

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250394

# 地铁杂散电流影响下的电流互感器传变特性分析

谢昱韬<sup>1</sup>, 林圣<sup>1</sup>, 范浩然<sup>1</sup>, 王爱民<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 611756; 2. 西华大学电气与电子信息学院, 四川 成都 610039)

**摘要:** 我国直流地铁系统大多采用钢轨进行回流, 因钢轨对地无法实现完全绝缘, 部分回流电流泄漏将形成杂散电流。杂散电流入侵城市电网将导致电磁式电流互感器传变误差增大, 甚至造成铁芯饱和、二次电流畸变等不利影响。现有研究普遍基于恒定直流影响下的电流互感器传变特性展开分析, 并不能准确刻画杂散电流低频正负交变、随机波动的特性以及其对电流互感器传变特性的影响。因此, 将杂散电流等效为直流与各低频分量的叠加; 结合电流互感器等效电路模型建立微分方程组, 推导了电网暂稳态下杂散电流对电流互感器传变特性的影响机理、影响规律及影响因素, 并通过仿真分析进行对比验证。结果表明, 杂散电流长期作用将引发电流互感器直流偏磁, 增大一、二次侧电流幅值差与相角差。杂散电流频率越低、幅值越大, 电流互感器饱和程度越深, 二次侧电流畸变越严重。

**关键词:** 地铁杂散电流; 直流偏磁; 电流互感器; 传变特性

## Analysis of the transfer characteristics of current transformers under the influence of metro stray currents

XIE Yutao<sup>1</sup>, LIN Sheng<sup>1</sup>, FAN Haoran<sup>1</sup>, WANG Aimin<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 2. School of Electrical Engineering and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 611039, China)

**Abstract:** In China, most DC metro systems utilize steel rails for current return. Because complete insulation between the rails and the ground cannot be achieved, part of the return current leaks and forms stray currents. When stray currents intrude into urban power grids, they can increase the transfer errors of electromagnetic current transformers (CTs) and may lead to core saturation and secondary current distortion. Existing studies generally analyze CT transfer characteristics under constant DC influence, which cannot accurately characterize the low-frequency alternating and randomly fluctuating nature of stray currents, nor their impact on CT transfer characteristics. Therefore, this paper models stray currents as the superposition of DC and multiple low-frequency components. By establishing differential equations based on the CT's equivalent circuit model, this paper derives the mechanisms, patterns, and influencing factors of stray currents on CT transfer characteristics under both transient and steady-state conditions, which are further cross-validated through comparative simulations. The findings indicate that long-term exposure to stray currents induces DC bias in CTs, increasing the amplitude and phase angle discrepancies between the primary and secondary currents. The lower the frequency and the larger the amplitude of the stray current, the deeper the CT core saturation and the more severe the distortion of the secondary current.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U2166212).

**Key words:** metro stray currents; DC bias; current transformer; transfer characteristics

## 0 引言

电流互感器是电力系统中测量、控制、保护等装置获取一次电流信息的设备, 其传变特性的正常

与否直接关系到电力系统的安全性和可靠性<sup>[1]</sup>。然而, 当有直流电流流经电流互感器时, 其会在电流互感器励磁支路产生直流分量, 诱发直流偏磁甚至引发铁芯饱和, 导致二次电流发生畸变, 从而改变其传变特性, 甚至造成控制保护失效等严重后果<sup>[2-3]</sup>。

目前, 研究和工程中关注的影响电流互感器传

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(U2166212)

变特性的直流电流主要有两类：1) 高压直流(high voltage direct current, HVDC)输电系统不平衡运行产生的直流入地电流<sup>[4]</sup>；2) 太阳活动影响下由地磁暴产生的地磁感应电流(geomagnetic induced current, GIC)<sup>[5]</sup>。

HVDC 输电系统在单极-大地回路或双极不平衡运行方式下会产生持续的直流入地电流，该电流将通过变压器接地中性点入侵电网并影响电流互感器。一般情况下，土壤电阻率、变压器中性点接地电阻等可认为不变，因而可将 HVDC 入地电流等效为恒定直流<sup>[6]</sup>。在此基础上，学者们对其影响下的电流互感器传变特性进行了深入研究<sup>[7-8]</sup>。其中，文献[7]通过建立电流互感器的等效电路模型，基于感性电路电磁关系方程推导了 HVDC 输电系统入地电流对电流互感器起始饱和时间的定量影响，结果表明，HVDC 输电系统入地电流越大，电流互感器饱和越快；在分析 HVDC 输电系统入地电流对电流互感器暂态传变特性影响的基础上，文献[8]研究了起始饱和时间、二次电流幅频特性与故障初相角的关系，研究表明，短路故障电流幅值不大时，故障初相角越小，电流互感器饱和越快、二次电流畸变越严重。

GIC 因太阳活动袭击地球而产生，主要由直流分量和低频交流分量组成，其频率范围主要集中在 0.001~0.1 Hz<sup>[9]</sup>。考虑到 GIC 的准直流特性，在进行其对电流互感器传变特性的影响分析时，文献大多亦将其等效为恒定直流电流<sup>[10-11]</sup>。当然，也有部分文献注意到 GIC 幅值与方向缓慢变化的交流特征，提出采用低频正弦交流电流对其进行等效的方法，并研究其对电流互感器传变特性的影响<sup>[9, 12]</sup>。其中，文献[9]基于电流互感器等效电路，通过分析 GIC 幅频特性对励磁磁通的作用机理，研究了 GIC 影响下的电流互感器传变特性；结果表明，GIC 的低频特征是改变传变特性的主要原因，当幅值增大或频率降低时，励磁磁通增大，饱和程度加深。在此基础上，文献[12]对比分析了 GIC 与 HVDC 输电系统入地电流影响下的电流互感器传变特性差异，研究表明，不同于持续时间较短且可控的 HVDC 输电系统入地电流，GIC 具有显著的随机性与时变性，因此相同工况下的 GIC 较 HVDC 输电系统入地电流而言对电流互感器的影响更轻；但在极端的 GIC 影响下，电流互感器可能发生严重的局部暂态饱和，此时二次侧饱和电流的二次谐波含量将会降低。

事实上，由于我国地铁多采用直流供电制式，其运行过程因钢轨绝缘问题而不可避免地产生杂散电流<sup>[13-14]</sup>。与 HVDC 输电系统入地电流及 GIC 类似，地铁杂散电流也可经变压器接地中性点入侵电网，成

为新的影响电流互感器传变特性的直流电流来源。

由于我国地铁规模化建设较晚，地铁杂散电流影响下的电流互感器传变特性研究尚处于起步阶段<sup>[15-16]</sup>。文献[15-16]分析了轨道交通杂散电流的时域特点及其影响下的电流互感器传变特性，详细推导了杂散电流对线路距离保护与变压器差动保护的影响，而对于杂散电流的具体频域特性、不同频率成分对电流互感器的影响则考虑较少。随着我国地铁网络化、高密度运行，加之钢轨绝缘性能随运营时间逐渐下降且难以恢复，众多城市电网中的杂散电流日趋增大。例如，南方某沿海城市电网中已监测到高达 114 A 的地铁杂散电流<sup>[17]</sup>。由此可见，地铁杂散电流对电流互感器传变特性的影响不容忽视。

作为一种新型的电流互感器传变特性影响因素，地铁杂散电流的时频特性与 HVDC 输电系统入地电流以及 GIC 均存在显著差异。一方面，地铁杂散电流产生的根本原因是钢轨对地无法做到完全绝缘，因而只要列车取流运行便会泄漏产生杂散电流，即地铁杂散电流持续时间与地铁运营时间有关。同时，文献[18-19]已通过大量现场测试和理论分析证明了地铁杂散电流具有低频正负交变的特性，且其交变周期与地铁列车发车间隔高度相关。另一方面，受地铁列车运行工况变化、沿线钢轨绝缘水平与土壤电阻率分布等因素共同影响，地铁杂散电流的幅值具有较强的波动性和一定的随机性<sup>[20-22]</sup>。然而，目前这种低频正负交变、随机波动且长时间持续作用的地铁杂散电流对电流互感器传变特性的影响尚不清晰，其影响与 HVDC 输电系统入地电流或 GIC 是否类似也不明确。因此，有必要进一步分析研究地铁杂散电流影响下的电流互感器传变特性，保障电网控制与保护系统的安全可靠运行。

为此，本文针对地铁杂散电流影响下的电流互感器传变特性开展研究。基于现场实测数据分析地铁杂散电流的时频域特性，并依此构建杂散电流的等效数学模型；基于此，结合电流互感器等效电路模型，分别推导了电网在稳态运行和短路故障条件下，电流互感器在地铁杂散电流影响下的传变特性，并分析了杂散电流频率、幅值等因素对电流互感器传变特性的影响规律。基于 PSCAD/EMTDC 进行了大量仿真试验，仿真结果验证了理论分析的正确性。

## 1 等效分析模型

### 1.1 电网中杂散电流等效

在我国，钢轨既作为直流地铁的走行轨，又作为牵引电流的回流路径，由于钢轨存在纵向电阻且对地无法实现完全绝缘，回流电流不可避免地泄漏

至大地, 形成杂散电流。以图 1 所示的杂散电流形成与入侵电网示意图为例, 杂散电流经土壤或电缆铠装流至变电站接地网后将导致不同距离的变电站接地网地表电位出现差异, 一旦两个变电站接地网之间存在电位差, 杂散电流即可经接地运行的主变中性点流入变压器绕组, 并进一步经输电线路流入电流互感器一次侧<sup>[23]</sup>。尤其对于含自耦变压器的交流电网而言, 由于自耦变压器高、中压绕组存在直接电气联系, 交流电网面临的杂散电流入侵风险更为严重。

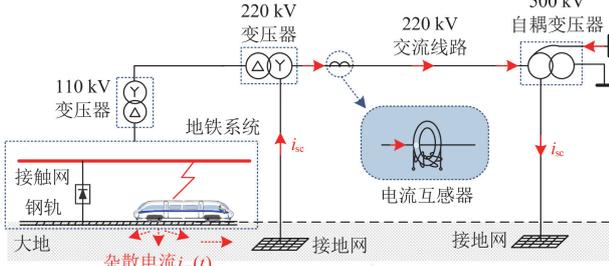


图 1 地铁杂散电流形成与入侵电网示意图

Fig. 1 Schematic diagram of metro stray currents formation and intrusion into the power grid

在入侵杂散电流不同频率成分的作用下, 电流互感器励磁支路将表现出不同的阻抗, 致使流经励磁支路与负载支路的电流幅值、相位出现不同, 引发 CT 特征未知的直流偏磁问题, 进而导致电流互感器传变特性出现差异。

图 2 所示为南方电网某 220 kV 变压器中性点的地铁杂散电流监测波形。

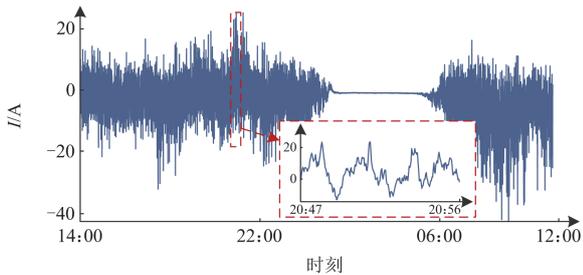


图 2 220 kV 变压器中性点杂散电流波形

Fig. 2 Waveform of stray currents at the neutral point of 220 kV transformer

由图 2 分析可知, 电网中杂散电流的存续特征与地铁的运行时间存在强相关性, 在地铁停运的凌晨时段, 杂散电流几乎为零, 而在地铁运行时段, 杂散电流水平显著升高, 且最值出现在早晚高峰时段。进一步分析发现, 杂散电流还受列车发车间隔、在轨列车数量等多重因素综合影响, 呈现出一定的周期性、随机波动、低频正负交变等复杂特性<sup>[18]</sup>。

对图 2 所示变压器中性点杂散电流进行傅里叶变换, 得到如图 3 所示幅频特性图。由图 3 可知, 杂散电流以直流分量为主, 同时包含低频交流分量, 主要集中在 0~0.1 Hz 频段。

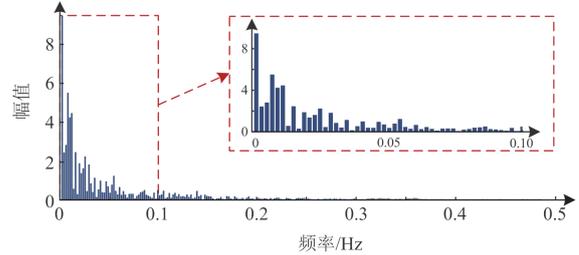


图 3 杂散电流幅频特性

Fig. 3 Amplitude-frequency characteristics of stray currents

为了保证杂散电流等效模型精度的同时简化数学分析, 本文基于对实测杂散电流的幅频特性分析, 选择采用 0~0.1 Hz 频率范围内的交流分量与直流分量叠加的形式对杂散电流  $i_{sc}(t)$  进行等效。假设 0~0.1 Hz 频率范围内交流分量总数为  $k$ , 对应角频率  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k$ , 则杂散电流  $i_{sc}(t)$  可表示为

$$i_{sc}(t) = \sum_{j=1}^k I_j \sin(\omega_j t) + I_{dc} \quad (1)$$

式中:  $j$  为交流分量的序号;  $I_j$ 、 $\omega_j$  分别表示第  $j$  个杂散电流低频交流分量的幅值与角频率;  $I_{dc}$  为杂散电流直流分量幅值。

### 1.2 电流互感器等效分析模型

目前, 电磁式电流互感器仍是我国电网采用的主流互感器, 其本质上是一种特殊变压器, 图 4(a) 为其等效模型, 主要包括一次侧阻抗  $Z_1$ 、二次侧阻抗  $Z_2$ 、励磁支路阻抗  $Z_m$  以及二次侧负载阻抗  $Z_x$ 。图中,  $i_1$ 、 $i_2$ 、 $i_m$  分别表示电流互感器一、二次侧电流以及励磁电流, 其中  $i_1$  为按电流互感器变比  $n$  归算至二次侧的电网一次电流。

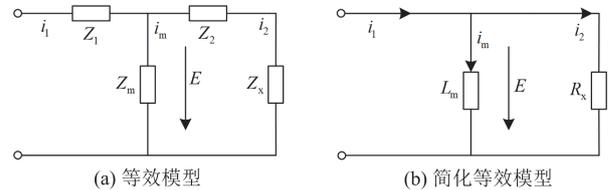


图 4 CT 等效模型

Fig. 4 Equivalent model of CT

电流互感器一次绕组匝数很少, 一次电流完全取决于线路电流, 因而可不计一次侧阻抗  $Z_1$ ; 同时, 由于励磁支路主要表现为感性且励磁电流较小, 铁芯损耗可忽略不计, 即假设励磁电流全部用作建立励磁磁通, 对应的励磁电感记为  $L_m$ ; 此外, 二次侧

绕组电抗在低漏磁电流互感器中一般可忽略不计<sup>[24]</sup>, 为进一步简化计算, 假设负载为纯电阻, 并将二次侧绕组电阻与负载电阻之和记为  $R_x$ <sup>[25]</sup>。综上, 电流互感器的简化等效模型如图 4(b)所示。

此时电流互感器二次时间常数  $T_2$  为

$$T_2 = L_m / R_x \quad (2)$$

根据 KVL 定律, 可对图 4(b)模型列写如式(3)所示的方程。

$$L_m \frac{di_m}{dt} = R_x i_2 \quad (3)$$

铁芯磁通密度  $B$  与励磁电流  $i_m$  满足式(4)。

$$B = L_m i_m / (NS) \quad (4)$$

式中:  $N$  为二次绕组匝数;  $S$  为铁芯截面积。根据  $i_2 = i_1 - i_m$ , 联立式(2)一式(4)可得

$$\frac{dB}{dt} + \frac{B}{T_2} = \frac{R_x i_1}{NS} \quad (5)$$

式(5)描述了电流互感器铁芯磁通密度  $B$  与二次时间常数  $T_2$ 、一次电流  $i_1$  之间的关系。

这样, 在已知杂散电流干扰下的电网一次电流条件下, 即可推导电流互感器铁芯磁通密度和励磁电流的数学表达式, 进而分析其传变误差, 研究杂散电流影响下的电流互感器传变特性。

## 2 稳态运行时杂散电流影响下的电流互感器传变特性分析

### 2.1 稳态运行时电流互感器线性传变特性

电网稳定运行时, 电流互感器一次侧电流(归算至二次侧)  $i_s(t)$  可表示为

$$i_s(t) = I'_0 \sin(\omega_0 t) + \sum_{j=1}^k I'_j \sin(\omega_j t) + I'_{dc} \quad (6)$$

式中:  $I'_0$  为一次侧工频交流电流幅值  $I_0$  归算至二次侧的幅值;  $\omega_0$  为工频交流电流的频率;  $I'_{dc}$ 、 $I'_j$  分别为杂散电流直流分量幅值  $I_{dc}$  以及第  $j$  个低频交流分量幅值  $I_j$  归算至二次侧的幅值。

将式(6)代入式(5), 若不考虑电流互感器剩磁影响, 则杂散电流影响下的电流互感器磁通密度为

$$B_s(t) = \frac{I'_0 L_m}{NS(1 + \omega_0^2 T_2^2)} \left[ \sin(\omega_0 t) + \omega_0 T_2 \left( e^{-\frac{t}{T_2}} - \cos(\omega_0 t) \right) \right] + \sum_{j=1}^k \frac{I'_j L_m}{NS(1 + \omega_j^2 T_2^2)} \left[ \sin(\omega_j t) + \omega_j T_2 \left( e^{-\frac{t}{T_2}} - \cos(\omega_j t) \right) \right] + \frac{I'_{dc} L_m}{NS} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) \quad (7)$$

则电流互感器励磁电流为

$$i_{ms}(t) = \frac{I'_0}{K_0} \sin(\omega_0 t - \arctan(\omega_0 T_2)) + C_0 + \sum_{j=1}^k C_j + \sum_{j=1}^k \frac{I'_j}{K_j} \sin(\omega_j t - \arctan(\omega_j T_2)) + I'_{dc} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) \quad (8)$$

式中:  $K_0 = \sqrt{1 + \omega_0^2 T_2^2}$ 、 $K_j = \sqrt{1 + \omega_j^2 T_2^2}$ , 其均由电流频率与二次时间常数决定; 且令工频交流电流、低频交流分量通过电流互感器传变形成的直流衰减

分量为  $C_0 = \frac{I'_0 \omega_0 T_2}{1 + \omega_0^2 T_2^2} e^{-\frac{t}{T_2}}$ 、 $C_j = \frac{I'_j \omega_j T_2}{1 + \omega_j^2 T_2^2} e^{-\frac{t}{T_2}}$ 。根据

$i_2 = i_1 - i_m$ , 结合式(6)和式(8), 杂散电流影响下电流互感器二次侧电流可表示为

$$i_{2s}(t) = \frac{I'_0 \omega_0 T_2}{K_0} \sin \left[ \omega_0 t + \arctan \left( \frac{1}{\omega_0 T_2} \right) \right] - C_0 - \sum_{j=1}^k C_j + \sum_{j=1}^k \frac{I'_j \omega_j T_2}{K_j} \sin \left[ \omega_j t + \arctan \left( \frac{1}{\omega_j T_2} \right) \right] + I'_{dc} e^{-\frac{t}{T_2}} \quad (9)$$

式(9)表明, 电网稳态运行时, 杂散电流影响下的电流互感器二次侧电流包含 3 个分量: 工频交流分量、低频交流分量与直流衰减分量。

#### 1) 工频交流分量

二次工频交流分量由一次工频交流电流通过电流互感器传变形成。电流互感器处于线性区时二次时间常数  $T_2$  一般为几秒<sup>[26]</sup>, 满足  $\omega_0 T_2 \gg 1$ , 此时  $K_0 \approx \omega_0 T_2$ 。根据式(6)、式(8)与式(9), 二次工频交流分量幅值  $\frac{I'_0 \omega_0 T_2}{K_0}$  近似等于一次工频交流电流归算至二次侧的幅值  $I'_0$ , 且与一次工频交流分量的相角差  $\arctan \left( \frac{1}{\omega_0 T_2} \right)$  接近于  $0^\circ$ 。此时一、二次侧电流

近似呈线性关系, 其幅值差异和相角偏差均较小。

#### 2) 低频交流分量

二次低频交流分量由一次杂散电流低频交流分量通过电流互感器传变形成。由于不同频率交流分量对电流互感器传变特性的影响是相似的, 因而本文选取单一频率的低频交流分量, 分析其低频特征对线性区传变特性的影响。考虑到杂散电流低频交流分量频率远低于工频频率 50 Hz, 满足  $\omega_j T_2 \ll 1$ ,

$K_j \approx 1$ , 此时二次低频交流分量幅值  $\frac{I'_j \omega_j T_2}{K_j}$  小于一次

低频交流分量归算至二次侧的幅值  $I'_j$ , 且二次低频交

流分量相位超前一次低频交流分量  $\arctan\left(\frac{1}{\omega_j T_2}\right)$ 。

此时电流互感器一、二次侧电流之间的幅值差异与相角偏差均较大。

为验证杂散电流低频交流分量对电流互感器传

变特性的影响, 参考表 1 所示的电流互感器与 J-A 模型铁磁材料参数, 其中无磁滞曲线拟合参数 1~4 用于准确拟合无磁滞磁化曲线, 无具体物理意义; 并基于 PSCAD/EMTDC 构建电流互感器模型; 在一次侧输入 1 A、0.006 Hz 低频交流电流的工况下, 仿真得到如图 5 所示的电流互感器电流波形。

表 1 电流互感器以及 J-A 模型铁磁材料参数<sup>[27]</sup>

Table 1 CT and J-A model ferromagnetic material parameters

参数	数值	参数	数值
一次绕组匝数	1	T 修正系数	0.96
二次绕组匝数	1250	域间耦合系数	$4.2 \times 10^{-5}$
二次绕组电阻/ $\Omega$	7.93	饱和磁化强度/(A/m)	$1.7011 \times 10^6$
铁芯截面积/ $\text{cm}^2$	40	无磁滞曲线拟合参数 1	16 346
磁路长度/m	0.85	无磁滞曲线拟合参数 2	18 743
可逆磁化系数	0.1	无磁滞曲线拟合参数 3	259 940
损耗系数	$14 \times 10^{-5}$	无磁滞曲线拟合参数 4	1.8557

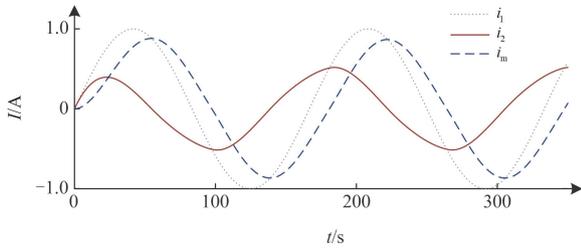


图 5 低频交流电流作用下电流互感器特征量

Fig. 5 Characteristics of CT with low frequency AC acts

由图 5 可以看到, 低频交流电流作用下的电流互感器二次侧电流相较于一次侧电流呈现出幅值减小、相位超前的特性, 与式(9)理论推导一致。这表明一次侧电流有部分流入励磁绕组形成励磁电流, 致使一、二次侧电流之间出现幅值差与相角差。

### 3) 直流衰减分量

二次直流衰减分量由一次工频交流电流、杂散电流低频交流分量与直流量通过电流互感器传变形成。当电流互感器处于线性区时,  $\omega_0 T_2 \gg 1$  且  $\omega_j T_2 \ll 1$ , 此时一次工频交流电流、低频交流分量

传变后的幅值  $C_0 = \frac{I'_0 \omega_0 T_2}{1 + \omega_0^2 T_2^2} e^{-\frac{t}{T_2}}$ 、 $C_j = \frac{I'_j \omega_j T_2}{1 + \omega_j^2 T_2^2} e^{-\frac{t}{T_2}}$

相较于杂散电流直流量通过电流互感器传变形成的  $I'_{dc} e^{-\frac{t}{T_2}}$  而言均较小, 因此二次直流衰减分量主要由  $I'_{dc} e^{-\frac{t}{T_2}}$  构成。

为验证杂散电流直流量对电流互感器传变特性的影响, 在一次侧输入 1 A 直流电流的工况下, 仿真得到如图 6 所示的电流互感器电流波形。

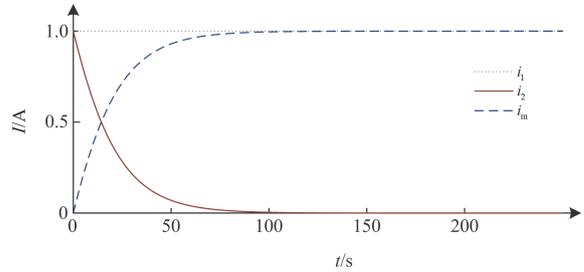


图 6 直流电流作用下电流互感器特征量

Fig. 6 Characteristics of CT when DC acts

由图 6 可以看到, 直流电流作用下的电流互感器二次侧电流从初始峰值迅速下降, 并随时间呈指数趋势衰减至零。这表明一次侧直流电流将逐渐流入电流互感器励磁绕组形成励磁电流。

当稳态运行工况下电流互感器工作于线性区时, 其复合误差可定义为

$$\varepsilon\% = \frac{100}{I_0} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (ni_2 - i_1)^2 dt} \quad (10)$$

式中:  $T$  为一个周波的时间。为综合考虑杂散电流低频交流分量的影响, 取  $T$  为最小低频交流分量的周期。此时, 杂散电流影响下的电流互感器复合误差  $\varepsilon\%$  可表示为

$$\varepsilon\% = \frac{100}{\sqrt{2}K_0} + \sum_{j=1}^k \frac{100I_j}{\sqrt{2}K_j I_0} + \frac{100I_{dc}}{I_0} \quad (11)$$

由式(11)可知, 由于  $K_0$ 、 $K_j$  均与电流频率和二次时间常数呈正相关, 因此, 低频交流分量频率  $\omega_j$ 、二次时间常数  $T_2$  以及工频交流电流幅值  $I_0$  越小, 杂散电流幅值  $I_j$ 、 $I_{dc}$  越大, 电流互感器复合误差  $\varepsilon\%$  越大, 对线性区传变特性的影响也更严重。

## 2.2 稳态运行时电流互感器饱和传变特性

由于电流互感器铁芯的磁滞效应与饱和特性，磁通密度  $B$  的变化滞后于磁场强度  $H$  的变化，并随磁场强度  $H$  的增加而呈现非线性饱和，其对应的磁滞回线如图 7 所示。

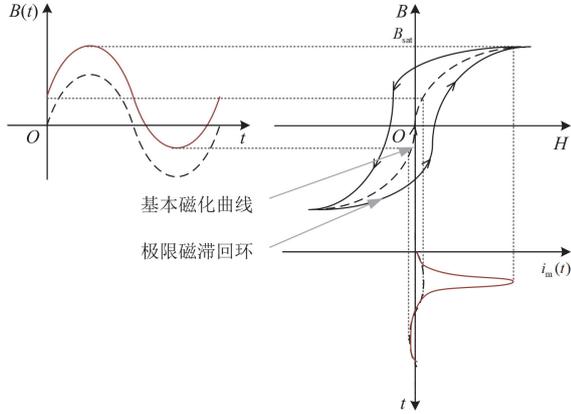


图 7 电流互感器  $B$ - $H$  曲线  
Fig. 7  $B$ - $H$  curve of CT

如图 7 所示，当磁通密度达到饱和磁通密度  $B_{sat}$  时，电流互感器发生饱和，此时磁滞曲线斜率减小，为维持励磁磁通密度，磁场强度进一步增大。由于励磁电流正比于磁场强度 ( $H = Ni_m/L_e$ ，其中  $L_e$  为等效磁路长度)，励磁电流随之增大。

基于图 1 所示的 220 kV 交流线路模型，分别将幅值为 25 A、50 A、100 A 的杂散电流通入表 1 所示电流互感器，仿真电网稳态运行时电流互感器的饱和特征量，如图 8 所示。

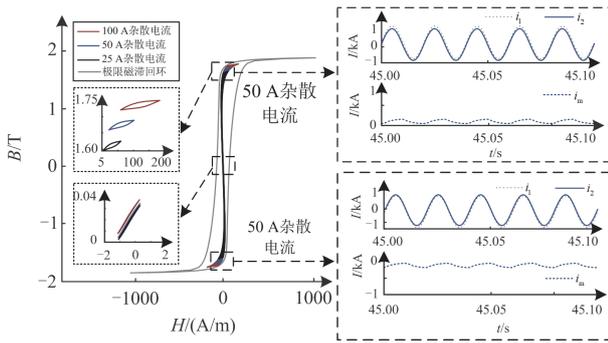


图 8 稳态运行时电流互感器饱和特征量  
Fig. 8 Saturation characteristics of CT under steady-state operation

以图 8 中 50 A 杂散电流作用下的电流互感器为例分析其饱和畸变机理。当电流互感器处于线性区时，磁滞回环斜率较高且狭窄，仅需很小的磁场强度即可建立励磁磁通，此时励磁电感极大、励磁电

流很小，电流互感器传变误差很小。杂散电流极性为正时，其流经励磁支路的部分将抬升磁通密度，并可能在工频正半周末端达到饱和，此时磁滞回环斜率减小且宽度增加，励磁电感减小，励磁电流增加，二次侧电流发生畸变。杂散电流极性为负时，电流互感器发生反向偏磁并在工频负半周末端发生饱和。总体而言，杂散电流幅值越大，其影响下的电流互感器磁通密度幅值越高、饱和程度越深。

鉴于铁芯的磁滞效应会导致解析推导电流互感器传变特性时面临极其复杂的数学关系，本文结合现有文献在分析推导过程中的简化，采取如图 7 所示近似等效的基本磁化曲线进行研究，而忽略磁滞效应的影响<sup>[6-9]</sup>。

## 2.3 电流互感器稳态传变特性影响因素

从式(7)给出的电流互感器磁通密度表达式可以看出，磁通密度的增大意味着励磁电流的增大，此时一、二次侧电流间的幅值差与相角差随之增大；当磁通密度进一步增大至饱和磁通密度时，如图 7 所示，电流互感器发生饱和，二次侧电流出现畸变。因此，电流互感器磁通密度直接关系着其传变特性。电网稳态运行时，式(7)给出的杂散电流影响下的电流互感器磁通密度由工频交流分量和杂散电流分量共同构成。

### 1) 工频交流分量

工频交流分量作用于电流互感器形成的磁通密度  $B_{\omega}(t)$  可表示为

$$B_{\omega}(t) = \frac{L_m I_0'}{NSK_0} [\sin(\omega_0 t - \arctan(\omega_0 T_2)) + C_0] \quad (12)$$

对于确定安装位置的电流互感器而言，其二次绕组匝数  $N$ 、铁芯截面积  $S$  以及工频交流电流频率  $\omega_0$  一般保持不变，因此，工频交流电流作用于电流互感器形成的磁通密度  $B_{\omega}(t)$  主要受电流幅值  $I_0'$  与二次时间常数  $T_2$  影响。

显然，一次侧工频交流电流归算至二次侧的幅值  $I_0'$  越大， $B_{\omega}(t)$  幅值也越大。二次时间常数  $T_2$  对磁通密度的幅值与相角均会产生影响，进而导致一、二次侧电流间出现幅值差与相角差，影响稳态传变特性。结合式(12)，图 9(a)给出了稳态运行时，1250 A、50 Hz 的工频电流作用下的磁通密度  $B_{\omega}(t)$  与二次时间常数  $T_2$  的关系。可以看到，随着  $T_2$  的减小，磁通密度幅值逐渐增大。

基于 PSCAD/EMTDC 所构建的仿真模型，在电流互感器一次侧通入 1250 A、50 Hz 的工频电流，根据  $T_2 = L_m/R_x$ ，在稳态下改变负载电阻  $R_x$  得到不同二次时间常数  $T_2$ ，并仿真此时的电流互感器磁通

密度, 如图 9(b)所示。仿真结果表明, 负载电阻越大、二次时间常数越小, 磁通密度幅值越大, 仿真结果验证了理论分析的结论。

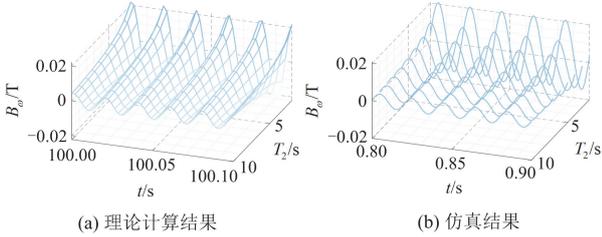


图 9 工频电流作用下磁通密度与二次时间常数的关系

Fig. 9 Relationship between flux density and secondary time constant at power frequency current

## 2) 杂散电流分量

杂散电流分量作用于电流互感器形成的磁通密度  $B_j(t)$  可表示为

$$B_j(t) = \sum_{j=1}^k \frac{L_m I'_j}{NSK_j} \left[ \frac{\sin(\omega_j t - \arctan(\omega_j T_2)) + \frac{I'_{dc} L_m}{NS} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_2}} \right)}{\sum_{j=1}^k C_j} \right] \quad (13)$$

同理, 杂散电流作用于电流互感器形成的磁通密度主要受电流幅值  $I'_j$  与  $I'_{dc}$ 、频率  $\omega_j$  以及二次时间常数  $T_2$  影响。

根据式(13)可知, 一次侧杂散电流低频分量、直流分量归算至二次侧的幅值  $I'_j$ 、 $I'_{dc}$  越大, 其作用形成的电流互感器励磁磁通密度越大。

对于杂散电流直流分量, 由前述分析可知, 二次时间常数  $T_2$  决定了其作用形成的磁通密度的衰减速度,  $T_2$  越小, 衰减速度越快, 但其对最终幅值不会造成影响; 对于杂散电流低频交流分量, 结合式(13), 可以得到 25 A、0.006 Hz 低频交流分量作用下的磁通密度与  $T_2$  的对应关系如图 10(a)所示。由图可知, 随着二次时间常数  $T_2$  减小, 磁通密度幅值逐渐增大, 且相位逐渐超前。

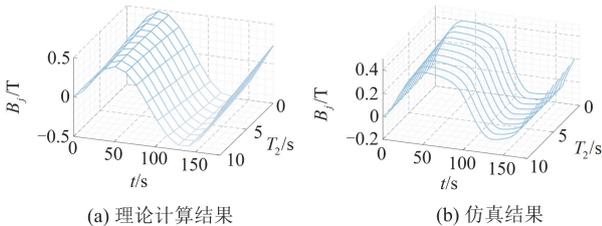


图 10 低频交流作用下磁通密度与二次时间常数的关系

Fig. 10 Relationship between flux density and secondary time constant when low frequency AC acts

为验证二次时间常数  $T_2$  对磁通密度的影响规律, 仿真电流互感器一次侧通入 25 A、0.006 Hz 低频交流电流的工况, 得到不同二次时间常数  $T_2$  影响下的电流互感器磁通密度如图 10(b)所示。仿真结果表明, 二次时间常数  $T_2$  减小将导致电流互感器磁通密度呈现出幅值增大、相位超前的变化规律, 与理论分析结论相同。

杂散电流低频交流分量的频率  $\omega_j$  也会对磁通密度造成影响。结合式(13)分析其影响规律, 可以得到电流互感器一次侧通入 25 A、频率范围为 0~0.10 Hz 的低频交流电流时的磁通密度如图 11(a)所示。由图可知, 随着杂散电流低频交流分量频率  $\omega_j$  的降低, 磁通密度幅值逐渐增大, 相位变化更加明显。

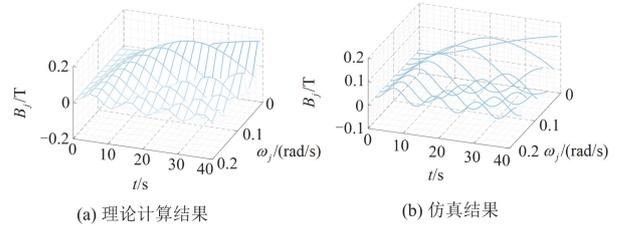


图 11 磁通密度与杂散电流频率的关系

Fig. 11 Relationship between flux density and frequency of stray currents

仿真电流互感器一次侧通入 25 A、0~0.1 Hz 的低频交流电流的工况, 获得磁通密度与杂散电流频率的关系如图 11(b)所示。由图可知, 杂散电流低频分量频率  $\omega_j$  的降低将导致磁通密度幅值增大与相位的显著改变, 进一步验证理论分析的结论。

综上所述, 杂散电流幅值越大、频率越低, 其在电流互感器铁芯处产生的磁通密度越大, 由于铁芯的非线性特性, 二次时间常数随之减小, 导致磁通密度以及励磁电流进一步呈现幅值增大、相位改变的变化规律, 不仅增大了电流互感器在线性区的复合误差, 还进一步缩短了其起始饱和时间, 对其稳态传变特性造成不利影响。

## 3 短路故障时杂散电流影响下的电流互感器传变特性

### 3.1 短路故障时电流互感器线性传变特性

电网在  $t = t_0$  时刻发生单相接地短路故障时的等值电路如图 12 所示。图中  $U_{ac}(t)$ 、 $i_f(t)$  分别表示系统电源电压、故障电流; 因短路故障持续时间较短, 在暂态传变特性分析时可假设杂散电流为恒定值  $i_{sc}(t_0)$ ;  $L$ 、 $R$  分别表示一次系统等电感与电阻。

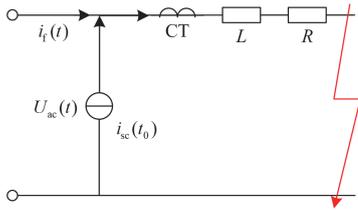


图 12 短路故障等值电路图

Fig. 12 Equivalent circuit diagram of short-circuit fault

图 12 中, 系统电源电压可表示为

$$U_{ac}(t) = \sqrt{2}U_{ac} \sin(\omega_0 t + \alpha) \quad (14)$$

式中:  $\alpha$  为故障起始角。

此时电网故障电流  $i_f(t)$  为

$$i_f(t) = I'_{pm} \left[ \sin(\omega_0 t + \alpha - \varphi) - e^{-\frac{t}{T_1}} \sin(\alpha - \varphi) \right] \quad (15)$$

式中:  $I'_{pm}$  为故障电流周期分量幅值  $I_{pm}$  归算至二次侧的幅值;  $\varphi$  为电压与电流的相位差(功率因数角);  $T_1$  为一次系统时间常数( $T_1 = L/R$ )。

当  $\alpha - \varphi = -90^\circ$  时, 短路电流的非周期分量最大, 此时有

$$i_f(t) = I'_{pm} \left[ -\cos(\omega_0 t) + e^{-\frac{t}{T_1}} \right] \quad (16)$$

将式(16)代入式(5), 若不考虑剩磁影响, 则短路故障下的磁通密度表达式为

$$B_f(t) = \frac{L_m}{NS} \left[ \frac{I'_{pm} T_1}{T_1 - T_2} \left( e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) + \frac{I'_{pm} e^{-\frac{t}{T_2}}}{1 + \omega_0^2 T_2^2} - \frac{I'_{pm}}{K_0} \sin \left( \omega_0 t + \arctan \left( \frac{1}{\omega_0 T_2} \right) \right) \right] \quad (17)$$

由前述分析可知, 杂散电流作用下的电流互感器在故障发生时刻( $t = t_0$ )会在励磁绕组中产生一个初始磁通密度  $B_s(t_0)$ , 其在暂态传变特性分析中可视为恒定, 即相当于在式(17)中叠加一个偏磁影响。因此, 短路故障时, 杂散电流影响下的电流互感器总磁通为

$$B_{total}(t) = B_f(t) + B_s(t_0) \quad (18)$$

$B_s(t_0)$  可通过式(7)所示的稳态运行时杂散电流影响下的电流互感器磁通密度表达式给出。

$$B_s(t_0) = \frac{L_m}{NS} \left[ \frac{I'_0}{K_0} \sin(\omega_0 t_0 - \arctan(\omega_0 T_2)) + C_0 + \sum_{j=1}^k C_j + \sum_{j=1}^k \frac{I'_j}{K_j} \sin(\omega_j t_0 - \arctan(\omega_j T_2)) + I'_{dc} \left( 1 - e^{-\frac{t_0}{T_2}} \right) \right] \quad (19)$$

结合式(17)~式(19), 短路故障时的电流互感器励磁电流可表示为

$$i_{mf}(t) = \frac{I'_{pm} T_1}{T_1 - T_2} \left( e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) + \frac{I'_{pm} e^{-\frac{t}{T_2}}}{1 + \omega_0^2 T_2^2} - \frac{I'_{pm}}{K_0} \sin \left( \omega_0 t + \arctan \left( \frac{1}{\omega_0 T_2} \right) \right) + \frac{NSB_s(t_0)}{L_m} \quad (20)$$

同理, 电流互感器二次侧电流可表示为

$$i_{2f}(t) = \frac{I'_{pm}}{T_1 - T_2} \left( T_1 e^{-\frac{t}{T_2}} - T_2 e^{-\frac{t}{T_1}} \right) - \frac{I'_{pm}}{1 + \omega_0^2 T_2^2} e^{-\frac{t}{T_2}} + \frac{I'_{pm} \omega_0 T_2}{K_0} \sin(\omega_0 t - \arctan(\omega_0 T_2)) - \frac{NSB_s(t_0)}{L_m} \quad (21)$$

式(21)表明, 电网发生短路故障时, 杂散电流影响下的电流互感器二次侧电流由 3 个分量构成: 故障非周期分量、周期分量与杂散电流分量。

二次侧非周期分量由一次故障电流的非周期分量通过电流互感器传变形成。由于线性区  $T_2$  (约为几秒)远大于 220 kV 典型交流系统时间常数  $T_1$  (约为 60 ms), 可忽略式(21)中  $T_1$  的影响, 一、二次侧电流近似呈线性关系, 小部分电流流入励磁绕组。

故障周期分量与杂散电流分量作用下的电流互感器线性传变特性分析与 2.1 节类似, 此处不再赘述。

### 3.2 短路故障时电流互感器饱和和传变特性

因短路电流幅值通常为稳态电流幅值的数倍至数十倍, 其作用下的电流互感器磁通密度将显著增大, 甚至达到饱和磁通密度, 此时磁滞回线斜率接近于 0, 励磁电流随之剧增。此外, 由于短路电流中的非周期衰减分量, 暂态饱和仅发生在与非周期衰减分量极性相同的工频半周内, 且磁通密度达到最值后将逐渐衰减, 暂态饱和程度逐渐降低。

同理, 在电网发生单相接地短路故障时, 分别仿真得到 25 A、50 A、100 A 杂散电流影响下的电流互感器饱和和特征量如图 13 所示。

以图中 50 A 杂散电流作用下的电流互感器为例分析其饱和畸变机理。电网发生短路故障时, 同极性杂散电流将进一步抬升故障时刻的电流互感器磁通密度并导致其进入严重饱和。此时磁滞回线斜率急剧下降, 表明严重饱和下的励磁电感显著减小, 一次侧电流几乎全部流入励磁支路以维持励磁磁通, 导致励磁电流发生剧增、二次电流出现严重的畸变缺损。随着非周期分量的衰减, 电流互感器饱和程度逐渐降低。

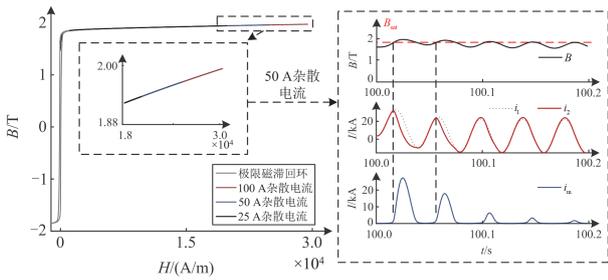


图 13 短路故障时电流互感器饱和特征量

Fig. 13 Saturation characteristics of CT under short-circuit fault

总体而言,与故障电流同极性的杂散电流越大,故障时刻的电流互感器初始磁通密度越大,该磁通密度与短路电流叠加影响将导致总磁通密度进一步增大,进而缩短电流互感器起始饱和时间并加深其饱和程度以及二次侧电流畸变程度。

### 3.3 电流互感器暂态传变特性影响因素

参考 3.2 节的分析可以得到,杂散电流对电流互感器暂态传变特性的影响主要体现在故障时刻形成的初始磁通密度上,初始磁通密度越大,对电流互感器暂态传变特性的影响则越严重。结合式(19)可以看出,杂散电流幅值、频率均会对故障时电流互感器的初始磁通密度造成影响,并在故障后进一步影响电流互感器传变特性。

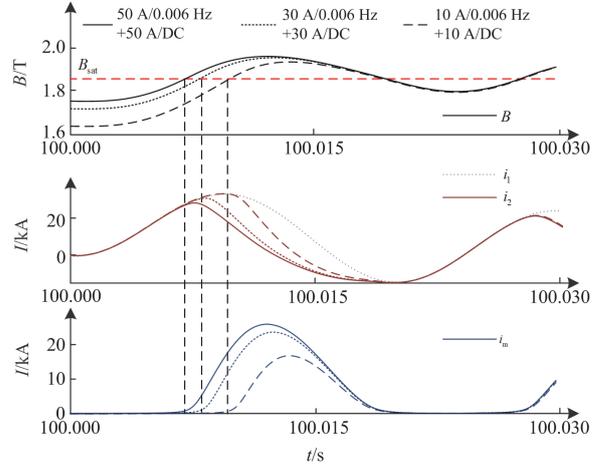
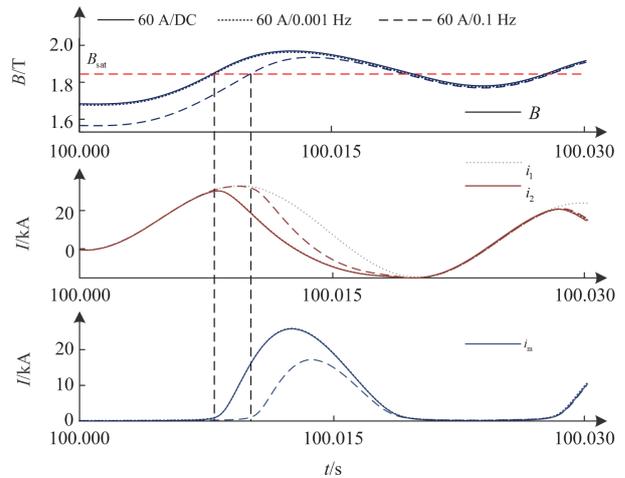
杂散电流幅值越大,其故障时形成的初始磁通密度越大,对电流互感器暂态传变特性的影响也更为严重。为研究杂散电流幅值对电流互感器暂态传变特性的影响,仿真图 1 所示交流线路模型分别在 10 A、30 A、50 A 的杂散电流直流分量与 0.006 Hz 低频交流分量叠加影响下,线路发生单相接地短路故障的工况,得到电流互感器特征量与杂散电流幅值的关系如图 14 所示。

由图 14 可知,随着杂散电流幅值的增大,故障时刻的初始磁通密度也逐渐增大,电流互感器起始饱和时间进一步缩短,励磁电流随之出现剧增、二次电流发生缺损。

根据式(19)可知,杂散电流低频交流分量的频率也会对故障初始磁通密度产生影响。具体而言,其频率越低,故障初始磁通密度幅值越大,电流互感器起始饱和时间越短,对暂态传变特性的影响也更为严重。为研究低频交流频率对电流互感器的影响,仿真图 1 所示交流线路模型在幅值为 60 A、频率分别为 0 Hz(直流)、0.001 Hz、0.1 Hz 的杂散电流影响下,线路发生单相接地短路故障的工况,得到电流互感器特征量如图 15 所示。

由图 15 可知,随着杂散电流低频交流分量频率的降低,故障时电流互感器磁通密度的幅值进一步

增大,饱和励磁电流、二次电流的畸变程度进一步加深。随着杂散电流低频交流分量频率的降低,其对电流互感器暂态传变特性的影响程度逐渐接近于同幅值杂散电流直流分量的影响。

图 14 短路故障时电流互感器特征量与杂散电流幅值的关系  
Fig. 14 Relationship between characteristics of CT and amplitude of stray currents under short-circuit fault图 15 短路故障时电流互感器特征量与杂散电流频率的关系  
Fig. 15 Relationship between characteristics of CT and frequency of stray currents under short-circuit fault

此外,由于杂散电流低频交流分量的交变特征,故障时刻的初始磁通密度极性也可能是不同的;相较于恒定极性直流分量与极性相反的短路电流的反向抵消作用,杂散电流与不同极性的短路电流均可能形成同向叠加作用,更易抬升电流互感器磁通密度并导致其发生严重暂态饱和,影响暂态传变特性。

## 4 结论

本文着眼于地铁杂散电流影响下的电流互感器

传变特性研究, 得到以下结论:

1) 基于杂散电流现场实测数据分析, 杂散电流在频域上除直流分量起主导作用外, 还包括超低频交流分量。基于此, 提出将杂散电流等效为直流分量与不同频率低频交流分量叠加的等效表达式。

2) 基于杂散电流与电流互感器等效分析模型, 研究了电网暂稳态时, 杂散电流影响下的电流互感器传变特性。结果表明, 随着杂散电流的增大, 一、二次侧电流间幅值、相角差逐渐增大; 同时受杂散电流低频交变特征影响, 其与不同极性的工频电流或故障电流均可能形成同向叠加作用, 导致电流互感器在工频半周内饱和程度进一步加深。

3) 研究推导杂散电流极性、频率、幅值以及电流互感器二次时间常数等不同影响因素对电流互感器传变特性的影响规律。结果表明, 同极性杂散电流幅值越大、频率越低, 其作用于电流互感器形成的磁通密度越大, 二次时间常数越小, 电流互感器更易发生饱和。

本文对杂散电流影响下的电流互感器传变特性研究仅从定性的角度出发, 未来将进一步量化研究杂散电流对不同准确度等级电流互感器以及不同电压等级交流电网的影响。

## 参考文献

- [1] 程鹏, 任倩, 盛诗雯, 等. 电磁式互感器二次电缆引起 MMC 孤岛系统高频谐振机理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(19): 89-100.  
CHENG Peng, REN Qian, SHENG Shiwen, et al. Research on high-frequency resonance mechanism in MMC islanded systems caused by secondary cables of electromagnetic instrument transformers[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(19): 89-100.
- [2] 李振兴, 张星宇, 朱益, 等. 基于 U-I 象空间分布的 CT 饱和识别及畸变电流重构方法[J/OL]. 电力系统保护与控制: 1-12[2025-08-05]. <https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.250231>  
LI Zhenxing, ZHANG Xingyu, ZHU Yi, et al. A method of CT saturation identification and distortion current reconstruction based on U-I image spatial distribution[J/OL]. Power System Protection and Control: 1-12[2025-08-05]. <https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.250231>
- [3] 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.
- [4] 曾祥君, 张玺, 阳韬, 等. 高压直流输电系统接地极不平衡保护改进措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 132-137.  
ZENG Xiangjun, ZHANG Xi, YANG Tao, et al. Improvement measures of electrodes line unbalance protection for HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 132-137.
- [5] 郑涛, 卢婷, 杨国生, 等. GIC 引发直流偏磁对距离保护 III 段动作性能影响的分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 1-5.  
ZHENG Tao, LU Ting, YANG Guosheng, et al. Analysis of the effects on distance protection zone III relays caused by DC bias induced from geomagnetic induced current[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 1-5.
- [6] 曾嵘, 赵杰, 尚春, 等. HVDC 地中直流对交流系统影响的防范措施[J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 919-925.  
ZENG Rong, ZHAO Jie, SHANG Chun, et al. Measures to restrain the neutral current of the AC transformer in HVDC ground return system[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4): 919-925.
- [7] 李长云, 李庆民, 李贞, 等. 直流偏磁条件下电流互感器的传变特性[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(19): 127-132.  
LI Changyun, LI Qingmin, LI Zhen, et al. Transfer characteristics of current transformers with DC bias[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 127-132.
- [8] 郭一飞, 高厚磊. 直流偏磁对电流互感器暂态传变特性的影响[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(12): 126-131.  
GUO Yifei, GAO Houlei. Effect of DC bias on transient transferring characteristics of current transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12): 126-131.
- [9] 郑涛, 陈佩璐, 刘连光, 等. 地磁感应电流对电流互感器传变特性及差动保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(22): 84-89.  
ZHENG Tao, CHEN Peilu, LIU Lianguang, et al. Effects of geomagnetically induced current on transferring characteristics of current transformer and transformer differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(22): 84-89.
- [10] REZAEI-ZARE A. Enhanced transformer model for low- and mid-frequency transients—part II: validation and simulation results[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(1): 316-325.
- [11] AHMADZADEH-SHOOSHTARI B, REZAEI-ZARE A. Advanced transformer differential protection under GIC conditions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(3): 1433-1444.

- [12] 马书民, 夏少连, 熊玮, 等. HVDC/GIC 型直流偏磁的差异性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 55-64.  
MA Shumin, XIA Shaolian, XIONG Wei, et al. Difference analysis of HVDC/GIC type DC bias[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(2): 55-64.
- [13] 潘超, 安景革, 刘闯, 等. 考虑地铁杂散电流干扰的电网变压器振动噪声耦合效应[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(9): 70-81.  
PAN Chao, AN Jingge, LIU Chuang, et al. Power grid transformer vibration-noise coupling effect considering subway stray current interference[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(9): 70-81.
- [14] WANG A, LIN S, HU Z, et al. Evaluation model of DC current distribution in AC power systems caused by stray currents of DC metro systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(1): 114-123.
- [15] WU G, WANG Q, CHEN L, et al. Analysis of characteristics of rail transit stray current and saturation mechanism of current transformer[J]. International Journal of Emerging Electric Power Systems, 2024, 25(3): 357-366.
- [16] 张国新. 轨道交通杂散电流对电流互感器传变特性及继电保护的影响[D]. 济南: 山东大学, 2023.  
ZHANG Guoxin. Effects of rail transit stray current on transferring characteristics of current transformer and relay protection[D]. Jinan: Shandong University, 2023.
- [17] 肖黎, 张晶焯, 陈龙, 等. 地铁杂散电流造成的电网变压器直流偏磁特征量分析[J]. 南方电网技术, 2021, 15(5): 129-134.  
XIAO Li, ZHANG Jinzhuo, CHEN Long, et al. Analysis on the DC magnetic bias characteristic of transformer in power system caused by the subway stray current[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(5): 129-134.
- [18] WANG A, LIN S, ZHOU Q, et al. Frequency analysis and calculation of transformer neutral DC caused by metro stray currents[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2025, 166.
- [19] WANG A, LIN S, WU J, et al. Relationship analysis between metro rail potential and neutral direct current of nearby transformers[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(3): 1795-1804.
- [20] ALAMUTI M M, NOURI H, JAMALI S. Effects of earthing systems on stray current for corrosion and safety behaviour in practical metro systems[J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2011, 1(2): 69-79.
- [21] ZHOU Q, LIN S, LIN X H, et al. A uniform model for stray current of long-line DC metro systems[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(2): 2915-2927.
- [22] 史云涛, 赵丽平, 林圣, 等. 城市电网中地铁杂散电流分布规律及影响因素分析[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1951-1957.  
SHI Yuntao, ZHAO Liping, LIN Sheng, et al. Analysis of distribution of metro stray current in urban power grid and its influencing factors[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1951-1957.
- [23] WANG A M, LIN S, HE Z Y, et al. Probabilistic evaluation method of transformer neutral direct current distribution in urban power grid caused by DC metro stray currents[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(1): 541-552.
- [24] 袁季修, 盛和乐, 吴聚业. 保护用电流互感器应用指南[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [25] 郑涛, 陈佩璐, 刘连光, 等. 计及直流偏磁的电流互感器传变特性对差动保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(20): 89-93.  
ZHENG Tao, CHEN Peilu, LIU Lianguang, et al. Transferring characteristics of current transformer affected by DC magnetic bias and its impact on differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(20): 89-93.
- [26] 戴魏, 郑玉平, 白亮亮, 等. 保护用电流互感器传变特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 46-54.  
DAI Wei, ZHENG Yuping, BAI Liangliang, et al. Analysis of protective current transformer transient response[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 46-54.
- [27] QI X, YIN X, ZHANG Z, et al. Study on the unusual misoperation of differential protection during transformer energization and its countermeasure[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(5): 1998-2007.

收稿日期: 2025-04-12; 修回日期: 2025-10-08

作者简介:

谢昱韬(2003—), 男, 硕士研究生, 研究方向为杂散电流分析与抑制; E-mail: xyt0303@126.com

林圣(1983—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为交直流混联电网保护与控制、供电系统健康诊断与主动运维、城市轨道交通杂散电流分析与抑制。E-mail: slin@swjtu.edu.cn

(编辑 周金梅)