

高电压大容量变压器绝缘技术的应用

咸永强 杜银海 郭 鹏
国网吴忠供电公司 宁夏 751101

摘要: 随着电力系统向高电压、大容量方向发展,对变压器的绝缘性能提出了更高的要求,本文从变压器的基本工作原理出发,分析了当前绝缘技术研究所面临的主要问题,并详细探讨了高电压大容量变压器绝缘技术的实际应用情况,旨在为提升变压器的运行可靠性和延长其使用寿命提供技术支持。

关键词: 变压器; 绝缘技术; 高电压; 大容量

引言

在现代电力系统中,变压器作为关键的电力设备之一,其安全稳定运行对于整个电网的可靠性至关重要,随着电网规模的不断扩大和技术的进步,对变压器的性能要求也在不断提高,尤其是其绝缘性能。绝缘技术是保障变压器安全运行的核心技术之一,特别是在高电压大容量变压器中,绝缘技术的应用更是关系到设备的安全与经济性。因此,深入研究和不断优化高电压大容量变压器的绝缘技术,对于推动电力系统的稳定发展具有重要的意义。

一、变压器工作原理

(一) 电磁感应原理

变压器的工作原理基于法拉第电磁感应定律,当交变磁场穿过导体时,会在导体中产生感应电动势,变压器利用这一原理,通过原、副绕组之间的电磁耦合实现电能的传递和电压的变换^[1]。当原绕组通入交流电时,在铁心中产生交变磁通,这个交变磁通又在副绕组中感应出电动势,从而在副绕组两端产生电压,感应电动势的大小与绕组匝数和磁通变化率成正比。通过调节原、副绕组的匝数比,可以实现电压的升高或降低。

(二) 变压器的结构组成

变压器主要由铁心、绕组、绝缘系统和外壳等部分组成,铁心是由硅钢片叠压而成,用于提供磁路,绕组通常采用漆包线或裸导线绕制,分为原绕组和副绕组。绝缘系统包括线间绝缘、层间绝缘和对地绝缘等,用于保证电气安全。外壳起到保护和散热的作用,对于大型变压器,还配有冷却系统、套管、分接开关等附件,变压器的结构设计需要综合考虑电气性能、机械强度、散

热效果和经济性等因素。

(三) 能量转换过程

变压器的能量转换过程可以分为电能—磁能—电能三个阶段。首先,原绕组中的交流电流在铁心中产生交变磁场,电能转化为磁能,然后,磁场通过铁心传递到副绕组。最后,副绕组中感应出电动势,磁能再次转化为电能。在这个过程中,能量的形式发生了变化,但总量基本保持不变。变压器的效率通常很高,可达98%以上。能量损耗主要包括铜损(绕组中的焦耳热)和铁损(铁心中的涡流损耗和磁滞损耗),通过优化设计,如使用高质量硅钢片、降低绕组电阻等措施,可以进一步提高变压器的效率。

二、绝缘技术研究存在的问题

(一) 材料老化与环境适应性

绝缘材料的老化是影响变压器长期可靠运行的关键因素,随着时间推移,绝缘材料会因热、电、机械应力和化学反应等因素而逐渐劣化,热老化导致绝缘材料分子结构变化,机械强度下降。电老化则可能引起局部放电,加速绝缘破坏^[2]。此外,环境因素如温度变化、湿度、污染物等也会加速老化过程,特别是在极端环境下,如高海拔、高湿度或高污染地区,绝缘材料的性能会受到更大挑战。目前,研究人员正致力于开发具有更好耐老化性能和环境适应性的新型绝缘材料,同时,也在探索如何准确评估和预测绝缘材料的老化程度,以便及时进行维护或更换。

(二) 部分放电与绝缘击穿

部分放电是绝缘系统中的一种局部电气放电现象,它不会立即导致绝缘击穿,但长期存在会逐步破坏绝缘材料,最终引发绝缘失效,部分放电的检测和防治

是绝缘技术研究的重点和难点。一方面，需要开发更精确、更灵敏的检测方法，以便在早期发现部分放电；另一方面，还需要研究部分放电的发展机理，找出有效的抑制措施。绝缘击穿是绝缘失效的最终结果，可能由电气、热或机械应力等因素引起。研究绝缘击穿机理，提高绝缘系统的耐受能力，是提升变压器可靠性的关键，当前，研究人员正在探索多种方法，如优化电场分布、改善散热条件、增强机械强度等，以延缓绝缘击穿的发生。

（三）绝缘检测技术的限制

现有的绝缘检测技术虽然已经取得了显著进展，但仍存在一些限制，非侵入式检测方法虽然不影响变压器运行，但精度和可靠性有待提高，侵入式检测虽然精度较高，但可能影响变压器正常运行，且成本较高。此外，一些隐蔽性强的绝缘缺陷，如内部微小裂纹或局部劣化，仍难以被现有技术准确检测。对于大型电力变压器，由于其结构复杂、体积庞大，全面准确的绝缘状态评估更具挑战性，另一个问题是数据解释的难度，即如何从检测数据中准确推断绝缘系统的实际状态^[3]。这需要建立更完善的数学模型和诊断算法。未来，绝缘检测技术的发展方向包括提高检测精度、扩大检测范围、降低检测成本，以及开发智能化、自动化的检测系统。

三、高电压大容量变压器绝缘技术的应用

（一）先进绝缘材料的应用

高电压大容量变压器的绝缘技术正经历着革命性的变革，其中先进绝缘材料的应用扮演着关键角色，耐高温绝缘材料的开发和应用显著提升了变压器的性能和寿命，改性聚酰亚胺材料凭借其优异的耐热性和电气性能，在高温环境下仍能保持稳定的绝缘特性，有效延长了变压器的使用寿命。聚四氟乙烯作为另一种重要的耐高温材料，其化学稳定性和低介电损耗特性使其在高频高压应用中表现出色，环保型绝缘材料的发展体现了电力行业对可持续发展的追求。植物油基绝缘油的广泛应用标志着绿色环保理念在变压器设计中的深入实践，这类材料不仅具有良好的绝缘性能，还具有生物降解性，大大减少了变压器报废后对环境的影响。此外，新型环保型固体绝缘材料的研发也取得了重要进展，如生物基聚合物绝缘材料，它们在保证绝缘性能的同时，显著降低了材料生产和处理过程中的碳排放，复合绝缘系统的创新应用为变压器绝缘技术带来了新的可能。传统的纸—油复合绝缘系统经过优化升级，通过改进纸张结构和浸油

工艺，实现了更高的绝缘强度和更好的散热性能。新型复合绝缘系统，如气—固复合绝缘，在特高压变压器中展现出巨大潜力，它结合了气体绝缘的自恢复性和固体绝缘的高绝缘强度，为解决特高压变压器的绝缘难题提供了新思路^[4]。纳米复合绝缘材料的研究和应用代表了绝缘技术的前沿发展方向，通过传统绝缘材料中添加纳米颗粒，如纳米氧化铝、纳米二氧化硅等，可以显著改善材料的介电性能、热导率和机械强度。这些纳米复合材料在高电场强度下表现出优异的抗击穿性能，为提高变压器的功率密度和可靠性提供了新的技术支撑。先进绝缘材料的应用不仅局限于主绝缘系统，在变压器的其他关键部件中也发挥着重要作用，例如，在套管绝缘中采用新型复合材料，可以显著提高套管的绝缘性能和机械强度，减少了维护需求和故障风险，在冷却系统中应用新型导热材料，能够更有效地散热量，保证变压器在高负载下的安全运行。

（二）绝缘结构设计优化

绝缘结构设计优化是高电压大容量变压器技术发展的核心领域之一，其重要性随着电压等级和容量的不断提升而愈发凸显，电场分布优化作为绝缘结构设计的关键环节，直接影响着变压器的绝缘性能和可靠性。通过采用静电场数值模拟技术，设计师能够精确分析复杂几何结构下的电场分布，从而优化绝缘结构，例如，在高压端采用静电屏蔽环不仅可以均衡电场分布，还能有效抑制局部放电的发生。近年来，多物理场耦合分析技术的应用为绝缘结构设计带来了新的突破。通过同时考虑电场、热场和机械应力场的相互作用，设计师能够更全面地评估绝缘结构的性能，并找到最优的设计方案，例如，在油纸绝缘系统中，电场分布会影响油流通道的设计，而油流又会影响热量分布，进而影响材料的电气性能。通过多物理场耦合分析，可以实现这些因素的综合优化。热管理设计是保证变压器长期可靠运行的另一个关键方面。随着变压器容量的增大，有效散热变得越发重要，创新的冷却结构设计，如导向式油流通道，能够显著提高油的流速，提高热交换效率，在特大容量变压器中，采用水冷技术可以进一步提高冷却效果。此外，热管理型绝缘材料的应用也为热量控制提供了新的思路，例如，热管理型绝缘纸通过优化纤维结构和添加导热填料，在保证绝缘性能的同时，大幅提高了热导率。机械强度提升是绝缘结构设计中不容忽视的环节，尤其在特大容量变压器中更为突出。短路力作用下，绕组可能发生

变形,导致绝缘结构失效。为应对这一挑战,设计师采用了多种创新方法,例如,通过优化绕组的支撑结构,如采用格栅式支撑板,可以显著提高绕组的抗短路能力。同时,新型高强度绝缘材料的应用,如纤维增强复合材料,为提高绝缘结构的机械强度提供了新的可能。此外,绝缘结构的模块化设计也是一个值得关注的发展方向。通过将复杂的绝缘结构分解为若干标准化模块,不仅可以简化设计和制造过程,还能提高维护的便利性。例如,模块化绝缘套管的设计使得更换和维护变得更加容易,降低了维护成本和停机时间。智能化设计工具的应用正在改变绝缘结构设计过程,人工智能和机器学习算法被用于优化复杂的绝缘结构,能够在海量设计方案中快速找到最优解,这不仅提高了设计效率,还能发现传统方法难以察觉的创新设计方案。

(三) 绝缘状态监测与评估

绝缘状态监测与评估技术的进步为高电压大容量变压器的安全运行提供了强有力的保障,在线监测技术的发展使得实时掌握变压器绝缘状态成为可能,大大提高了运维的精确性和及时性,局部放电在线监测系统的应用是这一领域的重要突破。通过安装高灵敏度的传感器,结合先进的信号处理算法,可以在早期阶段检测到绝缘系统中的微小放电,从而及时发现潜在的绝缘缺陷。油中溶解气体分析(DGA)技术的创新应用为绝缘状态评估提供了更加全面的信息^[5]。新型在线DGA设备能够实时监测油中多种特征气体的含量变化,通过智能算法分析气体组分和比例,可以准确判断绝缘系统的劣化类型和程度。例如,乙炔含量的突然增加可能预示着严重的局部过热或放电现象。绕组热点温度监测技术的进步为评估绝缘系统的热老化提供了直接依据,光纤温度传感技术的应用使得准确测量绕组内部温度成为可能,这不仅有助于防止热点过热,还为优化负载能力提供了依据。结合热老化模型,可以更精确地评估绝缘寿命消耗。智能传感器和物联网技术的融合为绝缘状态监测带来了革命性的变化,分布式传感网络能够全方位采集变压器的运行数据,包括温度、振动、部分放电等多项参数,通过5G网络实现数据的实时传输和云端分析,大大提高了监测的全面性和实时性。绝缘寿命评估方法的发展为制定科学的设备管理策略提供了重要支持。传统的热老化模型基础上,引入电气应力、机械应力等多因素的综合评估模型,能够更准确地反映实际运行条件下绝缘系统

的老化过程,基于大数据分析的寿命评估方法,通过挖掘海量历史运行数据,建立更加精确的寿命预测模型,为资产管理决策提供科学依据。故障预警机制的建立是绝缘状态监测与评估的最终目标。通过整合多源监测数据,结合专家知识库和人工智能算法,构建智能故障诊断系统,能够实现潜在故障的早期识别和风险评估,例如,通过分析局部放电特征、油中气体含量变化趋势、负载曲线等多维数据,系统可以预测绝缘击穿的风险,并给出相应的维护建议,人工智能技术在绝缘状态评估中的应用正在开拓新的研究方向。深度学习算法能够从复杂的监测数据中提取有价值的特征,实现更加准确的状态识别和故障预测。例如,利用卷积神经网络分析局部放电信号的时频特征,可以更加准确地识别放电类型和严重程度。未来,绝缘状态监测与评估技术将朝着更加智能化、集成化的方向发展。自适应监测系统将根据运行状况动态调整监测策略,实现更加高效和精准的状态评估,数字孪生技术的应用将使得虚拟仿真和实际运行数据的深度融合成为可能,为变压器全生命周期管理提供强大工具。

结束语

通过对高电压大容量变压器绝缘技术的深入分析和应用探讨,可以发现,随着新材料、新技术的不断发展,变压器的绝缘性能有了显著的提升,然而,面对日益严苛的运行环境和更高的性能要求,绝缘技术的发展仍然面临着诸多挑战。未来,通过持续的技术创新和系统优化,有望进一步提升变压器的绝缘性能,确保电力系统的高效、稳定运行。

参考文献

- [1]于鲜莉,贺宇,谢明佐,等.高电压大容量变压器绝缘技术研究[J].电工技术,2020(24):113-114.
- [2]黎慧明,杨露,余云光,等.高电压大容量变压器绝缘技术的应用[J].湖北农机化,2020(17):64-65.
- [3]董建平,马鹏.高电压大容量变压器绝缘技术的应用分析[J].技术与市场,2020,27(09):119+121.
- [4]王薇.高电压大容量变压器绝缘技术的应用研究[J].传播力研究,2019,3(18):276.
- [5]韩俊秀.高电压大容量变压器绝缘技术的应用分析[J].中国新通信,2019,21(09):225.