

柔性直流输电系统继电保护关键技术及配置方案优化

刘淑娟

广东律诚工程咨询有限公司 广东中山 528400

摘要: 随着能源格局的不断发展, 柔性直流输电系统在现代电网中的应用日益广泛。本文深入研究柔性直流输电系统继电保护关键技术及配置方案优化。首先阐述柔性直流输电系统的基本原理和结构特点, 分析其故障特性。然后详细探讨行波保护、纵联差动保护、基于电气量变化率保护等关键技术的原理与实现方式。接着对传统和优化后的继电保护配置方案进行对比分析, 结合实际工程案例说明优化方案在提升保护性能、可靠性和快速性方面的显著优势, 为柔性直流输电系统的安全稳定运行提供有力支撑。

关键词: 柔性直流输电; 系统; 继电保护; 关键技术; 配置方案

引言

柔性直流输电 (VSC-HVDC) 技术凭借其独特的优势, 如能够实现有功和无功功率的独立控制、无换相失败问题、可向无源网络供电等, 在新能源并网、城市电网增容改造、异步电网互联等领域得到了广泛应用。然而, 由于其与传统直流输电在拓扑结构和运行特性上存在较大差异, 传统的继电保护原理和配置方案难以直接适用于柔性直流输电系统。因此, 深入研究柔性直流输电系统继电保护关键技术及配置方案优化, 对于保障柔性直流输电系统乃至整个电网的安全稳定运行具有重要意义。

1 柔性直流输电系统基本原理与结构特点

1.1 基本原理

柔性直流输电系统主要采用电压源换流器 (VSC), 通过脉宽调制 (PWM) 技术将交流电转换为直流电, 或者将直流电转换为交流电。VSC 利用全控型电力电子器件 (如绝缘栅双极型晶体管 IGBT) 的快速开关特性, 能够精确地控制换流器输出电压的幅值和相位, 从而实现有功功率和无功功率的灵活调节。

1.2 结构特点

以模块化多电平换流器 (MMC) 型柔性直流输电系统为例, 其主要由换流站和直流输电线路组成。换流站包含多个子模块, 每个子模块通常由电容和 IGBT 构成的半桥或全桥电路组成。这种模块化的设计使得换流器易于扩展和维护, 并且能够输出接近正弦波的交流电压, 降低谐波含量。直流输电线路则负责将换流站输出的直流电传输到受端换

流站。与传统直流输电相比, 柔性直流输电系统的直流侧电容较小, 系统的动态响应速度更快, 但同时也导致故障特性更加复杂。

2 柔性直流输电系统故障特性分析

2.1 直流侧故障特性

2.1.1 短路电流特性

当柔性直流输电系统直流侧发生短路故障时, 短路电流上升速度极快。由于 VSC 的快速控制能力和直流侧电容较小, 短路电流在几毫秒内即可达到峰值, 且峰值电流通常远大于系统的额定电流。例如, 在某些工程中, 短路电流峰值可达额定电流的 3-5 倍。此外, 短路电流的大小和变化趋势还受到换流器控制策略、线路参数以及系统运行工况等因素的影响。

2.1.2 行波传播特性

故障发生时, 会产生行波在直流线路中传播。行波的传播速度接近光速, 且行波的幅值和极性会随着故障位置和故障类型的不同而发生变化。利用行波的这些特性, 可以实现对故障的快速检测和定位。但由于线路存在分布参数以及行波在传播过程中会发生折射和反射, 使得行波信号的分析 and 处理较为复杂。

2.2 换流器故障特性

2.2.1 子模块故障

在 MMC 换流器中, 子模块故障是较为常见的故障类型。当某个子模块发生故障时, 会导致该子模块所在桥臂的电流和电压发生畸变。如果不及时采取措施, 可能会引发其他子

模块的过电压和过电流,进而导致整个换流器的故障扩大。子模块故障的表现形式多样,如电容击穿、IGBT 开路或短路等,不同的故障形式对换流器运行的影响程度也不同。

2.2.2 阀控系统故障

阀控系统是控制 VSC 换流器正常运行的关键部分。当阀控系统出现故障时,可能会导致换流器的触发脉冲异常,从而使换流器无法正常工作。例如,触发脉冲丢失或延迟可能会导致换流器输出电压波形畸变,功率传输出现异常,甚至引发直流侧过电压等问题。

3 柔性直流输电系统继电保护关键技术

3.1 行波保护技术

3.1.1 基本原理

行波保护是利用故障行波的特性来实现对故障的快速检测和定位。当柔性直流输电系统发生故障时,故障点会产生向线路两端传播的行波。行波保护通过检测线路两端行波的极性、幅值和到达时间等信息,来判断故障是否发生在保护区内。如果线路两端检测到的行波极性相同,则判定为区外故障;如果极性相反,则判定为区内故障。

3.1.2 实现方式

行波保护通常采用高速采样设备对线路电压和电流进行实时采集,通过信号处理算法提取行波信号。常用的行波信号提取方法包括小波变换、傅里叶变换等。在实际应用中,为了提高行波保护的可靠性和准确性,还需要考虑行波的折射、反射以及噪声干扰等因素的影响。例如,可以采用多尺度小波变换对行波信号进行分析,提高对微弱行波信号的检测能力;通过设置合理的阈值和延时,避免因噪声干扰导致的误动作。

3.2 纵联差动保护技术

3.2.1 基本原理

纵联差动保护是基于基尔霍夫电流定律,通过比较线路两端电流的大小和相位来判断故障是否发生在保护区内。在正常运行和区外故障时,线路两端电流的大小相等,相位相反,差动电流为零;当区内发生故障时,差动电流会超过整定值,保护装置动作。

3.2.2 实现方式

为了实现纵联差动保护,需要在输电线路两端安装电流互感器,将线路电流转换为适合保护装置处理的信号。然后通过通信通道将两端的电流信号传输到对端,进行差动计

算。在柔性直流输电系统中,由于线路分布电容的存在,会对差动电流产生影响,导致保护装置误动作。因此,需要采用电容电流补偿算法,消除分布电容对差动保护的影响。此外,还需要考虑通信通道的可靠性和传输延时对保护性能的影响,通过优化通信协议和采用同步采样技术等措施,提高纵联差动保护的可靠性和快速性。

3.3 基于电气量变化率保护技术

3.3.1 基本原理

基于电气量变化率保护技术是利用故障发生时电气量(如电压、电流、功率等)的变化率来实现对故障的检测。当系统发生故障时,电气量的变化率会明显增大,通过设置合适的门限值,当电气量变化率超过门限值时,保护装置动作。

3.3.2 实现方式

以直流电压变化率保护为例,通过实时监测直流侧电压的变化情况,计算电压变化率。在正常运行时,直流电压变化率较小;当直流侧发生故障时,直流电压会迅速下降,电压变化率会急剧增大。保护装置根据预设的电压变化率门限值来判断是否发生故障。这种保护技术具有响应速度快、原理简单等优点,但也容易受到系统正常运行时电气量波动的影响,需要合理设置阈值和延时,以避免误动作。

4 柔性直流输电系统继电保护配置方案

4.1 传统继电保护配置方案

在柔性直流输电系统发展初期,其继电保护配置方案主要参考传统直流输电和交流输电的保护原理。这一方案涵盖了过电流保护、过电压保护、欠电压保护以及差动保护等常见类型。从基本功能上看,过电流保护能够在电流超过设定阈值时启动,防止设备因过流而损坏;过电压保护与欠电压保护则分别针对电压异常升高和降低的情况,保障系统电压稳定;差动保护通过比较电气量差异,对设备或线路故障进行判断。在系统正常运行或遇到一些简单故障时,这些保护措施确实能够发挥作用,满足系统的基本保护需求,在一定程度上维持柔性直流输电系统的稳定运行。然而,随着对柔性直流输电系统研究的深入和实际应用的增多,传统保护方案的局限性逐渐凸显。柔性直流输电系统具有独特的故障特性,例如其直流侧短路故障时,短路电流上升速度极快,幅值也很大。在这种情况下,传统的过电流保护由于动作时间较长,无法快速响应并切除故障,这就导致故障可能迅速蔓延,对整个系统造成严重损害。另外,在弱交流系统中,

传统的差动保护面临严峻挑战。系统振荡时,电气量会出现大幅波动,容易使差动保护误判;同时,电容电流的存在也会干扰差动保护的正常工作,导致其出现误动作,从而影响系统的可靠性和稳定性。这些局限性表明,传统继电保护配置方案难以完全适应柔性直流输电系统的特殊需求,迫切需要进行改进和优化。

4.2 优化后的继电保护配置方案

4.2.1 分层分区保护策略

为了克服传统继电保护配置方案的不足,优化后的方案采用了分层分区的保护策略。这种策略根据柔性直流输电系统的结构特点,将其划分为换流站层、直流线路层和交流系统层等不同层次。在换流站层,由于子模块和阀控系统为换流站的关键组成部分,也是故障多发点,因此设置了子模块故障保护和阀控系统故障保护。子模块故障保护能够快速检测到子模块的异常,如电容击穿、IGBT 损坏等,并及时采取措施,防止故障扩大;阀控系统故障保护则专注于监测阀控系统的运行状态,一旦出现故障,迅速做出响应,保障换流站的正常运行。

在直流线路层,配置了行波保护和纵联差动保护。行波保护利用故障产生的行波特性,能够在极短时间内检测到故障并确定故障位置,具有动作速度快的优势;纵联差动保护通过比较线路两端的电气量,对区内故障进行准确判断,可靠性高。在交流系统层,配备了与交流电网相适应的保护,以确保柔性直流输电系统与交流电网连接时的安全稳定运行。这种分层分区的保护策略,使得每个层次的故障都能得到针对性的处理,实现了对系统故障的快速、准确识别和切除,大大提高了保护的可靠性和选择性,为柔性直流输电系统的稳定运行提供了有力保障。

4.2.2 主后备保护协同配合

除了分层分区保护策略,优化方案还着重强调主保护和后备保护的协同配合。主保护采用快速动作的保护原理,如行波保护和纵联差动保护,它们能够在最短时间内对故障做出反应,迅速切除故障,将故障对系统的影响降到最低。以直流线路保护为例,行波保护作为主保护,动作时间可以控制在几毫秒内,能够在故障发生的瞬间就采取行动。

而后备保护则作为主保护的有力补充,在主保护拒动或通信故障等异常情况下发挥作用。纵联差动保护作为直流线路保护的后备保护,虽然动作时间略长于行波保护,但它能够在主保护失效时可靠动作,确保故障仍能得到及时处理。

为了实现主后备保护之间的良好配合,需要合理设置保护的動作时间和整定值。通过精确计算和反复调试,使得主保护在正常情况下能够快速切除故障,而后备保护在主保护出现问题时能够准确启动,避免出现保护空白区,进一步提高了保护系统的可靠性,为柔性直流输电系统的安全运行提供了双重保险。

5 工程案例

5.1 某实际柔性直流输电工程概述

某柔性直流输电工程用于连接新能源发电基地和负荷中心,输电容量为 $[X]$ MW,直流电压为 $\pm[Y]$ kV。该工程采用了 MMC 型柔性直流输电技术,输电线路长度为 $[Z]$ km。

5.2 继电保护配置方案应用及效果

在该工程中,采用了优化后的继电保护配置方案。在换流站配置了子模块过电压/过电流保护、阀控系统故障监测与保护等;在直流线路上安装了行波保护和纵联差动保护装置。通过实际运行监测,该配置方案取得了良好的效果。在一次直流侧短路故障中,行波保护在 2 ms 内快速动作,准确切除了故障,避免了故障的进一步扩大。纵联差动保护作为后备保护,在整定值和动作时间的配合下,未发生误动作,保证了系统的可靠性。同时,通过对保护装置的定期维护 and 数据分析,不断优化保护参数,进一步提高了保护系统的性能。

6 结论

本文对柔性直流输电系统继电保护关键技术及配置方案优化进行了全面的研究。通过分析柔性直流输电系统的基本原理、结构特点和故障特性,阐述了行波保护、纵联差动保护、基于电气量变化率保护等关键技术的原理和实现方式。对比了传统和优化后的继电保护配置方案,结合工程案例验证了优化方案在提高保护性能、可靠性和快速性方面的显著优势。随着柔性直流输电技术的不断发展和应用,继电保护技术也需要不断创新和完善,以适应未来电网对安全稳定运行的更高要求。

参考文献:

- [1] 刘景睿. 柔性直流线路保护与雷击干扰识别方法研究 [D]. 山东大学, 2023.
- [2] 刘太文. 柔性直流线路保护关键技术研究 [D]. 昆明理工大学, 2023.
- [3] 武传健. 混合直流输电系统线路保护方法研究 [D]. 北京交通大学, 2023.