

基于边缘计算的配电网二次系统轻量化保护算法

李旻林

中电(福建)电力开发有限公司 福建 南平 353000

摘要: 针对配电网二次系统对实时性与边缘节点算力的要求,提出基于边缘计算的轻量化保护算法。通过模型压缩与参数共享构建轻量化模型,结合边缘节点数据预处理、快速故障检测定位及自适应保护决策机制,实现故障毫秒级响应。采用参数自适应调整、节点协同协作及数据传输优化策略提升性能,经迭代更新增强算法适应性,为配电网安全稳定运行提供高效保护方案,降低带宽压力与响应延迟。

关键词: 边缘计算;配电网二次系统;轻量化;保护算法

引言

随着分布式电源与智能设备接入,配电网二次系统面临数据量激增与实时性保护挑战。传统集中式处理模式存在响应延迟与带宽瓶颈,边缘计算为本地化实时处理提供可能。本文设计轻量化保护算法,构建分层模型适配边缘节点算力,优化数据采集预处理流程,结合故障特征实现快速检测定位,通过动态决策机制执行保护动作,并提出性能优化策略,提升配电网故障处理效率与系统稳定性。

1 边缘计算与配电网二次系统概述

1.1 边缘计算

边缘计算通过将数据处理节点部署于物理设备或数据源头附近,实现计算能力向网络边缘的迁移,这种架构能够显著缩短数据传输路径,降低端到端延迟,为实时性要求严苛的场景提供支撑。其核心在于打破传统云计算集中式处理的局限,在靠近终端设备的边缘节点完成数据的过滤、分析与决策,减少不必要的中心云端交互,既提升了响应速度,也降低了主干网络的带宽压力。边缘节点具备分布式协同能力,可根据负载动态调整计算资源分配,在局部形成小型算力集群,应对设备密集区域的并发数据处理需求,同时通过本地化存储与计算增强系统的抗干扰能力,即便在网络波动或中断时仍能维持基础功能的稳定运行。随着物联网设备的普及,边缘计算与边缘智能的融合进一步拓展了应用边界,通过嵌入轻量化算法模型,使边缘节点具备自主感知与自适应调节能力,为复杂工业场景中的实时控制提供更精准的算力支撑。

1.2 配电网二次系统

配电网二次系统作为保障配电网安全稳定运行的核心环节,承担着数据采集、状态监测、控制执行与故障处理等关键功能,其通过各类传感器、智能终端与通

信网络构建起覆盖全网的感知与调控体系。该系统通过实时采集配电设备的电压、电流、开关状态等运行参数,经过数据融合与分析生成电网运行状态评估结果,为调度决策提供依据,同时具备快速响应能力,可在故障发生时触发保护机制,隔离故障区域并恢复非故障部分的供电。随着配电网中分布式电源、储能设备与电动汽车充电桩的大量接入,二次系统正从传统的单一监测向多元协同调控演进,通过构建数字化孪生模型,实现对分布式能源波动性的精准预测与动态平衡,提升配电网的接纳能力。边缘计算技术的融入为二次系统赋予了更强的本地化处理能力,使终端设备在毫秒级时间内完成故障识别与自愈控制,减少对主站系统的依赖,形成分层协同的智能调控架构。

2 基于边缘计算的配电网二次系统轻量化保护算法设计

2.1 算法轻量化模型构建

在构建算法轻量化模型时,充分考虑配电网运行的复杂特性与边缘节点有限的算力资源。采用模型压缩技术,对传统保护算法模型进行精简,去除冗余结构与参数。例如,运用剪枝算法对神经网络模型的连接权重进行筛选,剪掉那些对模型性能影响较小的连接,从而降低模型的复杂度,减少计算量。引入参数共享机制,在不损失关键信息的前提下,使模型参数数量大幅减少,提升模型在边缘节点的运行效率。针对配电网故障特征的多样性,设计一种分层级的轻量化模型架构。底层模型专注于对原始数据进行初步特征提取,将复杂的电气量数据转化为简洁且具有代表性的特征向量;高层模型基于底层提取的特征进行综合分析决策。这种分层结构使得模型既能有效捕捉故障信息,又能在不同层次灵活分配计算资源,避免一次性处理大量数据导致的计算过载,确保模型在边缘节点能够快速、稳定地运行,为

后续的保护动作提供坚实的算法基础^[1]。

2.2 边缘节点数据采集与预处理

边缘节点的数据采集需兼顾全面性与实时性。在硬件选型上,采用高精度、宽量程的传感器,确保能够精准采集配电网中各类设备的电气参数,如电压、电流、功率等,同时涵盖设备的运行状态信息,如开关位置、设备温度等。通过高速数据采集接口,以毫秒级的频率获取这些数据,为实时分析提供充足的数据样本。采集到的数据往往存在噪声干扰与数据缺失等问题,因此预处理环节至关重要。利用数字滤波技术,如卡尔曼滤波算法,对采集到的电气量数据进行去噪处理,有效滤除因电磁干扰等因素产生的噪声信号,还原数据的真实特征。针对数据缺失情况,采用基于历史数据与实时相关性分析的插值算法,根据设备运行的历史规律以及同类型设备的实时数据,对缺失值进行合理填补。在此基础上,对数据进行归一化处理,将不同量级、不同范围的数据统一映射到特定区间,便于后续算法的高效处理,提升数据的可用性与分析精度,为故障检测与定位提供可靠的数据支持。

2.3 故障快速检测与定位

在故障快速检测方面,基于边缘节点预处理后的数据,运用多种先进算法进行联合分析。构建故障特征提取模型,通过对正常运行与故障状态下电气量数据的对比分析,挖掘出能够准确表征故障的特征量,如电流突变率、电压相位差等。采用动态时间规整算法,实时将采集到的数据与预先建立的故障特征模板进行匹配,一旦发现数据特征与故障模板高度契合,即刻判定故障发生。故障定位则借助配电网的拓扑结构信息与故障时电气量的分布特性。利用基于图论的方法,将配电网抽象为节点与边组成的拓扑图,根据故障发生时各节点电气量的变化情况,通过潮流计算与故障分量分析,确定故障所在的支路或区域。例如,当某条线路发生短路故障时,故障点上游节点的电流会显著增大,电压会降低,通过分析这些电气量在拓扑图中的传播路径与变化规律,能够快速、准确地定位故障点,为后续的保护动作决策提供精确依据,极大地缩短故障处理时间,降低故障对配电网运行的影响。

2.4 保护动作决策与执行

保护动作决策需综合考虑故障类型、故障位置以及配电网的实时运行状态。基于故障快速检测与定位的结果,依据预先设定的保护逻辑规则库,确定相应的保护动作策略。例如,对于瞬时性故障,优先采取重合闸操作,尝试恢复供电;对于永久性故障,则迅速隔离故障

区域,避免故障扩大。在决策过程中,引入自适应机制,根据配电网中分布式电源的接入情况、负荷的实时变化等因素,动态调整保护动作的阈值与时间,确保保护动作既准确可靠又能适应配电网的复杂运行工况。在保护动作执行阶段,边缘节点通过高速通信接口,将决策结果快速传输至相应的执行设备,如断路器、重合闸装置等。执行设备接收到指令后,以毫秒级的响应速度完成分合闸等操作,实现故障区域的隔离与非故障区域的供电恢复。边缘节点持续监测保护动作的执行效果,若发现动作未成功或出现异常情况,及时重新评估故障状态并调整保护策略,形成闭环控制,确保配电网在故障发生时能够得到及时、有效的保护,维持配电网的安全稳定运行^[2]。

3 基于边缘计算的配电网二次系统轻量化保护算法性能优化策略

3.1 算法参数自适应调整

(1) 针对配电网运行状态的动态变化,构建基于实时工况的参数调整模型,通过边缘节点采集的电压波动、负荷变化率等关键指标,建立参数与工况的映射关系,使算法参数能够随电网运行状态自主修正。例如,在分布式电源出力骤增时,自动提高电流差动保护的门槛值,避免因潮流反向导致的误动,同时降低稳态运行时的灵敏度过高问题,通过动态阈值实现保护精度与可靠性的平衡。(2) 引入强化学习机制,将边缘节点的保护动作效果作为反馈信号,持续优化参数调整策略。通过构建奖励函数,对正确动作给予正向激励,对误动或拒动给予负向惩罚,使算法在长期运行中自主学习不同工况下的最优参数组合,形成具有自进化能力的参数调整机制,减少人工整定的工作量,提升算法对复杂电网场景的适应性。(3) 采用多维度参数耦合优化方法,打破传统单参数独立调整的局限,考虑电流、电压、相位等参数间的关联性,建立参数协同调整矩阵。当配电网发生拓扑重构时,通过矩阵运算同步更新保护算法中的多个关联参数,确保参数调整的整体性与协调性,避免因参数匹配失衡导致的保护性能下降,增强算法在电网结构动态变化时的稳定性。

3.2 边缘节点协同协作机制优化

(1) 构建基于分布式一致性算法的边缘节点协同框架,使相邻节点通过实时数据交互达成决策共识,在故障发生时形成局部保护域。例如,当某一节点检测到故障特征时,迅速向周边节点广播故障信息,接收节点结合自身采集的数据进行交叉验证,通过加权投票机制确定故障性质与范围,避免单一节点因数据误差导致的误

判,提升保护决策的准确性。(2)设计动态负载均衡的协同策略,根据各边缘节点的实时算力占用率与通信链路质量,自适应分配计算任务。通过构建节点算力评估模型,量化不同节点的处理能力,在故障处理高峰期将复杂计算任务分流至负载较轻的节点,同时优先选择通信延迟低的节点组建临时协作集群,确保关键保护功能的实时性,避免局部节点过载导致的响应延迟。(3)引入边缘节点角色动态切换机制,根据配电网运行阶段与故障位置灵活调整节点功能。正常运行时,节点以独立监测为主;故障发生时,距离故障点最近的节点自动升级为区域主节点,统筹协调周边节点的保护动作,形成以故障点为中心的多层级协作网络,在缩短保护动作时间的同时,减少跨区域通信开销,提升系统的协同效率与抗干扰能力^[3]。

3.3 数据压缩与传输优化

(1)开发基于故障特征驱动的数据压缩算法,仅保留与保护决策相关的关键数据特征,剔除冗余信息。提取故障暂态中的高频分量、突变点等核心特征,借助小波变换与稀疏编码相结合,把原始采样数据转为低维度特征向量,保证故障特征完整无缺,大幅降低数据传输量,缓解通信链路压力。(2)构建自适应传输速率调节机制,根据实时通信带宽与数据优先级动态调整传输参数。对故障报警、保护动作指令等关键数据采用高速率、低延迟的传输模式,通过预留通信信道确保信息直达;对常规运行数据采用低速率周期传输,结合数据缓存与批量发送技术,减少通信交互频次,在保证关键信息时效性的同时,提高带宽利用率。(3)引入边缘节点本地数据融合技术,通过时空关联分析对多源异构数据进行预处理。将同一区域内不同传感器采集的电压、电流数据进行时间同步与空间校准,剔除异常值并融合形成统一的电网状态数据集,再将融合结果传输至上级节点,避免数据重复传输与不一致性问题,减少数据传输总量的同时,提升数据质量与决策效率。

3.4 算法迭代更新与升级

(1)构建基于边缘节点运行日志的算法评估体系,通过采集保护动作的准确率、响应时间、资源占用率等指

标,建立算法性能量化模型。定期对算法在不同工况下的表现进行评分,识别出性能短板,如在高谐波环境下的故障检测准确率下降等问题,为算法迭代提供精准的优化方向,确保升级目标的针对性。(2)设计轻量化模型增量更新机制,仅将算法迭代产生的差异参数传输至边缘节点,避免全量模型下载带来的资源消耗。通过将模型拆分为基础框架与动态模块,基础框架常驻节点本地,迭代时仅更新优化后的动态模块,结合断点续传与校验机制,确保更新过程的安全性及完整性,在分钟级时间内完成算法升级,减少对电网正常运行的影响。(3)引入数字孪生仿真验证平台,在算法升级前通过虚拟环境模拟各类复杂电网场景,测试新算法的兼容性与可靠性。利用配电网实时运行数据构建高精度仿真模型,模拟分布式电源波动、网络拓扑变化、极端天气等边界条件,对迭代算法进行多维度压力测试,提前发现潜在缺陷并优化,确保算法升级后能够无缝适配实际运行环境,提升系统的稳定性与鲁棒性^[4]。

结语

综上所述,基于边缘计算的配电网二次系统轻量化保护算法,通过轻量化模型构建与边缘节点协同,突破传统保护模式局限。算法在保证精度的同时,显著提升响应速度与资源利用效率,自适应调整机制增强复杂工况适应性。未来可探索边缘智能深度融合,结合数字孪生技术优化算法迭代,为高渗透率分布式能源接入下的配电网提供更具韧性的保护体系,推动配电网智能化升级。

参考文献:

- [1]何琨才,梁永昌.基于边缘计算的配电网低电压监测方法[J].电力系统装备,2022(4):32-34.
- [2]陈宝华.基于边缘计算的配电网供电恢复智能决策方法研究[J].电气技术与经济,2024(9):8-10.
- [3]董朝武,娄奇鹤,王登政,等.新型电力系统背景下配电网二次系统体系架构及发展方向[J].电力建设,2024,45(8):11-23.
- [4]王世平,张运龙,蔡文辉,等.10kV配电网二次系统电源配置[J].电器工业,2022(5):74-77.