

电力系统中的继电保护自动化技术应用研究

江绍明

中国电建集团江西省电力建设有限公司 江西 南昌 330000

摘要: 在电力系统规模持续扩大、运行环境日益复杂的背景下,保障电网安全稳定成为核心挑战。本文聚焦电力系统中的继电保护自动化技术应用展开研究。首先阐述该技术在电力系统中应用的优势,包括提升故障处理效率、增强系统稳定性及提高保护系统可靠性。接着详细介绍其在输电线路、变压器、发电机和配电网等环节的具体应用。最后探讨其发展趋势,如智能化水平深度提升、与新能源并网深度融合、通信与信息安全强化以及一体化与协同化发展。旨在为电力系统中继电保护自动化技术的进一步发展与应用提供理论参考。

关键词: 电力系统; 继电保护; 自动化技术; 发展趋势

引言:随着电力行业的快速发展,电力系统的规模不断扩大,结构也日益复杂,这对电力系统的安全稳定运行提出了更高要求。继电保护作为保障电力系统安全的关键防线,其重要性愈发凸显。传统的继电保护方式在应对复杂多变的电力系统故障时,逐渐暴露出一些局限性。而继电保护自动化技术凭借其高效、精准等优势,成为当前电力系统保护领域的研究热点。深入研究该技术在电力系统中的应用,对于提升电力系统运行水平、保障电力供应安全可靠具有重要的现实意义。

1 电力系统中应用继电保护自动化技术的优势

1.1 提升故障处理效率

在电力系统中,继电保护自动化技术能显著提升故障处理效率。当系统出现故障时,它可快速、精准地检测到故障位置与类型。传统保护方式需人工逐步排查,耗时久且易出错。而自动化技术借助先进传感器与智能算法,瞬间完成故障分析判断,并迅速发出跳闸指令,隔离故障区域,防止故障扩大。同时,还能及时将故障信息上传至控制中心,为运维人员提供详细数据,辅助其快速制定修复方案,大幅缩短故障处理时间,减少停电损失,保障电力供应的连续性。

1.2 增强电力系统稳定性

电力系统稳定运行关乎社会各行业的正常运转。继电保护自动化技术是增强其稳定性的重要保障。该技术能实时监测电力系统的各项参数,如电压、电流、频率等。一旦参数出现异常波动,超出安全范围,自动化装置会立即动作,切除故障元件,避免故障蔓延引发系统崩溃。而且,它还能根据系统运行状态自动调整保护策略,适应不同工况,确保系统在各种复杂情况下都能保持稳定运行,有效降低大面积停电事故的发生概率,提升电力系统的抗干扰能力和稳定性。

1.3 提高保护系统可靠性

保护系统的可靠性是电力系统安全运行的基础。继电保护自动化技术通过多重冗余设计和先进的自诊断功能,极大提高了保护系统的可靠性。冗余设计使得系统中部分元件出现故障时,其他元件仍能正常工作,保证保护功能不间断。自诊断功能可实时监测装置自身的运行状态,及时发现硬件故障或软件异常,并发出警报。同时,自动化技术还能定期对保护装置进行校验和测试,确保其性能始终处于最佳状态,减少误动作和拒动作的发生,为电力系统提供可靠的保护^[1]。

2 继电保护自动化技术在电力系统中的具体应用

2.1 输电线路保护

(1) 距离保护应用。距离保护通过测量故障点至保护安装处的阻抗判断故障位置,其动作时间与阻抗值成反比,实现“故障越近、动作越快”的选择性切除。该技术核心在于阻抗继电器,其类型包括全阻抗、方向阻抗及四边形特性继电器等,通过 0° 接线方式消除故障类型对测量阻抗的影响。例如,在220kV线路中,距离保护I段整定阻抗通常为线路全长的80%-85%,动作时间小于0.1秒,可快速切除近端故障;II段延伸至相邻线路,动作时限按阶梯原则整定,作为后备保护;III段按躲过最小负荷阻抗整定,覆盖本线路及下一线路全长,动作时限最长。自适应控制技术的应用进一步提升了距离保护的适应性,例如通过实时调整动作特性应对系统频率波动、过渡电阻影响及振荡闭锁需求,确保在复杂工况下仍能准确动作。(2) 差动保护应用。差动保护基于基尔霍夫电流定律,通过比较线路两端电流矢量和判断故障。正常运行时,两端电流矢量和为零;内部故障时,矢量和不为零,保护装置迅速动作切除故障。该技术具有灵敏度高、选择性好、动作速度快等优势,尤其适用

于高压长距离输电线路。例如,在500kV线路中,差动保护动作时间可缩短至20毫秒以内,远快于距离保护。为应对CT饱和、充电电流及励磁涌流等干扰,现代差动保护采用二次谐波制动、波形对称识别及虚拟阻抗补偿等技术,提升抗干扰能力。此外,光纤通信技术的发展使线路两端电流数据同步传输成为可能,进一步增强了差动保护的可靠性。

2.2 变压器保护

(1) 瓦斯保护应用。瓦斯保护是变压器内部故障的主保护,基于故障时绝缘材料分解产生的气体触发动作。当变压器内部发生轻微故障(如局部过热、匝间短路)时,绝缘油分解产生少量气体,聚集在瓦斯继电器顶部,触发轻瓦斯报警信号,提示运维人员检查;若故障加剧(如内部短路、铁芯故障),气体快速涌出并带油流冲击挡板,触发重瓦斯跳闸信号,直接切除变压器电源。例如,在110kV变压器中,瓦斯继电器动作时间可控制在0.1秒内,远快于外部保护动作时间。该保护无需外部电源,动作可靠性高,但需定期校验瓦斯继电器密封性及触点灵敏度,防止因气体滞留或触点氧化导致误动或拒动。(2) 差动保护在变压器的应用。变压器差动保护通过比较各侧电流矢量和判断故障,具有灵敏度高、选择性强、动作速度快等优势。其原理基于基尔霍夫电流定律,正常运行时各侧电流矢量和为零;内部故障时,矢量和不为零,保护装置动作切除变压器。为应对变压器励磁涌流、CT饱和及变比不一致等干扰,现代差动保护采用二次谐波制动(识别励磁涌流)、波形对称识别(区分故障电流与涌流)及虚拟阻抗补偿(消除CT误差)等技术。例如,在220kV变压器中,差动保护动作时间可缩短至20毫秒以内,且通过自适应整定算法动态调整保护定值,适应变压器运行工况变化。

2.3 发电机保护

(1) 纵差动保护应用。纵差动保护是发电机内部故障的主保护,通过比较发电机定子绕组两端电流矢量和判断故障。正常运行时,两端电流矢量和为零;内部故障(如相间短路、匝间短路)时,矢量和不为零,保护装置动作切除发电机电源。该保护具有灵敏度高、选择性强、动作速度快(动作时间 $\leq 20\text{ms}$)等优势,尤其适用于大型发电机组。为应对励磁涌流、CT饱和及外部故障穿越电流等干扰,现代纵差动保护采用二次谐波制动(识别励磁涌流)、波形对称识别(区分故障电流与涌流)及虚拟阻抗补偿(消除CT误差)等技术。例如,在600MW汽轮发电机中,纵差动保护可快速切除定子绕组短路故障,避免故障扩大至铁芯烧毁。(2) 失磁保护应

用。失磁保护是防止发电机因励磁系统故障导致进相运行或失步振荡的关键保护。当发电机励磁电流消失或严重不足时,定子电流增大、电压下降,机组进入异步运行状态,可能引发系统电压崩溃。失磁保护通过监测励磁电压、定子电流及功率因数等参数,综合判断失磁状态。例如,当励磁电压低于整定值且定子电流超限、功率因数滞后时,保护装置动作于减负荷或跳闸。现代失磁保护采用自适应整定算法,动态调整保护定值以适应不同运行工况(如空载、负载、进相运行)。此外,结合PMU(同步相量测量单元)技术,可实时监测发电机功角,提升失磁保护的决策精准性,保障发电机与电网的同步稳定运行。

2.4 配电网保护

(1) 过电流保护应用

过电流保护是配电网中最基础且广泛应用的保护方式,其原理是通过检测电流超过整定值时触发动作,切除故障线路。该保护需根据配电网的拓扑结构与负荷特性分级配置:靠近电源侧的保护整定值较大、动作时限较长,作为后备保护;靠近负荷侧的保护整定值较小、动作时限较短,实现快速切除近端故障。为应对短路故障与过负荷的差异化需求,过电流保护通常分为速断保护(瞬时动作,切除严重短路)与定时限过流保护(按预设时限动作,兼顾选择性)。现代配电网中,过电流保护结合智能算法实现自适应整定,可根据实时负荷与故障特征动态调整定值,避免因定值固定导致的误动或拒动,同时通过与分布式电源(DG)的协调控制,确保含DG配电网的故障隔离与供电恢复能力。(2) 自动重合闸应用。配电网提升供电可靠性的核心技术,其通过在故障切除后自动合闸恢复供电,有效应对瞬时性故障(如雷击、异物接触)。配电网中,自动重合闸需与过电流保护、分段开关等设备协同工作:当保护动作跳闸后,重合闸装置启动计时,在预设延时(通常0.5-1.5秒)后合闸,若故障为瞬时性则恢复供电,若为永久性则再次跳闸并闭锁重合闸。为适应分布式电源接入与多电源环网结构,现代自动重合闸采用分布式控制策略,通过通信技术实现各开关的同步协调,避免非同期合闸冲击^[2]。

3 电力系统中应用继电保护自动化技术的发展趋势

3.1 智能化水平深度提升

未来继电保护自动化将深度融合人工智能技术,实现从“规则驱动”到“数据驱动”的转变。通过机器学习算法,保护装置可自动提取故障特征并优化动作策略,例如利用深度神经网络分析暂态电流波形,精准识别复杂故障类型;强化学习技术可动态调整保护定值,

根据系统运行状态（如负荷波动、新能源出力）实时优化灵敏度与选择性。同时，智能体技术将推动保护装置的自主决策能力，在分布式电源接入场景中，多智能体协同框架可实现故障区段的快速定位与隔离，减少对控制中心的依赖。此外，数字孪生技术将构建电力系统的虚拟镜像，通过仿真推演验证保护策略的有效性，提前预判潜在风险，实现从“被动响应”到“主动预防”的智能化升级。

3.2 与新能源并网深度融合

随着新能源占比持续提升，继电保护需适应其随机性、间歇性及低惯量特性。未来保护技术将针对逆变型电源开发专用算法，例如通过分析电压暂降深度与持续时间识别光伏阵列故障，或利用直流侧电流谐波特征检测储能系统内部短路。同时，构建源网荷储协同保护体系，通过信息共享实现保护装置的联动控制：在风电场集电线路故障时，保护装置可联合风机变流器调整控制策略，限制故障电流幅值，为保护动作创造条件。此外，针对新能源场站的孤岛效应，保护技术将融合主动式检测方法（如阻抗测量法），确保故障时快速隔离并网设备，保障人身与设备安全，推动新能源与电网的深度协同运行。

3.3 通信与信息安全强化

继电保护系统的数字化、网络化转型对通信与信息安全提出更高要求。未来将采用5G/6G低时延通信技术，通过切片技术为保护业务分配专用带宽，确保故障信号的实时可靠传输。同时，量子加密技术将应用于保护装置间的通信链路，利用量子密钥分发（QKD）防止数据窃听与篡改，提升系统抗网络攻击能力。在信息安全层面，基于区块链的分布式信任机制可构建保护装置的身份认证体系，确保设备接入的合法性；入侵检测系统（IDS）将实时监测保护终端的异常行为，例如通过分析操作日志识别恶意代码注入或定值篡改攻击。此外，标

准化的安全协议（如IEC62351）将统一保护设备的安全配置要求，推动全行业信息安全防护水平的整体提升。

3.4 一体化与协同化发展

继电保护将向“站-线-变-户”一体化方向演进，通过统一数据平台实现保护、测控、计量等功能的深度融合。在智能变电站中，保护装置将集成故障录波、电能质量监测等功能，减少设备重复配置，降低系统复杂度。同时，协同化保护将成为主流，通过区域协同控制实现故障的快速隔离与供电恢复：在配电网中，分布式保护装置可基于GOOSE通信协议实现级联跳闸，将故障隔离时间缩短至毫秒级；在输电网中，广域保护系统通过整合多站信息，可精准定位故障区段并优化切除策略，避免大面积停电。此外，保护与自动化系统的协同将延伸至需求响应领域，在故障恢复阶段结合用户侧可中断负荷信息，动态调整供电路径，实现故障影响最小化与资源利用最大化的双重目标^[3]。

结束语

电力系统继电保护自动化技术作为保障电网安全稳定运行的核心手段，其发展始终与电力工业的变革同频共振。从传统机械式保护到智能化、数字化保护，技术迭代不仅提升了故障处理的速度与精度，更推动了新能源消纳、多能互补等新型电力系统形态的落地。未来，随着人工智能、量子通信等前沿技术的深度融合，继电保护将实现从“被动防御”到“主动免疫”的跨越，构建起覆盖源网荷储的全场景安全防护体系。

参考文献

- [1]彭娇.继电保护自动化技术在电力系统中的应用[J].通信电源技术,2022,36(12):121+123.
- [2]赵福娟.继电保护自动化技术在电力系统中的应用研究[J].通信电源技术,2022,36(10):122-123.
- [3]姚伟平.继电保护自动化技术在电力系统中的应用[J].通讯世界,2021,26(09):317-318.