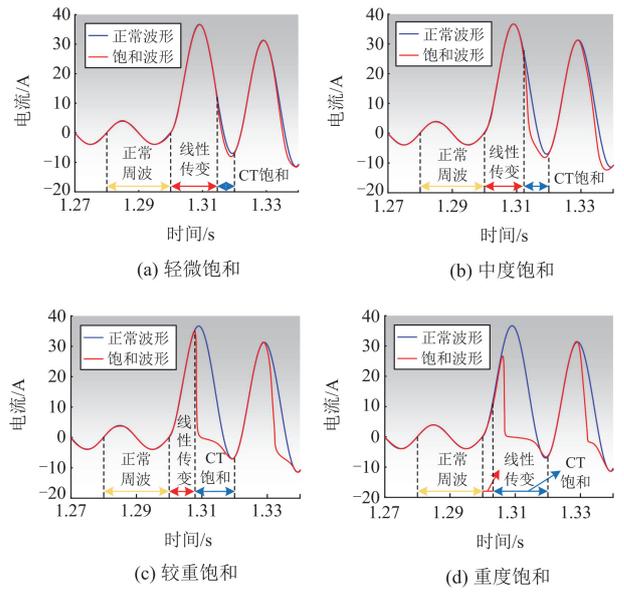


图 2 不同程度 CT 暂态饱和电流波形

Fig. 2 Transient saturation current waveforms of CT with different degrees

一般而言, CT 稳态饱和主要是由不包含非周期分量的大故障电流超过互感器 P 级额定限值引起的, 其畸变后的二次电流在周期内呈现明显的正负半周对称特点<sup>[19]</sup>, 同时也会存在一定程度的脉冲型, 典型 CT 稳态饱和时的畸变电流波形如图 3 所示。

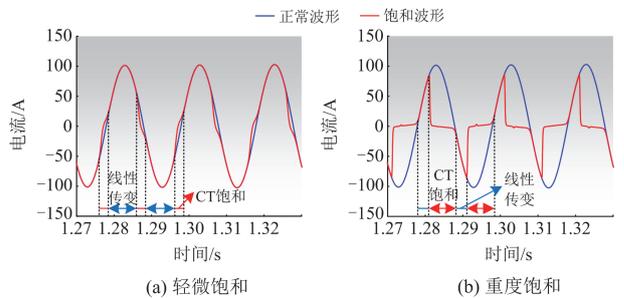


图 3 不同程度 CT 稳态饱和电流波形

Fig. 3 Steady-state saturation current waveforms of CT with different degrees

与暂态饱和的严重程度定义方法相似, 将 CT 稳态饱和和严重程度划分为 4 个等级, 如表 2 所示。

但无论是 CT 暂态饱和还是稳态饱和, 也无论饱和程度有多严重, 在故障发生后一个周波内均存在一段线性传变区<sup>[16]</sup>, 此段区间内二次电流仍能正常反映一次电流情况, 即使在严重饱和程度下, 这一时间也至少有 2~3 ms。在暂态饱和情况下, 线性传变区仅出现一段且持续到畸变发生时刻, 这段区间长度随着 CT 暂态饱和严重程度的加深而缩短; 而

表 2 不同 CT 稳态饱和程度定义

Table 2 Different CT saturation definitions			
CT 稳态饱和程度	二次电流畸变率/%	二次电流饱和拐点时刻	二次电流线性传变时长/ms
轻微	0~25	0~1/8 周波	15~20
		1/2~5/8 周波	
中度	25~50	1/8~1/4 周波	10~15
		5/8~3/4 周波	
较重	50~75	1/4~3/8 周波	5~10
		3/4~7/8 周波	
重度	75~90	3/8~9/20 周波	2~5
		7/8~1 周波	

在稳态饱和情况下, 线性传变出现在周波发展初始阶段及相应过零后负半周波初始阶段, 即一周波内出现两段线性传变区间且呈现明显的正负半波对称特点。

## 2 U-I 象空间分布特征分析及 CT 饱和识别

### 2.1 正常工况下 U-I 象空间分布特征

现有线路 CT 饱和识别及重构方法主要依赖二次电流波形的局部畸变特征, 受限于单一物理量的信息维度, 难以揭示铁芯传变特性的动态演化机理。为此, 本文提出基于 U-I 象空间分布的分析方法, 通过同步关联输电线路监测点处互感器 PT 与 CT 的二次电气量, 将 CT 二次电流采样值作为横坐标, PT 电压采样值作为纵坐标, 在二维平面中构建电压-电流的动态映射轨迹<sup>[26]</sup>, 实现对 CT 饱和过程的全局特征提取。本方法聚焦于线路测点处的 CT 饱和识别与畸变电流重构, 仅基于本地 PT 与 CT 的同步采样数据, 各测点的轨迹曲线独立反映本地 CT 的传变特性。且未涉及需多 CT 协同工作的设备(如变压器差动保护中的多侧 CT), 因此无需处理多 CT 饱和的交互问题。

在绘制轨迹之前, 需要对电压、电流信号量进行提取与标么化处理。

对于二次电流量  $I_2$ , 假设采样时刻为  $t_n$ , 有

$$\begin{cases} k_1 T < |t_n - t_{pk}| < (k_1 + 1)T, t_{pk} < t_n \\ k_2 T < |t_n - t_{lw}| < (k_2 + 1)T, t_n < t_{lw} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $T$  为每周波时长, 在工频下为 20 ms;  $t_{pk}$  为该周波的波峰时刻;  $t_{lw}$  为该周波的波谷时刻;  $k_1$ 、 $k_2$  为常数, 可由检测周波数需求而灵活设置, 本文为方便分析, 均取 1, 在此基础上可生成周波电流采样矩阵  $I_{2M}$ 。

对于电压量, 采样方法与电流量相同, 不再赘述, 同理得到电压采样矩阵  $U_M$ 。然后, 对电流、

电压采样值进行标么化处理。

$$\begin{cases} I_{2Mpu} = I_{2M} / I_{2.norM} \\ U_{Mpu} = U_M / U_{norM} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $I_{2Mpu}$ 、 $U_{Mpu}$  分别为标么化处理后的二次电流和电压采样矩阵;  $I_{2.norM}$ 、 $U_{norM}$  分别为系统正常运行时的稳态电流及电压矩阵。无故障状态下, U-I 象空间分布如图 4 所示。

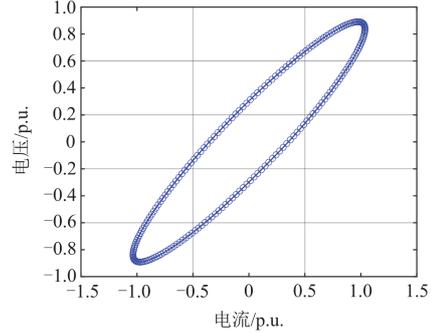


图 4 正常运行情况时 CT 的 U-I 象空间分布

Fig. 4 U-I image space distribution of CT during normal operation conditions

如图 4 所示, 正常运行情况下测点的电压与电流量波形均为标准的正弦曲线, 在一个周波内, U-I 象空间分布的呈现形式为一个椭圆。但对比标准椭圆方程形式, 该曲线会以坐标原点为中心旋转一定角度。这是因为在系统运行时, 线路上或多或少存在一定的无功功率, 造成电压、电流量之间存在一定的相位差异; 同时由于电压、电流基准值选取的差异, 二者标么化处理对应时刻的值并不相同, 这也解释了 U-I 象空间分布呈现为椭圆形式而非标准圆形式。

### 2.2 CT 暂、稳态饱和下的 U-I 象空间分布特征

故障发生后, CT 所在测点处电流、电压量发生突变, 考虑故障电流引起 CT 饱和和无法正确传变一次电流, 分别从 CT 暂、稳态饱和情况下研究 U-I 象空间分布的变化特征。

#### 2.2.1 CT 暂态饱和情况

非周期分量影响下, CT 出现不同程度暂态饱和的典型波形如图 2 所示, 其对应的 U-I 象空间分布如图 5 所示。随着饱和程度的动态演化, U-I 轨迹呈现显著的渐进畸变特性。

如图 5(a)所示, 在暂态饱和初始阶段, U-I 轨迹仍延续正常椭圆的宏观形态, 但受铁芯局部磁滞效应的影响, 曲线发生轻微扭曲变形, 表现为曲率连续渐变特征, 失去理想椭圆的光滑过渡特性。此时轨迹整体仍维持轴对称性, 仅出现向坐标原点方向

的微量收缩。如图 5(b)所示, 在中度饱和阶段, 轨迹对称性被破坏, 局部区域产生向原点塌陷的弧形凹陷, 但曲率变化仍保持连续平滑特性。如图 5(c)所示, 当暂态饱和程度进一步加剧至较重饱和阶段, 约半周轨迹的凹陷区收缩为窄带尖峰结构, 波峰与波谷区域的局部曲率梯度显著增大, 导致超 50%的轨迹偏离正常椭圆形态。如图 5(d)所示, 在暂态饱和和最严重的工况下, 半周轨迹完全塌陷为锐角尖峰状结构, 畸变区段已丧失椭圆轨迹特征。

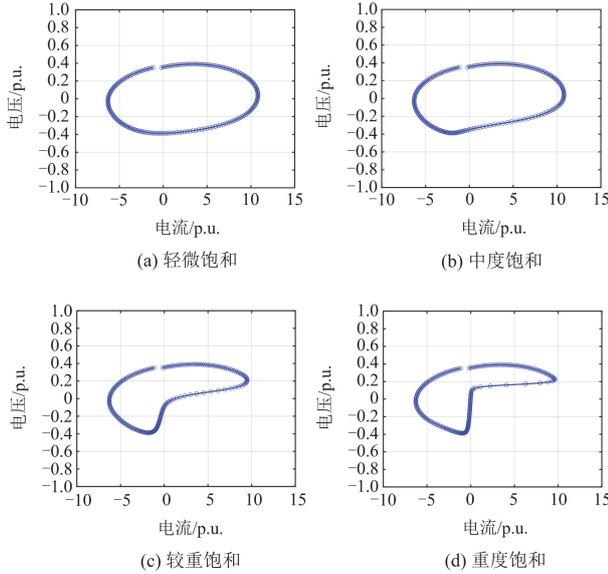


图 5 不同程度 CT 暂态饱和 U-I 象空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of U-I images with different degrees of CT transient saturation

需要重点指出的是, 在重度饱和条件下, 周波初期约 1/4 的轨迹区段仍严格遵循椭圆方程, 其物理本质对应于铁芯未饱和时的线性传变过程。该区段在饱和畸变最显著时仍表现出强鲁棒性, 其几何形态的稳定性为饱和起始点的判定提供了关键特征判据。

### 2.2.2 CT 稳态饱和情况

在故障电流持续作用下, CT 稳态饱和的 U-I 象空间分布特征如图 6 所示。

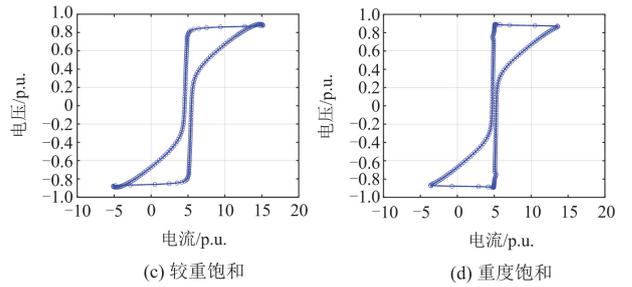
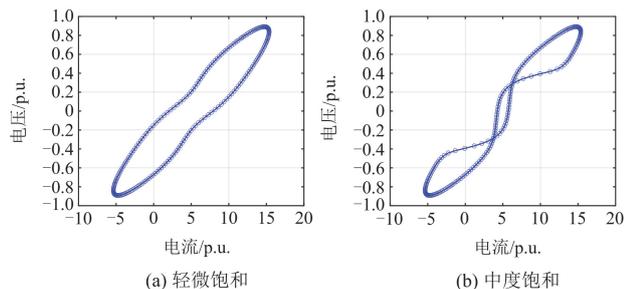


图 6 不同程度 CT 稳态饱和 U-I 象空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of U-I images with different degrees of CT steady state saturation

与暂态饱和的渐进畸变不同, 稳态饱和表现为周波对称性的几何形态突变。如图 6(a)所示, 在轻微饱和时, U-I 象空间分布中轨迹曲线偏离正常椭圆, 呈现对称性横向压缩特征, 正、负半周波内波峰/波谷区域的曲率半径显著增大, 形成类梯形结构的“扁平化”畸变, 但过零点附近仍保留连续弧度。如图 6(b)所示, 随着饱和程度加剧至中度, 波峰/波谷处的磁滞效应导致轨迹出现锐角折线化畸变, 呈现显性的多边形特征。如图 6(c)和图 6(d)所示, 在较重及重度饱和工况下, 曲线轨迹折角锐度与传变误差呈指数关联, 此时电流传变特性已完全脱离线性区域。

值得注意的是, 稳态饱和和工况下周波过零点附近始终存在两段满足椭圆规律的轨迹, 其物理本质源于故障电流交流分量的“负向去磁”效应, 即铁芯在电流过零时短暂退出饱和状态, 恢复线性传变特性。该现象表明, U-I 象空间分布可通过饱和区和非饱和区轨迹的共存特征, 实现稳态饱和程度的量化评估。

## 3 U-I 象空间分布对畸变电流重构

### 3.1 线性传变区间提取方法

选取 50 Hz 理想工频对应的 20 ms 周波时长作为 U-I 象空间分布轨迹绘制的基准, 可以得到完整的椭圆曲线。根据文献[19], 即使是最严重的 CT 饱和情况下, 仍能有至少 2~3 ms 的线性传变区, 对应检测周波时长的 10%~15%; 对于稳态 CT 饱和情况, 由于波形存在正负半波对称畸变, 且过零后存在短暂退出饱和的现象, 这意味着在还原的实际周波时长内存在两段可供提取的椭圆曲线段。那么, 对应 CT 暂、稳态饱和情况下满足线性传变区段的电流可被提取, 表示为

$$\begin{cases} I_{sz} = A_1 e^{-t/\tau} + A_2 \sin(\omega_n t), 0 < t < kT_n \\ I_{sw} = A_3 \sin(\omega_n t), 0 < t < kT_n \end{cases} \quad (6)$$

式中： $I_{sz}$ 、 $I_{sw}$  分别为 CT 暂、稳态饱和情况下线性传变电流； $A_1$ 、 $\tau$  分别为衰减的非周期分量的幅值和时间常数； $A_2$ 、 $A_3$  分别为暂、稳态饱和情况下电流基波的幅值； $\omega_n = 1/f_n$ ， $f_n$  为理想工频 50 Hz； $k$  为线性传变时长取值系数，由前文所述，考虑一定裕度，取 0.10~0.15； $T_n$  为周波时长，取值 20 ms。

新能源大规模接入背景下可能带来频率偏移影响，导致周波时长出现扰动变化。在不触发频率保护的前提下<sup>[27]</sup>，工频波动的上下限约分别为 51 Hz 和 48 Hz，与工频相比，周波时长相差分别为 +392 ms 和 -0.833 ms，若按上述方法提取线性传变区段需要再与系数  $k$  相乘，那么周波时长误差将不超过 0.1 ms，该误差时长相对提取的线性传变区间时长，其影响可忽略不计。

### 3.2 U-I 象空间分布对畸变周波重构

针对 CT 饱和后的二次电流畸变问题，传统方法通常采用泰勒级数展开与递推最小二乘法进行预测重构，但其存在数据窗要求严苛、矩阵运算复杂等局限性。本节结合前述提取的线性传变区段曲线，利用改进后的最小二乘椭圆拟合算法，提出一种更为直观、运算方便的畸变电流波形重构方法。

由前文可知，未发生 CT 饱和情况下二次电流的 U-I 象空间分布均为椭圆形式，其在二维坐标中的曲线形式如图 7 所示。

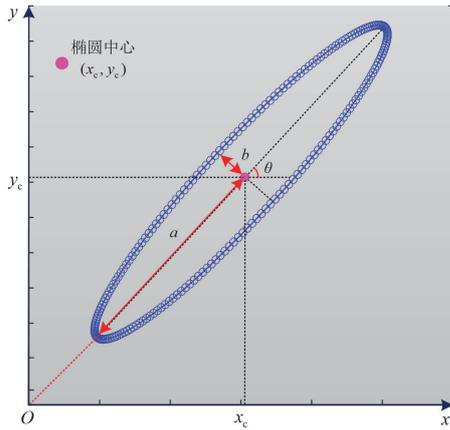


图 7 二维坐标下椭圆曲线示意图

Fig. 7 Elliptic curve schematic in 2D coordinates

椭圆曲线可用含有 6 个常数的方程形式表征：

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (7)$$

且通过椭圆方程可以得到曲线的特征参数如式 (8) 所示。

$$\begin{cases} (x_c, y_c) = \left( \frac{BE - 2CD}{4AC - B^2}, \frac{BD - 2AE}{4AC - B^2} \right) \\ a = 2 \cdot \sqrt{\frac{-2F}{A+C - \sqrt{B^2 + (A-C)^2/F^2}}} \\ b = 2 \cdot \sqrt{\frac{-2F}{A+C + \sqrt{B^2 + (A-C)^2/F^2}}} \\ \theta = \frac{1}{2} \cdot \arctan\left(\frac{F}{A-C}\right) \end{cases} \quad (8)$$

式中： $(x_c, y_c)$  为椭圆中心； $a$ 、 $b$  分别为椭圆的长轴和短轴； $\theta$  为椭圆相对标准形式下的旋转角。

根据 3.1 节，按一定裕度提取出线性传变区内的曲线段。由于按照固定采样频率提取的离散点很难完全分布在同一个椭圆上，故首先进行归一化处理减小误差，引入归一化矩阵  $\lambda_N$ ，有

$$\mathbf{Q}' = \lambda_N \cdot \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} s & 0 & -st_x \\ 0 & s & -st_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{Q} \quad (9)$$

式中： $\mathbf{Q}$ 、 $\mathbf{Q}'$  分别为原始曲线和归一化处理后的坐标矩阵； $(t_x, t_y)$  表示平移向量； $s$  为缩放因子，二者可由式(10)确定。

$$\begin{cases} t_x = \sum_{i=1}^n x_i/n, t_y = \sum_{i=1}^n y_i/n \\ s = \sqrt{2} / \sqrt{\sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i - t_x)^2 + (y_i - t_y)^2}} \end{cases} \quad (10)$$

式中： $(x_i, y_i)$  为采样点坐标； $n$  为采样点个数。完成归一化后，用向量相乘的形式表征椭圆方程，如式(11)所示。

$$\begin{cases} f(\Phi, \mathbf{Q}') = \Phi \cdot \mathbf{Q}' \\ \Phi = (A, B, C, D, E, F) \\ \mathbf{Q}' = (x_i^2, x_i y_i, y_i^2, x_i, y_i, 1) \end{cases} \quad (11)$$

那么根据最小二乘法原理，选取线性传变区内 6 个采样点，确定目标函数及约束如式(12)所示。

$$\begin{cases} f(A, B, C, D, E, F) = \\ \sum_{i=1}^n (Ax_i^2 + Bx_i y_i + Cy_i^2 + Dx_i + Ey_i + F) \\ \frac{\partial f}{\partial A} = \frac{\partial f}{\partial B} = \frac{\partial f}{\partial C} = \frac{\partial f}{\partial D} = \frac{\partial f}{\partial E} = \frac{\partial f}{\partial F} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

求解式(12)，得到由 6 个参数值确定的拟合椭圆。求取各采样点与拟合椭圆的距离，设置距离阈值，若超过 95% 的点满足阈值，则接受该椭圆作为重构后的 U-I 象空间分布曲线。提取横坐标代表的

电流值按时间序列进行重新排列, 实现畸变电流的重构与补偿。重构步骤如图 8 所示。

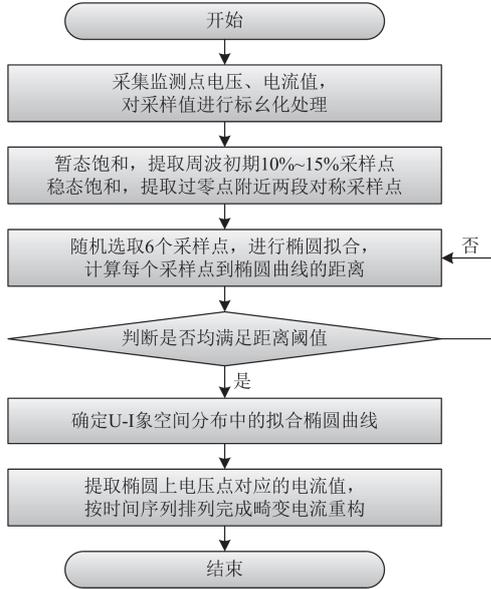


图 8 U-I 象空间分布对畸变电流重构步骤

Fig. 8 U-I image spatial distribution for distortion current reconstruction process

#### 4 仿真验证

在 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建系统拓扑如图 9 所示。

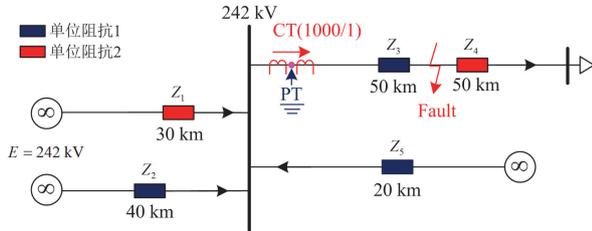


图 9 无穷大电网运行拓扑

Fig. 9 Infinity grid operational topology

给出系统相关元件的参数如表 3 所示。

表 3 系统元件相关参数

Table 3 Related parameters of system component

元件	参数	数值
CT (JA 模型)	残留磁通密度/T	0
	铁芯长度/m	0.638
	铁芯横截面积/m <sup>2</sup>	2.601×10 <sup>-3</sup>
	正序、零序电阻/(Ω/km)	0.210, 0.115
单位阻抗 Z <sub>1</sub>	正序、零序电感/(mH/km)	0.898, 2.290
	正序、零序电容/(μF/km)	0.013, 0.005
	正序、零序电阻/(Ω/km)	0.105, 0.215
单位阻抗 Z <sub>2</sub>	正序、零序电感/(mH/km)	1.258, 0.379
	正序、零序电容/(μF/km)	0.009, 0.006

#### 4.1 CT 饱和识别验证

正常运行情况下, 监测点的 U-I 象空间分布曲线是在标准椭圆曲线的基础上旋转  $\theta$  角度, 椭圆曲线的中心仍在坐标原点上。饱和发生后, 椭圆曲线的中心发生偏移。根据多组实验呈现的结果, A、B、C 三相所在测点在畸变发生后中心呈现明显的偏移规律, 其中 A、B 相的 U-I 曲线向纵轴右侧偏移, 并随着故障合闸角的改变, 中心在一、四象限均有可能存在; C 相对应的 U-I 象空间分布则向纵轴左侧偏移, 故障合闸角的改变也使得中心在二、三象限不均匀分布, 以 A 相测点为例, 选取 CT 暂、稳态轻度饱和的情况进行说明。

如图 10 所示, 考虑一定偏差裕度, 规定无饱和情况下椭圆曲线中心在以坐标原点为圆心、半径为  $d$  的圆内。以坐标原点向 U-I 象空间分布的曲线引直线, 得到原点到曲线两端的距离, 定义为  $d_1$  和  $d_2$ 。则通过判断中心是否偏移而判断饱和是否发生的判据如式(13)所示。

$$\left| |d_1 - d| - |d_2 - d| \right| \geq d_{\text{set}} \quad (13)$$

式中:  $d_{\text{set}}$  为偏移整定值, 视实际情况而定。若满足式(13), 可认为轨迹曲线中心发生偏移, 则发生了饱和现象, 通过设置不同故障及合闸角的验证情况如表 4 所示。

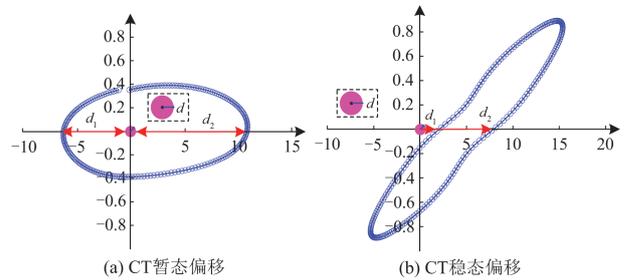


图 10 典型 A 相 CT 饱和偏移

Fig. 10 Typical A-phase CT saturation offset

表 4 CT 饱和判断验证

Table 4 CT saturation judgment verification

故障设置	合闸角设置	是否满足判据	是否饱和
AB 相间故障	0°	是	是
	45°	是	是
	90°	是	是
AB-G 相间故障接地	0°	是	是
	45°	是	是
	90°	是	是
ABC 相间故障	0°	是	是
	45°	是	是
	90°	是	是

根据多组实验验证,在可能产生大电流引起 CT 饱和的故障工况下分别设置不同故障合闸角,所有情况均满足中心偏移及饱和发生,说明该基于 U-I 象空间分布的饱和判据能有效识别 CT 饱和现象。

#### 4.2 CT 不同暂态、稳态饱和程度下拟合验证

根据图 9 拓扑所示的系统结构,以 3.1 节所述 CT 饱和线性传变区段所提取的曲线为基础,采用 3.2 节所述椭圆拟合方法,进行不同饱和程度下(由上自下依次为轻微、中度、较重、重度)的椭圆拟合可行性验证,拟合效果如图 11 所示。

在不同饱和程度下,最少仅需要 6 个采样点即可确定椭圆曲线,这与椭圆方程所需的 6 个参数相对

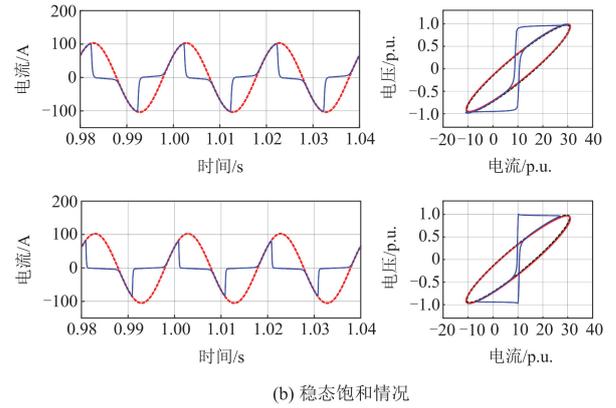
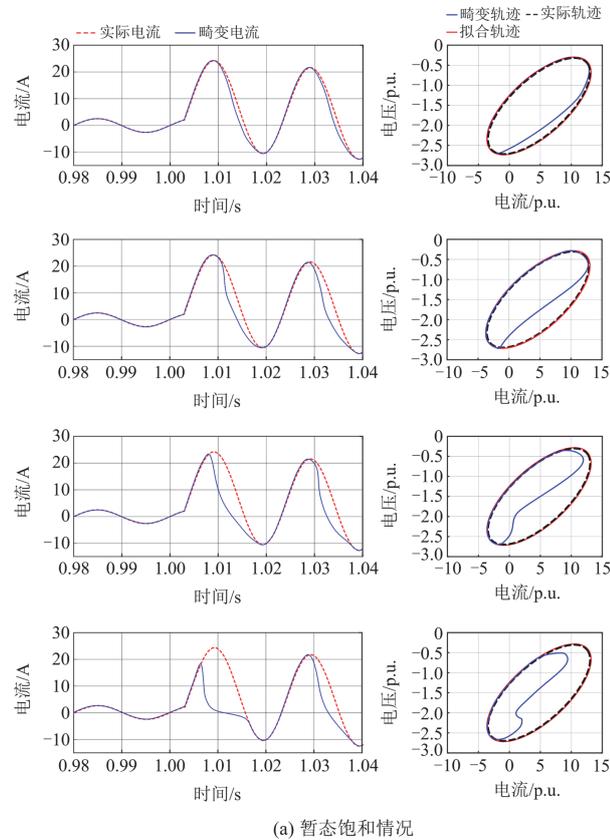


图 11 不同饱和程度下椭圆拟合效果

Fig. 11 Effect of ellipse fitting at different saturation degrees



应。对于饱和程度较轻的曲线,其能取的可用曲线段包含的可用采样点较多,既可以选择紧密排列的样点组,也可以选择分布稀疏一些的样点进行拟合,均能体现良好的拟合性;对于严重饱和情况,其能取的可用曲线段较短,则可用采样点也相对较少,且在可用曲线段上排列更为紧密。但根据验证结果来看,只要在可用区线段上寻得满足拟合椭圆的 6 个及以上采样点,即可得到该条件下的最优拟合椭圆。

进一步采用均方根误差(root mean square error, RMSE)作为衡量精度的标准,相关计算如式(14)所示。

$$e_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_{\text{pre},i} - R_{\text{real},i})^2}{n'}} \quad (14)$$

式中:  $e_{\text{RMSE}}$  为均方根误差;  $R_{\text{pre},i}$  为预测值;  $R_{\text{real},i}$  为实测值;  $n'$  为样本个数。对 CT 暂、稳态饱和的不同严重程度,每组做 10 次拟合验证并计算出均方根误差的平均值,结果如表 5 所示。根据实验结果,随着饱和程度的加深,误差值会随之增大,但总体平均误差值均在 3% 水平以下。在严重级别的拟合验证中, RMSE 最大值不超过 5%。综合考虑,该椭圆拟合方法在不同饱和程度验证中均表现出较高的准确性。

表 5 不同 CT 饱和和工况下 RMSE 平均值

Table 5 Mean RMSE under different CT saturation conditions		
饱和类型	严重程度	RMSE 平均值/%
暂态饱和	轻微	0.71
	中度	0.95
	较重	1.35
	重度	2.52
稳态饱和	轻微	0.32
	中度	0.56
	较重	1.06
	重度	2.60

### 4.3 畸变电流重构验证

对于 CT 饱和发生后的二次电流, 一般利用以最小二乘法为代表的短路电流预测方法实现畸变电流的重构。仿真结果证明, 该方法对于不含衰减分量的稳态饱和畸变电流重构效果较好, 但对于包含衰减非周期分量的暂态饱和情况, 该方法受数据窗长度影响大, 准确性显著降低。本文所述畸变电流重构方法在已知椭圆曲线参数及电压值的情况下, 可得到轨迹曲线上电压点对应的电流值, 以时序表达形式对二次电流进行还原, 即可得到补偿后的电流值。设置故障开始时刻为 1.003 s, 数据窗均选用 20 ms, 用两种方法对 CT 在不同暂态饱和严重程度(由上自下依次为轻微、中度、较重、重度)下的畸变电流重构效果如图 12 所示。

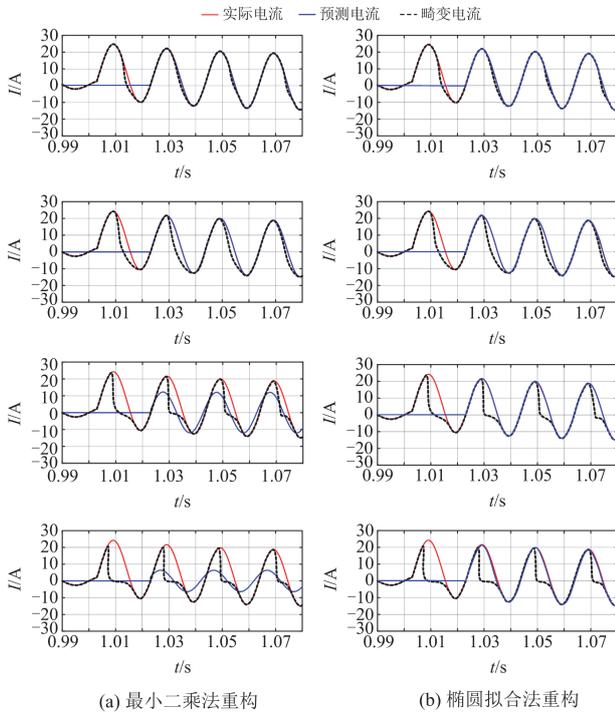


图 12 两类畸变电流重构方法效果对比

Fig. 12 Comparison of the effects of two types of distortion current reconstruction methods

对两种畸变电流重构方法在各情况下每组做 10 次实验, 得到 RMSE 平均值如表 6 所示。

### 4.4 新能源接入及谐波与噪声影响验证

在图 9 所示无穷大电网拓扑基础上, 引入一个容量为 100 MW 的双馈电源, 同时对新能源电源设置相应的滤波元件, 保证故障发生后尽量去除高次谐波的影响, 具体拓扑如图 13 所示。

故障发生后, 若按照固定时间窗, 如 20 ms, 则极有可能受到新能源电源带来的频率偏移的影响,

导致曲线不闭合或过闭合, 如图 14 所示。

表 6 不同 CT 饱和情况下两类电流重构方法 RMSE 平均值  
Table 6 Mean RMSE of two types of current re-configuration methods under different CT saturation conditions

饱和类型	严重程度	最小二乘法 RMSE 均值/%	椭圆拟合法 RMSE 均值/%
暂态饱和	轻微	1.52	0.51
	中度	4.78	0.62
	较重	42.77	1.52
	重度	71.25	4.87
稳态饱和	轻微	0.51	0.21
	中度	0.82	0.34
	较重	2.52	0.75
	重度	3.17	1.28

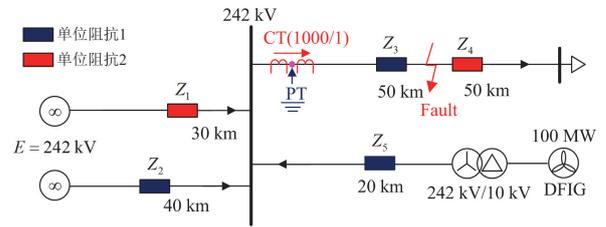


图 13 新能源接入大电网拓扑

Fig. 13 New energy access to the large power grid topology

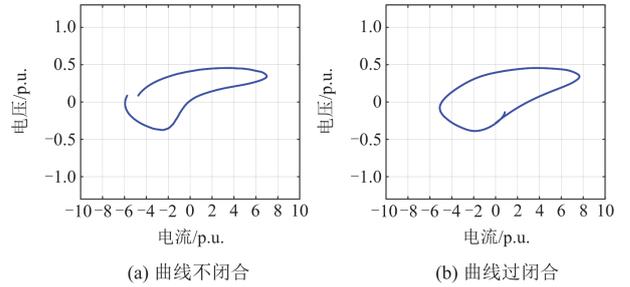
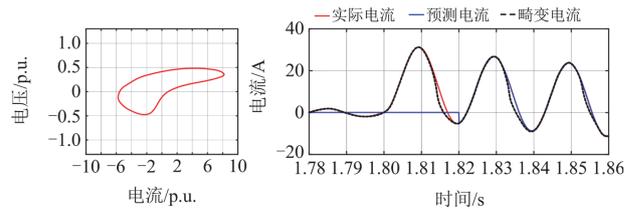


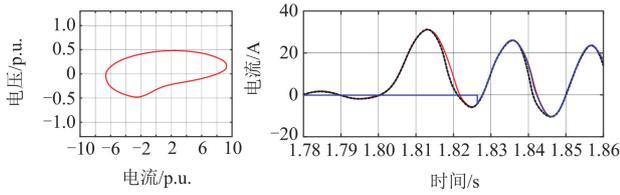
图 14 频率偏移影响曲线闭合情况

Fig. 14 Curve closure affected by frequency offsets

因此, 按照 3.1 节所述步骤, 通过识别周波内的电流峰值与谷值, 还原实际的周波时长。当然, 受限于采样频率, 可能无法精准定位每一个峰、谷值的具体时刻, 采用插值处理可有效提升精度。还原实际的周波时长后, U-I 曲线不闭合或过闭合的情况得以修正, 对应周波的 U-I 曲线图像及畸变电流重构效果如图 15 所示。



(a) U-I 曲线不闭合修正



(b) U-I曲线过闭合修正

图 15 修正后 U-I 曲线及畸变电流重构效果

Fig. 15 Corrected U-I curve and the reconstruction effect of distortion current

仿真结果证明，通过波形性质还原实际周波时长对新能源接入后带来的频率偏移问题有较好的应对效果，在不同饱和严重程度下电流重构的 RMSE 平均值未超过 5%。

受限于新能源电源的控制策略，其馈出的电流幅值远小于其他电源所在线路，因而其提供的谐波分量相对大故障电流背景下测点处 CT 饱和的影响可忽略。同时实际线路一般配备滤波器，能有效过滤高次谐波，为验证谐波分量对本文方法的影响，在故障期间对线路定量注入以二、三次谐波为主的谐波电流，且每种情况做 10 组仿真测试，得到 RMSE 平均值如表 7 所示。由结果可见，当注入谐波占比小于 10% 时，该重构方法仍能保持较好的准确性，当注入谐波占比超过 10% 后，准确性下降程度较高。但结合线路故障情况，无论是对称性故障还是非对称性故障，在加入滤波器后谐波分量占比很小，因此本文方法准确性得以保障。

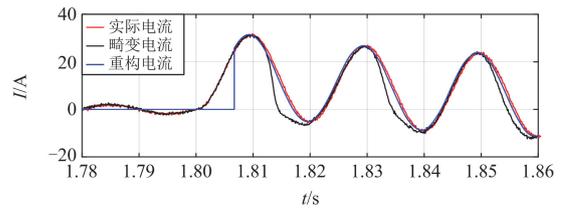
表 7 不同谐波注入下 RMSE 平均值

Table 7 Mean RMSE under different harmonic injection

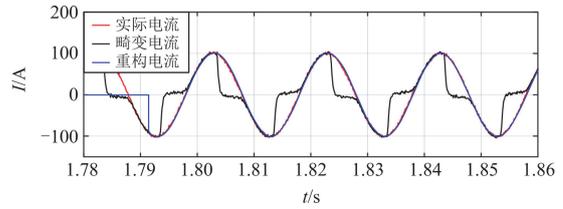
注入谐波 占比/%	RMSE 平均值/%	
	暂态	稳态
0~3	2.62	2.17
3~6	4.83	3.78
6~9	7.56	7.14
9~12	10.89	9.87
12~15	18.21	13.74

在此基础上，进一步进行噪声干扰测试，对中度及以下程度的暂、稳态饱和和二次电流加入 20 dB 噪声干扰。典型的暂、稳态饱和畸变电流重构效果如图 16 所示。

每种饱和情况做 10 组仿真测试，得到 RMSE 平均值如表 8 所示。从噪声验证的结果来看，相比无穷大电网系统的畸变电流重构准确性均有一定程度的下降，但总体误差均在 10% 以下，仍保持较好的重构精度。



(a) 暂态饱和和重构



(b) 稳态饱和和重构

图 16 噪声加入后电流重构效果

Fig. 16 Effect of current re-construction after noise is added

表 8 不同噪声干扰下 RMSE 平均值

Table 8 Mean RMSE under different noise interference

饱和程度	RMSE 平均值/%	
	暂态	稳态
轻微	3.79	2.56
中度	4.78	3.38
较重	5.78	5.02
重度	7.89	6.87

## 5 结论

本文针对故障大电流引发 CT 饱和导致的二次电流失真问题，提出一种基于 U-I 象空间分布多维特征融合的饱和识别与畸变电流重构方法，主要结论如下。

1) 突破传统单一电流分析维度，融合电压-电流动态轨迹的 U-I 象空间分布双模式识别机制，利用 PT 不存在饱和问题的优越性，抑制 CT 饱和导致的单一信号失真对状态辨识的干扰。但为了避免暂态瞬间电压、电流同时剧烈波动引起轨迹曲线特征混乱，以故障后半周波开始进行畸变电流重构。

2) 通过 U-I 象空间分布中轨迹曲线的几何畸变特征量化表征 CT 暂、稳态饱和程度，结合改进的椭圆拟合算法，用 6 个及以上线性转变区段的采样点即可实现二次畸变电流的重构。相比传统基于泰勒级数展开的短路电流预测重构方法，本文所提方法对数据窗长度要求低，计算量小，重构精度高。

基于 U-I 象空间分布的特征提取机制，可进一步研究其在多端差动保护自适应整定、饱和电流谐波分量分离等场景的扩展应用，推动保护系统智能化升级。

## 参考文献

- [1] 郑浩, 林湘宁, 金能, 等. 母线保护 TA 饱和快速闭锁与再开放判据研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5805-5816.  
ZHENG Hao, LIN Xiangning, JIN Neng, et al. Research on TA saturation fast blocking and reopening criterion for bus protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19): 5805-5816.
- [2] 李振兴, 王扬曠, 望周丽, 等. 通信限制下多 DG 接入配网的新型电流差动保护[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2): 80-89.  
LI Zhenxing, WANG Yangze, WANG Zhouli, et al. A novel current differential protection for multiple DGs accessing a distribution network with a communication limitation[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 80-89.
- [3] 徐文浩, 徐启峰, 谢楠. 基于四电平编码与弱光通信的极低功耗传光式电流互感器[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(5): 148-157.  
XU Wenhao, XU Qifeng, XIE Nan. An ultra-low power optical current transformer based on four-level coding and weak-light communication[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(5): 148-157.
- [4] 顾乔根, 张晓宇, 吕航, 等. 柔性低频输电系统的主变稳态负序差动保护[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(5): 168-177.  
GU Qiaogen, ZHANG Xiaoyu, LÜ Hang, et al. Steady state negative sequence differential protection of a transformer in a flexible low-frequency transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(5): 168-177.
- [5] 邢家维, 金能, 林湘宁, 等. 基于小波包变换的电流互感器饱和识别及有效数据运用策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6): 1170-1179.  
XING Jiawei, JIN Neng, LIN Xiangning, et al. A novel strategy of current transformer saturation identification and valid data application based on wavelet packet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6): 1170-1179.
- [6] 王兴国, 于溯, 周泽昕, 等. 基于电流突变采样值轨迹特征的快速母线保护[J]. 电网技术, 2023, 47(4): 1423-1431.  
WANG Xingguo, YU Su, ZHOU Zexin, et al. Bus protection based on trajectory characteristics of current sample value mutation[J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1423-1431.
- [7] 王波, 尹仕红, 肖勇, 等. 基于 RFC-SAGA-RBF 的直流偏磁下 CT 畸变电流反衍方法[J]. 南方电网技术, 2024, 18(12): 51-61.  
WANG Bo, YIN Shihong, XIAO Yong, et al. Inverse propagation method of CT distortion current under DC bias based on RFC-SAGA-RBF[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(12): 51-61.
- [8] 宋许鹏, 杨小洋, 樊征臻. 基于电流合成矢量轨迹特性的双馈风电场主变压器差动保护[J]. 中国电力, 2025, 58(2): 9-21.  
SONG Xupeng, YANG Xiaoyang, FAN Zhengzhen. Differential protection of main transformer of doubly-fed wind farm based on current synthesized vector trajectory characteristics[J]. Electric Power, 2025, 58(2): 9-21.
- [9] LIANG Y, REN Y, YU J, et al. Current trajectory image-based protection algorithm for transmission lines connected to MMC-HVDC stations using CA-CNN[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(1): 1-15.
- [10] 戚宣威, 李露, 黄晓明, 等. 区外故障导致变压器电流互感器饱和及差动保护误动问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 44-51.  
QI Xuanwei, LI Lu, HUANG Xiaoming, et al. Study on the CT saturation and mal-operation of the transformer current differential protection during external faults[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 44-51.
- [11] 郑涛, 于佳旭, 睦程曦, 等. 基于磁路耦合的 Sen 变压器差动保护方案[J]. 中国电力, 2025, 58(3): 108-118.  
ZHENG Tao, YU Jiaxu, SUI Chengxi, et al. Sen transformer differential protection scheme based on magnetic circuit coupling[J]. Electric Power, 2025, 58(3): 108-118.
- [12] 马显映, 刘小状, 陈小松. 电流互感器磁饱和特性对继电保护的影响及防范[J]. 电工技术, 2023(22): 190-192.  
MA Xianying, LIU Xiaozhuang, CHEN Xiaosong. Impact of magnetic saturation characteristics of current transformers on relay protection and its prevention[J]. Electric Engineering, 2023(22): 190-192.
- [13] 李乃永, 张美玲, 王昕, 等. 实现 GIS 故障精准辨识切除及自动恢复供电的母线保护新原理[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2965-2971.  
LI Naiyong, ZHANG Meiling, WANG Xin, et al. A new bus protection principle of GIS fault accurate isolation and automatic restoration of power supply[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2965-2971.
- [14] 周泽昕, 王兴国, 杜丁香, 等. 一种基于电流差动原理的变电站后备保护[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1113-1120.  
ZHOU Zexin, WANG Xingguo, DU Dingxiang, et al. A substation backup protection based on current differential protective principle[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1113-1120.
- [15] 刘益青, 高伟聪, 王成友, 等. 基于差电流半周积分特征的电流互感器饱和和识别方法[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2889-2896.  
LIU Yiqing, GAO Weicong, WANG Chengyou, et al.

- Detection method for current transformer saturation based on characteristic of differential current by half-cycle integral algorithm[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(9): 2889-2896.
- [16] 刘益青, 武凯, 徐明阳, 等. 基于 CT 饱和准确识别的零序方向元件改进方案[J]. *电网技术*, 2021, 45(10): 4161-4174.  
LIU Yiqing, WU Kai, XU Mingyang, et al. Improved scheme of zero-sequence direction element based on accurate recognition of CT saturation[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(10): 4161-4174.
- [17] 张志良. 电流互感器饱和检测方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.  
ZHANG Zhiliang. Study on current transformer saturation detection method[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [18] 黄婷. 电流互感器饱和和特性对变压器差动保护的影响研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.  
HUANG Ting. Research on the impact of current transformer saturation on transformer differential protection[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [19] 吴崇昊, 陆于平, 刘小宝. 基于电流互感器线性传变区检测的母线采样值差动保护[J]. *电网技术*, 2008, 32(14): 70-74.  
WU Chonghao, LU Yuping, LIU Xiaobao. Busbar sampled value differential protection based on linear transfer section checking of TA[J]. *Power System Technology*, 2008, 32(14): 70-74.
- [20] 黄智慧, 段雄英, 邹积岩, 等. 基于改进 RLS 算法的故障电流参数估计[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(15): 2460-2469.  
HUANG Zhihui, DUAN Xiongying, ZOU Jiyan, et al. Fault current parameter estimation based on adaptive RLS algorithm[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(15): 2460-2469.
- [21] 马啸, 刘畅, 陈乐, 等. 应对不确定性短路电流超标的保护柔性跳闸策略[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(19): 5782-5792.  
MA Xiao, LIU Chang, CHEN Le, et al. Flexible tripping strategy dealing with uncertain excessive short-circuit current[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(19): 5782-5792.
- [22] 王峰, 朱佳, 焦邵麟, 等. 磁通密度特征分析与 CT 饱和区识别及重构技术[J]. *中国电力*, 2023, 56(10): 179-185.  
WANG Feng, ZHU Jia, JIAO Shaolin, et al. Informer photovoltaic power generation forecasting based on cycle information enhancement[J]. *Electric Power*, 2023, 56(10): 179-185.
- [23] 杨国生, 杜丁香, 柳焕章, 等. 基于波形塌陷的铁磁元件饱和识别与开放新方法[J/OL]. *电网技术*: 1-10[2025-01-01]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1084>  
YANG Guosheng, DU Dingxiang, LIU Huanzhang, et al. A new method for saturation identifying and opening up of ferromagnetic components based on waveform collapse[J/OL]. *Power System Technology*: 1-10[2025-01-01]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1084>
- [24] 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.
- [25] 黄梓欣, 林湘宁, 马啸, 等. 含风电继电保护应用中的电流互感器饱和和电流重构方法[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(19): 4823-4834.  
HUANG Zixin, LIN Xiangning, MA Xiao, et al. Reconstruction method of saturation current of current transformer in relay protection application related to wind power[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(19): 4823-4834.
- [26] 汪颖, 杨维, 肖先勇, 等. 基于 U-I 象空间分布精细化识别的非侵入式居民负荷监测方法[J]. *电网技术*, 2021, 45(10): 4104-4113.  
WANG Ying, YANG Wei, XIAO Xianyong, et al. Non-intrusive residential load monitoring method based on refined identification of U-I trajectory curve[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(10): 4104-4113.
- [27] 李雪萍, 王自力, 陈燕东, 等. 基于虚拟惯量模糊自适应的新能源逆变器频率主动支撑策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(20): 25-37.  
LI Xueping, WANG Zili, CHEN Yandong, et al. Active frequency support strategy for new energy inverters based on virtual inertia fuzzy adaptive control[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(20): 25-37.

收稿日期: 2025-03-06; 修回日期: 2025-06-03

作者简介:

李振兴(1977—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: lzx2007001@163.com

张星宇(2001—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: zhangxy0161@163.com

(编辑 魏小丽)