

Adaptive Improvement and Application of Relay Protection Technology in Smart Grid Context

Fantao Wu

Yunfeng Power Plant, State Grid Lüyuan Hydropower Company, Ji'an, Jilin, 134200, China

Abstract

The increasing complexity of smart grids and large-scale integration of renewable energy have posed challenges to traditional relay protection systems, including insufficient sensitivity, delayed response, and poor adaptability. This paper explores adaptive improvement pathways for relay protection based on smart grid operational characteristics. Through analyzing adaptive protection principles, information fusion mechanisms, and intelligent algorithms, optimized strategies are proposed for distributed power sources, power electronic devices, and multi-node communication environments. Research demonstrates that integrating artificial intelligence algorithms, online parameter identification, and multi-source data fusion technologies enables dynamic parameter tuning and real-time decision-making for protection systems. Simulation and engineering validation results show that adaptive protection systems exhibit enhanced sensitivity and reliability under complex operating conditions, providing technical support for building intelligent relay protection frameworks.

Keywords

smart grid; relay protection; adaptive protection

智能电网背景下继电保护技术的自适应改进与应用

吴钊滔

国网绿源水力发电公司云峰发电厂，中国·吉林 集安 134200

摘要

智能电网的复杂化与新能源大量接入使传统继电保护面临灵敏度不足、动作迟滞和适应性差等问题。本文结合智能电网运行特征，探讨继电保护的自适应改进路径。通过分析自适应保护原理、信息融合机制与智能算法，提出在分布式电源、电力电子化设备及多节点通信环境下的优化策略。研究表明，结合人工智能算法、在线参数辨识及多源数据融合技术，可实现保护参数的动态整定与实时决策。仿真与工程验证结果显示，自适应保护系统在复杂运行条件下具备更高的灵敏度与可靠性，为智能化继电保护体系的构建提供了技术支持。

关键词

智能电网；继电保护；自适应保护

1 引言

智能电网的发展推动了电力系统从集中式向分布式、多节点、信息化方向转型。新能源发电的高比例接入、电力电子装置的广泛应用以及实时通信技术的深度融合，使得电网运行状态更加动态复杂。传统继电保护依赖静态整定参数，在面对频繁变化的网络拓扑和潮流分布时，难以保持精确的动作特性，甚至可能出现拒动或误动现象。为适应智能电网的实时特性和广域协调需求，继电保护技术亟须实现由“固定阈值”向“自适应决策”的转变^[1]。本文从系统架构、算法改进与工程实践三个层面，深入分析自适应继电保护的实现机理与应用效果，旨在为智能电网的安全防护体系提供创新路径。

【作者简介】吴钊滔（1989—），男，中国吉林集安人，本科，工程师，从事电气二次继电保护研究。

2 智能电网特征下继电保护面临的技术挑战

2.1 复杂电网结构带来的保护协调困难

智能电网的高度互联与分布式特征使继电保护协调面临前所未有的挑战。多电源并网条件下，潮流方向呈双向变化，传统依赖单向功率流的保护逻辑难以准确识别故障区段。分布式电源接入导致短路电流分布呈现不确定性，不同运行方式下故障点的电气特征差异显著，致使电流差动保护与距离保护的选段边界模糊。同时，电力电子设备的广泛应用使电压、电流波形畸变，谐波与高频干扰增加，削弱保护元件的灵敏度与动作稳定性。广域测控系统引入的通信时延与数据抖动进一步加剧保护判据的不确定性，使系统协调与配合逻辑复杂化。如何在多节点、多电源耦合条件下实现统一协调成为继电保护技术发展的关键难题。

2.2 新能源接入下的动态特性影响

新能源的间歇性与随机性对继电保护的实时响应能力

提出更高要求。风电与光伏系统输出受气象条件波动影响较大,功率变化频繁且难以预测。传统以稳态模型为基础的保护算法无法准确捕捉新能源发电的动态响应特征。在并网点发生故障时,逆变器控制的电流限幅机制使故障电流幅值受控,无法反映故障严重程度,造成过流与差动保护失效。此外,新能源在系统中占比提高后,短路容量下降,电压恢复过程变缓,易引发保护装置误动或拒动^[2]。为应对这一特性,自适应保护需结合实时监测结果调整定值参数,以保持故障检测的灵敏性与动作的选择性,实现保护性能的动态最优。

2.3 通信与信息融合的复杂性

智能电网的自适应保护依赖于广域信息交互与多点同步测量,其性能在很大程度上取决于通信网络的可靠性与数据融合精度。广域测控系统(WAMS)通过PMU、RTU等设备实现数据采集,但通信链路的延迟、抖动与丢包现象会导致信息传输不完整,影响保护动作的时效性。若时间同步系统存在偏差,不同节点间数据将出现相位失配,从而引发误判或保护拒动。多源数据融合还需应对异构数据格式与噪声干扰问题。为保证保护动作的正确性与一致性,必须构建高精度时钟同步机制与数据冗余校验体系,并通过分层融合算法提升决策可靠性。通信与信息处理的高性能集成,是实现智能电网自适应保护的核心技术基础。

3 自适应继电保护技术的核心原理与体系构建

3.1 自适应保护的概念与原理

自适应继电保护是一种基于实时信息感知与智能算法决策的动态保护技术,其核心在于系统运行参数的自感知与定值的在线调整。传统继电保护采用静态定值,难以应对智能电网中潮流方向频繁变化、运行状态动态波动的特点。自适应保护通过采集电压、电流、频率、功率及相角等多维信号,结合电网状态估计模型,对系统工况进行实时识别,并依据变化趋势动态修正动作阈值。其算法框架融合了数据驱动与模型驱动两种思想:前者依赖历史数据训练模型,后者基于电气方程实时更新参数。通过自学习与预测机制,保护装置可在故障发生前进行趋势判断,在故障过程中实现动作逻辑的自调整。该技术显著提高了保护动作的准确性与适应性,能够在复杂运行环境下保持灵敏度、选择性与速动性的一致性,为智能电网的安全运行奠定基础。

3.2 信息融合与在线参数辨识

自适应继电保护的实现离不开高质量的信息融合与参数辨识机制。智能电网中数据来源复杂,来自PMU(同步相量测量装置)、RTU(远动终端)和SCADA系统的信号需通过统一数据模型进行融合处理^[3]。信息融合系统利用时间同步、数据清洗与异常检测技术,消除通信延迟、时钟偏移及测量噪声,确保数据一致性。在线参数辨识技术采用递推最小二乘法、扩展卡尔曼滤波或模糊自学习算法,对线路阻抗、系统等效参数及潮流分布进行动态估计,使保护装

置具备自感知与自诊断能力。通过融合多源异构数据与物理模型,系统可在运行状态波动或网络拓扑改变时实时更新保护逻辑,增强对工况突变的响应能力。这种融合机制不仅提高了状态估计精度,也为自适应保护的动态整定提供了可靠数据支撑。

3.3 广域协同与动态整定机制

广域协同是自适应继电保护体系的重要特征。随着智能电网的互联化发展,单一保护装置已难以应对跨区域、多节点的复杂故障。广域自适应保护通过通信网络实现保护装置间的协调联动,使不同节点的保护逻辑在统一的时间基准下协同运行。系统采用分层分布式架构设计,现场保护装置负责局部数据采集与故障判定,区域协调中心则进行跨区信息整合与策略优化,中央控制单元负责全网动态整定。通过实时潮流监测与参数协同调整,系统可根据不同运行模式自动优化保护定值,避免保护死区与越级动作。动态整定机制利用在线计算与状态预测模型,在检测到系统异常时即时修正定值,实现保护性能的全局优化。该协同机制提升了全网保护的响应一致性与协调性,是构建智能化、自适应继电保护体系的关键路径。

4 自适应继电保护的关键算法与技术路径

4.1 基于人工智能的保护算法

人工智能算法在智能电网的复杂非线性环境中展现出卓越的自学习与自适应特性。通过神经网络、支持向量机(SVM)及决策树等模型,可实现故障信号的快速识别与特征提取。神经网络依托海量训练样本建立输入特征与故障类型间的非线性映射,实现高精度判断;SVM模型则在小样本条件下具备良好的分类性能,适用于稀疏数据环境。基于大数据的模式识别技术可构建电网运行状态与故障响应的映射模型,实现故障的实时预测。深度学习算法通过多层特征抽取,在高维时序数据中自动识别隐含规律,显著提升保护动作的准确性与鲁棒性。结合专家系统与模糊逻辑,可实现基于规则与经验的动态定值修正,使保护系统兼具逻辑解释性与自适应能力。人工智能的引入使继电保护由传统逻辑判断迈向智能决策阶段,显著增强了复杂电网中的故障诊断与响应效率。

4.2 基于动态特征的自适应整定方法

动态整定方法以实时监测与在线计算为核心,旨在根据系统运行状态变化动态调整保护定值。该方法通过对电压、电流、频率及功率变化率的连续跟踪,建立动态方程以描述电网的瞬态特征,实现保护参数的自学习更新。基于功率变化率的自调整算法能在潮流突变时快速修正阈值,避免因参数滞后引发误判;基于状态空间的预测控制模型则利用系统方程预测短期运行趋势,提前优化保护策略。动态整定的关键在于平衡灵敏度与选择性,使保护在多故障条件下仍具稳定性。将动态整定与概率统计分析结合,可依据运行数

据的分布特性评估故障发生概率,从而优化动作门限,提高系统的安全裕度。研究表明,该方法能有效减少误动作,增强保护系统在不确定环境下的可靠性与适应性。

4.3 数据驱动的多维决策优化

数据驱动方法为自适应继电保护提供了基于全局信息的优化思路。通过大数据平台对电网运行与故障历史数据进行聚类分析与特征提取,可揭示系统运行规律与潜在异常模式。多目标优化算法可对动作时间、灵敏度与选择性等关键性能指标进行权衡,实现保护策略的全局最优配置。基于强化学习的决策模型使保护装置具备“经验学习”能力,能在不断交互与反馈中自我优化决策规则。该机制通过奖惩函数调节策略选择,使系统在复杂环境下逐步趋向最优动作方案。多维决策模型不仅能够实现动态参数自整定,还能在多场景下保持鲁棒性与可扩展性。数据驱动的保护体系改变了传统基于静态模型的思维模式,使继电保护具备自主感知、智能判断与持续优化的能力,为电力系统的自适应运行提供了坚实的技术支撑。

5 自适应继电保护的工程应用与发展趋势

5.1 在分布式电源系统中的应用

自适应继电保护技术在分布式电源系统中展现出显著优势。随着分布式光伏、风电电源的大规模接入,配电网潮流呈现双向特性,传统基于固定值的保护逻辑难以适应复杂的功率反向流动。自适应保护通过实时监测节点电压、电流及功率变化,结合参数辨识算法动态计算线路阻抗,实现保护定值的在线调整。当分布式电源运行状态变化或潮流方向反转时,保护系统能依据实时数据自适应修正阈值,避免误判。引入功率方向判据与多点测量数据融合,使故障定位更加精确,动作时间显著缩短。仿真与实验结果表明,自适应保护在典型辐射型与环网结构中均能实现故障快速识别,动作延迟降低约40%,同时误动作率明显下降,为分布式系统的安全与灵活运行提供了技术支撑。

5.2 在柔性直流与电力电子化系统中的应用

柔性直流输电及电力电子化系统具有高控制灵活性和强非线性特征,其故障特征与传统交流系统显著不同。由于换流器输出受控,短路电流被限流,传统保护装置依赖的电流幅值与相角判据不再适用。自适应继电保护通过实时检测

换流阀状态、直流母线电压与电流变化率,结合模型预测控制算法对故障类型与位置进行快速判定。基于AI优化的特征识别模型可在数毫秒内识别异常波形,实现保护参数的自整定与动作逻辑动态优化。该方法兼顾灵敏度与选择性,能有效应对双极短路、接地及单极故障等多种场景。工程应用表明,自适应保护在柔性直流系统中的动作响应速度提高30%以上,显著增强了系统运行的安全性与可控性。

5.3 未来发展趋势与挑战

自适应继电保护的未来发展方向正向智能协同化、云平台化与标准化体系建设演进。随着边缘计算与物联网技术的融合,保护装置可通过云边协同架构实现算法远程升级与参数动态优化,提升全网保护协调效率。数字孪生与人工智能的结合将赋予系统实时仿真、状态预测与自学习能力,使保护逻辑从被动响应转变为主动防御。同时,广域自适应保护的推广仍面临通信延时、数据安全与算法可靠性等挑战。构建统一的通信协议、数据安全防护及算法验证体系,成为保障大规模应用的关键。未来,基于云端协同的智能保护平台将成为电力系统自适应防护的核心,实现全网保护的动态优化与标准化运行。

6 结语

智能电网的发展对继电保护技术提出了更高要求,自适应继电保护作为重要方向,正成为电力系统安全防护的核心技术。通过信息融合、在线辨识与智能算法的协同作用,继电保护实现了从静态整定向动态自优化的转变。工程实践表明,自适应保护系统在复杂电网中表现出更高的灵敏度与鲁棒性,为新能源接入和电力电子化设备提供了可靠的保护支撑。未来,随着人工智能、边缘计算与数字孪生等技术的深入应用,自适应继电保护将进一步实现自学习与自决策功能,构建覆盖全网的智能防护体系,推动电网安全性、稳定性与智能化水平的整体提升。

参考文献

- [1] 徐川川.智能电网中继电保护系统的动态适应性研究[J].家电维修,2025,(02):143-145.
- [2] 李振兴.智能电网层次化保护构建模式及关键技术研究[D].华中科技大学,2013.
- [3] 刘强,瞿汉飞,张少腾.新时代背景下继电保护技术在智能电网中的应用[J].自动化应用,2024,65(S1):106-108+112.