

电力系统继电保护原理的发展历程与未来趋势

张宝杰

中国铁路哈尔滨局集团有限公司牡丹江供电段 黑龙江 牡丹江 157000

摘要: 继电保护作为电力系统安全稳定运行的第一道防线,其技术演进始终与电网结构、运行方式及控制理念的变革紧密相连。本文系统梳理了电力系统继电保护从电磁式、整流式、晶体管式、集成电路式到微机型的发展脉络,深入剖析了各阶段技术的核心原理、典型装置及其历史局限性。在此基础上,重点探讨了数字化、智能化背景下继电保护技术的最新进展,包括基于IEC 61850标准的数字化保护、广域测量系统(WAMS)支撑下的广域保护、人工智能(AI)与大数据驱动的智能保护等前沿方向。最后,文章对继电保护在未来新型电力系统(以高比例可再生能源、高比例电力电子设备为特征)中所面临的挑战与发展趋势进行了展望,旨在为相关领域的研究与工程实践提供理论参考。

关键词: 继电保护;发展历程;微机保护;广域保护;人工智能

引言

电力系统是现代社会的能源命脉,其安全、可靠、高效运行直接关系到国计民生与国家安全。继电保护装置作为电力系统的“免疫系统”和“神经末梢”,承担着在系统发生故障或异常工况时,快速、准确、有选择性地切除故障元件,最大限度地缩小停电范围、减轻设备损坏、维持系统稳定性的核心任务。自19世纪末电力工业诞生以来,继电保护技术便应运而生,并伴随着电力系统规模的扩大、电压等级的提升、运行复杂性的增加而不断迭代升级。从最初的简单熔断器到如今集成了通信、计算、人工智能于一体的智能电子设备(IED),继电保护的原理、实现方式和功能内涵都发生了翻天覆地的变化。理解其发展历程,不仅是对技术史的回顾,更是把握未来技术走向、应对新型电力系统挑战的关键。本文旨在系统性地回顾继电保护技术的演进历程,深入分析其内在的技术逻辑与驱动力,并前瞻性地探讨其在构建以新能源为主体的新型电力系统背景下的发展方向与核心挑战。

1 继电保护技术的早期发展阶段(19世纪末—20世纪50年代)

1.1 电磁式继电器时代

继电保护雏形可追溯至19世纪末的熔断器,但其选择性和速动性差。交流输电系统出现后,催生了电磁式继电器,这是继电保护发展的首个里程碑。其基于电磁感应定律和电磁力作用,典型电流继电器由线圈、铁芯等组成,电流达整定值时,电磁力使衔铁动作,触点闭合或断开发出跳闸信号。这一时期代表性保护原理有过电流保护,通过设定电流阈值判断故障;方向过电流保护,增加功率方向判别元件解决选择性问题;距离保护,

通过测阻抗判断故障位置,是高压输电线路主保护。电磁式继电器结构简单、可靠性高、抗干扰强,但缺点也突出:体积大、功耗高、整定难、缺乏自检能力、难实现复杂逻辑,还易受机械磨损和环境影响。

1.2 整流型与晶体管型继电器的过渡

20世纪40—50年代,随着半导体技术的萌芽,出现了整流型继电器。它利用二极管将交流量整流为直流量,再驱动一个小型直流电磁继电器。这在一定程度上减小了装置的体积和功耗,提高了灵敏度,但本质上仍未脱离电磁执行机构的框架。随后,晶体管的发明开启了固态继电器的新纪元。晶体管型继电器利用晶体管的开关和放大特性来构成逻辑回路和执行单元。与电磁式相比,它具有体积小、重量轻、功耗低、动作速度快、无机械触点磨损等优点^[1]。更重要的是,它为实现更复杂的保护算法(如多段式距离保护、高频保护的启动与停信逻辑)提供了硬件基础。然而,晶体管电路设计复杂,对元件参数分散性敏感,调试和维护困难。同时,其抗电磁干扰(EMI)能力较弱,在强电磁场环境中工作稳定性不佳。这些局限性促使工程师们寻求更稳定、集成度更高的解决方案。

2 集成电路与微机保护的崛起(20世纪60年代—90年代)

2.1 集成电路(IC)保护

20世纪60年代,集成电路技术的成熟为继电保护带来了革命性的变化。通过将大量晶体管、电阻、电容等元件集成在一块硅片上,形成了运算放大器、比较器、定时器等标准化的功能模块。基于这些模块,可以构建出性能稳定、调试方便、功能相对丰富的保护装置。IC保护装置成功实现了模拟量的精确处理和复杂的逻辑组

合,例如,利用模拟滤波器和相敏检测电路可以精确提取基波分量,实现高精度的距离保护。同时,其抗干扰能力和长期运行稳定性远优于分立元件的晶体管电路。IC保护是继电保护从“机电式”向“电子式”全面转型的关键阶段,为后续数字化奠定了坚实的基础。

2.2 微机保护的诞生与普及

若说IC保护是量变,微机保护的出现则是质的飞跃。20世纪70年代末至80年代初,微型计算机(单片机)技术飞速发展,第一代微机保护装置诞生。它将被保护元件的模拟信号经处理转换为数字信号输入微处理器,微处理器按预设算法运算分析,满足故障判据便发出跳闸命令,“硬件通用化、功能软件化”的模式改变了继电保护设计哲学。其优势划时代:计算与逻辑处理能力强,能实现复杂算法,提升保护性能;自适应性与灵活性高,保护定值等可软件在线修改,适应电网变化;自检与通信功能强大,能自检故障,便于构成综合自动化系统;还能多功能集成,简化二次回路、降低成本。自20世纪90年代起,微机保护凭借优势迅速取代前代产品,成为继电保护主流,至今仍是电网现场主力装备。

3 数字化与智能化时代的继电保护(21世纪初至今)

进入21世纪,信息技术、通信技术和人工智能的爆炸式发展,深刻地重塑了继电保护的技术生态。

3.1 基于IEC61850的数字化保护

传统微机保护虽然内部已数字化,但其对外接口仍依赖于大量的硬接线(电缆),存在信息孤岛、扩展性差、维护成本高等问题。国际电工委员会(IEC)发布的IEC 61850标准,为变电站自动化系统提供了统一的通信架构、信息模型和服务接口。在IEC 61850框架下,互感器输出的模拟信号首先在过程层被电子式互感器(EVT/ECT)或合并单元(MU)转换为遵循IEC 61850-9-2标准的采样值(SV)数字报文;开关状态等信息则通过面向通用对象的变电站事件(GOOSE)机制进行高速传输^[2]。保护装置作为间隔层的智能电子设备(IED),通过高速以太网接收SV和GOOSE报文,完成保护逻辑运算,并通过GOOSE发布跳闸命令。数字化保护彻底实现了“信息数字化、功能集成化、结构紧凑化、状态可视化”,不仅简化了二次回路,提高了系统可靠性,更为高级应用(如站域保护、广域保护)提供了统一、高效的信息交互平台。

3.2 广域保护与控制系统(WAPS/WACS)

传统继电保护是“就地化”的,仅利用本地或相邻站点的有限信息进行决策。随着电网互联程度加深和新能源大规模接入,局部故障可能引发连锁反应,导致大范围停电。广域保护与控制系统(WAPS/WACS)应运而

生。WAPS利用同步相量测量单元(PMU)构成的广域测量系统(WAMS),能够以高精度时间同步(GPS/北斗)的方式,实时获取全网关键节点的电压、电流相量(即“电网动态画像”)。中央决策单元基于这些全局信息,运用先进的状态估计、稳定分析和优化控制算法,可以在毫秒至秒级的时间尺度内,协调多个变电站的保护与控制装置,实施最优的切机、切负荷、解列等紧急控制措施,有效遏制事故蔓延,提升电网的整体韧性。

3.3 人工智能与大数据驱动的智能保护

面对新型电力系统中海量、高维、非线性的运行数据,以及传统基于物理模型的保护方法在应对复杂扰动(如高阻接地、振荡与短路的区分、逆变器故障特性)时的局限性,人工智能(AI)技术展现出巨大潜力。(1)机器学习(ML):利用支持向量机(SVM)、随机森林(RF)等算法,可以从历史故障录波数据中学习故障模式,构建高精度的故障分类与识别模型。(2)深度学习(DL):卷积神经网络(CNN)擅长处理时序信号(如一维电流波形),可用于故障检测与定位;图神经网络(GNN)则能有效建模电网的拓扑结构,用于广域协同保护。(3)知识图谱:将电网设备、保护规则、运行经验等知识结构化,构建保护领域的知识图谱,辅助进行故障推理和决策^[3]。AI驱动的保护不再仅仅依赖于预设的数学方程,而是通过数据驱动的方式,挖掘隐藏在海量数据背后的复杂规律,有望实现更高水平的自适应、自学习和自愈能力。

4 面向新型电力系统的未来挑战与发展趋势

以“双高”(高比例可再生能源、高比例电力电子设备)为主要特征的新型电力系统,给传统继电保护原理带来了前所未有的挑战,也指明了未来的发展方向。

4.1 核心挑战

故障电流特性的根本性改变:传统同步发电机提供的故障电流具有幅值大、衰减慢、含有丰富谐波和直流分量的特点。而以光伏、风电为代表的新能源,通过电力电子变流器(逆变器)并网,其故障电流受控于变流器的控制策略,通常被限制在额定电流的1.1~2倍,且呈现非正弦、非线性、甚至无明确相位关系的“类恒流源”特性。这使得依赖于电流幅值和相位的传统保护(如过流、距离保护)的灵敏度和可靠性大幅下降。(2)系统惯量降低与频率稳定性问题:同步发电机转子储存的巨大动能(系统惯量)是电网抵御功率扰动、维持频率稳定的关键。新能源发电不提供或仅提供虚拟惯量,导致系统整体惯量水平下降,频率变化率(RoCoF)急剧增大。这要求保护与控制必须更快响应,传统的基于频率

缓慢变化的失步、低频减载等保护面临严峻考验。(3) 宽频带振荡与谐振风险:大量电力电子设备的接入,引入了复杂的控制环路和非线性动态,容易在次/超同步频段(几Hz到几百Hz)激发新的振荡模式。这些宽频带动态过程超出了传统工频保护的观测范围,可能导致保护误动或拒动。

4.2 未来发展趋势

4.2.1 基于故障行波与暂态量的超高速保护

行波在输电线路上的传播速度接近光速,利用故障瞬间产生的行波进行保护,理论上可以实现无时限、不受系统运行方式和故障电阻影响的全线速动。结合高速采样(MHz级)和先进的信号处理技术(如小波变换、Hilbert-Huang变换),行波保护有望成为未来超/特高压骨干网架的主保护。

4.2.2 构网型(Grid-Forming,GFM)控制与保护协同

未来的新能源变流器将从当前的“跟网型”(Grid-Following, GFL)向“构网型”(GFM)演进。GFM变流器能够主动建立并维持电网电压和频率,其动态特性更接近于同步机^[4]。这为重新设计与之匹配的保护原理(如基于虚拟阻抗的距离保护)创造了条件,实现源-网-荷-储的深度协同。

4.2.3 “云-边-端”协同的智能保护体系

构建一个分层的智能保护架构。终端(端)负责高速、可靠的本地保护;边缘计算节点(边)负责区域内的信息融合与协同决策(如站域保护);云端(云)则利用大数据和AI模型,进行全网态势感知、保护定值在线校核、故障预测与健康诊断(PHM)。三者通过高速、安全的通信网络紧密协同,形成一个兼具速动性、选择性和全局最优性的保护体系。

4.2.4 数字孪生赋能的保护仿真与验证

利用数字孪生技术,在虚拟空间中构建与物理电网完全镜像的高保真模型。可以在该模型上对新型保护原理、算法和策略进行海量、高效的仿真测试和验证,极大缩短研发周期,降低现场试验风险,确保新方案的安全可靠。

5 结语

电力系统继电保护原理的发展是一部与电网共成长、与技术同进步的壮丽史诗。从笨重的电磁铁到精密的微处理器,再到依托于高速通信网络和人工智能的智能体,继电保护始终在追求更快、更准、更可靠、更智能的目标。当前,我们正站在一个历史性的十字路口。以新能源为主体的新型电力系统对传统保护范式提出了根本性挑战,但也孕育着前所未有的创新机遇。未来的继电保护将不再是孤立的“故障切除器”,而是深度融入电网运行控制体系的“智能决策单元”。它将充分利用数字化、网络化、智能化的技术红利,从被动响应转向主动防御,从局部最优走向全局协同。唯有持续推动理论创新、技术融合与工程实践,才能构建起足以支撑新型电力系统安全稳定运行的下一代继电保护体系,为全球能源转型和“双碳”目标的实现保驾护航。

参考文献

- [1]朱文婷,刘莹.电力系统自动化和继电保护技术的协同应用与优化[J].光源与照明,2025,(10):163-165.
- [2]张嘉业.新型电力系统下继电保护技术的应用与优化策略[J].电工技术,2025,(17):188-190+193.
- [3]黄康.智能化继电保护系统在电力系统中的应用及其发展趋势[J].光源与照明,2025,(12):245-247.
- [4]刘赞.电力系统继电保护装置的智能化发展趋势与关键技术研究[N].山西市场导报,2025-04-08(015).DOI:10.44302/n.cnki.nscdb.2025.000148.