

供配电系统中继电保护配置原则与运维协同机制研究

朱红星 赵 炳

南水北调中线信息科技有限公司 北京 100000

摘 要：本文旨在深入探讨现代供配电系统中继电保护的核心配置原则，并创新性地提出一种以数据驱动、流程贯通、责任共担为核心的“运维协同”机制。文章首先分析了当前供配电系统的发展趋势及其对继电保护提出的新要求；其次，系统阐述了继电保护“四性”（选择性、速动性、灵敏性、可靠性）在复杂配电网环境下的内涵深化与配置策略；再次，重点剖析了当前继电保护运维中存在的痛点问题；最后，构建了一个涵盖“规划-建设-运维-退役”全生命周期的协同机制框架，并提出了基于数字孪生、人工智能等新技术的实施路径，旨在为提升继电保护系统的整体效能和电网韧性提供理论支撑与实践指导。

关键词：供配电系统；继电保护；配置原则；运维协同；智能电网

引言

长期以来，我国配电网呈辐射状，潮流方向单一、负荷稳定，经典继电保护方案广泛应用且体系成熟。但“双碳”目标下，配电网变革深刻：高渗透率分布式能源接入，使网络变有源，潮流和短路电流特征改变；电力电子设备普及，故障电流暂态特性变化，挑战传统保护；用户侧互动性增强，负荷成“产消者”，系统复杂性和不确定性增加；数字化与智能化升级，提供海量数据和高速通道。这些变革让传统继电保护面临“失灵”风险，如反向潮流致误动、故障电流不足致拒动、定值整定困难等。且现实中运维存在“重建设、轻运维”等问题，削弱保护防御能力。因此，在新的电网生态下，科学制定继电保护配置原则，构建高效协同运维机制，是亟待解决的关键课题，本文将对此展开系统性研究。

1 供配电系统新形态对继电保护的挑战

1.1 潮流与短路电流特性的颠覆性变化

传统辐射状配电网潮流单向、短路电流由上级系统提供且随故障点远离电源递减，为电流保护阶梯式配合提供基础。但含高比例高渗透率分布式能源（DERs）的有源配电网中，潮流双向，本地 DERs 出力大于负荷时反向流入上级电网，可能使过流保护误判；短路电流贡献复杂，不同类型 DERs 差异大，或致保护灵敏度不足、失去选择性；且 DERs 出力随机性强，短路电流水平波动大，给保护定值整定带来极大困难。

1.2 故障暂态过程的复杂化

电力电子接口设备的引入，使得故障暂态过程不再遵循传统的工频正弦规律。IIDG在故障期间会执行特定的故障穿越（FRT）策略，其输出的电流波形可能包含丰富的谐波、直流分量，甚至呈现出非线性、非对称的特

征。传统的基于工频相量提取的保护算法（如傅里叶变换）在这种情况下性能会严重下降，可能出现计算误差大、响应慢甚至误判的问题。

1.3 网络拓扑的动态可变性

微电网、移动式储能、即插即用设备等概念的普及，使得配电网的拓扑结构不再是固定不变的。微电网可以在并网与孤岛模式间切换，移动储能可以接入不同的节点，这些都要求继电保护系统具备自适应能力，能够根据实时的网络拓扑自动调整其保护逻辑和定值，否则极易在模式切换过程中引发保护误动或拒动。

1.4 对保护“四性”的再审视

上述挑战直接冲击了继电保护“四性”原则的实现：（1）选择性：在多电源、多分支的复杂网络中，如何精确定位故障区段，避免越级跳闸，成为巨大难题。（2）速动性：对于某些需要快速隔离的故障（如电缆故障），传统保护的动作时间可能已无法满足要求。（3）灵敏性：在IIDG主导的弱馈系统中，如何保证保护对高阻接地故障等轻微故障有足够的反应能力，是灵敏性面临的新考验。（4）可靠性：保护系统自身的可靠性也受到挑战，IED（智能电子设备）的软硬件故障、通信中断、网络安全威胁等都可能使其失效。

2 继电保护的核心配置原则深化

2.1 坚守“四性”根本，优化配置策略

强化选择性：应从单纯依赖电气量幅值/时限配合，转向综合利用多种信息。例如，推广基于通信的纵联保护（如差动保护、方向比较式保护）至中压配电网的关键线路和设备，利用两端或多端的电气量信息进行精确故障定位。对于不具备通信条件的区域，可探索利用故障行波、暂态高频分量等不受负荷电流和系统振荡影响的特

征量来实现无通道选择性^[1]。

提升速动性：在关键节点（如变电站出口、重要用户入口）优先采用速断保护。同时，研究和应用基于暂态量的超高速保护原理，力求在几个毫秒内完成故障识别与隔离，这对于抑制故障发展、保护电力电子设备至关重要。

保障灵敏性：针对高阻接地故障检测难题，应大力推广注入信号法（如S注入法）、零序功率方向法、以及基于小波变换、Hilbert-Huang变换等先进信号处理技术的选线与定位方法。对于IIDG接入点，需专门校核其背后故障时，上游保护的灵敏度是否足够。

确保可靠性：采用“N-1”甚至“N-2”的冗余设计理念，对关键保护功能进行双重化或多重化配置。同时，加强保护装置的电磁兼容（EMC）设计和网络安全防护，防止外部干扰和恶意攻击导致保护失效。

2.2 贯彻“因地制宜、分级分区”的差异化配置思想

配电网覆盖面广，用户类型多样，不应采用“一刀切”的保护配置方案。应根据供电区域的重要性（如A+、A、B、C、D、E类供电区）、负荷性质（如医院、数据中心等一级负荷）、网络结构（架空线、电缆、混合网）以及DERs的接入情况，实施差异化的保护策略。（1）核心区（A+/A类）：以高可靠性为目标，全面部署基于高速通信的光纤纵差保护、自愈环网等，实现故障的“毫秒级”隔离与恢复。（2）一般城区（B/C类）：以经济性和可靠性平衡为目标，可采用智能分布式FA（馈线自动化）配合就地式保护，实现“分钟级”自愈^[2]。（3）乡村及偏远地区（D/E类）：以满足基本供电需求为目标，可继续采用经典的三段式过流保护配合重合闸，并辅以故障指示器等低成本手段进行故障定位。

2.3 融入“即插即用”与“自适应”的前瞻性理念

未来的继电保护装置应具备更强的灵活性和自适应能力。通过标准化的信息模型（如IEC 61850）和即插即用（Plug-and-Play）技术，新设备接入系统后能自动完成参数注册、定值下载和功能激活。同时，保护逻辑应根据实时采集的系统运行状态（如拓扑、DERs出力、负荷水平）自动在线调整定值或切换保护模式，实现真正的“自动驾驶”式保护。

3 当前继电保护运维中的痛点与瓶颈

3.1 信息孤岛与数据割裂

继电保护的全生命周期涉及多个部门和系统：规划设计部门使用CAD/GIS系统，整定计算部门使用专用软件，调度部门使用EMS/DMS系统，运维检修部门使用PMS（生产管理系统）和移动巡检APP。这些系统间缺

乏有效的数据贯通，导致保护装置的台账信息、定值单、图纸、缺陷记录、检验报告等关键数据分散各处，形成信息孤岛。当需要查询某台保护的历史信息或进行定值校核时，往往需要跨多个系统手动比对，效率低下且易出错。

3.2 “两张皮”现象：定值管理与现场脱节

保护定值是保护正确动作的灵魂。然而，定值单从计算、审核、下发到现场执行，再到归档，流程繁琐且容易脱节。现场人员可能因各种原因（如装置型号不符、接线错误）未能正确执行定值，或者在紧急抢修后未及时更新定值单。而整定计算部门往往无法实时获知现场的实际定值状态，导致后台计算所依据的“模型”与现场“实体”不一致，埋下巨大安全隐患。

3.3 运维模式被动滞后

当前的运维模式多以定期检修（Time-Based Maintenance, TBM）和事后抢修为主。TBM存在“过修”或“失修”的风险，无法针对设备的实际健康状态进行精准维护。而事后抢修则意味着故障已经发生，损失已然造成^[3]。缺乏对保护装置运行状态的在线监测和故障预警能力，使得运维工作始终处于被动应对的局面。

3.4 专业壁垒与协同不足

继电保护涉及一次、二次、通信、自动化等多个专业。在实际工作中，各专业团队往往各自为政，缺乏有效的协同机制。例如，一次设备的改造可能影响二次回路，但信息未能及时传递给继保专业；通信通道的检修可能导致纵联保护退出，但调度和运维部门可能未充分协调。这种协同不足极易引发人为责任事故。

4 构建全生命周期的继电保护运维协同机制

为解决上述痛点，必须打破部门墙和系统墙，构建一个覆盖继电保护“全周期”的运维协同机制。

4.1 协同机制的总体框架

该机制的核心是建立一个统一的、权威的继电保护数字资产中心。这个中心以单台保护装置（或保护功能）为最小单元，汇聚其从规划、设计、采购、安装、调试、投运、运行、检修到最终退役的所有静态和动态数据，形成完整的“数字履历”。（1）规划与设计阶段：将保护配置原则、选型要求等固化到设计标准和模板中，并通过系统自动校验设计方案的合规性。（2）建设与调试阶段：实现定值单的电子化流转与闭环管理。现场调试人员通过移动端接收定值单，执行后拍照上传回执，系统自动比对执行结果与下发定值，确保“所见即所得”。（3）运行与运维阶段：这是协同机制的核心。通过物联网（IoT）技术，实时采集保护装置的运行状态（如CPU

负载、内存、开入开出状态、通信状态)、自检告警信息、录波文件等。结合SCADA/EMS的电网运行数据,利用大数据分析和AI算法,对保护的健康状态进行评估,预测潜在故障,并自动生成精准的运维工单(Predictive Maintenance, PdM)。(4)退役阶段:记录设备的退役原因、处置方式,其历史数据作为知识沉淀,用于指导新设备的选型和配置。

4.2 关键协同流程

(1) 定值全链条协同:建立“计算-审核-批准-下发-执行-反馈-归档”的线上闭环流程。任何定值的变更都必须通过此流程,并自动触发相关联设备(如对侧保护、安稳装置)的联动校核。(2) 缺陷与隐患协同治理:当在线监测系统发现异常,或巡检人员上报缺陷时,系统能自动关联该设备的历史数据、同类设备的家族性缺陷信息、以及相关的电网运行风险,辅助生成最优的消缺方案,并自动通知相关专业协同处理^[4]。(3) 检修计划协同优化:将保护装置的状态评价结果、定检周期要求、以及一次设备的停电计划进行智能匹配,生成综合检修计划,最大化利用每一次停电窗口,减少重复停电。

4.3 技术赋能:数字孪生与人工智能

(1) 数字孪生(Digital Twin):为物理世界的每一套继电保护系统构建一个高保真的虚拟映射。这个孪生体不仅能实时反映物理实体的状态,还能进行“假设分析”(What-if Analysis)。例如,模拟某条线路发生故障时,整个保护系统的动作行为是否符合预期,从而在故障发生前就发现逻辑错误或定值配合问题。(2) 人工智能(AI):利用机器学习算法,对海量的历史故障录波数据、装置自检数据、电网运行数据进行深度挖掘,训练出能够智能诊断保护装置硬件故障、软件逻辑错误、定

值错误等问题的模型。AI还可以用于智能整定计算,根据不断变化的电网模型,自动推荐最优定值组合。

5 结语

供配电系统的深刻变革对继电保护提出了前所未有的挑战,也为其创新发展提供了广阔空间。本文认为,应对之道在于两个层面的深度融合:一是在技术层面,深化对“四性”原则的理解,拥抱差异化、自适应、智能化的配置新思想;二是在管理层面,彻底打破运维环节的壁垒,构建一个以数据为核心、以流程为纽带、以全生命周期为视角的运维协同新机制。未来的继电保护系统,将不再是孤立的、静态的硬件装置集合,而是一个深度融入电网数字化生态的、具备自我感知、自我诊断、自我决策、自我恢复能力的有机生命体。通过规划、建设、调度、运维等各环节的无缝协同,以及数字孪生、人工智能等前沿技术的赋能,我们有望构建起一个更加坚强、智能、可靠的供配电系统安全防线,为新型电力系统的高质量发展保驾护航。

参考文献

- [1] 尤冬蕊,郭琳.电力系统继电保护配置与可靠性提升[C]//《中国招标》期刊有限公司.新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛——绿色智造·采购革新专题.国网河北省电力有限公司南皮县供电分公司,2025:703-707.
- [2] 邓桥培.配电系统继电保护配置及其可靠性探讨[J].电力设备管理,2025,(20):14-16.
- [3] 邱闫.配电网系统中的继电保护配置优化分析[J].电子技术,2025,54(06):224-225.
- [4] 林柏桐.继电保护远程监测及智能运维研究方法[J].大众标准化,2025,(18):54-56.