

1-15-2024

Evaluation method of transformer insulation aging state based on IWOA-BP algorithm

Zhaohong DENG

Center of Electrical & Electronic Technology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Chunming ZHAO

Electric Power Research Institute, State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd., Changchun 130021, China

Jun Leng

Electric Power Research Institute, State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd., Changchun 130021, China

Guanqiang Zhai

Electric Power Research Institute, State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd., Changchun 130021, China

Xin WANG

*Center of Electrical & Electronic Technology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China,
wangxin26@sjtu.edu.cn*

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

Recommended Citation

DENG, Zhaohong; ZHAO, Chunming; Leng, Jun; Zhai, Guanqiang; and WANG, Xin (2024) "Evaluation method of transformer insulation aging state based on IWOA-BP algorithm," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 38: Iss. 5, Article 26.

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.05.026

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol38/iss5/26>

This Scientific Research is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology. For more information, please contact dlxb04@163.com.

基于 IWOA-BP 算法的变压器绝缘 老化评估方法

邓昭宏¹, 赵春明², 冷俊², 翟冠强², 王昕¹

(1. 上海交通大学电工与电子技术中心, 上海 200240; 2. 国网吉林省电力有限公司电力科学研究院, 吉林 长春 130021)

摘 要: 为增强变压器运行的安全性以及稳定性, 提出一种基于改进的鲸鱼优化(improved whale optimization algorithm, IWOA)—反向传播(back propagation, BP)算法的变压器绝缘老化状态评估模型。建立变压器油纸绝缘模型进行极化—去极化电流(polarization and depolarization current, PDC)实验, 为避免含水率对评估结果造成影响, 提取综合电导率作为老化特征量; 以 BP 神经网络为主, PDC 电流数据为输入, 综合电导率为输出, 建立算法模型对油纸绝缘老化状态进行评估; 为提升算法模型的评估效果, 以加入非线性收敛因子以及自适应权重为方法对鲸鱼优化算法(whale optimization algorithm, WOA)进行改进, 并以 IWOA 对 BP 神经网络进行优化, 获取更优的 BP 权重与阈值初值, 提高 BP 神经网络的收敛速度以及精度。最终结果证明, IWOA-BP 评估模型具有一定准确性以及实用性, 且在油纸绝缘寿命评估方向上有一定发展空间。

关 键 词: 变压器油纸绝缘; 极化去极化电流法; 综合电导率; 改进的鲸鱼优化算法

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.05.026 中图分类号: TM855 文章编号: 1673-9140(2023)05-0253-09

Evaluation method of transformer insulation aging state based on IWOA-BP algorithm

DENG Zhaohong¹, ZHAO Chunming², Leng Jun², Zhai Guanqiang², WANG Xin¹

(1.Center of Electrical & Electronic Technology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2.Electric Power Research Institute, State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd., Changchun 130021, China)

Abstract: In order to improve the safety and stability of transformer operation, a transformer insulation aging state evaluation model based on improved whale optimization algorithm-back propagation (IWOA-BP) algorithm is proposed. An oil-paper insulation model of transformer for polarization and depolarization current (PDC) method experiment is established. In order to avoid the influence of moisture content on the evaluation results, the comprehensive conductivity is extracted as the aging characteristic quantity. An evaluate algorithm model for the aging state of oil-paper insulation basing on BP neural network is established, in which PDC current data is the input and comprehensive conductivity is the output. In order to promote the evaluation effect of the algorithm model, the whale optimization algorithm (WOA) is improved by adding nonlinear convergence factors and adaptive weights. And IWOA is used to optimize the BP neural network to obtain better BP weights and threshold initial values. Thus, the convergence speed and accuracy of the BP neural network are

收稿日期: 2021-10-04; 修回日期: 2022-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(61673268); 国网吉林省电力有限公司科技项目(2019-24)

通信作者: 王昕(1972—), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力设备在线检测研究; E-mail: wangxin26@sjtu.edu.cn

improved. The final result proves that the proposed IWOA-BP evaluation model has certain accuracy and practicability, and has some development space in the direction of oil-paper insulation life evaluation.

Key words: transformer oil-paper insulation; polarization-depolarization current method; comprehensive conductivity; improved whale optimization algorithm

在长期运行的过程中,电力变压器油纸绝缘会受到诸多因素,如电老化、热老化、机械老化以及化学因素的影响而发生老化现象^[1-2]。老化现象的发生会直接导致变压器性能下降、寿命减短,更甚者还会导致整个电力系统瘫痪,造成国民经济的重大损失。因此针对变压器油纸绝缘老化进行状态评估,对电力系统的稳定运行具有极其重要意义^[3-7]。

对于电力变压器的绝缘老化状态进行评估,目前分为2种判别方法:电气诊断法与化学诊断法^[8]。化学诊断法主要有油中糠醛含量检测法、油中溶解气体分析法以及变压器绝缘油纸板聚合度测量法等;电气诊断法主要有回复电压法、频域介电法以及极化—去极化电流(polarization and depolarization current, PDC)法等^[9-13]。化学诊断法在实施过程中会受到各种环节和因素的影响,如取样、试样、试验、现场操作不便、破坏绝缘结构等问题,因此通常采用电气诊断法进行评估。文献[14]采用拉曼检测光谱对变压器老化状态进行评估,但采集到的样本数据集维度过高,会产生维数灾难、训练效率低等问题;文献[15]采用频域介电谱对变压器老化状态进行评估,但评估结果易受含水率影响,从而造成评估结果不够准确;文献[16]通过回复电压法分析了变压器绝缘微水率与时间常数之间的关系,但并未针对微水率及回复电压与变压器绝缘老化状态之间的关系进行分析;文献[17]通过建立等效模型分析变压器内绝缘的含水率、聚合度以及电导率等信息,但并未对变压器老化状态进行有效评估;文献[18]使用频域介电谱法对测试数据进行分析,得到了一种可以计算变压器绝缘含水率的方法,但仅针对含水率进行分析,并未就测试结果分析变压器绝缘老化状态。目前,使用电气诊断法时,大多仅针对变压器绝缘的含水率进行评估,或是受其他因素影响而导致评估结果的精度不足以满足评估要求。因此,在使用电

气诊断法进行评估时,不仅要對变压器绝缘老化状态进行分析,更要排除其他因素的影响以保证评估结果的精度达到要求。

本文提出一种变压器油纸绝缘老化状态评估方法。首先,建立油纸绝缘模型进行PDC实验,针对电导率受含水率影响导致评估结果不准确的问题,提出综合电导率代替电导率作为油纸绝缘老化特征量。其次,采用反向传播(back propagation, BP)神经网络建立油纸绝缘老化状态评估模型。引入非线性收敛因子以及自适应权重来改进鲸鱼优化算法(whale optimization algorithm, WOA),并通过改进的鲸鱼优化算法(improved whale optimization algorithm, IWOA)对BP神经网络的权重与阈值初值进行寻优,提高老化评估模型的精度及收敛速度。最后,根据PDC法实验数据,采用IWOA-BP模型进行仿真实验,对变压器绝缘进行评估。评估结果证明,IWOA-BP评估模型具有一定有效性及实用性。

1 绝缘老化评估方法与特征参量

为保证测试过程的便捷性以及评估结果的可靠性,本文采用具有无损检测、操作简单以及受干扰小等优点的PDC法进行实验,并通过对实验数据进行分析,提取其老化特征量“综合电导率”,对含水率对综合电导率的影响进行分析,研究综合电导率对比于电导率是否能够更好地进行评估。

1.1 PDC法

PDC法的操作较为简单,测试过程主要分为2个阶段:极化阶段与去极化阶段。极化阶段是在实验开始时,将开关打到触点1上,对油纸绝缘模型加以一定幅值的直流高压 U_0 ,在此阶段中,皮安表所记录下的流过电路中的电流数据即为极化电流 i_p ,该阶段持续时间记作 t_p 。在此阶段后,进入去极化阶段。将开关打到触点2,使油纸绝缘模型的两极

短路并接地,在此阶段中,流过电路的电流数值会瞬间跳变成负值,皮安表据此所记录下的电流数据即为去极化电流 i_d ,该阶段持续时间记为 t_d 。其基本原理如图1所示。

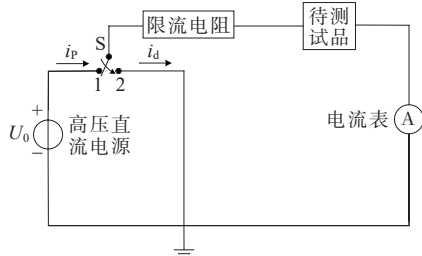


图1 PDC法原理

Figure 1 Schematic diagram of PDC method

1.2 综合电导率

电导率是评估绝缘介质的绝缘性能最直接、最主要的特征量之一,且通过电导率评估绝缘性能,并不受被测试样品的绝缘几何形状以及尺寸影响。然而在实验测试过程中,发现测量得到的电导率并不稳定,这是由于油纸绝缘的含水率对于油纸绝缘老化状态的评估存在一定影响。为保证对绝缘老化状态评估的有效性,本文引进了PDC趋于稳态时的综合电导率作为替代。

对于综合电导率,首先需要分析其是否能够不受含水率的影响,从而保证对油纸绝缘的老化状态进行有效评估。

从图2可以看出,含水率对于PDC初始状态影响较大,即对于变压器油电导率存在较大影响,但综合电导率计算取值为PDC末端均值,受含水率变化影响极小。因此,综合电导率可以作为老化特征量,更好地对油纸绝缘老化状态进行评估。

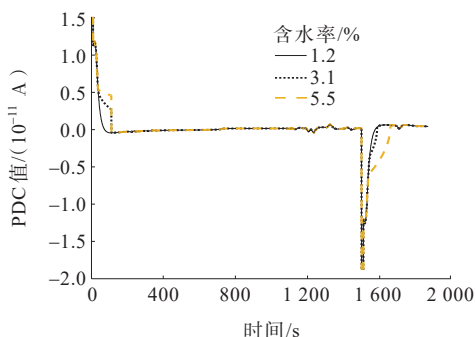


图2 不同含水率的PDC数据对比

Figure 2 Comparison chart of PDC data with different moisture content

在极化时间足够长的时候综合电导率可用以下表达式计算:

$$\phi_{com} = \frac{\epsilon_0 [i_p(t_{end}) + i_d(t_{end})]}{C_0 U_0} \quad (1)$$

式中, U_0 为极化电压; C_0 为被测样品的工频绝缘几何电容; ϵ_0 为真空介电常数($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$); $i_p(t_{end})$ 为极化电流末端电流平均值, $i_d(t_{end})$ 为去极化电流末端电流平均值。

2 IWOA-BP神经网络模型

为对绝缘老化状态进行更精确地评估,需要对BP神经网络进行优化,以提高BP神经网络的全局寻优能力以及收敛速度。本文首先对鲸鱼优化算法(whale optimization algorithm, WOA)的收敛因子以及权重进行改进;接着,以改进WOA对BP神经网络的权重与阈值初始参数进行优化,获得更优的权重与阈值初始值。

2.1 改进鲸鱼优化算法

WOA是一种元启发式智能优化算法,通过模拟座头鲸的“螺旋气泡网”捕食方式来实现算法的计算。WOA先随机选择一鲸鱼位置或是猎物位置,通过此位置来更新当前鲸鱼位置,进而全局寻优,最终获得最优解。WOA实现步骤如下。

1) 包围目标猎物。

座头鲸会寻找并包围猎物,当发现猎物位置时,座头鲸会以猎物位置为基准,不断更新自身位置,以此达到包围猎物的目的。该数学模型为

$$\begin{cases} D = |C \cdot X_{op}(t) - X(t)| \\ X(t+1) = X_{op}(t) - A \cdot D \\ A = 2a \cdot r_1 - a \\ C = 2r_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $X_{op}(t)$ 为当前最优解座头鲸位置; $X(t)$ 为当前座头鲸位置; t 为当前迭代次数; A 和 C 为系数向量; r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 的随机向量; a 为在迭代过程中从2线性递减至0的收敛因子, a 的表达式如下:

$$a = 2(1 - \frac{t}{t_{max}}) \quad (3)$$

式中, t_{max} 代表最大迭代次数。

2) 螺旋气泡网攻击。

座头鲸会通过收缩包围以及螺旋移动的方式更新自身位置,进而逐渐靠近猎物,最终发动攻击。座头鲸螺旋移动的数学模型如下:

$$\begin{cases} X(t+1)=D \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + X_{op}(t) \\ D=|X_{op}(t)-X(t)| \end{cases} \quad (4)$$

式中, D 为当前座头鲸位置与最优解位置之间的距离; b 为一个螺旋形状常数; l 为 $[-1,1]$ 的随机数。

以 p 值大小判断是进行螺旋更新位置还是收缩包围,数学模型如下:

$$X(t+1)=\begin{cases} X_{op}(t)-A \cdot D, & p < 0.5 \\ D \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + X_{op}(t), & p \geq 0.5 \end{cases} \quad (5)$$

式中, p 为 $[0,1]$ 中的一个随机数。

3) 搜寻锁定目标猎物。

当系数向量 $|A| \geq 1$ 时,座头鲸更新位置的基准由最优解座头鲸位置改为随机选定一座头鲸位置,进而进行全局寻优;当系数向量 $|A| < 1$ 时,座头鲸依旧以最优解位置进行位置更新,进行局部寻优,数学模型如下:

$$\begin{cases} X(t+1)=X_{rand}(t)-A \cdot D \\ D=|C \cdot X_{rand}(t)-X(t)| \end{cases} \quad (6)$$

式中, $X_{rand}(t)$ 表示随机一头鲸鱼的位置。

WOA原理简单,需要人为调节的参数少,但算法的寻优能力很大程度上取决于收敛因子 a 大小, a 的值越小,代表算法寻优能力更偏向局部寻优,能够加快收敛速度; a 的值越大,则表示算法寻优能力更接近全局寻优,可以防止算法陷入局部最优的情况。传统WOA中收敛因子 a 的值以线性规律从2减小到0,收敛因子呈现线性变化的趋势则会导致优化算法在迭代前期具有较优异的全局寻优能力,但收敛速度较慢,而在迭代后期,收敛因子较小,算法收敛速度较快,就容易使得算法陷入局部最优。

因此,期望对WOA的收敛因子进行改进,保证在迭代前期,算法既有较强的全局搜索能力又有较快的收敛速度,在迭代后期,保证算法收敛速度的前提下,防止算法陷入局部最优。

本文引入了非线性收敛因子 a ,能够保证在 a 变

化趋势不改变的前提下,兼顾算法的局部寻优能力以及全局寻优能力。其数学模型如下:

$$a=(2-2t^2/t_{\max}^2)(1-t^3/t_{\max}^3) \quad (7)$$

从式(7)可以看出,通过加入此非线性收敛因子,在算法前期, a 的值随着迭代次数的增大缓慢变小以保证算法前期的全局寻优能力,之后随着迭代次数增加,快速变小从而加快收敛速度;在算法后期 a 值先随着迭代次数快速减小保证收敛速度,后缓慢减小保证算法不陷入局部最优。因此,引入该非线性收敛因子不仅保证了算法整体的全局寻优能力,同时也加快了算法的收敛速度。

当引入了非线性收敛因子后,线性变化的惯性权重就无法使算法拥有更好的优化效果。为增强算法的寻优能力,应改变权重的变化规律,将线性变化的惯性权重变为非线性变化的自适应权重。其数学模型如下:

$$\omega(t)=1-\ln\left(1+\frac{(e-1)t^3}{t_{\max}^3}\right) \quad (8)$$

自适应权重在前期随迭代次数增加而逐渐减小,使算法前期有利于全局寻优;在后期随迭代次数增加而发生较大幅度的减小,有利于局部寻优,整体而言加快了算法的收敛速度以及收敛精度。

引入自适应权重因子的座头鲸位置更新数学模型为

$$X(t+1)=\begin{cases} \omega(t) \cdot X_{op}(t)-A \cdot D, & p < 0.5 \\ D \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \omega(t) \cdot X_{op}(t), & p \geq 0.5 \end{cases} \quad (9)$$

2.2 IWOA-BP神经网络模型

BP神经网络的主要特点是:输入信号是向前传播的,但误差却与之相反,是向后传播的。由于其存在“过训练”现象,容易陷入局部最优的情况,收敛性较差。故而,为了达到更好的寻优效果,通过使用IWOA优化BP神经网络。利用IWOA的全局寻优能力强以及收敛速度快等优点,与BP神经网络的缺点形成互补,最后得到一个更加完善的算法模型。

IWOA-BP神经网络的基本思想为:提取BP神经网络的权重与阈值初始值作为IWOA的座头鲸

位置信息,通过座头鲸对最优解位置靠拢,不断更新座头鲸位置,从而可以不断更新网络权重与阈值,获得最优权重与阈值初始值,再将该值输入BP神经网络,对其进行训练,从而实现IWOA对BP神经网络的优化。IWOA-BP模型实现计算的程序如图3所示。

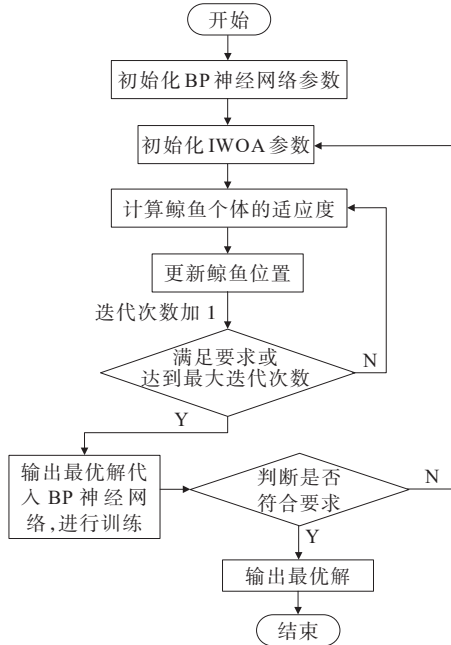


图3 IWOA-BP模型程序

Figure 3 IWOA-BP model block diagram

具体实现步骤如下。

1) 初始化BP神经网络。确定网络的拓扑结构,并提取网络参数中权重与阈值初始值。

2) 初始化IWOA算法。设置座头鲸的种群数量 N ,最大迭代次数 $t_{\max}$,迭代次数 $t=0$ 。将BP神经网络的权重与阈值初始值作为IWOA的位置向量。

3) 计算座头鲸个体的适应度值,记录当前最优适应度值及其位置信息。

4) 根据式(7)更新非线性收敛因子 a ,根据式(8)更新自适应权重 ω 。再以 a 更新系数向量 A 、 C ,随机选择 p 、 l 。

5) 根据 A 的值更新座头鲸位置信息,当 $|A| \geq 1$ 时,按照式(5)中, $p < 0.5$ 时的公式更新位置信息;当 $|A| < 1$ 时,按照式(9)更新位置信息。

6) 判断迭代数是否达到最大迭代数,若是,结束算法;若否,当前迭代数 t 加1,返回步骤3)。

7) 输出最优解,输入BP神经网络,对其进行训练。

8) 判断计算结果的误差是否符合要求;若是,记录最优解,结束算法;若否,返回步骤2)。

3 实验与分析

为了验证IWOA-BP算法对于变压器油纸绝缘老化状态评估上的有效性,搭建了变压器油纸绝缘模型进行实验,并基于实验数据进行仿真实验。

3.1 PDC实验

PDC测试的电路原理如图4所示,实验装置包括上位机、Keithley6517A高阻计、真空恒温老化箱、油纸绝缘模型、GPIB-USB-HS数据采集卡以及同轴电缆等。

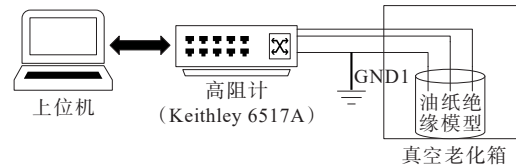


图4 PDC测量电路原理

Figure 4 Schematic diagram of the PDC measurement circuit

在实验之前,先对实验模型进行预处理。首先,将油纸绝缘模型放入真空恒温老化箱中进行24 h真空干燥处理;接着,将油纸绝缘模型进行浸油处理,静置24 h;静置结束后,油纸绝缘模型即可投入实验。

实验时,将预处理完的油纸绝缘模型放入真空恒温老化箱中进行热老化处理。进行70、90、110℃的加速热老化实验,每一组温度下的实验都进行30 d,并每24 h对油纸绝缘模型进行多次PDC测试。进行PDC实验时,设置极化电压为1 000 V、极化时间为1 500 s、去极化时间为3 000 s,实验装置如图5所示。不同老化温度及不同老化时间PDC电流数据对比曲线如图6所示。

从图6可以看出,不论热老化时间增加或是随着老化温度变化,即老化程度发生变化,都会引起PDC电流曲线的变化,说明绝缘老化程度信息是包含在PDC电流曲线中的。

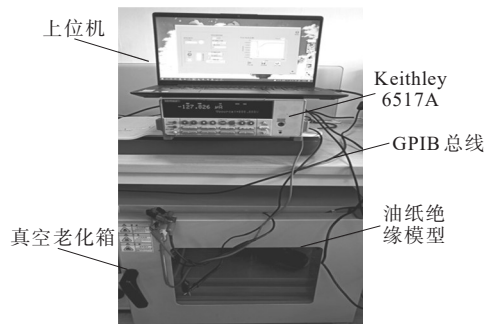
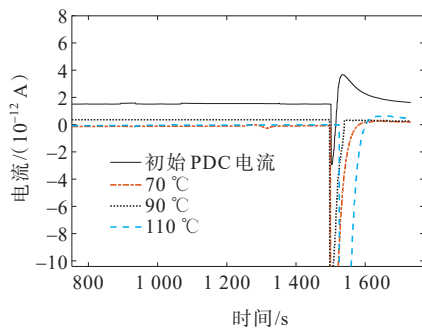
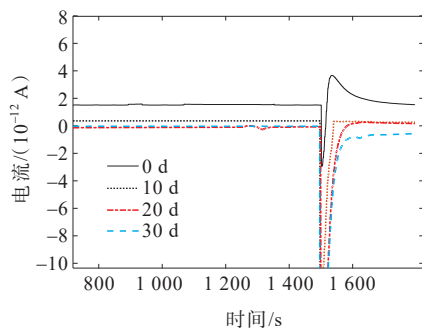


图5 实验装置

Figure 5 Picture of experimental devices



(a) 热老化 20 d 后的 PDC 电流数据对比



(b) 热老化 90 °C 时不同老化时间 PDC 电流数据对比

图6 实测极化去极化电流曲线

Figure 6 Measured polarization and depolarization current curve

3.2 油纸绝缘老化评估

本文以热老化实验获取的PDC电流数据为输入,以老化特征量“综合电导率”为输出建立样本集,随机选取80%为训练样本,剩余20%为测试样本。表1为油纸绝缘在不同综合电导率下的老化程度,模型的评估效果将根据表1中的老化程度来进行划分。

为验证IWOA-BP神经网络的绝缘老化状态评估效果,采用传统BP模型、GWO-BP、WOA-BP、IWOA-BP模型对PDC电流数据进行评估。设置

BP神经网络输入节点为2个,隐藏层节点为5个,输出层节点为1个,IWOA权重与收敛因子如上文所示设置,种群大小为20,实验迭代350次,算法性能对比如图7所示。

表1 油纸绝缘老化状态评估

Table 1 Evaluation of oil-paper insulation ageing state

综合电导率大小/(S/m)	老化程度
$\geq 3.0 \times 10^{-13}$	严重老化
$\geq 1.5 \times 10^{-13}, < 3.0 \times 10^{-13}$	中度老化
$\geq 0.5 \times 10^{-13}, < 1.5 \times 10^{-13}$	轻度老化
$< 0.5 \times 10^{-13}$	未发生老化

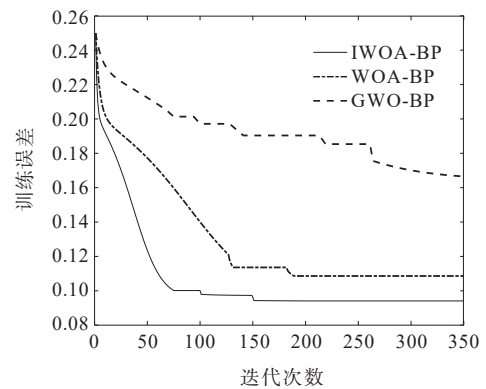


图7 算法寻优效果对比

Figure 7 Comparison chart of algorithm optimization effect

由图7可见,IWOA-BP经过73次迭代便逐渐趋于平稳,相较于另外2种算法收敛速度明显加快且误差更小。

输入样本集,以GWO-BP、WOA-BP模型与BP神经网络模型作为对比,验证IWOA-BP模型的有效性与准确性。

由表2可以看出,对比老化程度样本数据,IWOA-BP算法的评估结果最贴近实际的样本数据。

表2 评估数据对比

Table 2 Comparison of evaluation data 个

老化程度	实际	BP	GWO-BP	WOA-BP	IWOA-BP
未老化	6	5	5	5	6
轻度老化	11	11	12	15	10
中度老化	15	18	14	10	16
严重老化	18	16	19	20	18

油纸绝缘老化状态评估结果误差分析如图8所示。

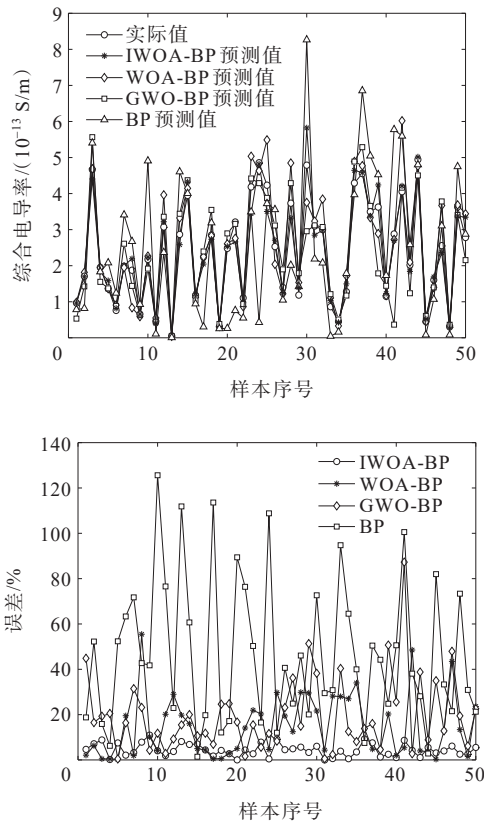


图8 油纸绝缘老化状态评估结果对比及误差分析

Figure 8 Comparison chart and error analysis chart of evaluation results of oil-paper insulation aging state

为反映预测结果的准确度以及有效性,选取3种评价指标对预测结果进行评价。3种评价指标为:平均相对误差(mean absolute percent error, MAPE),平均绝对误差(mean absolute deviation, MAD)和均方根误差(root mean square error, RMSE),表达式分别如下:

$$P_{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \tilde{y}_i}{y_i} \times 100\% \right| \quad (10)$$

$$P_{MAD} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \tilde{y}_i| \quad (11)$$

$$P_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2} \quad (12)$$

式中, y_i 为第 i 个实际值; $\tilde{y}_i$ 为第 i 个预测值; n 为数据总数目。

评价结果对比如表3所示。由表3可得,相比于BP、GWO-BP以及WOA-BP模型,IWOA-BP

模型的评估结果误差最小、精度最高。IWOA-BP模型对于评估结果的平均相对误差控制低于10%,且平均绝对误差与均方根误差也较之两者更低,满足对变压器油纸绝缘老化状态评估的要求。这是因为IWOA算法的收敛速度相比其他算法更快,全局收敛能力更优,不易陷入局部最优的状况,且IWOA算法的收敛精度也更高,通过IWOA算法对BP神经网络进行优化,获得的优化效果相比于其他算法更好。因此,IWOA-BP模型对于作为变压器油纸绝缘老化状态评估有一定可行性。

表3 各算法评估结果对比

Table 3 Evaluation results of each algorithm

算法	$P_{RMSE}/$ (10^{-13} S/m)	$P_{MAPE}/\%$	$P_{MAD}/$ (10^{-13} S/m)
BP	1.442 0	47.070 7	1.012 3
GWO-BP	0.663 7	19.888 4	0.445 9
WOA-BP	0.550 1	14.630 6	0.351 4
IWOA-BP	0.299 1	8.612 1	0.203 5

通过诊断得出老化程度,分析其与变压器剩余寿命之间关系,便可进一步研究出对变压器绝缘寿命的预测方法,从而进行变压器绝缘的寿命评估。

4 结语

本文通过PDC法,测算得到油纸绝缘模型的综合电导率,并基于IWOA-BP模型建立油纸绝缘老化评估模型。

1) 提出了基于PDC法以及IWOA-BP模型的变压器油纸绝缘老化状态评估模型。

2) 引入综合电导率作为油纸绝缘老化状态评估的特征量,并分析了含水率对其的影响程度,分析结果证明了综合电导率几乎不受含水率影响,可以更好地对老化状态进行评估。

3) 通过加入非线性收敛因子以及自适应权重改进了IWOA,提高了算法精度及全局寻优能力;

并以WOA对BP神经网络的权重与阈值初值进行寻优,提高了BP神经网络的全局寻优能力、收敛速度以及精度。

4) 根据PDC法建立油纸绝缘模型,并测得PDC数据;试验结果证明,IWOA-BP模型的评估结果满足对变压器绝缘老化状态的评估要求。

参考文献:

- [1] 成立,夏彦卫,高树国,等.基于混合电场线性叠加原理的换流变压器内部电场分布规律研究[J].智慧电力,2021,49(1):90-95.
CHENG Li, XIA Yanwei, GAO Shuguo, et al. Effect of thermal aging on electric field distribution in converter transformer based on linear additive principle for mixed electric field[J]. Smart Power, 2021, 49(1):90-95.
- [2] 张毅涛,齐波,林元棣,等.变压器油纸绝缘套管受潮缺陷频域介电谱特征[J].电力工程技术,2021,40(2):135-140.
ZHAGN Yitao, QI Bo, LIN Yuandi, et al. FDS characteristic of damp-affected oil-paper insulation transformer bushings [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 135-140.
- [3] 赵洪山,常杰英,曲岳哈,等.基于二元非线性Wiener随机过程的变压器油纸绝缘剩余寿命预测方法[J].电工技术学报,2023,38(15):4040-4049.
ZHAO Hongshan, CHANG Jieying, QU Yuehan, et al. Residual life prediction method of transformer oil-paper insulation based on binary nonlinear Wiener random process[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(15):4040-4049.
- [4] 邹阳,俞豪奕,金涛.融合模糊K近邻及证据理论的变压器油纸绝缘状态评估方法[J].电力系统保护与控制,2023,51(14):55-63.
ZOU Yang, YU Haoyi, JIN Tao. Evaluation method of the oil-paper insulation condition of a transformer based on fuzzy K nearest neighbor and evidence theory[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14):55-63.
- [5] 姜良民,殷守斌,徐珂,等.变压器油纸绝缘电热联合老化机理研究[J].电网与清洁能源,2022,38(5):86-94.
JIANG Liangmin, YIN Shoubin, XU Ke, et al. A study on the electrical-thermal aging mechanism of oil-paper insulation in transformers[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(5):86-94.
- [6] 刘咏鑫,宋斌,王力农,等.基于混沌序列优化的BP网络油纸绝缘变压器寿命预测[J].电测与仪表,2022,59(4):137-143.
LIU Yongxin, SONG Bin, WANG Linong, et al. Life prediction of oil-paper insulated transformer based on chaotic sequence optimization BP neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(4): 137-143.
- [7] 郑涛,郭勇帆,吕文轩,等.基于电力电子变压器故障穿越策略的低压直流配电网保护[J].电力系统自动化,2023,47(16):152-161.
ZHENG Tao, GUO Yongfan, LÜ Wenxuan, et al. Protection for low-voltage DC distribution network based on fault ride-through strategy of power electronic transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(16): 152-161.
- [8] 巩晶.温度和水分对变压器油纸绝缘老化特性及寿命评估的影响研究[D].重庆:重庆大学,2010.
GONG Jing. Study on the impact of temperature and moisture contents on transformer oil-paper insulation ageing characteristics and life[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [9] 周凯,李明志,饶显杰,等.基于极化-去极化电流法的变压器油纸绝缘低频介质损耗特性分析[J].高电压技术,2020,46(8):2830-2838.
ZHOU Kai, LI Mingzhi, RAO Xianjie, et al. Analysis of low-frequency dielectric loss characteristics of oil-paper insulation based on polarization and depolarization current method[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2830-2838.
- [10] 李明志,周凯,张福忠,等.基于极化-去极化电流法的实际变压器油纸绝缘老化状态的现场评估[J].绝缘材料,2019,52(11):82-88.
LI Mingzhi, ZHOU Kai, ZHANG Fuzhong, et al. On-site assessment of oil-paper insulation ageing condition for real transformers based on polarization and depolarization current method[J]. Insulating Materials, 2019, 52(11):82-88.
- [11] 王永强,仲钊,谢军,等.温度对不同老化程度的绝缘纸板沿面放电的影响[J].高电压技术,2017,43(8):2724-2732.
WANG Yongqiang, ZHONG Zhao, XIE Jun, et al. Influence of temperature on the surface discharge of insulating paperboard with different aging degree[J]. High Voltage

- Engineering,2017,43(8):2724-2732.
- [12] 鄢仁武,高硕勋,宋微浪,等.基于多参量LSTM模型的变压器油纸绝缘老化诊断方法[J].武汉大学学报(工学版),2021,54(6):541-550.
- YAN Renwu, GAO Shuoxun, SONG Weilang, et al. Diagnosis method of oil-paper insulation aging in transformer based on multi-parameter LSTM model[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(6): 541-550.
- [13] XI X G, WANG H M, WANG W, et al. The study on the relationship of frequency domain spectroscopy of oil-paper insulation with degree of polymerization and tensile strength[C]//2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), Xi'an, China, 2018.
- [14] 陈新岗,陈姝婷,杨定坤,等.基于高维拉曼光谱数据的变压器油纸绝缘老化评估方法研究[J].光谱学与光谱分析,2021,41(5):1463-1469.
- CHEN Xingang, CHEN Shuting, YANG Dingkun, et al. Study on the evaluation method of oil-paper insulation aging in transformer based on high dimensional Raman spectral data[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(5): 1463-1469.
- [15] 范贤浩,刘捷丰,张懿议,等.融合频域介电谱及支持向量机的变压器油浸纸绝缘老化状态评估[J].电工技术学报,2021,36(10):2161-2168.
- FAN Xianhao, LIU Jiefeng, ZHANG Yiyi, et al. Aging evaluation of transformer oil-immersed insulation combining frequency domain spectroscopy and support vector machine[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(10): 2161-2168.
- [16] 王飞凤,郭金明,田树军,等.微水含量及老化状态对绝缘硅油介电特性的影响[J].中国电力,2022,55(3):48-56.
- WANG Feifeng, GUO Jinming, TIAN Shujun, et al. Effect of moisture content and aging state on the dielectric properties of silicone oil[J]. Electric Power, 2022, 55(3): 48-56.
- [17] 杨定乾,王进,宋通,等.基于频域介电响应的油浸纸套管受潮缺陷诊断分析[J].高压电器,2022,58(6):77-86.
- YANG Dingqian, WANG Jin, SONG Tong, et al. Diagnosis and analysis of moisture defect of oil-paper insulated bushing based on frequency domain dielectric response[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(6): 77-86.
- [18] 张明泽,刘骥,齐朋帅,等.变压器油纸绝缘老化含水率频域法定量评估[J].高电压技术,2019,45(10):3221-3230.
- ZHANG Mingze, LIU Ji, QI Pengshuai, et al. Quantitative assessment of moisture content in frequency domain response for transformers oil-paper insulation aging[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3221-3230.