

高压直流输电系统中换流变压器绝缘老化机制及防护措施

巴桑欧珠

西藏雷斯盾科技服务有限公司 西藏日喀则

【摘要】高压直流输电凭借高效、稳定等优势，成为现代电力传输的关键技术，而换流变压器作为核心设备，其绝缘老化问题严重威胁系统运行安全。深入分析换流变压器绝缘老化，发现热、电、机械应力与环境因素协同作用，致使油纸绝缘系统中纤维素裂解、绝缘油氧化。针对性提出优化运行参数、革新绝缘材料、强化监测维护等防护措施，有效延缓绝缘老化进程，对保障高压直流输电系统可靠运行、提升电力传输效率意义重大。

【关键词】高压直流输电；换流变压器；绝缘老化；老化机制；防护措施

【收稿日期】2025 年 1 月 20 日 **【出刊日期】**2025 年 2 月 18 日 **【DOI】**10.12208/j.jeea.20250052

Insulation aging mechanism and protection measures of converter transformer in HVDC transmission system

Ouzhu Basang

Xizang Lesdun Technology Service Co., Ltd, Shigatse, Xizang

【Abstract】 High-voltage DC transmission, leveraging its advantages of efficiency and stability, has become a key technology in modern power transmission. As a core component, the insulation aging of converter transformers poses a serious threat to system operational safety. A thorough analysis of transformer insulation aging reveals that thermal, electrical, mechanical stress, and environmental factors work together to cause cellulose cracking and insulating oil oxidation in the paper-insulated system. Targeted measures such as optimizing operating parameters, innovating insulating materials, and enhancing monitoring and maintenance have been proposed to effectively delay the process of insulation aging. These measures are crucial for ensuring the reliable operation of high-voltage DC transmission systems and improving power transmission efficiency.

【Keywords】 HVDC transmission; Converter transformer; Insulation aging; Aging mechanism; Protection measures

引言

在“双碳”目标驱动与能源跨区域调配需求下，高压直流输电技术因损耗低、输送容量大等优势迅速发展。长期运行中，绝缘材料受电、热、机械应力及环境因素侵蚀，老化问题频发，引发局部放电、绝缘击穿等故障，严重影响电力供应稳定性与安全性。系统研究换流变压器绝缘老化机制，探索有效的防护策略，对推动高压直流输电技术持续发展、保障能源稳定供应具有迫切的现实意义。

1 老化机制解析

换流变压器的绝缘老化是一个由多因素耦合作用导致的复杂过程，其中油纸绝缘系统性能的劣化

是这一过程的核心。在换流变压器长期运行期间，绝缘材料持续遭受电场、温度、机械应力等多种应力的共同作用^[1]。从电场角度来看，直流电压下空间电荷的积聚以及极性反转所产生的过电压，会在绝缘材料内部引发局部放电现象。这种局部放电会释放出高温以及高能粒子，它们如同“微观杀手”，直接破坏纤维素和绝缘油原本稳定的分子结构，在材料内部形成微小气隙与碳化通道。这些微观损伤不断积累，如同堤坝上的蚁穴，逐步削弱绝缘性能，使得绝缘材料的防护能力大打折扣。

温度因素对绝缘老化的影响同样不容小觑。高温环境会极大地加速绝缘油的氧化反应，在这一过

程中,会产生酸性物质和低分子烃类气体。酸性物质的出现降低了绝缘油的电气强度,使其对电流的阻挡能力下降;低分子烃类气体的产生则进一步破坏了绝缘油的稳定性。与此高温还会促使纤维素发生裂解,导致绝缘纸的聚合度下降。绝缘纸作为绝缘系统的重要组成部分,其聚合度降低直接致使机械强度和电气性能衰退,就像老化的绳索,强度和韧性都大不如前。并且,绝缘材料内部温度分布不均匀,不同区域的热胀冷缩程度不同,从而形成热应力,这种热应力会进一步加剧材料的老化进程。

机械应力也是绝缘老化的重要诱发因素。当短路电流出现时,会产生强大的电动力,其力量之大远超正常运行时的情况。变压器在运行过程中始终处于振动状态。电动力和振动的双重作用,会使绝缘结构产生变形、位移等情况。这种结构上的变化会导致绝缘层出现裂纹、分层等问题,破坏了绝缘材料的完整性^[2]。而一旦绝缘材料的完整性受损,就如同打开了一扇门,为水分、杂质的侵入创造了条件。水分和杂质的进入又会进一步加速绝缘老化,形成一个恶性循环,最终致使换流变压器绝缘性能逐步下降,甚至引发故障。

2 影响因素探究

热因素在影响换流变压器绝缘老化的诸多因素中,占据着关键地位。换流变压器在正常运行过程中,绕组和铁芯由于铜损、铁损的存在,会持续产生大量热量。倘若散热系统存在缺陷,无法及时有效地将这些热量散发出去,或者变压器长期处于过载运行状态,就会使得绝缘材料长时间处于高温环境之中。大量研究表明,绝缘油和绝缘纸的老化速率与温度之间呈现出指数关系,也就是说,温度每升高 8-10℃,其老化速度大约会增加一倍^[3]。不仅如此,高温环境还会加速绝缘油中抗氧化剂的消耗。抗氧化剂原本能够有效延缓绝缘油的氧化进程,当它被快速消耗后,绝缘油的抗氧化能力大幅降低,从而促使绝缘油更快地发生劣化,进而对整个绝缘系统的稳定性产生严重影响。

电因素对于绝缘老化的作用同样十分显著。在直流电压作用下,绝缘材料中的载流子迁移速度存在差异,这种差异会导致空间电荷在材料内部积聚,进而形成畸变电场。当畸变电场的强度超过一定阈值时,就会引发局部放电现象。而在极性反转的瞬

间,绝缘材料所承受的电压会急剧变化,产生强大的过电压冲击,这种冲击会对绝缘造成累积性损伤^[4]。另外谐波电流的存在也不容忽视,它会在绝缘材料中产生附加损耗,这些损耗会转化为热量,引起局部发热,而局部发热又会加速绝缘老化。这些电应力长期持续作用,会使绝缘材料的绝缘性能不断下降,大大增加了绝缘击穿的风险,严重威胁换流变压器的安全运行。

机械与环境因素在绝缘老化过程中也扮演着重要角色。一旦发生短路故障,巨大的短路电流所产生的电动力可达正常运行时的数十倍之多。如此强大的电动力会使绕组发生变形、位移,绝缘垫块也会出现松动现象,从而严重破坏绝缘结构的完整性。变压器在长期运行过程中,其振动会不断作用于绝缘材料,久而久之,会使绝缘材料产生疲劳裂纹。环境中的水分、杂质若侵入绝缘系统,将会产生一系列不良影响。水分会降低绝缘油的击穿电压,加速绝缘纸的水解反应;杂质颗粒在电场作用下,还可能形成导电小桥,引发局部放电。这些因素相互交织、共同作用,显著加速了换流变压器绝缘老化的进程。

3 防护措施实施

优化运行参数是延缓换流变压器绝缘老化的重要手段之一。通过实时监测变压器的负载、油温、绕组温度等关键参数,可以为建立科学的运行策略提供可靠依据。在实际运行中,应合理控制变压器的负载率,避免其长期处于过载运行状态^[5]。要根据环境温度以及负载的实时变化,及时且灵活地调整冷却系统的运行模式。在高温环境或者高负载情况下,加大冷却系统的功率,以确保绝缘材料始终处于适宜的温度范围。还需对直流输电系统的控制策略进行优化,减少电压波动和极性反转的次数,从而降低电应力对绝缘的损伤。通过这些措施,能够从运行层面为绝缘提供良好的工作环境,有效延缓绝缘老化。

改进绝缘材料是提升换流变压器绝缘性能的根本途径。近年来,研发和应用新型耐高温、高电气强度的绝缘材料成为行业热点。以纳米复合绝缘纸为例,通过在绝缘纸中添加纳米颗粒,能够显著改善其机械性能和电气性能。纳米颗粒的加入使得绝缘纸的耐电晕、耐老化能力得到大幅提升^[6]。高性能绝

缘油同样具有优异的性能,其具备出色的抗氧化、抗水解性能,能有效延长绝缘系统的使用寿命。除了新型材料的应用,采用复合绝缘结构也是一种有效的方式。将不同性能的绝缘材料进行合理组合,让它们各自发挥优势,从而增强绝缘系统的整体性能,为换流变压器的稳定运行提供坚实保障。

加强状态监测与维护是保障换流变压器绝缘安全的关键环节。当前,可利用局部放电检测、油色谱分析、频域介电谱分析等多种先进的在线监测技术,实时、精准地掌握绝缘状态。局部放电检测技术能够及时发现绝缘内部的放电缺陷,如同给绝缘系统做“CT”,将微小问题暴露出来;油色谱分析则可通过检测绝缘油中气体成分及含量,准确判断绝缘老化程度和故障类型,为后续维护提供关键信息;频域介电谱分析能获取绝缘材料的介电特性,以此评估绝缘受潮和老化状态。根据这些监测结果,制定科学合理的维护计划,定期进行绝缘油处理、绝缘纸更换等维护工作,及时修复受损的绝缘部件,确保换流变压器绝缘性能始终处于良好状态。

4 成果与展望

在高压直流输电系统中,换流变压器的绝缘老化问题一直是影响系统可靠性与稳定性的关键因素。通过对换流变压器绝缘老化机制的深入研究以及一系列防护措施的有效实施,在延缓绝缘老化、提升设备可靠性方面取得了显著成效^[7]。优化运行参数这一举措意义重大,热应力和电应力是加速绝缘老化的重要因素,通过科学调整运行参数,如精准控制变压器的负载电流、优化冷却系统的运行模式等,能从源头上有效控制热、电应力对绝缘的不良影响,使得绝缘材料的工作环境得到极大改善,避免绝缘材料因长期处于恶劣条件下而快速老化,为换流变压器的稳定运行筑牢基础。

状态监测与维护同样不可或缺,通过安装各类传感器,对换流变压器的油温、绕组温度、局部放电等关键参数进行实时监测,实现了对绝缘状态的精准把控。一旦监测到异常数据,运维人员便能迅速响应,及时发现并解决问题,避免小故障演变为大事故。当检测到局部放电量异常增加时,可及时安排检修,对可能存在的绝缘缺陷进行修复,从而保障换流变压器的安全运行。随着能源互联网建设的不断推进以及电力系统智能化的深入发展,对换流

变压器绝缘老化防护提出了更高要求^[8]。一方面,我们需进一步深化对复合绝缘材料老化特性的研究,复合绝缘材料在高压直流输电系统中应用广泛,但其老化特性受多种因素影响,较为复杂。

另一方面,还应加强多物理场耦合下绝缘老化机理的研究。在实际运行中,换流变压器的绝缘材料往往同时承受电场、磁场、热场和机械应力场等多物理场的作用,多物理场耦合会加速绝缘老化。深入探究其老化机理,能为优化绝缘设计、制定更科学的防护措施提供依据,为高压直流输电系统的安全、高效运行提供更坚实的技术支撑。

5 结语

高压直流输电中,换流变压器绝缘老化受电、热、机械及环境因素共同影响。通过剖析老化机制,针对性采取优化运行参数、改进绝缘材料、强化监测维护等措施,有效延缓绝缘老化,保障设备可靠运行。未来,伴随能源互联网与智能电网发展,需深入研究复合绝缘材料老化规律,开发更先进监测诊断技术,探索多物理场耦合下的老化机理,为高压直流输电安全高效运行筑牢技术根基。

参考文献

- [1] 张学友,石永建,李冀,等.应用 LSTM-RNN 的特高压直流输电系统继电保护故障检测方法[J].中国测试,2025,51(03): 177-184.
- [2] 李建青,潘文明,沈思,等.基于 VDCOL 的高压直流输电换相失败抑制系统[J].电子设计工程,2025,33(05):129-133.
- [3] 曹志刚.高压直流输电系统稳定性与控制策略[J].大众标准化,2025,(04):121-123.
- [4] 卢东斌,黄志岭,龚飞,等.高压直流输电直流线路故障穿越重启策略[J].高电压技术,2025,51(02):828-839.
- [5] 郭宁明,李冰,许勇.基于非线性系统辨识的长距离直流输电线路色散补偿及故障定位方法[J/OL].电网技术,1-10[2025-04-19].
- [6] 张楠,张哲任,徐政.基于逆阻型 IGCT 的高压直流输电系统电压稳定性评估[J].高电压技术,2025,51(03):1329-1338.
- [7] 刘熠,王跃,武鸿,等.含单相面对面型 MMC-DC/DC 变换

器的高压直流输电系统阻抗建模及稳定性分析[J].高电压技术,2025,51(01):269-280.

- [8] 吴布托,董秋军,邹昊凯,等.特高压直流输电系统大角度控制策略研究[J].山东电力高等专科学校学报,2024,27(06): 12-15.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS