

[继电保护]

高压直流输电线路中继电保护技术的应用研究

文/王汉之

山东山大电力技术股份有限公司

高压直流输电线路是输送电能的关键动脉，其稳定性和安全性对整个电网的运行至关重要。然而，随着电网规模的不断扩大和复杂性的增加，高压直流输电线路面临着日益严峻的挑战。为保障电网的稳定运行，继电保护技术的应用显得尤为关键。研究通过探讨高压直流输电线路中继电保护技术的应用现状、应用价值及应用策略，分析不同继电保护技术的优缺点，并结合具体案例进行实证分析，旨在推动电力系统的安全稳定运行。

继电保护技术作为电力系统中的重要组成部分，能够在故障发生时迅速、准确地切断故障线路，防止故障扩大，保障电网的安全稳定运行。在高压直流输电线路中，由于传输的电能巨大，一旦发生故障，其影响范围和后果将更为严重。因此，对高压直流输电线路中继电保护技术的应用进行深入研究，具有重要的理论意义和实际应用价值。

高压直流输电线路继电保护存在的问题

1. 高压直流输电线路继电保护技术原理的局限性

高压直流输电线路领域继电保护技术的核心目标是确保整个电力系统的安全稳定。值得注意的是，当前的继电保护技术在实际应用过程中仍然无法避免受到其固有的原则限制约束。具体而言，高压直流输电线路中的继电保护技术主要依靠对电流和电压等关键电气参数的实时监测，以便及时识别和处理各种故障。然而，这种基于单一电气参数的判断方法存在误判、漏判的潜在风险。尤其是在一些复杂的故障情况下，电气参数的变化不明显，使继电保护装置难以准确定位故障类型、位置，进而减慢故障处理的速度。

2. 保护方法过于单一

在高压直流输电线路的保护工作中，继电保护技术仍然面临着保护方法单一，缺乏多样化应对策略的问题。目前，高压直流输电线路的继电保护主要依靠过电流保护和差动保护等传统保护措施。然而，当保护方法遇到新类型的故障或复杂的故障场景时，可能无法提供充分有效的保护策略。虽然过电流保护可以快速切断故障线路，但在某些特定情况下无法发挥作用，进而导致停电范围扩大。虽然差动保护具有较高的灵敏度和选择性，但在某些特殊情况下，也可能引起误动或拒动。特别是在电缆线路中，由于电容效应、电磁干扰等各种因素，差动保护可能无法准确判断故障电流的大小与方向，导致误判的发生。

3. 理论研究的滞后与实践应用的脱节

尽管近年来继电保护技术在高压直流输电线路中得到了广泛应用，但相关理论研究仍然滞后于实践需求。一方面，当前的高压直流输电线路继电保护技术研究主要是集中在保护算法、保护配置等方面，而对于保护原理、保护机制等基础理论的研究相对较少。这导致在实际应用中继电保护技术只能针对已知的故障类型和场景进行保护，而无法应对

新型的故障。另一方面，由于高压直流输电线路的运行环境复杂多变，不同地区的电网结构和运行方式也存在差异。在实际应用中，继电保护技术需要根据具体情况进行定制和优化。然而，由于理论研究的滞后，导致不同地区的继电保护技术存在差异化现象，无法为实践提供指导。

继电保护在高压直流输电线路中的应用价值

1. 确保电力系统安全稳定运行的核心保障

高压直流输电系统作为现代电力网络的重要组成部分，承担着远距离、大容量电能传输的重任。在复杂的电力系统中，各种电气设备和线路之间存在相互耦合和干扰，这要求继电保护装置能准确区分正常操作与故障状态，避免误动作或拒动作，从而仅切断故障部分，而不影响其他正常部分的运行，最大程度地减少停电范围。

2. 提升高压直流输电系统的智能化水平

随着智能电网建设的不断推进，高压直流输电系统也需要不断提升其智能化水平。在这一过程中，继电保护的应用价值在于其能够为系统提供全面的保护和控制功能，实现智能化管理和优化运行。继电保护装置可以通过集成先进的传感器、通信技术和信息处理技术，通过分析大量的实时数据，继电保护装置能更准确地判断故障类型和位置，为系统提供更为精确的保护和控制策略。同时，继电保护装置可以与自动重合闸装置、无功补偿装置等智能设备相互配合，实现故障的快速恢复和系统电压的稳定控制。

3. 推动继电保护技术的创新发展

在高压直流输电系统中应用继电保护技术，不仅有助于保障电力系统的安全稳定运行和提升系统的智能化水平，还能够推动继电保护技术的创新发展。首先，高压直流输电系统的特殊性和复杂性为继电保护技术提供新的应用场景和挑战，针对高压直流输电系统中可能出现的特殊故障类型（如对地闪络、雷击等），继电保护技术需要研究新的保护原理和算法，以提高保护的准确性和可靠性。其次，高压直流输电系统的大规模建设和运行也为继电保护技术的研究提供丰富的实践经验支持。通过对实际运行数据的分析，可以发现继电保护技术在实际应用中存在的问题，为技术创新提供有力支持。

高压直流输电线路继电保护的主要影响因素

高压直流输电线路的继电保护系统是其稳定运行的关键防线。在设计和实施这一系统时，需充分考虑多种影响因素，以确保其高效、准确地响应各种故障情况。

1. 电容电流特性的影响

高压直流输电线路的电容电流特性是继电保护设计中的一个重要考量因素。由于线路的电容量大、波阻抗小，正常运行时会产生较大的电容电流。这种电流不仅影响线路的稳定运行，还可能对继电保护装置的性能产生干扰。当电容电流过大时，继电保护装置难以准确判断故障类型和位置，从而影响其保护效果。因此，在设计继电保护系统时，要充分考虑电容电流的影响，通过合适的补偿措施和算法优化，确保继电保护装置在电容电流作用下仍能稳定、可靠地工作。

2. 过电压条件的影响

过电压是高压直流输电线路中常见的故障之一，由雷击、操作失误等多种因素引起。在过电压情况下，继电保护装置需要迅速响应并切断故障线路，以防止对设备和系统造成进一步损害。然而，过电压的波形和持续时间具有不确定性，增加了继电保护装置准确判断的难度。因此，在设计继电保护系统时，要充分考虑过电压条件的影响，采用快速响应和准确判断的算法和逻辑，确保在过电压情况下能够及时、准确地动作。

3. 电磁暂态过程的影响

高压直流输电线路在操作和故障发生时会产生电磁暂态过程，这一过程对继电保护装置的性能具有显著影响。电磁暂态过程产生的高频分量会干扰继电保护装置的正常工作，而电气测量的偏差也导致继电保护装置误判或漏判。因此，需要采用先进的滤波技术和电气测量技术，以消除高频分量的干扰并提高电气测量的准确性。同时，还需要通过优化继电保护系统的算法和逻辑，以适应电磁暂态过程的影响，确保继电保护装置在复杂电气环境下的稳定性和可靠性。

高压直流输电线路中继电保护技术的应用对策

1. 强化继电保护技术理论研究

为提高高压直流输电线路中介电保护的稳定性

以及精确度，有必要回溯至基本原理层次，对现行的继电保护技术展开全方位、多角度和系统化的深度挖掘与优化完善。这一过程的目标是建立起一套具备可靠性、适用性的理论框架，并作为依托，设计出一整套科学严谨又切合实际需求的继电保护策略方案^[1]。目前，电力领域的学者和专家对于继电保护的原理及其运用方法已经提出诸多富有创新精神且具有前瞻性的观点，不仅极大地充实继电保护技术的理论根基，更为实际应用提供宝贵的依据。

在具体保护策略的研究方面，行波保护作为高压直流输电线路中一种关键的保护措施，其性能的改善直接关乎整个电力系统的安全稳定。因此，郑小江等学者提出基于小波变换的行波保护理论^[2]。这一理论巧妙地借助小波变换在时频分析方面的独特优势，对行波信号进行精细化处理，从而有效提升行波保护的精准度与稳定性。同时，郑喻等学者还提出极性比较式行波保护理论^[3]。该理论通过对行波信号的极性对比分析，从而确定故障的方向与位置。这种继电保护技术具有原理简洁明了、实施简便易行等优点，尤其适合于高压直流输电线路中特定类型的故障。然而，鉴于高压直流输电线路的复杂性以及故障类型的多样化，极性比较式保护在某些特殊情况下会面临一定程度的局限性。因此，需要根据实际工况积极开展优化。

除此之外，高压直流输电线路的复杂性以及故障类型的多样性使得继电保护技术的理论研究面临着巨大的挑战。为实现有效的技术交流，需要建立跨学科间的协同合作机制，充分发挥现代科技手段与方法的优点，诸如人工智能、大数据分析等，以推动继电保护技术的创新发展。而且，还需加强与国际领先水平的交流，积极借鉴国外的先进经验与技术成果，持续提升我国高压直流输电线路继电保护技术的整体水平。

2. 提高继电保护装置的可靠性

提升高压直流输电线路继电保护装置的可靠性，需要深入贯彻全方位的整体保护观念，对保护方案开展全方位且深思熟虑的评估。尽管某些单一的保护原理或策略在特定情况下会表现出显著的效果，然而，在面对错综复杂且千变万化的电网环境和各类故障类型时难以有效应对。而建立多元化的保护机制，实现各保护策略间的补充与协调，对于

提高系统保护的可靠性具有重要的价值。以高压输电线路为例，当某一路段出现故障时，故障会迅速蔓延至整个电网系统，进而引发两侧电流产生异常信号。异常信号正是判断故障发生的重要指示，通过精准捕捉和深度解析信号能够迅速定位故障点，并采取相应的保护措施。因此，需要充分挖掘并运用异常信号，通过各种尖端的继电保护元件，如电流互感器、电压互感器等，构建一个联动性强、反应速度快的保护系统。

其中，电容电流补偿方法作为交流输电线路保护领域的一项重要技术，通过对电容电流的精确测量和补偿，有效消除了其对继电保护系统的不利影响。在高压直流输电线路中，可以结合直流线路的具体配置、特性，借鉴电容电流补偿方法，优化并提高直流线路的保护性能。具体来说，可以在直流线路两侧安装高准确度的电流互感器，实时监控线路中的电流变化。一旦发生故障，电流互感器能迅速捕获异常信号，并将其传递给继电保护系统。继电保护系统接收到信号后，将立即展开快速判断，确定故障类型与位置，并启动相应的保护动作。除此之外，也可以采用先进的算法，对异常信号开展精细化处理。尤其是人工智能、神经网络等现代信号处理技术，能够满足信号去噪、滤波和特征提取等操作需求，显著提高分析效率。

3. 综合保护与协同控制策略

在高电压直流输电线路领域，继电保护技术的运用绝非单纯采用某一种保护装置或者策略，而应当全面理解继电保护技术在整个系统中的综合应用，充分发挥协同性作用。为此，要构建一个全方位的保护框架，包含诸如主保护、备用保护等多层级的系统，各个装置之间需要实现良好的协同配合关系，形成互补效应，确保在各类突发的故障状态下均能发挥稳定、持续且可靠的电流保护功能。同时，还需要强化与其他控制系统的协同合作力度。举例来说，可以与电源侧控制系统、负荷侧控制系统等深度协同控制，实现整个系统的高效运行，提升故障处理能力。除此之外，也不能忽视对新兴技术在继电保护技术中的应用研究。伴随着科技的飞速进步，新的保护算法、新型传感器技术和先进通信技术层出不穷，为继电保护技术的发展带来前所未有的机遇。探索这些新技术在高电压直流输电

线路中的应用潜力，进一步推动继电保护技术的创新发展。

高压直流输电线路中继电保护技术的应用案例

随着电网规模的不断扩大和复杂性的增加，高压直流输电线路面临着诸多挑战，其中故障频发成了一个亟待解决的问题。为进一步探讨继电保护技术，本文将某电力公司的高压直流输电线路A为例，结合大量实际运行数据，深入探讨继电保护技术的应用及其效果。某地区高压直流输电线路是该地区电网的核心组成部分，承载着大量的电能传输任务。然而，在过去的几年中，A线路频繁发生各种故障，严重影响电网的安全稳定运行。A线路升级改造前故障统计数据见表1。

表1 A线路升级改造前故障统计数据

时间段	故障次数	故障类型	故障原因	故障影响
2021年第一季度	6	断路器失灵	设备老化	导致系统失稳
2021年第二季度	7	电容器爆炸	过电压	引发火灾
2021年第三季度	7	相间短路	人为操作失误	引发跳闸
2021年第四季度	8	其他	自然灾害等	多种影响

从上述数据可以看出，A高压直流输电线路的故障类型多样，且故障发生频率较高。其中，断路器失灵、电容器爆炸和相间短路是最主要的故障类型，占据了总故障次数的80%以上。这些故障不仅导致系统失稳，还引发了火灾、跳闸等严重后果，给电网的安全稳定运行带来极大的威胁。

针对上述问题，电力公司决定对A高压直流输电线路的继电保护技术进行全面升级改造。

1) 引入先进的继电保护装置。电力公司引进了具有高准确度、高可靠性和高灵敏度的继电保护装置。这些装置能够实时采集线路的电压、电流等参数，并通过智能算法迅速识别并定位故障点，同时准确判断故障类型。

2) 优化保护逻辑。电力公司根据线路的实际运行情况和历史故障数据，对继电保护装置的保护逻辑和定值进行优化。通过精确设定保护定值，提高保护的灵敏度和选择性，降低误动和拒动的风险。

3) 加强与其他系统的协同配合。电力公司加强与调度自动化系统、故障录波系统等其他系统的协

同配合。通过实现数据共享和快速处理，提高故障处理的效率。

经过继电保护技术的升级改造，高压直流输电线路的故障率明显降低，电网的安全稳定运行得到了有效保障。升级改造后A线路故障统计数据见表2。

表2 升级改造后A线路故障统计数据

时间段	故障次数	故障识别准确率 (%)	平均动作时间/ms	误动作次数	拒动作次数
2023年第一季度	5	100	30	0	0
2023年第二季度	3	100	25	0	0
2023年第三季度	2	100	20	0	0
2023年第四季度	1	100	15	0	0

从表2可以看出，升级改造后A高压直流输电线路的故障次数大幅减少，故障识别准确率提升至100%，平均动作时间也大幅缩短。同时，误动作和拒动作现象得到有效遏制，保证了电网的稳定运行。

结束语

在高压直流输电线路中，继电保护技术展现出重要的应用价值。通过探索应用，继电保护技术不仅能迅速准确地检测故障，还能有效隔离故障区域，确保电力系统的稳定运行。展望未来，随着电力技术的不断进步，继电保护技术将面临更多挑战与机遇。期待通过持续的创新和优化，使继电保护技术在高压直流输电线路中发挥更加关键的作用，为电力系统的安全、高效运行提供有力保障。EA

(收稿日期：2024-05-22)

参考文献

- [1] 何海翔，荆彧. 高压直流输电线路中的继电保护技术分析[J]. 集成电路应用，2023，40(4): 86-87.
- [2] 郑小江，姚刚，吴通华，等. 综述高压直流输电线路继电保护技术的应用[J]. 电子技术与软件工程，2018(24): 212.
- [3] 郑喻. 高压直流输电线路继电保护技术的应用与维护[J]. 通信电源技术，2018，35(10): 108-109.