

面向高比例分布式电源的配电网自适应保护与 AI 决策机制研究

崔亚袖

(广东腾辉建设集团有限公司, 广东 茂名 525000)

摘要 针对高比例分布式电源接入导致的配电网保护适应性下降问题, 提出基于人工智能决策的自适应保护机制。通过 RTDS 实时数字仿真平台构建含 35 节点的动态模型, 结合某省电网 12 种典型 DG 接入场景的 PMU 实测数据, 开发深度残差网络故障判别算法。仿真结果表明: 在 60% 渗透率场景下, 新型保护系统将平均故障切除时间从 152 ms 降至 86 ms, 误动率由 8.7% 压缩至 0.9%, 通信丢包容忍阈值提升至 5%。现场实试验证了系统在 25 MW 光伏集群区的工程适用性, 故障定位误差均值降低 68.7%, 孤岛检测时间缩短 61.1%, 区外故障误动率控制在 0.4% 以内。统计检验显示 DG 渗透率对保护性能影响的 F 值从 37.2 降至 2.8, ROC 曲线 AUC 值提升至 0.93, 证实了所提方法在复杂运行工况下的鲁棒性与可靠性。

关键词 高比例分布式电源; 配电网; AI 决策

中图分类号: TM7; TP18

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.26.005

0 引言

随着分布式电源渗透率持续攀升, 传统配电网保护面临动作特性畸变、故障特征弱化等严峻挑战。现有三段式过流保护在高渗透率场景下存在误动率激增、切除延时恶化等问题, 其根本原因在于固定整定值难以适应 DG 出力随机性引发的电网阻抗多态特性。针对高比例分布式电源接入引发的保护适应性难题, 本研究提出融合动态阻抗辨识与深度强化学习的自适应保护体系, 通过构建多时间尺度阻抗特征库与 AI 决策树, 实现保护定值的动态整定与故障类型的在线辨识。

1 研究方法

1.1 实验设备与数据来源

实验依托 RTDS 实时数字仿真平台构建配电网动态模型, 采用中国电科院研发的 ADPSS v3.2 系统实现 10 μ s 级步长的高精度实时仿真, 平台配置 32 核 CPU 与 128GB 内存资源, 可同步处理 15 回线路的电磁暂态仿真需求。数据基础来源于某省电力公司提供的实测配电网运行数据集, 涵盖 2021-2023 年间 12 种典型分布式电源接入场景的 PMU 录波文件, 包括光伏、风电及储能系统的并网数据, 采样频率达到 1 kHz。该数据集覆盖 50 个配电节点, DG 总容量区间为 50 kW ~ 5 MW, 渗透率跨度 15% ~ 65%, 包含单相接地、相间短路等 6 类故障波形记录, 原始数据规模超过 100 TB。为验证保护策略适应性, 特别选取了 DG 接入位置、容量配比

差异超过 30% 的 3 组差异化场景作为基准测试集^[1]。

1.2 实验设计

为系统评估高比例分布式电源接入对配电网保护性能的影响, 实验构建了基于实际工程参数的新型 35 节点配电网仿真模型。该模型采用双电源环网结构, 馈线总长覆盖典型城市电缆—架空线混合线路特征, 节点负荷配置参照商业区、工业区与居民区的典型日曲线分布。分布式电源渗透率测试梯度从 30% 基础值起始, 按 10% 步长递增至 80% 渗透阈值, 完整覆盖现行标准规定的极限运行场景。故障模拟方案设计兼顾对称性与非对称性故障特征, 除常规三相金属性短路外, 特别设置含电弧模型的两相短路、高阻接地等复杂故障类型, 故障点布设于馈线首端开关柜、中段电缆接头及末端配电变压器等关键位置, 过渡电阻参数设置考虑潮湿土壤环境与设备老化因素, 模拟 0 ~ 40 Ω 接地阻抗变化对故障特征的影响^[2]。

通信环境仿真系统搭建光纤与无线异构网络, 主干通道采用 GPON 无源光网络架构, 分支节点部署 LoRa 无线传感单元, 同步模拟强电磁干扰场景下的信道衰减特性。延时干扰模型引入符合 IEEE 1646 标准的网络抖动参数, 通过时间戳错位技术重构 0 ms、20 ms、50 ms 三档典型通信延迟场景, 精确复现 5G 基站切换、光缆熔接故障等现实工况下的数据包传输异常。

对比测试体系采用经典三段式过流保护作为基准参照, 其 I 段速断保护动作时限设置为 0.1 s, 对应线路

全长80%的保护区段；II段定时限过流保护延时0.5 s，作为主保护的后备；III段过负荷保护延时1.2 s，定值整定依据最大负荷电流的1.3倍系数，严格遵循DL/T 584标准要求。本文提出的AI保护系统部署深度残差网络架构，输入层设计为三相电压、电流及零序分量的200 ms时间窗数据，采样率设定为10 kHz以满足高频暂态特征捕捉需求，网络深度优化为18层残差模块，通过跳跃连接结构缓解梯度消失问题^[3]。

实验数据生成系统集成蒙特卡洛随机抽样算法，在3 200组有效样本中构建涵盖不同天气条件、负荷波动模式与设备老化程度的多维测试案例。训练集与测试集按4:1比例划分，采用滑动窗口机制确保时序数据的连续性。在线学习模块设计轻量化增量更新策略，模型参数优化周期严格控制在10个工频周期内完成，通过FPGA硬件加速实现微秒级特征提取与决策推理，满足继电保护动作速动性要求。故障注入系统配备可编程逻辑控制器，支持毫秒级精准触发各类预设故障场景，同步采集保护装置的动作报文与录波文件，构建完整的性能评估数据库。

1.3 测量方法

故障切除时间测量采用多源同步时钟系统，通过GPS/北斗双模授时模块实现故障录波器、保护装置与RTDS仿真时钟的 μs 级时间对齐。故障起始时刻由RTDS数字仿真平台触发脉冲标记，保护出口继电器动作信号经光电隔离模块接入16通道时间标记仪，时间分辨率达到0.1 ms。针对不同故障类型设置差异化的数据窗截取规则，对称故障取故障后5~100 ms观测窗，非对称故障扩展至前20 ms至后150 ms的宽时间窗，确保暂态特征完整捕获^[4]。

误动率统计基于3 200组全场景测试样本，建立四维评估矩阵，涵盖DG渗透率、故障位置、通信延时和负荷波动参数组合。误动作事件定义为保护装置在区外故障时误动或在区内故障时延迟超过整定值20%的情况。数据采集系统配置冗余校验机制，每个测试案例均通过三套独立测量装置交叉验证，消除偶发性误差对统计结果的影响。测试过程同步记录电压电流谐波畸变率、零序分量突变幅值等12项辅助判据，为误动原因追溯提供多维数据支撑^[5]。

2 研究结果

2.1 仿真实验结果

为验证所提AI保护系统的适应性，基于PSCAD/EMTDC搭建含多类型分布式电源（光伏、风电、储能）的IEEE 33节点配电网模型，设置渗透率30%~80%的梯度测试场景。仿真结果表明，在分布式电源渗透

率达60%的典型工况下，传统三段式过流保护平均故障切除时间为 $152\pm 23\text{ ms}$ ，最大延时达175 ms，且动作时间标准差高达23 ms，暴露出整定值静态化导致的响应离散性缺陷。相比之下，本文AI保护系统通过实时阻抗特征提取与Q-learning动态决策机制，将平均切除时间压缩至 $86\pm 11\text{ ms}$ ，动作时间波动范围缩小62%，满足继电保护快速性要求。

误动率统计揭示更深层优势：传统保护在DG出力随机波动场景下误动概率达8.7%，尤其在光伏出力骤降引发的伪故障场景中，误动频次占比超过60%；而本文方法借助LSTM时序特征预测模块，结合故障电流谐波分量动态权重分配策略，将误动率抑制在0.9%以下。两类策略性能差异经SPSS双样本t检验验证，其显著性水平P值均小于0.01，证明AI保护系统的性能提升具有统计学意义。不同保护策略性能对比如表1所示。

表1 不同保护策略性能对比

性能指标	传统保护	本文方法	显著性检验
平均 t_c (ms)	152 ± 23	86 ± 11	$P < 0.001$
误动率 P_e (%)	8.7	0.9	$P < 0.01$
通信丢包容忍阈值	失效(>2%)	正常($\leq 5\%$)	—

在DG渗透率影响测试中，传统保护正确率随渗透率上升呈非线性衰减，当渗透率超过50%时正确率曲线进入陡降阶段（渗透率80%时正确率跌至73.2%），其本质源于固定反时限特性与电网阻抗多态分布失配。本文方法创新引入自适应阻抗匹配因子，通过动态调整保护动作方程中的权重系数，在30%~80%渗透率区间将正确率稳定维持在97.1%~98.5%，波动幅度小于1.4%。通信可靠性测试进一步显示，传统保护在信道丢包率超过2%时因数据完整性破坏导致逻辑闭锁，而本文系统集成滑动窗口预测补偿算法，利用历史数据流构建状态转移矩阵，在5%丢包率下仍保持96.3%的动作准确率，验证了容错机制的工程实用性。

2.2 现场实测结果

在某省25MW光伏集群示范区开展的工程验证中，本文方法展现出显著的技术优势。针对分布式电源高渗透导致的故障定位难题，系统通过融合动态阻抗匹配与改进型行波定位算法，将单相接地故障定位误差均值从传统方案的 $320\pm 45\text{ m}$ 压缩至 $112\pm 28\text{ m}$ ，最大定位偏差稳定在150 m阈值内，如表2所示。在光伏阵列边缘区域，通过部署高频信号注入装置与自适应滤波模块，成功消除逆变器谐波对行波波头的干扰，使复杂地形下的定位精度标准差降低38%。

表 2 光伏集群区改造前后性能对比

评估指标	原保护系统	本文方法	测试案例数
故障定位误差 (m)	320±45	112±28	47
孤岛检测时间(ms)	302±52	118±19	32
区外故障误动率(%)	5.6	0.4	128
电压暂降抑制率(%)	68.3	91.5	19

孤岛检测性能实现突破性提升,新型保护装置集成暂态特征快速提取机制,在并网点电压跌落至 0.85 p.u. 时,平均检测时间缩短至 118±19 ms,较原微机保护的 302±52 ms 提升 61.1%。在实测中,某次光伏出力骤降引发的孤岛事件检测响应时间达到 96 ms,突破传统保护物理极限。电压自适应测试进一步验证系统鲁棒性:当光伏集群出力瞬变引发 0.7 p.u. 深度电压暂降时,动态调整模块基于实时电网强度系数重构动作阈值曲线,故障判别准确率提升至 98.7%,误判案例均由电磁暂态过程的高频振荡分量引发。

通信可靠性测试揭示系统容灾能力:模拟光纤通道 300 ms 中断场景下,本地缓存池通过滑动窗口机制保存前 200 ms 的特征量数据流,结合 LSTM 预测模型补充缺失时序信息,维持 92.3% 的动作可靠性,较传统方案依赖实时通信的 49.7% 提升显著。区外故障误动率统计显示,在 128 次穿越性故障测试中,系统通过多源信息融合决策将误动率从 5.6% 压制至 0.4%,有效避免保护越级跳闸。在电压暂降抑制测试中,基于动态无功支撑策略将电压恢复至 0.9 p.u. 的时间从传统方案的 620 ms 缩短至 210 ms,暂降抑制率提升至 91.5%。

2.3 统计检验

为量化评估不同保护策略的适应性差异,采用多元统计分析方法对仿真与实测数据进行系统验证。单因素方差分析揭示,分布式电源渗透率对传统保护故障切除时间具有显著主效应($F(5, 3194)=37.2, P<0.001$),证明 DG 接入比例上升会引发保护性能的实质性退化。Tukey HSD 事后检验进一步量化差异程度:当渗透率超过 50% 时,传统保护组间切除时间均值差异达 68 ms (95%CI[53, 83] ms),而本文方法在各渗透率梯度组间差异最大仅为 12 ms,其 ANOVA 检验 F 值降至 2.8 ($P>0.05$),表明所提算法有效抑制了 DG 渗透率变化对保护性能的干扰,如表 3 所示。

在故障识别效能评估中,接收者操作特征曲线分析显示,本文方法在正负样本不平衡场景下取得 0.93 的 AUC 值,较传统方法 0.71 提升 30.9%。最优决策阈值对应灵敏度 96.2%、特异度 91.5%,显著优于传统策略的 82.4% 与 67.3%。Kappa 一致性系数达到 0.88 (传统方法 0.54),证明 AI 决策模型与真实故障状态的匹

配度达到几乎完全一致等级(Landis-Koch 标准)。多重共线性诊断表明,特征向量集的方差膨胀因子最大值为 2.7,平均 VIF 为 1.9,远低于经验阈值 5.0,验证了模型输入变量的独立性。协方差分析结果显示,本文方法在调整 DG 出力波动、通信延迟等混杂因素后,模型解释力(调整 R^2)达 0.89,较传统策略提升 43.5%,证实了动态特征提取机制对复杂工况的表征能力。

表 3 关键统计检验指标对比

检验类型	传统保护结果	本文方法结果	显著性水平
ANOVA F 值	37.2	2.8	$P<0.001$
ROC 曲线 AUC 值	0.71	0.93	$P<0.005$
协方差调整 R^2	0.62	0.89	—

3 结束语

本研究成功构建了面向高比例分布式电源的智能保护体系,通过 AI 算法与电力系统暂态特征的深度耦合,实现了保护逻辑从“预设阈值”到“动态决策”的范式转变。实验证明,深度残差网络可有效提取 DG 并网场景下的故障暂态指纹,动态权重调整机制使保护系统在 30%~80% 渗透率区间保持稳定性能。现场应用验证了系统在复杂通信条件下的工程可行性,其 5% 丢包容忍阈值与 300 ms 通道中断耐受能力显著优于传统方案。未来研究将聚焦多类型能源协同控制场景下的保护协同优化,探索联邦学习框架下的分布式决策模型,并推进保护装置的嵌入式轻量化设计,以适应更大规模新能源接入的电网发展需求。

参考文献:

- [1] 李响,周成瀚,邹贵彬,等.基于时域波形的有源配电网自适应电流差动保护[J/OL].电力系统自动化,1-14[2025-05-16].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.tp.20250418.1553.009.html>.
- [2] 张旭,薛士敏,李玥轩,等.计及高渗透率分布式光伏接入的配电网自适应距离保护原理[J/OL].中国电机工程学报,1-13[2025-05-16].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20250402.1406.004.html>.
- [3] 王路遥,龚钢军,陆俊,等.配电网量测数据动态联邦学习框架、自适应隐私保护模型和边缘侧贡献度评估[J/OL].中国电机工程学报,1-17[2025-05-16].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20250305.0952.002.html>.
- [4] 陈水耀,徐峰,潘武略,等.适应高比例光伏接入的有源配电网自适应电流差动保护[J].浙江电力,2025,44(01):34-43.
- [5] 程海军,亓雅婷,李玲.含分布式电源的配电网差动保护研究[J].沈阳工程学院学报(自然科学版),2025,21(01):35-41.