

智能断路器在配电网故障快速隔离中的应用与性能分析

冯伟杰¹ 黄利彪²

1. 内蒙古电力（集团）有限责任公司锡林郭勒盟正蓝旗供电分公司 内蒙古 锡林郭勒盟正蓝旗 027200

2. 内蒙古电力（集团）有限责任公司锡林郭勒供电公司锡林浩特供电分公司 内蒙古 锡林郭勒盟锡林浩特 026000

摘要：本文聚焦智能断路器在配电网故障快速隔离中的应用与性能。阐述其由触头、灭弧等多系统构成及工作原理，分析实时监测等技术特点。在故障快速隔离应用上，介绍故障检测定位与切除隔离流程。性能方面，从快速响应、稳定可靠、智能自适应、通信性能展开剖析。并提出提高故障检测准确性等优化策略，旨在提升配电网运行可靠性与供电质量。

关键词：智能断路器；配电网故障快速隔离；性能分析

1 智能断路器的组成与工作原理

智能断路器主要由触头系统、灭弧系统、操作机构、智能控制单元以及通信模块等部分组成。触头系统负责电路的接通与分断，灭弧系统用于熄灭触头分断时产生的电弧，操作机构提供分合闸的动力。智能控制单元是核心部分，它集成了多种传感器和微处理器，能够实时采集电路中的电流、电压、温度等参数。通信模块则实现了断路器与外部设备或系统的信息交互^[1]。其工作原理为：智能控制单元持续监测电路参数，当检测到电流、电压等参数异常，如过载、短路、欠压等故障时，会迅速分析判断故障类型和程度。然后，根据预设的逻辑和保护策略，向操作机构发出分闸或合闸指令，操作机构执行相应动作，使触头系统分断或接通电路，从而实现电路的保护和控制，通过通信模块将故障信息和设备状态传输给上位机或监控系统。

2 智能断路器的技术特点

2.1 实时监测功能

智能断路器配备了高精度的传感器，能够实时监测电路中的电流、电压、功率、频率以及温度等多种参数。这些传感器将采集到的数据快速传输至智能控制单元，控制单元对数据进行处理和分析。通过实时监测，可及时发现电路中潜在的问题，例如轻微过载或局部发热等早期故障迹象，为预防性维护提供依据，避免故障进一步发展导致严重事故，大大提高了电力系统运行的可靠性。

2.2 多重保护功能

智能断路器具备丰富且强大的多重保护功能。除了传统的过载、短路保护外，还拥有欠压保护、过压保护、漏电保护以及缺相保护等。在发生过载时，智能控

制单元根据过载电流的大小和持续时间，按照反时限特性曲线准确判断并发出分闸指令。面对短路故障，能在极短时间内（通常为毫秒级）迅速切断电路，限制短路电流对设备和线路的损害。欠压、过压保护功能则确保电路在电压异常时及时分闸，保护用电设备不受异常电压影响。漏电保护和缺相保护进一步增强了对人员安全和设备正常运行的保障，全方位守护电力系统的安全稳定运行。

2.3 远程操控功能

借助通信模块，智能断路器支持远程操控。工作人员可通过上位机软件或监控系统，在远离断路器安装位置的控制中心对其进行远程分闸、合闸操作。这一功能在一些特殊场景下具有极大优势，如在恶劣环境（高温、高湿、有毒有害等）或难以接近的区域，无需人工现场操作，就能实现对断路器的控制^[2]。远程操控便于实现电力系统的自动化管理，与其他智能设备协同工作，提高整个电力系统的运行效率和管理水平。

2.4 事件记录与数据分析功能

智能断路器的智能控制单元具备事件记录功能，能够详细记录每次分合闸操作的时间、原因（如正常操作、故障跳闸等），以及故障发生时的各项电路参数。这些记录的数据可存储在本地，也可通过通信模块上传至云端或上位机。通过对大量历史数据的分析，运维人员可以深入了解电力系统的运行状况，发现潜在的故障模式和趋势，例如通过分析电流变化曲线预测设备老化情况。根据数据分析结果可优化保护策略和运维计划，提高设备的维护效率和使用寿命，降低运维成本。

3 智能断路器在配电网故障快速隔离中的应用

3.1 故障检测与定位

在配电网中,故障的及时检测与精准定位是实现快速隔离的基础。智能断路器凭借其内置的多种高精度传感器,能够实时、全面地采集线路中的电流、电压、功率等关键电气参数。当配电网发生故障时,这些参数会出现异常变化,智能断路器的智能控制单元迅速捕捉到这些异常信号。通过先进的故障检测算法,智能控制单元对采集到的数据进行快速分析与处理。在故障定位方面,智能断路器利用行波法、阻抗法等多种定位技术。行波法是依据故障产生的行波在输电线路上的传播特性,通过测量行波到达不同监测点的时间差,精确计算出故障点的位置。阻抗法则是根据故障时测量点到故障点之间的线路阻抗与正常运行时的差异,来确定故障位置。这些技术相互配合,大大提高了故障定位的准确性和速度。

3.2 故障切除与隔离

一旦故障被检测与定位,智能断路器迅速执行故障切除与隔离操作,以限制故障的影响范围。当智能控制单元确认故障发生并确定故障位置后,会立即发出分闸指令给相应的智能断路器。智能断路器的操作机构响应迅速,能够在极短的时间内(通常为毫秒级)完成分闸动作,快速切断故障线路中的电流,从而实现故障的切除。在复杂的配电网中,为了确保非故障区域的正常供电,智能断路器还需协同其他设备完成故障隔离。智能断路器通过通信网络与相邻的智能开关设备以及配电网自动化系统进行信息交互。根据预先设定的故障隔离策略,当某一区域发生故障时,相关的智能断路器和智能开关相互配合,将故障区域从配电网中隔离出来。这种快速、准确的故障切除与隔离机制,有效避免故障的蔓延,最大限度地减少停电范围和停电时间,保障配电网的安全稳定运行,提高电力供应的可靠性和质量,为用户提供更加优质的电力服务。

4 智能断路器在配电网故障快速隔离中的性能分析

4.1 快速响应性能

在配电网故障快速隔离中,时间就是保障供电可靠性的关键,而智能断路器的快速响应性能至关重要。智能断路器内置的高速数据采集系统和先进的微处理器,使其能够在极短时间内感知到故障的发生。当配电网出现异常,如电流瞬间大幅上升、电压急剧下降等故障特征信号出现时,智能断路器的传感器可在微秒级别的时间内捕捉到这些变化,并迅速将数据传输至智能控制单元。智能控制单元配备了高效的故障检测算法,能在接收到数据后,以毫秒级的速度完成对故障类型、位置以及严重程度的判断。一旦确认故障,便立即向操作机构

发出分闸指令。操作机构采用先进的电磁驱动或永磁驱动技术,响应速度极快,可在几毫秒内完成分闸动作,迅速切断故障线路,阻止故障电流对电网其他部分的进一步影响。相比传统断路器,智能断路器大幅缩短了从故障发生到故障切除的时间间隔,显著提升配电网故障快速隔离的时效性,有效减少停电范围和停电时间,为用户提供更稳定的电力供应保障^[3]。

4.2 稳定性与可靠性

在硬件设计上,智能断路器选用高品质的材料和先进的制造工艺,确保其在各种复杂环境下都能稳定运行。灭弧系统经过精心设计,具备强大的灭弧能力,无论在正常运行还是故障状态下,都能可靠地熄灭电弧,防止电弧重燃对设备和电网造成损害。智能断路器还具备完善的自检和容错机制,智能控制单元会实时监测自身的工作状态以及各个部件的运行参数,一旦发现异常,如传感器故障、通信中断等,能够立即启动容错程序,采取相应的措施维持断路器的基本功能,同时向运维人员发送警报信息。在软件算法方面,采用冗余设计和可靠性编码,确保控制算法在复杂电磁干扰环境下也能稳定运行,准确地执行故障检测、判断和隔离操作,极大地提高了智能断路器在配电网故障快速隔离中的可靠性,保障了电力系统的安全稳定运行。

4.3 智能性与自适应能力

智能性和自适应能力是智能断路器区别于传统断路器的显著特征。智能断路器通过内置的智能控制单元,能够对配电网的运行状态进行实时分析和学习。它不仅可以根据预设的故障判据进行故障检测和隔离,还能利用大数据分析和人工智能算法,对配电网的历史运行数据进行挖掘,从而发现潜在的故障隐患和运行规律。当配电网的运行方式发生变化,如负荷波动、线路检修导致网络拓扑结构改变时,智能断路器能够自动调整自身的保护策略和运行参数,以适应新的运行工况。在面对一些复杂的故障情况,如间歇性电弧故障、高阻接地故障等,传统断路器可能难以准确判断和处理,而智能断路器凭借其强大的智能分析能力,能够准确识别故障类型,并采取针对性的隔离措施,大大提高了配电网故障快速隔离的准确性和灵活性,增强了配电网应对各种复杂运行场景的能力。

4.4 通信性能

在实现配电网故障快速隔离的过程中,良好的通信性能是智能断路器与其他设备协同工作的关键纽带。智能断路器通常配备多种通信接口,如以太网接口、无线通信模块(如4G、5G、Wi-Fi等)以及电力线载波通信模

块等,以满足不同应用场景下的通信需求。这些通信接口能够确保智能断路器与配电网自动化系统、相邻的智能开关设备以及远程监控中心之间进行高速、稳定的数据传输。在故障发生时,智能断路器能够迅速将故障信息,包括故障类型、位置、故障时的电气参数等,通过通信网络上传至配电网自动化系统和远程监控中心。它也能及时接收来自自动化系统的控制指令,如分闸、合闸命令以及保护策略调整等信息。通信的实时性和准确性直接影响到故障快速隔离的效率和效果。高速的通信网络使得智能断路器能够在短时间内完成大量数据的传输和交互,确保各个设备之间的协同动作精准无误。

5 智能断路器在配电网中的优化策略

5.1 提高故障检测与定位的准确性

准确的故障检测与定位是智能断路器高效运行的基础,可通过升级传感器技术来实现。采用更为先进、高精度的电流、电压传感器,这些传感器具备更高的灵敏度和抗干扰能力,能够精准捕捉配电网运行中的细微参数变化。例如,运用光纤电流传感器,其测量精度可达0.1%甚至更高,能有效减少测量误差,为故障检测提供更可靠的数据。利用多传感器融合技术,将多种类型传感器采集的数据进行综合分析。如同时采集电流、电压、温度等数据,通过数据融合算法挖掘不同参数之间的关联信息,提高对复杂故障的识别能力,避免单一传感器因故障或干扰导致的误判。优化故障检测与定位算法至关重要,引入人工智能算法,如深度学习中的卷积神经网络(CNN)或循环神经网络(RNN)。这些算法能够对大量历史故障数据进行学习,自动提取故障特征,建立精准的故障模型。当配电网出现异常时,智能断路器可利用这些模型快速、准确地判断故障类型和位置。

5.2 增强智能断路器的联动控制能力

为实现智能断路器在配电网中的高效协同工作,需增强其联动控制能力。建立统一的通信与控制协议是关键一步。在整个配电网中,所有智能断路器及相关设备遵循相同的通信协议,如IEC61850标准,确保设备之间能够准确、快速地进行信息交互。当某一区域发生故障时,检测到故障的智能断路器能够迅速将故障信息按照协议规范发送给相邻断路器以及配电网自动化系统。开发智能化的联动控制策略,利用分布式智能控制技术,使每个智能断路器在一定程度上具备自主决策能力^[4]。

当故障发生时,不仅依赖上级控制中心的指令,相邻智能断路器可根据本地采集的数据以及接收到的故障信息,按照预先设定的联动策略,自主判断是否需要动作以及何时动作。通过模拟仿真技术对不同的联动控制策略进行验证和优化,不断提高智能断路器之间的协同工作效率。

5.3 改进通信模块,减少通信延迟

通信延迟会严重影响智能断路器在配电网中的响应速度和协同效果,因此改进通信模块势在必行。在硬件方面,选用高性能的通信芯片和设备。优化通信线路布局,减少信号传输过程中的干扰和衰减。对于电力线载波通信,采用新型的调制解调技术和信号增强设备,提高信号在电力线上的传输质量和稳定性。在软件方面,优化通信协议栈。采用轻量级、高效的通信协议,减少数据传输过程中的冗余信息。建立通信缓存和优先级机制。当通信网络出现拥塞时,智能断路器可将重要的故障信息和控制指令优先发送,并对数据进行缓存,避免数据丢失,确保在复杂通信环境下仍能实现快速、稳定的通信,从而提高智能断路器在配电网故障处理中的实时性和可靠性。

结束语

智能断路器在配电网故障快速隔离中展现出显著优势,其应用有效提升了配电网的可靠性和稳定性。随着配电网复杂性增加与智能化发展需求,智能断路器仍面临诸多挑战。未来,需持续优化技术,深入研究人工智能算法应用,强化设备联动与通信性能,以更好地适应新型配电网架构,为电力系统安全高效运行提供坚实保障,推动智能电网建设迈向新高度。

参考文献

- [1]王强.10kV及以下高低压供配电系统故障探究[J].南方农机,2020,v.51;No.342(02):187+193.
- [2]梁国灿.低压总进线断路器的选择与变配电室的接地[J].通信电源技术,2020,v.37;No.194(02):138-141.
- [3]姚卓磊,黄文焘,余墨多,等.智能配电网电力-通信灾害故障动态协调恢复方法[J].电力系统自动化,2022,46(19):87-94.
- [4]沙杰.解析电力系统中配电网的安全运行技术[J].中国设备工程,2020,(22):216-217.