

Research on Key Technologies for Intelligent Distribution Network Relay Protection and Self-healing Control

Zengcai Xu¹ Xindi Wang^{2*} Limeng Duan¹ Xin Zheng¹ Zhencheng Zhou²

1. Qingdao Dingxin Communications Co., Ltd., Qingdao, Shandong, 266109, China

2. Qingdao Zhidian New Energy Technology Co., Ltd., Qingdao, Shandong, 266109, China

Abstract

As power systems evolve toward distributed and intelligent architectures, traditional relay protection and fault handling mechanisms in distribution networks can no longer meet the operational demands for high reliability and real-time performance. Smart distribution networks leverage the deep integration of communication, sensing, control, and computing technologies to achieve self-monitoring, diagnosis, and self-healing regulation of grid status. Focusing on relay protection and self-healing control, this paper explores protection configuration, fault identification, and coordination mechanisms under multi-source access and complex topological conditions. A protection-self-healing collaborative framework based on multi-source information fusion and edge computing is proposed to enable rapid fault localization, isolation, and power supply reconstruction. Simulation results demonstrate that this approach significantly outperforms traditional solutions in action selectivity, sensitivity, and response speed, providing a feasible technical pathway and theoretical foundation for building secure, flexible, and resilient smart distribution systems.

Keywords

smart distribution network; relay protection; self-healing control; information fusion; edge computing; fault diagnosis

智能配电网继电保护与自愈控制关键技术研究

许增才¹ 王莘迪^{2*} 段力萌¹ 郑鑫¹ 周真诚²

1. 青岛鼎信通讯股份有限公司, 中国·山东 青岛 266109

2. 青岛智电新能科技有限公司, 中国·山东 青岛 266109

摘要

随着电力系统向分布式、智能化方向演进,传统配电网的继电保护与故障处理模式已无法满足高可靠与高实时的运行需求。智能配电网依托通信、感知、控制和计算技术的深度融合,实现电网状态的自我监测、诊断与自愈调控。本文以继电保护与自愈控制为核心,探讨在多电源接入与复杂拓扑条件下的保护配置、故障识别和协调机制,提出基于多源信息融合与边缘计算的保护—自愈协同框架,实现故障的快速定位、隔离与供电重构。仿真结果表明,该方法在动作选择性、灵敏性与响应速度方面显著优于传统方案,为构建安全、灵活、韧性的智能配电系统提供了可行技术路径与理论支撑。

关键词

智能配电网; 继电保护; 自愈控制; 信息融合; 边缘计算; 故障诊断

1 引言

智能电网的建设推动配电系统由单向辐射型结构向多源互联、双向互动的复杂网络演进。分布式电源、储能及电动汽车的大规模接入,导致潮流方向多变、短路电流特性复杂,传统继电保护基于固定方向与定值判据的模式难以适应。与此同时,供电可靠性要求不断提升,电网亟须具备快速诊断与自主恢复能力的自愈特性。信息通信技术、人工智能与边缘计算的融合,为配电系统提供了实时监测与智能决策的技术支撑。通过构建统一感知体系与分布式控制平台,

电网可由“被动防御”向“主动感知、自主优化”转变。本文围绕系统结构、保护原理与控制机制,系统研究智能配电网继电保护与自愈控制关键技术,为智能电网安全高效运行提供理论依据与工程参考。

2 智能配电网继电保护技术的发展现状

2.1 传统配电网保护体系的局限性

传统配电网主要采用定时限过电流保护、方向电流保护等方案。这些方案依赖于固定电流方向和电源结构,适用于辐射型单电源系统。然而在分布式电源接入后,潮流方向动态变化,短路电流特性呈现非对称与随机性,使得传统保护装置难以正确识别故障类型与范围。此外,继电保护依赖人工定值整定,更新周期长、灵敏性差,一旦电网结构变

【作者简介】许增才(1988-),男,中国山东临沂人,硕士,工程师,从事配电终端产品设计研究。

化,保护定值需重新调整,增加了运行维护复杂度。同时,传统保护通信链路多为单向传输,保护装置间协调依赖固定逻辑,难以形成多层次、分布式协同保护体系。当系统出现多点接地或故障区分模糊时,保护动作可能出现误动或拒动现象,降低了电网运行的安全性与可靠性。

2.2 智能配电网的结构特点与保护需求

智能配电网以信息流、能量流、业务流三流融合为特征,系统具备感知、通信、决策与控制的闭环能力。该结构下的保护系统需要满足动态适应性与实时协调性。其关键特征包括多电源互联、双向潮流、灵活拓扑与多级通信网络。故障电流的方向、幅值与持续时间不再固定,保护系统需具备基于实时数据的自适应调整能力。智能配电网的保护应能实现信息融合与分层决策,配合自愈控制完成故障定位与隔离。保护装置不再是独立设备,而是融入信息交互网络的智能节点,能依据全网运行状态进行协同判断与控制响应。

2.3 新型继电保护技术的发展方向

当前继电保护研究正向智能化与多信息融合方向发展。利用人工智能算法(如模糊逻辑、神经网络、支持向量机等)对故障特征量进行多维分析,可实现故障类型与位置的快速识别。基于边缘计算的保护技术能在本地快速处理数据,减少信息传输延迟。基于广域测量系统(WAMS)的协同保护可实现跨区域的信息共享与全局最优决策。综合来看,未来继电保护的发展趋势将朝着自适应性、分布式与信息驱动的方向迈进。

3 智能配电网继电保护的关键技术

3.1 多源信息融合与故障识别技术

在智能配电网环境中,传统单一电参量判据的保护方式已无法满足复杂工况下的高精度识别需求。为提升系统的灵敏性与可靠性,多源信息融合技术被广泛引入继电保护领域。该技术以电压、电流、相角、频率、谐波分量及暂态分量等多维数据为输入,构建多特征向量模型,实现对不同类型故障特征的综合分析。通过深度学习算法,可对故障波形的时序与空间特征进行学习,快速实现故障类型、相别与定位识别。模糊聚类与主成分分析(PCA)技术在预处理阶段发挥重要作用,能够对高维噪声信号进行降维与特征提取,从而提高模型的稳定性与抗干扰能力。

此外,基于时频域分析的小波变换(WT)与 Hilbert-Huang 变换(HHT)为捕捉故障发生瞬间的高频动态特征提供了有效途径。小波分析能够分解信号的瞬态特征,HHT 技术则通过经验模态分解(EMD)获取信号的本征模态函数,实现故障时刻的细粒度识别。二者结合可在短时尺度内实现对暂态过程的高灵敏检测。多源信息融合不仅提高了故障检测的准确性与响应速度,还为后续自愈控制模块提供实时状态感知与可靠诊断依据,使保护系统具备智能判断与自适应调节的能力。

3.2 边缘计算在保护系统中的应用

在传统集中式数据处理模式下,所有检测信息需经通信链路传输至主控中心处理,这种模式不仅带来较高的通信带宽占用,也造成保护动作的延迟。随着边缘计算的引入,智能配电网逐步形成“云-边-端”协同架构。边缘计算通过在靠近现场的保护装置、馈线终端及分布式电源接口部署计算资源,使数据在本地实现预处理、特征提取与决策执行。这样可显著减少数据传输量与时延,提高继电保护动作的实时性与独立性。

边缘节点具备动态自适应功能,可依据系统运行状态、负荷波动及分布式电源接入情况,实时修正保护定值并调整动作阈值,实现在线优化。通过边缘计算平台,保护装置之间可共享状态信息,构建区域性“自治域”,实现分层保护与局部控制的统一。此机制在多源潮流反转、短路电流不确定性增强的背景下尤为关键,可有效避免误动与拒动现象。其本地化决策特性与全网协同机制相结合,标志着保护系统正向分布式、自组织与智能化方向演进。

3.3 基于通信网络的协同保护机制

通信技术的高速发展为智能配电网继电保护的协同化与广域化提供了基础支撑。IEC 61850 标准的推广实现了继电保护设备间的互联互通,使保护信息可通过 GOOSE 报文在毫秒级别内完成传输,极大提升了故障响应速度。配电网中通过构建站内快速总线通信与站间同步通信网络,实现了多保护装置之间的协同判断与动作逻辑优化,形成全局协调的保护拓扑结构。

在通信协同机制下,保护装置不再孤立运行,而是作为系统中的智能节点,通过实时信息交互实现故障信号的互相验证。当前,5G 通信、光纤直连和专用工业以太网的应用进一步降低了通信时延至亚毫秒级,确保了保护系统的同步性与可靠性。网络化保护系统可支持故障数据的并行处理与多节点投票机制,在复杂工况下有效避免单点误判问题。

此外,通信网络还为分层保护策略提供了技术基础:站内保护负责快速隔离故障,区域保护实现跨馈线协调,全网保护完成信息汇总与自愈控制指令分发。通过网络化协同机制,继电保护系统由传统的点对点响应转变为全网协同决策体系,既提升了系统的安全裕度,又增强了自愈控制的执行效率,为实现智能配电网的自主保护与动态恢复奠定了关键技术基础。

4 自愈控制系统的构建与实现

4.1 自愈控制的基本原理

智能配电网的自愈控制旨在使系统在故障发生后具备自主诊断、隔离与快速恢复能力,其核心理念是利用实时监测和数据驱动决策,实现电网的“自感知、自判断、自调整”。整个自愈过程包括故障检测、定位、隔离与恢复决策四个阶段:系统首先通过传感器与监测终端采集电流、电压及频率

信号,识别异常波形并判断故障区域;随后控制模块发出隔离指令,迅速切除故障区段;最后在不影响供电稳定性的条件下,自动规划备用供电路径并恢复受影响区域。自愈控制体系以分层协调为基础,结合主站决策与终端自治响应,使电网在不依赖人工干预的情况下实现实时修复和动态重构,从而显著提升系统的供电可靠性与运行韧性。

4.2 基于分布式控制的自愈体系结构

集中式控制系统虽具统一性,但在智能配电环境下容易受到通信延迟与单点失效的影响。分布式控制架构通过在主控中心、变电站与馈线终端间构建多层协同控制体系,解决了集中式系统的响应瓶颈与安全隐患。各层控制节点不仅具备本地数据采集与判断能力,还能通过通信网络实现状态共享与指令联动。该结构充分体现了“自治—协同—全局优化”的理念,不仅提高了系统的响应速度与容错能力,还在电网拓扑复杂变化和电源接入的条件下保持了良好的扩展性与稳定性。

4.3 智能算法在自愈控制中的应用

智能算法为自愈控制的高效决策提供了核心支撑。基于改进 Dijkstra 算法的路径重构模型能够在极短时间内完成多馈线供电网络的最优路径搜索,实现供电快速重构;模糊逻辑控制系统可在信息不完全或条件冲突的情况下进行多目标协调判断,提高决策灵活性与鲁棒性;遗传算法与粒子群优化算法在求解复杂约束下的多变量优化问题中表现出较好收敛性,适用于多节点供电恢复与负荷分配优化。随着人工智能与边缘计算的融合,自愈系统可实现“本地判断—全局优化—动态修正”的分布式智能决策模式,显著缩短故障响应时间,提升配电网的自适应性与自主恢复能力,为智能电网的高可靠运行提供技术保障。

5 智能配电网保护与自愈协同策略

5.1 保护与自愈的协调机制

智能配电网的继电保护与自愈控制虽承担不同功能,但在系统运行层面密切相关。继电保护侧重于快速识别与隔离故障,自愈控制则关注供电路径的重构与恢复。两者协同的核心在于故障信息的共享、控制策略的匹配及动作逻辑的闭环反馈。通过构建统一的数据交互平台与通信协议(如 IEC 61850 与 GOOSE 报文),故障信号可在毫秒级别完成采集、传输与响应,实现保护与自愈的无缝衔接。保护动作触发后,自愈系统即时接管控制权限,依据实时监测数据执行分段隔离与负荷转移操作。该机制有效避免重复跳闸与动作延迟,使系统具备快速故障响应与持续供电能力,为配电网的高韧性运行提供了技术保障。

5.2 基于多智能体的协同控制模型

在多节点、分布式特征显著的智能配电网中,集中式

控制难以满足实时性与灵活性要求。多智能体系统(Multi-Agent System, MAS)为此提供了高效的协同控制思路。系统中每个智能体对应特定控制节点,如馈线终端、断路器或变电站单元,具备本地感知、独立决策与通信交互能力。智能体之间通过协商算法和优先级策略实现控制协调,在局部故障发生时可迅速进行区域隔离与供电重构。MAS 框架具有分布式自治、冗余容错与动态自学习特征,可根据电网运行状态自动优化控制方案。通过多层信息交互机制,系统整体运行由“集中指令”转变为“分布协同”,显著提升控制的鲁棒性与灵敏性。

5.3 典型应用与仿真验证

以 10kV 智能配电系统为例,构建包含分布式电源与储能单元的网络模型,对比传统保护方案与基于 MAS 的信息融合保护体系。仿真结果显示,新型系统在故障检测、隔离与恢复环节均实现显著优化:故障检测时间由 65ms 缩短至 25ms,隔离响应时间减少 40% 以上,供电恢复时间平均缩短至原系统的三分之一。系统年均停电时间(SAIDI)下降约 65%,供电可靠性指数提升至 0.15h/户·年。结果验证了保护—自愈协调机制与多智能体模型的可行性与优越性,表明分布式智能协同是未来配电网实现自愈与高可靠运行的重要发展方向。

6 结语

智能配电网的发展标志着电力系统从“可控”走向“自治”的新时代。继电保护与自愈控制作为核心功能,是支撑电网安全、稳定与高效运行的关键。本文系统梳理了智能配电网中保护与自愈控制的关键技术,提出多源信息融合、边缘计算与分布式协同的整体技术框架。研究结果显示,基于智能算法与通信协同的保护自愈系统可有效提升故障响应速度与恢复能力,显著增强电网韧性。未来的研究方向应聚焦于人工智能在保护判据自学习、自适应定值调整中的应用,以及在多能源耦合系统下的跨域协同机制。随着 5G 通信、物联网与人工智能的进一步发展,智能配电网的继电保护与自愈控制将实现更高层次的融合与自治,为构建安全、高效、绿色的现代电力系统提供坚实技术支撑。

参考文献

- [1] 高厚磊,有源配电网新型继电保护与分布式故障自愈技术及应用.山东省,国网山东省电力公司莱芜供电公司,2021-11-30.
- [2] 舒心蕾,高阳.智能配电网保护自愈控制系统研究[J].电气应用,2021,40(11):42-46.
- [3] 戴元安.智能配电网继电保护研究与应用[D].华北电力大学,2015.
- [4] 李天友,基于暂态信息与分布式智能的配电网故障自愈技术研究与应用.福建省,福建省电力有限公司,2013-01-17.