

Design and optimization of digital substation relay protection system

Yi Liu

Guizhou Xidian Electric Power Co., Ltd., Yaxi Power Generation Operation Branch, Zunyi, Guizhou, 563108, China

Abstract

Digital substations constitute a vital component of smart grid development, with their significance being self-evident. The design and optimization of relay protection systems in these substations directly impact the safe and stable operation of power systems. This paper provides a comprehensive analysis of the overall architecture, technical characteristics, and design principles of digital substation relay protection systems. It examines the key differences between these systems and traditional protection systems, with particular emphasis on critical aspects including hardware architecture design, protection principles and algorithm implementation, performance improvement strategies, as well as testing, verification, and operation management. The study aims to establish a digital relay protection system featuring rapid response capabilities, high reliability, and ease of maintenance, thereby offering theoretical references for related engineering practices.

Keywords

digital substation; relay protection; system design; performance optimization; operation and maintenance management strategy

数字化变电站继电保护系统的设计与优化

刘易

贵州西电电力股份有限公司鸭溪发电运营分公司, 中国·贵州 遵义 563108

摘要

数字化变电站属于智能电网发展的重要组成部分,其重要性不言而喻。其继电保护系统的设计与改进直接关系到电力系统的安全稳定运行。本文详细阐述了数字化变电站继电保护系统的整体架构、技术特征和设计准则,剖析了该系统与传统保护系统的主要区别,着重论述了系统硬件架构设计、保护原理和算法实现、性能改进策略以及测试验证和运维管理等关键环节,并进行了深入探讨。希望创建起一套快速反应、可靠性强、易于维护的数字化继电保护系统,为相关工程实践提供理论参考。

关键词

数字化变电站; 继电保护; 系统设计; 性能优化; 运维管理策略

1 引言

随着电力系统智能化水平的日益提高,数字化变电站成为了现代电网创建的关键发展方向,继电保护系统作为变电站的中心部件,也从最初的电磁式,静态式再到微型,最后到达数字化^[1]。数字化变电站继电保护系统基于 IEC 61850 标准,凭借采样值的数字化,通信网络化,信息共享化,完成了保护功能上的深刻变革,这个系统既改进了保护性能,也改良了系统的扩充能力和互相操作性,所以仔细探究其设计方法和改进办法,对保证电网安全,增进供电可靠具有既有的理论价值和实际意义。本文将从系统概述出发,逐步深入探讨其硬件设计、算法实现、性能优化及运维管理等核心内容。

【作者简介】刘易(2000-),男,中国贵州赤水人,本科,助理工程师,从事继电保护研究。

2 数字化变电站继电保护系统概述

2.1 系统基本构成与特点

数字化变电站继电保护系统通常遵循 IEC 61850 标准定义的三层两网结构。过程层包含电子式互感器,合并单元,智能终端等设备,这些设备负责电力参量的本地数字化采集以及开关设备的智能化控制,间隔层由各种保护装置,测控装置等构成,它是保护逻辑判断和执行的关键所在^[2]。站控层则对全站数据实施集成,处理,显示并完成同控制中心的通信任务。

该系统最突出的特点就是数据源头数字化,和传统系统依靠模拟信号传输不同,过程层的电气量直接以数字采样值的形式发布在过程层网络上,这带来高绝缘、抗干扰强、数据共享方便等优点,而且系统内部采用统一的通信标准,设备间互操作性好,简化了系统集成与后期扩容。

2.2 与传统保护系统的主要差异

数字化保护系统和传统保护系统存在差异是全面的,在信号传输方式上,传统系统依靠电缆传输连续的模拟信号,数字化系统则经由光纤网络传输离散的数字报文,这就从根本上改变了信号传输的介质和形式。在系统结构上,传统系统大多采用功能集中的屏柜式结构,各装置相对独立。数字化系统则是网络化、分布式,保护功能可能分散在不同的物理装置中,通过网络协同完成。信息应用模式也有本质区别。传统系统的信息基本是点对点专用,数字化系统则是网络化的信息共享,一个合并单元发布的采样值可以被多个保护装置同时订阅使用,极大地减少了二次接线,提高了信息利用率。

2.3 核心设计目标与原则

数字化继电保护系统的设计首先就是保证速动性、可靠性。速动性要求保护系统在发生故障时能够快速、准确的切除故障元件。可靠性是指安全性和信赖性^[3]。设计要遵守标准化和开放性原则,严格依照国际标准(比如 IEC61850)是保障不同厂家设备能够互相沟通的前提,也是系统可以长久发展的关键,系统得有很好的可扩展性和可维护性,硬件的配置和软件的功能要模块化,方便将来增加或者改变功能,而且降低运维的难度,经济性原则也要兼顾,性能达到要求的时候,优化配置以得到比较合理的全生命周期成本。

3 系统硬件架构设计

3.1 过程层设备配置与功能

过程层设备是数字化保护系统的“感官神经”,电子式互感器替代传统电磁式互感器,采用光学或罗氏线圈原理直接输出数字信号,无磁饱和、频带宽、动态范围大等优势。合并单元是过程层的核心设备,同步采集多路 ECT/EVT 输出信号,按标准格式组帧后,经组播方式向间隔层网络发送采样值^[4]。智能终端则是“执行机构”,接收间隔层保护装置发出的 GOOSE 跳闸、合闸命令,经过解析后驱动一次设备的操作机构,同时采集断路器、隔离开关的位置状态等信息并上传给间隔层设备。过程层设备的精度和可靠性直接决定了整个保护系统性能的基石。

3.2 间隔层保护装置设计

间隔层保护装置是实现保护功能的载体,其硬件核心一般为高性能的多核处理器架构,要满足大量的数字化采样数据的实时处理需要,装置应具备数量足够多的以太网接口,用以接入过程层 SV 网和 GOOSE 网,从而达到同过程层设备进行沟通的目标^[5]。装置内部设计上重视模块化,电源模块, CPU 模块,开入开出模块,通信模块等均需相对独立,方便故障定位和现场更换,装置还要有强大的数据存储和处理能力,可以记录故障录波,事件顺序记录等关键信息,为事故分析提供依据,硬件设计也要顾及电磁兼容性,

确保在复杂的变电站电磁环境下稳定工作。

3.3 站控层系统集成方案

站控层属于变电站的监控中心,通常由监控主机、操作员工作站、工程师工作站、远动通信网关机等设备组成,站控层网络(MMS 网)经由站控层网络与间隔层设备交互,站控层系统集成方案的关键是实现信息的统一建模和标准访问^[6]。所有间隔层设备都依照 IEC61850 标准创建统一的数据模型,服务器模型会向站控层客户端供应服务,这种依靠网络的客户端/服务器模式,取代了旧式的硬接线或者规约转换方法,数据访问变得更为灵活高效,站控层系统集成应该做到数据采集,运行监视,操作控制,信息管理,远程通信等各项功能的深度融合,为运维人员提供统一的监控平台。

4 保护原理与算法实现

4.1 数字化采样与数据处理方法

数字化保护算法的前提是高质量的数据采样,系统依赖于合并单元提供的同步采样值流,采样同步通常由站内时钟同步系统(如北斗/GPS+IEEE 1588)保证,采样数据进入保护装置后,首先需要进行一些预处理,比如校验采样值的有效性、连续性,检测数据丢包、畸变。

后续的数据处理集中在数字滤波和特征量提取上,数字滤波器比如傅里叶滤波,余弦滤波等滤除采样信号的高频噪声和非周期分量,获得干净的工频基波分量或目标谐波分量,之后,算法从滤波后的数据里快速准确的算出保护判据用到的电气量特征值,诸如电压,电流的有效值,相位,阻抗,功率等。

4.2 典型保护功能的算法模型

基于提取出的特征量,各种保护功能通过特定的算法模型来实现,线路纵联差动保护的核心算法是计算线路两端电流相量和(差动电流)和标量和(制动电流),然后根据比率制动特性判断区内、外故障,距离保护通过计算保护安装处到故障点的阻抗,然后与设定的阻抗整定值进行比较来实现动作^[7]。变压器差动保护需考虑励磁涌流影响,算法常利用二次谐波制动,波形对称识别等原理来区分故障电流和涌流,母线保护遇到区外故障 CT 饱和和引发误动情况,其算法必须具备很强的抗 CT 饱和能力,这些算法模型均在软件中实现,其精度和速度直接影响保护性能。

4.3 保护逻辑的软件实现流程

保护逻辑的软件实现按照一个流程来,程序开始运行后,进入主循环,在每个处理周期当中,软件首先读取最新的采样数据包以及 GOOSE 开入量状态,然后调用对应的保护算法模块进行实时计算,得到所需的电气量和逻辑状态。程序会把计算出来的结果同预设的定值、延时等判据做比较,按照既定的保护逻辑,也就是启动逻辑、闭锁逻辑或者出口逻辑,对这些结果进行综合考量,要是符合动作条件,

就去启动计时器或者直接发出跳闸命令，然后把跳闸命令用 GOOSE 报文形式迅速发送出去，还要记录下有关的动作事件和故障数据，整个流程要达到非常高的实时性和确定性。

5 系统性能优化策略

5.1 速动性与可靠性提升方法

要提高速动性，从硬件和软件两个方面入手，硬件上，采用处理能力强的 CPU，改进内部总线，保证网络通信低延迟和高确定性，软件上，改进算法结构，削减不必要计算，用快速滤波和判据算法，缩减保护动作的总时间^[8]。可靠性提升依靠多重化设计，关键保护可主后备一体化或者双重化，重要元件比如母线，主变的保护常双重化或者三重化，靠冗余提升系统可用性，加强装置自诊断功能，使其能实时监测自身硬件，通信，数据质量，异常时及时告警或者闭锁等安全措施。

5.2 保护配合与定值优化

数字化环境下，保护定值的设置和配合更加细致，依托全站统一的数据模型和通信网络，可实现保护定值的在线校核和协同优化，借助站控层的分析工具，可对不同保护的动作时序、灵敏度开展仿真计算，保证从负荷到电源方向形成逐级配合的选择性保护序列。定值优化还要考虑到网络通信延时对保护配合的影响，整定计算时要将 GOOSE 报文的传输、处理延时等时间级差纳入考虑范围，利用数字化系统强大的数据处理能力，研究自适应保护定值策略，使定值可以随系统运行方式的变化自动调整，增强保护的适应性。

5.3 抗干扰与故障应对措施

数字化系统虽抗干扰能力不错，但也不能忽视，硬件方面，用屏蔽，接地，隔离之类的设计，软件方面，加强通信报文的校验，比如 CRC 校验，设置数据有效性检查机制，对异常的数据包进行丢弃或者标记。针对网络风暴、设备失效等故障，要有应对措施，网络交换机要支持虚拟局域网划分，组播过滤，隔离广播风暴，系统要有合理的故障隔离机制，某台设备或者网络出故障时，能迅速定位并隔离故障点，避免影响扩大，启动备用系统或者切换运行方式，保证核心保护功能。

6 测试验证与运维管理

6.1 系统性能测试方法

数字化保护系统的测试更加复杂，需要新的测试手段，动态模拟测试系统可以模拟各种电网故障工况，向保护装置注入符合标准的 SV 和 GOOSE 报文，全面检验保护装置的动作行为，数字仿真测试基于实时数字仿真器和物理保护装置构成闭环测试系统，具有更高的灵活性和经济性^[9]。测试内容涵盖单体设备测试和系统集成测试，单体测试聚焦装置基本功能，精度，动态特性，系统集成测试验证网络性能（吞吐量，延时），多设备互操作，保护系统复杂故障下的整体

逻辑配合是否正确。

6.2 日常运维管理要点

日常运维管理要适应数字化特性，网络状态监视很重要，网络流量，通信负载，报文丢包率等都要注意，定期检查时钟同步系统的精准度，保证全站采样同步，SCD 配置文件也要加强管理，任何修改都要严格走变更审批和验证流程。运维工作要充分利用系统给出的智能告警，故障录波，事件顺序记录等高级功能，展开状态分析和趋势预估，形成完备的设备台账和运维记录，把运维工作做到信息化，标准化，加大对运维人员的培训力度，让他们掌握数字化系统的工作原理和运维技能。

6.3 常见故障处理流程

系统出现异常或者故障的时候，要依照清晰的处理流程来应对，先按照监控系统的告警信息，大概确定故障的范围和性质^[10]。接着借助故障录波，事件记录等数据做细致的分析，找到故障点，分辨是保护装置自身故障，一次设备故障，还是网络通信问题。装置硬件故障一般通过更换备件来解决，软件或配置方面的问题需要联系厂家技术人员来分析并进行修正，处理过程中要严格遵守安全规程，做好安全措施，故障处理完后，必须做必要的测试，确保系统功能正常，然后详细记录故障现象，分析过程和处理结果，归档保存。

7 结语

数字化变电站继电保护系统属于继电保护技术的前沿发展方向，其凭借架构革新和技术融合，使得保护性能和智能化水平明显提升。本文对它在设计要点和优化策略方面展开系统论述，包含了从硬件配置，算法实施到运维管理的全环节内容。不过该技术仍处于持续发展之中，保护功能网络化，人工智能高级应用，网络安全防护强化等，均是将来要不断深入研究的重要课题，做好系统的设计，优化和运维工作，是完全发挥其技术优势，保障电网安全稳定运行的根本所在。

参考文献

- [1] 吴春旭.基于数字化变电站中继电保护的可靠性研究[J].电气技术与经济,2025,(07):80-82+85.
- [2] 刘秀丽.智能变电站继电保护调试技术研究[J].光源与照明,2025,(02):198-200.
- [3] 柳殿煌,汤浩.数字化变电站中的继电保护调试技术分析[J].集成电路应用,2024,41(07):286-287.
- [4] 汪柯颖.智能变电站继电保护检测和调试技术分析[J].电子元件与信息技术,2023,7(04):83-86.
- [5] 崔晓,柳贵东,熊宇,等.数字化变电站继电保护测试技术研究[J].信息记录材料,2021,22(12):239-241.
- [6] 马东巍,于文强.论智能变电站继电保护调试技术[J].科技创新与应用,2021,11(17):124-126.