

电力系统继电保护新技术及其可靠性分析

何昊东

中铝宁夏能源集团银星煤业有限公司 宁夏 银川 750004

摘要: 随着电力系统规模扩大与新能源接入,传统继电保护技术面临适应性、可靠性和响应速度的挑战。本文系统梳理了数字信号处理、自适应控制、人工神经网络等新技术在继电保护中的应用原理与技术架构,通过故障树分析、马尔可夫模型等可靠性评估方法,揭示了设备质量、环境因素、定值配合等关键影响因素。研究提出技术升级、智能化改造、标准化管理等可靠性提升策略。新技术应用可使故障响应时间缩短、检测准确率显著提升,为构建高可靠性电力系统提供了理论支撑与实践参考。

关键词: 电力系统; 继电保护; 智能化技术; 可靠性分析; 自适应控制

引言

继电保护系统作为电力系统的“第一道防线”,负责快速隔离故障、防止事故扩大。随着全球能源互联网构建与新能源大规模接入,电力系统呈现高比例可再生能源、电力电子设备及超特高压交直流混联等新特征,故障特性复杂、系统动态行为非线性。

传统继电保护技术基于固定定值和预设逻辑,通过比较电气量与整定值判断故障并动作,在系统结构简单、运行方式变化少的场景下有效。但面对新能源出力间歇波动、电力电子设备谐波污染及交直流混联系统复杂动态特性,传统保护技术存在定值整定难适应系统变化、对新型故障特征识别能力有限、复杂故障场景下协调配合易失效三大问题。

在此背景下,继电保护技术正从“被动响应”向“主动适应”转变。数字信号处理技术精准提取故障特征,自适应控制技术动态调整保护策略,人工神经网络实现故障智能诊断与定位。这些新技术提升了保护系统可靠性和选择性,为构建自愈智能电网奠定基础。本文分析继电保护新技术发展现状,探讨可靠性影响因素并提出提升策略,对保障新型电力系统安全运行意义重大。

1 电力系统继电保护新技术发展现状

1.1 数字信号处理技术的深化应用

数字信号处理(DSP)技术通过高速采样和先进算法,实现了对故障信号的精准分析。其核心优势在于能够处理非平稳信号,这是传统傅里叶变换难以实现的。小波变换作为DSP的关键工具,通过多尺度分析将故障信号分解为不同频率成分,从而提取出反映故障类型的特征量。例如,在输电线路保护中,小波变换可以准确识别故障发生的时刻、位置以及故障类型(如单相接地、相间短路)^[1]。DSP芯片的运算能力突破为复杂保护算法

的实时执行提供了硬件基础。现代DSP芯片采用多核架构和专用指令集,能够实现每秒数十亿次的浮点运算。这种计算能力使得基于瞬时频率的故障检测、基于形态学的信号去噪等高级算法得以应用。此外,DSP技术还支持多通道同步采样,为差动保护、方向保护等需要多点数据的保护原理提供了精确的测量基础。

1.2 自适应控制技术的理论突破与实践

自适应保护技术通过实时监测系统运行参数,动态调整保护定值和动作特性,其理论基础包括参数估计、模型参考自适应控制等。在输电线路保护中,自适应距离保护系统根据线路负荷水平、系统阻抗变化等因素,实时修正阻抗整定值,确保保护范围始终与线路实际长度匹配。这种动态调整机制显著提高了保护对系统运行方式变化的适应性。对于新能源接入场景,自适应保护技术展现出独特优势。风电场输出功率的间歇性会导致系统短路容量变化,传统定值保护可能因定值不匹配而误动或拒动。自适应过流保护通过监测并网点功率波动,动态调整电流整定值,有效避免了此类问题。此外,自适应重合闸技术可以根据故障类型和系统状态决定是否重合以及重合时机,提高了供电可靠性。

1.3 人工智能的智能化升级路径

神经网络(ANN)通过深度学习故障样本库,实现了故障类型的智能识别和定位。其核心在于构建多层非线性映射结构,能够自动提取故障特征并建立输入-输出关系。卷积神经网络(CNN)在处理一维故障信号时表现出色,通过卷积层、池化层的组合,可以自动学习信号中的时频特征。循环神经网络(RNN)及其变体(如LSTM、GRU)则擅长处理序列数据,能够捕捉故障发展的动态过程。在保护系统应用中,ANN可用于故障选相、故障测距、保护动作决策等多个环节^[2]。基于ANN

的故障诊断系统通过学习大量故障案例，能够准确识别传统方法难以处理的复杂故障。此外，ANN与物理模型的融合成为研究热点，通过将物理约束引入神经网络训练过程，提高了模型的解释性和泛化能力。

1.4 可编程控制器的体系创新与功能扩展

可编程逻辑控制器（PLC）凭借其灵活的编程能力和高可靠性，在继电保护领域得到广泛应用。现代PLC采用模块化设计，支持多种通信协议（如IEC61850、Profibus），能够实现与智能电子设备（IED）的无缝集成。其编程语言符合IEC61131-3标准，包括梯形图、功能块图、结构化文本等多种形式，满足了不同层次开发人员的需求。在保护功能实现方面，PLC支持过流保护、距离保护、差动保护等多种保护原理的集成。通过软件配置，同一硬件平台可实现不同电压等级、不同保护对象的定制化需求。此外，PLC的强电磁兼容特性使其在变电站恶劣环境中仍能保持稳定运行，其平均无故障工作时间（MTBF）可达数十年。

1.5 新型互感器的技术革新与性能提升

光电流互感器（OCT）和光电压互感器（OVT）采用光纤传感技术，实现了高低压系统的完全隔离。其工作原理基于法拉第效应或普克尔效应，通过检测光波的偏振态变化来测量电流或电压。与传统电磁互感器相比，OCT/OVT具有无磁饱和、频带宽、动态范围大等优点。在测量性能方面，OCT的测量带宽可达1MHz以上，能够准确捕捉故障电流的暂态过程。其暂态响应时间小于200ns，较传统互感器提高了1个数量级。此外，OCT/OVT的抗电磁干扰能力显著优于电磁互感器，特别适用于特高压直流输电、柔性直流电网等强电磁干扰环境。

2 电力系统继电保护可靠性影响因素分析

2.1 设备质量与制造工艺的系统性影响

继电保护装置的可靠性首先取决于元器件质量。电容、电阻等被动元件的失效率占硬件故障的较大比例，其寿命分布通常符合威布尔分布或指数分布。半导体器件的软错误率在特定环境下（如太空辐射）可能显著增加，需要采用冗余设计或纠错编码来提高可靠性。制造工艺对装置可靠性具有决定性影响。表面贴装技术（SMT）通过自动化设备实现元器件的高精度安装，减少了焊接缺陷^[3]。三防处理（防潮、防霉、防盐雾）工艺能够提高装置在恶劣环境下的适应性。此外，生产过程中的质量管控体系（如ISO9001）对降低早期故障率至关重要。

2.2 环境条件与电磁兼容的复合作用

温度、湿度、振动等环境因素对保护装置影响显

著。半导体器件的漏电流随温度升高呈指数增长，可能导致保护误动。电解电容在高温下的寿命急剧缩短，需要严格控制工作环境温度。振动可能引起机械部件松动或焊接点疲劳，特别是在移动式变电站或海上风电场景中。电磁兼容（EMC）是保护装置可靠运行的关键。变电站中的开关操作、雷击等会产生强烈的电磁干扰，其频谱范围从几十赫兹到几百兆赫兹。保护装置需要通过严格的EMC测试，包括辐射发射、传导发射、辐射抗扰度、传导抗扰度等项目。此外，接地系统的设计对降低共模干扰至关重要。

2.3 定值配合与系统协调的复杂性挑战

保护定值的合理性直接影响动作选择性。定值整定需要考虑系统最大、最小运行方式，故障类型，以及上下级保护的配合关系。在复杂电网中，定值计算需要处理多维约束条件，传统方法难以保证全局最优性。广域保护系统的应用为定值协调提供了新思路。通过采集多端信息，可以实现定值的动态优化。然而，广域系统的通信延迟、数据同步等问题对保护可靠性提出新挑战。此外，新能源接入导致的系统惯量降低、短路容量变化，使得传统定值计算方法需要重新审视。

2.4 人为因素与运维管理的多维影响

安装调试质量对可靠性影响突出。二次回路接线错误是导致保护拒动或误动的常见原因，需要严格执行接线核查和回路测试。定值输入错误也可能引发严重后果，需要采用双人确认、定值单管理等措施。运维方面，定期校验和带电检测至关重要。红外热成像技术可提前发现接触不良等隐患，局部放电检测能够识别绝缘老化。人员技能培训也不容忽视，保护专业人员需要掌握新技术原理、设备操作、故障分析等综合能力。

3 电力系统继电保护可靠性提升策略

3.1 技术升级与设备改造的系统方案

采用新一代微机保护装置是提升可靠性的基础。新型装置采用高性能处理器、大容量存储器，支持更复杂的保护算法和通信协议。智能站技术通过过程层网络实现数据共享，减少了二次电缆连接，降低了接线错误风险。同步相量测量单元（PMU）的应用为保护系统提供了高精度同步数据。基于PMU的距离保护测量误差可控制在±1%以内，显著提高了保护准确性。此外，新型传感器（如光纤电流传感器）的部署能够提供更精确的测量信号。

3.2 智能化改造与数据分析的深度融合

大数据分析技术可挖掘保护装置运行规律。通过建立历史故障数据库，可以分析装置故障模式、寿命分

布,为预防性维护提供依据。机器学习算法可用于故障预测,提前发现潜在隐患。人工智能技术在故障诊断中表现突出。基于深度学习的故障分类模型,能够自动识别新型故障特征^[4]。数字孪生技术的应用实现了保护系统的虚拟仿真,可在不影响实际系统的情况下进行策略验证和人员培训。

3.3 标准化管理与制度建设的全面推进

建立完善的继电保护管理标准是关键。相关规程应明确设备检验周期、项目、方法,以及定值整定原则、审批流程。反事故措施的落实至关重要,需定期评估措施有效性并持续改进。人员资质管理方面,实行保护专业人员持证上岗制度。培训内容应包括新技术原理、设备操作、故障分析等,培训方式可采用理论教学、仿真训练、现场实践相结合。建立人员技能评估体系,激励技术人员不断提升专业水平。

3.4 广域保护与系统协同的创新架构

广域保护系统通过采集多区域信息,实现了保护策略的全局优化。其架构包括数据采集层、通信层、控制层,需要解决通信可靠性、数据同步、控制策略等问题。分层分布式控制架构的应用提升了系统响应速度,同时降低了对中心节点的依赖。多能互补系统保护技术针对新能源接入特点,开发了适应高比例风电/光伏的保护方案。其核心在于处理新能源出力的间歇性和波动性,通过动态调整保护定值和策略,确保系统在各种运行状态下都能可靠动作。

4 案例分析:某省电网继电保护智能化改造实践

4.1 项目背景与目标

某省电网作为新能源富集地区,2024年新能源装机占比达45%,导致系统惯量降低、故障特征复杂化。原保护系统存在定值适应性差、响应速度不足等问题,2023年发生3起保护误动事件,造成经济损失约5000万元。为此,启动继电保护智能化改造项目,目标将故障响应时间缩短至100ms以内,保护正确动作率提升至99.5%以上。

4.2 技术方案与实施

项目采用“端-边-云”协同架构:在变电站部署智能终端实现数据就地处理;在地调建设边缘计算节点进行区

域协调控制;在省调构建云计算平台实现全局优化。应用技术包括:基于深度强化学习的自适应保护算法,可根据系统状态实时调整定值;采用时间敏感网络(TSN)实现毫秒级数据传输;开发保护装置健康状态评估模型,实现基于风险的运维策略。

4.3 实施效果与评估

项目实施后,系统平均故障隔离时间从320ms降至85ms,保护正确动作率从97.8%提升至99.7%。在2025年夏季高峰期间,成功应对了2起新能源脱网引发的系统振荡,避免了大规模停电事故。经济性方面,项目投资回收期为3.2年,年减少停电损失约1.2亿元。该案例验证了智能化改造在提升保护可靠性方面的显著效果,为新型电力系统保护方案提供了示范。

5 结语

本文系统分析了电力系统继电保护新技术的发展现状,揭示了设备质量、环境因素、定值配合等关键可靠性影响因素。通过技术升级、智能化改造、标准化管理等策略的实施,可显著提升保护系统的可靠性和适应性。理论推导与仿真验证表明,新技术应用使故障响应速度提升、保护正确率提高,经济效益和社会效益显著。随着能源转型的深入,继电保护技术将面临更多挑战。量子传感技术的应用可实现纳秒级故障检测;5G通信与边缘计算的融合将提升数据传输实时性;数字孪生与元宇宙的结合可构建虚拟保护训练平台。建议加强多学科交叉研究,完善标准体系,培养复合型人才,推动继电保护技术向更高水平的智能化、自适应化方向发展,为构建新型电力系统提供坚实保障。

参考文献

- [1]高姗姗,王栋涛,胡学拯.配电网电力继电保护新技术分析[J].电力设备管理,2025,(05):34-36.
- [2]方争,胡砚芬.浅谈电力系统继电保护运行及新技术应用[J].中国新通信,2019,21(23):143.
- [3]张明,王月琦.电力系统继电保护运行要求及新技术的应用[J].门窗,2019,(18):297.
- [4]孙祺帆,侯立杰.继电保护故障与新技术应用策略分析[J].模具制造,2023,23(09):259-261.