

数字化变电站继电保护系统设计

张雅雯 耿志华

国网河南新乡县供电公司 河南 新乡 453700

摘要:随着电力系统数字化转型,数字化变电站成为智能电网发展的核心环节,其继电保护系统面临信息处理、通信架构等方面的全新挑战。本文围绕数字化变电站信息数字化、通信网络化、设备智能化、系统集成化的特点,探讨了基于过程层的分布式母线保护、数字化变压器保护、输电线路数字化保护及电子式互感器接口等关键技术,重点阐述了数字化保护装置、通信网络及系统配置与集成的设计方案。研究表明,该系统能有效提高保护性能、增强运行可靠性,并简化调试与维护流程,为数字化变电站继电保护的工程应用提供了理论与实践参考。

关键词:数字化;变电站;继电保护;系统设计

引言:传统变电站继电保护系统存在信息孤岛、通信效率低、设备协同性差等问题,难以满足智能电网对实时性、可靠性的要求。数字化变电站通过信息数字化采集、网络化传输、智能化设备交互及系统集成化管控,重构了电力系统的运行模式,为继电保护技术升级提供了新路径。本文立足数字化变电站的技术特征,针对其继电保护系统的特殊需求,深入分析分布式保护、数字化接口等关键技术,系统设计保护装置、通信网络及集成方案,旨在解决传统保护模式的局限性,为构建高效、可靠、易维护的数字化继电保护体系提供设计思路,推动电力系统保护技术向智能化、网络化方向发展。

1 数字化变电站的特点

1.1 信息数字化

在数字化变电站中,信息数字化是核心特征之一。传统变电站的模拟信号被全面转换为数字信号,从一次设备的电气量采集,如电流、电压,到二次设备的各种状态信息,都以数字形式存在。这使得信息具有更高的精度和稳定性,减少了信号传输过程中的误差和干扰。同时,数字信息便于存储、处理和分析,能实现数据的深度挖掘和综合利用。通过数字化信息,运行人员可实时、准确地掌握变电站设备的运行状态,为故障诊断、运行优化等提供可靠依据,极大提升了变电站的信息化水平和运行管理效率。

1.2 通信网络化

通信网络化是数字化变电站的重要支撑。变电站内构建了高速、可靠的通信网络,将各个设备紧密连接成一个有机整体。该网络采用统一的通信协议和标准,实现了设备之间信息的快速、准确交换。无论是过程层的智能电子设备,还是间隔层、站控层的各类装置,都能

通过网络实时共享数据。这种网络化的通信方式打破了传统变电站信息孤岛的局面,使得数据传输更加高效、便捷,为变电站的自动化控制和智能化管理提供了坚实的通信基础,保障了整个变电站系统的协同运行。

1.3 设备智能化

数字化变电站的设备具备高度智能化特点。一次设备如变压器、断路器等,集成了智能传感器和执行器,能够实时监测自身的运行参数,如温度、压力、机械状态等,并根据预设策略自动调整运行状态。二次设备如保护装置、测控装置等,具有强大的数据处理和逻辑判断能力,可快速准确地完成保护动作、测量控制等任务。智能设备之间还能通过网络进行信息交互和协同工作,实现设备的自诊断、自调节和自适应,大大提高了设备的可靠性和运行效率,减少了人工干预和维护工作量。

1.4 系统集成化

系统集成化是数字化变电站的显著优势。通过采用统一的平台和标准,将变电站内的保护、测量、控制、监视等各个子系统进行有机集成,实现了数据的共享和功能的协同。不同子系统之间的信息流通顺畅,避免了信息的重复采集和处理,提高了系统的整体性能和响应速度。同时,系统集成化还便于变电站的统一管理和维护,运行人员可以通过一个操作界面实现对整个变电站的监控和操作,降低了运行管理的复杂度和成本,提升了变电站的综合自动化水平^[1]。

2 数字化变电站继电保护系统的关键技术

2.1 基于过程层的分布式母线保护

分布式母线保护通过在过程层配置与母线连接元件数量相同的保护单元,实现数据采集与共享。每个保护单元独立采集本支路电流、电压数据,并通过以太网与其他单元交换信息,形成完整的母线保护逻辑。该技术

采用比率制动特性的分相式电流差动原理，由中央处理单元（CU）完成核心计算，间隔单元（BU）提供过电流就地判据作为后备保护。其优势在于简化二次接线，减少电缆消耗，并通过光纤通信实现数据同步采样。当某一保护单元误动时，仅跳开对应支路断路器，避免母线全停事故，尤其适用于超特高压系统枢纽变电站。分布式架构还支持保护、测量、控制一体化，满足变电站综合自动化需求。

2.2 数字化的变压器保护

数字化变压器保护集成差动保护、绕组温度保护、油温保护等功能，采用电子式互感器实现高精度数据采集。通过光纤通信传输数字信号，消除传统电磁式互感器的饱和误差，提升保护灵敏度。保护装置内置智能算法，可实时监测变压器运行状态，自动调整保护参数以适应不同工况。例如，差动保护采用比率制动特性，有效区分内部故障与外部穿越性故障；瓦斯保护通过监测油流速度和气体积存量，快速响应绕组匝间短路等故障。数字化技术还支持保护装置与监控系统无缝对接，实现故障录波、事件记录、远程定值修改等功能，显著提高运维效率。

2.3 输电线路数字化保护

输电线路数字化保护以电子式电流互感器为核心，消除传统互感器饱和问题，从根本上杜绝纵差保护误动。电子式互感器为距离保护提供高精度采样值，避免铁芯磁饱和导致的测量误差，显著提升起动元件、选相元件及距离阻抗元件的动作准确率。例如，分相瞬间值纵差保护通过比较线路两端电流数字量，实现故障快速定位与隔离；距离保护利用电子式互感器的高线性度，优化阻抗测量特性，提高保护范围稳定性。此外，数字化保护支持与行波测距、分布式故障定位等装置协同工作，实现故障精确定位与主动预警，缩短停电时间，提升供电可靠性。

2.4 基于电子式互感器的数字化保护接口

电子式互感器通过合并单元（MU）实现与保护装置的数字接口，MU将互感器输出的数字信号转换为符合IEC 61850-9-1/2标准的通信报文，通过光纤以太网传输至二次设备。该接口采用ADSP+FPGA架构，分为数据还原、处理与输出三个模块：FPGA实现数据同步采样与CRC校验，DSP完成数字滤波、相位补偿及均方根值计算，最终将组帧后的数据发送至保护装置。此设计解决了传统电磁式互感器接口存在的信号干扰、传输延迟等问题，支持多任务并行处理与高速通信，满足数字化变电站对实时性、可靠性的要求^[2]。

3 数字化变电站继电保护系统的设计

3.1 数字化保护装置设计

数字化保护装置是继电保护系统的核心，其设计需兼顾功能集成与性能优化。硬件层面，采用高性能处理器与大规模可编程逻辑器件（FPGA），实现数据采集、逻辑运算与通信控制的并行处理。例如，通过多核DSP芯片完成差动保护、距离保护等复杂算法，FPGA则负责同步采样、数字滤波等实时任务。软件架构采用模块化设计，将保护逻辑、人机界面、通信协议等功能解耦，便于维护与升级。装置需支持IEC 61850标准，实现与合并单元、智能终端等设备的互操作性。同时，集成自检功能，通过监测电源、存储器、通信接口等模块状态，实时上报异常信息。此外，设计抗干扰电路与冗余电源，提升装置在恶劣电磁环境下的可靠性。

3.2 通信网络设计

通信网络是数字化变电站的“神经中枢”，其设计需满足高实时性、高可靠性与高带宽需求。过程层采用星型或环型拓扑结构，以百兆/千兆以太网为骨干，实现保护装置与合并单元、智能终端之间的点对点通信。例如，采用IEC 61850-9-2LE标准传输采样值（SV），通过GOOSE协议快速传递跳闸信号，确保保护动作时间小于10ms。间隔层与站控层采用交换式以太网，支持VLAN划分与QoS优先级策略，优先保障保护报文的传输。网络冗余设计采用PRP（并行冗余协议）或HSR（高速冗余环网），实现链路故障时的无缝切换。此外，部署网络安全防护设备，如防火墙与加密装置，防止非法访问与数据篡改，确保通信安全。例如，通过VLAN隔离不同安全等级的设备，限制GOOSE报文的传播范围，降低网络攻击风险。

3.3 系统配置与集成设计

系统配置与集成需实现保护、测量、控制等功能的协同优化。采用一体化配置工具，基于SCD（系统配置描述）文件统一管理IED（智能电子设备）的模型、通信参数与逻辑关系。例如，通过图形化界面配置母线保护、变压器保护等装置的输入输出通道，自动生成CID（配置IED）文件并下载至设备。系统集成遵循“分层分布、信息共享”原则，将过程层设备（如电子式互感器、智能断路器）与间隔层/站控层装置（如保护测控装置、监控主机）通过标准化接口连接。例如，保护装置通过MMS协议上传事件记录与故障录波数据至站控层，供运维人员分析。同时，集成高级应用功能，如故障定位、状态评估与自适应保护，通过大数据分析优化保护策略。例如，根据线路负荷变化动态调整距离保护定

值,提升系统适应性。此外,设计标准化测试流程,通过数字化测试仪模拟故障信号,验证保护装置的动作逻辑与通信性能,确保系统可靠运行。

4 数字化变电站继电保护系统的应用

4.1 提高保护性能

数字化变电站继电保护系统借助电子式互感器,实现了一次设备电气量的高精度、高频率采样。与传统互感器相比,电子式互感器无饱和现象,能精准反映故障电流、电压的瞬时值和变化率,为保护装置提供更准确的故障特征信息。例如在距离保护中,精确的采样值使阻抗测量误差大幅降低,有效避免了保护误动或拒动。同时,基于高速通信网络,保护装置可快速获取全站数据,实现更复杂的保护算法。如分布式母线保护,各间隔保护单元实时交换信息,能在极短时间内定位故障点并切除故障,将母线故障切除时间缩短至毫秒级。此外,数字化保护还支持自适应保护策略,根据系统运行方式、负荷变化等因素自动调整保护定值,进一步提高保护的选择性和灵敏性,确保在各种工况下都能可靠动作。

4.2 增强可靠性

数字化继电保护系统采用冗余设计和自诊断技术,显著增强了可靠性。通信网络采用双网冗余配置,当主网出现故障时,备用网可立即切换投入使用,确保保护信息的不间断传输,避免因网络故障导致保护失灵。设备层面,保护装置具备完善的自诊断功能,能实时监测硬件状态和软件运行情况。一旦检测到电源异常、存储器错误、通信中断等问题,立即发出告警信息,并将故障信息上传至监控系统。运维人员可根据告警信息迅速定位故障设备,及时进行维修或更换,防止故障扩大。此外,数字化保护装置的抗干扰能力更强,采用光纤通信和屏蔽设计,有效抵御电磁干扰,保障在复杂电磁环境下稳定运行。

4.3 便于调试与维护

数字化变电站继电保护系统的调试与维护更加便捷高效。在调试阶段,利用数字化测试设备,可模拟各种故障场景,通过通信网络将测试信号准确发送至保护装置,快速验证保护逻辑和动作特性。例如,在变压器保护调试中,能方便地模拟区内、区外故障,检查差动保护、后备保护等动作是否正确,大大缩短了调试周期。

维护方面,系统具备强大的故障录波和事件记录功能,可详细记录故障发生时的电气量变化、保护动作过程等信息。运维人员通过分析这些数据,能快速定位故障原因,制定针对性的维护方案。同时,数字化保护装置支持远程维护,技术人员可在远方对装置进行参数修改、软件升级等操作,减少了现场维护的工作量 and 时间成本,提高了维护效率。

4.4 提升系统兼容性与扩展性

数字化变电站继电保护系统遵循统一的通信标准和数据模型,如IEC 61850标准,使不同厂家生产的设备能够实现无缝对接和互操作。这打破了传统变电站中设备品牌和型号的限制,用户在设备选型和更新换代时具有更大的灵活性。例如,当变电站需要新增一条输电线路时,可方便地接入符合标准的保护装置,无需对原有系统进行大规模改造。同时,数字化系统的扩展性也更强。随着变电站规模的扩大或功能的增加,只需在现有通信网络基础上增加相应的设备,如智能终端、合并单元等,并进行简单的配置即可实现系统扩展。这种兼容性和扩展性为变电站的长期发展和智能化升级提供了有力保障,降低了变电站的建设和运维成本^[1]。

结束语

数字化变电站继电保护系统设计是电力系统迈向智能化、高效化的关键一步。通过融合先进的数字化技术,该设计不仅显著提升了保护性能与可靠性,实现了故障的快速精准切除,还极大地方便了系统的调试与维护,降低了运维成本。同时,其良好的兼容性与扩展性,为变电站的未来发展预留了充足空间。展望未来,随着技术的持续进步,数字化变电站继电保护系统将不断优化完善,为电力系统的安全稳定运行提供更为坚实的保障,推动电力行业朝着更加智能、绿色的方向蓬勃发展。

参考文献

- [1]王亭江.数字化变电站中电气二次设计分析[J].黑龙江科技信息.2021(18):226-227
- [2]马建月.数字化变电站在变电专业应用浅谈[J].科技与创新.2022(26):105-106
- [3]周旭洋.数字化变电站运行维护策略研究[J].科技创业家.2022(13):194-195.