深度学习下配电网故障识别与自适应保护研究

王浩哲¹ 王英军²

1 国网河北省电力有限公司雄安新区供电公司 2 国网河北省电力有限公司邢台供电分公司

DOI:10.12238/hwr.v9i7.6465

[摘要] 随着配电网规模不断扩大及智能化程度提升,传统故障识别与保护方法已难以满足现代配电网运行需求。并且新型负荷及分布式电源的大量接入,使配电网故障特征更加复杂,保护需求更加多样化,而深度学习技术在故障特征提取与模式识别方面具有显著优势,将其应用于配电网故障识别与保护领域具有重要意义。基于此,本研究采用深度神经网络构建故障识别模型,利用强化学习算法实现保护策略自适应优化,而且基于标准系统与实际工程验证表明,该方法显著提升了故障识别准确率与保护可靠性,为配电网智能化发展提供了有效技术支撑。

[关键词] 深度学习; 配电网; 故障识别; 自适应保护; 强化学习

中图分类号: TN819.1 **文献标识码:** A

Research on Fault Identification and Adaptive Protection of Distribution Networks under Deep Learning

Haozhe Wang¹ Yingjun Wang²

1 State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. Xiong'an New Area Power Supply Company

2 State Grid Hebei Electric Power Co., LTD. Xingtai Power Supply Branch

[Abstract] With the continuous expansion of the distribution network scale and the improvement of its intelligence level, traditional fault identification and protection methods have become difficult to meet the operational requirements of modern distribution networks. The extensive access of new loads and distributed power sources has made the fault characteristics of distribution networks more complex and the protection demands more diverse. Deep learning technology has significant advantages in fault feature extraction and pattern recognition. It is of great significance to apply it to the field of fault identification and protection in distribution networks. The research adopts deep neural networks to construct a fault identification model and utilizes reinforcement learning algorithms to achieve adaptive optimization of protection strategies. Verification based on standard systems and actual engineering shows that this method significantly improves the accuracy of fault identification and the reliability of protection, providing effective technical support for the intelligent development of distribution networks.

[Key words] Deep learning Distribution network Fault identification Adaptive protection Reinforcement learning

配电网作为电力系统重要组成部分,其安全稳定运行直接关系到用户供电可靠性,近年来,分布式能源与电动汽车等新型负荷大量接入,使配电网故障特征与保护需求呈现出多样性与动态性,传统固定整定值的保护方式与简单阈值判断的故障识别方法,已无法适应现代配电网动态特性。深度学习技术凭借其强大的特征提取与自适应决策能力,为构建智能化故障识别与自适应保护体系提供了新思路,将人工智能技术与传统保护理论相结合,对提升配电网运行可靠性具有重要意义。

1 深度学习故障识别原理

1.1 配电网故障特征分析。配电网故障特征具有多维性与动态性及复杂性等方面特点^[1],电压与电流及功率等基础电气量在故障发生时会出现显著变化,这些变化构成了故障诊断的基本特征内容,从时域特征角度来讲,故障瞬间会出现电压骤降与电流突变等暂态过程情况,频域特征则体现为基波分量变化与谐波成分畸变现象。分布式电源接入让配电网故障特征变得更加复杂,双向潮流致使传统故障特征发生改变,功率波动与电压波动的相关性有所增强,新型负荷接入引发的系统阻抗变化,使故障电流幅值与相角特性呈现出新的规律特点,智能配电设备

产生的海量运行数据蕴含着丰富故障特征信息,通过提取电气量的时频特征与相位特征与小波特征等多维特征,能为故障识别提供充分的数据基础支撑。

1.2 深度神经网络架构设计。深度神经网络架构运用多层次特征提取与融合策略,输入层接收配电网各测量点采集的电压与电流等原始数据后通过多层卷积神经网络进行特征提取,卷积层采用不同尺度卷积核提取故障数据中局部特征与全局特征,池化层通过最大池化降低数据维度并保留显著特征,循环神经网络层采用长短时记忆单元(LSTM)处理时序特征以捕捉故障发生过程中动态变化规律,特征融合层将卷积特征与循环特征进行深度融合构建故障特征统一表征。全连接层对融合特征进行降维映射,输出层采用Softmax函数实现故障类型概率预测,网络中设置残差连接结构缓解深层网络梯度消失问题提升模型收敛性能,注意力机制引入使模型能自适应关注关键特征,提高特征提取有效性。

1.3 识别算法性能优化。识别算法性能优化从模型结构与训练策略两个维度展开^[2],故障识别准确率计算如下:

$$A = \frac{N_t}{N_c} \times 100\% \quad (1)$$

其中 A 代表识别准确率, N_c 是正确识别样本数, N_t 为总样本数。学习率采用自适应调整策略,训练初期保持较大学习率来加速收敛,后期降低学习率以实现精细优化,比标准化技术的应用加速了深层网络训练过程,提高了模型的收敛速度,Dropout层的随机失活机制增强了模型的鲁棒性,防止网络对某些特征过度依赖,权重初始化采用改进的He初始化方法,让网络在训练初期具备更好收敛特性,多任务学习框架的引入实现故障类型识别与故障区域定位协同优化,提升了算法的综合性能。

2 配电网自适应保护机制

2.1 强化学习保护模型。强化学习保护模型借助智能体及环境交互来构建最优保护决策机制,模型采用深度网络结构把配电网运行状态映射成高维状态空间,保护动作决策构成动作空间,状态空间包含电压电流功率等基础电气量,以及其变化率、系统拓扑信息与负荷特性等多维特征,动作空间包含保护装置动作时限与保护范围及整定值等控制参数,保护动作时间计算如下:

$$T = T_0 + k I_f \quad (2)$$

其中: T 为保护动作时间(s), T_0 为最小动作时间(s), k 为时间系数, I_f 为故障电流有效值(A)。强化学习保护模型的奖励函数设计考虑保护可靠性与选择性及灵敏性等多个评价指标,引导智能体学习最优保护策略。经验回放机制的引入提升了训练样本利用效率,目标网络的设置稳定了训练过程,优先经验回放机制加快了关键经验的学习速度,模型通过持续学习及策略优化,逐步形成对配电网保护特性的深度理解,实现了保护策略的智能决策。

2.2 整定值动态调整方法。整定值动态调整方法基于配电网

实时运行特性,构建自适应保护整定体系^[3]。传统固定整定值在分布式电源接入与负荷动态变化等场景下难以保证保护性能,动态调整方法采用分层递进式结构,将整定值调整分为快速响应层及深度优化层,快速响应层利用测量数据直接计算临时整定值,保证保护能够对系统变化做出快速响应,深度优化层基于历史数据及离线仿真,综合考虑系统阻抗特性与故障电流分布及保护相互配合等因素,计算最优整定值。整定值调整过程中引入模糊决策机制,建立整定值与系统运行状态的映射关系,实现整定值的平滑调整,方法设置了安全约束条件,确保调整后的整定值满足保护性能要求,通过引入自适应数据窗口机制,提高了整定值计算的准确性及实时性。

2.3 保护策略协调控制。保护策略协调控制采用分布式协同决策机制,实现配电网多层次保护的统一协调^[4]。协调控制架构分为设备层、区域层及系统层三个层级,设备层完成单个保护装置的基本控制功能,包括故障检测与动作判据计算及执行机构控制,区域层负责馈线单元内保护装置的协调配合,通过建立通信网络实现信息共享及决策同步,系统层则从全局角度统筹各区域保护策略,确保系统整体保护性能。协调控制过程中采用分层递进式决策机制,低层级保护装置具备一定自主决策能力,高层级则承担策略优化及协调任务,方法通过引入自适应时间窗口机制,解决了不同层级保护配合的时序问题,基于图结构的拓扑分析方法保证了策略协调的系统性,动态权重分配机制提升了协调控制的灵活性,协调控制策略的分布式特性增强了系统的可靠性,避免了单点故障导致的系统性风险。

3 智能保护系统实现

3.1 系统总体架构设计。智能保护系统采用分布式多层架构设计,构建完整的智能保护技术体系,系统硬件层配置高性能计算单元、通信单元与执行单元,为智能算法提供运行平台,计算单元采用嵌入式处理器,具备并行计算能力,满足深度学习算法的实时性要求。系统实时性指标计算如下:

$$T_t = T_c + T_n + T_e \quad (3)$$

式中: T_t 为系统总响应时间, T_c 为计算处理时间, T_n 为网络传输时间, T_e 为执行动作时间,通信单元支持IEC61850与Modbus等多种通信协议,实现设备间的信息交互与数据共享,执行单元包括断路器操作机构与信号采集装置等,完成保护指令的执行与状态监测。系统软件层采用模块化设计思路,包括数据采集模块与特征提取模块,故障识别模块与保护决策模块及执行控制模块,各功能模块间通过标准化接口实现数据交互,确保系统运行的可靠性与实时性。系统设置有完备的网络安全防护机制,采用身份认证、数据加密及访问控制等多重措施,保障系统运行安全,智能保护系统设计过程中充分考虑了可扩展性需求,预留了丰富的硬件接口与软件接口,便于系统功能的持续升级与优化。

3.2 核心功能模块开发。核心功能模块开发采用标准化与组件化的设计理念,构建灵活可配置的功能单元,数据采集模块支持多种采样频率配置,实现对电压与电流等电气量的高精度采

样,采用数字滤波算法消除干扰信号,特征提取模块集成多种特征提取算法,包括时域分析、频域分析及小波分析等方法,提取故障特征信号。故障识别模块集成深度学习模型,完成故障类型与故障区域的智能识别,保护决策模块基于强化学习算法,实现保护策略的自适应优化,执行控制模块负责保护指令的执行管理,具备指令校验与执行反馈等功能,模块间通过消息队列机制进行数据传输,采用发布订阅模式实现模块解耦。系统集成在线学习功能,支持模型的持续优化,模块开发过程采用统一的软件架构标准,确保代码质量与运行效率,系统具备完善的异常处理机制,能够及时发现并处理运行异常,保障功能模块稳定运行。

3.3运行机制与流程。运行机制与流程设计遵循实时性、可靠性与安全性原则,构建完整的系统运行体系^[5],系统启动阶段进行硬件自检与软件初始化,加载深度学习模型与保护参数,建立通信连接,正常运行阶段,数据采集模块按照预设频率采集系统运行数据,经过数据预处理后传入特征提取模块,特征提取模块对数据进行实时分析,提取故障特征向量。故障识别模块基于提取的特征进行故障判断,输出故障类型与位置信息,保护决策模块根据故障信息与系统状态,计算最优保护策略,执行控制模块接收保护决策指令,完成断路器分合闸等控制操作,系统运行过程中持续进行状态监测,实时记录运行日志,支持运行状态可视化展示,异常处理机制在检测到系统异常时,启动应急处理流程,确保系统安全运行,系统具备自诊断能力,定期进行功能测试与性能评估,保障运行可靠性。

4 智能保护系统实现

4.1仿真系统验证。仿真系统验证基于IEEE 33节点标准配电系统与国内某市实际配电网进行深入分析,标准测试系统包含33个配电节点,设置12个分布式电源接入点,负荷总容量为3.715MW,仿真场景涵盖单相接地故障、两相短路故障及三相短路故障等多种故障类型,故障点覆盖主干线路与分支线路不同位置,深度学习模型在标准系统中表现出优异的故障识别性能,对各类故障的平均识别准确率达到98.5%,故障定位偏差控制在±50米范围内,自适应保护策略在分布式电源波动与负荷突变等复杂工况下保持良好的适应性,相比传统固定整定值方案,保护可靠性提升52%,选择性提升45%。实际配电网验证工况设置更加复杂,包括潮流倒灌,谐波干扰,分布式电源脱网等多种运行状态,智能保护系统在复杂环境下依然保持稳定可靠运行,故障识别准确率维持在95%以上,保护动作时间较传统方案缩短43%,有效避免了误动与拒动等异常情况,系统对配电网拓扑变化具有较强适应能力,在馈线重构场景下能够快速调整保护策略。

4.2工程运行结果。工程运行结果通过长期数据统计与分析,全面评估智能保护系统的实际应用效果,表1展示了系统关键性能指标数据,在故障识别方面,系统对单相接地故障与相间短路故障的识别准确率分别达到97.8%及96.5%,平均故障定位时间缩短至15ms,自适应保护策略在分布式电源接入工况下表现突出,保护整定值自适应调整准确率达到98.2%,有效解决了传统

保护方案在新能源接入场景下的适应性问题。系统运行可靠性指标显著提升,保护装置年均误动率降低至0.02次/年,拒动率降低至0.01次/年,检修维护工作量减少40%,工程实践证明,该系统在配电网故障识别与自适应保护领域具有显著优势,为配电网智能化升级提供了可靠技术支撑,系统运行过程中积累的海量数据为深度学习模型的持续优化提供基础,通过在线学习机制不断提升系统性能。

表1 智能保护系统与传统保护方案性能对比

性能指标	传统保护方案	智能保护系统	提升幅度
单相接地故障识别率	72.5%	97.8%	25.3%
相间短路故障识别率	75.2%	96.5%	21.3%
平均故障定位时间	35ms	15ms	57.1%
保护整定值准确率	65.8%	98.2%	32.4%
装置年均误动率	0.15次/年	0.02次/年	86.7%
装置年均拒动率	0.08次/年	0.01次/年	87.5%
维护工作量(人时/月)	180	108	40.0%
供电可靠性	99.90%	99.99%	0.09%

5 结语

深度学习技术在配电网故障识别与自适应保护领域展现出显著优势,构建的智能保护系统实现了故障特征的深度提取与保护策略的动态优化,系统在实际运行中表现出优异的适应性与可靠性,有效解决了传统保护方案在新型配电网中面临的技术难题,研究成果为配电网保护技术的发展提供了新思路,建立了智能化保护的新范式。该技术的工程应用证明了人工智能在电力系统保护领域的实用价值,为配电网向更高智能化水平发展奠定了基础,未来研究将着重优化算法实时性,推动配电网保护技术持续创新。

[参考文献]

- [1]郭泽霖.人工智能技术在配电网故障识别中的应用探析[J].软件,2025,46(02):156-158.
- [2]吴春旭.基于深度学习的继电保护自适应优化算法研究[J].电气开关,2025,63(01):32-34+39.
- [3]孙崇棋.基于深度学习的配电网高阻故障识别[D].哈尔滨工程大学,2024.
- [4]张可欣.基于深度学习的直流输电线路保护研究[D].北京交通大学,2022.
- [5]杨晓雨.基于深度学习的配电网故障辨识[D].华北电力大学(北京),2022.

作者简介:

王浩哲(1997--),男,汉族,河北邢台人,硕士研究生,助理工程师。主要研究方向为电力系统及其自动化。

王英军(1975--),男,汉族,河北元氏人,大学本科,高级工程师。主要研究方向为输配电线路运检工程。