

电力系统中继电保护与自动化装置研究

孙 杰

大唐黄岛发电有限责任公司 山东邹城 266000

摘要: 随着电厂建设规模逐渐扩大, 电力行业发展趋势智能化, 电力系统结构日益复杂化。本文系统梳理了继电保护技术的基本原理、装置分类及性能指标, 分析了自动化装置的核心功能与智能电网中的高级应用, 探讨了通信技术对系统协同的支撑作用, 并提出了继电保护与自动化装置协同优化的策略。研究结果表明, 通过冗余设计、数字化管理、环境适应性优化及智能化升级, 可显著提升电力系统应对故障的能力, 为新型电力系统建设提供技术保障。

关键词: 电力系统; 继电保护; 自动化装置; 智能电网; 协同优化

引言

我国电网覆盖范围持续扩大, 电气设备运行环境复杂化, 叠加新能源大规模接入带来的波动性, 对电力系统故障快速隔离与自愈能力提出更高要求。继电保护作为电网安全运行的“第一道防线”, 需在毫秒级时间内完成故障识别与断路器动作; 自动化装置则通过实时监测与智能控制, 实现电网运行状态的动态优化。二者协同工作效能直接影响电网的可靠性、安全性与经济性。本文从技术原理、功能实现及协同优化三方面展开研究, 为电力系统智能化升级提供理论支持。

一、继电保护技术

(一) 继电保护基本原理

继电保护通过采集电气量(电流、电压、功率因数等)与非电气量(温度、气体成分等)变化特征, 基于故障前后物理量差异构建保护逻辑。例如, 短路故障导致电流突增、电压骤降, 保护装置通过比较测量值与整定值触发跳闸信号; 不对称故障(如单相接地)产生负序、零序分量, 差动保护利用双侧电流矢量和差异实现精准定位。以220kV线路保护为例, 速断保护动作时间 $\leq 0.04s$, 过流保护延时 $0.5\sim 1.5s$, 兼顾速动性与选择性需求。

(二) 保护装置组成与分类

电力系统继电保护装置作为保障电网安全的核心设备, 其组成结构与功能分类紧密围绕故障识别与隔离需求展开。硬件层面, 保护装置以微处理器为核心, 集成数据采集单元(含电流/电压互感器、模数转换芯片)、逻辑处理单元(基于DSP或FPGA实现保护算法)及执行输出单元(驱动断路器分合闸的继电器回路), 部分智

能装置还配备人机交互界面与通信模块, 支持定值修改与远程监控。软件层面, 装置运行嵌入式操作系统, 通过差动保护算法、距离保护阻抗计算、方向元件功率判据等核心逻辑, 实现对短路、接地、过载等故障的精准识别。按保护对象划分, 线路保护涵盖距离保护(利用阻抗变化定位故障距离)、纵联保护(通过通道交换两侧电气量实现全线速动); 变压器保护包含差动保护(比较高低压侧电流矢量和)、瓦斯保护(监测油流速度与气体积累); 发电机保护则涉及失磁保护(检测转子磁场衰减)、定子接地保护(测量零序电压)。技术迭代推动装置向数字化、智能化演进, 微机保护通过高速采样(采样率达1kHz以上)与精密算法提升灵敏度, 智能保护集成AI故障诊断模块, 可自适应电网运行方式变化, 而广域保护系统通过多装置信息交互, 实现跨区域故障协同处置, 为复杂电网提供更可靠的防护屏障。

(三) 关键性能指标

继电保护装置的性能优劣直接决定电网故障处置效能, 其关键指标需在速动性、选择性、灵敏性与可靠性间实现动态平衡。速动性要求装置在故障发生后以最短时间切除故障, 例如220kV线路近端短路时, 保护动作时间需控制在40ms以内, 结合断路器分闸时间(约60ms), 总切除时间不得超过100ms, 以限制短路电流对设备的热效应与动稳定冲击。选择性通过阶梯式保护配置实现, 如馈线保护设置速断(瞬时动作)、限时速断(延时0.5s)与过流(延时1~2s)三段式保护, 确保仅故障区段被隔离, 避免越级跳闸导致停电范围扩大。灵敏性以灵敏系数量化, 距离保护在最小运行方式下两相短路时, 灵敏系数需 ≥ 1.25 , 变压器差动保护则要求制动系数与拐点电流合理匹配, 防止区外故障时因CT饱和误动。

二、电力系统自动化装置技术

(一) 自动化装置的核心功能

电力系统自动化装置是电网智能化运行的“神经中枢”，具有数据感知、决策控制、状态优化能力等核心功能，是电网智能化发展的重要组成部分。实时监测功能是通过高精度的传感器网络来实现的，例如PMU（同步相量测量单元）能够以每秒100次的采样频率捕获电压、电流的幅度和相位信息，并结合温度、对气体密度和其他非电气量进行监测并构建了电网全维度的状态画像；智能控制功能是基于AGC（自动发电控制）和AVC（自动电压控制）系统来动态调整发电能力和无功补偿设备的，特别是在负荷突然增加的情况下，AGC能够在30秒的时间里使发电机的功率增加5%，确保系统的频率稳定在 $50 \pm 0.1\text{Hz}$ 范围内，而AVC则通过切换电容器组或调整变压器的分接头，确保母线电压的偏差维持在 $\pm 2\%$ 的范围内；故障的自我修复功能是通过分布式智能终端（DTU/FTU）来实现的。

随着新能源和储能技术的快速发展，储能系统在电力系统中的应用日益广泛。储能自动保护装置作为保障储能系统安全稳定运行的关键技术，其重要性日益凸显。储能自动保护装置通过实时监测储能电池的电压、电流、温度等关键参数，结合先进的保护算法，实现对储能系统的过充、过放、过流、短路及过热等故障的快速识别和隔离。具体而言，储能自动保护装置具备以下功能：（1）过充过放保护：当储能电池的电压超过设定上限或低于设定下限时，保护装置立即触发，切断充电或放电回路，防止电池损坏。（2）过流保护：实时监测储能系统的电流，当电流超过额定值时，保护装置在毫秒级时间内切断电路，防止因电流过大导致的设备损坏或火灾事故。（3）短路保护：通过快速识别短路故障特征，保护装置迅速切断短路电流，防止对储能系统和电网造成冲击。（4）温度保护：监测储能电池和关键设备的温度，当温度超过安全阈值时，启动散热系统或切断电源，防止热失控引发的安全事故。

(二) 智能电网中的高级应用

物联网技术将智能传感器布设于设备层，对变压器油温，开关柜局部放电和电缆接头温度等重要参数进行实时采集，以特高压变电站为例，光纤测温系统能够沿电缆线路每米设置1个测温点，使异常发热的检测准确度提高到 $\pm 1^\circ\text{C}$ ，并与LoRa无线通信相结合实现数据上传到云平台，所述降温装置在温度高于阈值的情况下被自动触发，所述告警信息被推送；大数据分

析是基于大量的运行数据来构建预测模型的，通过整合SCADA系统的实时数据、气象信息和历史故障记录，利用LSTM神经网络来预测未来24小时的负荷波动（准确率 $\geq 95\%$ ），负责指导电力生成计划的优化和设备的维修安排，以降低非计划性停运的比例达到30%；人工智能技术已经深入到故障检测和自我修复控制的各个环节中，基于深度学习技术的图像识别算法能够自动解析断路器的分合闸线圈电流波形，识别机械卡涩、辅助触点粘连等隐性故障（诊断准确率 $\geq 92\%$ ），而强化学习算法在微电网能量管理中动态调整储能充放电策略，通过光伏出力预测和负荷需求响应相结合的方法使弃光率由原来的下降到更低。

(三) 通信技术对自动化的支撑

通信技术是电网自动化运行的“神经网络”，以高速、可靠的数据传输支撑起智能调控的实时性与精准性。光纤通信凭借其大带宽（单纤可达Tb/s级）与低时延（毫秒级）特性，成为骨干网传输的主力，例如在特高压输电走廊中，光纤复合架空地线（OPGW）不仅承担通信功能，还能实时监测线路覆冰、舞动等状态，将监测数据同步传送至调控中心，为防灾减灾提供决策依据；5G技术以超低时延（1ms内）与海量连接能力赋能配网自动化，通过部署5G电力专网，智能分布式馈线自动化可在故障发生后200ms内完成区段定位与隔离，较传统方案提速10倍；工业以太网则以确定性传输特性保障厂站自动化设备间的数据同步，其时间同步精度可达微秒级，确保PMU相量测量、保护装置采样值等关键数据的时空一致性，为广域保护与动态稳定控制奠定基础。

三、继电保护与自动化装置的协同优化

(一) 冗余设计与可靠性提升

冗余设计是提升电力自动化系统可靠性的核心策略，通过多重备份与容错机制筑牢安全防线。硬件层面采用双通道并行架构，关键控制单元如CPU、电源模块均配置主备两套独立系统，主通道运行时备用通道实时自检，一旦检测到故障立即无缝切换，确保控制指令不间断输出，切换时间控制在毫秒级；通信链路实施“光纤+无线”双路由冗余，变电站自动化终端同时接入电力专网与5G公网，当光纤因施工意外中断时，系统自动切换至无线通道，数据传输时延波动小于100ms，保障遥测、遥信信息实时上传；软件层面引入看门狗技术与自愈算法，主程序循环执行关键状态监测，若发现任务卡死或数据异常，立即触发复位重启并从备份区恢复配置参数，结合CRC校验与冗余编码，将存储器数据误码率降至

10^{-12} 以下；此外，关键保护装置采用“三取二”表决逻辑，对同一电气量采集三路独立信号，仅当两路及以上信号一致时才执行跳闸指令，有效屏蔽单点故障引发的误动风险，系统可用率提升至99.995%。

（二）数字化管理与效率优化

数字化管理为电力系统效率优化注入强劲动能，通过数据贯通与智能分析重构运维模式。设备台账管理实现全生命周期数字化追踪，借助RFID标签与移动终端扫描，变压器、断路器等设备的投运日期、检修记录、缺陷台账等信息实时同步至云端，检修人员通过APP可快速调取设备“健康档案”，将现场作业准备时间缩短40%；运行监控依托数字孪生技术构建虚拟电厂模型，实时映射物理电网的拓扑结构、潮流分布与设备状态，当某条线路负载率突破80%时，系统自动叠加气象、负荷预测数据，生成转供方案并推送至调度员，决策效率提升60%；物资管理通过物联网传感器与智能仓储系统联动，库存物资的出入库、盘点、调拨全程自动化，智能货架利用重力感应与图像识别技术自动更新库存数量，误差率低于0.1%，结合需求预测算法动态调整采购计划，将库存周转率提高25%；此外，移动作业平台整合工单派发、现场签到、数据回传等功能，检修人员通过手持终端可实时接收任务指令，上传现场照片与试验数据，实现“无纸化”作业，单次任务处理时长平均减少1.5小时。

（三）环境适应性优化

环境适应性优化是保障电力自动化装置稳定运行的关键，需从材料选型、结构设计到智能调控多维度突破。设备外壳采用高强度铝合金与环氧树脂复合材料，既满足IP65防护等级要求，抵御沙尘、雨水侵袭，又能通过表面纳米涂层降低凝露风险，确保户外端子箱在 -40°C 至 70°C 温宽内电气性能稳定；散热系统融合自然对流与强制风冷技术，功率模块安装热管散热器，当温度超过 60°C 时，温控风扇自动启动，配合机柜顶部排风设计，将设备内部温差控制在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内，避免电子元件因过热失效；电磁兼容设计通过金属屏蔽层与滤波电路双重防护，抑制100kHz至1GHz频段内的电磁干扰，确保装置在变电站强电磁环境中可靠动作；此外，智能环境监测模块实时采集温湿度、盐雾浓度等参数，当检测到海边变电站盐雾值超标时，自动启动除湿装置并缩短设备巡检周期，通过“主动防御+动态响应”机制，将环境因素导致的故障率降低70%以上。

（四）智能化升级与协同控制

智能化升级赋予了电力自动化系统自主决策和全局协同的能力，促进了运行模式向着自适应和自优化的方

向进化。利用基于深度学习的故障预测模型，结合设备的历史运行数据、环境因素和相似的故障实例，能够提前72小时发出变压器套管绝缘老化的预警、针对GIS的局部放电等潜在风险，其准确性已经超过了90%，为预防性的维修工作提供了明确的方向；多智能体协同控制技术在微电网中的应用，将光伏逆变器，储能装置和可调负荷视为一个独立的智能体，利用分布式通信协议进行功率信息的实时共享，遇到云层遮挡造成光伏出力突然下降的情况，储能系统会在200ms之内对充放电策略进行调整，而负荷侧的智能插座则会对非关键设备进行自动关断，从而达到源网荷储的动态平衡；另外，利用数字孪生技术建立虚拟电网镜像并结合强化学习算法对不同运行条件下调控策略进行仿真，实现了新能源大发时段内弃风弃光最小化方案的自动产生，与传统人工调度相比提高了新能源消纳率；智能巡检机器人携带红外热成像及局部放电检测模块对开关柜和电缆沟按照预设路径进行独立巡查，并将数据实时回传到诊断平台上，缺陷识别效率是人工巡检的五倍。

结论

继电保护和自动化装置协同优化，是建设新型电力系统关键技术途径。以冗余设计促进可靠性，以数字化管理提高工作效率，以环境适应性优化确保稳定性，以智能化升级强化协同性可以有效地应对新能源大范围接入和电网形态演变所面临的各种挑战。今后的研究需要重点关注AI算法对保护逻辑的优化，量子通信对超高速保护的探索和基于数字孪生电网故障仿真平台的研制等方面，从而为电力系统的安全运行提供更加有力的技术支撑。

参考文献

- [1]李志兴,王昱栋,许志华.继电保护装置定值自动化校核系统设计[J].电气技术与经济,2024(3):299-301.
- [2]胡澎.电力系统继电保护及自动化装置可靠性研究[J].Water Conservancy&Electric Power Technology & Application,2024,6(22).
- [3]梁超强.基于电力系统的自动化继电保护装置设计与优化研究[J].大众科学,2024,45(23):28-30.
- [4]杜成斌.电力系统继电保护与自动化装置的可靠性试验及评估[C]//全国绿色数智电力设备技术创新成果展示会论文集(四).2024.
- [5]庞岑茂,夏统照,詹子民.电力系统继电保护及其自动化装置可靠性研究[J].光源与照明,2023(10):231-233.