

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.03.035

基于改进神经网络的电流互感器综合状态评估的研究

杨鹏举,王涛云,杨恒,孟垂攀,张颢

(国网上海市电力公司 金山供电公司,上海 200540)

摘要:针对电流互感器长期在恶劣工况下运行造成准确度退化以及故障问题,设计一种电子式电流互感器在线状态综合评估系统,通过神经网络实现对互感器在线误差预测与故障诊断。针对现有基于神经网络的方法存在收敛速度慢、精度低等问题,提出一种基于改进的鲸鱼优化神经网络用于误差预测与故障诊断。通过非线性收敛因子提高鲸鱼优化的收敛速度;同时引入自适应惯性权重与模拟退火机制提高鲸鱼优化算法精度,避免陷入局部最优。通过基准函数测试、算例分析验证了方法有效性与可靠性。实验证明:所设计的电流互感器在线状态综合评估系统能有效地对电流互感器进行误差预测与故障诊断。

关键词:互感器误差预测;故障诊断;鲸鱼优化算法;人工神经网络

中图分类号:TP306 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2024)03-0163-03

Research on Comprehensive State Assessment of Current Transformer Based on Improved Neural Network

YANG Pengju, WANG Taoyun, YANG Heng, MENG Chuipan, ZHANG Hao

(Jinshan Power Supply Company, State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200540, China)

Abstract: For the accuracy degradation and fault caused by long-term operation of current transformers under harsh operating conditions, an electronic current transformer online condition comprehensive evaluation system is proposed to achieve online error prediction and fault diagnosis of transformers based on neural networks. With regard to the slow convergence and low accuracy of existing neural network-based methods, a neural network based on improved whale optimization is put forward for error prediction and fault diagnosis. The convergence speed of whale optimization is accelerated by nonlinear convergence factor, and meanwhile, adaptive inertia weights and simulated annealing mechanism are introduced to improve the accuracy of the whale optimization algorithm and avoid falling into local optimal. Benchmark function test and case analysis are conducted to verify the validity and reliability of the method. The experiment proves that designed the online state comprehensive evaluation system of current transformer designed can effectively perform error prediction and fault diagnosis of current transformer.

Keywords: transformer error prediction; fault diagnosis; whale optimization algorithm; BP neural network

0 引言

电子式互感器由于在电能计量、继电保护等方面具有较强的稳定性以及可靠性得以智能变电站广泛应用^[1]。为了提高电流互感器故障诊断的准确度,减少电流互感器误差超差运行时间,亟需一种可靠高效的电流互感器在线状态综合评估系统。

目前,互感器的误差检测包含离线测量^[2]和在线检测^[3]。离线检测是在互感器断电后进行误差检测,有外推法、小信号测试法等。尽管离线测量具有简单等优点,但由于许多互感器在线运行时无法停电,故这类方法具有局限性。将校验装

置和互感器并网运行的在线检测方法能够克服这一缺陷。LI 等^[4]通过含有标准互感器的校验装置对电子式电流互感器实现电子式电流互感器的在线检测。文献[5]通过包含标准电容器的校验装置对电子式互感器进行在线检测。

本文设计了一种电子式电流互感器的在线综合评估系统,通过数据驱动方法对电子式电流互感器实现故障诊断与误差预测。为了提高故障诊断准确性与误差预测精度,进一步提出了一种基于改进鲸鱼优化的神经网络算法(IWOA-BP),克服了现有研究的缺陷。最后通过 IWOA-BP 建立电子式电流互感器在线状态综合评估模型,实现对电子式互感器的故障诊断以及误差预测。通过

基金项目:国家电网有限公司科技项目(SGSHJS00HBJS2103087)

第一作者简介:杨鹏举(1986—),男,河南周口人,硕士,研究方向为电力市场营销,li.cheng@basf-ypc.com.cn。

基准函数测试、实例分析,验证了文中方法的可行性与可靠性。

1 电流互感器在线综合评估系统

如图1所示,电流互感器的在线综合评估系统由在线误差评估以及故障诊断部分组成。通过数据处理单元将电流互感器中关键检测点的电信号、负荷参量与环境参量上传至服务器,经过信号降噪、特征提取、数据储存后建立评估模型。当输入信号通过交换机发送至服务器后,从算法库中调取算法对输入数据进行挖掘。电流互感器运行正常时通过显示器向用户显示当前运行状态。当数据出现异常时,根据电流互感器不同的故障类型,通过声信号、光信号发出预警。

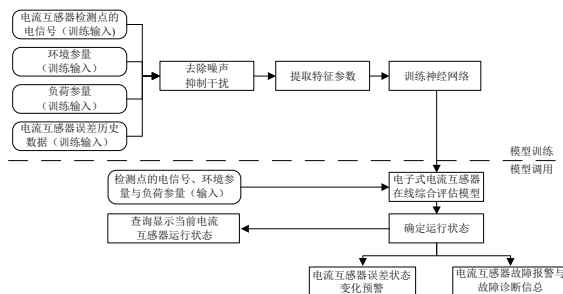


图1 在线综合评估系统总体示意图

电子式电流互感器的误差与谐波、振动、电场、磁场等诸多参量有关。温度、磁场、负荷参量对其误差影响较大。本文主要考虑温度、磁场、负荷参量。

针对电子式电流互感器不同的故障以及特点,图2展示了电子式电流互感器的故障检测的原理图。

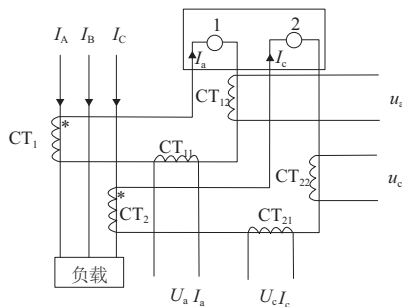


图2 电子式电流互感器的故障检测原理图

图2中,CT表示电流互感器, I_A 、 I_B 、 I_C 分别表示A、B、C三相电流,电压 U_a 、 U_c 以及电流 I_a 、 I_c 分别表示计量单元a、c的测量电压与电流;CT₁和CT₂的二次侧检测电压为 u_a 、 u_c 。当电流互感

器CT短路时,通过施加1kHz激励信号累计检测多种信号从而检测阻抗的变化。当电流互感器CT二次侧短路时,由于网络阻抗与负载变化相关,故需要检测多个信息确定故障。

2 改进的鲸鱼优化算法(IWOA)

1) 非线性收敛因子

WOA算法中只有两个主要的参数A和C。在保持基本WOA中收敛因子递减的前提下,引入一种新的非线性收敛因子,公式如下:

$$a = 1 - \cos[(1 - t/M_{\text{Max,iter}})^m \times \pi] \quad (1)$$

式中: t 是正在进行的迭代数; $M_{\text{Max,iter}}$ 是设置的最大迭代数; m 是非线性调整因子,可以控制收敛因子 a 的递减程度。

2) 自适应惯性权重

为了提高算法寻优性能,引入PSO算法中的惯性权重思想。通过引入一种新的非线性惯性权重来进一步提升WOA全局和局部的勘探性能,公式如下:

$$w = 2 \times \left[\sin\left(\frac{\pi \times t}{2 \times M_{\text{Max,iter}}} + \pi\right) + 1 \right] \cdot n \quad (2)$$

式中: n 为0~1之间的任意值。在迭代后期进行一定的扰动使算法更容易跳出局部最优。因此,鲸鱼算法的搜索表达式改为如下形式:

$$X(t+1) = w \cdot X_{\text{best}}(t) - A \times D \quad (3)$$

$$X(t+1) = D' \times e^{bl} \times \cos(2\pi l) + w \cdot X_{\text{best}}(t) \quad (4)$$

式中: A 为系统参数矩阵,是在-1~1之间的任意值; D 是当前解 $X(t)$ 和最优解 $X_{\text{best}}(t)$ 的距离,可以表示为 $D = |C \times X_{\text{best}}(t) - X(t)|$; b 是决定螺旋程度常数项,通常为1; l 为-1~1之间的任意值。

3) 模拟退火算法

模拟退火算法(simulated annealing, SA)是美国学者马托布里斯等发明的一种算法^[6],其接受劣质解的概率设定如下:

$$p = \begin{cases} 1, & T(n+1) < T(n) \\ e^{-\frac{E(n+1)-E(n)}{kT}}, & T(n+1) \geq T(n) \end{cases} \quad (5)$$

式(5)表明:如果能量降低,即接受新解;否则,进行概率运算,以一定的概率来接受劣质解。其中初始温度 $T(0) = 100$,退火函数 $T(n+1) = \lambda T(n)$ 。

3 基于改进WOA优化的BP神经网络(IWOA-BP)

本文中,IWOA算法用于确定BP神经网络中的连接权重与阈值,采用均方误差函数 E 作为性

能函数,其如式(6)所示。

$$E = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^l (\hat{y}_j^k - y_j^k)^2 \quad (6)$$

式中: $\hat{y}_j^k$ 和 y_j^k 分别代表神经网络的输出值与期望的输出值。当 IWOA 算法求得式(6)的最小值时,当前最优解即为 BP 神经网络的连接权重与阈值,其具体步骤如下。

步骤 1:初始化 BP 神经网络,确定初始的连接权重与阈值。

步骤 2:初始化 IWOA 算法,确定算法的种群大小 N ,最大迭代次数 $M_{\text{Max,iter}}$,非线性调整因子 m ,初始化 b 、 l 、 i 和 M 等相关参数,将式(6)作为 IWOA 的适应度函数,将步骤 1 中的连接权重与阈值作为 IWOA 的初始位置向量。

步骤 3:通过 IWOA 优化求解,并输出最优个体位置。

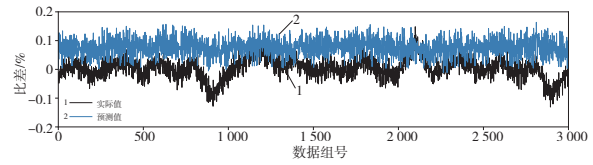
步骤 4:将输出最优个体位置作为 BP 神经网络的连接权重与阈值,并返回神经网络。

4 实验结果及分析

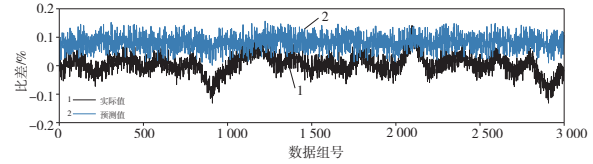
为验证电子式电流互感器误差预测模块的有效性,采用上海市某电力公司 220 kV 电子式电流互感器自 2020 年 4 月—2020 年 7 月的在线监测数据作为训练样本。归一化处理后,建立基于 WOA-BP、AWOA-BP 以及 IWOA-BP 的神经网络模型,对电子式电流互感器的误差状态进行预测分析,3 种神经网络的训练模型分别记为 M_1 、 M_2 与 M_3 。

将模型 M_1 、 M_2 和 M_3 接入 2020 年 8 月的环境参量数据与负荷参量数据,得到 2020 年 8 月电子式电流互感器误差的预测结果,如图 3、图 4 所示。由图 3(c) 可以发现,对于相同的训练样本,基于模型 M_3 的电流互感器比差预测曲线与实际比差曲线更为接近,从图 4(c) 可以看出基于模型 M_3 的角差预测提高了预测精度。

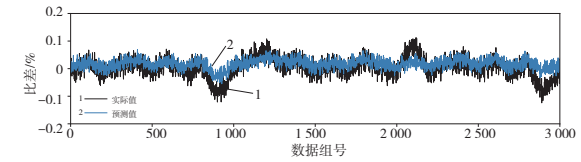
根据预测结果可得基于模型 M_1 的比差预测的误差 E_{re1} 为 7.85%,角差预测的误差 E_{pe1} 为 18.4%;基于模型 M_2 的比差预测的误差 E_{re2} 为 7.02%,角差预测的误差 E_{pe2} 为 16.4%;基于模型 M_3 的比差预测的误差 E_{re3} 为 2.65%,角差预测的误差 E_{pe3} 为 9.6%。



(a) 基于模型 M_1 的比差预测结果

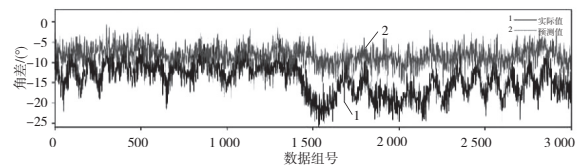


(b) 基于模型 M_2 的比差预测结果

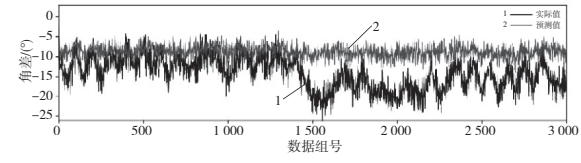


(c) 基于模型 M_3 的比差预测结果

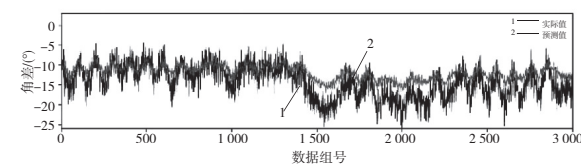
图 3 基于模型 M_1 、 M_2 和 M_3 的比差预测结果



(a) 基于模型 M_1 的角差预测结果



(b) 基于模型 M_2 的角差预测结果



(c) 基于模型 M_3 的角差预测结果

图 4 基于模型 M_1 、 M_2 和 M_3 的角差预测结果

5 结语

本文设计了一种在线状态综合评估系统对电子式电流互感器进行故障诊断以及误差预测。为了提高评估系统的精度与可靠性,进一步提出了一种改进的鲸鱼优化神经网络(IWOA-BP)的建

(下转第 171 页)

因素,其表现为旋转角度越大,压降和分离效率越高,同时叶片旋转角度与叶片螺距以及中心轴轴径都有着较强的交互作用,对分离效率影响显著。

2) 叶片螺距和中心轴轴径是影响涡旋管分离器气动性能的主要因素,表现为螺距越大,轴径越小,压降和分离效率越低,且叶片螺距和中心轴轴径的交互作用对压降影响强烈。

3) 基于响应曲面法建立了涡旋管分离器的压降及分离效率的预测模型。得到了分离器的优化模型,并与初始模型对比,结果表明:在对 AC 砂的分离效率相近情况下,优化模型的无量纲压降降低 1.358,且优化模型对粒径为 $0.2 \sim 6.0 \mu\text{m}$ 分离效率更高,说明响应曲面法在涡旋管粒子分离器的结构优化上具有可行性和应用价值。

参考文献:

- [1] CALLE C I, BUHLER C R, MCFALL J L, et al. Particle removal by electrostatic and dielectrophoretic forces for dust control during lunar exploration missions[J]. Journal of Electrostatics, 2009, 67(2/3): 89-92.
- [2] ZHANG J P, ZHA Z T, CHE P, et al. Charging effect on separation performance of outer vortex type cyclone for submicron particles at different operating parameters[J].

Particulate Science and Technology, 2020, 38(5): 596-604.

- [3] FILIPPONE A, BOJDO N. Turboshift engine air particle separation[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2010, 46(5/6): 224-245.
- [4] HUARD M, BRIENS C, BERRUTI F, et al. A review of rapid gas-solid separation techniques[J]. International Journal of Chemical Reactor Engineering, 2010, 8(1): 47-54.
- [5] MATSUBAYASHI T, KATONO K, HAYASHI K, et al. Effects of swirler shape on swirling annular flow in a gas-liquid separator[J]. Nuclear Engineering and Design, 2012, 249: 63-70.
- [6] MAO Y Q, PU W H, ZHANG H, et al. Orthogonal experimental design of an axial flow cyclone separator[J]. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 2019, 144: 107645.
- [7] 王涵,史治宇. 最优阶次多项式响应面法及其在模型修正中的应用[J]. 机械设计与自动化, 2021, 50(6): 93-98.
- [8] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.

收稿日期: 2022-12-06

(上接第 165 页)

模和预测方法。实验结果表明,相比于现有方法,本文的算法在理论性能、故障诊断与误差预测的精度上具有显著优势,能够为电流互感器在线状态提供有效可靠的评估。

参考文献:

- [1] ZIEGLER S, WOODWARD R C, IU H H C, et al. Current sensing techniques: a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(4): 354-376.
- [2] 李晓辉,刘响,顾强,等.电子式互感器电能计量贸易结算的 PCA 和 AHP 混合风险评估方法[J].电测与仪表, 2018, 55(14): 1-7.
- [3] 陈海宾,杨姝楠,陈丽雯,等.基于现场信号仿真技术的电流互感器误差测试技术研究[J].电测与仪表,

2021, 58(2): 133-138.

- [4] LI Z H, LI H B, ZHANG Z. An accurate online calibration system based on combined clamp-shape coil for high voltage electronic current transformers[J]. The Review of Scientific Instruments, 2013, 84(7): 075113.
- [5] HU C, CHEN M Z, LI H B, et al. An accurate on-site calibration system for electronic voltage transformers using a standard capacitor[J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(5): 055901.
- [6] KIRKPATRICK S, GELATT C D Jr, VECCHI M P. Optimization by simulated annealing[M]//Readings in Computer Vision. Amsterdam: Elsevier, 1987: 606-615.

收稿日期: 2022-10-19