

高压直流电缆耐压试验方法及关键技术研究

吕斌泽

(泉州亿兴电力工程建设有限公司丰泽配电分公司 福建省泉州市 362000)

摘要: 高压直流电缆是直流输电系统的重要组成部分。规范对其进行运维检修是降低成本、提高安全性和可靠性的关键。高压直流电缆耐压试验的主要目的是通过获取寿命曲线,采取更为合理措施以确保电缆在实际运行中的稳定性和安全性。基于此,文章通过分析高压直流电缆耐压试验方法和关键技术,掌握借助已有容量的加热试验设备满足截面绝缘体加热的试验要求,以及合理控制电缆样品本身绝缘温差的方法,合理采取措施保护实验设备。

关键词: 高压直流电缆;耐压试验;绝缘温差控制;安全性

Abstract: High-voltage DC cable is an important component of DC transmission system. Standardizing their operational overhaul is key to reducing costs, improving safety and reliability. The main purpose of the withstand voltage test of high-voltage DC cable is to take more reasonable measures to ensure the stability and safety of the cable in actual operation by obtaining the life curve. Based on this, by analyzing the withstand voltage test methods and key technologies of high-voltage DC cables, this paper masters the test requirements of cross-section insulator heating with the help of heating test equipment with existing capacity, and reasonably controls the insulation temperature difference of the cable sample itself, and reasonably takes measures to protect the experimental equipment.

Key words: high voltage DC cable; Withstand voltage test; Insulation temperature difference control; security

引言: 随着能源的快速发展和电力传输的不断增长,高压直流电缆作为重要的能源传输方式,在现代电力系统中扮演着至关重要的角色。然而,由于电力系统中的环境和工作条件复杂多变,高压直流电缆往往会受到电压冲击、环境应力等多种因素的影响,可能导致电缆的损坏和故障。因此,为确保高压直流电缆在实际运行中的稳定性和可靠性,进行相关试验成为一项关键的工作。目前我国高压直流电缆试验相关技术发展相对滞后,较产业发展落后。依托高压直流电缆型式试验和预鉴定试验,难以判断其最高使用电压或者可靠性,基于此,开展耐压试验可以更为直观对直流电缆进行性能评价,保证其安全性和可靠性。

1 试验开展价值

远距离输电过程中,直流电缆相较于交流电缆更具优势。以相同的电缆类型、导体截面和敷设安装条件为基础,直流电缆的载流量、输电容量更具优势,且运行损耗低于交流电缆。同时,从成本角度来看,输电距离高于40km,高压直流电缆成本更低。基于此,合理应用高压直流电缆有积极意义。

铺设电缆时,出于安全性和可靠性的思考,需要进行试验,而依靠高压直流电缆型式试验和预鉴定试验难以对性能进行检验。基于此,需要开展耐压试验,辅助确定电缆各项性能是否可靠^[1]。

耐压试验需要获取直流电缆的击穿电压和时间的关系曲线(寿命曲线),通过较高的试验电压获得较短时间的击穿电压值,从而求出相应于无限长时间的电缆击穿电压。在获取寿命曲线时,一般按照逐级加压方法比较电缆的相对质量。在试验过程中,电缆运行温度对电缆寿命有直接影响,电缆导体的持续载流发热会导致绝缘层形成温度梯度,此时靠近导体屏蔽处温度更高,接近绝缘层区域温度低,进而影响电导率分布,出现“电场反转”现象,影响电缆的击穿电压值。基于此,文章开展相关研究,以求获得更为准确的电缆寿命曲线,保证分析结果的科学性。

2 试验过程阐述

2.1 试验原理

高压直流电缆耐压试验主要基于电压应力引发的绝缘击穿特性。在试验中,电缆被暴露于高于额定电压的电压下,以模拟电力系统中可能的电压冲击和应力。测试时,电缆的绝缘材料会受到电场的影响,如果绝缘材料质量不足或存在缺陷,电场集中可能导致绝缘击穿,从而引发电缆故障。因此,高压直流电缆耐压试验的结果对于评估电缆的可靠性至关重要。如果电缆能够在测试电压下保持稳定,未出现绝缘击穿现象,说明其绝缘性能较好,具备在高压电场下正常工作的能力。通过这项试验,可以有效确保电缆在实际运行中不会因电压冲击而损坏,提高电力系统的稳定性和可靠性。

2.2 试验阐述

2.2.1 试验主要材料

500kV 直流模型电缆是试验主体,借助±500kV 直流电缆绝缘材料制作真型电缆本体、接头和终端,支撑完成试验。

2.2.2 试验方法

采用感应电流法加热电缆。过程如下:电缆设置为主回路和模拟回路两部分,两部分均以铜排连接成闭合回路,借助穿心变压器促使电缆感应电流,完成加热。

具体来看,308V 电源输入电流,经过调压器、充电变压器为高压直流发生器本体提供电源,高压直流发生器本体通过倍压整流、滤波稳压给电缆系统施加直流高电压。同时,380V 电源通过调压器、穿心变压器实现加热。计算机控制处理系统通过采集输出电压信号和辅助测温电缆温度信号,确保直流输出电压和电缆系统导体温度可控。直流电缆耐压试验中对电缆加压,并维持在规定的温度范围内。测量时,需要保证试验电缆的主回路和模拟回路感应电流值等同,采集模拟回路实际温度,记录相关数据,通过这一信息控制模拟回路和主回路感应电流^[2]。上文提及两个回路感应电流相同,所以两个回路的温度图应保持一致,此时可以通过采集试验电缆的温度信息,控制主回路电缆温度。参考热冲击逐级击穿试验方法,此时便总结出耐压试验方法:试验开展过程中,确保电缆导体温度不低于 T_{cmax} ,且电缆绝缘温差控制在不低于 ΔT_{max} 范围内,此时电缆导体中通入电流,金属屏蔽层不通电流,借助感应电流加热确保电缆导体达到所需温度。试验过程中,为了避免出现终端套管闪络,以负极性支流试验电压为研究值。采集数据时,先将试验电压升至研究类型电缆的额定电压 U_0 ,然后逐级升高模型电缆直流试验电压,以5% U_0 为一级,最初将模型电缆电压设置为1% U_0 kV/s,每升一级电压保持5min,直到将模型电缆击穿为止。记录最终的击穿电压值,这就是文章研究结果。

3 试验中需要解决的三大难点问题及解决对策

高压直流电缆耐压试验是电力系统中重要的测试过程,用于验证电缆在高压直流条件下的绝缘性能。开展耐压试验时,需要解决如下三方面问题。

3.1 仪器设备保护问题

试验过程中,需要应用多台设备,如温度记录仪、热电偶等,其中温度记录仪负责记录电缆样品导体和绝缘层等区域温度作用,热电偶发挥温度传感器作用,负责测量各测量点的温度。试验过程中,涉及的冲击电压及直流电压会对周围导体产生千伏级的感应电压。温度记录仪作为一种弱仪器设备,和热电偶设备联合应用时,热电偶传导的千伏级感应电压容易导致温度记录仪出现损伤。

3.2 加热实验设备的容量问题

试验过程中,标准情况下借助导体电流完成电缆加热,主要步骤是研究的模型电缆按照规定弯曲半径进行完全,借助铜排形成封闭的闭合回路,借助多台穿心变压器,为电缆回路赋予感应大电流,电缆导体通过长时间处于大电流状态,实现加热。

在耐压试验中,应用的电缆样品包括模拟回路和试验回路两部分,

试验回路需要施加试验电压值,从而判断电缆的绝缘性。模拟回路主要是判断电缆性能,也就是通过加热与试验回路进行对比,通过温度差异从而确定电缆的性能。试验中,电缆样品测温示意图如下图1所示,样品布置如下图2所示。

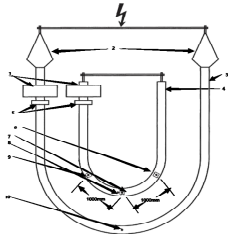


图1 试验电缆样品测温图示

注:1—穿心变压器;2—瓷套管及复合套管终端;3—电缆35m长段;4—电缆10m长段;
5—电流互感器;6—导体测温;7—导体测温;8—外护套测温;9—导体测温;10—外护套测温

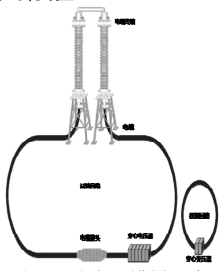


图2 耐压试验中电缆样品布置图示

试验过程中,基于实际情况,以150kVA调压器为基础,对电缆模拟回路进行加热,借助100kVA完成电缆试验回路加热。试验各项数据见下表1所示。当电缆样品回路感应电流达到1752kV时,调压器的输出电流为305A,此时超出调压器输出端子的长期电流载流量设计值,也超过调压器和穿心变压器之间的连接电缆载流量允许值,短期内影响不明显,但一旦长期保持此种状态,会导致调压器超额作业进而出现损坏,或者连接电缆由于温度过高而出现火灾等安全隐患^[5]。因此,在试验过程中,需要注意这一问题,避免出现问題。

表1 耐压试验过程中加热时各项数据总结表

研究内容	数值			
	1	2	3	4
调压器电压(V)	50	100	150	200
调压器输出(A)	47	89	166	305
电缆样品电流(A)	442	895	1322	1752

3.3 电缆样品的绝缘温差问题

在试验过程中,为了保证研究有意义,500kV高压直流电缆的导体温度和绝缘层温度之间的差值需要得到管控。结合实际来看,电缆结构如下图3所示。

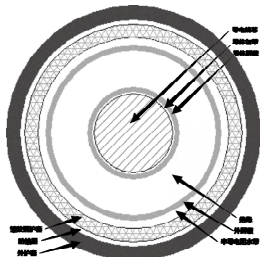


图3 500kV高压直流电缆结构图示

所谓的温差(ΔT)就是导体和绝缘层之间的温度差值。耐压试验中,在对直流电缆进行加热时,电缆导体经过感应电流影响温度提升,热量会由于传导效应导致绝缘层、半导体层等也产生温度,进而出现电缆温度升高现象^[6]。

如果采取常规方法直接按照试验步骤对直流电缆及逆行加热,此时, ΔT 约为20.9℃,这相较于标准试验中需要保证 ΔT 控制在15~16

℃范围内的要求明显超出,势必会影响试验结果。

3.4 解决对策

针对上文提出的三个重点问题,针对性采取策略进行完善。

3.4.1 试验设备的保护措施

针对这一问题,可以采取更换热电偶和在热电偶特殊部分加入磁环的方法加以保护。第一,用带金属铠装的铠装型热电偶取代传统的普通塑料外皮的热电偶,借助其金属护套接地通过耦合作用将部分能量耦合到金属外皮,从而降低热电偶传导到温度记录仪重点热量,保证温度记录仪;第二,在热电偶部分区域加入磁环,借助磁环将脉冲电压的电场转换为磁场能,从而降低干扰^[5]。这两种方法成本低廉且操作简便,效果也较为明显,因此应用较为广泛。

3.4.2 加热试验设备的电容补偿

由于500kV高压直流电缆加热试验回路会受到感应电流影响,因此,在实验时可以通过加入电容器解决问题。电容器补偿电缆试验回路无功电流,从而降低设备试验容量,这可以降低成本支出,降低能耗。从实际角度进行思考,为了便于安装和保证效果,一般以高压补偿方法为主,也就是通过在穿心帕妮雅琪附近安装电容器的方式提供电容补偿从而缓解容量问题^[6]。

3.4.3 绝缘温差控制措施

可以通过以下三项措施解决温差问题。第一,通过在电缆试样的外护套上包覆铝箔纸的方式实现热量反射,进而保证电缆绝缘层温度接近导体温度,避免出现较大的温差。第二是严控电缆加热时的实验电流,保证升温初始阶段,以较小电流进行加热,逐步提升电流,确保电缆升温速度大体一致,此时可以降低温差差距。第三,控制电缆温度,严格将电缆外部温度控制在19~21℃时,可以保证绝缘温差在规定范围内。但从操作角度来看,一般情况下难以严格把控电缆外部温度,因此,通常借助保温大棚实现温度控制。但该方法操作复杂且成本较高,所以应用较少。

4 高压直流电缆耐压试验关键技术阐述

结合上文对耐压试验的分析阐述,关键技术包括以下几方面:第一,高压直流电源是实施耐压试验的核心设备。它必须能够提供稳定的高压直流电压,同时具备电流限制和过流保护等功能,以确保试验的安全性和可靠性。高压直流源的选型与校准是保证试验准确性的关键。第二,在试验过程中,需要对电压、电流、局部放电信号等进行实时监测和记录。通过仪器设备,可以跟踪电缆绝缘系统的响应,以便在必要时采取措施,保证试验过程的可控性和安全性。第三,科学掌控电压持续时间、试验电流、试验温度等参数。这些参数的选择应基于电缆规格、应用环境和试验目的,以确保试验结果具有可比性和可靠性^[7]。

结语

高压直流电缆的稳定运行对于现代电力系统的正常运转具有重要意义。通过本研究对高压直流电缆耐压试验方法的分析,对该试验过程中常遇见的三个技术难题有了系统性认识和了解,并针对性提出解决策略。基于本文研究,对高压直流电缆的耐压试验方法过程和关键技术掌握透彻,这可以为相关人员开展同类型试验提供更多借鉴。

参考文献:

[1]刘淑军,吴启仁,李栋,等.高压直流电缆附件用EPDM与XLPE电气性能匹配关系研究[J].绝缘材料,2022,55(12):75-79.
[2]钟启迪,蒲莹,孙建锋,等.适用于柔性直流电网的500kV级直流电缆与架空线路并联运行控制及保护策略[J].电力建设,2022,43(7):80-86.
[3]魏艳慧,郑元浩,龙海泳,等.绝缘层厚度对高压直流电缆电场和温度场分布的影响[J].电工技术学报,2022,37(15):3932-3940.
[4]衣红印.变电站高电压试验设备的现状与技术改进分析[J].集成电路应用,2022,39(11):212-213.
[5]胡世勋,张雅茹,邵清,等.不同改性技术路线的聚丙烯基高压直流电缆绝缘材料综合性能比较[J].中国电机工程学报,2022,42(4):1243-1252.
[6]陈芳.电力电缆高频分布式局部放电检测方法分析[J].电子技术,2022,51(10):208-209.
[7]王宇斌.基于交流耐压试验的XLPE电缆绝缘检测要点分析[J].电气开关,2022,60(4):6-8+12.