

微机保护装置在复杂电网环境中的性能优化

田园

北京唐浩电力工程技术研究有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i8.4936

[摘要] 随着新能源大规模并网、交直流混联电网结构日益复杂以及负荷侧互动性增强,现代电力系统正经历前所未有的动态复杂化。作为保障电网安全稳定运行的第一道防线,微机保护装置(MBPR)面临着故障特征模糊、暂态过程复杂、通信干扰加剧等多重挑战。本文系统分析了复杂电网环境下微机保护装置面临的主要技术瓶颈,包括高渗透率分布式电源接入引起的反向潮流、谐波与非工频分量干扰、CT饱和导致的电流畸变、通信延迟对差动保护的影响等。在此基础上,从算法优化、硬件架构升级、多源信息融合及人工智能赋能四个维度,提出了一系列针对性的性能优化策略。最后,对微机保护装置在未来智能电网中的发展方向进行了展望。

[关键词] 微机保护; 复杂电网; 性能优化; 人工智能; 自适应保护

中图分类号: TM77 **文献标识码:** A

Performance Optimization of Microcomputer-Based Protection Devices in Complex Power Grid Environments

Yuan Tian

Beijing Tanghao Electric Power Engineering Technology Research Co., Ltd.

[Abstract] With the large-scale integration of new energy sources, the increasing complexity of AC-DC hybrid power grid structures, and enhanced load-side interactivity, modern power systems are experiencing unprecedented dynamic complexity. As the first line of defense for ensuring the safe and stable operation of power grids, microcomputer-based protection devices (MBPRs) face multiple challenges including obscure fault characteristics, complex transient processes, and intensified communication interference. This paper systematically analyzes the main technical bottlenecks faced by microcomputer-based protection devices in complex power grid environments, including reverse power flow caused by high-penetration distributed generation integration, harmonics and non-power frequency component interference, current distortion due to CT saturation, and the impact of communication delay on differential protection. On this basis, a series of targeted performance optimization strategies are proposed from four dimensions: algorithm optimization, hardware architecture upgrading, multi-source information fusion, and artificial intelligence empowerment. Finally, the development direction of microcomputer-based protection devices in future smart grids is discussed.

[Key words] microcomputer-based protection; complex power grid; performance optimization; artificial intelligence; adaptive protection

引言

近年来随着“双碳”目标推进,风电、光伏等可再生能源装机容量迅猛增长,柔性直流输电、FACTS装置广泛应用,用户侧储能与电动汽车参与电网互动,使得电网呈现出高度不确定性、强非线性与时空异质性等新特征。在此背景下,传统基于固定阈值与简单逻辑判据的微机保护策略逐渐暴露出适应性不足的问题。例如,在高比例分布式电源接入的配电网中,故障电流方向

与幅值可能因运行方式变化而剧烈波动;在含大量电力电子设备的系统中,故障暂态过程包含丰富的高频谐波与直流分量,易导致保护误动或拒动;此外,广域测量系统(WAMS)与IEC61850标准的推广虽提升了信息交互能力,但也引入了通信延迟、数据丢包等新风险。因此,如何在复杂电网环境中提升微机保护装置的鲁棒性、灵敏性与智能化水平,已成为当前电力系统保护领域亟待解决的关键科学与工程问题。

1 复杂电网环境对微机保护装置的挑战

1.1 分布式电源接入导致的故障特性变化

传统辐射状配电网中,故障电流仅由系统侧提供,方向单一、幅值稳定。然而,当分布式电源(DG)如光伏逆变器、风力发电机大量接入后,故障点可能出现双向或多向电流注入。尤其在孤岛运行或弱电网条件下,DG提供的短路电流受限于其控制策略(如恒功率控制),幅值远小于系统侧,且相位角不确定^[1]。这导致传统过电流保护、方向保护的整定困难,甚至出现保护盲区或误判方向。

1.2 电力电子设备引入的非工频干扰

新能源发电、柔性直流输电、电动汽车充电桩等广泛采用电力电子变换器,其开关动作产生大量谐波、间谐波及高频噪声。故障发生时,这些非工频分量叠加在基波上,严重干扰保护装置的采样与滤波环节。例如,传统傅里叶算法在存在衰减直流分量或高次谐波时会产生“频谱泄漏”,导致幅值与相位计算误差增大,进而影响阻抗继电器、距离保护的动作准确性。

1.3 电流互感器(CT)饱和问题加剧

在近端严重短路或含有直流偏磁的故障中,CT铁芯易进入深度饱和状态,导致二次侧电流波形严重畸变,出现削顶、反向尖峰等现象。传统基于电流突变量或谐波制动的CT饱和判据在复杂暂态过程中可能失效,造成差动保护误动。尤其在含大量非线性负荷或HVDC换流站附近的区域,CT饱和风险显著提高。

1.4 通信依赖性增强带来的新风险

现代微机保护装置普遍支持IEC61850标准,通过GOOSE和SV实现高速信息交互,支撑线路纵联差动、母线保护等需要多端同步数据的功能。然而,网络延迟、抖动、丢包甚至网络攻击可能导致采样数据不同步或缺失,破坏差动电流的平衡性,引发保护误动^[2]。此外,广域保护依赖于WAMS数据,其秒级更新周期难以满足主保护毫秒级动作要求。

1.5 运行方式频繁切换降低保护适应性

源-网-荷-储协同互动使得电网拓扑与运行方式变化更加频繁。传统离线整定的保护定值难以覆盖所有运行场景,导致在某些方式下灵敏度不足或选择性丧失。例如,微电网并/离网切换瞬间,保护需在数百毫秒内完成策略切换,否则可能扩大故障范围。

2 微机保护装置性能优化关键技术

2.1 自适应保护算法优化

2.1.1 改进型故障分量提取算法

为抑制非工频干扰,可采用改进的数字滤波与信号处理技术。例如:(1)自适应陷波滤波器:实时跟踪基波频率(尤其在弱电网频率波动时),有效滤除谐波;(2)小波包变换:对暂态信号进行多尺度分解,精准提取故障初始行波与高频特征,用于超高速保护;(3)Hilbert-Huang变换(HHT):适用于非平稳、非线性信号,可准确提取瞬时幅值与频率,用于识别高阻接地故障。

2.1.2 基于系统辨识的阻抗自适应整定

利用在线测量的系统等效阻抗,动态调整距离保护的整定

值。例如,通过注入小扰动信号或利用正常运行数据辨识Thevenin等效参数,实现保护范围的实时校正,避免因系统强度变化导致的超越或欠范围动作。

2.1.3 抗CT饱和和新判据

新一代抗饱和判据趋向于多维信息融合,它综合考察电流波形的时域奇异性,例如电流一阶导数(di/dt)在饱和起始时刻会出现异常尖峰;同时分析频域中谐波分量的分布规律,如三次谐波与基波的比值变化;更进一步,可引入机器学习模型,利用历史饱和与非饱和波形数据训练分类器,实现对饱和状态的模式识别与提前预警^[3]。通过这种多角度、多层次的综合判断,保护装置能够在确认CT饱和时可靠闭锁差动出口,并无缝切换至基于电压突变量或其他非电流量的后备判据,从而在保证区内故障快速切除的同时,彻底杜绝区外故障误动的风险。

2.2 高性能硬件平台升级

为直观体现硬件平台演进对保护性能的支撑作用,表1对比了传统微机保护装置与新一代高性能平台在关键指标上的差异。

表1 传统与新型微机保护硬件平台关键性能对比

指标类别	传统平台	新一代高性能平台
主处理器架构	单核MCU(如ARM7/9)	多核异构(ARM Cortex-A+FPGA/DSP)
采样率	1-2kHz	≥4.8kHz(支持16位以上精度)
时间同步精度	毫秒级(IRIG-B)	微秒级(IEEE1588PTP/北斗授时)
通信接口	RS-485/以太网(无GOOSE)	双千兆以太网,支持IEC61850GOOSE/SV
安全机制	软件校验	硬件加密引擎+可信执行环境(TEE)
典型动作时间	20-40ms	≤15ms(主保护)

2.2.1 多核异构处理器架构

现代高端微机保护装置普遍采用多核异构处理器架构。该架构将计算任务进行功能解耦:通用主控核(如ARM Cortex-A系列)负责运行操作系统、执行保护逻辑判断、处理人机交互及通信协议栈;而专用协处理单元(如高性能DSP或FPGA)则被赋予高速信号处理的重任,包括但不限于高密度采样、实时FFT、小波变换、矩阵运算等。这种分工协作的模式极大地提升了系统的并行处理能力,将核心保护算法的执行周期压缩至亚毫秒级别,为实现超高速、高精度保护奠定了坚实的硬件基础。

2.2.2 高精度同步采样技术

随着IEC61850标准的普及,基于网络的采样值(SV)传输成为主流,这也对时间同步提出了更高要求。为此,新一代保护装置普遍集成了IEEE1588精密时间协议(PTP)硬件时间戳单元,或直接内置北斗/GPS卫星授时模块。这些技术能够实现全变电站乃至跨站间的微秒级时间同步,确保来自不同位置的电流、电压采样值在时间轴上严格对齐。即便在网络存在轻微抖动的情况下,高精度的时间戳也能为后续的数据插值与重构提供可靠依据,从根本上削弱了通信延迟对差动电流平衡性计算的不利影响,保障了保护动作的正确性。

2.2.3 硬件级安全防护

现代保护装置开始在芯片级集成硬件加密引擎与可信执行

环境(TEE)。关键的跳闸命令(GOOSE)和采样值(SV)在发送前会利用硬件加速的加密算法生成消息认证码(MAC),接收端则通过硬件验签确保其完整性与来源真实性^[4]。TEE则为保护核心逻辑提供了一个隔离的、受硬件保护的执行空间,有效抵御来自操作系统或应用层的恶意软件入侵,从物理层面筑牢了保护系统的安全防线。

2.3 多源信息融合与协同保护

2.3.1 就地-区域-广域三级保护架构

在这一体系中,就地层保护作为第一道防线,依托本地电气量实现毫秒级的快速故障切除;区域层保护则利用整个变电站内的共享信息(如所有间隔的电流、母线电压等),实现站域内的智能协同,例如优化失灵保护的启动逻辑、实现无通道的站域后备保护等;广域层则借助广域测量系统(WAMS)获取跨区域的电网动态全景信息,用于评估系统稳定性,并在必要时触发切机、切负荷等紧急控制措施,形成“保护-控制”一体化的闭环响应机制。

2.3.2 基于IEC61850-9-2LE的采样值共享

通过该标准,合并单元(MU)可将高精度的原始电流、电压采样数据直接打包成SV报文,经由站控层网络广播给所有需要的保护、测控装置。这种方式省去了传统模拟量传输中的多次A/D、D/A转换环节,极大提升了数据的保真度与时效性。更重要的是,每个SV报文都携带了由高精度时钟源打上的绝对时间戳。即使在网络传输中出现轻微的延迟或抖动,接收装置也可以利用这些时间戳,结合先进的插值或预测算法,对采样序列进行精确重构,从而在通信不完美的现实条件下,依然维持保护判据所需的同步性与连续性,为高可靠性保护提供了坚实的数据基础。

2.4 人工智能赋能的智能保护

2.4.1 基于深度学习的故障分类与定位

深度学习技术通过构建一维卷积神经网络(1D-CNN)或图神经网络(GNN)等模型,可以直接将多通道的原始电压、电流波形作为输入,经过多层非线性变换,自动学习并提取出对故障类型、位置和严重程度最具判别性的高维特征表示。这种端到端的学习方式摆脱了对专家经验的依赖,尤其在识别高阻接地、间歇性弧光等传统方法难以捕捉的弱特征故障方面表现卓越。

2.4.2 强化学习驱动的自适应整定

强化学习(RL)可以将电网的实时运行状态(如拓扑、负荷、DG出力等)视为环境状态,将保护的定值和逻辑配置视为智能体的动作,以“最小化故障切除时间、最大化保护选择性、避免误动/拒动”等目标构建复合奖励函数。通过与电网环境的持续交互和试错,RL智能体能够自主探索并学习到一套最优的自适应

整定策略。这套策略能够在线感知运行方式的变化,并实时调整保护参数,从而实现真正意义上的“随网而动”。

2.4.3 数字孪生辅助保护测试与验证

数字孪生技术通过构建一个高保真、全动态的电网数字孪生体,可以在虚拟空间中低成本、高效率地模拟任意复杂的故障组合与运行工况。研发人员可以将待测的保护算法部署于该孪生体中,进行全面的压力测试、边界测试和鲁棒性评估。这种“虚拟先行、实证跟进”的模式,不仅大幅降低了研发与验证周期,也极大地提升了新型保护技术的安全性和可靠性,加速了其从实验室走向工程应用的进程。

3 未来展望

尽管当前微机保护技术已取得显著进步,面向未来以新能源为主体的新型电力系统,仍需在以下方向持续突破:(1)量子传感与保护:探索基于量子磁力计的无铁芯电流测量,从根本上消除CT饱和问题;(2)边缘-云协同智能保护:将轻量化AI模型部署于边缘保护装置,复杂模型运行于云端,实现资源最优分配;(3)区块链赋能的保护可信协同:利用区块链不可篡改特性,构建跨区域保护动作审计与责任追溯机制;(4)人机协同保护决策:在极端复杂故障下,引入专家知识与AI推理结合,提升决策透明度与可解释性。此外,标准化工作亦需同步推进,如制定AI保护模型的测试规范、数据接口标准等,以促进技术落地与产业生态建设。

4 结语

复杂电网环境对微机保护装置的可靠性、选择性与速动性提出了更高要求。本文系统分析了分布式电源接入、电力电子干扰、CT饱和、通信依赖等核心挑战,并从算法、硬件、信息融合与人工智能四个维度提出了综合优化策略。未来,随着新材料、新算力与新架构的引入,微机保护将向更智能、更弹性、更可信的方向演进,为构建安全、高效、绿色的新型电力系统提供坚实保障。

[参考文献]

- [1]王元东,电气微机保护装置系统.河南省,新乡市万新电气有限公司,2021-08-30.
- [2]马蓬蓬.提高低压电动机微机保护装置可靠性的关键措施[J].机械管理开发,2023,38(05):224-225+228.
- [3]罗维求.电力微机保护装置抗干扰措施研究[J].能源与环境,2021,(03):32-33+40.
- [4]吴迪.新型自供电智能微机保护装置的设计与实现[D].安徽大学,2021.