

换流变压器主绝缘结构优化与可靠性提升研究

巩跟盼

保定天威保变电气股份有限公司 河北 保定 071056

摘要：文章聚焦于换流变压器主绝缘结构的优化与可靠性提升研究。通过对电-热耦合特性的深入分析，结合绝缘材料的选用与优化策略，以及几何形状与设备结构的创新设计，本文提出多项改进措施。同时借助先进的可靠性评估方法、绝缘监测与故障诊断技术，以及维护与保养策略的优化，显著提升换流变压器主绝缘结构的可靠性。本研究为换流变压器的安全运行和性能提升提供理论支撑和实践指导。

关键词：换流变压器；主绝缘结构；可靠性

引言：换流变压器作为直流输电系统的核心设备，其主绝缘结构的性能直接关系到系统的稳定运行。随着电力需求的不断增长和电网结构的日益复杂，对换流变压器的绝缘性能提出了更高要求。因此开展换流变压器主绝缘结构的优化与可靠性提升研究，对于保障电网安全、提高输电效率具有重要意义。本文旨在探讨相关优化策略和技术手段，以期工程实践提供有益参考。

1 换流变压器的工作原理及主绝缘结构分析

换流变压器是一种关键的电力设备，尤其在直流输电系统中发挥着不可替代的作用。它的主要作用在于实现直流电源转换和控制，将交流输电系统与直流输电系统紧密相连，确保了长距离高压直流输电的可靠性和高效性。换流变压器的工作核心在于通过控制晶闸管等开关元件的导通和截止，来实现对直流电压的转换和调节。当晶闸管处于导通状态时，直流电压能够正常通过；而当晶闸管截止时，直流电压则被隔离，此时通过换向装置（例如桥式整流器）进行电流反向，从而实现直流电流的正负交替。这一转换过程使得直流输电系统能够灵活应对不同的电力需求，确保电力传输的稳定性和高效性。主变压器作为换流变压器的核心部件，负责将输电线路上的高压交流电转换为适合换流变压器输入的低压交流电。而晶闸管阀组则是控制直流侧电压输出的关键，通过对晶闸管的触发角度进行调节，可以实现对直流电压的精确控制。换流变压器在运行过程中会产生一定的热量，因此油浸式冷却系统被广泛应用，以确保换流变压器的正常运行^[1]。换流变压器的工作不仅局限于直流输电系统，它还广泛应用于高压直流输电、可再生能源并网以及工业领域等多个方面。在高压直流输电系统中，换流变压器通过将交流输电系统转换为直流输电系统，实现了远距离大容量电力输送。在可再生能源接入方面，换流变压器能够将风电、光伏等产生的直流电转

换为交流电注入电网。而在工业领域中，换流变压器则为电弧炉、电动机启动等场景提供稳定的电力支持。

2 主绝缘结构的组成与特点

2.1 绝缘材料的种类与性能

绝缘材料在变压器中扮演着至关重要的角色，其性能和质量直接关乎变压器的运行可靠性和使用寿命。换流变压器中常用的绝缘材料种类繁多，根据电压等级的不同，绝缘材料可分为多个等级，而耐热等级则反映了材料在变压器中所能承受的最高温度。固体绝缘材料在变压器中占据着重要地位，如绝缘纸、绝缘纸板等，它们是构成变压器绝缘系统的基础材料。绝缘纸具有优良的电气性能和物理机械性能，是变压器中不可或缺的绝缘材料之一。合成纤维纸（如NOMEX纸）和加脞绝缘纸（如丹尼森纸）也是常用的固体绝缘材料。这些纸张经过特殊加工，具有优异的机械强度和适当的延伸率，能够满足大型变压器绕组匝绝缘的需求。液体绝缘材料在换流变压器中同样发挥着重要作用。变压器油作为主要的液体绝缘材料，不仅具有优异的绝缘性能，还具有良好的散热性能。变压器油在变压器内部循环流动，带走热量，确保变压器的正常运行。

2.2 绝缘层的设计与布置

换流变压器绝缘层的设计与布置是一个复杂而精细的过程，它必须全面考量电气强度、耐热强度和机械强度等多个关键因素。电气强度是衡量绝缘层能否在特定电压下保持正常工作的核心指标，它决定了绝缘层所能承受的电压上限，是确保设备安全运行的基础。耐热强度同样至关重要，它要求绝缘层在高温环境下依然能够维持良好的绝缘性能，防止因温度上升而导致的绝缘失效。机械强度也是设计中不可忽视的一环，它确保绝缘层在面临短路电流等极端工况时，能够承受住巨大的机械应力，防止设备受损。在实际设计中，“薄纸筒，小

油隙”理论被广泛应用。这一理论通过降低导体表面及附件油隙的场强,使其耐受场强始终小于击穿场强,从而有效提升了绝缘层的整体性能。绝缘层的布置也极为讲究,需要合理分割主空道及线圈端部的油隙,以提高击穿电压。另外,角环的合理布置也是防止线圈端部沿面爬电的关键。值得注意的是,绝缘层的设计还需充分考虑油流畅通性,避免形成死油区,确保变压器油的散热效果,从而进一步提升设备的运行效率和稳定性。

2.3 电场分布与绝缘强度的关系

电场分布对换流变压器的绝缘强度具有重要影响。在换流变压器中,电场分布不仅取决于绝缘材料的介电常数和电导率,还受到绝缘结构、绕组排列以及外部电场等因素的影响。在交流电压下,电场分布主要取决于绝缘油和绝缘纸的介电常数。由于纤维素的相对介电常数远大于绝缘油,使得两者所承受的电场在交流下分布不均^[2]。而在直流电压下,电场分布则更多地取决于绝缘油和绝缘纸的电导率。由于纤维素电导率与变压器油相差较大,使得两者承受的电场强度在直流场下分布更不均匀。这种电场分布的不均匀性可能导致局部放电、沿面放电或击穿等绝缘事故。换流变压器阀侧套管承受的电场较复杂,主要包含直流叠加多种谐波分量。当换流阀换相失败或内部故障时,还会出现操作冲击过电压或陡波。这些复杂的电场条件对绝缘材料的性能提出了更高的要求。在换流变压器的设计和制造过程中,需要充分考虑电场分布对绝缘强度的影响,采取合理的绝缘结构和材料,以确保变压器的安全可靠运行。

3 换流变压器主绝缘结构优化方法

换流变压器作为直流输电系统中的关键设备,其主绝缘结构的优化对于提高设备的运行可靠性和使用寿命具有重要意义。

3.1 电-热耦合特性的考虑

在换流变压器的主绝缘结构优化中,电-热耦合特性是一个必须考虑的重要因素。电-热耦合特性是指电场与温度场在绝缘结构中的相互作用,它们共同影响着绝缘材料的电气性能和机械性能。在电场的作用下,绝缘材料内部会发生电荷的移动和积聚,形成电场分布。而温度场的变化则会影响绝缘材料的电导率、介电常数等电气参数,从而改变电场分布。电场和温度场的共同作用还会导致绝缘材料内部的热应力分布不均,可能引发局部放电、热击穿等绝缘故障。为了优化电-热耦合特性,可以采取以下措施:首先,通过精确计算和分析,确定电场和温度场的分布规律,找出潜在的绝缘弱点;其次,采用热稳定性好、电气性能优异的绝缘材料,提高

绝缘结构的耐热性能和电气强度;最后,优化绝缘结构的设计,如合理布置绝缘层、调整油隙等,以降低电场和温度场的耦合效应,提高绝缘结构的可靠性。

3.2 绝缘材料的选用与优化

绝缘材料的选用与优化是换流变压器主绝缘结构优化的关键环节。绝缘材料的性能直接决定了绝缘结构的电气性能、耐热性能和机械性能。在选用绝缘材料时,需要考虑材料的电气强度、耐热等级、机械强度以及环保性能等因素。电气强度决定了材料在电场作用下的承受能力,耐热等级则反映了材料在高温环境下的稳定性。机械强度则要求材料能够承受设备运行过程中的机械应力。此外,随着环保意识的提高,环保性能也成为选用绝缘材料时需要考虑的重要因素。为了优化绝缘材料的使用,根据设备的运行条件和绝缘要求,选择合适的绝缘材料;通过改进材料的制造工艺和配方,提高材料的综合性能;加强材料的质量控制和检测,确保选用的材料符合设计要求^[3]。在实际应用中,还可以考虑采用新型绝缘材料,如纳米复合材料、高分子绝缘材料等。这些新型材料具有优异的电气性能、耐热性能和机械性能,能够有效提高换流变压器主绝缘结构的可靠性和使用寿命。

3.3 几何形状与设备结构的优化

几何形状与设备结构的优化也是提高换流变压器主绝缘结构可靠性的重要手段。几何形状的优化可以通过改变绝缘层的厚度、形状和布置方式等来实现,以改善电场分布和降低绝缘弱点。设备结构的优化则可以通过改进设备的冷却系统、加强设备的支撑结构等措施来提高设备的整体性能和可靠性。在几何形状的优化方面,可以通过计算和分析确定最佳的绝缘层厚度和形状,以降低电场强度的不均匀性。还可以通过合理布置绝缘层之间的油隙和角环等附件,来改善电场分布和提高绝缘强度。在设备结构的优化方面,可以通过改进冷却系统的设计来提高设备的散热性能,降低设备内部的温度。还可以加强设备的支撑结构,提高设备的抗震能力和稳定性。这些措施能够有效提高换流变压器主绝缘结构的可靠性和使用寿命。

4 换流变压器主绝缘结构可靠性提升策略

4.1 可靠性评估方法的改进

可靠性评估是评价换流变压器主绝缘结构性能的重要手段。传统的可靠性评估方法往往基于经验和统计数据,存在一定的局限性和不确定性。为了改进可靠性评估方法,可以采用先进的仿真技术和数据分析方法,对绝缘结构的性能进行更加准确和全面的评估。例如,可

以采用有限元分析方法对电场和温度场进行仿真计算,以得到绝缘结构内部的电场分布和温度分布。还可以结合设备的历史运行数据和故障记录,采用数据挖掘和机器学习等方法对绝缘结构的可靠性进行评估和预测。这些先进的方法和技术能够提高可靠性评估的准确性和可靠性,为优化绝缘结构和提高设备性能提供有力支持。

4.2 绝缘监测与故障诊断技术

绝缘监测与故障诊断技术在确保换流变压器主绝缘结构的安全运行中扮演着至关重要的角色。这一技术通过实时监测绝缘结构的电气性能和温度等关键参数,能够迅速捕捉到潜在的绝缘故障迹象,从而及时采取措施进行干预,有效防止故障进一步发展。目前,业界已广泛采用多种绝缘监测方法,如局部放电监测、介质损耗监测和泄漏电流监测等。这些方法不仅能够实时追踪绝缘结构的电气性能变化,还能为后续的故障诊断提供精确的数据支撑。特别是局部放电监测,它能够捕捉到绝缘结构中微小的放电现象,对于预测和诊断绝缘老化、裂纹等潜在问题具有重要意义。为了进一步提升绝缘监测与故障诊断技术的准确性和可靠性,需要不断加强对监测设备和技术的研究与开发。一方面,可以致力于开发更加灵敏和精确的局部放电监测设备和技术,以实现放电现象的即时捕捉和准确分析。另一方面,也应加强对介质损耗和泄漏电流等参数的监测与分析,从而更全面地掌握绝缘结构的性能变化动态。结合先进的故障诊断技术,如专家系统、神经网络等,可以实现对绝缘故障的精准诊断和定位。这些智能算法能够通过对监测数据的深度挖掘和分析,揭示出绝缘结构中的潜在问题,为后续的维修和保养工作提供有力支持。

4.3 维护与保养策略的优化

维护与保养策略的优化是提高换流变压器主绝缘结构可靠性的重要措施。通过制定合理的维护和保养计

划,定期对设备进行维护和保养,可以及时发现和处理潜在的故障和隐患,确保设备的正常运行和延长使用寿命^[4]。在维护与保养策略的优化方面,可以根据设备的运行条件和绝缘要求,制定合理的维护和保养计划。例如,可以定期对绝缘结构进行清洁和检查,及时发现和处理绝缘表面的污垢和损伤。还可以对设备的冷却系统进行清洗和维护,确保设备的散热性能良好。另外,还可以加强对设备的预防性试验和检修工作。通过定期对设备进行预防性试验和检修,可以及时发现和处理潜在的故障和隐患,避免设备在运行过程中发生故障。同时可以根据设备的实际情况和运行经验,对维护和保养策略进行不断的优化和改进,以提高设备的可靠性和使用寿命。

结束语

本研究通过对换流变压器主绝缘结构的优化与可靠性提升进行深入探讨,提出了一系列切实可行的改进措施和技术手段。这些研究成果不仅为换流变压器的设计和制造提供了理论支撑和实践指导,也为电力系统的稳定运行和性能提升做出了积极贡献。未来,将继续深化相关研究,不断探索新的优化方法和可靠性提升策略,以期为推动电力行业的发展和进步贡献更多智慧和力量。

参考文献

- [1]王志刚,张瑞栋.变压器绝缘结构的损伤特性研究及预测[J].电网技术,2020,44(5):132-138.
- [2]李明,刘建华.高压试验对变压器绝缘结构损伤的影响分析[J].电力系统保护与控制,2019,47(12):87-93.
- [3]冯利君,王克胜,原帅,高晋文,姚兆民,赵彦平.换流变压器有载调压开关控制策略分析及优化[J].变压器,2021,58(10):7-12.
- [4]唐颖凯,贾骥铭.大型变压器油色谱异常原因分析策略研究[J].电子元件与信息技术,2023,7(12):12-15.