

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.10.008

## 基于J-A磁滞理论的变压器剩磁预测

龙 启<sup>1</sup>, 杨 旭<sup>1</sup>, 姜克如<sup>1</sup>, 张长虹<sup>1</sup>, 侯明春<sup>1</sup>, 辛 昱<sup>2</sup>,  
熊德华<sup>2</sup>, 段雄鹰<sup>2</sup>

(1. 中国南方电网超高压输电公司电力科研院, 广州 510663; 2. 大连理工大学电气工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 用断路器实现变压器的选相投切是减小励磁涌流的有效措施, 选相合闸的核心是根据分闸后的剩磁得到合适的合闸角度。针对剩磁的预测, 电压积分法存在积分上限不易确定的问题, 而Jiles-Atherton(J-A)模型具有参数物理含义明晰, 计算准确等优点。首先, 针对目前提取J-A模型参数的粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)收敛速度慢、容易陷入局部最优解的问题, 提出了一种改进粒子群优化算法, 通过优化粒子的速度和位置更新公式, 解决了传统粒子群算法收敛速度慢, 容易陷入局部最优解的问题。这种新的算法不仅加快了收敛速度, 也平衡了整体和局部的搜寻能力。然后, 基于J-A模型对变压器进行剩磁预测, 搭建变压器空载合闸实验平台, 使用PSCAD/EMTDC搭建结合J-A模型和经典变压器的仿真模型, 在不同的合闸角度下预测变压器的剩磁。最后, 将仿真与实际实验录波数据相结合, 通过比较励磁涌流的峰值验证了剩磁预测的准确性。

**关键词:** 铁心剩磁; J-A理论; 参数辨识; 励磁涌流; 选相投切

## Remanence Prediction of Transformer Based on J-A Hysteresis Theory

LONG Qi<sup>1</sup>, YANG Xu<sup>1</sup>, JIANG Keru<sup>1</sup>, ZHANG Changhong<sup>1</sup>, HOU Mingchun<sup>1</sup>, XIN Yu<sup>2</sup>,  
XIONG Dehua<sup>2</sup>, DUAN Xiongying<sup>2</sup>

(1. CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510663, China; 2. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116024, China)

**Abstract:** Using circuit breaker to achieve phase-controlled switching of transformer is an effective measure to reduce inrush current. The core of phase-controlled closing is to obtain the appropriate closing angle based on the remanent flux after opening. In the context of remanence prediction, the voltage integration method has the problem that the upper integration limit is difficult to determine, while the Jiles-Atherton(J-A) model has the advantages of clear physical meaning of parameters and accurate calculation. First, to address the problems of slow convergence and a tendency to fall into local optimal solutions in the particle swarm optimization(PSO) algorithm currently used for extracting J-A model parameters, an improved particle swarm-optimization algorithm is proposed. By optimizing the velocity and position update formulas of the particles, the issue of slow convergence and susceptibility to local optima in the traditional PSO algorithm are resolved. This new algorithm not only accelerates the convergence speed but also balances the global and local search capabilities. Then, the remanence prediction of the transformers is carried out based on J-A model. A transformer no-load closing experimental platform is established, and a simulation model combining the J-A model and the classical transformer model is built using PSCAD/EMTDC to predict the remanence flux under different closing angles. Finally, the accuracy of remanence prediction is verified by comparing the peak value of inrush current by way of combining simulation with experimental recorded data.

**Key words:** remanence in transformer; J-A theory; parameter identification; inrush current; phase-controlled switching

收稿日期:2026-05-09; 修回日期:2026-07-12

基金项目:南方电网公司重点科技项目(CGYKJXM20220346)。

Project Supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid(CGYKJXM20220346).

## 0 引言

在空载变压器随机合闸过程中,可能会引发远超额定电流的励磁涌流,这可能会对电力系统的安全和稳定性造成损害<sup>[1-6]</sup>。为了解决这个问题,通常可以采用选相投切技术<sup>[7]</sup>。即根据断开时剩余磁通量的数值,在最佳相位上合闸,保证磁通平稳过渡,从而对产生励磁涌流的现象起到有效的抑制作用<sup>[8-9]</sup>。

要确定最佳的合闸相位,需要获取精确的剩磁值。至今为止,剩磁分析的主要方法可以归纳为以下几类:经验估算法,直接测量法,励磁涌流反推法,电压积分法和磁滞模型法。其中最为常用的是电压积分法和磁滞模型法<sup>[10]</sup>。

电压积分法利用电压互感器采集变压器一侧绕组的电压信号,通过分析变压器端口电压与剩磁之间的关系,通过对端口电压进行修正,积分而得到剩磁的估计值。这种方法较为简便,对电压信号精准度要求较高,实际应用中积分的上下限也不便确定,难以准确地计算剩磁<sup>[11-12]</sup>。

磁滞模型法中应用最为广泛的是物理含义明确的Jiles-Atherton(J-A)模型<sup>[13-16]</sup>,它能够较好地描述真实的磁滞现象。J-A模型中存在5个不能直接获得的关键参数,这5个参数越准确,建立的磁滞模型也越符合实际情况<sup>[17]</sup>。为此,研究人员引入了系统辨识和参数辨识理论,国内外也在这一领域进行了大量的研究。如K Chwastek等人使用了确定参数的遗传算法(genetic algorithm, GA),Chelho等人提出通过粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)来优化计算参数,减少了计算量,还有学者通过灰狼优化算法(grey wolf optimizer, GWO)来生成参数。然而,这些算法存在一些问题,比如收敛速度慢、容易陷入局部最优解等<sup>[18-20]</sup>。

为了解决这些问题,文中提出了一种自适应更新速度位置的改进PSO算法。改进算法的辨识精度明显高于传统算法。此外,利用PSCAD/EMTDC搭建以J-A模型为基础的变压器模型,模拟断路器对变压器进行空载合闸,在给出剩磁的预测模型的同时考虑直流偏磁的影响。在滤去直流偏磁的影响后通过比较仿真与实验的励磁涌流的峰值验证了剩磁预测方法的有效性。

## 1 J-A磁滞模型

J-A磁滞模型是利用磁畴壁运动原理和能量守恒的物理模型,以磁畴理论为基础,用以描述铁磁材料的非线性磁滞特性。在该磁滞模型中,实际的磁化强度 $M$ 被分解为可逆磁化强度 $M_{\text{rev}}$ 与不可逆磁

化强度 $M_{\text{irr}}$ ,即

$$M = M_{\text{irr}} + M_{\text{rev}} \quad (1)$$

式(1)中,磁畴壁的弯曲会引起可逆性磁化分量,磁畴壁的替代会引起不可逆磁化分量。可逆磁化强度 $M_{\text{rev}}$ 的常微分方程为

$$\frac{dM_{\text{irr}}}{dH_e} = \frac{\delta_M(M_{\text{an}} - M_{\text{irr}})}{k\delta} \quad (2)$$

式(2)中:

$$H_e = H + \alpha M \quad (3)$$

$$M_{\text{an}} = M_s \left[ \coth\left(\frac{H + \alpha M}{a}\right) - \left(\frac{a}{H + \alpha M}\right) \right] \quad (4)$$

$$\delta_M = \begin{cases} 1 & \text{sgn}(M_{\text{an}} - M) \cdot \text{sgn}(dH/dt) \geq 0 \\ 0 & \text{sgn}(M_{\text{an}} - M) \cdot \text{sgn}(dH/dt) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式(2)-(5)中: $H_e$ 为有效磁场强度; $M_{\text{an}}$ 为无磁滞磁化强度,用Langevin函数描述; $\delta_M$ 为防止出现非物理解而引出的系数; $\delta$ 为方向系数; $dH/dt < 0$ ,  $\eta = -1$ ;  $dH/dt > 0$ ,  $\eta = 1$ ;  $M_s$ 、 $\alpha$ 、 $a$ 分别为饱和磁化强度、磁畴内部耦合平均场参数、无磁滞磁化曲线形状参数。

$M_{\text{an}}$ 、 $M_{\text{rev}}$ 、 $M_{\text{irr}}$ 之间的关系为

$$M_{\text{rev}} = c(M_{\text{an}} - M_{\text{irr}}) \quad (6)$$

式(6)中, $c$ 为可逆磁化系数。

能量守恒方程为

$$\mu_0 \delta_M \int M dH_e = \mu_0 \delta_M \int M_{\text{an}} dH_e - \mu_0 k \eta \int \left( \frac{dM_{\text{irr}}}{dH_e} \right) dH_e \quad (7)$$

式(7)中, $k$ 为磁畴间的牵制系数。

根据上述方程得到的J-A模型为

$$\frac{dM}{dH} = \frac{\delta_M(1-c)(M_{\text{an}} - M) + k\eta c \cdot \frac{dM_{\text{an}}}{dH}}{k\eta - \alpha\delta_M(1-c)(M_{\text{an}} - M)} \quad (8)$$

## 2 参数辨识方法

设定适应度函数为由J-A模型参数计算出的磁场强度曲线与目标磁场强度曲线之差。为准确地评估优化算法的解析精度,采用方均根误差(root mean square error,  $e_{\text{RMSE}}$ )作为目标函数(或适应度值)来优化<sup>[21-22]</sup>。通过最小化这个目标函数,可以将J-A模型参数辨识的问题转化为一个优化问题,从而提高参数识别的准确性。目标函数为

$$Fitness = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [H_{\text{mea}}(i) - H_{\text{cal}}(i)]^2}{N}} \quad (9)$$

式(9)中: $H_{\text{mea}}$ 为磁场强度实测值; $H_{\text{cal}}$ 为磁场强度计算值; $N$ 为实验采样点数,后续实验中取20。

### 2.1 标准PSO算法

在标准的PSO算法框架内,每个粒子通过参照其自身过去的最佳位置(即 $p_{\text{best}}$ )和整个群体中所发

现的最佳位置(即  $gbest$ )进行搜索,以便定位到最优解。对于一个以  $X=\{x_1, x_2, \dots, x_D\}$  定义的变量集,同时把最小化函数  $\min\{f(x)\}$  作为目标的优化问题,粒子的位置更新公式为:

$$v_{id}(t+1) = wv_{id}(t) + c_1r_1[pbest_{id} - x_{id}(t)] + c_2r_2[gbest_d - x_{id}(t)] \quad (10)$$

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1) \quad (11)$$

式(10)、(11)中:在时刻  $(t+1)$ , 粒子  $i$  的速度与位置分别用  $v_{id}(t+1)$  和  $x_{id}(t+1)$  表示;  $w$  为惯性权重的系数;  $c_1$ 、 $c_2$  分别为个体学习因子和群体学习因子;  $r_1$ 、 $r_2$  为两个服从均匀分布在  $[0, 1]$  区间内的随机变量,用于粒子的位置和速度的更新。然而算法控制参数(如粒子初始化、惯性权重、学习因子等)决定了算法的搜索能力,同时这些参数也影响了该算法在全局探索和局部精细调整之间的平衡。这导致了标准 PSO 算法在局部搜寻能力和搜寻精度上存在不足<sup>[23-24]</sup>。

## 2.2 改进算法

文中提出一种改进的自适应速度位置更新方法,用个体最优和群体最优的线性组合  $(pbest_{id} + gbest_d)/2$  和  $(pbest_{id} - gbest_d)/2$  分别替换式(10)中的  $pbest_{id}$  和  $gbest_d$  那么获得新的速度更新策略为

$$v_{id}(t+1) = wv_{id}(t) + c_1r_1[(pbest_{id} + gbest_d)/2 - x_{id}(t)] + c_2r_2[(pbest_{id} - gbest_d)/2 - x_{id}(t)] \quad (12)$$

引入每个粒子在所有维度上信息的平均值

$$p_{ad}(t) = \frac{1}{D} \sum_{i=1}^D x_{id}(t) \quad (13)$$

为了使局部搜索和全局搜索的效果在迭代过程中达到平衡,使用  $p_{ad}$  来替代  $pbest_{id}$ , 这样就不需要每次迭代都重新计算  $pbest_{id}$ , 从而加快算法的收敛速度。

使用两种不同的位置更新策略:一种是“ $X=X+V$ ”, 主要用于增强局部搜索能力;另一种是“ $X=wX+(1-w)V$ ”则主要用于加强全局搜索能力,见式(14)、(15)。

$$p_i = \frac{\exp\{fit[x_i(t)]\}}{\exp\left\{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N fit[x_i(t)]\right\}} \quad (14)$$

$$x_{id}(t+1) = \begin{cases} wx_{id}(t) + (1-w)v_{id}(t+1) & p_i > rand \\ x_{id}(t) + v_{id}(t+1) & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

式(14)中:  $fit(\cdot)$  用于衡量每个粒子的适应度;  $N$  定义了群体中的粒子总数。在式(14)里, 每个粒子的适应度比值  $p_i$ , 用来衡量个别粒子适应度与整个

群体平均适应度之间的相对值。当粒子处于一个较优的位置时该粒子的适应度值会显著高于平均水平(即  $p_i$  较大), 此时采用“ $X=wX+(1-w)V$ ”的更新策略, 以利用其当前位置的信息进行全局搜索;反之, 如果粒子的适应度值接近或低于平均水平, 说明需要更密集的局部搜索, 此时采用“ $X=X+V$ ”的策略。新的速度和位置更新公式为

$$\begin{cases} v_{id}(t+1) = wv_{id}(t) + c_1r_1[(pbest_{id} + gbest_d)/2 - x_{id}(t)] + c_2r_2[(pbest_{id} - gbest_d)/2 - x_{id}(t)] \\ x_{id}(t+1) = wx_{id}(t) + (1-w)v_{id}(t+1) \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1) \\ v_{id}(t+1) = wv_{id}(t) + c_1r_1[p_{ad} - x_{id}(t)] + c_2r_2[gbest_d - x_{id}(t)] \end{cases} \quad (17)$$

采用自适应更新策略来动态调整粒子的速度和位置, 基于适应度比值  $p_i$  与预定阈值  $\delta$  的比较, 当  $p_i > \delta$  时, 即个体粒子的适应度显著高于种群平均值时, 这通常反映出算法正处于探索阶段或粒子分布相对较广。在这种情况下, 使用式(16)的更新方式, 即结合个体最优位置和群体最优位置的线性组合来扩展粒子的搜寻范围。对于位置的更新, 则通过“ $X=wX+(1-w)V$ ”来强化全局搜寻能力。相反, 当  $p_i < \delta$  时, 表明个体粒子的适应度与群体平均适应度接近, 这意味着算法正在进行深入的局部搜索或粒子已经趋于聚集。这一阶段, 采用式(17)策略更为适宜, 即增强算法的局部探索能力, 避免在解决复杂多峰问题时过早收敛于局部最优解。同时, 在速度更新过程中引入平均维度信息使得算法更快地收敛。

通过这种自适应的更新机制, 算法能够根据搜索阶段和粒子的分布状况灵活调整探索策略, 既能有效拓宽搜索范围寻找全局最优解, 又能在必要时加强局部搜索, 以期达到搜索效果更优和收敛速度更快的目的。

改进的 PSO 算法计算的步骤可总结为如下几个阶段。

1) 初始化过程: 本阶段主要是设定算法的基本参数, 如种群大小  $N$ , 最大迭代次数  $K$ , 学习因子, 惯性权重等。同时, 为每个粒子在预定的搜索空间内随机分配初始位置和速度。

2) 适应度评估: 利用预先设定的目标函数, 计算种群中每个粒子的适应度值, 用于后续的优化过程。

3) 更新全局最优和个体最优: 逐个比较每个粒子的当前的适应度和其过去的最佳适应度, 如果当前适应度优秀于历史最佳适应度, 则更新粒子的位

置为最优位置,反之则保持不变。

4)速度和位置的动态更新:计算每个粒子的适应度比值 $p_i$ 。如果 $p_i$ 大于阈值 $\delta$ ,表示需要进行全局搜索优化,然后根据式(16)的更新策略及时修正粒子的速度和位置。反之,如果 $p_i < \delta$ ,说明应当加强局部搜索能力,便采取式(17)进行速度和位置的更新。

5)终止条件判断:在算法执行过程中,检查是否满足停止条件,即达到最大迭代次数或者达到足够的优化程度。如果条件满足,算法将停止并输出最终结果;若不满足,则算法会回到第二步继续迭代。

通过上述步骤,改进算法能够在全局和局部搜索之间灵活调整,有效地寻找到问题的最优解。

### 3 算法可行性验证

为了验证文中提出的改进算法在J-A模型参数辨识方面的可行性和有效性,使用了一组自定义参数生成的磁滞回线作为理论曲线,接着分别PSO算法,GWO算法以及改进算法来对J-A静态磁滞模型的参数进行识别<sup>[25]</sup>。结果见图1、表1。由图1、表1可以清楚地看到改进算法的拟合效果优于传统算法。传统算法的最大相对误差为55.9%,而改进算法的最大相对误差降低到17.6%。

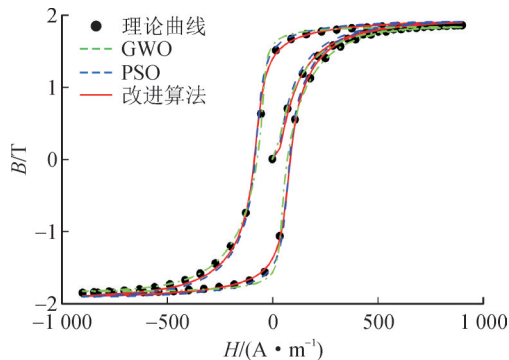


图1 不同参数辨识算法对比

Fig. 1 Comparison of results of different parameter identification algorithms

表1 参数辨识结果对比

Table 1 Comparison of parameter identification results

| 算法   | $k$    | $\alpha$               | $a$    | $M_s$               | $c$   |
|------|--------|------------------------|--------|---------------------|-------|
| 理论值  | 50.000 | $8.000 \times 10^{-5}$ | 30.000 | $1.530 \times 10^6$ | 0.700 |
| PSO  | 66.593 | $1.000 \times 10^{-4}$ | 46.767 | $1.586 \times 10^6$ | 0.513 |
| GWO  | 69.698 | $5.208 \times 10^{-5}$ | 13.992 | $1.485 \times 10^6$ | 0.561 |
| 改进算法 | 54.765 | $9.422 \times 10^{-5}$ | 35.473 | $1.576 \times 10^6$ | 0.622 |

此外,为了表征上述各算法的收敛速度,各个算法均方根误差随迭代次数的变化趋势见图2。

传统算法的早熟现象很明显,并且其全局搜索能力较差。改进算法可以多次跳出局部最优,因为

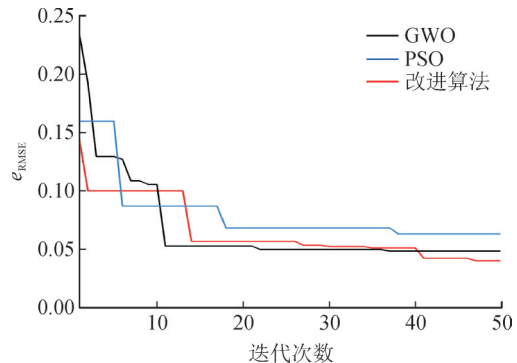


图2 各算法均方根误差随迭代次数的变化

Fig. 2 The variation of  $e_{RMSE}$  of each algorithm with the number of iterations

它根据不同的情况采用不同的速度和位置更新策略重新确定全局最优解区域。

### 4 基于J-A模型的剩磁预测

常规选相合闸技术的效果受到变压器剩磁的影响。由于变压器的结构和特性复杂,直接测量剩磁十分困难。剩磁是变压器分闸后残留在铁心中的磁通,而分闸时的相位会直接影响剩磁的大小。如不考虑其他因素的影响,剩磁的计算公式为

$$\Phi_r = -\Phi_m \cos(\omega t_1) \quad (18)$$

式(18)中: $\Phi_r$ 为变压器中的剩磁量; $\Phi_m$ 为磁通的峰值; $t_1$ 为变压器的开断时刻; $\omega$ 为电源角频率。式(18)描述了理想情况下剩余磁通量的计算公式,但是实际工况下,受到多种因素的影响,剩磁的测量变得更加复杂。

变压器空载运行时,一次侧绕组感应电动势的瞬时值为

$$e_1(t) = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (19)$$

设剩磁稳定时刻为 $t$ ,则稳定后的剩磁可表示为

$$\Phi_r = -\frac{1}{N_1} \int_{t_0}^{t_{final}} e_1(t) dt \quad (20)$$

理论上,剩磁量可通过对变压器一次侧绕组电压进行积分求取,但通常因为电压积分上限的不准确性而导致结果出现误差<sup>[26]</sup>。铁心特性、绕组电容、杂散电容以及断路器暂态恢复电压等因素的影响导致分闸后的剩磁需要一段时间才能稳定下来。因此,在分闸时刻进行的电压积分得到的剩磁值可能存在一定的不确定性。因此需要引入J-A模型,通过磁滞回线与纵轴交点判断剩磁点<sup>[27]</sup>,可以有效避免电压积分法中积分上限不便确定的问题。

文中使用的测算方法见图3,首先采集变压器空载分闸后的一次侧电压和电流数据,进行离散化处理,以得到波形对应的离散数据,见图4、5。将电压采集模块采集到的电压数据和电流采集模块采

集到的电流数据通过式(21)、(22)进行处理得到磁通密度  $B$  和磁场强度  $H$  的数据。

$$B = -\frac{1}{N_1} \int_{t_0}^{t_{\text{final}}} e_1(t) dt \quad (21)$$

$$H = \frac{N_1 \times i(t)}{L_e} \quad (22)$$

式(22)中:  $i(t)$  为励磁电流瞬时值;  $L_e$  为变压器铁心有效磁路长度。

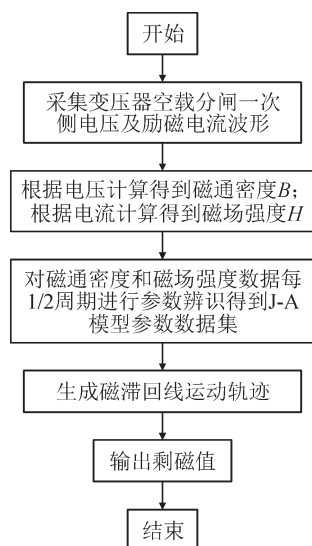


图3 剩磁测算流程

Fig. 3 Calculation process of remanence

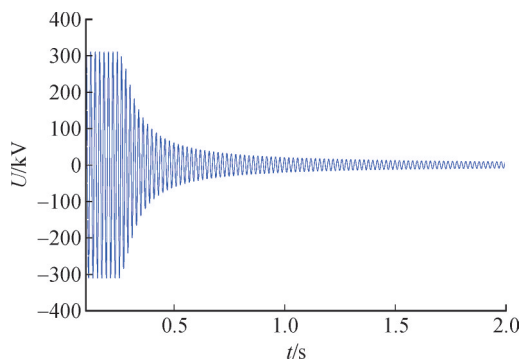


图4 变压器空载分闸电压波形

Fig. 4 Waveform of no-load opening voltage of transformer

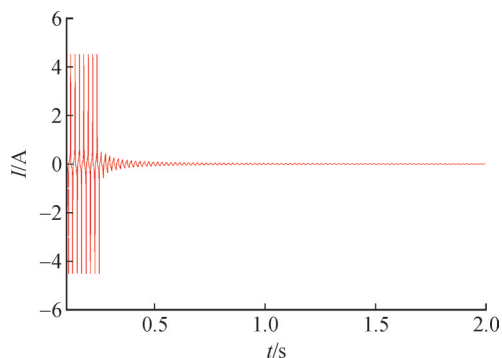


图5 变压器空载分闸励磁电流波形

Fig. 5 Waveform of excitation current for no-load opening of transformer

采用最小二乘法对电压数据进行拟合,对电压取绝对值,并且将分闸后每半波的峰值进行提取,以峰值数据为基础拟合,可得到电压稳定时间,由此确定  $t_{\text{final}}$ ,拟合过程见图6。然后将磁通密度和磁场强度数据作为输入,每半个周期运行一次改进 PSO 辨识算法得到 J-A 模型参数的数据集  $\{M_{s_i}, \alpha_i, \alpha_i, k_i, c_i\} (i=1, 2, 3, \dots, T_{\text{max}})$ , 最终生成磁滞回线运动轨迹,磁滞回线与纵轴的最后交点即为剩磁点,见图7。

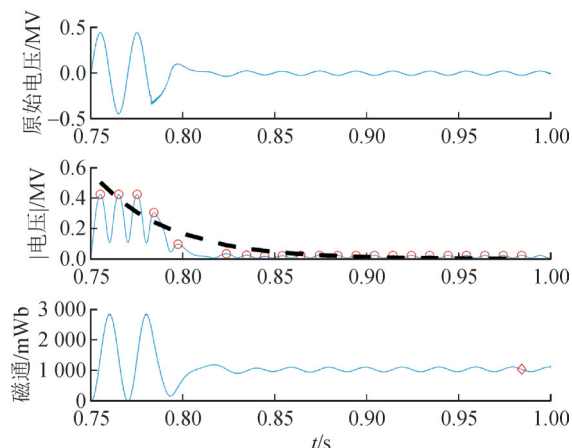


图6 最小二乘法处理过程

Fig. 6 Principle of least squares processing

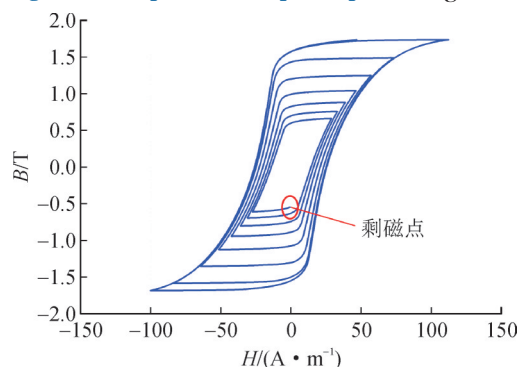


图7 电压积分过程中磁通密度变化

Fig. 7 Change in magnetic flux during voltage integration process

在积分求取磁通密度的过程中,受铁心内偏磁的影响,导致积分得到的波形出现趋势项,铁心实际的磁通密度产生畸变,通过对数据采用多项式拟合算法识别出波形中趋势项包含的阶数,对上述影响进行消除,得到稳定变化的磁通密度,见图8。

## 5 模型仿真和实验验证

受到磁滞因素的影响,变压器空载运行时,电流全部用于励磁,铁心磁通较大,容易达到饱和状态,在变压器的空载合闸过程中产生的励磁涌流波形和数值可以作为验证剩磁预测模型正确性和精确度的一个重要依据<sup>[28-31]</sup>。

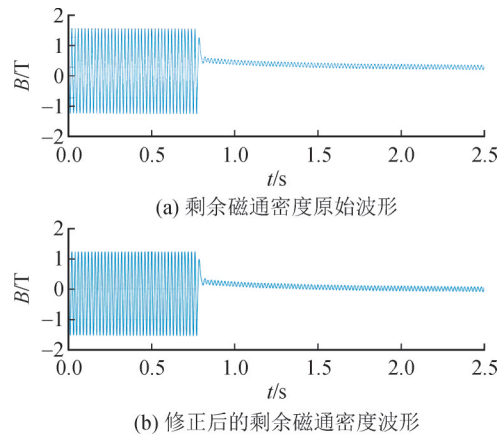


图8 修正含有畸变的磁通波形

Fig. 8 Correcting distorted magnetic flux waveforms

在文中,采用了单相双绕组变压器并结合断路器进行实验。测试平台主要具体包括市电系统、驱动电路、电容器组、调压器、选相控制器、断路器、单相变压器以及各种测量设备,见图9,实验电路图见图10。变压器的参数见表2。



图9 实验测试平台

Fig. 9 Experimental testing platform

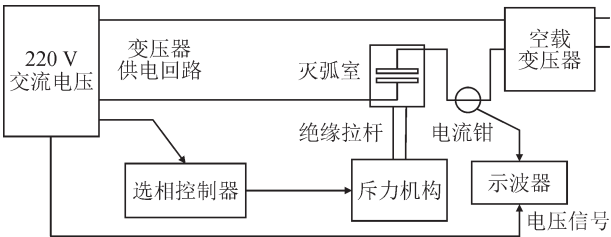


图10 变压器空载实验电路图

Fig. 10 Circuit diagram of transformer no-load test

表2 变压器参数

Table 2 Transformer parameters

| 参数           | 数值      | 参数        | 数值   |
|--------------|---------|-----------|------|
| 额定容量/V A     | 200     | 铜损/p.u.   | 0.50 |
| 输入/输出电压有效值/V | 220/160 | 涡流损耗/p.u. | 0.03 |
| 运行频率/Hz      | 50      | 漏抗/p.u.   | 0.10 |

同时,使用PSCAD软件搭建基于J-A模型的变压器的空载实验的饱和模型,以及模拟断路器在不

同的合闸角度下进行变压器剩磁的预测,磁滞模拟由连接在绕组两端补偿电流源的形式表示<sup>[32]</sup>。J-A模型参数由参数辨识算法得到,变压器参数按照实际实验设置,仿真模型见图11。将预测剩磁值结果输入变压器模型中。实验中断路器和仿真断路器在同一角度进行合闸,检测励磁涌流的峰值,通过其误差的大小来验证J-A模型预测出剩磁值的准确性。

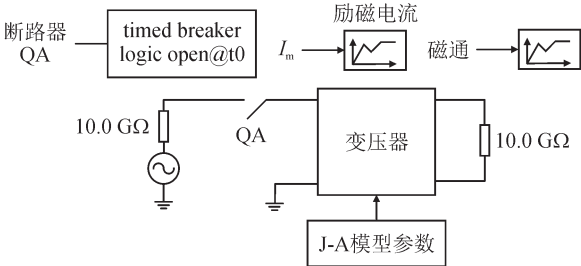


图11 仿真模型

Fig. 11 Simulation model

通过选相控制可以获得不同的合闸角度。仿真结果与实验结果的对比见表3、图12。

表3 各组波形励磁涌流峰值对比

Table 3 Peak values of inrush current in each waveform

| 励磁涌流峰值/(°) | 仿真结果/A  | 实验结果/A  | 相对误差/% |
|------------|---------|---------|--------|
| 30         | 50.006  | 52.422  | 4.8    |
| 60         | 20.961  | 21.818  | 3.9    |
| 90         | 0.400   | 0.420   | 4.8    |
| 120        | -20.972 | -22.183 | 5.5    |

从以上图12、表3结果可以看出,将变压器空载分闸后得出的剩磁转化为相位输入到控制器并进行下一次空载合闸,断路器合闸后第一个周波的励磁涌流峰值与在仿真模型中得到的结果相差很小。由此可以验证参数辨识算法的准确性和剩磁预测的有效性,在避免了利用电压积分法中积分上限难以确定这个的基础上,使用J-A磁滞模型的方法可以准确地预测变压器剩磁。

6 结论

- 1)变压器铁心的剩磁可以利用J-A磁滞模型来计算。这种方法能够计算变压器空载分闸后的磁滞回线信息,并且得到准确的剩磁值,克服了电压积分法中积分上限确定不准导致剩磁计算出现偏差的问题。
- 2)在J-A模型的参数辨识过程中,对粒子群优化算法进行了改进,优化了粒子的速度和位置更新公式。这一算法具有不易陷入局部最优解、快速收敛以及高参数辨识精度等优点。提高了剩磁计算的精度和速度。

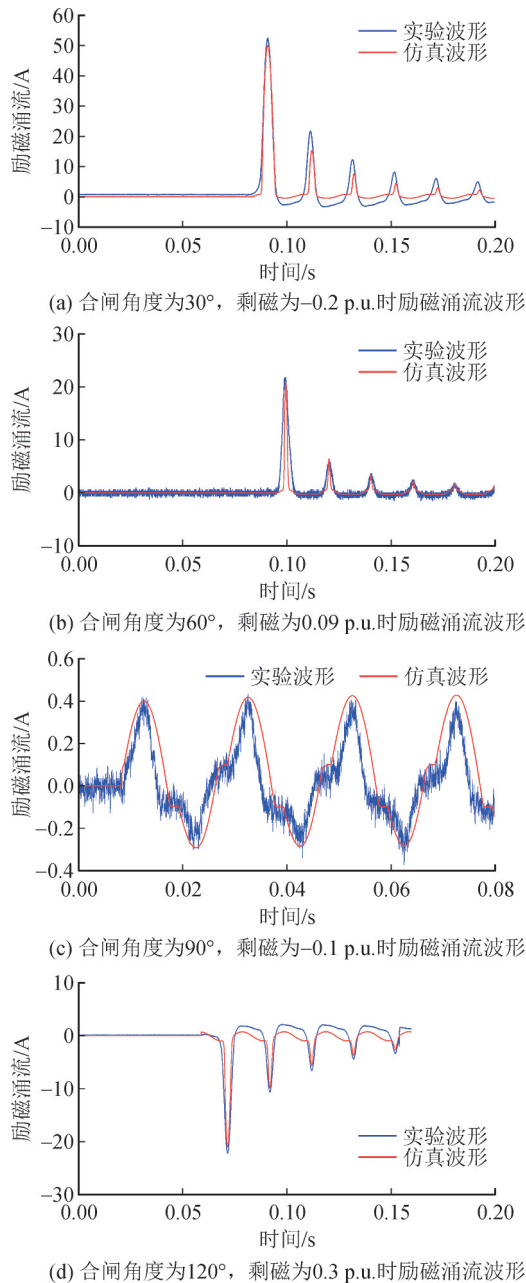


图12 不同合闸角度的励磁涌流波形对比

Fig. 12 Comparison of inrush current waveforms at different closing angles

3)通过仿真和实验验证,通过对比变压器分闸后下一次的不同空载合闸角度下的励磁涌流峰值,基于J-A磁滞模型的剩磁测算方法可获取准确求取剩磁。

## 参考文献:

- [1] 夏聆峰,孙向飞,何俊伟,等.换流变压器励磁涌流研究[J].云南电力技术,2016,44(1):1-5.  
Xia Lingfeng, Sun Xiangfei, He Junwei, et al. Research on inrush current of converter transformer[J]. Yunnan Electric Power, 2016, 44(1):1-5.
- [2] 周余.变压器励磁涌流及其抑制方法研究[J].电气技术与经

济,2024(2):166-168.

- Zhou Yu. Research on transformer excitation inrush current and its suppression methods[J]. Electrical Equipment and Economy, 2024 (2): 166-168.
- [3] 龙启,杨旭,薛淑鹏,等.基于圆坐标表征法的换流变压器励磁涌流辨识研究[J].电力系统保护与控制,2025,53(9):118-129.  
Long Qi, Yang Xu, Xue Shupeng, et al. Research on identification of converter transformer inrush current based on circular coordinate representation method[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(9): 118-129.
- [4] 容春艳,胡诗尧,李腾,等.高压内置型高阻抗变压器励磁涌流特性分析及工程计算[J].电测与仪表,2025,62(1):217-224.  
Rong Chunyan, Hu Shiyao, Li Teng, et al. Analysis and engineering calculation of excitation inrush current characteristics of high voltage built-in high impedance transformer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(1): 217-224.
- [5] 栾云飞,张禄亮,季天瑶,等.基于直方图和余弦相似度的光伏电站主变压器励磁涌流识别[J].电测与仪表,2025,62(7):181-189.  
Luan Yunfei, Zhang Luliang, Ji Tianyao, et al. Histogram and cosine similarity based magnetizing inrush current identification for main transformer in photovoltaic power station[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(7): 181-189.
- [6] 戚沁雅,曹伯仲,安义,等.基于改进Prony算法的配电变压器群励磁涌流多特征综合辨识方法[J].电力科学与技术学报,2024,39(6):69-78.  
Qi Qinya, Cao Bozhong, An Yi, et al. Comprehensive multi-feature identification method of magnetizing inrush current in distribution transformers based on improved Prony algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 69-78.
- [7] Sung B C, Kim S. Accurate transformer inrush current analysis by controlling closing instant and residual flux[J]. Electric Power Systems Research, 2023(223): 109638.
- [8] 胡凯波,崔娜.500 kV变压器的励磁涌流与抑制方法[J].电工材料,2019(4):36-39.  
Hu Kaibo, Cui Na. Research on inrush current of 500 kV transformer and its suppression method[J]. Electrical Engineering Materials, 2019(4): 36-39.
- [9] 吴华林.变电站投运变压器和应涌流案例及抑制方法研究[J].变压器,2025,62(3):66-75.  
Wu Hualin. Case and suppression method study of sympathetic inrush current in substation transformers operation[J]. Transformer, 2025, 62(3): 66-75.
- [10] 王洋.变压器铁心剩磁预测研究[D].济南:山东大学,2017.  
Wang Yang. Research on residual magnetism prediction of transformer iron core[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [11] 彭涛.变压器剩磁变化规律及励磁涌流抑制研究[D].武汉:华中科技大学,2017.  
Peng Tao. Research on the variation law of residual magnetism in transformers and the suppression of excitation inrush current[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [12] Xie Weijie, Xiao Fan, Tu Chunming, et al. Suppression strategy for the inrush current of a solid-state transformer caused by the reclosing process[J]. Protection and Control of Modern Power

- Systems, 2023, 8(1):53.
- [13] 任 静. JA/SW 三维混合磁滞模型理论及仿真研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2010.
- Ren Jing. Theoretical and simulation study on JA/SW three dimensional hybrid hysteresis model[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2010.
- [14] 罗 炜, 陈煜敏, 钱 海, 等. 基于分数阶导数理论的高频变压器铁心动态J-A磁滞模型[J]. 供用电, 2024, 41(6):90-96.
- Luo Wei, Chen Yumin, Qian Hai, et al. Dynamic J-A hysteresis model of high frequency transformer core based on fractional derivative theory[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(6):90-96.
- [15] 林峻宁, 严柏平, 冯浩文, 等. 基于模拟退火改进PSO算法的J-A磁滞模型参数辨识[J]. 变压器, 2024, 61(2):26-34.
- Lin Junning, Yan Baiping, Feng Haowen, et al. Parameter identification of J-A hysteresis model based on hybrid algorithms of SA and improved PSO[J]. Transformer, 2024, 61(2):26-34.
- [16] 韩 霄, 陈浩天, 周 佳, 等. 变压器分闸对铁心剩磁的影响研究[J]. 浙江电力, 2025, 44(2):103-109.
- Han Xiao, Chen Haotian, Zhou Jia, et al. Research on the impact of transformer switching-off on core residual magnetism[J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(2):103-109.
- [17] 王 洋, 刘志珍. 基于蛙跳模糊算法的Jiles Atherton铁心磁滞模型参数确定[J]. 电工技术学报, 2017, 32(4):154-161.
- Wang Yang, Liu Zhizhen. Determination of Jiles Atherton core hysteresis model parameters based on fuzzy-shuffled frog leaping algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(4):154-161.
- [18] 郝晓亮, 叶美盈. 基于粒子群优化算法的Jiles-Atherton磁滞模型参数计算[J]. 浙江师范大学学报(自然科学版), 2015, 38(2):133-141.
- Hao Xiaoliang, Ye Meiyang. Parameter calculation of the Jiles-Atherton hysteresis model using particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Zhejiang Normal University(Natural Sciences), 2015, 38(2):133-141.
- [19] Das S, Santra T, Choudhury A B, et al. Transient modeling and performance analysis of a passive magnetic fault current limiter considering JA hysteresis model[J]. Electric Power Components and Systems, 2019, 47(5):396-405.
- [20] Lu Hailiang, Wen Xishan, Lan Lei, et al. A self-adaptive genetic algorithm to estimate JA model parameters considering minor loops[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2015(374):502-507.
- [21] 王红斌, 方 健, 张 敏, 等. 基于邻域保持嵌入-主成分分析的配电变压器合闸涌流波形特征检测[J]. 电工电能新技术, 2024, 43(2):29-38.
- Wang Hongbin, Fang Jian, Zhang Min, et al. Closing surge waveform feature detection of distribution transformer based on neighborhood preserving embedding-principal component method[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2024, 43(2):29-38.
- [22] Key S, Son W G, Nam R S. Deep learning-based algorithm for internal fault detection of power transformers during inrush current at distribution substations[J]. Energies, 2024, 17(4):963.
- [23] 杨廷志, 杨志航, 邓家洪, 等. 基于粒子群优化算法的电缆中间头故障智能识别仿真研究[J]. 粘接, 2024, 51(1):137-140.
- Yang Tingzhi, Yang Zhihang, Deng Jiahong, et al. Simulation study on intelligent identification of cable intermediate head fault based on particle swarm optimization algorithm[J]. Adhesion, 2024, 51(1):137-140.
- [24] 吴俊俊, 宋 刚, 卢彬芳. 基于粒子群优化算法的特高压输电线路覆冰不平衡张力计算[J]. 浙江电力, 2019, 38(3):59-64.
- Wu Junjun, Song Gang, Lu Binfang. Calculation of unbalanced tension of iced UHV transmission line based on particle swarm optimization[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(3):59-64.
- [25] 张启民, 谢庆峰, 张良县. 基于粒子群优化算法的特高压换流变压器静电板结构优化设计[J]. 变压器, 2016, 53(8):1-5.
- Zhang Qimin, Xie Qingfeng, Zhang Liangxian. Optimal design of static plate in EHV converter transformer based on PSO algorithm[J]. Transformer, 2016, 53(8):1-5.
- [26] 戈文祺. 电力变压器铁心剩磁的仿真、测量与削弱[D]. 天津: 河北工业大学, 2014.
- Ge Wenqi. Simulation, measurement, and weakening of residual magnetism in power transformer iron core[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2014.
- [27] Sima Wenxia, Zou Mi, Yang Ming, et al. Saturable reactor hysteresis model based on Jiles-Atherton formulation for ferroresonance studies[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, (101):482-490.
- [28] 刘文博. 变压器励磁涌流的形成机理与仿真实验[J]. 湖南工业职业技术学院学报, 2015, 15(4):14-16.
- Liu Wenbo. Formation mechanism and simulation of excitation inrush current of transformer[J]. Journal of Hunan Industry Polytechnic, 2015, 15(4):14-16.
- [29] 那晋豪. 基于剩磁预测的变压器励磁涌流研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
- Na Jinhao. Research on transformer excitation inrush based on residual magnetism prediction[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019.
- [30] 刘 玉, 张晶焯, 鲁海亮, 等. 变压器空载合闸励磁涌流试验和仿真分析[J]. 高压电器, 2017, 53(10):117-123.
- Liu Yu, Zhang Jingchao, Lu Hailiang, et al. Excitation inrush current test and simulation analysis of transformer in no-load closing switching[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(10):117-123.
- [31] 董小飞. 基于非同步预充磁策略的混合变压器励磁涌流抑制技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022.
- Dong Xiaofei. Research on excitation inrush suppression technology for hybrid transformers based on non synchronous pre magnetization strategy[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2022.
- [32] 程新博, 张玥璇, 陈 承, 等. 分闸变压器时铁心磁轨迹反演及剩磁产生[J]. 变压器, 2024, 61(3):14-19.
- Cheng Xinbo, Zhang Yuexuan, Chen Cheng, et al. Magnetic track inversion and remanence generation of iron core when switched off transformer[J]. Transformer, 2024, 61(3):14-19.

龙 启(1988—),男,硕士,高级工程师,主要从事高电压技术及其应用相关研究工作(E-mail:longqi@im.ehv.csg)。

段雄英(1974—),女,教授,博士生导师,主要研究方向为高电压技术、智能化电器装备(通信作者)(E-mail:xyduan@dlut.edu.cn)。