

Discussion on Fault Diagnosis and Protection Technology of High Voltage Direct Current Transmission System

Zhengzhi Chen

Jiangxi Copper Group Guixi Smelter, Guixi, Jiangxi, 335400, China

Abstract

High voltage direct current transmission system, as an important technical means of long-distance and large capacity power transmission, has been widely used in modern power grids due to its advantages of high stability and low loss. However, the system faces complex electromagnetic environments and asymmetric working conditions during operation, making it prone to multiple types of faults. Moreover, the fault propagation speed is fast and the diagnosis difficulty is high, posing a serious threat to system safety. Therefore, building a scientific and effective fault diagnosis mechanism and a fast and accurate protection technology system has become the key to ensuring its safe operation. This article focuses on the common types of faults in high-voltage direct current transmission systems, deeply analyzes the characteristics of fault propagation, systematically sorts out the current mainstream fault diagnosis methods and protection strategies, focuses on exploring the response mechanism based on multi-source information fusion and high-speed circuit breaker configuration, and conducts forward-looking discussions on future technological development trends at the technical level, aiming to provide theoretical support and practical guidance for the stable operation and safety guarantee of high-voltage direct current transmission systems.

Keywords

High Voltage Direct Current Transmission; Fault diagnosis; Protection strategy; Fault response; Multi terminal system

高压直流输电系统故障诊断与保护技术探讨

陈正治

江铜集团贵溪冶炼厂, 中国·江西 贵溪 335400

摘要

高压直流输电系统作为长距离、大容量电能传输的重要手段, 因其稳定性高、损耗低的优势, 在现代电网中得到广泛应用。然而, 该系统在运行过程中面临着复杂的电磁环境和非对称工况, 容易发生多类型故障, 且故障传播速度快、诊断难度大, 对系统安全构成严重威胁。因此, 构建科学有效的故障诊断机制与快速精准的保护技术体系, 成为保障其安全运行的关键。本文围绕高压直流输电系统常见故障类型, 深入剖析故障传播特性, 系统梳理当前主流的故障诊断方法与保护策略, 重点探讨基于多源信息融合和高速断路器配置的响应机制, 并对未来技术发展趋势进行了技术层面的前瞻性研讨, 旨在为高压直流输电系统的运行稳定与安全保障提供理论支撑和实践指导。

关键词

高压直流输电; 故障诊断; 保护策略; 故障响应; 多端系统

1 引言

随着电力系统跨区互联规模的不断扩大, 高压直流输电技术凭借其长距离输送电能的经济性和可控性, 在国家主干电网构建中占据核心地位。尤其在新能源大规模并网背景下, 直流输电的调节能力与系统兼容性优势愈发凸显。但其固有的技术特征也带来了故障响应时间短、波动幅度大、保护配合难等挑战, 使得传统的交流保护思路难以直接适用于直流系统。面对直流系统在运行过程中的高频率突发故障、设备损坏风险以及保护动作失效等复杂情况, 亟需构建一

套具备快速识别、精准定位和分级响应能力的保护与诊断体系。

2 高压直流输电系统故障特性分析

2.1 高压直流输电系统的结构组成与运行特征

高压直流输电系统由换流站、直流线路、接地极、滤波装置及控制保护系统等组成, 核心设备包括换流器和换流变压器。系统运行中通过换流器实现交流与直流之间的能量变换, 并以直流方式进行远距离电力输送。系统具备潮流可控、线路损耗低、运行效率高等特点, 能够有效实现远距离电能传输及区域间电网互联。在实际运行中, 系统对电压波动、电流突变及短路冲击等高度敏感, 依赖快速响应的控制与保护机制维持系统稳定, 整体结构紧凑但对故障容忍度较

【作者简介】陈正治(1998-), 男, 中国江西鹰潭人, 本科, 助理工程师, 从事电气检修研究。

低,对诊断与保护提出较高要求。

2.2 典型故障类型及其传导机制

高压直流输电系统中常见的故障类型包括线路接地、极间短路、换流器内部故障及直流断路器失效等。接地故障会导致电流单向突增,引发电位不平衡及设备绝缘击穿;极间短路可引发双向高电流冲击,严重时可能损毁换流装置与滤波系统。换流器故障则表现为阀组导通异常、冷却系统失效及控制系统错判等,可能扩展为系统性崩溃。故障信号在直流系统中传播速度极快,常在毫秒级内引发连锁反应。由于直流电流无自然过零点,无法依靠传统方式清除短路电流,故需借助快速开断元件及全系统配合的保护策略进行抑制。

2.3 直流故障与交流系统故障的差异对比

直流系统与交流系统在故障表现及处理机制上存在本质差异。直流系统故障电流上升速度快、峰值高且持续时间短,不具备自然过零特性,断路器需具备强制开断能力,响应时间通常要求小于5ms。交流系统中故障电流呈周期性震荡变化,依赖过零点实现电弧熄灭,保护装置主要以继电器配合断路器构建选择性保护策略。直流系统中,一旦发生短路,故障电流受线路电感与电源电动势控制,难以自然消除,需通过快速限流、换流器闭锁或直流断路器快速动作控制。交流系统容错能力较强,保护设计可结合时间延时实现分区隔离,而直流系统多采用集中控制与高频采样实现瞬时判别与隔离,技术要求与实现逻辑显著不同。

3 直流系统故障诊断的技术路径

3.1 基于电气量特征的快速识别方法

在高压直流系统运行过程中,故障诊断的关键在于对电气量异常变化的实时捕捉与快速识别。典型的诊断参数包括直流电压跌落、直流电流上升速度、换流阀电流失衡等,这些参数可通过高速采样系统进行微秒级监测。故障发生时,电压波形会出现急剧下降,电流则在极短时间内出现显著上升,形成典型的突变特征。通过设定特征量阈值及变化率判断标准,可实现对不同类故障的初步判别。进一步结合电气量在空间分布上的差异,可以对故障区段进行粗定位。此类方法依赖高灵敏度传感器及高速数据处理单元,对系统噪声抑制能力和电磁兼容设计提出较高要求,适用于系统实时响应与故障初步识别。

3.2 信号处理与模式识别在故障定位中的应用

信号处理技术为故障波形的特征提取提供有效手段,常用方法包括小波变换、傅里叶分析、希尔伯特变换等,可将原始电压电流信号在频率、幅值与相位上进行分解,从中识别出典型故障特征模式。在实际应用中,通过构建特征矢量,将提取出的数据输入模式识别模型中进行分类判断,能够区分不同故障类型与发展阶段。采用支持向量机、决策树、概率神经网络等模式识别算法,可有效提升定位精度与判断

速度。在故障波动剧烈或信号噪声干扰严重场景中,信号预处理与特征优化技术可增强模型稳定性与泛化能力。该类方法对历史数据依赖程度较高,适宜在具有良好数据积累基础的工程系统中推广使用。

3.3 多源信息融合诊断模型构建

在单一数据源存在不确定性与局限性的背景下,多源信息融合诊断模型逐渐成为提升故障识别准确性的关键路径。该类模型来自换流站、直流线路、保护装置、电压电流传感器、温度传感器等多个监测终端的数据进行统一采集与处理,通过构建时空一致性特征向量,结合统计分析、贝叶斯推断、模糊逻辑等方法对故障状态进行综合判断。信息融合可以提高系统对冗余信号的容忍能力,降低误判概率,并在数据缺失或失真的情况下保持一定诊断准确度。模型建立过程中需考虑各类信息的同步性、可信度与融合权重,保障最终诊断结果的准确性与可解释性,具备高度实时性与容错性的融合模型已在多端直流系统中显示出良好效果。

4 故障保护策略及其响应机制

4.1 线路快速断开与换流器自保护机制设计

高压直流系统发生故障时,快速切断故障电流是防止设备损毁与系统崩溃的关键。线路断开通常依赖直流断路器或基于换流器控制的限流与闭锁机制实现。在故障信号识别后,保护系统立即触发断路器动作或控制换流器关断,使系统进入暂态保护状态。换流器的自保护机制包括直流过电流限制、故障极闭锁、冷却系统提升响应速率等措施,能够在极短时间内实现内部控制逻辑转化,保护阀组与控制单元安全。同时,保护信号需在系统各换流站间快速传播,实现多端联动与状态同步,确保系统整体协调断开。该过程需综合考虑设备响应时间、传输延迟与系统惯性匹配,构建稳定高效的故障响应闭环控制逻辑。

4.2 直流断路器动作特性与协调配置

直流断路器作为快速开断故障电流的核心设备,其性能直接关系到保护系统的有效性与稳定性。断路器动作需在毫秒级完成,具备高开断电流能力、高耐压水平及强制电弧熄灭能力。现代直流断路器多采用混合式结构,结合机械开断与电力电子限流,实现电弧能量的分散转移。在多端直流系统中,断路器的配置应遵循选择性原则,即仅对故障区段动作,避免全网闭锁。为实现选择性保护,各断路器间需进行保护配合协调,设定合理的时间延时与电流阈值参数,并结合实时数据反馈动态调整开断策略。配置过程需考虑断路器分布位置、系统运行状态及故障后恢复要求,确保保护动作既快速果断,又具备系统稳定性保障能力。

4.3 保护装置的选择性、灵敏度与动作速度分析

高压直流系统保护装置的设计需在选择性、灵敏度与动作速度三者之间实现最优平衡。选择性要求在多故障并发或波及范围广泛时,仅切除受影响区域,保障系统大部分

功能正常运行；灵敏度体现为对微小异常信号的响应能力，避免故障发展为系统性事故；动作速度关系到设备损坏程度与系统恢复时间，是直流系统保护中的核心指标。实现该平衡需依托高速通信网络、逻辑判断算法与可编程控制器相配合，形成闭环保护系统。装置内部需具备电压、电流、温度等多维传感功能，并集成多段式保护逻辑、跳闸指令执行模块及状态反馈接口。通过在线校验与周期性整定更新，保持系统保护能力与运行状态的高度一致，构建稳定、可靠的保护响应体系。

5 典型故障场景下的保护技术优化

5.1 极间短路故障下的快速切除策略

极间短路故障具有电流上升速度快、电磁冲击强、电弧能量高等特点，是高压直流输电系统中最具破坏性的故障类型之一。发生极间短路时，系统直流电流在数毫秒内迅速增大，可能超过设备额定极限，引发换流器损坏、导线熔断等严重后果。实现快速切除需要依赖高性能直流断路器配合换流器闭锁机制，构建毫秒级故障响应通道。通过在线检测极间电压变化率与直流电流跳变量，判断故障发生并立即发出跳闸指令，断路器执行强制开断操作，同时启动换流器保护逻辑，关闭阀组通路以限制电流持续。断路器配置需根据线路电感、电压等级与换流站间距进行参数整定，确保动作时间优于故障扩展速度。系统保护策略还需考虑跳闸后重合闸时序安排与孤岛运行状态识别，实现电网稳定恢复与后续保护闭环控制。

5.2 接地故障条件下的系统稳定性维持技术

接地故障多发生于直流线路绝缘老化、雷击干扰或外力破坏后，其典型表现为电压跌落与电流单向突增，严重时可能导致极间电压不平衡与换流器强制停运。为保障系统在接地故障发生后的电压稳定与能量输送连续，需设计具备快速识别、差动限流与动态换流控制能力的保护体系。接地电流路径识别通过监测直流极与地之间的电压变化趋势实现，判断故障区域后启动接地极与中性点换流逻辑调整，使系统过渡至非对称运行状态下的稳定区间。保护系统利用电抗器限流与滤波电容调压，实现电流幅值控制与电压对称度调节，维持换流器的最小换相电压，避免出现触发丢失或控制死区。稳定性维持还包括系统励磁控制的协同调节与多端站点负荷分担机制的动态切换，保障主干供电能力不受严重

影响。

5.3 多端直流系统故障保护的协调机制设计

多端高压直流系统在结构复杂、运行模式多变的基础上，对保护动作的协调性提出更高要求。任一端口故障可能通过直流母线迅速影响全系统，若保护响应不具选择性，极易造成全局跳闸与供电中断。为实现多端站点之间的保护协调，需构建基于同步信息共享的高速通信平台，通过电压、电流、极性变化数据的同步采集与交换，构建站间一致性的故障判断模型。保护动作逻辑根据端口位置、故障类型与流向特征进行分级配置，使最靠近故障点的断路器优先动作，其余节点保持闭锁状态，保障故障切除的局部性。系统需集成快速广播机制，将保护动作与运行状态在各节点间同步更新，实现实时动态联动。在不同换流站采用不同控制策略的情况下，还需通过协议兼容与接口标准化实现信息无缝衔接，提升保护协调的可操作性与系统整体鲁棒性。

6 结语

高压直流输电系统在支撑大电网互联、推动清洁能源消纳和提升能源配置效率方面展现出显著优势，但随之而来的故障诊断与保护难题也对系统运行安全构成严峻挑战。故障种类的多样性、电气特性的突变性以及响应机制的高时效性要求，促使相关技术不断向精准化、高速化、智能化方向演进。通过深入剖析故障特征、完善保护策略、优化协调机制，可以有效提升系统对突发故障的应对能力，保障输电通道稳定运行。未来构建集成度高、反应迅速、判据清晰的诊断保护体系，将成为高压直流输电技术持续发展的关键支撑。在系统规模日益扩展、运行环境更加复杂的背景下，面向不同故障场景的技术精细化调整与机制动态优化将成为不可或缺的研究与工程重点，助力实现更高层级的电力系统安全稳定运行目标。

参考文献

- [1] 张子傲,李岩松.基于人工神经网络的直流输电系统故障诊断[J].东北电力技术,2025,46(06):10-14.
- [2] 田小龙,韩毅,王佼.基于换相失败免疫因子的高压直流输电系统换相失败研究[J].东北电力技术,2025,46(06):15-20.
- [3] 卢东斌,俞翔,黄志岭,李海英,卢宇,吕彦北.高压直流输电系统故障电流控制策略研究及其应用[J].电力系统自动化.
- [4] 张锐.高压柔性直流输电系统故障穿越控制策略[J].电力设备管理,2024,(16):59-61.