

电力系统中电气主设备继电保护技术分析

潘畴宇 王 健

中国华电集团贵港发电有限公司 广西 贵港 537102

摘要：本文围绕电力系统电气主设备继电保护技术展开分析，阐述了变压器、发电机等核心设备的特性及常见故障，介绍了各类设备的继电保护核心技术与应用场景，剖析了当前技术应用中存在的装置误动拒动、配置不合理等问题及技术、管理层面原因，提出了算法优化、设备升级等针对性解决方案，并展望了智能化、数字化、协同化发展趋势，为提升电力系统电气主设备继电保护可靠性、保障电力系统稳定运行提供理论与实践参考。

关键词：电力系统；电气主设备；继电保护技术

引言：电气主设备是电力系统电能产生、转换与传输的核心，其运行稳定性直接决定电力系统安全与供电可靠性。继电保护技术作为电力系统的“安全卫士”，是防范设备故障、遏制故障扩大的关键。随着电力系统向大容量、高电压发展及新能源广泛接入，传统继电保护技术面临诸多挑战。本文系统分析其基础理论、应用现状、现存问题及优化策略，对推动电力系统高质量发展具有重要现实意义。

1 电力系统电气主设备及继电保护基础理论

1.1 电力系统电气主设备核心类型及特性

(1) 变压器：能量转换核心设备，主要由铁芯、绕组、油箱等组成，具有变压、变流的核心功能，运行关键参数包括额定容量、变比、短路电压等，其结构特性决定了电能转换的效率和稳定性，是电力系统中连接不同电压等级的关键设备。(2) 发电机：电能产生核心设备，基于电磁感应原理将机械能转化为电能，运行中转速、电压、频率为核心参数，故障敏感点主要集中在定子绕组、转子回路，易出现过热、绝缘损坏等问题，直接影响电能输出质量。(3) 母线与输电线路：电能传输与汇集关键载体，母线用于汇集和分配电能，结构紧凑、导电性能优良；输电线路分为架空线和电缆线，需满足载流量、绝缘强度要求，其运行稳定性直接决定电能传输的安全性和可靠性。

1.2 电气主设备常见故障类型及危害

(1) 短路故障：最常见且危害最大的故障，相间短路由导线绝缘破损、误操作等导致，表现为电流骤增、电压骤降；接地短路多因线路对地绝缘失效引发，易产生零序电流，破坏系统平衡。(2) 设备内部故障：属于隐蔽性故障，变压器匝间短路由绕组绝缘老化、过电压导致，发电机定子绕组故障多为绝缘破损、局部过热引发，此类故障初期不易察觉，易扩大为严重故障。(3)

故障危害：会直接损坏设备绕组、铁芯等核心部件，导致设备报废；破坏电力系统运行稳定性，引发系统振荡甚至瓦解，同时造成大量电能损耗，带来显著经济损失^[1]。

1.3 继电保护核心理论及基本要求

(1) 核心理论：以故障检测为基础，通过采集电气量异常信号识别故障，利用逻辑判断确定故障位置，最终通过执行部分隔离故障区域，核心逻辑是区分正常运行与故障状态，快速响应异常。(2) 基本要求：选择性要求只切除故障部分，不影响非故障区域；速动性要求快速动作，减少故障影响；灵敏性要求准确识别轻微故障；可靠性要求避免误动、拒动，保障保护系统稳定运行。(3) 继电保护系统的组成：测量部分负责采集电压、电流等电气量；逻辑判断部分分析信号，确定故障类型和位置；执行部分接收指令，发出跳闸、告警信号，实现故障隔离。

2 电力系统电气主设备继电保护核心技术及应用

2.1 变压器继电保护技术及应用

(1) 主保护技术：差动保护基于基尔霍夫电流定律，通过比较变压器两侧电流差值识别内部故障，配置时需保证接线方式与变压器绕组接线匹配，避免因接线错误导致误动；瓦斯保护针对油箱内故障，轻瓦斯因油位下降或轻微故障告警，重瓦斯因严重故障跳闸，配置时需确保瓦斯继电器动作灵敏可靠，定期校验。(2) 后备保护技术：复合电压闭锁过流保护适用于应对外部短路，在电压降低、电流增大的双重条件下动作，避免单一过流误动；零序保护针对变压器接地故障，适配中性点接地运行方式，保障接地故障快速切除；过励磁保护用于防止变压器铁芯过热，根据额定电压和频率设定动作阈值，应对过电压或低频导致的过励磁问题。(3) 应用实例：大容量主变压器配置差动+瓦斯双重主保护，搭配复合电压闭锁过流、零序等多重后备保护，运行稳

定且故障响应迅速；小容量配电变压器简化配置，以过流保护为主，兼顾经济性与可靠性，可有效避免故障扩大，满足配网供电需求。

2.2 发电机继电保护技术及应用

(1) 主保护技术：发电机差动保护通过比对发电机定子绕组两侧电流，精准检测相间短路，采用比率制动特性提升抗干扰能力；定子绕组匝间短路保护根据绕组结构，采用零序电压法或负序功率法实现，可有效识别匝间、层间短路。(2) 后备保护技术：负序电流保护针对不对称故障，通过检测负序电流判断故障，防止转子过热损坏；失磁保护实时监测发电机励磁状态，当励磁消失时及时动作，避免发电机异步运行；过负荷保护根据定子电流大小延时动作，提醒运维人员处理，保障设备长期安全运行^[2]。(3) 应用实例：大型发电机组采用双重化主保护配置，主保护与后备保护层配合，故障时可在毫秒级响应，快速隔离故障，避免机组损坏，同时减少停机带来的经济损失，保障电力系统稳定供电。

2.3 母线及输电线路继电保护技术及应用

(1) 母线保护：母线差动保护基于电流平衡原理，比较母线各支路电流差值识别故障，采用比率制动特性有效抗CT饱和，应用中需严格核对CT极性接线，避免因极性错误导致保护误动，确保动作准确性。(2) 输电线路保护：纵联差动保护可实现全线速动，动作速度快、灵敏度高，适用于短距离线路；距离保护根据故障点与保护安装处的阻抗判断故障位置，不受系统运行方式影响，适配长距离线路；零序过流保护针对性应对线路接地故障，动作可靠，广泛应用于各类输电线路。(3) 辅助保护：自动重合闸与线路保护协同工作，线路发生瞬时故障后，自动重合恢复供电，提升供电可靠性；断路器失灵保护在断路器拒动时，快速切除相关元件，防止故障蔓延，保障系统整体稳定^[3]。

2.4 继电保护装置的选型与配置原则

(1) 选型依据：结合设备容量和电压等级确定保护装置规格，匹配设备运行参数；根据户外、高温、潮湿等运行环境，选择对应防护等级的装置；同时严格满足继电保护选择性、速动性、灵敏性和可靠性的核心要求。(2) 配置原则：重要电气设备采用双重化配置，确保一套保护故障时，另一套可正常工作，提升保护可靠性；上下级保护需合理匹配动作时限和灵敏度，避免越级跳闸，保障保护逻辑连贯，确保故障时仅切除故障部分。

3 电力系统电气主设备继电保护技术应用存在的问题及原因分析

3.1 继电保护技术应用中的核心问题

(1) 保护装置误动、拒动问题：故障案例及表现形式，误动多发生在系统扰动或电磁干扰时，如雷雨天气导致保护装置误发跳闸指令，造成非故障设备停运；拒动则表现为设备发生故障时，保护装置未及时动作，导致故障扩大，如变压器内部短路时瓦斯保护未跳闸，造成设备烧毁。(2) 保护配置不合理问题：与设备特性、系统运行方式不匹配的具体表现，部分大容量变压器未配置双重化主保护，单一保护故障时无备用保障；部分线路保护配置未结合系统负荷变化调整，导致保护灵敏度不足，无法识别轻微故障。(3) 技术适配性不足：新能源接入对传统继电保护技术的挑战，风电、光伏等新能源出力波动大，导致系统电流、电压特性变化，传统保护算法难以精准识别故障与正常波动，易出现误动、拒动，影响系统稳定。

3.2 问题产生的技术层面原因

(1) 保护算法缺陷：传统算法对复杂故障的识别精度不足，多针对单一故障设计，对相间接地、匝间短路等复杂故障的识别能力较弱，且抗干扰能力差，易受谐波、电磁扰动影响，导致判断失误。(2) 设备性能不足：互感器精度、保护装置稳定性等硬件问题，电流、电压互感器精度不达标，采集的电气量信号存在偏差，影响保护判断；部分老旧保护装置元器件老化，运行稳定性下降，易出现误动作或拒动作^[4]。(3) 技术更新滞后：新型电气主设备与传统保护技术的适配性差距，新型大容量、高电压设备不断投入使用，其运行特性与传统设备差异较大，而传统保护技术未及时更新，无法适配新型设备的运行需求。

3.3 问题产生的管理与运维层面原因

(1) 整定计算不科学：未结合系统运行变化及时调整整定值，系统负荷增减、设备投退等运行方式变化后，保护整定值未同步优化，导致保护灵敏度或选择性不足，无法适应实际运行工况。(2) 运维管理不到位：定期校验、故障排查不及时，部分运维单位未严格执行保护装置定期校验制度，导致装置性能下降；故障排查不及时，小隐患逐步扩大，引发保护装置故障。(3) 人员专业能力不足：运维人员对新型保护技术的掌握不够，随着继电保护技术向智能化、数字化发展，部分运维人员缺乏相关专业培训，对新型装置的操作、调试和故障处理能力不足，影响保护系统正常运行。

4 电力系统电气主设备继电保护技术优化策略及发展趋势

4.1 继电保护技术优化策略

(1) 算法优化：引入智能算法，提高故障识别精度

和响应速度,结合人工智能、机器学习等先进技术,对电力系统复杂故障信号进行精准解析,有效区分故障与系统正常扰动、电磁干扰,优化算法逻辑以缩短响应时限,增强抗干扰性能,适配新能源接入后的复杂运行工况,提升保护装置对各类故障的识别可靠性。(2)配置优化:结合设备特性和系统运行方式,完善保护配置方案,针对不同容量、电压等级的电气主设备制定差异化配置策略,大容量关键设备严格落实双重化保护要求,小容量配电设备兼顾经济性与基本保护需求,根据系统负荷变化、新能源出力波动等情况动态调整配置,确保保护系统与实际运行工况高度匹配。(3)设备升级:推广高精度、高稳定性的智能保护装置及互感器,逐步淘汰老旧、性能不达标设备,选用具备抗干扰、高精度数据采集、远程监控功能的智能装置,搭配高精度电流、电压互感器减少信号采集偏差,推动保护装置模块化、标准化建设,提升设备运行稳定性,方便后期安装调试与日常维护。

4.2 运维管理优化措施

(1)完善整定计算体系:建立动态整定机制,适配系统运行变化,结合系统负荷增减、设备投退、新能源出力波动等实际情况,定期开展整定计算复核与调整工作,建立整定计算数据库实现动态管理,采用智能化工具提升整定效率与准确性,确保整定值贴合系统运行需求,保障保护装置可靠动作。(2)强化运维管控:建立定期校验、故障预警及快速排查机制,严格执行保护装置定期校验制度,明确校验周期与标准,及时排查设备潜在隐患;搭建故障预警平台,实时监测保护装置运行状态,提前预判故障风险,制定标准化快速排查流程,明确责任分工与处置时限,最大限度减少故障停机损失^[5]。(3)提升人员专业能力:加强技术培训,适配新型保护技术发展,制定针对性培训计划,重点涵盖智能保护装置操作、调试、故障处理及新型技术应用等内容,定期组织培训与技能考核,鼓励运维人员开展技术交流,学习先进经验,全面提升其对智能化、数字化保护技术的掌握与应用能力。

4.3 继电保护技术发展趋势

(1)智能化发展:人工智能、大数据在故障诊断和保护控制中的应用日益深入,通过整合电力系统运行数据、故障历史数据,利用智能算法实现故障精准诊断、提前预判及自适应控制,提升保护装置自主学习与决策能力,减少人工干预,大幅提高保护系统的响应效率与运行可靠性。(2)数字化发展:加快基于IEC61850标准的数字化保护系统建设,统一通信协议与数据格式,实现保护装置、互感器、监控系统的数字化互联互通,打破传统系统的信息孤岛,推广数字化采样与传输技术,为保护控制、系统调度提供精准、高效的数据支撑,助力电力系统数字化转型。(3)协同化发展:推动继电保护与电力系统调度、运维工作的协同联动,建立健全故障信息实时共享与协同处置机制,实现保护动作与调度指令的精准配合,优化故障隔离与系统恢复流程,进一步提升电力系统整体运行稳定性与供电可靠性,适配新型电力系统高质量发展需求。

结束语

综上所述,电力系统电气主设备继电保护技术是保障电力系统安全稳定运行的核心支撑,其发展与电气主设备特性、系统运行需求紧密相关。当前该技术在应用中仍存在诸多亟待解决的问题,需通过技术优化、运维升级、人员赋能逐步完善。未来,随着人工智能、数字化技术的深度融合,继电保护技术将向更智能、更高效、更协同的方向发展,为新型电力系统的安全稳定运行提供更坚实的保障。

参考文献

- [1]伏成志.电力系统继电保护中的隐性故障分析[J].集成电路应用,2023,40(10):230-231.
- [2]赵相丞.电气自动化系统继电保护安全技术的应用研究[J].品牌与标准化,2023,7(S1):166-169.
- [3]田琨.电力系统中继电保护自动化技术分析[J].科技资讯,2024,22(22):62-64.
- [4]何洋,赵中坤.电力系统中的自动化继电保护技术探析[J].电力设备管理,2024,23(18):59-61.
- [5]王晟.电力系统中自动化继电保护技术的应用和发展方向[J].光源与照明,2023,15(11):219-221.