

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，避免不必要的动作，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≤50ms，配失灵保护；10kV 线路用光纤电流差动保护，动作时间≤30ms；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≤30ms，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 线路近后备用阶段式过流保护，远后备用距离保护 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.