

# 直流换流变故障分析及保护改进

夏永强

国网内蒙古东部电力有限公司内蒙古超特高压分公司

**摘要:** 对直流换流变保护的原理及动作特性进行分析,提出了改进方案。为了使整流侧换流变保护能够与直流线路保护配合,增加了换流变电流差动保护和换流变纵差保护。分析了换流变电流差动保护和换流变纵差保护的動作特性,发现在直流线路发生故障时,换流变电流差动保护动作于跳闸,而换流变纵差保护不能动作于跳闸。为解决这一问题,本文就对直流换流变故障进行分析,并提出相应的保护改进措施。

**关键词:** 直流; 换流变; 故障分析; 保护改进

【DOI】 10.12252/j.issn.2096-6288.2023.07.238

## 引言

换流变压器是直流输电系统的重要组成部分,在直流系统中起到控制、保护、调节和保护作用。工作人员需要对直流换流变故障类型进行分析,总结换流变故障的特点。并以换流变故障为例,阐述了直流系统中换流变的重要作用,分析换流变故障对直流系统的影响,提出对换流变压器故障检测和控制方法。

## 一、直流换流变概述

### 1. 换流阀和直流换流站

换流阀是换流站内的核心设备,起到实现高压直流输电的目的。换流阀是由多个金属氧化物半导体构成的换流站专用换流变压器,通常分为阀冷、阀热两种类型。直流换流变压器是直流输电系统中的核心设备,主要作用是将交流电压转换成直流电压,以便于为整流设备提供稳定、可控的直流电流。在直流输电系统中,需要向多个换流站同时输送大量的直流电流,因此,需要一种能够将多个交流电源转换为直流电源的设备,而这种设备通常都是由换流阀来实现的。目前,我国已建成世界上电压等级最高、技术最先进、功能最齐全的 $\pm 500\text{kV}/\pm 2000\text{kV}$ 柔性直流输电工程。

### 2. 直流换流变压器

直流输电系统是由多个相互连接的直流输电线路和换流器组成,其核心设备直流换流变压器主要作用是在换流阀中提供电压支撑,使交流系统与换流器之间能安全稳定的交换直流能量。直流换流变压器是由高压绕组和低压绕组两个部分组成,其主要作用是通过高压绕组中的变压器实现对交流电压和交流电流的变换,从而完成功率传输。其主要组成部件有高压绕组、低压绕组、铁心、绝缘套管、变压器油和控制保护单元等。直流换流变压器的技术要求主要包括电压等级及额定容量、绝缘等级及绝缘结构、交流侧功率因数、低压侧谐波含量、直流侧交流电压及电压变化率、容量利用率、额定

容量系数、直流侧电流谐波含量,其中交流侧电流谐波含量不能超过国家标准。此外,还要满足设计寿命的要求。

### 3. 未来发展趋势

直流换流变压器作为直流输电系统的核心设备,随着电力电子技术、人工智能、大数据等技术的不断发展,其在直流输电系统中的应用将会更加广泛。传统直流输电系统中采用的是基于电压源型换流器的直流换流变压器,该换流变在功率传输方面与换流器有着较高的匹配度。随着柔性直流输电技术的快速发展,基于VSC的直流换流变压器将在未来直流输电系统中发挥更大作用。由于电力电子技术的快速发展,大容量电力电子器件、变压器等核心设备已经实现了国产化,因此基于电力电子技术的直流换流变压器在未来也将得到广泛应用。基于人工智能、大数据等技术的应用,直流换流变压器能够根据电网实时运行状态进行自我调整和控制,这将会大大提高直流换流变压器运行效率和可靠性,并进一步降低设备成本。

## 二、直流换流变故障分析

### 1. 非典型故障

直流换流变是直流输电系统的核心,而换流变的非典型故障是指换流变因外部原因导致故障,造成换流变损坏。当直流系统发生以下几种故障时,会造成直流故障闭锁。首先,交流系统短路故障。当直流线路发生短路时,如果发生在换流变旁路控制柜的断路器或者换流变交流侧断路器,则可能造成换流站不能正常运行。其次,直流线路接地故障。当直流线路发生接地故障时,直流线路上的交流电压会出现异常,且不能通过传统的保护逻辑进行检测。然后换流变内部故障。当换流变内部发生短路或断路等故障时,换流变会出现过流、过热和发热等异常情况,进而导致换流变内部烧毁。最后,换流变短路或断路。当换流变在运行中发生短路或断路

时,会导致换流变励磁电流急剧增加,严重时可能损坏换流变压器。其中,换流变故障闭锁原理通常是因为直流系统发生了交流系统短路故障,造成换流站的断路器或换流变交流侧断路器不能正常合闸,进而导致换流站不能正常运行。为了防止这类事故的发生,直流输电系统中的换流变故障闭锁一般采用以下两种方式,一种是直接在换流站内设置保护装置,在运行中通过闭锁断路器来防止这类故障的发生。另一种是将换流变交流侧断路器和旁路控制柜内的断路器设置为故障时不工作。当发生交流系统短路或接地故障时,直流系统的换流站内设置的保护装置会将交流电压和电流采集至控制器中,并通过闭锁旁路控制柜内的断路器来阻止交流系统短路或接地故障发生。

## 2. 换流阀相间故障

换流阀相间故障是指在换流阀出口侧发生的两组阀之间的电气故障。故障通常发生在换流阀和直流系统之间,一般为单组换流阀或多组换流变阀组发生相间故障。该故障将导致换流阀换流变过负荷,最终导致换流变压器烧毁,或引发直流系统控制保护拒动。由于单个阀组或者多个阀组中的阀之间没有直接联系,因此这种故障不会对整个直流系统产生严重影响。为了更好地研究换流阀与直流系统之间的相互作用,将两个不同的换流阀设置为单相的直流系统。两个单相的直流系统分别连接在两个不同的阀组中。当单相的换流阀发生相间故障时,它将触发另一个换流变压器,此时两个换流阀之间并联运行。然而,两个换流阀之间并没有直接联系,因此当换流变压器发生相间故障时,只有一个阀组发生了故障,另一个阀组并没有受到影响。当换流阀出口侧发生单相故障时,两个换流阀之间并不会同时出现故障。当系统中出现双相换流阀时,将触发另外一个换流阀。此时两个换流阀之间形成了串联连接方式,使得这两个换流阀组可以相互通信。如果其中一个换流变压器发生相间故障时,它会触发另一个换流变压器。因此这两个换流阀组并联运行可以保证整个直流系统的安全稳定运行。当系统中出现双相换流变时,双相的阀组之间就会有一定的相互影响。当单相阀组发生故障时,双相的阀组可能会出现相间故障;而当双相阀组发生相间故障时,单相的阀组也可能会出现相间故障。如果在一段时间内出现多起换流阀相间故障或单相阀组发生相间故障时,可能会导致整个直流系统崩溃或出现闭锁现象。因此当系统中出现双相换流变时,一定要仔细检查每个阀组是否有发生相间故障的可能。

## 3. 换流阀单相接地故障

阀控式无功补偿器和阀侧换流阀是直流输电系统的重要组成部分,阀控式无功补偿器和阀侧换流阀是直流输电系统中的重要设备。阀控式无功补偿器是由阀控板、换流器、调压变压器等设备组成,其作用是在直流输电系统正常运行时,向换流站提供无功功率,保证换流设备的安全运行。阀侧换流阀是直流输电系统中的主要设备之一,其主要作用是在直流输电系统正常运行时向电网提供无功功率,保证直流系统的安全运行。当阀侧换流阀发生故障时,可能导致阀控系统保护动作,从而引起直流输电系统跳闸。当阀控板发生故障时,也会引起换流设备保护动作。当换流阀发生单相接地故障时,也会导致直流输电系统跳闸。

## 三、直流换流变保护改进

### 1. 谐波分量的影响

直流输电系统中,在换流变中,整流侧的整流侧换流变和滤波侧的滤波侧换流变,其内部电流均为工频分量。整流侧换流变在其内部含有基波分量,而滤波侧换流变在其内部含有基波分量。由于换流变励磁电流为基波分量,所以直流输电系统中整流侧换流变保护的差动保护和纵差保护的动作为都将受到整流侧换流变励磁电流的影响。但是在整流侧馈入的交流电压为基波电压时,其基波分量为谐波分量,并不会产生影响。而在滤波侧馈入的交流电压为高次谐波分量时,其谐波分量与整流侧换流变励磁电流产生的谐波分量非常相似。同时滤波侧馈入的交流电压含有高次谐波成分,所以当直流输电系统发生故障时,滤波侧馈入的交流电压产生的高次谐波成分对换流变内部短路故障电流产生了影响,导致换流变内部故障电流增加,因此换流变内部短路故障时换流变保护可能会动作于跳闸。

### 2. 直流分量的影响

由于整流侧换流变的直流分量对其自身保护的影响,使其保护装置无法正确动作于跳闸,在交流侧换流变发生故障时,整流侧换流变的保护装置也不能正确动作于跳闸。为了解决这一问题,在整流侧换流变保护中增加了换流变电流差动保护和换流变纵差保护。因此在整流侧换流变发生故障时,必须有换流变差动保护和换流变纵差保护来确保换流变差动保护和换流变纵差保护的可靠性。此时为使换流变差动保护动作于跳闸,必须加入换流变纵差保护。

### 3. 差分滤波的影响

根据直流系统的运行特点,直流换流站在运行时,

交流侧电势可以发生正负方向的转换。当换流变发生故障时，整流侧电流中会有较大的直流分量。由于交流电流和直流电流之间存在着较大的差异，为了将交流电流信号转变为直流电流信号，在整流侧换流变中加入了差动保护。差动保护的原理是在每一个方向上，若有较大的直流分量，则差动极发生动作，即直流线路发生故障时，换流变中的直流电流大于整流侧电流。由于换流变中存在着较大的直流分量，且整流侧换流变中存在着较大的交流分量，因此在整流侧换流变发生故障时，整流侧换流变保护可能会误动作。为了避免这一问题出现，可以在换流变中加入差动保护。差动保护与常规主保护原理基本一致，在差动保护中需要添加一个差动元件。差动元件的作用是将换流变中的直流分量转变为直流电流信号。为了保证差动元件能够正确动作，需要在差动极发生动作时，将其闭锁。对于整流侧换流变来说，其内部故障时电流为零，当整流侧换流变发生故障时电流为零。而换流变内部故障时，其内部可能存在着较大的交流分量。由上述分析可知，在换流变故障时，整流侧换流变保护需要在整流侧换流变中加入差动保护。由于换流变中存在着较大的直流分量以及交流分量，因此差动元件可能会被闭锁。

#### 4. 保护及其优化

首先采样信号采用差分滤波处理。差动保护中，差电流的采样是采用差分方式，其原理为差动保护中的电流互感器对被测信号进行采样，其采样结果经过差分处理后送入差动保护装置中。由于在差动保护装置中的电流互感器是直接与被测信号接触的，故差电流的采样过程为：当被测信号为正弦信号时，其幅值和相位是满足要求的。但如果采样信号不经过差分处理，则会出现以下两种情况，一是采样信号中的噪声干扰会被放大，二是在不平衡电流较大时，会对差动保护产生影响。差动保护装置采用线性外推法进行计算，当采样数据存在较大波动时，其计算结果偏差较大。由于线性外推法计算的差动比不能完全反映被测信号的真实值，而差动保护装置采用差分方式进行采样，则消除了直流输电系统中换流变高压侧电容电流对差动保护的影响。因此在直流输电系统中采用差电流采样方式可以有效地提高保护的可靠性。其次做好故障分析，为进一步提升故障分析效果，应重点对故障情况进行分析，并进一步明确故障特征。同时，还应针对不同类型的故障进行深入研究。例如，当直流系统出现内部短路时，需要在对其进行分析时，重点关注故障特征。此外，还需对直流系统进行全

面的分析，以此来进一步明确其故障特征。从当前研究现状来看，针对换流变保护的研究相对较少，主要是以典型直流换流变保护为研究对象，对其进行优化设计。在具体设计过程中，可根据具体情况对其进行适当改进。但目前对换流变保护的研究还相对较少，因此需要进一步加强这方面的研究工作。

#### 5. 仿真验证

以某500kV换流变为例，将保护判据分别应用于不同类型的换流变，并进行仿真验证。仿真参数为直流输电系统运行方式为单端运行，换流变交流侧最大和最小负荷分别为50MW和10MW。仿真系统中的直流输电线路采用DDS3000/50型直流输电系统，其故障过程分为7个阶段，如故障前、故障中、故障后、暂态稳定、稳态稳定、停运及重启动。线路起停时间均为30 ms。在不同的故障类型下，直流输电线路和换流变的仿真波形，可以采用基于电流互感器的保护改进措施后，保护动作结果与原保护结果相比无明显变化。在直流输电线路和换流变发生故障时，故障前和故障后，差动保护的動作情况与原保护相比都发生了很大的变化。因此，采用基于电流互感器的保护改进措施后，换流变差动保护具有较高的动作可靠性。

#### 结束语

总而言之，直流换流变压器作为直流输电系统中的核心设备，是直流输电系统中实现功率传输的关键，其性能的优劣直接影响到整个系统的安全、稳定运行。近年来随着我国对电力能源需求的不断增加，以及电力电子技术、人工智能、大数据等领域的迅速发展，直流换流变压器得到了长足发展。工作人员需要做好分析，了解其故障产生的具体机制，结合实际情况制定相应的保护改进措施，进而提高电力企业的发展质量。

#### 参考文献

- [1] 吴明凯, 刘亮, 杨晨, 王晓东, 陈昊阳. 银东直流换流变饱和和保护动作分析与改进措施[J]. 科技创新与生产力, 2023, (06): 94-97.
- [2] 朱璧君, 陈维莉, 关就, 吴梓阳. 高肇直流换流变非电量“三取二”改造[J]. 电工技术, 2022, (05): 167-169.
- [3] 郑超, 张晓宇, 吕航, 孙浩晖. 直流输电换流变故障分析及保护改进[J]. 工业控制计算机, 2020, (01): 118-121.
- [4] 成敬周. 高压交直流互联系统故障分析及相关保护的研究[D]. 导师: 徐政. 浙江大学, 2015.