

Analysis of the integration and future development of intelligent substation relay protection and artificial intelligence

Sihao Ren

Lvliang Power Supply Branch, State Grid Shanxi Electric Power Co., Ltd., Lvliang, Shanxi, 033000, China

Abstract

With the advancement of new-type power system construction, the integration of high-proportion renewable energy sources has made grid characteristics increasingly complex. The emergence of smart substations has brought prominent advantages such as digitalization and networking, laying the foundation for building a robust and reliable power network. Artificial intelligence technology has been widely applied in fields like relay protection fault detection and protective device status evaluation, offering broader solutions to complex grid protection challenges through its powerful learning capabilities. This paper first elucidates the inevitability of integrating power system relay protection with AI technology; then focuses on analyzing three core application scenarios of AI technology in smart substation relay protection; subsequently explores the innovative architecture of station-domain protection control systems after adopting AI technology; finally, it outlines the challenges and future development directions in this field, providing theoretical references for promoting intelligent upgrades in smart substation relay protection technology.

Keywords

Smart substation; Relay protection; Artificial intelligence; Fault diagnosis; Station-domain protection

智能变电站继电保护与人工智能的融合应用以及未来发展探析

任思浩

国网山西省电力有限公司吕梁供电分公司, 中国·山西 吕梁 033000

摘要

随着新型电力系统建设的推进,高比例新能源的接入使电网特性日趋复杂。智能变电站的出现带来了数字化、网络化等一系列突出优点,为打造坚强可靠的电力网络提供了基础。其中人工智能技术广泛应用在继电保护故障的检测和保护装置状态评估等领域,以其强大的学习能力为解决复杂电网保护难题提供了更广阔的思路。本文首先阐述了电力系统继电保护与人工智能技术融合的必然性;其次,重点分析了人工智能技术在智能变电站继电保护中的三大核心应用场景;随后,探讨了站域保护控制系统在依托人工智能技术后的革新架构;最后,对该领域面临的挑战及未来发展方向进行了展望,为推动智能变电站继电保护技术的智能化升级提供理论参考。

关键词

智能变电站; 继电保护; 人工智能; 故障诊断; 站域保护

1 引言

电力系统继电保护是保障电网安全稳定运行的“第一道防线”,其核心使命是在电网发生故障时,能迅速、准确、可靠地隔离故障元件,防止事故扩大。传统的继电保护原理主要采集变电站各线路间隔电流和母线电压,然后基于基尔霍夫定律进行计算和分析,由此形成的定值依赖于电网最大、最小运行方式的额定容量和系统参数,这导致保护功能和保护范围只针对于特定的网络和运行条件。然而,在众多自然资源较为丰富的地区,以新能源为主体的电力网络受天

气和地理位置等多方面因素,导致其输出容量和电网结构有较大的不确定性和复杂性。例如风电、光伏等分布式电源通过电力电子变流器接入,其故障输出特性(弱馈性、低短路电流、谐波含量丰富)与传统同步发电机有本质区别,使得传统运行条件下的计算方式和故障分析无法满足从而造成严重的保护误动。智能变电站是智能电网的核心物理载体,其采用 IEC 61850 标准,并利用过程层中的合并单元和智能终端依靠光纤取代传统电网的电缆硬接线实现数字化和网络化,通过微秒级别的传输速度使得海量高精度的电流、电压和众多的变电站四遥信息得以被实时采集和高速共享。这为应用数据驱动的方法解决了数据源瓶颈问题^[1]。

人工智能技术在现如今智能变电站的应用主要是利用机器学习(ML)和深度学习(DL),其中图像识别和自然

【作者简介】任思浩(1997-),男,中国山西吕梁人,硕士,从事电力系统及其自动化、继电保护研究。

语言处理可以应用在继电保护中的故障类型识别和故障位置计算等众多领域。其核心优势在于能够从高维、非线性、强噪声的复杂数据中自动提取深层特征、发现内在规律并做出智能决策。将人工智能技术的高效性和便利性引入继电保护领域，可以轻松的补充传统运行分析计算中的缺陷赋予整个电网构架“感知-认知-决策-学习”的智能化能力，从而应对新型电力系统因为天气和地理位置等多方面因素带来的不确定性，实现从“传统保护”到“智能保护”的范式转移。本文旨在系统性地探讨这一融合技术在智能变电站场景下的应用现状、实现路径与发展前景。

2 继电保护与人工智能技术融合的必然性

二者的融合是技术发展与需求牵引共同作用的结果，其必然性体现在以下三个方面：

2.1 数据基础的形成：

智能变电站遵循 IEC 61850 标准，构建了“三层两网”结构。过程层中的合并单元和智能终端依靠光纤取代传统电网的电缆硬接线实现数字化和网络化，其中合并单元主要负责采集变电站各线路间隔、主变三侧的电流和母线电压量，电流通过直采方式进入保护装置参与计算，而电压通过各间隔合并单元级联完成数据共享最后参与分析计算，数据速率极高（通常为 4000Hz/80 点每周波）；继电保护二次回路剩余的遥控（控制回路）和遥信（刀闸、开关位置和保护动作等状态信息）信息则通过智能终端实现。这些标准化、结构化的实时数据流，为 AI 模型提供了前所未有的训练和应用基础。

2.2 传统保护局限性：

如前所述，面对复杂的故障特性（如高阻接地、发展性故障、振荡中再故障）和各式各样的新能源接入电网导致的系统运行方式改变，传统保护装置的保护范围和保护边界已经远远不能满足需求。变电站各间隔定值无法随着变化的系统运行情况进行整定，灵敏性较低，并且逻辑计算分析相对固定无法适应多场景下的复杂故障。因此系统运行方式的多变性要求保护具备自适应能力，而这正是 AI 所擅长的。

2.3 人工智能技术的独特优势：

强大的特征提取能力：深度学习中的卷积神经网络（CNN）可自动从故障暂态波形中提取有效特征，无需依赖人工经验选择特征量（如傅里叶变换后的基波分量），更能捕捉非工频的故障信息；高超的模式识别精度：对于难以用电力系统故障序网图描述的复杂故障，AI 模型能够整合全站多设备的数据，提前学习各种故障的典型特征从而更准确地进行识别和分类；内在的自适应与预测能力：强化学习（RL）算法可通过与仿真环境交互，自主学习最优的保护策略和定值调整方案，使保护系统能适应电网拓扑和运行方式的变化。此外，AI 还能基于设备监测数据，实现故障预警和预测性维护。

3 AI 在智能变电站继电保护中的核心应用场景

在智能变电站的框架下，AI 的应用可渗透到保护的各个环节。

3.1 故障的精确判断

应用模式：首先利用大数据模型学习多个变电站发生过的所有复杂故障类型和故障数据，通过合并单元直采模式自动匹配线路或者变压器的故障特征，或者是在新能源电网发生电流骤增、电压骤降的情况下，在毫秒级内以极高的数据运算速率匹配各式各样的短路故障特征，判断是各出线间隔短路而不是因为天气等原因导致的干扰信号，迅速识别出有没有故障、是什么类型的故障；其次可以通过融合多源数据，将一条输电线路某地发生故障时变电站 A 和变电站 B 检测到的时间差，直接排查故障具体位置，例如采用一维 CNN（1D-CNN）对故障电流/电压波形进行端到端的模式识别，直接输出故障类型（单相接地、相间短路等）、故障相别和故障方向；最后面对复杂的电网运行环境，人工智能深度学习暴雨、雷击天气和设备老化情况下的伪故障信号特征，例如树障会导致输电线路出现瞬时的电流波动，AI 会适应多场景变化避免保护设备出现误判导致跳闸停电。其优势是 AI 算法能充分利用故障发生初期的暂态高频分量，实现超高速识别（可在几个采样点内完成），极大提升速动性。对于高阻接地故障，其暂态特征虽幅值小但模式依然存在，AI 模型通过挖掘这些细微特征，可显著提升检测灵敏度^[2]。

3.2 保护定值的自适应整定

应用模式：新能源并网后的电网的运行方式、负荷水平会受到多方面因素时刻变化，依靠最大、最小运行方式固定的保护定值难以始终保证最优性能。可采用强化学习（RL）框架，将变电站各间隔保护的装置参数和保护值视为智能体，将电网不同时期的负荷大小和运行状态视为环境，将正确/错误的动作后果作为奖励。智能体通过不断与数字仿真模型或历史数据交互，学习出一套在不同电网状态下都能正确动作的最优定值调整策略。其优势是实现保护定值与系统运行状态的实时动态匹配，既能避免因保守整定导致的灵敏性不足，也能防止因激进整定导致的误动风险，优化保护配合。

3.3 继电保护二次设备状态评估

应用模式：对保护装置本身、合并单元、智能终端等二次设备的自检信息、运行日志、环境温度、网络流量等数据进行长期监测。利用机器学习算法（如孤立森林、支持向量机 SVM）进行异常检测，或利用长短期记忆网络（LSTM）进行趋势预测，监测继电保护二次设备信息参数随时间和运行状态的变化规律进行趋势预测，判断设备是否存在老化：绝缘缺陷和保护频繁启动等潜在故障。其优势是变“定期检修”为“状态检修”提前发现隐藏故障，极大提升整个保护系统的可靠性。

4 AI 赋能下的站域保护控制系统

智能变电站的站域保护控制系统在信息来源、系统决策逻辑计算和保护功能范围上都有着显著提升,利用人工智能算法构建控制系统平台可以更高效地分析全站运行状态,更快速地做出判断优化全站运行。

4.1 系统架构

站域保护控制系统会整合全站多源信息,将各出线、进线间隔、变压器、母线的电流和电压,以及站内外环境天气状态形成一个全局数据池,利用 AI 提前学习各种故障的典型特征,智能分析后快速分清真故障和假信号。

4.2 应用功能

4.2.1 多层感知机

站域系统采集全站设备和保护信息,信息覆盖面广但常面临线路或者母线多个故障同时存在或者干扰源导致瞬时故障的问题(比如暴雨天树障导致的瞬时电流波动,易被误判为线路短路)。先让多层感知机技术学习“全站历史故障数据”:包括“线路短路、母线故障、变压器过载”等 10+ 类故障的电流/电压波形、开关状态特征,以及“雷雨干扰、设备电磁噪声”等非故障信号特征;其次该技术会通过微秒级别的传输速度使得海量高精度的电流、电压和众多的变电站四遥信息快速比对已经学习到的故障数据:最后精确判断故障类型和故障位置,快速启动保护切除故障。

4.2.2 广域信息冗余判别

当某个间隔的保护动作信息上传后,站域主机可调用其他相关间隔的信息进行协同验证,提高决策可靠性,防止单一元件错误信息导致误动。

4.2.3 优化后备保护动作时序

基于全局拓扑和实时潮流,动态调整站内各后备保护的動作时间定值,确保故障隔离范围最小,避免后备保护不合理配合导致的连锁跳闸。

5 面临的挑战与未来发展方向

尽管前景广阔,但 AI 与继电保护的深度融合仍面临诸多挑战,这也是未来的重点研究方向。

5.1 模型的安全性和可靠性

继电保护作为电网安全运行的关键无法盲目依赖 AI 的模型运算,深度学习模型常被视为“黑箱”,无法清晰解释判断逻辑,保护装置一旦发生误动作或者拒动所承担的风险太大。未来需大力发展可解释性人工智能(XAI),使保护人员能够理解 AI 为何做出某种决策,从而建立信任。这是 AI 保护从理论研究走向工程应用的关键一步。

5.2 数据质量与样本均衡问题

AI 模型的性能严重依赖训练数据。逻辑判断往往需要

高质量且海量的数据训练,但变电站日常维护过程中极端天气或特殊运行方式下造成的短路跳闸故障极少,可能几年才发生一次,电网中严重故障样本稀少:同时不同地区的变电站一次设备和线路参数往往差异过大,因此故障数据无法适配一套 AI 模型。未来需研究数据增强技术、小样本学习、迁移学习等方法,提升模型在数据稀缺和不完备条件下的泛化能力。

5.3 多智能体协同与标准化:

未来电网的保护将是一个由众多智能保护装置(智能体)构成的分布式系统。如何让这些智能体高效协同、信息共享、避免冲突,是一个重要课题。需借鉴多智能体强化学习(MARL)等理论,并推动相关技术标准的制定,确保不同厂商设备间的互操作性^[3]。

5.4 实现高可靠的 AI 决策:

AI 模型可能面临对抗性攻击,即通过对输入数据添加细微扰动,导致模型做出错误判断。必须深入研究提升 AI 模型鲁棒性的方法,并将其纳入安全防护体系^[4]。同时发展可解释 AI 技术,当面临复杂故障时不仅能输出结果,还能显示该故障特征和判断依据,避免误判。

6 结语

智能变电站继电保护在当下的电网运行中有着较为完善的技术,为了提升继电保护对于全站信息的精准把控,让系统更高效、更精确、更快应对故障,与人工智能的融合是应对各式各样新能源并网后电网安全新挑战的必然选择。它并非颠覆传统,而是在继承其经典原理的基础上,通过数据驱动和智能算法,赋予保护系统更强大的感知、认知和决策能力。当前,研究已从理论验证走向初步应用探索,在故障精确判断、定值优化和继电保护二次设备状态评估等方面展现出巨大潜力。然而,要实现大规模工程化应用,仍需模型可解释性、实时嵌入式部署、多智能体协同和安全鲁棒性等关键技术取得突破。未来,随着技术的不断成熟和标准的逐步完善,继电保护深度融合人工智能后的一体化技术将成为打造坚强可靠智能电网的重要支柱,推动电力系统继电保护技术进入一个全新的智能化时代。

参考文献

- [1] 刘虎林,苏柏松,刘中平.人工智能技术在电力系统继电保护中的应用[J].电气时代,2022,(03):44-46.
- [2] 彭裕龙.基于深度学习的电力系统故障诊断与定位方法研究[J].电工技术,2024,(S1):469-471.
- [3] 陈延璇.面向新型电力系统的智能变电站继电保护技术研究[J].电工技术,2024,(S2):236-238.
- [4] Goodfellow I, et al. Deep Learning[M]. MIT Press, 2016.