

多层次继电保护策略在复杂电力系统中的应用研究

李晓雯

国家电投黄河上游水电开发有限责任公司羊曲发电公司, 青海西宁, 810000;

摘要: 随着电力系统向高电压、大容量、跨区域联网快速发展, 新能源接入、交直流混联等新形势使系统结构复杂性和运行不确定性提升, 传统继电保护策略难以满足系统安全稳定运行需求。多层次继电保护策略基于系统分层架构, 整合不同层级和类型保护单元, 实现故障快速识别、精准定位与分级处置, 是破解复杂电力系统保护难题的关键。本文阐述复杂电力系统结构特征及继电保护挑战, 分析多层次继电保护内涵与设计原则, 构建含主保护、后备保护、辅助保护的多层次保护体系, 结合工程实例验证其可行性与优越性, 最后探讨未来发展趋势, 为复杂电力系统继电保护优化设计与工程应用提供理论与实践参考。

关键词: 复杂电力系统; 多层次继电保护; 主后备配合

DOI: 10. 64216/3104-9672. 25. 03. 016

引言

电力系统是国民经济核心基础设施, 其安全稳定运行关乎社会生产生活与能源安全。近年来, 随双碳目标推进, 新能源并网、特高压工程建设, 电力系统形成源网荷储协同的复杂格局, 结构向网状、混联网络转型, 运行方式多场景、强耦合、高波动。同时, 故障类型复杂, 单一故障连锁反应风险提升, 对继电保护速动性等提出更高要求。继电保护是电力系统第一道防线, 承担故障检测等核心任务, 其性能决定故障损失与影响程度。传统继电保护多采用单一保护单元+固定定值模式, 各装置独立运行、信息交互不足, 难适应复杂系统故障问题, 易出现误动等情况, 严重时致系统瓦解。

1 复杂电力系统的结构特征及继电保护面临的挑战

复杂电力系统由多个电源点、输配电网络和负荷中心构成, 结构庞大、元件多样, 核心结构特征有三方面。一是电源结构多元化, 传统与新能源电源协同, 新能源的特点使系统电源出力和短路电流变化大, 分布式电源接入增加故障识别难度。二是网络结构复杂化, 特高压交直流线路建设形成跨区域联网, 交直流混联常态化, 故障电流路径多元, 元件耦合紧密, 易引发连锁故障。三是运行方式多样化, 受多种因素影响, 系统运行方式和参数频繁变化, 要求继电保护适应不同故障特征。基于这些特征, 传统继电保护策略难满足需求, 面临四大挑战。一是保护选择性与速动性矛盾突出, 复杂系统要求保护快速动作, 但精准区分故障元件难, 传统策略难兼顾, 易致系统失稳或误动。二是保护灵敏性难适应故障变化, 复杂故障频发, 新能源使故障特征复杂, 传统

保护检测灵敏度降低。三是各保护单元协同性差, 传统保护独立运行, 缺乏信息交互与配合, 动作时序易混乱, 定值整定难适应运行方式切换。四是保护可靠性受多种因素影响, 电磁干扰等影响装置运行, 通信问题可能导致保护信息丢失, 影响装置正常动作。

2 多层次继电保护策略的核心内涵与设计原则

2.1 核心内涵

多层次继电保护策略基于复杂电力系统分层架构与故障处置需求, 按优先级、动作时序、功能定位划分保护功能层次, 通过各层次保护单元协同配合、信息共享, 实现故障快速识别、定位、分级隔离与冗余备份。其核心内涵为分层协同、功能互补、自适应调整。分层协同是核心, 将保护系统分为主、后备、辅助三个核心层次, 各层次承担不同任务, 按预定时序协同动作。主保护是首道防线, 快速切除故障; 后备保护是第二道防线, 主保护失效时切除故障; 辅助保护针对特定故障场景补充。功能互补指各层次、类型保护单元配合, 弥补单一保护局限, 整合多种保护方式覆盖各类故障。自适应调整指保护系统根据电力系统运行和故障特征变化, 自动调整保护定值、动作时序与逻辑, 确保性能稳定, 适应复杂系统变化。

2.2 设计原则

为使多层次继电保护策略适应复杂电力系统需求, 实现快速、精准、可靠、协同目标, 设计需遵循四大原则。一是层次性原则, 明确各保护层次功能定位与动作时序, 主保护优先动作, 后备保护与主保护合理配合, 辅助保护针对特定故障补充, 动作时限遵循主保护<后

备保护<系统稳定极限。二是协同性原则，强化各保护单元和层次信息交互与协同，构建全局联动、分级响应机制，通过通信网络实时共享信息，协同整定保护定值。三是适应性原则，保护策略适应系统运行、故障特征和结构变化，采用自适应定值整定技术，优化保护逻辑，具备扩展性。四是可靠性原则，确保继电保护系统在复杂工况下可靠运行，选用高性能设备，优化逻辑、增加冗余，建立状态监测与故障诊断机制。处理保护装置异常，提升保护系统运行可靠性。

3 多层次继电保护策略的体系构建与实现方法

3.1 主保护层次：快速切除故障的核心防线

主保护是多层次继电保护体系核心，旨在快速精准切除故障元件，缩短故障时间，降低冲击与损坏。设计优先保证速动性与选择性，动作时间通常不超 50ms，也有一定灵敏性。不同元件主保护方式：输电线路采用光纤电流差动保护，特高压线路可用纵联方向差动保护；变压器采用纵差与瓦斯保护结合；母线采用分相电流差动保护，配失灵保护；新能源汇集站采用快速差动保护。主保护关键是确保快速准确，优化采样算法减少延时，采用比率制动等技术避免误动。

3.2 后备保护层次：冗余备份的安全防线

后备保护是冗余备份防线，在主保护拒动等情况时切除故障，防止扩大，保障系统安全。设计优先保证可靠性与灵敏性，与主保护合理时序配合。分为近、远后备保护，近后备与主保护在同一单元，动作时限比主保护长 0.3 - 0.5s；远后备装在相邻元件上，动作时限比近后备长 0.5 - 1.0s。后备保护方式依保护对象与故障特征选，关键是与主保护时序协同、定值匹配，协同整定动作时限，优化定值。

3.3 辅助保护层次：功能补充的完善防线

辅助保护是补充防线，针对特定故障场景和工况保护，弥补主、后备保护不足。不承担主要故障处置任务，仅在特定条件下动作，与主、后备保护协同配合。方式包括零序、负序、过电压、低电压、暂态保护等。关键是精准识别特定故障，避免不必要动作，优化动作判据，确保仅在特定故障时动作。

3.4 多层次继电保护的协同实现

多层次继电保护策略优势在于各保护单元协同配合，依靠信息共享、协同整定与自适应调整技术实现。信息共享是基础，构建信息共享平台，依托 IEC61850 规约实现信息毫秒级交互，使各保护单元获取全局故障

信息，精准决策。工作流中，后备保护接收信息并调整动作时序，辅助保护传递特定故障信息给主、后备保护以准确识别故障。协同整定是协同实现的关键，建立多层次继电保护定值协同整定模型，综合考虑系统运行、故障特征及保护动作时序，优化主、后备、辅助保护定值，避免保护问题。采用优化算法实现协同优化，提升保护系统性能，如复杂配电网采用协同整定模式实现接地故障定位与切除。自适应调整是协同实现的保障，实时监测系统状态与故障特征，自动调整保护参数。利用机器学习算法提升自适应能力，如根据不同情况调整保护门槛、定值或提升灵敏性避免拒动。

4 工程应用实例分析

为验证多层次继电保护策略在复杂电力系统中的可行性与优越性，以某 35kV 城东矿区配电网工程为例，开展工程应用验证。该配电网为复杂多电源配电网，接入多个分布式光伏电源（总容量 40MW），包含 35kV 变电站 1 座（郑村变电站）、10kV 线路 8 条、配电变压器 32 台，系统结构复杂，运行方式灵活，传统继电保护策略存在保护易越级、接地难定位、自动化配合不稳定等问题，故障跳闸次数较多，供电可靠性有待提升。

4.1 工程概况与保护需求

该 35kV 配电网承担城东矿区生产生活供电，负荷密度大、含重要负荷，对供电可靠性要求高。因接入大量分布式光伏电源，系统短路电流波动大、故障类型复杂、单相接地故障频发。传统继电保护存在问题：一是易越级跳闸，扩大停电范围；二是接地故障难定位，故障处置时间长；三是自动化配合不稳定，易出现保护误动、拒动。为此，工程需构建多层次继电保护体系，实现故障快速识别、定位与分级处置，提升保护系统性能，保障供电可靠性。

4.2 多层次继电保护策略的设计与实施

结合配电网结构与保护需求，构建主保护-后备保护-辅助保护三级多层次继电保护体系，具体如下：

一是主保护层次设计。35kV 变电站母线用分相电流差动保护，动作时间 $\leq 50\text{ms}$ ，配失灵保护；10kV 线路用光纤电流差动保护，动作时间 $\leq 30\text{ms}$ ；分布式光伏汇集站用快速差动保护，配电子式互感器与数字滤波算法；配电变压器用纵差保护，动作时间 $\leq 30\text{ms}$ ，配合瓦斯保护。

二是后备保护层次设计。采用近后备+远后备模式。10kV 线路近后备阶段式过流保护，远后备距离保护Ⅲ段；配电变压器近后备用过电流保护，远后备用相

邻线路过流保护。同时优化定值，动态调整。

三是辅助保护层次设计。引入零序保护，采用小电流接地选线技术识别单相接地故障线路；10kV 线路配置暂态保护；变电站出线开关配置过电压、低电压保护。构建短路三级+接地五级自动化保护体系。

四是协同实现。搭建信息共享平台，实现信息实时共享；建立协同整定模型，优化定值与动作时序；引入自适应调整技术，提升自适应能力。完成 35kV 郑村站综自改造，提升故障识别速度。

4.3 应用效果验证

策略实施后，工程试运行 6 个月，对比试运行前后性能指标验证可行性与优越性。同时，在后河线支线、王街线开展两轮真型试验，验证各级保护装置性能。能。试验与试运行结果表明，多层次继电保护策略解决了传统保护策略问题，显著提升保护系统性能：一是大幅缩短故障切除时间，主保护平均动作 28ms，后备保护平均动作 320ms，较传统策略缩短超 45%，减少故障对设备与系统的影响；二是显著提升故障定位精度，单相接地故障定位误差 ≤ 50 米，准确率达 100%，故障处置时间从平均 2.5 小时缩至 0.5 小时以内，提高处置效率；三是显著提升保护可靠性，试运行期间误动、拒动次数为 0，动作成功率达 100%，故障跳闸次数同比降 75%；四是显著增强适应能力，能适应分布式光伏出力波动、系统运行方式变化等，在复杂工况下稳定运行。此外，该策略提升了配电网供电可靠性，试运行期间平均供电可靠率达 99.98%，较传统策略提升 0.05 个百分点，减少停电损失，保障矿区正常供电。试验与试运行验证了该策略在复杂配电网中的可行性与优越性，能解决复杂电力系统保护难题，提升整体性能。

5 多层次继电保护策略的发展趋势

随着电力系统向源网荷储协同、智能、数字化发展，复杂电力系统结构与运行特征更复杂，多层次继电保护策略将结合新技术，向智能化、协同化、数字化、一体化发展，具体趋势如下。一是智能化水平提升。人工智能技术与多层次继电保护策略深度融合，实现保护逻辑、故障特征、保护定值自主优化、识别与整定。分析海量数据构建故障识别模型，精准识别复杂故障、预测故障，实现全流程保护。如深度学习模型提升微弱信号识别准确率，强化学习算法优化保护动作逻辑。二是协同范围扩大。从各保护层次、单元扩展到源网荷储全环节，实

现与新能源、储能、负荷侧管理系统协同联动。广域保护技术依托新技术发展，实现跨区域、层级保护协同，构建全局联动体系。比如新能源故障时，保护系统联动储能补缺口；负荷侧故障时，联动切除非重要负荷。三是数字化转型加速。数字孪生技术用于设计、调试与运维，构建数字孪生模型，实现虚拟仿真、优化设计与故障溯源。降低调试成本，实时监测装置状态，提升可靠性。保护装置数字化水平提升，实现信息数字化采集、传输与分析，采用数字式互感器与通信协议，实现毫秒级交互。四是一体化保护体系构建。打破传统保护单元界限，构建保护-控制-测量-通信一体化体系，实现功能深度融合。简化结构，减少设备，提升集成度与可靠性，为协同决策提供支撑。如一体化装置可实现多种功能，提升运行效率。

6 结论

复杂电力系统结构多元化、运行多样化，使传统继电保护策略面临选择性与速动性矛盾等挑战，难以满足系统安全运行需求。多层次继电保护策略基于系统分层架构，构建主保护-后备保护-辅助保护三级体系，实现保护单元协同配合等，能破解复杂电力系统保护难题。本文经深入研究并结合工程实例验证，得出结论：一是该策略遵循相关原则，可快速识别故障等，提升保护系统性能；二是三级体系明确各层功能与时序，通过不同保护方式组合全面覆盖各类故障；三是信息共享等技术是协同运行关键，能确保动作协同、定值匹配，适应系统变化；四是工程实例表明其能解决复杂配电网保护问题，提升供电可靠性，有良好工程应用价值。随着双碳目标推进与电力转型，该策略还需完善：一是优化协同整定算法，结合人工智能提升适应能力；二是加强广域协同保护技术研究，构建全局一体化体系；三是推动新技术融合，提升数字化、智能化水平；四是针对复杂场景开展适应性研究，完善保护逻辑与方法，支撑复杂电力系统安全运行。

参考文献

- [1] 黄宏宏, 许海霞. 继电保护状态检修在电力系统中的应用研究[J]. 科技资讯, 2013(25): 1. DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-3791. 2013. 25. 090.
- [2] 黄克成, 周泽禹. 继电保护自动化技术在电力系统中的应用研究[J]. 华东科技: 学术版, 2017(12): 1.
- [3] 许云鹏, 刘凯. 继电保护自动化技术在电力系统中的应用研究[J]. 产品可靠性报告, 2024(8): 106-107.