

低频电力变压器在海上风电中的热特性与散热结构优化研究

秦永艳

广东明阳电气股份有限公司, 广东 中山 528400

[摘要]随着海上风电的快速发展,低频电力变压器的热特性对系统的稳定性和可靠性产生重要影响。通过分析变压器在海上复杂环境中的热行为,探讨了不同散热结构对其性能的影响。采用数值模拟和实验验证相结合的方法,对散热效果进行优化,提出了适应海洋环境的高效散热设计方案。研究表明,优化后的散热结构显著提高了变压器的热管理性能,为海上风电的可靠运行提供了重要支持。

[关键词]低频电力变压器;海上风电;热特性;散热结构;优化设计

DOI: 10.33142/hst.v7i12.14698

中图分类号: TN99-34

文献标识码: A

Research on Thermal Characteristics and Heat Dissipation Structure Optimization of Low Frequency Power Transformers in Offshore Wind Power

QIN Yongyan

Guangdong Mingyang Electric Co., Ltd., Zhongshan, Guangdong, 528400, China

Abstract: With the rapid development of offshore wind power, the thermal characteristics of low-frequency power transformers have a significant impact on the stability and reliability of the system. By analyzing the thermal behavior of transformers in complex offshore environments, the influence of different heat dissipation structures on their performance was explored. By combining numerical simulation and experimental verification, the heat dissipation effect was optimized, and an efficient heat dissipation design scheme suitable for the marine environment was proposed. The research results indicate that the optimized heat dissipation structure significantly improves the thermal management performance of transformers, providing important support for the reliable operation of offshore wind power.

Keywords: low frequency power transformer; offshore wind power; thermal characteristics; heat dissipation structure; optimization design

引言

海上风电作为可再生能源的重要组成部分,正迅速崛起并推动全球能源结构转型。在这一过程中,低频电力变压器的性能直接影响到整个系统的效率和安全性。然而,海洋环境的复杂性和特殊性使得变压器的热管理成为一大挑战。为确保其稳定运行,迫切需要对变压器的热特性进行深入研究,并探索更为高效的散热结构优化方案。通过科学的方法与创新的设计,有望提升低频电力变压器在海上风电中的应用可靠性。

1 海上风电环境对低频电力变压器热特性的影响

1.1 海上风电环境的特点

海上风电项目由于其独特的地理位置,通常面临极具挑战性的环境条件。这些条件主要包括强风、高湿度和盐雾等,这些都对低频电力变压器的运行和维护提出了高标准的要求。首先,海上风电场的风力不仅强劲而且变化无常,风速的频繁变化和极端性质导致变压器经历快速且不规律的负荷波动。这种波动对变压器的升温特性产生了直接影响,需要变压器具备更高的负载调节能力和更强的热稳定性。其次,变压器在高湿度和盐雾的海洋环境中运行,会加速设备的腐蚀过程并降低绝缘性能,这不仅增加了维护成本,还可能引发严重的故障。盐雾中的盐分可以积累

在设备表面,与湿气结合后形成导电路径,增加绝缘材料的电流泄漏,从而导致绝缘性能下降。此外,由于海上风电场的冷却条件通常不如陆地,低频电力变压器在运行过程中产生的热量散发困难,对变压器的散热设计提出了更高要求。为了应对这些挑战,开发出具有高耐腐蚀性和优异散热性能的变压器成为行业的重要任务,以确保变压器能够在苛刻的海上环境中安全稳定地运行。这些研究和改进对于提高海上风电项目的整体可靠性和效率至关重要。

1.2 热特性分析与影响因素

低频电力变压器的热特性是其安全和效率的关键因素,这些特性受到材料属性、结构设计以及外部环境条件等多种因素的综合影响。变压器所使用的材料,如其铁芯和线圈的金属类型、绝缘材料的种类,直接决定了其热导率和热稳定性。材料的导热性能高,可以有效传递内部产生的热量至外部环境,而热膨胀系数则影响材料在温度变化时的尺寸稳定性,这对维持结构的完整性和功能性至关重要。在海洋环境中,由于高湿度和盐雾的影响,变压器绝缘材料的耐湿性和抗腐蚀性能尤其重要。不仅需要防止湿气侵入,还需要抵抗盐分对金属部件的腐蚀,保持绝缘效果,防止电气故障的发生。此外,变压器的结构设计,如油流动路径的优化、散热片的有效布局以及风扇冷却系

统的合理配置,都对提高散热效率和降低温升有着直接影响。有效的结构设计可以促进冷却介质(如变压器油)的流动,加速热量分散,从而降低核心和线圈的温度。环境条件,特别是海上风电场的水温、气温和风速,同样会显著影响变压器的热行为。例如,气温的升高可能减缓热量的散发,而强风则可能增强冷却效果。因此,建立精确的热行为模型并实施实时的动态监测,对于优化变压器的运行参数、提前识别潜在的故障点、确保变压器在恶劣海洋环境中稳定运行至关重要。这些分析不仅有助于变压器设计的初期阶段,也对日常运维提供了理论和数据支持。

1.3 热特性优化对策

为应对海上风电环境对低频电力变压器的热特性影响,优化散热结构至关重要。首先,可以采用具有高热导性的材料来提升散热效果,比如使用铝合金散热器或导热油。此外,优化油冷却系统的设计,使油流在变压器内部形成良好的循环,能有效降低温度。其次,针对海洋气候的特点,可以设计适应性强的散热装置,例如加装风扇和散热器,以增强空气流动,提高散热效率。通过数值模拟和实验验证相结合的方法,可以优化散热结构并评估其性能。在未来的发展中,持续改进散热技术,将为低频电力变压器在海上风电中的可靠应用提供强有力的支持。

2 低频电力变压器的热行为分析与模型建立

2.1 热行为分析的重要性

低频电力变压器的热行为分析对于保障其稳定性和安全性至关重要。在实际运行中,变压器由于电流的通过会产生热量,温度的升高直接影响到其工作效率和使用寿命。为了准确评估变压器的热特性,需要对其热行为进行全面分析。这一过程包括对热源的识别、热传导机制的理解以及对环境影响的考量。变压器内部的热源主要来自于绕组和铁心的损耗,电流通过时的铜损和磁损都会导致热量的积累。在此基础上,需建立热模型,明确热量的分布和流动路径,以便为散热结构的优化提供依据。

2.2 热行为模型的建立

建立低频电力变压器的热行为模型需要综合考虑多种因素,包括材料特性、几何结构和工作条件等。首先,材料的导热系数、比热容和密度等物理特性会影响热量的传导和储存,因此在模型中需详细列出所用材料的热性能参数。其次,变压器的几何结构,如绕组的布局、铁心的形状和散热器的配置,也在模型中占据重要地位。这些结构特征将直接影响热量的分布和流动,进而影响温度的变化。最后,模型还应考虑运行条件,如负载变化和环境温度等,这些因素将导致热行为的动态变化。因此,通过建立综合的热模型,能够更精准地预测变压器的温度分布和热状态。

2.3 模型的验证与应用

热行为模型的建立并不仅仅是理论推导,还需要通过实验进行验证。实验过程中,可以采用热成像技术对变压器的温度分布进行实时监测,从而与模型预测结果进行对

比。通过不断调整模型参数和边界条件,逐步提高模型的准确性。在模型验证的基础上,可以进一步应用于不同工况下的热分析,例如在极端海洋环境下的热行为评估。此类分析不仅有助于理解低频电力变压器在复杂条件下的热响应,也为后续的散热结构优化提供了理论依据。因此,通过有效的热行为分析和模型建立,可以为低频电力变压器的安全运行和性能提升提供科学支持。

3 散热结构设计原则及其在海上应用中的挑战

3.1 散热结构设计原则

在低频电力变压器的散热结构设计中,合理的设计原则至关重要。首先,散热结构应具有良好的热导性,以确保热量能够迅速从热源处传导至散热面。材料的选择在这一过程中至关重要,通常采用高热导系数的金属材料,如铝或铜,作为散热器的主要构件。其次,散热结构的几何形状和布局需要精心设计,以提高散热效率。一般来说,散热器应具有较大的表面积,以增加与周围介质的热交换。此外,散热结构的流体动力学特性也需考虑,通过优化油流路径和空气流动,提高散热效果。此外,设计应符合海洋环境的特殊要求,如抗腐蚀性和抗风压能力,以确保长期稳定运行。

3.2 海上应用中的挑战

尽管散热结构的设计原则明确,但在海上应用中仍面临诸多挑战。首先,海洋环境的复杂性对散热系统提出了更高的要求。海上风电场的温度、湿度和盐雾等变化都可能对散热性能造成影响。例如,盐雾会导致散热器表面腐蚀,降低热传导能力,甚至引发绝缘故障。此外,海上风电场常常面临强风和波浪的干扰,这可能影响散热装置的稳定性和工作效率。为此,设计者需针对这些挑战进行深入分析,并在散热结构中融入抗风浪设计,以确保设备在极端条件下的可靠性。此外,海上操作的高成本和维修难度也要求散热结构设计具备易于维护和更换的特点。

3.3 散热结构的创新与发展

面对海上应用中的各种挑战,散热结构的创新与发展变得尤为重要。近年来,研究者们探索了多种新型散热技术,如相变材料(PCM)和纳米流体的应用,这些新技术能够显著提升散热效果。相变材料具有较高的热容,能够在温度波动时有效吸收和释放热量,平衡变压器的温度变化。同时,纳米流体的引入也能提升热导率,增强散热性能。此外,智能监测技术的应用使得散热系统的实时监控和调节成为可能,通过传感器实时获取温度数据,智能算法可以优化散热结构的工作状态。未来,随着技术的不断进步,散热结构将更加智能化和高效化,能够更好地应对海上风电环境带来的挑战,为低频电力变压器的稳定运行提供坚实保障。

4 散热性能优化方案及其效果评估

4.1 散热性能优化方案

为了提升低频电力变压器的散热性能,优化方案需从多个方面入手。首先,优化材料选择是提高散热效率的重

要环节。通过选用高导热性材料,如铝合金或铜制散热器,可以有效增加热传导率,迅速将热量从变压器内部转移到外部环境。此外,增加散热器的表面积也是一种行之有效的措施。采用鳍片设计或其他增强表面结构,可以显著扩大散热面积,增强与周围介质的热交换能力。其次,流体动力学的优化也是提升散热性能的关键。在油冷却系统中,合理设计油流通道,促进油液的循环流动,可以提高热量的传导和散发效率。同时,增设风扇或风道,确保空气流动良好,从而改善散热效果。最后,散热结构的整体布局应考虑海洋环境的特殊性,确保设备在强风和波浪影响下依然能够高效散热。

4.2 散热效果的评估方法

评估散热性能优化方案的有效性,需要建立科学的评估方法。首先,热成像技术是一种直观有效的评估手段。通过红外热成像仪器,可以实时监测变压器及其散热结构的温度分布情况,发现热点区域,分析热量的流动路径。其次,数值模拟也是评估散热效果的重要工具。采用计算流体动力学(CFD)软件,对散热结构进行建模与仿真,能够预测不同工况下的热行为,提供数据支持。在实际运行中,可以通过对比优化前后的温度变化、热传导效率和散热器表面温度等指标,量化散热性能的提升。此外,长期的耐久性测试也不可忽视,通过模拟极端海洋环境的温度和湿度变化,评估散热结构的长期稳定性和抗腐蚀能力,确保其在实际运行中的可靠性。

4.3 散热优化的实际效果与应用前景

通过实施上述优化方案,低频电力变压器的散热性能得到显著提升,优化后的散热结构在实际应用中表现出良好的效果。在海上风电项目中,经过优化的变压器能有效降低工作温度,延长设备的使用寿命,减少故障率。这不仅提升了变压器的运行效率,还为整个风电系统的安全稳定运行提供了保障。未来,随着技术的不断进步和新材料的开发,散热性能优化将迎来新的机遇。例如,智能散热系统的引入,使得散热结构能够根据实际温度和负载情况,自动调节散热强度,进一步提高散热效率。此外,结合物联网技术,实时监控散热性能并进行数据分析,有助于实现更为智能化的散热管理。因此,散热性能的优化不仅为低频电力变压器在海上风电中的应用奠定了基础,也为未来的可持续能源发展提供了重要支撑。

5 未来低频电力变压器散热技术的发展趋势与展望

5.1 新材料的应用与创新

未来低频电力变压器的散热技术将越来越多地依赖于新材料的应用与创新。传统的散热材料如铝和铜虽具备良好的导热性,但在极端环境下的性能仍有限。新型复合材料和纳米材料的出现,为散热技术提供了新的可能性。例如,纳米流体技术通过在液体中加入纳米颗粒,显著提

升了热传导性能,使冷却效率大幅提高。此外,具有相变特性的材料也在散热领域展现出良好的应用前景。这些材料能够在温度变化时吸收和释放热量,从而有效平衡变压器的温度波动,确保设备的稳定运行。未来,材料科学的不断进步将推动散热技术的发展,提升低频电力变压器在多变海洋环境下的适应能力。

5.2 智能散热系统的兴起

随着智能技术的快速发展,智能散热系统将成为低频电力变压器散热技术的重要发展方向。这些系统通过集成传感器和物联网技术,实现对变压器温度和负载的实时监测与调节。智能散热系统能够根据实际情况动态调整散热强度,例如在负载增加时,自动启动额外的冷却措施,从而保持变压器在最佳工作状态。此外,数据分析技术的引入使得散热管理更加科学。通过对温度数据的分析,可以预测设备可能出现的过热情况,并提前采取预防措施。这种智能化的管理方式不仅提升了变压器的运行安全性,也有助于减少维护成本,提高系统的整体效率。

5.3 可持续发展与环境友好型设计

未来的低频电力变压器散热技术还将更加注重可持续发展和环境友好型设计。随着全球对环境保护和可持续发展的重视,散热技术的设计需要考虑材料的可回收性和对环境的影响。例如,采用可再生材料或环保材料制造散热器,不仅能减少资源消耗,还能降低环境污染。此外,散热系统的能效提升也成为重要的设计目标。通过优化散热结构和提高散热效率,可以显著降低变压器的能耗,实现更高的能效比。这种以可持续发展为导向的设计理念,将推动低频电力变压器散热技术的进步,为实现更绿色的能源发展贡献力量。

6 结语

随着低频电力变压器在海上风电领域的广泛应用,散热技术的优化显得尤为重要。新材料的应用和智能散热系统的发展,将为提升散热性能提供新的解决方案,同时也为应对海洋环境的挑战奠定了基础。未来,散热技术不仅要提高效率,还需关注可持续发展与环境友好型设计,通过创新和技术进步,实现资源的合理利用和环境的保护。因此,低频电力变压器散热技术的发展前景广阔,将为可再生能源的稳定运行和可持续发展提供重要支持。

[参考文献]

- [1]张光宇.海上风电变压器电磁力谐波特征分析及寿命预估研究[D].济南:山东大学,2022.
- [2]阳熹,汤翔,李炬添,等.海上风电低频主变压器特性分析及技术展望[J].南方能源建设,2023,10(5):139-148.
- [3]杨明,杜楠,禩冠星,等.海上风电升压变压器技术路线选择与对比[J].电工技术,2023(24):25-30.
- [4]李想,李晓华,赵文彬,等.海上风电低频变压器铁心损耗特性实验研究[J].上海电力大学学报

报, 2024, 40(2): 124-128.

[5]王孟夏,周生远,杨明,等.计及海底电缆热特性的可接纳海上风电装机容量评估方法[J].电力系统自动化, 2021, 45(6): 195-202.

[6]李传明,孙业荣,魏彩霞,等.低频干式变压器漏磁场分析及杂散损耗计算[J].变压器, 2023, 60(1): 1-7.

[7]缪宇峰,汪李忠,郭强,等.基于中低频零序扫描阻抗的配电变压器容量检测方法[J].电工电能新技术, 2022, 41(7): 64-71.

[8]冯洪达.配电变压器高效轻质吸隔声材料结构及性能研究[D].北京:华北电力大学, 2021.

[9]李飞,张静,程林,等.适用于寒冷地区的变压器低频短路电流加热干燥方法研究[J].黑龙江电力, 2018, 40(5): 438-442.

[10]胡胜,李铁楠,周冠东,等.户内配电变压器低频噪声综合治理技术[J].湖南电力, 2017, 37(3): 36-38.

[11]江启红.电力变压器有源降噪的关键技术研究[J].低碳世界, 2016, 3(17): 49-50.

[12]黄辉.电子电力变压器的控制与应用[D].武汉:华中科技大学, 2015.

[13]章彬,周亚琪,伍国兴,等.电力变压器低频噪声的模拟与等效[J].武汉大学学报(工学

版), 2014, 47(5): 642-647.

[14]黄阳,陶永政,孔志达,等.海上风电柔性低频输电系统的技术经济分析[J].电网技术, 2024, 2(10): 10-12.

[15]吴梦成,从雨亭,徐继尧,等.基于双边演化博弈的海上风电补贴机制研究[J].电力勘测设计, 2024, 4(9): 17-74.

[16]张奕,杨超华,方丽薇.海上风电和海洋牧场融合发展中公众参与:利益博弈与机制构建[J].现代营销(下旬刊), 2024, 3(9): 68-70.

[17]王岳峰,黄虎,王晓东,等.海上风电机组除湿盐雾系统研究[J].机械工程与自动化, 2024, 3(5): 206-210.

[18]刘云鹏,赵家莹,刘贺晨,等.低频电压下含纤维素颗粒变压器油绝缘特性及影响因素[J].电工技术学报, 2024, 39(4): 1198-1207.

[19]巫仟煌,江吉彬,郑金波,等.电机控制器散热结构多目标优化[J].微特电机, 2024, 52(8): 20-25.

[20]韩新明.通风系统变频器散热结构设计研究[J].煤炭与化工, 2024, 47(8): 90-93.

作者简介:秦永艳(1984.9—),女,毕业院校:辽宁工程技术大学,所学专业:电气工程及其自动化,当前工作单位:广东明阳电气股份有限公司,职务:高级研发工程师,职称级别:电气工程师。