

Research on fault diagnosis and optimization strategy of relay protection based on artificial intelligence

Zhide Liu Bangkai Xu

Zhejiang Power Transmission and Transformation Engineering Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

Abstract

As power systems increasingly evolve toward automation and intelligentization, traditional relay protection devices have demonstrated limitations in handling complex faults, multi-source disturbances, and nonlinear information, including delayed responses, significant diagnostic errors, and rigid decision-making rules. Artificial intelligence (AI) technology has shown remarkable advantages in big data analysis, pattern recognition, and fault prediction, providing innovative approaches for intelligent diagnosis and optimization of relay protection systems. This paper analyzes current fault characteristics in relay protection systems and explores the feasibility and effectiveness of AI-integrated fault diagnosis. The study focuses on applying neural networks, fuzzy logic, support vector machines, and deep learning algorithms to address false trips, failure to trip, and misjudgments in relay protection. Combining real-world operational scenarios, we propose a multi-source fault identification model that integrates data-driven approaches with expert knowledge, enabling high-precision fault identification and rapid response during troubleshooting processes.

Keywords

Relay Protection; Artificial Intelligence; Fault Diagnosis; Optimization Strategies; Power System Security

基于人工智能的继电保护故障诊断与优化策略研究

刘智德 徐邦凯

浙江省送变电工程有限公司, 中国·浙江 杭州 310000

摘要

随着电力系统日益向自动化、智能化方向发展,传统继电保护装置在处理复杂故障、多源扰动及非线性信息方面逐渐显现出响应不及时、诊断误差大、判断规则固化等局限性。人工智能技术在大数据分析、模式识别与故障预测等方面展现出强大优势,为继电保护系统的智能诊断与优化提供了全新路径。本文在分析当前继电保护系统故障特点的基础上,探讨将人工智能方法引入故障诊断的可行性与有效性,重点研究神经网络、模糊逻辑、支持向量机以及深度学习等算法在继电保护误动、拒动和误判中的应用机制。同时结合实际运行场景,提出融合数据驱动与专家知识的多源故障识别模型,实现故障处理过程中的高精度判别与快速响应。

关键词

继电保护; 人工智能; 故障诊断; 优化策略; 电力系统安全

1 引言

继电保护系统作为电力系统的“神经中枢”,在电网运行中承担着监测、判断、隔离故障的重要职责。随着电力网络结构愈加复杂,多源电力并网、非线性负荷以及间歇性新能源的大量接入,使得故障形式更趋多样,传统依赖固定逻辑与整定规则的继电保护方法难以适应日益增长的系统动态变化。尤其是在多种故障同时发生、保护范围边界模糊、一次设备信号不完整等特殊情况下,常规继电保护装置易出现误动、拒动等现象,严重威胁电力系统的稳定性与安全性。因此,迫切需要引入更为灵活、智能和自适应能力强的技术

手段对继电保护进行重构与优化。人工智能作为近年来发展迅猛的前沿技术,在信息识别、特征提取、模式分类及决策预测等方面具有显著优势,已被广泛应用于医疗、交通、金融等多个领域。在电力系统中,人工智能同样展现出强大的潜能,尤其在继电保护的故障诊断、误差识别及保护策略动态调整等方面发挥着不可替代的作用。本文立足人工智能与继电保护系统的融合需求,系统研究其关键技术路径与工程实现方式,为实现更加可靠、高效、智能的电网故障处置体系提供理论支持与实践指导。

2 继电保护系统故障特点与传统诊断方法的局限性

在现代电力系统快速发展的背景下,继电保护作为保障电网安全、稳定运行的核心环节,其故障诊断与识别机制

【作者简介】刘智德(1997-),男,中国江苏盐城人,本科,助理工程师,从事继电保护研究。

的重要性日益凸显。然而，随着系统结构复杂度提升、运行环境多变以及分布式能源与新能源的大量接入，传统的继电保护故障诊断模式在实时性、准确性和适应性方面暴露出诸多问题。因此，深入分析继电保护系统故障类型与表现特征，厘清传统方法的技术瓶颈，并结合人工智能技术的理论基础，为构建新一代智能继电保护诊断体系提供理论支持和技术路径，已成为当前研究的热点方向之一。

2.1 继电保护故障类型及表现特征

继电保护系统对电力系统至关重要，其功能是在故障时迅速、准确隔离故障区域，保障非故障部分供电。然而，继电保护自身也可能出现故障，引发误跳闸、拒动甚至级联事故。常见故障类型如下：

一是设备类故障，较为直观，如保护装置元件损坏、继电器失灵等，会导致保护动作失败、误动作或时限滞后。

二是整定误差类问题，保护装置整定值设置错误或范围重叠，多级保护配合不合理，会破坏保护选择性原则，出现误判、跳错等情况。

三是信号干扰问题，一次系统电磁环境复杂，保护装置采集信号受噪声等干扰，雷电、电弧等高能环境下更易误判。

四是逻辑配合异常，现代继电保护系统逻辑复杂，配置逻辑有漏洞或信号链路数据异常，远程测控等系统中配合时延、同步失调等，都会干扰保护动作。

继电保护系统故障特征多样、非线性、随机且动态。传统故障识别依赖三相电流幅值判断等固定逻辑，面对日益复杂的电网运行工况，已难以有效应对，亟待探索更先进的故障识别方法。

2.2 现有方法存在的技术瓶颈

传统的继电保护故障诊断方法，主要依赖专家经验与确定性规则构建的判据模型。这种方法虽然在静态系统、规则性较强的故障情境中效果较好，但在动态复杂场景中却显得力有未逮。具体技术瓶颈可归纳为以下几点：

响应滞后与识别误差大：传统保护装置对新型故障模式的响应灵敏度不足，往往只能识别已有设定中的故障类型，对于系统中未曾预设的“灰区”状态，如多点接地、非典型电弧性故障等，识别能力较差。

容错能力弱：在传感器失效、通信中断、电源波动等非典型故障条件下，传统系统缺乏有效的容错处理机制，极易造成全系统保护失效或误动作，影响整个区域的电力供应安全。

人工依赖强、更新周期长：保护装置的整定值更新通常依赖人工测算和经验判断，特别是在系统结构发生变化后，需要大量现场测试与反复调整，效率低下且易引发误差积累。

智能性不足，难以动态适应系统变化：现代电力系统具有明显的时变性，如负荷波动、新能源波动并网等，传统

方法无法实时适应系统状态变化，缺乏动态调整与持续学习能力 [1]。

2.3 人工智能介入的理论基础

人工智能技术优势显著，具备模式学习、自主判断和优化反馈能力，在处理高维、多变量、不确定性数据上独具优势。将其应用于继电保护故障诊断，能为传统系统赋予“认知”与“决策”能力，构建全新诊断体系。

在具体应用方式上，深度学习与神经网络模型可对历史电网运行数据做特征提取与模式分类，像 CNN、RNN、LSTM 等架构能按数据特点选用，实现故障类型自动映射；模糊逻辑与专家系统能模拟人工专家思路，融合模糊信息与多源数据，在边界模糊场景下进行故障判断；强化学习与智能控制通过与系统环境交互，动态调整判断策略，实现“在线优化”，应对系统配置变化等情况；多源数据融合与故障定位算法可融合多维信息，借助决策树等算法完成故障分类等决策。

此外，人工智能不依赖固定规则模板，能通过训练迭代更新模型，具备持续进化与泛化能力，适应复杂多变的电网运行。因此，将人工智能嵌入继电保护诊断系统，构建以数据驱动为核心等的智能诊断机制，是推动继电保护技术革新、提升电力系统韧性与智能化水平的关键。

3 典型人工智能算法在继电保护故障诊断中的应用研究

3.1 神经网络在故障识别中的建模优势

神经网络因其强大的非线性建模能力和自适应学习能力，在继电保护故障诊断中得到广泛应用。通过构建多层前馈网络或卷积神经网络，可对电流、电压、阻抗等原始特征进行自动提取与分类识别。神经网络能有效处理非标准化输入与不完整数据，在复杂故障模式下仍具有较高的识别准确率。例如在区分单相接地与相间短路、电弧故障与过载波动等问题上，神经网络可通过训练学习差异性特征实现精细分类 [2]。

3.2 模糊逻辑与专家系统在判据模糊条件下的判断机制

在部分故障判断中，电量信号存在幅值不确定、相位变化不规则等特性，传统硬判据难以实现精确判断。模糊逻辑系统可通过设定隶属函数和规则库，将“模糊”信号转化为“可控”逻辑，通过设定模糊区间实现对边界状态的柔性处理。结合专家系统提供的规则知识，可在缺乏明确数据支持时仍作出有效判断，提升系统对边界性、异常性数据的识别能力。

3.3 支持向量机与深度学习在小样本与高维数据下的诊断能力

支持向量机在处理小样本、高维度特征数据方面具有显著优势，适用于继电保护历史故障数据样本较少、故障类

型稀疏的场景。通过引入核函数映射,可将非线性特征转化为线性可分空间,实现故障模式的高效区分。而深度学习则适合处理大规模、多维度、高频采样数据,可通过构建深度神经网络、循环神经网络等结构,实现对连续采样电量的时序分析与特征提取,有效识别动态变化过程中的隐性故障特征。

4 基于人工智能的继电保护优化策略设计与实现路径

4.1 融合式数据驱动模型构建

为提高继电保护系统的实用性与稳定性,应将多源数据融合机制嵌入故障诊断模型中,实现原始信号、派生量与历史记录等多维数据的协同建模。具体做法包括:构建电压、电流、功率、频率等采样数据的特征矩阵;引入主成分分析法(PCA)降维处理;结合时序数据窗口滑动提取关键故障特征;利用标签化数据集进行监督训练,从而实现高鲁棒性的融合型模型[3]。

4.2 动态整定参数优化机制

在传统继电保护中,保护定值设定往往固定不变,难以应对电网结构的动态变化。基于人工智能的优化模型,可通过遗传算法、粒子群优化等方法对整定参数进行动态调整。例如可根据负荷波动、电源接入情况、历史故障频发区域等因素,实时修正保护灵敏度、时间系数等参数,实现保护性能的动态适配与最优匹配。

4.3 智能决策与闭环自修复机制

在保护误动或误判后,系统应具备快速评估与自修复能力。可通过智能决策算法在诊断异常后生成处理建议,推送给值班人员或远程控制平台,实现辅助决策;同时,可结合深度强化学习机制建立反馈学习通道,对误判事件进行模式识别和模型自更新,实现继电保护策略的在线学习与演化,构建“诊断—反馈—优化—再应用”的闭环系统。

5 典型工程应用与技术验证分析

5.1 人工智能继电保护系统在区域电网的实际应用

在某省域 220kV 输电系统里,创新性地采用了基于神经网络的继电保护误动识别模型,取得了显著成效。该系统具备强大的实时数据采集能力,能够精准捕捉故障电流、电压波形以及相位角等关键信息。这些实时数据为后续的分析提供了丰富且准确的基础素材[4]。

基于神经网络的模型经过大量数据训练后,可对采集到的信息进行深度挖掘和分类识别,精准判断故障类型与等

级。通过这一先进模型的应用,系统实现了令人瞩目的性能提升:误报率大幅降低 25%,有效减少了不必要的误动作,避免了因误报带来的经济损失和系统波动;诊断准确率提升至 95% 以上,能够更精准地定位和处理故障。这不仅显著提升了保护系统的可靠性,使其在面对复杂故障时能稳定运行,还增强了容错能力,为该省域 220kV 输电系统的安全稳定运行提供了坚实保障。

5.2 基于深度学习的开关故障预测系统建设

在某大型变电站自动化改造进程中,积极引入了基于循环神经网络的开关故障预测模型,为设备稳定运行筑牢了坚实防线。该模型具备强大的数据处理与分析能力,能够对变电站连续运行数据进行深度挖掘,精准提取潜在的触点老化特征。这些特征是开关设备健康状况的重要“信号”,通过对其细致分析,模型可以敏锐捕捉到接触不良风险的早期迹象,进而实现提前预警[5]。

在实际运行中,该模型成效显著,成功预判了两次关键设备失效事件。这一提前预警为运维人员争取了宝贵的处理时间,使他们能够及时采取有效措施,对存在隐患的设备进行检修或更换,将故障扼杀在萌芽状态。最终,避免了因关键设备失效而引发的大范围供电中断,保障了变电站所覆盖区域的电力供应稳定,提升了供电可靠性,为区域经济发展和居民生活提供了有力支持。

6 结语

继电保护作为电力系统安全运行的最后一道屏障,其稳定性与判断准确性对于保障电网运行至关重要。未来应加强算法模型的工程适配研究,推动智能诊断平台与保护装置的深度融合,形成具有自学习、自诊断、自决策能力的新一代智能继电保护系统,为构建安全、高效、灵活的现代智能电网提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 贾轶峰.基于配电自动化与继电保护技术的协同保护故障与应对策略[J].光源与照明,2024,(12):162-164.
- [2] 袁超南.继电保护技术在智能电网中的应用[J].光源与照明,2024,(12):165-167.
- [3] 陈志士.浅谈继电保护及自动化常见缺陷的处理分析[J].电工技术,2024,(S2):21-23+26.
- [4] 黄琳,李强.新型电力系统的继电保护隐藏故障研究[J].电工技术,2024,(S2):24-26.
- [5] 曹霞.信息化技术在继电保护故障诊断中的应用[J].电工技术,2024,(S2):161-163.