

# 高压直流输电系统的故障检测与保护技术研究

李杨 张乐

安徽明生电力工程咨询有限公司

**【摘要】**随着高压直流输电技术在电力系统中的广泛应用，其故障检测与保护技术成为确保系统安全稳定运行的关键。本文深入分析了高压直流输电系统的常见故障类型及其特征，详细阐述了当前主流的故障检测方法，包括基于行波的检测方法、基于电气量变化特征的检测方法等，并对相应的保护策略进行了探讨，如直流线路保护、换流器保护、直流滤波器保护等。通过对这些故障检测与保护技术的研究，旨在提高高压直流输电系统的可靠性和稳定性，为电力系统的安全运行提供有力保障。

**【关键词】**高压直流输电；故障检测；保护技术；电力系统

Research on Fault Detection and Protection Technology of High Voltage Direct Current Transmission System

Li Yang Zhang Le

Anhui Mingsheng Power Engineering Consulting Co., Ltd.

**【Abstract】** With the wide application of high-voltage direct current (HVDC) transmission technology in power systems, its fault detection and protection technology has become the key to ensuring the safe and stable operation of the system. This paper deeply analyzes the common fault types and their characteristics of HVDC transmission systems, elaborates in detail the current mainstream fault detection methods, including traveling wave-based detection methods, detection methods based on the characteristics of electrical quantity changes, etc., and discusses the corresponding protection strategies, such as DC line protection, converter protection, DC filter protection, etc. Through the research of these fault detection and protection technologies, the aim is to improve the reliability and stability of HVDC transmission systems and provide a strong guarantee for the safe operation of power systems.

**【Key words】** High-voltage direct current transmission; Fault detection; Protection technology; Power system

高压直流输电(HVDC)以其输电容量大、传输距离远、控制灵活等优点,在现代电力系统中发挥着越来越重要的作用。然而,由于直流系统的特殊运行特性,一旦发生故障,如果不能及时准确地检测并采取有效的保护措施,将会导致严重的后果,如系统停运、设备损坏等。因此,深入研究高压直流输电系统的故障检测与保护技术具有极为重要的现实意义。

## 一、高压直流输电系统常见故障类型及特征

### (一) 直流线路故障

直流线路故障是高压直流输电系统中较为常见的故障类型,主要包括极间短路故障和单极接地故障。极间短路故障通常是由于线路绝缘损坏,导致两极导线直接接触而引起的,这种故障会导致直流电流急剧增大,直流电压骤降。单极接地故障则是某一极导线与大地之间发生短路,故障极的电压会降低,而健全极的电压可能会升高,同时会有接地电流流过。

### (二) 换流器故障

换流器是高压直流输电系统的核心设备之一,其故障类型主要有阀短路故障、阀误开通故障、桥臂直通故障等。阀短路故障会使换流器内部的电流通路异常,导致直流侧短路

电流迅速上升,交流侧电流也会发生畸变。阀误开通故障可能会引起直流电压波动和交流系统的不稳定。桥臂直通故障会造成换流器的输出电压异常,影响直流输电的正常运行<sup>[1]</sup>。

### (三) 直流滤波器故障

直流滤波器的故障主要表现为电容器击穿、电抗器过热等。当电容器击穿时,会导致滤波器的滤波性能下降,直流系统中的谐波含量增加,可能会对其他设备造成干扰和损坏。电抗器过热可能是由于过载或散热不良等原因引起的,会影响电抗器的正常运行,甚至引发火灾等严重后果。

## 二、高压直流输电系统故障检测方法

### (一) 基于行波的故障检测方法

行波是故障发生时在输电线路上传播的暂态信号。基于行波的故障检测方法通过检测行波的到达时间、极性、幅值等特征来判断故障的位置和类型。例如,利用行波到达线路两端的时间差,可以计算出故障点到两端的距离。当发生极间短路故障时,会产生幅值较大的行波信号,且极性与故障类型相关。这种方法具有故障定位准确、检测速度快的优点,但对行波传感器的性能要求较高,且在复杂的线路结构和电磁环境下可能会受到干扰。

### (二) 基于电气量变化特征的故障检测方法

基于电气量变化特征的故障检测方法主要包含电流差动保护与电压变化率检测。电流差动保护借助直流线路两端或换流器不同桥臂间的电流差值实施故障检测,正常运行时其差值微小,一旦故障发生,故障电流致使电流差值逾越设定阈值,进而判定故障出现,该方法原理简易且可靠性强,然而在高阻接地故障情形下灵敏度欠佳。电压变化率检测则是通过监控直流电压的变化率来察觉故障,故障之际直流电压会陡然突变,变化率脱离正常区间,如直流线路单极接地故障时,接地极电压急剧降低,电压变化率显著增大,此方法虽能迅速捕捉电压异常变动,但易受系统正常操作及扰动的干扰,在实际应用中需综合考量其特性并与其他检测手段相互配合,以提升故障检测的准确性与可靠性<sup>[2]</sup>。

## 三、高压直流输电系统保护策略

### (一) 直流线路保护

直流线路作为高压直流输电系统的关键组成部分,其保护的可靠性直接关系到整个系统的稳定运行。目前,直流线路保护采用了多种先进且互补的保护原理。行波保护凭借其其对故障行波信号的高灵敏度捕捉与精确分析能力,能够在极短时间内准确判断故障位置,为后续的保护动作提供关键依据。电流差动保护则通过实时对比线路两端的电流差值,有效检测出线路中的故障电流变化,进一步提高了故障判断的准确性。与此同时,过电压保护与低电压保护在应对复杂多变的运行工况中发挥着不可或缺的作用。在实际运行中,恶劣天气下的雷击或系统操作失误等情况时有发生,这些都可能引发直流线路的过电压问题。此时,过电压保护系统迅速响应,通过精确检测直流电压,一旦发现其超出预设的过电压阈值,立即启动保护机制,快速投入避雷器等保护设备,将过电压幅值限制在安全范围之内,从而有效避免了线路绝缘因过高电压而被击穿的风险,确保了线路的完整性和绝缘性能。相反,当直流线路遭遇故障,如单极接地故障或其他严重故障,导致直流电压急剧下降时,低电压保护随即启动。其保护动作的策略根据故障的严重程度和系统的运行状态而定。在某些情况下,为防止故障进一步扩散,保护装置会果断闭锁直流系统,阻止故障电流的持续流通;而在其他情况下,若系统具备一定的备用电源和切换条件,保护系统会迅速切换到备用电源,维持系统部分关键功能的继续运行,从而最大限度地保障电力传输的连续性与稳定性,减少因故障导致的停电损失和对用户的影响。

### (二) 换流器保护

换流器在高压直流输电系统中起着至关重要的作用,其运行的安全性和稳定性直接影响到电能的转换与传输效率。针对换流器可能出现的各类故障,专门设计了多种精准且高效的保护功能。对于阀短路故障,这种故障一旦发生,可能会引发巨大的故障电流,对换流器造成严重损坏。因此,采用了快速熔断器和电子保护装置协同工作的保护方式。当阀短路故障发生的瞬间,快速熔断器凭借其快速熔断的特性,能够在极短时间内切断故障电流,阻止故障的进一步扩大。与此同时,电子保护装置通过对换流器电气量的实时监测,迅速检测到阀短路故障信号,并立即发出指令,停止换流器

的运行,从而有效隔离故障部位,保护换流器的其他部件免受损坏,确保整个系统的安全稳定运行。阀误开通故障也是换流器运行中可能出现的问题之一。为了及时发现并处理这种故障,保护系统通过对阀的触发信号以及电流、电压等电气量进行严密监测。一旦监测到阀的触发信号出现异常,或者电流、电压等电气量偏离正常运行范围,保护系统立即启动相应的纠正措施。这些措施可能包括对触发信号进行调整,尝试纠正阀的误开通状态;若故障无法及时纠正,则迅速停止换流器的工作,以防止故障对系统造成更大的影响,保障换流器的正常运行和电力传输的可靠性。桥臂直通故障同样会对换流器的运行产生严重威胁。当桥臂发生直通故障时,会导致桥臂电流和电压出现异常变化。此时,保护系统通过对桥臂电流和电压的精确检测,一旦发现其超出正常范围,即判定为桥臂直通故障发生。随即,快速保护动作迅速启动,将故障桥臂进行隔离,防止故障电流在桥臂中持续流通,避免因桥臂直通故障引发的换流器损坏以及系统故障的扩大,确保换流器能够在安全稳定的状态下运行,维持高压直流输电系统的正常输电功能。

### (三) 直流滤波器保护

直流滤波器保护对于高压直流输电系统的稳定运行意义重大,其涵盖的电容器不平衡保护和电抗器过流保护各司其职。在电容器不平衡保护方面,借助高精度的监测设备,持续对电容器组的不平衡电流及电压进行严密追踪。一旦检测到不平衡度逾越预设阈值,便即刻判定电容器极有可能出现了击穿等故障隐患。此时,系统会迅速发出清晰的报警信号,同时果断采取有效措施,例如精准切除故障电容器组,防止故障的进一步扩散,维持电容器组的整体性能稳定<sup>[1]</sup>。而电抗器过流保护同样关键,当电抗器电流超出额定数值时,保护机制立即启动。根据实际情况,或是降低直流系统的功率,以缓解电抗器的电流压力;或是直接切除滤波器,

及时将电抗器从故障电路中隔离,避免其因长时间过载而引发过热损坏,从而确保直流滤波器乃至整个输电系统的安全与稳定。

## 四、故障检测与保护技术的应用实例与效果分析

以某高压直流输电工程为例,该工程采用了基于行波和电流差动相结合的直流线路保护方案,以及针对换流器和直流滤波器的完善保护策略。在实际运行中,当发生一次直流线路单极接地故障时,行波保护首先快速检测到故障行波信号,并初步确定故障位置,随后电流差动保护进一步确认故障,保护装置迅速动作,在极短的时间内将故障极闭锁,同时健全极继续运行,保障了系统的部分输电能力。通过对这次故障处理过程的分析,可以看出准确的故障检测与有效的保护措施能够大大减少故障对系统的影响,提高系统的可靠性和稳定性。

## 五、结论

高压直流输电系统的故障检测与保护技术是保障系统安全稳定运行的重要环节。通过对常见故障类型和特征的深入分析,研究了基于行波和电气量变化特征的故障检测方法,并探讨了直流线路、换流器和直流滤波器等的保护策略。在实际应用中,这些技术能够有效地检测故障并采取及时的保护措施,减少故障对系统的影响。然而,随着高压直流输电技术的不断发展,如多端直流输电系统的出现等,对故障检测与保护技术也提出了更高的要求。未来需要进一步深入研究新型故障检测方法,优化保护策略,提高保护装置的性能和可靠性,以适应高压直流输电系统不断发展的需求,确保电力系统的安全稳定运行。

## 参考文献

- [1]黄良泉.高压直流输电线路继电保护关键技术分析[J].中国机械, 2023, (36): 65-69.
- [2]郑睿娜, 胡忠山, 文兆新, 汪娟娟.高压直流输电系统交流侧故障检测方法[J].广东电力, 2020, 33(05): 97-104.
- [3]李文婷.高压直流输电线路的故障检测定位技术研究[J].中国战略新兴产业, 2018, (28): 195.