

# 高压直流输电系统中换流站的故障诊断与保护策略优化

崔永强

(酒泉华强机电有限公司, 甘肃 酒泉 735000)

**摘要** 全面阐述换流站在高压直流输电系统中的关键地位及运行特性, 详细分析换流站常见故障类型及其产生机理; 系统介绍当前应用于换流站故障诊断的各类技术, 包括基于电气量分析、信号处理以及人工智能的诊断方法; 深入剖析现有保护策略的原理、优势与不足, 进而提出针对性的保护策略优化方案, 涵盖优化保护判据、改进保护配置以及融合先进通信与控制技术等方面, 旨在为电力领域换流站故障诊断与保护策略提供参考, 进而提升高压直流输电系统的可靠性与稳定性, 保障电力系统安全高效运行。

**关键词** 高压直流输电系统; 换流站; 故障诊断; 保护策略; 计算机网络技术

中图分类号: TM8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.018

## 0 引言

随着电力需求的持续增长以及电力系统规模的不断扩大, 高压直流输电 (HVDC) 技术凭借其输电容量大、输电距离远、线路损耗小、不存在系统稳定问题等显著优势, 在现代电力系统中得到了广泛应用。换流站作为高压直流输电系统的核心枢纽, 承担着交流与直流电相互转换的关键任务。其运行的可靠性直接关系到整个高压直流输电系统的稳定运行。然而, 由于换流站设备众多、结构复杂、运行环境恶劣, 加之电力电子器件的频繁动作, 使得换流站极易发生故障。一旦换流站出现故障, 可能导致直流输电中断, 引发大规模停电事故, 给社会经济带来巨大损失。因此, 深入研究换流站的故障诊断技术与保护策略优化, 对于提高高压直流输电系统的可靠性、保障电力系统安全稳定运行具有至关重要的现实意义。同时, 随着计算机网络技术的飞速发展, 其在电力系统中的应用日益广泛, 为换流站故障诊断与保护策略的创新提供了新的机遇。

## 1 换流站在高压直流输电系统中的作用与运行特性

换流站在高压直流输电系统中处于核心位置, 是实现交流与直流电相互转换的关键设施。在整流侧, 换流站将交流电转换为直流电, 通过直流输电线路传输至逆变侧; 在逆变侧, 换流站又将直流电转换为交流电, 接入交流电网。其运行特性复杂且独特。换流站中的核心设备如换流阀, 采用大量的电力电子器件,

如晶闸管、绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 等, 这些器件在高频、高压、大电流的工况下运行, 对散热、过电压保护等要求极高。换流变压器作为换流站的重要组成部分, 其运行特性与普通变压器有所不同, 需要承受直流偏磁、谐波等特殊电磁环境的影响<sup>[1]</sup>。

平波电抗器在换流站中, 依靠其自身较大的电感特性, 对直流电流波动形成强大阻碍。当直流电流试图发生快速变化时, 平波电抗器会产生反向电动势, 抑制电流的突变, 从而让直流电流的波形更为平滑, 减少因电流波动对后续设备的冲击。滤波装置则包含多种类型, 如交流侧的无源滤波器, 通过电感、电容和电阻组成的特定电路结构, 利用不同频率下元件阻抗的差异, 选择性地吸收或阻断特定频率的谐波电流, 使其无法流入交流电网。直流侧的滤波装置同样借助类似原理, 清除直流电流中的谐波成分。但电力电子器件的高频开关动作, 使得换流站成为谐波的高发源。这些谐波会注入交流和直流系统, 干扰换流站内部设备的正常运行, 如导致测量仪表出现误差, 使继电器误动作。在周边电力设备方面, 谐波会增加设备的铁损和铜损, 降低设备效率, 甚至引发设备过热故障。而交流系统电压波动和频率变化, 会改变换流站中各类设备的运行参数。例如: 电压波动会影响换流阀的触发角, 进而改变换流站的直流输出电压; 频率变化则会导致换流变压器、平波电抗器等设备的电抗值改变, 影响设备性能, 让换流站的运行状态变得愈发复杂难测。

## 2 换流站常见故障类型及产生机理

换流阀是换流站的核心设备，其故障类型多样。电力电子器件的过热是常见故障之一，由于换流阀在运行过程中通过大电流，器件自身会产生热量，如果散热系统出现故障，如冷却风扇故障、冷却液泄漏等，会导致器件温度过高，进而引发器件损坏<sup>[2]</sup>。过电压也是导致换流阀故障的重要原因，在换流阀的开关过程中，会产生暂态过电压，若过电压保护措施不完善，可能使器件承受过高电压而击穿。此外，换流阀的触发控制系统故障也可能导致换流阀误触发或不触发，影响换流站的正常运行。

换流变压器绕组故障中的短路，可能源于长期运行下绝缘老化，绝缘材料在热、电、机械等应力作用下逐渐失去绝缘性能，致使相邻绕组间短路。机械应力方面，变压器在运输、安装或遭遇短路电流冲击时，绕组会受到强大电动力，可能使绕组变形、位移，最终引发短路或断路。而过电流时，绕组通过大电流产生大量热量，加速绝缘老化，严重时烧断绕组造成断路。铁芯故障里，铁芯多点接地多因制造时铁芯硅钢片间混入金属异物，或运行中受振动、电磁干扰，使硅钢片绝缘涂层受损，形成多点接地回路，产生环流导致铁芯过热。此外，交流系统电压异常升高，或直流偏磁导致铁芯工作点偏移，使磁通密度超出正常范围，也会引发铁芯过热。在绝缘故障方面，复杂电磁环境下，直流偏磁让铁芯局部过热，加速绝缘老化；谐波引发局部放电，持续侵蚀绝缘材料。同时，运行环境中的湿度、污秽等因素，进一步降低绝缘性能，最终导致绝缘故障。

平波电抗器的绕组故障，在长期运行过程中，绕组持续受到直流电流产生的电动力作用，导线之间不断摩擦，致使绕组表面的绝缘层逐渐磨损。尤其是在电抗器的拐角、接头等应力集中部位，磨损情况更为严重。随着时间推移，绝缘层被磨穿，导线直接接触，进而引发短路故障。若磨损进一步加剧，导线可能出现断线，导致电抗器无法正常工作<sup>[3]</sup>。而过电流工况下，当直流系统发生短路或过载等故障时，过大的电流流经绕组，根据焦耳定律，电流热效应显著增强，绕组迅速产生大量热量。如果散热系统无法及时将热量散发出去，绕组温度急剧上升，超过其绝缘材料的耐受温度，绝缘材料性能恶化，最终导致绕组过热损坏。在绝缘故障方面，绝缘材料长期处于复杂的电磁环境中，受到电场、磁场以及温度的综合作用，会逐渐老化。

绝缘材料的分子结构发生变化，导致其绝缘性能逐渐下降。与此同时，若电抗器运行环境湿度较大，水分可能会侵入绝缘材料内部。水分子具有较强的极性，会改变绝缘材料内部的电场分布，降低其绝缘电阻。当绝缘电阻降低到一定程度，在高电压作用下，就容易发生击穿短路现象。此外，环境中的污秽颗粒附着在电抗器表面，在潮湿环境下形成导电通道，也会对绝缘性能造成负面影响，增加绝缘故障发生的风险。

换流站的控制系统负责对换流阀的触发控制、系统的运行监控以及与其他设备的协调配合。控制系统故障可能包括硬件故障，如控制器板卡损坏、传感器故障等，以及软件故障，如程序错误、通信协议异常等。控制系统故障可能导致换流站的控制功能失效，引发系统运行异常。

## 3 换流站故障诊断技术

故障分量法通过分析换流站运行过程中的电气量参数，如电流、电压、功率等，来判断设备是否发生故障。例如：利用故障分量法分析故障发生时电气量的突变情况，确定故障类型和位置。通过监测换流阀交流侧和直流侧的电流、电压波形，分析谐波含量和相位关系，可判断换流阀是否正常工作。基于电气量分析的故障诊断技术具有原理简单、易于实现的优点，但对于一些复杂故障，可能存在诊断不准确的问题。

采用信号处理方法对换流站设备产生的信号进行分析，提取故障特征。例如：利用傅里叶变换、小波变换等技术对设备的振动信号、声音信号进行分析，判断设备的运行状态。对于换流变压器等设备，可通过分析其局部放电产生的高频脉冲信号，检测绝缘故障。基于信号处理的故障诊断技术能够有效地提取设备的故障特征，提高故障诊断的准确性，但对信号采集设备和信号处理算法的要求较高。

近年来，人工智能技术在换流站故障诊断中得到了广泛应用。神经网络、支持向量机等人工智能算法能够对大量的历史数据进行学习，建立故障诊断模型。通过将实时监测的数据输入到模型中，可快速准确地判断设备是否发生故障以及故障类型。例如：利用深度学习算法对换流站的运行数据进行分析，能够自动提取复杂的故障特征，提高故障诊断的效率和准确性。基于人工智能的故障诊断技术具有自学习、自适应能力强等优点，但需要大量的历史数据进行训练，且模型的训练和维护成本较高。

#### 4 现有保护策略分析及优化方向

目前,换流站采用的保护策略主要包括电流差动保护、过电流保护、过电压保护、欠电压保护等。电流差动保护通过比较被保护设备两端的电流大小和相位,判断设备是否发生内部故障,具有动作迅速、灵敏度高的优点。过电流保护和过电压保护则是在设备电流或电压超过设定阈值时动作,能够有效地保护设备免受过大电流和电压的损害<sup>[4]</sup>。这些传统保护策略在保障换流站安全运行方面发挥了重要作用。

然而,现有保护策略也存在一些不足之处。传统保护策略大多基于单一电气量或简单的逻辑判断,对于复杂故障的识别能力有限。在高压直流输电系统运行方式发生变化时,保护定值可能需要重新整定,否则可能导致保护误动或拒动。此外,现有保护策略对通信依赖程度较高,在通信故障时,可能影响保护的正常动作。

为了克服现有保护策略的不足,可从多个方面进行优化。优化保护判据,综合考虑多种电气量和设备状态信息,采用更加复杂和智能的逻辑判断,提高保护对复杂故障的识别能力。改进保护配置,根据换流站设备的重要性和故障风险,合理配置保护设备,提高保护的可靠性。融合先进的通信与控制技术,如利用高速通信网络实现保护信息的快速传输和共享,采用分布式控制技术提高保护的响应速度和可靠性。此外,还可引入智能电网技术,实现保护策略的自适应调整,提高保护对系统运行方式变化的适应性。

#### 5 计算机网络技术在换流站故障诊断与保护中的应用前景

在故障诊断层面,基于网络的分布式监测系统可在换流站各关键设备,如换流阀、换流变压器和平波电抗器等部位,部署各类传感器。这些传感器通过有线或无线通信网络,将采集到的实时运行数据,如温度、振动、电气参数等,快速传输至分布式的数据采集节点。各节点再将数据汇总至中央数据处理中心,实现对换流站设备全方位、实时状态的监测。云计算技术在此过程中发挥着重要作用,它凭借强大的计算资源和弹性扩展能力,能轻松应对海量监测数据的存储需求。通过分布式存储架构,数据被分散存储在多个云服务器中,保障数据安全的同时提高了存储效率。在数据处理时,云计算可并行处理大量数据,运用数据挖掘、机器学习等算法,快速分析设备运行趋势,相较于传统本地计算,大大提升了数据处理效率。

大数据分析技术则进一步深挖监测数据的价值。

通过对设备长期运行积累的历史数据和实时数据进行关联分析,能够识别出不同故障类型对应的特征模式。例如:在换流变压器的局部放电监测中,大数据分析可根据放电脉冲的幅值、频率、相位等参数特征,精准判断绝缘故障的程度与位置,为故障诊断提供更为准确、可靠的依据。在保护领域,高速通信网络,如5G通信技术与光纤通信的结合,能以极低的延迟传输保护信息。当换流站设备发生故障时,保护装置可在毫秒级时间内接收到故障信号,迅速做出跳闸等保护动作,极大地提高保护的動作速度。在网络安全技术方面,运用加密算法对保护信息进行加密,防止信息在传输过程中被窃取或篡改;防火墙技术则阻挡外部非法网络访问,保障保护系统的网络安全,确保保护信息的安全性及可靠性。智能电网技术依托计算机网络,使换流站与周边变电站、发电厂等电力设备实现信息共享与交互<sup>[5]</sup>。基于此,可根据电力系统整体运行状态,协同优化保护策略。例如:在电力系统发生大扰动时,各设备的保护装置可相互配合,实现精准、有序的保护动作,提升电力系统整体的安全性与可靠性。

#### 6 结束语

高压直流输电系统中换流站的故障诊断与保护策略优化是保障电力系统安全稳定运行的关键。通过深入了解换流站的运行特性,分析常见故障类型及产生机理,采用先进的故障诊断技术和优化保护策略,能够有效提高换流站的可靠性。同时,充分发挥计算机网络技术在换流站故障诊断与保护中的作用,为电力系统的智能化发展提供新的思路和方法。在未来的研究与实践中,应不断探索新的技术和方法,进一步完善换流站的故障诊断与保护体系,为高压直流输电技术的广泛应用和电力系统的可持续发展提供有力支撑。

#### 参考文献:

- [1] 李明,王华.高压直流输电换流站运行特性及影响因素分析[J].电力系统自动化,2020,44(12):110-116.
- [2] 张伟,刘畅.基于电气量分析的换流站故障诊断方法研究[J].电力电子技术,2019,53(09):135-138.
- [3] 陈宇,赵强.信号处理技术在换流站设备故障诊断中的应用[J].高电压技术,2021,47(07):2345-2352.
- [4] 王芳,孙明.人工智能算法在换流站故障诊断中的应用与优化[J].电网技术,2022,46(05):1876-1883.
- [5] 刘辉,李阳.高压直流输电换流站现有保护策略的问题与改进措施[J].电力系统保护与控制,2023,51(14):102-109.