

高压直流输电直流线路故障穿越重启策略

王 超

河北省水利工程局集团有限公司 河北 石家庄 050000

摘 要：高压直流输电优势显著，但直流线路运行中会面临短路、接地等故障，威胁系统安全稳定运行。故障类型多样，各有特征。为此，故障穿越重启策略设计需遵循快速性、安全性、稳定性原则，通过故障检测与定位、换流器控制调整以及重启过程优化等措施，保障系统在故障后平稳恢复运行，确保电力供应的可靠性与稳定性。

关键词：高压直流输电线路；故障穿越；重启策略

引言：在现代电力系统中，高压直流输电凭借其独特优势，在跨区域电力输送、新能源并网等领域发挥着关键作用。然而，直流线路运行中不可避免会遭遇各类故障，如短路、接地等，这些故障会引发电流增大、电压跌落等一系列严重后果，威胁系统安全稳定运行。为有效应对故障，保障系统可靠供电，深入研究直流线路故障类型、特征，并制定科学合理的故障穿越重启策略至关重要。本文将围绕此展开详细探讨。

1 高压直流输电直流线路故障概述

高压直流输电作为一种高效、远距离的大容量电能传输方式，在现代电力系统中占据着愈发重要的地位。它凭借独特的优势，如能够实现不同频率交流电网之间的互联、减少线路走廊占地面积、降低线路损耗等，在跨区域电力输送、新能源并网等领域发挥着不可替代的作用。然而，高压直流输电直流线路在运行过程中，不可避免地会面临各种故障的挑战，这些故障严重威胁着系统的安全稳定运行。（1）高压直流输电直流线路故障主要是指在直流线路持续运行期间出现的短路、接地等异常状况。短路故障又可细分为极间短路和极对地短路。极间短路是指直流输电系统的正、负极之间直接导通，这种情况通常是由于线路遭受外力破坏，如雷击、大风导致导线舞动相互接触，或者线路绝缘子发生闪络、击穿等引发。极对地短路则是直流线路的某一极与大地之间形成低阻抗通路，常见原因包括线路绝缘子污秽积累、绝缘老化，以及树木、鸟类等异物搭接线路等。（2）接地故障同样不容忽视，它分为高阻接地和低阻接地。高阻接地往往是由于线路经过树木、干燥土壤等介质与大地相连，过渡电阻较大，故障特征相对不明显；低阻接地则多是因为线路绝缘子损坏、金属性接地等原因，导致接地电阻较小，故障电流较大。（3）这些故障一旦发生，会引发一系列严重的后果。首先，会导致直流电流急剧增大。在短路故障发生时，线路的等

效阻抗大幅减小，根据欧姆定律，电流会瞬间飙升至正常值的数倍甚至数十倍。巨大的短路电流会产生强大的电动力，对线路的导体和绝缘子造成机械损伤，如导线断裂、绝缘子破碎等。同时，过大的电流还会使线路发热严重，加速绝缘材料的老化和损坏，进一步降低线路的绝缘性能，形成恶性循环。其次，直流电压会大幅跌落。故障点的存在使得直流系统的电压分布发生改变，故障相的电压迅速降低，甚至接近于零。电压的跌落会影响与直流线路相连的换流站的正常运行，导致换流器的触发角、关断角等控制参数发生异常变化，影响换流器的功率传输能力和运行稳定性。此外，直流线路故障的影响范围并不仅限于线路本身。由于高压直流输电系统是一个有机的整体，线路故障会迅速波及换流站等关键设备。换流站内的换流变压器、平波电抗器、阀组等设备会承受过电压、过电流的冲击，可能导致设备损坏、保护误动等问题，进而影响整个高压直流输电系统的安全运行，严重时甚至会造成大面积停电事故，给社会经济和人民生活带来巨大的损失。因此，深入研究高压直流输电直流线路故障的机理、特征和检测方法，制定有效的故障穿越和重启策略，对于保障高压直流输电系统的安全稳定运行具有重要的现实意义^[1]。

2 直流线路故障类型及特征

2.1 暂时性故障

暂时性故障在电力系统的运行中是一类较为常见且具有特定特征的故障类型。它指的是在故障发生之后，无需进行大规模、长时间的维修处理，经过一段短暂的时间就能够自行恢复至正常运行状态，或者仅需采取一些简单、便捷的措施便可消除的故障。常见的暂时性故障，像雷击引发的线路闪络就是典型代表。当雷电击中输电线路时，强大的雷电过电压会使线路绝缘子表面的空气发生击穿，产生闪络现象，导致线路出现短暂的短路或接地。但这种闪络持续时间极短，在雷电消失后，空气绝缘性能迅速恢

复,线路即可恢复正常。此外,瞬时性接地也属于暂时性故障,它可能是由于外界异物短暂接触线路等原因造成。虽然暂时性故障对线路和设备的损害相对较小,但它会在故障发生的瞬间导致系统参数发生突变,引发系统短期内出现扰动,影响电能质量。

2.2 永久性故障

永久性故障在电力传输系统中是一类性质严重且不容忽视的故障情形。它指的是在故障出现之后,仅依靠系统自身的调节能力或者实施一些简单、临时的处置手段,根本无法使系统恢复到正常运行状态的故障类型。常见的永久性故障包含线路断线,这可能是由于长期承受机械应力、外力破坏或者线路老化等原因,导致导线断裂,使电流无法正常通过;绝缘子击穿也是典型,当绝缘子长期处于恶劣环境,如污秽、高湿度等,其绝缘性能下降,在过电压作用下被击穿,造成线路永久性短路;还有永久性接地,多因线路杆塔基础沉降、树木长期挤压线路等因素引发。这类故障持续时间长,会持续对线路和相关设备造成严重损害,如导致设备过热、损坏等。只有通过专业、针对性的检修工作,更换受损部件,才能彻底排除故障,恢复系统正常运行^[2]。

2.3 高阻故障

高阻故障在电力输电线路故障类型中属于较为棘手的一类。它指的是在故障发生时,故障点处的过渡电阻呈现出较大数值的故障状况。这类故障常见的形成原因,是线路与树木发生接触,或者线路表面附着大量污秽等,进而引发接地故障。高阻故障具有鲜明的特征。由于过渡电阻大,使得流经故障点的故障电流相对较小,与传统短路等故障产生的较大电流形成明显对比。同时,其故障特征十分不明显,在系统运行参数上的体现较为微弱,常规的故障检测方法和保护装置难以准确捕捉到这些细微变化。这就给故障检测和定位工作带来了极大挑战,技术人员难以快速、精准地确定故障位置。而故障处理的不及时,不仅会延长系统的停电时间,影响供电可靠性,还可能使故障进一步恶化,对输电线路及相关设备造成更严重的损害,增加后续的维修成本和难度。

3 故障穿越重启策略设计原则

3.1 快速性原则

在构建和完善故障穿越重启策略时,快速性原则是至关重要的核心准则。该原则要求故障穿越重启策略必须具备卓越的快速响应能力。当系统遭遇故障时,时间就是关键,每一秒的延误都可能带来不可估量的损失。因此,策略需能够在故障发生的瞬间,迅速且精准地检

测到故障的存在。这依赖于先进且灵敏的故障检测技术,能够实时监测系统的各项参数,一旦参数出现异常偏离正常范围,即可立即判定故障发生。在检测到故障后,策略应迅速启动与之匹配的相应处理措施,不能有丝毫的迟滞。通过快速的处理,能够有效缩短整个故障处理的时间周期。如此一来,便可以极大地减少故障对系统造成的负面影响,防止故障的进一步扩散和恶化,避免系统出现大规模的功率波动,保障系统运行的稳定性,为电力系统的安全可靠运行提供坚实有力的支撑。

3.2 安全性原则

在故障穿越和重启这一关键且复杂的操作过程中,安全性原则是绝对不容忽视的核心要义。它要求在整个流程里,必须全方位、无死角地确保系统设备的安全稳定运行。具体而言,要高度警惕因所采用的策略不合理、不恰当,而引发换流器、变压器等关键设备承受过载、过压的恶劣状况,进而造成设备的严重损坏,影响整个电力系统的正常运转。不仅如此,安全性原则还强调对故障范围的严格把控。必须采取有效措施防止故障像滚雪球一样不断扩大,避免引发更为严重的系统故障和连锁反应。此外,操作人员的安全生命以及周边环境的安稳同样至关重要。要制定完善的安全防护机制和操作规范,保障操作人员在执行故障穿越和重启任务时的人身安全,同时确保周边环境不会因故障处理过程而受到破坏或产生安全隐患,实现电力系统的安全、可靠、稳定运行。

3.3 稳定性原则

在精心设计故障穿越重启策略时,稳定性原则是保障电力系统可靠运行的关键基石。该原则着重强调,所制定的策略必须全方位有利于维持系统的稳定状态。在故障穿越和重启这一复杂且关键的阶段,系统面临着诸多不确定因素和潜在风险,极易受到冲击。因此,策略需具备精准的调控能力,尽可能降低对交流系统和直流系统的扰动与冲击。要充分考虑到系统在故障前后的动态特性,通过合理的参数设置和控制逻辑,避免系统出现振荡、失稳等不良状况。一旦系统出现不稳定迹象,策略应能迅速做出反应,采取有效的抑制措施。同时,要确保功率能够平稳、有序地恢复,防止功率的突变对系统造成二次冲击。只有严格遵循稳定性原则,才能保障电力系统在故障穿越和重启过程中,始终保持安全、稳定的运行态势,为电力供应的可靠性提供坚实保障。

4 直流线路故障穿越重启策略

4.1 故障检测与定位

在高压直流输电系统里,及时且精准地检测故障并

确定其具体位置，乃是顺利实施故障穿越重启策略的关键前提。若无法快速锁定故障，后续的重启操作便如同无头苍蝇，难以有效开展。（1）为实现这一目标，通常会在直流线路上科学合理地安装各类先进的故障检测装置。这些装置能够实时、不间断地监测线路的电流、电压等关键参数。一旦这些参数出现异常波动，超出正常运行的范围，装置便会迅速做出反应，依据预设的算法和逻辑，快速判断是否有故障发生。（2）在判定故障发生后，还需进一步确定故障点的位置。此时，可借助行波法、阻抗法等成熟且高效的定位技术。行波法通过捕捉故障产生的行波在线路上的传播特性来确定故障距离；阻抗法则是根据线路的阻抗特性来计算故障位置。通过这些技术，能大致确定故障点所在，为后续精准的故障处理和系统重启提供坚实可靠的依据^[3]。

4.2 换流器控制调整

在高压直流输电系统遭遇故障时，对换流器控制进行调整是实现故障穿越的核心环节。故障类型不同，换流器的控制调整策略也各有差异。（1）当面对暂时性故障时，由于此类故障持续时间短、对设备损害相对较小，可采取针对性措施。例如降低换流器触发角，这样能有效调节换流器的输出特性，减少无功功率的消耗；同时限制直流电流，降低故障电流的幅值，进而减轻故障电流对换流器及其他设备的冲击。在故障自行消失后，系统能迅速将换流器恢复至正常运行状态，保障电力传输的连续性。（2）而对于永久性故障，其危害大且无法自行恢复。在精准检测并确认故障后，需及时将换流器闭锁。闭锁操作能迅速切断故障电流通路，防止故障进一步恶化，避免对换流器等关键设备造成不可挽回的损坏，确保整个高压直流输电系统的安全稳定运行。

4.3 重启过程优化

在高压直流输电系统运维中，重启过程优化是保障

系统平稳恢复运行的核心要点。当确认故障已被有效消除或可靠隔离后，需严格遵循科学合理的步骤开展系统重启工作。（1）重启伊始，要循序渐进地增加换流器的触发角。这一操作如同缓缓开启电力传输的“阀门”，能使直流电压和电流以较为平缓的态势上升，有效规避因电压、电流突变而产生过大的冲击，防止对换流器及相关设备造成二次损害。（2）依据系统实时恢复状况，有条不紊地逐步提升传输功率。在此过程中，需密切且精准地监测系统各项参数的变化，如电压、电流、功率因数等。一旦发现参数异常，立即采取相应措施进行调整。通过这样的精细操作，确保重启过程安全稳定，最终使系统顺利恢复至正常运行水平，保障电力供应的可靠性和稳定性。

结束语

高压直流输电直流线路故障的妥善处理，关乎电力系统的安全稳定运行。从深入剖析故障类型与特征，到遵循快速性、安全性、稳定性原则设计故障穿越重启策略，再到精准落实故障检测定位、换流器控制调整及重启过程优化等关键举措，每一步都紧密相连、不可或缺。只有持续完善相关技术与策略，提升应对故障的能力，才能有效降低故障影响，保障高压直流输电系统高效、可靠地运行，为现代社会的电力供应提供坚实支撑。

参考文献

- [1]刘卫明, 汤汉松, 张平, 等.直流断路器结合暂态行波的HVDC高压直流输电线路故障保护算法[J].电气自动化, 2021(1): 102-104.
- [2]罗磊, 艾红杰.特高压直流输电中性点偏移保护的研究[J].电气技术, 2020(11): 71-75.
- [3]柴小君, 韩鹏.高压直流输电线路故障特性分析[J].电气开关, 2020(5): 5-8.