

基于数字孪生的配电网继电保护协同优化策略

经竹青

南京国电南自自动化有限公司，江苏南京 211153

DOI:10.61369/WCEST.2025040012

摘要：针对高比例分布式能源接入导致配电网继电保护系统面临的响应滞后、误动率高及多主体协同难题，提出一种“管理—技术”双维度协同优化策略。管理上，构建了“组织架构优化—制度协同创新”体系，通过设立联合协调办公室与月度联席会议，明晰权责流程；技术上，设计了基于数字孪生的协同平台，实现配电网全要素高精度建模与多源异构数据融合，为构建敏捷可靠的新型电力系统保护体系提供了有效方案。

关键词：数字孪生；配电网；继电保护；协同优化；动态定值整定；智能决策支持

Collaborative Optimization Strategy of Relay Protection in Distribution Network Based on Digital Twin

Jing Zhuqing

Nanjing SAC Automation Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211153

Abstract : A "management technology" two-dimensional collaborative optimization strategy is proposed to solve the problems of delayed response, high misoperation rate and Multi-Agent Coordination faced by the distribution network relay protection system due to the high proportion of distributed energy access. In terms of management, the system of "organizational structure optimization system collaborative innovation" was constructed, and the rights and responsibilities process was clarified through the establishment of a joint coordination office and a monthly joint meeting; Technically, a collaborative platform based on digital twin is designed to realize the high-precision modeling of all elements of distribution network and the integration of multi-source heterogeneous data, which provides an effective scheme for building an agile and reliable new power system protection system.

Keywords : digital twins; distribution network; relay protection; collaborative optimization; dynamic setting; intelligent decision support

引言

国家能源局《关于加快推进新型电力系统发展的指导意见》明确指出，需构建智能高效的电网调度保护体系，以应对高比例可再生能源接入的挑战。传统继电保护系统依赖人工整定与固定阈值，难以适应电网动态变化，存在响应滞后、误动拒动风险高、调度—运维—检修等多部门协同效率低等问题。数字孪生技术通过构建物理电网与虚拟模型间的实时交互与映射，为实现保护系统的状态精准感知、故障智能决策与多业务协同提供了新范式^[1]。然而，当前研究多集中于设备级状态监测与诊断，在系统级协同优化架构、跨部门联动机制及“管理—技术”深度融合方面的研究尚显不足^[2]。本文立足于数字孪生技术，从组织管理与技术平台两个维度，系统构建配电网继电保护协同优化机制，以解决信息孤岛问题，提升协同效率，为增强继电保护系统对新型配电网的适应性提供理论支撑与实践路径^[3]。

一、配电网继电保护协同优化理论基础

(一) 数字孪生技术的基本框架与核心特征

数字孪生是以数字化方式创建物理实体的虚拟映射，并基于实时数据进行仿真分析与决策优化的技术框架。其在配电网继电保护中的应用核心在于三大特征：一是高保真实时性，依托同步

相量测量单元（Phasor Measurement Unit, PMU）、智能终端及高速通信网络，实现毫秒级数据同步与模型更新，精准反映电网运行状态；二是闭环交互性，通过“数据采集—模型仿真—策略优化—指令执行”的闭环反馈，驱动保护策略的动态调整与迭代优化；三是多维度融合性，整合电气量（电压、电流）、物理量（温度、振动）、环境量（气象、地理）及拓扑参数，构建多

作者简介：经竹青（1976.01-），男，汉族，江苏溧水人，本科，中级工程师，主要研究方向：电力系统继电保护和电力系统通信。

维度的配电网虚拟镜像，支撑故障场景复现与保护策略推演。该框架为应对分布式电源出力不确定性和拓扑多变性问题提供了动态决策基础。

(二) 继电保护协同理论架构

配电网继电保护协同的本质是实现保护装置、调度中心、运维部门及分布式电源管理系统之间的信息共享与动作协调，其理论架构涵盖三个层次：一是数据采集与通信层，依托 PMU、智能传感器与 5G/光纤网络，实现全网数据的精准感知与低延时传输；二是模型构建与仿真层，基于数字孪生技术建立包含分布式电源、负荷、网架及保护装置的精细模型，支持电磁暂态仿真与故障模拟；三是决策优化与协同层，采用自适应保护算法、广域协同策略与多智能体决策理论，生成与电网实时状态相匹配的保护定值与动作逻辑，并通过标准化接口与管理系统交互，实现调度-运维-保护的跨部门业务协同。该架构突破了传统保护模式的局限，为构建高效、自适应的协同保护机制奠定了理论基础。

二、配电网继电保护协同现状分析

(一) 现有协同模式及其效能瓶颈分析

当前配电网继电保护协同主要依赖于传统模式，面临多重效能瓶颈。在信息流转方面，调度、运维、检修部门间多依赖电话、邮件等传统方式传递故障信息与定值单，平均信息流转时间过长，严重迟滞故障响应；在定值管理方面，普遍采用离线人工计算与整定模式，调整周期长达数周，无法适应分布式电源接入导致的短路电流日甚至小时级波动，保护误动风险显著增加；在数据共享方面，保护装置、SCADA 系统、配电自动化系统及 GIS 平台数据格式异构、接口不一，形成严重的“信息孤岛”，阻碍多源数据融合与协同决策。上述瓶颈致使传统协同模式难以支撑新型电力系统对保护敏捷性的要求。

(二) 协同机制的核心问题剖析

从系统层面剖析，当前协同机制存在三大核心问题：一是管理协同壁垒，调度、运维、信通等部门权责边界模糊，缺乏高效的跨部门议事决策平台与标准化流程，故障处置中易出现指挥重叠或责任推诿；二是技术协同障碍，不同厂商保护设备的通信协议（如 IEC 61850、103、104 等）与数据接口差异大，协同算法兼容性不足，且现有平台缺乏对海量异构数据的融合处理与智能分析能力；三是策略协同僵化，传统定值整定策略依赖经验公式与固定阈值，未能与数字孪生仿真平台联动，无法根据电网实时运行状态（如 DG 出力、负荷水平、拓扑结构）进行动态调整，在故障场景下适应性差。这些问题构成了制约保护系统性能提升的关键矛盾。

三、数字孪生驱动的协同优化机制构建

(一) 组织架构与制度协同机制设计

为破解管理协同壁垒，构建了“结构-制度”双轮驱动的管理协同体系。在组织架构上，成立由调度、运维、信通及安监部

门组成的联合协同办公室，作为常设协调机构，负责保护策略的联合评审、数据权限分配与跨部门争议仲裁，从顶层消除权责交叉；同步建立月度联席会议制度，定期通报电网拓扑变更、保护动作分析报告与技术标准更新，促进信息互通。在制度协同上，设计了“数字孪生仿真-多部门联合评审-方案发布执行-效果后评估”的标准化决策流程，明确各环节责任主体与时限要求，压缩决策周期；强制推行基于 IEC 61850 的统一数据建模与共享标准，打破信息交互壁垒。该体系通过权责明晰与流程再造，为高效协同提供了制度保障。

(二) 技术协同平台集成与功能设计

为解决技术协同障碍，研发了以数字孪生为核心的一体化技术协同平台。该平台由三大核心模块构成：一是全要素数字孪生建模模块，集成 ETAP、PSCAD 等仿真引擎，建立涵盖分布式电源、线路、开关、保护装置的精细模型，支持拓扑动态识别与参数在线校核，提升模型精度；二是多源数据智能融合模块，基于边缘计算网关接入 PMU 量测数据、无人机巡检影像、气象环境数据及设备状态数据，采用聚类分析与时序关联算法进行数据清洗、特征提取与故障画像生成，消除数据孤岛；三是协同决策与动态调整模块，内嵌自适应保护算法与广域协同逻辑，能够根据数字孪生平台的仿真结果，实时计算并下发最优保护定值，支持故障区域的毫秒级精准隔离与自愈方案生成。该平台通过与管理体系的深度集成，实现了“数据-模型-决策-执行”的全链条技术协同。

四、协同优化机制实施路径与效果保障

(一) 分阶段实施与动态管控策略

为确保协同机制的平稳落地，制定了“试点验证-推广扩容-全面应用”的三阶段实施路径。试点阶段（3-6 个月）选取高渗透率分布式光伏的典型馈线进行部署，重点验证管理流程贯通性与平台技术指标；推广阶段（6-12 个月）扩大至整个配电分区，完善技术标准与制度细则，形成区域化协同能力；全面应用阶段推广至全网。在动态管控上，建立了“数字孪生预警-保护动作-运维处置”的在线闭环流程：平台利用仿真数据预判故障风险并生成预决策方案；保护装置动作后，动作信息实时回传至数字孪生模型进行效果校验与策略迭代；同步触发运维工单并推送至移动终端，缩短平均故障隔离时间。同时，建立平台性能健康度评估模型，当算法精度或数据同步延迟偏离阈值时，自动触发预警并启动检修流程。

(二) 标准化流程再造与绩效保障体系

聚焦协同效率提升，开展了系统性流程再造。一是定值管理流程线上化：将传统人工定值计算流程转变为“数字孪生仿真生成初始方案-联合办公室在线评审-自动下发至装置-平台采集动作数据评估效果”的线上闭环，杜绝人为干预，提升效率与准确性。二是故障处置流程标准化：基于平台虚拟定位功能，快速锁定故障区段，自动生成标准化处置指导书（含操作步骤、安全措施、预期后果），并推送至现场运维人员，处置结果通过 APP

回传归档，形成“仿真–执行–反馈”的知识积累闭环。在绩效保障方面，构建了以数据共享及时率（ $\geq 95\%$ ）、保护动作正确率（ $\geq 99\%$ ）、故障平均隔离时间（ $< 100\text{ms}$ ）为核心的可量化考核指标，并实施跨部门双向评价制度，评价结果与绩效奖金强制关联（权重 $\geq 30\%$ ），驱动各部门从被动协作转向主动协同。

五、总结

本文系统分析了新型电力系统下配电网继电保护在协同方面面临的挑战，构建了数字孪生驱动的“管理–技术”双维度协同

优化机制。该机制通过联合协同办公室与标准化流程破解了管理壁垒，通过数字孪生平台与智能算法实现了数据融合与动态决策，有效解决了职责模糊、数据孤岛与响应滞后问题，显著提升了保护正确率与故障处置效率，为适配新型电力系统提供了可行路径。未来研究可探索数字孪生与人工智能的深度融合，推动模型轻量化与复杂场景适配，增强极端天气下的鲁棒性，完善标准体系以提升工程适用性。此外，所提出的协同优化框架对于水电系统、大型泵站等水利电力交叉领域的保护与控制同样具有借鉴意义，可作为下一步的研究方向。

参考文献

- [1] 付慧敏, 郑刚. 基于数字孪生的配电网智能化故障诊断方法 [J]. 沈阳工业大学学报, 2025, 47(03):288–294.
- [2] 王庆杰, 尚磊, 陈双印, 等. 分布式光伏电站接入配电网继电保护整定优化 [J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(04):84–91.
- [3] 王榕泰, 吴细秀, 冷宇宽, 等. 数字孪生技术在新型电力系统中的发展综述 [J]. 电网技术, 2024, 48(09):3872–3889.