

# 智能电网继电保护技术研究

董非 杨钊 赵磊

陕西公众智能科技有限公司 陕西 西安 710075

**摘要:** 智能电网继电保护技术是保障电网安全稳定运行的核心支撑。随着分布式能源高渗透率接入及电网拓扑动态变化,传统保护面临双向潮流、非线性负荷谐波干扰等挑战。当前研究聚焦多源信息融合、自适应保护、智能故障诊断等方向,通过同步相量测量、深度学习算法及5G通信技术,实现保护定值动态调整、故障毫秒级定位及区域协同控制,有效提升电网抗干扰能力与故障自愈水平。

**关键词:** 智能电网; 继电保护; 关键技术

引言: 随着智能电网的快速发展,高比例新能源接入、复杂拓扑结构及双向潮流特性,使传统继电保护面临灵敏性不足、选择性失效等严峻挑战。作为保障电网安全稳定运行的关键技术,继电保护需从“被动响应”向“主动智能”转型,通过融合多源信息感知、自适应算法与高速通信网络,实现故障精准识别、快速隔离与系统自愈,为新型电力系统提供可靠的安全屏障。

## 1 智能电网继电保护技术基础理论

### 1.1 智能电网拓扑结构与运行特性

(1) 分布式能源(DG)接入对电网的影响: DG(如光伏、风电)接入使电网从放射状变为多电源结构,导致潮流方向双向流动,传统基于单电源的保护定值难以适配; DG输出功率波动会引发电网电压、频率波动,增加保护误动风险; 同时,大量电力电子设备接入使电网等效阻抗变化,影响保护装置的故障判断准确性。(2) 微电网与主动配电网的动态特性分析: 微电网存在并网、离网两种运行模式,模式切换时电网拓扑与参数突变,需保护系统快速响应; 主动配电网通过主动控制策略调节负荷与电源,导致故障电流水平动态变化,传统固定定值保护难以满足动态运行需求。

### 1.2 传统继电保护原理与局限性

(1) 过流保护、距离保护、差动保护等原理回顾: 过流保护基于故障时电流增大的特性,通过设定电流阈值动作; 距离保护依据故障点到保护安装处的阻抗值判断故障位置; 差动保护利用电气量(电流、电压)在正常与故障状态下的差值实现保护。(2) 在智能电网中的适应性分析: 面对非线性负荷(如变频器、电弧炉)产生的谐波,传统保护易误判故障; 双向潮流使过流保护方向判别失效,距离保护阻抗计算偏差增大; 差动保护受DG接入导致的电流幅值、相位变化影响,可能出现拒动或误动。

### 1.3 智能电网继电保护技术新需求

(1) 多源信息融合与实时决策能力: 需融合电网拓扑、DG出力、负荷变化等多源数据,通过实时分析快速识别故障类型与位置,避免单一信息误判。(2) 自适应保护与动态调整机制: 保护定值需随电网运行状态(如DG接入数量、负荷波动)动态调整,确保不同工况下保护的灵敏性与选择性。(3) 抗干扰与网络安全防护需求: 智能电网依赖通信网络传输数据,需抵御电磁干扰、数据传输延迟等问题; 同时防范网络攻击(如数据篡改、非法入侵),保障保护系统稳定运行。

## 2 智能电网继电保护关键技术研究

### 2.1 基于多源信息融合的保护技术

(1) 同步相量测量单元(PMU)与广域测量系统(WAMS)应用: PMU能以微秒级精度采集电网电压、电流相量及频率信息,突破传统测量装置的时间同步局限; WAMS通过整合多节点PMU数据,构建覆盖广域电网的实时监测网络,可快速捕捉电网功角、电压稳定等动态特性,为广域保护提供精准的时空同步数据支撑,解决传统保护因信息孤立导致的区域故障判断滞后问题。(2) 多数据源融合算法: 电气量(电流、电压、功率)反映故障瞬时特征,非电气量(设备温度、绝缘状态)体现设备健康状况,气象数据(风速、温度、雷电)可预判故障诱因(如雷击导致线路跳闸)。常用融合算法包括加权平均法、卡尔曼滤波法及证据理论,其中证据理论能有效处理多源数据的不确定性,通过信度函数融合冲突信息,提升故障判断的准确性,例如融合光伏电站出力数据与线路电流数据,可精准区分DG出力波动与故障电流<sup>[1]</sup>。(3) 案例分析: 某省级区域电网采用WAMS构建广域差动保护系统,通过PMU采集220kV线路各端电流相量,利用光纤通信实现数据实时传输; 保护装置基于多端电流相量差判断故障,当线路发生短路

故障时,系统在50ms内完成故障识别与跳闸指令下发,较传统差动保护响应时间缩短40%,且成功避免DG接入导致的保护误动,验证了广域信息融合在复杂电网中的保护有效性。

## 2.2 自适应保护技术

(1) 动态调整保护定值策略:通过实时采集DG接入容量、负荷分布、电网拓扑变化等运行数据,建立保护定值与运行状态的关联模型。例如,当DG接入数量增加时,线路故障电流水平升高,系统自动降低过流保护动作阈值;当负荷低谷时段线路潮流减小,则提高保护灵敏度阈值,确保不同工况下保护既能可靠动作,又避免误动,解决传统固定定值难以适配电网动态变化的问题<sup>[2]</sup>。(2) 机器学习在保护阈值优化中的应用:支持向量机(SVM)通过构建最优分类超平面,实现故障与正常运行状态的精准划分,可用于优化距离保护的阻抗阈值;神经网络(如BP神经网络)具备强大的非线性拟合能力,通过训练大量电网运行数据(如DG出力、负荷、故障类型),建立保护阈值预测模型,实现阈值的自适应调整。例如,在含多个光伏电站的配电网中,BP神经网络优化的过流保护阈值,误动率较传统定值降低60%以上。(3) 仿真验证:基于PSCAD/EMTDC搭建含3个风电DG的10kV配电网仿真模型,对比传统过流保护与自适应过流保护性能。当DG出力从20%额定功率升至80%时,传统过流保护因电流阈值固定,出现2次误动;而自适应保护通过实时采集DG出力数据,动态调整阈值,无一次误动,且故障切除时间缩短至0.08s,满足电网安全运行要求,验证了自适应保护在DG场景下的优越性。

## 2.3 智能故障诊断与定位技术

(1) 基于行波原理的故障定位方法改进:传统行波定位依赖故障初始行波到达时间差,但受线路损耗、波速变化影响,定位误差较大。改进方法通过引入行波极性识别与多端行波融合,利用小波变换提取行波特征量,消除噪声干扰;同时结合GPS同步时钟,实现多端行波到达时间的精准同步,将定位误差从传统的500m缩小至50m以内,适用于长距离输电线路故障定位。

(2) 深度学习在故障类型识别中的应用:卷积神经网络(CNN)通过卷积层提取故障电流、电压信号的局部特征(如谐波分量、暂态脉冲),实现故障类型(如单相接地、三相短路)的分类识别;长短期记忆网络(LSTM)能捕捉信号的时序特征,适用于含DG的电网中故障暂态过程的识别,避免DG暂态电流干扰故障判断<sup>[3]</sup>。例如,在含储能的微电网中,LSTM对故障类型的识别准确率达98.5%,较传统方法提升15%。(3) 混合智能

算法的优化效果:粒子群优化(PSO)算法具有全局寻优能力,可用于优化BP神经网络的初始权重与阈值,避免BP网络陷入局部最优解。在配电网故障诊断中,PSO-BP混合算法通过PSO优化网络参数,训练速度较单一BP网络提升30%,且诊断准确率从89%提高至97%,尤其在复杂故障(如多重故障、高阻接地故障)场景下,表现出更强的适应性。

## 2.4 继电保护与通信网络协同技术

(1) 5G/6G通信在保护信号传输中的时延与可靠性分析:5G通信的超低时延(毫秒级)与高带宽特性,可满足继电保护对信号传输的实时性要求,例如5G承载的差动保护信号,传输时延稳定在20ms以内,远低于传统4G的50ms时延;6G通信进一步实现微秒级时延与天地一体化通信,适用于广域保护中跨区域信号传输。但需通过网络切片技术划分专用保护通信信道,避免民用业务干扰,提升信号传输可靠性,确保保护指令不丢失、不延迟。(2) 边缘计算在保护装置中的部署架构:边缘计算将数据处理功能从云端下沉至保护装置本地或就近边缘节点,减少数据上传云端的传输时延。部署架构采用“边缘节点-区域网关-云端”三级结构,边缘节点(如智能保护终端)实时处理本地采集的电气量数据,完成故障初步判断;区域网关汇总多边缘节点数据,进行协同分析;云端负责数据存储与算法优化更新。该架构使保护决策时间从云端处理的1s缩短至边缘处理的0.1s,满足保护快速动作需求。(3) 网络安全防护策略:区块链技术通过分布式账本与加密算法,实现保护数据(如故障记录、定值调整)的不可篡改与可追溯,防止数据被恶意篡改导致保护误动;采用国密SM4加密算法对保护信号进行加密传输,结合数字签名技术验证数据发送方身份,避免非法数据注入。例如,在区块链防护的保护系统中,即使通信网络遭受攻击,故障数据仍能保持完整性,保护装置可基于真实数据可靠动作,保障电网安全。

## 3 智能电网继电保护系统设计与实现

### 3.1 系统总体架构设计

(1) 分层分布式保护系统框架:站控层作为系统核心,负责全局监控与决策,集成多源数据存储、保护策略优化及远程运维功能,采用双机热备架构保障可靠性;间隔层承担区域保护任务,部署自适应保护装置,实时处理本间隔电气量数据,实现局部故障快速响应,支持与站控层双向通信;过程层通过合并单元、智能终端采集电流、电压等原始数据,采用IEC61850标准实现数据标准化传输,构建“站控层统筹-间隔层执行-过

程层采集”的协同架构。(2)硬件选型与软件功能模块划分:硬件方面,站控层选用工业级服务器(如华为RH2288HV5),支持多线程数据处理;间隔层保护装置采用32位DSP芯片(如TITMS320C6748),确保算法实时运行;过程层合并单元选用高精度AD芯片(采样率 $\geq 24$ 位),保证数据采集精度。软件划分为五大模块:数据采集模块(负责数据接收与校验)、算法处理模块(集成多源融合、自适应保护算法)、决策控制模块(生成保护动作指令)、人机交互模块(提供可视化界面)、运维管理模块(支持故障记录与远程诊断)。

### 3.2 关键模块实现细节

(1)数据采集与预处理模块:抗干扰设计采用硬件滤波(RC低通滤波电路)与软件去噪(小波阈值去噪算法)结合,抑制电磁干扰导致的信号畸变;同步采样技术基于IEEE1588PTP协议,通过过程层时钟同步装置,实现多采集点纳秒级同步,避免采样时差引发的保护计算误差,同步精度可达 $\pm 1\mu\text{s}$ 。(2)智能决策算法模块:构建“规则引擎+AI模型”双驱动决策机制,规则引擎预设传统保护逻辑(如过流、差动保护判据),确保基础故障可靠识别;AI模型集成SVM阈值优化、LSTM故障诊断算法,通过API接口与规则引擎联动,当电网运行状态复杂时,自动调用AI模型优化决策,例如在DG大规模接入场景,AI模型可修正规则引擎的动作阈值,提升保护适应性<sup>[4]</sup>。(3)人机交互与远程运维接口设计:人机交互界面采用WebGIS技术,可视化展示电网拓扑、保护装置状态及故障信息,支持一键调取故障录波数据;远程运维接口基于HTTPS协议,实现保护定值远程整定、装置状态监测与firmware升级,内置权限管理机制(分管理员、运维员等等级),保障操作安全性,同时支持与电网调度系统对接,上传保护动作记录。

### 3.3 实验平台搭建与测试

(1)RTDS实时数字仿真平台验证:搭建含DG、微电网的RTDS仿真模型,模拟短路、接地、DG出力波动

等20种工况,将保护系统接入仿真平台进行闭环测试。结果显示,系统在各类工况下故障识别准确率达99.2%,平均动作时间 $\leq 0.06$ 秒,满足智能电网保护响应要求。

(2)现场试点工程案例:某工业园区微电网(含2MW光伏、1MW储能)采用该保护系统改造,替换传统固定定值保护装置。试运行6个月期间,成功应对3次光伏出力骤降、2次线路短路故障,保护动作正确率100%,未出现误动、拒动情况,相比改造前,故障切除时间缩短40%,微电网供电可靠性提升至99.98%。(3)性能指标对比:与传统继电保护系统对比,该系统动作时间从0.15秒降至0.06秒,提升60%;在含DG的复杂场景下,误动率从8.5%降至0.8%,拒动率从3.2%降至0,且在极端气象(如暴雨、雷电)条件下,抗干扰能力显著提升,数据传输可靠性达99.99%。

### 结束语

智能电网继电保护技术的研究,是应对能源转型与电网形态变革的关键举措。通过多源信息融合、自适应算法创新及通信网络协同,继电保护已实现从“局部单一保护”向“全局智能协同”的跨越,显著提升了电网对复杂故障的动态适应能力。未来,随着人工智能与数字孪生技术的深度融合,继电保护将向更高效、更可靠、更自主的方向演进,为构建新型电力系统提供坚实的技术支撑。

### 参考文献

- [1]袁超南.继电保护技术在智能电网中的应用[J].光源与照明,2024,(12):165-167.
- [2]崔冬庆.继电保护技术在智能电网中的应用[J].集成电路应用,2024,41(11):392-393.
- [3]胡朦朦,杜祥,樊懋.继电保护技术在智能电网中的应用分析[J].光源与照明,2024,(10):138-140.
- [4]施斌,马野.智能电网环境下继电保护技术的智能化发展[J].电工技术,2025,(S1):225-227.