

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.05.023

计及谐波的 J-A 磁滞模型修正

肖贤博¹, 徐启峰¹, 吴姝婷¹, 黄奕钊¹, 谭巧²(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108;
2. 闽江学院计算机与控制工程学院, 福建 福州 350108)

摘要: J-A 磁滞理论被广泛应用于电磁式电流互感器的磁特性建模, 但是在谐波条件下该模型存在较大的误差。针对这一问题, 文中对各次谐波分别修正经典 J-A 模型参数, 利用遗传退火算法进行参数辨识, 然后将各次谐波的磁特性进行线性叠加, 实现非正弦激励下电流互感器的磁特性建模。采用该修正方法的前提是计量用电流互感器的非线性误差符合规定的 0.2S 级, 因此对各次谐波磁滞回线的仿真分析与误差修正均近似适用于线性叠加原理。以采用纳米晶材料的 0.2S 级电流互感器为例, 对角差与比差进行仿真分析与实验验证, 结果表明经过参数修正的 J-A 模型改善了谐波条件下的测量准确度, 多次谐波磁特性的近似线性叠加方法对测量准确度的影响可以忽略不计, 从而确认计及谐波的 J-A 磁滞模型修正合理有效。

关键词: 电磁式电流互感器; J-A 磁滞模型; 谐波; 参数修正; 遗传退火算法; 线性叠加

中图分类号: TM452

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)05-0205-09

0 引言

随着风能、太阳能等分布式能源的发展和电力电子器件的广泛应用, 大量谐波被注入到电网中^[1-2], 造成了巨大的谐波污染、劣化了电流互感器的铁磁特性、降低了电气测量与继电保护的准确性和可靠性^[3-4]。为了实现对电网中谐波的准确测量与分析研究, 须在谐波环境下对电流互感器的磁特性进行准确的仿真建模^[5-7]。

目前有多种磁滞模型可以用来描述铁磁材料的磁滞特性, 其中 J-A 磁滞模型符合磁滞现象的物理本质, 且模型参数较少, 被广泛用于电流互感器的铁磁建模^[8-11]。铁磁材料的磁滞特性主要由磁滞回线表征。与铁心的工频磁滞回线相比, 谐波使磁滞回线的形状发生改变^[12], 经典 J-A 磁滞模型难以充分体现这些变化, 因此无法准确拟合计及谐波的磁滞回线, 降低了电流互感器谐波建模的准确性。文献[13]在对电流互感器谐波误差特性进行仿真研究的过程中, 采用的磁滞模型未考虑频率因素的影响, 仿真结果与实际存在较大偏差。

目前, 有相关文献提出了在谐波条件下改进现有磁滞模型的方法。文献[14]将谐波磁通密度分解为主磁通和局部反转磁通, 进行正弦化近似处理, 结合外推磁滞损耗法、经典涡流损耗公式及动态损耗系数实现谐波激励下铁磁材料的磁滞建模,

但在局部磁滞回环处仿真误差较大。文献[15]利用 Preisach 模型, 基于损耗分离与场分离法对多个不同单频正弦条件下的损耗测量结果进行参数提取, 构建了多次谐波激励下的动态磁滞模型, 提高了计算精度, 但模型求解复杂, 在高频谐波下集肤效应会导致模型精度下降。文献[16]在高频条件下引入 R-L 型分数阶导数改进 J-A 模型的涡流损耗表达式, 但需要大量的实验数据且计算复杂、耗时长。综上所述, 现有方法难以满足工程上对电流互感器在谐波环境下的磁特性建模的实用要求。

计量用电流互感器正常运行时工作在线性区内, 其非线性误差一般小于规定的 0.2S 级。以此为前提, 文中基于经典 J-A 磁滞模型, 采用遗传退火算法进行参数辨识, 分析模型参数对磁滞特性的影响及其随频率变化的规律, 引入模型参数关于谐波阶次的修正方程, 针对各次谐波分别修正经典 J-A 磁滞模型参数; 然后将各次谐波的磁特性进行线性叠加, 近似地反映谐波环境下电流互感器的磁特性。以一台 0.2S 级纳米晶电流互感器为例, 通过仿真与实验分析 J-A 磁滞修正模型对各次谐波的测量准确度; 计及电流互感器的非线性, 进一步研究各次谐波磁特性的近似线性叠加方法对测量准确度的影响, 验证 J-A 磁滞模型修正方法的合理性和有效性。

1 经典 J-A 磁滞模型

1.1 经典 J-A 磁滞理论

假设 J-A 磁滞模型存在理想畴壁运动, 包括畴壁弯曲和平移, 将实际磁化强度分解为由畴壁弯曲

收稿日期: 2023-04-11; 修回日期: 2023-06-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51977038, 620051-10); 高端外国专家引进计划(G2021020009L)

引起的可逆磁化分量和畴壁取代引起的不可逆磁化分量。根据经典 J-A 磁滞理论,当 $\delta(M_{an} - M) \geq 0$ 时,建立磁化强度 M 与磁场强度 H 之间的关系:

$$\frac{dM}{dH} = \left[c \frac{dM_{an}}{dH_e} + \frac{M_{an} - M}{k\delta - \alpha(M_{an} - M)/(1-c)} \right] / \left(1 - \alpha c \frac{dM_{an}}{dH_e} \right) \quad (1)$$

$$M_{an} = M_s \left(\coth\left(\frac{H_e}{a}\right) - \frac{a}{H_e} \right) \quad (2)$$

式中: c 为畴壁弯曲系数; M_{an} 为非磁滞磁化强度; H_e 为等效维斯平均场的磁场强度, 满足 $H_e = H + \alpha M^{[17]}$; k 为磁畴钉扎效应系数; δ 为方向系数; α 为耦合系数; M_s 为饱和磁化强度; a 为非磁滞磁化特性的形状参数。

当 $\delta(M_{an} - M) < 0$ 时, 为避免模型出现非物理解(在磁滞回线 2 个端点附近微分磁导率出现负值), 令:

$$\frac{dM}{dH} = c \frac{dM_{an}}{dH_e} / \left(1 - \alpha c \frac{dM_{an}}{dH_e} \right) \quad (3)$$

在模型求解的过程中, 若求解式(1)、式(3)时出现分母为 0 的情况, 则当方向系数 $\delta > 0$ 时, 令分母为 0.01, 否则取 -0.01。若式(2)中 $H_e = 0$, 对式(2)两边同时求导并进行泰勒级数展开, 得到:

$$\frac{dM_{an}}{dH_e} = \frac{M_s}{3a} \quad (4)$$

式(1)一式(4)共同构成经典 J-A 磁滞理论^[18]。

1.2 基于遗传退火算法的 J-A 模型参数确立

由式(1)一式(4)可知, 经典 J-A 磁滞模型有 5 个参数须确立: 饱和磁化强度 M_s 、磁畴钉扎效应系数 k 、畴壁弯曲系数 c 、形状参数 a 和耦合系数 α 。然而, 式(1)、式(3)、式(4)均为磁化强度 M 关于磁场强度 H 的微分方程, 直接利用磁滞回线的实验数据求解这些系数较为困难。

随着信息技术的发展, 遗传算法、粒子群算法、鲸鱼算法等都曾用于 J-A 模型的参数辨识^[19-20]。然而, J-A 磁滞模型参数求解过程复杂, 采用单一优化算法往往耗时且不准确, 因此文中利用遗传退火算法求解 J-A 磁滞模型参数。文献[21-23]已表明该算法兼具遗传算法和模拟退火算法的优势, 具有较高的稳定性、较强的搜索能力和较快的收敛速度, 可以提高输出结果的准确性。运用遗传退火算法进行参数辨识的步骤如下。

(1) 初始化算法参数: 确定种群规模 N_0 、交叉

概率 p_c 、变异概率 p_m 、初始温度 T_0 、结束温度 T_m 和温度下降系数 a_1 的取值。

(2) 随机产生初始种群, 建立目标函数, 并计算各个体的适应度函数值。

(3) 判断目标值是否满足收敛条件, 若满足则结束算法, 否则执行步骤(4)。

(4) 对各个体进行选择、交叉和变异操作。

(5) 通过比较各个体的适应值, 筛选出最优个体作为模拟退火算法的初始值。

(6) 执行退火操作, 判断是否满足算法的停止条件, 若满足则结束, 否则转至步骤(3), 算法继续。

为简化计算量, 文中采用四阶 Runge-Kutta 法求解式(1)、式(3)、式(4), 并将磁滞回线分为上、下两支分别计算, 使求解的精度与速度得到进一步提升。以磁感应强度的仿真值 B_s 与实验值 B_l 的均方根误差建立目标函数 ε :

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{up}} (B_{si} - B_{li})^2 + \sum_{j=1}^{N_{down}} (B_{sj} - B_{lj})^2}{N_{up} + N_{down}}} \quad (5)$$

式中: N_{up} 、 N_{down} 分别为磁滞回线上、下两支的数据点个数; B_{si} 、 B_{sj} 分别为数据点 i 、 j 磁感应强度的仿真值; B_{li} 、 B_{lj} 分别为数据点 i 、 j 磁感应强度的实验值。 ε 的大小反映了模型参数辨识的优劣程度以及仿真磁滞回线与实验数据的拟合情况, 从而将参数识别问题转换为误差函数 ε 的最小值优化问题。

基于磁滞回线测量实验所得到的磁滞回线数据, 利用遗传退火算法确立 J-A 模型参数, 结合式(1)一式(4), 可建立经典 J-A 磁滞模型。

2 谐波环境下 J-A 磁滞模型的改进

实际运行中, 工频与不同频率的谐波共同作用于电流互感器的铁心, 其复合磁特性较纯工频磁特性发生了变化, 例如谐波导致铁心损耗增加、磁滞回线的面积变大、磁通密度波形的畸变产生了局部磁滞回环等^[24]。而经典 J-A 磁滞模型无法充分表达这些变化, 因此在谐波环境下电流互感器的经典 J-A 磁滞模型存在较大误差。为了解决这一问题, 文中基于近似线性叠加原理, 针对各次谐波分别对 J-A 磁滞模型进行修正。

2.1 电流互感器的各次谐波磁特性分析

为针对各次谐波改进经典 J-A 磁滞模型, 向一台 0.2S 级纳米晶电流互感器的一次侧分别输入同幅不同频的正弦激励, 使电流互感器处于线性区内。以工频至 9 次谐波为例, 其磁滞回线形状随频率的变化情况如图 1 所示。

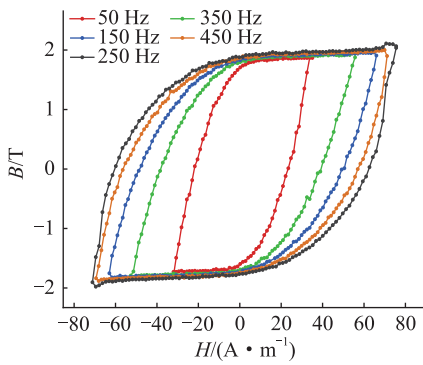


图1 不同频率下纳米晶电流互感器的磁滞回线
Fig.1 Hysteresis loops of nanocrystalline current transformer at different frequencies

由图1可知,电流互感器的磁特性随频率的变化具有以下特点:

(1) 随着频率的增加,磁滞回线的面积明显变大,具体表现为磁滞回线的宽度增加、上升幅度减缓,使得矫顽力增大、矫顽力点斜率减小。

(2) 在输入电流的幅值保持不变的情况下,即使频率发生改变,各次谐波磁滞回线的高度也基本保持不变。

2.2 各次谐波环境下的J-A磁滞模型参数修正

由经典J-A磁滞理论可知,磁滞回线形状的改变可以由模型参数的变化来体现。文献[25]通过控制变量法,即在保持其他参数不变的情况下,改变其中一个参数的大小,定性分析了每个参数对磁滞回线形状的影响,将其归结为矫顽力 H_c 、矫顽力点斜率 k_H 、剩磁 B_r 、剩磁点斜率 k_B 与最大磁化强度 M_{max} 的变化趋势,如表1所示。由表1可知矫顽力仅受参数 c 、 a 、 α 的影响,而最大磁化强度、剩磁、剩磁点斜率均随5个参数的变化而改变。

表1 模型参数变化对磁滞回线形状的影响

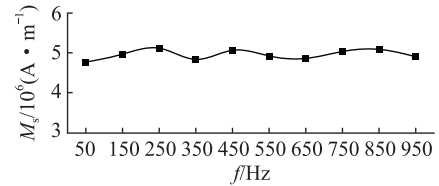
Table 1 The effect of model parameters change on the shape of the hysteresis loop

| 模型参数 | 变化情况 | 影响 | | | | |
|----------|------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| | | H_c | B_r | k_H | k_B | M_{max} |
| M_s | ↑ | 不变 | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ |
| k | ↑ | 不变 | ↓ | ↓ | ↑ | ↓ |
| c | ↑ | ↓ | ↓ | 不变 | ↑ | ↑ |
| a | ↑ | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ |
| α | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ |

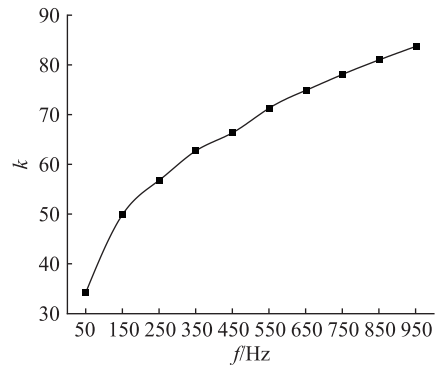
注:“↑”表示增大,“↓”表示减小。

为了根据频率合理准确地改进J-A磁滞模型,基于遗传退火算法,设置种群规模 $N_0 = 200$,交叉概率 $p_c = 0.5$,变异概率 $p_m = 0.1$,初始温度参数 $T_0 = 0.5$,结束温度参数 $T_m = 1 \times 10^{-7}$,温度下降系数 $\alpha_t = 0.99$ 。利用实验测量所得纳米晶的各次谐波磁滞回

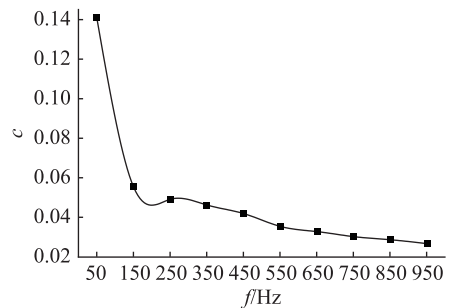
线数据,分别得到各组J-A磁滞模型参数,分析各组参数与频率之间的变化规律,结果如图2所示。



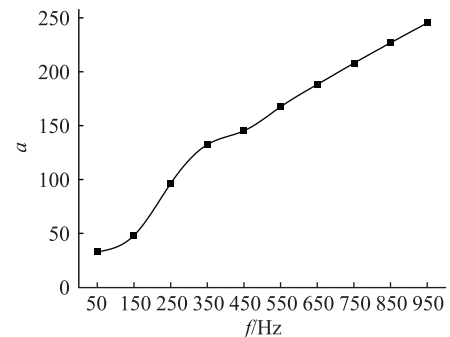
(a) M_s 随 f 的变化趋势



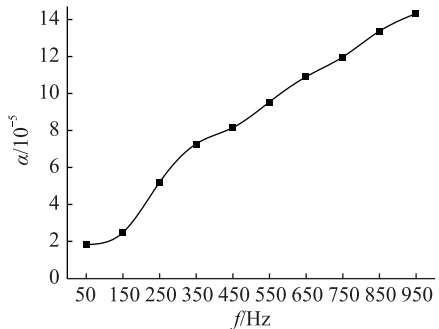
(b) k 随 f 的变化趋势



(c) c 随 f 的变化趋势



(d) a 随 f 的变化趋势



(e) α 随 f 的变化趋势

图2 J-A模型参数随谐波频率的变化趋势
Fig.2 The trend of J-A model parameters with harmonic frequency

图2中,当频率 f 增大时,饱和磁化强度 M_s 可视为保持不变,即最大磁化强度 M_{\max} 保持不变;系数 k 、 a 、 α 随频率 f 的增大而增大;系数 c 随频率 f 的增大而减小,并且频率越高, c 下降幅度越缓。

结合表1与图2可知,对各次谐波磁特性的仿真可通过合理修正经典J-A磁滞模型的系数实现。

文献[26-27]为了准确拟合不同温度下的磁滞回线,分析了模型参数随温度的变化趋势,引入居里温度、临界指数等附加参数,建立了基于温度的J-A模型参数修正方程,利用某一温度下建立的J-A磁滞模型参数,代入修正方程求出其他温度下的J-A模型参数,实现了对磁滞回线的温度特性仿真。基于以上思路,根据图2所示J-A模型参数随谐波频率变化规律,结合表1,引入谐波修正参数 ω_k 、 ω_c 、 ω_a 、 ω_α ,利用曲线拟合对J-A模型的各个参数关于谐波阶次 h 作出如下修正:

$$\begin{cases} M_s(h) = M_{s0} \\ k(h) = k_0 h^{\omega_k} \\ c(h) = c_0 h^{-\omega_c} \\ a(h) = a_0 h^{\omega_a} \\ \alpha(h) = \alpha_0 h^{\omega_\alpha} \end{cases} \quad (6)$$

式中: M_{s0} 、 k_0 、 c_0 、 a_0 、 α_0 均为铁心在工频激励下确立的J-A磁滞模型参数; ω_k 、 ω_c 、 ω_a 、 ω_α 为各个模型参数随频率变化而引入的谐波修正参数。

对于不同频率的谐波,在经典J-A磁滞模型的基础上利用式(6)便可基于各次谐波分别修正其模型参数,从而对电流互感器的各次谐波磁特性进行仿真。

2.3 多谐波激励下电流互感器磁特性的近似线性叠加

对一次侧的非正弦激励电流 $i_1(t)$ 进行傅里叶分解,得到基波与各次谐波分量之和:

$$i_1(t) = \sum_{h=1}^n I_{1h} \sin(h\omega t + \alpha_{1h}) \quad (7)$$

式中: ω 为工频角频率; I_{1h} 、 α_{1h} 分别为一次电流第 h 次谐波的幅值与初相位。

设 $H_h(t)$ 为0.2S级计量用电流互感器在某一时刻 t 单独处于一次电流的基波($h=1$)或第 h 次谐波作用下铁心内部的磁场强度,利用式(1)一式(4)、式(6)求出非正弦电流的基波与各次谐波分别在铁心内部产生的磁感应强度 $B_h(H_h, t)$,然后将各分量进行线性叠加,以近似反映时刻 t 下非正弦激励在电流互感器内部产生的磁场强度 $H(t)$ 与磁感应强度 $B(t)$ 。

$$\begin{cases} H(t) = \sum_{h=1}^n H_h(t) \\ B(t) = \sum_{h=1}^n B_h(H_h, t) \end{cases} \quad (8)$$

式(1)一式(4)、式(6)、式(8)共同构成了计及谐波的J-A磁滞修正模型。在非正弦激励下,利用式(6)对各次谐波修正J-A模型参数、利用式(8)进行线性叠加,近似反映多次谐波共同作用下电流互感器的磁特性。

3 计及谐波的J-A磁滞修正模型的验证

3.1 J-A磁滞修正模型的参数辨识

通过Python 3.9.2编写遗传退火算法的运行程序,并基于图1所示纳米晶电流互感器的工频磁滞回线数据,对J-A磁滞模型进行参数辨识,目标函数采用式(5)。模型的参数辨识结果如表2所示。

表2 工频下的经典J-A磁滞模型参数
Table 2 Classical J-A hysteresis model parameters at industrial frequency

| 模型参数 | 辨识结果 |
|--------------------|---------|
| $M_{s0}/10^6$ | 4.916 8 |
| k_0 | 35.22 |
| c_0 | 0.140 8 |
| a_0 | 31.38 |
| $\alpha_0/10^{-5}$ | 1.538 |

与scikit-opt库提供的遗传算法和模拟退火算法相比,采用遗传退火算法对J-A磁滞模型进行参数辨识所需的时间以及目标函数值(误差)如表3所示。

表3 3种优化算法的参数辨识时间及误差
Table 3 Parameter identification time and error of three optimization algorithms

| 算法 | 时间/s | $\varepsilon/\%$ |
|--------|-------|------------------|
| 遗传退火算法 | 1 770 | 2.56 |
| 遗传算法 | 2 399 | 3.27 |
| 模拟退火算法 | 3 324 | 5.93 |

从表3可以看出,遗传退火算法与遗传算法和模拟退火算法相比,运行时间分别缩短了629 s和1 554 s,拟合误差分别降低了0.71%和3.37%。说明遗传退火算法的运行时间与拟合误差两项指标均具有优势。

基于表2所示工频J-A磁滞模型参数,利用图2所示J-A模型参数与频率之间的数据点,通过遗传退火算法对修正方程式(6)中的谐波修正参数 ω_k 、 ω_c 、 ω_a 、 ω_α 进行辨识,使其能够拟合图2中数据点,

目标函数仍采用式(5),得到修正参数的求解结果如表4所示。算法参数辨识时间为1.122 5 s,误差为1.477 6%。

表4 谐波修正参数值

Table 4 The harmonic correction parameters

| 谐波修正参数 | 辨识结果 |
|-----------------|---------|
| ω_k | 0.294 2 |
| ω_c | 0.569 5 |
| ω_a | 0.698 4 |
| ω_α | 0.760 4 |

将表2、表4中的参数值代入式(6),建立纳米晶材料在第 h 次谐波下的J-A磁滞模型系数修正方程:

$$\begin{cases} M_s(h) = 4.916 8 \times 10^6 \\ k(h) = 35.22h^{0.294 2} \\ c(h) = 0.140 8h^{-0.569 5} \\ a(h) = 31.38h^{0.698 4} \\ \alpha(h) = 1.538h^{0.760 4} \times 10^{-5} \end{cases} \quad (9)$$

以3、5、7、9次谐波为例,根据式(9)求得修正后的J-A磁滞模型参数如表5所示。

表5 不同谐波环境下修正后的J-A模型参数
Table 5 Corrected J-A model parameters at different harmonics

| 模型参数 | 150 Hz | 250 Hz | 350 Hz | 450 Hz |
|------------------|---------|---------|---------|---------|
| $M_s/10^6$ | 4.916 8 | 4.916 8 | 4.916 8 | 4.916 8 |
| k | 48.66 | 56.55 | 62.43 | 67.22 |
| c | 0.075 3 | 0.056 3 | 0.046 5 | 0.040 3 |
| a | 67.59 | 96.56 | 122.14 | 145.58 |
| $\alpha/10^{-5}$ | 3.55 | 5.23 | 6.75 | 8.18 |

3.2 J-A磁滞模型参数修正的有效性验证

通过测量与分析各次谐波环境下电流互感器测量误差(角差与比差)的大小,验证J-A磁滞模型的参数修正是否合理有效。参照GB/T 14549—1993的规定,将测量的谐波阶次范围设为2~19次,并重点关注模型对于奇次谐波的测量误差。

研究对象采用德恒科技生产的DHC01A型纳米晶电流互感器。一、二次额定电流分别为5 A和2.5 mA;铁心的平均磁路长度 $l=48.36$ mm,截面积 $S=1.2 \times 10^{-5}$ m²;准确度等级为0.2S级。

3.2.1 基于J-A磁滞模型的电流互感器测量准确度仿真

利用式(9)修正各次谐波的J-A模型参数,结合安培环路定律和法拉第电磁感应定律,便可得到电流互感器的一、二次电流之间存在如下关系:

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{\mu_0 NS \left(1 + \frac{dM}{dH}\right) \frac{di_1}{dt} - R_2 i_2 l}{L_2 l + \mu_0 N^2 S \left(1 + \frac{dM}{dH}\right) \frac{di_1}{dt}} \quad (10)$$

式中: i_1 、 i_2 分别为一、二次电流; μ_0 为真空磁导率; R_2 、 L_2 分别为二次负载的电阻和电感; N 为电流互感器变比。

为避免复杂的微分方程求解,利用Simulink基于式(10)和式(1)~式(4)对电流互感器进行二次电流 i_2 的仿真建模,图3为仿真示意。

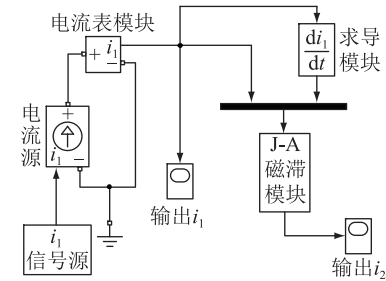


图3 电流互感器二次电流的Simulink仿真

Fig.3 Simulink simulation of the secondary current of the current transformer

图3中的J-A磁滞模块表示计及谐波的J-A磁滞修正模型,采用S-function(系统函数)建模。模块参数分为2组,一组为计及谐波的J-A磁滞模型参数,包括工频J-A磁滞模型参数以及谐波修正参数;另一组为电流互感器本身的设计参数,包括变比 N 、平均磁路长度 l 和铁心截面积 S 。

对于不同频率的一次电流 i_{1h} ,利用图3仿真得到二次电流 i_{2h} ,接着利用式(11)计算该频率下电流互感器比差 f_h 的仿真值,而角差 δ_h 的仿真值则通过计算 i_{1h} 与 i_{2h} 之间的相位差得到,即式(12)。

$$f_h = \frac{Ni_{2h} - i_{1h}}{i_{1h}} \times 100\% \quad (11)$$

$$\delta_h = \alpha_{2h} - \alpha_{1h} \quad (12)$$

式中: α_{2h} 为二次电流第 h 次谐波的相位。

3.2.2 测量准确度的实验设计

设计图4所示实验测量电流互感器的角差与比差,从而合理验证J-A磁滞模型参数修正方法的准确性。图4中信号源为FY2300H系列全数控双通道函数/任意信号波形发生器,采用5 V直流电源供电,可产生0~25 MHz的正弦信号,并且支持用户自定义波形。信号源的输出端与FPA101A型功率放大器相连,放大器的最大输出功率可达到100 W。通过电流表检测一次电流 i_1 有效值。被检电流互感器为文中所研究的DHC01A型0.2S级纳米晶电流互感器,一、二次绕组的匝数比为200:200;一、二次

侧取样电阻 $R_1 = 10\text{ W}$ 、 $R_2 = 30\text{ W}$ ；电流互感器的测量误差检测装置采用 XL-809E 型互感器校验仪，其准确度等级为 0.05 级，两端输入信号为 R_1 与 R_2 两端的电压 U_1 与 U_2 ，角差与比差的实验数据可直接从测量仪屏幕上读取。

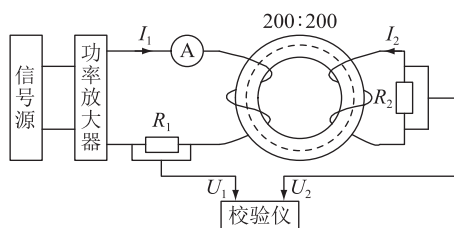


图 4 电流互感器准确度检测的实验原理
Fig.4 Experimental principle of current transformer accuracy detection

3.2.3 J-A 磁滞修正模型对于各次谐波测量准确度的分析

通过测量准确度的仿真与实验验证 J-A 磁滞模型参数修正有效性的步骤如下：

(1) 在图 3 中的信号源模块设置一次正弦电流 i_1 的频率分别为 50、150、…、950 Hz，有效值恒为额定一次电流，即 5 A。

(2) 在图 3 中的 J-A 磁滞模块中输入电流互感器的设计参数与 J-A 磁滞模型参数。为了与经典 J-A 磁滞模型进行对比，输入 J-A 磁滞模块的 J-A 磁滞模型参数分别取自表 2 中的工频 J-A 磁滞模型参数与基于式(9)修正后的 J-A 磁滞模型参数。

(3) 将 i_1 、 i_2 的仿真数据导入 MATLAB 工作区，利用式(11)、式(12)计算得到电流互感器的 J-A 磁滞修正模型对于基波 ($h=1$) 或 h 次谐波的角差与比差仿真值。

(4) 基于图 4，根据电流表示数调节信号源使输出的一次电流 i_1 的有效值恒为 5 A，然后不断调节 i_1 的频率 f ，从校验仪中分别读取不同频率正弦激励下电流互感器角差与比差的实验数据。

综合以上步骤，在单频正弦激励下，将采用经典 J-A 磁滞模型与修正后的 J-A 磁滞模型所得比差和角差的仿真数据与通过校验仪所得比差和角差的实验数据进行对比，具体见表 6、表 7。

由表 6、表 7 可知，参数修正后的 J-A 磁滞模型相较于经典 J-A 磁滞模型对各次谐波的测量误差更小，表明模型参数的修正提高了谐波条件下的测量准确度。此外，从表 6、表 7 还可以看出，在单频正弦激励下，应用修正后的 J-A 磁滞模型仿真得到的测量误差与实验值接近，可以反映电流互感器的实际传变特性，并且修正模型对基波与各次谐波的测

表 6 单频正弦激励下的比差对比

Table 6 Comparison of ratio errors under single frequency sinusoidal excitation

| f/Hz | 比差/% | | 实验值 |
|---------------|----------------|------------------|--------|
| | 经典 J-A 磁滞模型仿真值 | 修正后的 J-A 磁滞模型仿真值 | |
| 50 | -0.083 | -0.083 | -0.073 |
| 150 | -0.151 | -0.080 | -0.089 |
| 250 | -0.265 | -0.094 | -0.101 |
| 350 | -0.363 | -0.097 | -0.108 |
| 450 | -0.401 | -0.099 | -0.116 |
| 550 | -0.474 | -0.105 | -0.136 |
| 650 | -0.532 | -0.129 | -0.154 |
| 750 | -0.638 | -0.132 | -0.169 |
| 850 | -0.679 | -0.147 | -0.182 |
| 950 | -0.745 | -0.177 | -0.193 |

表 7 单频正弦激励下的角差对比

Table 7 Comparison of angle errors under single frequency sinusoidal excitation

| f/Hz | 角差/(°) | | 实验值 |
|---------------|----------------|------------------|-------|
| | 经典 J-A 磁滞模型仿真值 | 修正后的 J-A 磁滞模型仿真值 | |
| 50 | 2.09 | 2.09 | 2.38 |
| 150 | -3.05 | -1.85 | -2.17 |
| 250 | -5.58 | -2.28 | -2.60 |
| 350 | -13.33 | -2.91 | -3.13 |
| 450 | -18.68 | -3.78 | -3.97 |
| 550 | -24.24 | -4.43 | -4.76 |
| 650 | -29.41 | -5.30 | -5.51 |
| 750 | -34.47 | -6.06 | -6.23 |
| 850 | -39.14 | -6.84 | -6.93 |
| 950 | -43.71 | -7.52 | -7.60 |

量误差均在规定的 0.2S 级准确度限值内，满足对不同谐波电流的测量要求。

3.3 多谐波激励下磁特性的近似线性叠加方法对测量准确度的影响

在多谐波激励下运用 J-A 磁滞修正模型进行电流互感器的磁特性仿真时须将基波与各次谐波的磁特性进行线性叠加。考虑到 0.2S 级电流互感器正常运行时其磁特性存在一定的非线性特征，因此文中进一步通过实验分析磁特性的近似线性叠加方法对 0.2S 级电流互感器测量准确度的影响，验证该方法运用于多谐波激励下的磁特性仿真的合理性。

基于图 4 所示实验原理，在 0.2S 级电流互感器的匝数与采样电阻 R_1 、 R_2 的值保持不变的前提下，利用信号源配套的上位机控制软件自定义电流波形，通过电脑 USB 接口将波形数据发送至信号源的

终端,再由功率放大器产生如式(13)所示包含基波与3~19次奇数次谐波相叠加的一次电流 i_1 :

$$i_1(t) = 5\sqrt{2}\sin(100\pi t) + \sum_h 5\sqrt{2}\sin((2h+1) \times 100\pi t) \quad (13)$$

$h = 1, 3, 5, \dots, 19$

从校验仪读取多谐波激励作用时电流互感器基波与各次谐波的角差与比差的实验数据,并分别与表6、表7中单频正弦激励下的角差与比差的实验数据进行对比,便可分析磁特性的近似线性叠加对测量准确度的影响。

通过实验得到多谐波激励下磁特性的近似线性叠加方法对基波与各次谐波比差和角差的影响如表8、表9所示。

表8 多谐波激励下磁特性的近似线性叠加对比差的影响

Table 8 Influence of approximate linear superposition of magnetic characteristics on ratio errors under multi-harmonic excitation

| f/Hz | 比差/% | | |
|---------------|--------|--------|-------|
| | 线性叠加 | 单频正弦激励 | 变化量 |
| 50 | -0.081 | -0.073 | 0.008 |
| 150 | -0.095 | -0.089 | 0.006 |
| 250 | -0.110 | -0.101 | 0.009 |
| 350 | -0.114 | -0.108 | 0.006 |
| 450 | -0.122 | -0.116 | 0.006 |
| 550 | -0.143 | -0.136 | 0.007 |
| 650 | -0.163 | -0.154 | 0.009 |
| 750 | -0.174 | -0.169 | 0.005 |
| 850 | -0.189 | -0.182 | 0.007 |
| 950 | -0.198 | -0.193 | 0.005 |

表9 多谐波激励下磁特性的近似线性叠加对角差的影响

Table 9 Influence of approximate linear superposition of magnetic characteristics on angle errors under multi-harmonic excitation

| f/Hz | 角差/(°) | | |
|---------------|--------|--------|------|
| | 线性叠加 | 单频正弦激励 | 变化量 |
| 50 | 2.84 | 2.38 | 0.46 |
| 150 | -2.54 | -2.17 | 0.37 |
| 250 | -2.99 | -2.60 | 0.39 |
| 350 | -3.41 | -3.13 | 0.28 |
| 450 | -4.32 | -3.97 | 0.35 |
| 550 | -5.17 | -4.76 | 0.41 |
| 650 | -5.81 | -5.51 | 0.30 |
| 750 | -6.51 | -6.23 | 0.28 |
| 850 | -7.24 | -6.93 | 0.31 |
| 950 | -7.96 | -7.60 | 0.36 |

由表8与表9可知,对于0.2S级电流互感器,多谐波激励下磁特性的近似线性叠加对基波与各

次谐波比差所引起的变化量不超过0.01%,对角差所引起的变化量不超过0.5',其影响相对于0.2S级电流互感器的测量准确度可以忽略不计,因此能够将该方法运用于多谐波激励下电流互感器的磁性仿真。

综上所述,通过对电流互感器测量准确度的仿真与实验,验证了计及谐波的J-A磁滞修正模型可以合理准确地描述谐波环境下电流互感器的磁特性。

4 结语

计量用电流互感器的非线性误差满足规定的0.2S级,基于这一前提,将基波与各次谐波单独激励下的磁特性进行线性叠加,近似反映多谐波激励下电流互感器的磁特性。因此对各次谐波分别修正经典J-A模型参数,利用遗传退火算法进行参数辨识,然后基于近似线性叠加原理实现谐波条件下电流互感器的磁性仿真。

文中以一台0.2S级纳米晶铁心电流互感器为例,通过仿真与实验比较分析其在单频正弦激励下的测量准确度。结果表明,相较于经典J-A磁滞模型,参数修正后的J-A磁滞修正模型对各次谐波的比差与角差很小,与实际误差接近,均在规定的0.2S级误差限值之内;并通过实验确认了在多谐波激励下,采用近似线性叠加方法对基波与各次谐波测量准确度的影响可以忽略不计,说明计及谐波的J-A磁滞模型修正合理有效。

考虑到系统中奇次谐波的含量高于偶次谐波,因此仿真分析与理论建模均主要针对奇次谐波,在进一步研究中将针对偶次谐波和间谐波进行修正。

参考文献:

- [1] 陈少伟,林坤杰,陈碧琳. 分布式光伏发电系统的谐波源机理模型[J]. 浙江电力,2022,41(8):57-64.
CHEN Shaowei, LIN Kunjie, CHEN Bilin. Harmonic source mechanism model of distributed photovoltaic power generation system[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(8):57-64.
- [2] 张帅,于希永,刘柱,等. 基于配电网的谐波监测及三相不平衡调节系统[J]. 电力信息与通信技术,2021,19(12):43-48.
ZHANG Shuai, YU Xiyong, LIU Zhu, et al. System of harmonic monitoring and three-phase unbalance regulation based on distribution Internet of Things[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2021, 19(12):43-48.
- [3] 刘刚,孙立鹏,王雪刚,等. 正弦及谐波激励下的铁心损耗计算方法改进及仿真应用[J]. 电工技术学报,2018,33(21):4909-4918.
LIU Gang, SUN Lipeng, WANG Xuegang, et al. Improvement of

- core loss calculation method and simulation application under sinusoidal and harmonic excitations [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(21): 4909-4918.
- [4] 李猷民, 姜建平, 菅有为, 等. 谐波对电磁式互感器测量的影响研究[J]. 电气技术, 2021, 22(2): 36-41.
LI Youmin, JIANG Jianping, JIAN Youwei, et al. Research on the influence of harmonics on the measurement of electromagnetic transformers [J]. Electrical Engineering, 2021, 22(2): 36-41.
- [5] 李鹤, 岳长喜, 邵海明, 等. 电磁式电流互感器谐波特性[J]. 沈阳工业大学学报, 2020, 42(2): 121-126.
LI He, YUE Changxi, SHAO Haiming, et al. Harmonic characteristics of electromagnetic current transformer [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2020, 42(2): 121-126.
- [6] 李琼林, 邹磊, 刘会金, 等. 电力变压器谐波损耗仿真计算与实验研究[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3521-3527.
LI Qionglin, ZOU Lei, LIU Huijin, et al. Simulation calculation and experimental research on harmonic losses in power transformers [J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3521-3527.
- [7] 陈利翔, 吴丹岳, 邵振国. 基于 J-A 动态磁滞模型的电流互感器谐波变换建模及实验验证[J]. 电气技术, 2016(8): 14-18, 23.
CHEN Lixiang, WU Danyue, SHAO Zhenguo. Modeling and experimental verification of current transformer harmonic transform based on J-A dynamic hysteresis model [J]. Electrical Engineering, 2016(8): 14-18, 23.
- [8] QI X W, YE Y T, WANG S, et al. The practical CT transient simulation model based on dynamic tests and its application [J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2019, 14(2): 221-230.
- [9] 杨汾艳, 余超耘, 刘正富, 等. 基于实际工程的变压器改进 J-A 模型研究[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(4): 191-195.
YANG Fenyan, YU Chaoyun, LIU Zhengfu, et al. Research on modified J-A model of transformer based on practical engineering [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4): 191-195.
- [10] KANOKBANNAKORN W, PENTHONG T. Improvement of a current transformer model based on the Jiles-Atherton theory [C]//2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia). Bangkok, Thailand. IEEE, 2019: 495-499.
- [11] 澹台乐琰, 韩肖清, 王磊, 等. 一种用于变压器直流偏磁状态下的改进型 Jiles-Atherton 模型[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 122-132.
TANTAI Leyan, HAN Xiaoqing, WANG Lei, et al. An improved Jiles-Atherton model for DC bias of transformer [J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 122-132.
- [12] 陈利翔, 邵振国, 张逸. 电磁式电流互感器谐波比值误差实验与分析[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 977-984.
CHEN Lixiang, SHAO Zhenguo, ZHANG Yi. Experiment and analysis on electromagnetic current transformer harmonic ratio error [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(4): 977-984.
- [13] 郭捷. 谐波对电流互感器的传变特性及电能计量影响研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
GUO Jie. Impact of harmonics on current transformer characterization and energy measurement [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [14] 赵志刚, 毕紫莉. 正弦及谐波激励下铁磁材料损耗模型的改进和验证[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3452-3460.
ZHAO Zhigang, BI Zili. Improvement and verification of ferromagnetic material loss model under sinusoidal and harmonic excitation [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3452-3460.
- [15] 赵小军, 徐华伟, 黄康, 等. 一种多谐波激励下取向硅钢片的磁滞及损耗特性预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4): 1625-1633.
ZHAO Xiaojun, XU Huawei, HUANG Kang, et al. A prediction method for hysteresis and loss characteristics of oriented silicon steel sheet under multi-harmonic excitation [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1625-1633.
- [16] 陈彬, 秦小彬, 唐波, 等. 基于 R-L 分数阶导数的动态 J-A 磁滞模型及其特征参数辨识算法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(12): 4590-4603.
CHEN Bin, QIN Xiaobin, TANG Bo, et al. Dynamic J-A hysteresis model based on R-L fractional derivative and its characteristic parameter identification algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(12): 4590-4603.
- [17] LI Y, ZHU J G, LI Y J, et al. Modeling dynamic magnetostriction of amorphous core materials based on Jiles-Atherton theory for finite element simulations [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2021, 529: 167854.
- [18] 张生艳, 鲁怀伟, 方雪欣, 等. Terfenol-D 棒多场耦合 J-A 建模与仿真分析[J]. 磁性材料及器件, 2021, 52(1): 15-20.
ZHANG Shengyan, LU Huaiwei, FANG Xuexin, et al. Modeling and simulation analysis of Terfenol-D rod with multi-field coupling J-A model [J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2021, 52(1): 15-20.
- [19] 李宜伦, 张异殊, 宋光. 基于改进鲸鱼算法的电流互感器 J-A 模型磁滞参数识别[J]. 中国电力, 2022, 55(2): 190-199.
LI Yilun, ZHANG Yishu, SONG Guang. Hysteresis parameter identification of current transformer J-A model based on improved whale algorithm [J]. Electric Power, 2022, 55(2): 190-199.
- [20] 曹祎, 王路, 雷民, 等. 基于改进粒子群算法的电流互感器 J-A 模型参数辨识[J]. 电测与仪表, 2021, 58(5): 70-77.
CAO Yi, WANG Lu, LEI Min, et al. Parameter identification for J-A hysteresis model of current transformer based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(5): 70-77.
- [21] 何庆, 吴意乐, 徐同伟. 改进遗传模拟退火算法在 TSP 优化中的应用[J]. 控制与决策, 2018, 33(2): 219-225.

- HE Qing, WU Yile, XU Tongwei. Application of improved genetic simulated annealing algorithm in TSP optimization [J]. Control and Decision, 2018, 33(2): 219-225.
- [22] YU J H, XIE Z D, DONG Z G, et al. Intelligent bus scheduling control based on on-board bus controller and simulated annealing genetic algorithm [J]. Electronics, 2022, 11(10): 1520.
- [23] 徐小琴, 郑旭, 王思聪, 等. 基于改进遗传退火算法的输配电网协调规划方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 124-131.
- XU Xiaoqin, ZHENG Xu, WANG Sicong, et al. Coordinated planning method of transmission and distribution network based on an improved genetic annealing algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 124-131.
- [24] 赵小军, 王瑞, 杜振斌, 等. 交直流混合激励下取向硅钢片磁滞及损耗特性模拟方法 [J]. 电工技术学报, 2021, 36(13): 2791-2800.
- ZHAO Xiaojun, WANG Rui, DU Zhenbin, et al. Hysteretic and loss modeling of grain oriented silicon steel lamination under AC-DC hybrid magnetization [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(13): 2791-2800.
- [25] 戎静怡. 谐波激励条件下变压器铁心磁性能研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2017.
- RONG Jingyi. Research on the magnetic properties of transformer core under harmonic excitation [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2017.
- [26] 李超, 徐启峰. J-A 模型误差修正和温度特性仿真 [J]. 电工技术学报, 2014, 29(9): 232-238.
- LI Chao, XU Qifeng. Error modification and temperature simulation of J-A model [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(9): 232-238.
- [27] 李超, 徐启峰. 非晶合金 J-A 模型修正 [J]. 电机与控制学报, 2014, 18(7): 86-93.
- LI Chao, XU Qifeng. Amorphous alloys J-A model amendment [J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(7): 86-93.

作者简介:



肖贤博

肖贤博(1999),男,硕士在读,研究方向为电力系统测量技术(E-mail: 1428143105@qq.com);

徐启峰(1959),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为智能电网测量与控制新技术;

吴妹婷(1995),女,硕士,研究方向为电力系统测量技术。

Modification of J-A hysteresis model considering harmonics

XIAO Xianbo¹, XU Qifeng¹, WU Shuting¹, HUANG Yifan¹, TAN Qiao²

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. College of Computer and Control Engineering, Minjiang University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The J-A hysteresis theory is widely used in the modeling of the magnetic properties of electromagnetic current transformers. However, under harmonic conditions, the model has significant errors. To solve this problem, the classical J-A model parameters are modified for each harmonic, and genetic-annealing algorithm is used for parameter identification. Then, the magnetic characteristics of each harmonic are linearly added to achieve the magnetic characteristics modeling of the current transformer under non sinusoidal excitation. The premise of adopting this correction method is that the nonlinear error of the measuring current transformer meets the specified level 0.2S, so the simulation analysis and error correction of harmonic hysteresis loops are approximately applicable to the linear superposition principle. Taking 0.2S level current transformers made of nanocrystalline materials as an example, the simulation analysis and experimental verification of angle errors and ratio errors show that the J-A model after parameter correction improves measurement accuracy under harmonic conditions, and the approximate linear superposition method of multiple harmonic magnetic characteristics has a negligible impact on measurement accuracy. This confirms that the J-A hysteresis model correction considering harmonics is reasonable and effective.

Keywords: electromagnetic current transformers; J-A hysteresis model; harmonic; parameter correction; genetic-annealing algorithm; linear superposition

(编辑 方晶)