

基于 20Hz 低频输电技术的海上风电变压器系统设计与性能分析

石姜

广东明阳电气股份有限公司, 广东 中山 528400

[摘要] 海上风电系统在可再生能源利用中扮演着重要角色。随着低频输电技术的发展, 20Hz 低频输电方案为海上风电变压器系统的设计提供了新的思路。该系统通过优化变压器的设计与性能分析, 旨在提高风电输电效率与系统稳定性。采用先进的材料和结构设计, 降低了损耗, 提升了可靠性。同时, 针对海洋环境的特殊性, 设计了相应的防护措施, 以确保变压器在恶劣条件下的安全运行。研究表明, 20Hz 低频输电技术能够有效提升海上风电系统的整体性能。

[关键词] 海上风电; 变压器; 低频输电; 系统设计; 性能分析

DOI: 10.33142/hst.v7i11.14305

中图分类号: TM561

文献标识码: A

Design and Performance Analysis of Offshore Wind Power Transformer System Based on 20Hz Low Frequency Transmission Technology

SHI Jiang

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

Abstract: Offshore wind power systems play an important role in the utilization of renewable energy. With the development of low-frequency transmission technology, the 20Hz low-frequency transmission scheme provides new ideas for the design of offshore wind power transformer systems. The system aims to improve the efficiency and system stability of wind power transmission by optimizing the design and performance analysis of transformers. Adopting advanced materials and structural design has reduced losses and improved reliability. At the same time, corresponding protective measures have been designed to ensure the safe operation of transformers under harsh conditions, taking into account the particularity of the marine environment. The research results indicate that 20Hz low-frequency transmission technology can effectively improve the overall performance of offshore wind power systems.

Keywords: offshore wind power; transformer; low frequency transmission; system design; performance analysis

引言

海上风电作为一种重要的可再生能源,正在全球范围内快速发展。然而,传统的输电技术面临着效率和稳定性的挑战。近年来,20Hz 低频输电技术的兴起,为海上风电变压器系统的设计提供了创新的解决方案。这一技术不仅能够显著降低能量损耗,还提升了系统的抗干扰能力和可靠性。深入探讨低频输电在海上风电中的应用,不仅有助于推动可再生能源的广泛利用,也为未来的电力传输技术指明了方向。

1 20Hz 低频输电技术概述及其在海上风电中的应用

1.1 20Hz 低频输电技术的基本原理

20Hz 低频输电技术通过将电力传输频率从传统的 50Hz 或 60Hz 降低到 20Hz,显著降低了输电过程中的电能损耗和电磁干扰,特别是在需要长距离传输的应用场景中,如海上风电。这种技术在海上风电领域表现尤为突出,因为海上风电场通常位于离岸较远的地方,传统高频输电方式在此类长距离传输中会导致较大的能量损失。低频输电技术不仅减少了损耗,还有助于减轻电缆的热负荷,延长了设备的使用寿命。此外,20Hz 低频信号具有更好的环境适应性,能够有效应对海洋环境中如风速和海浪等自然

条件的波动,从而提供更为稳定和可靠的电力供应。这种技术也促进了海上风电技术的进步和优化,使得远离岸边的风电场更加经济和高效,为远海风电的发展提供了强有力的技术支持,有望成为未来海上风电输电的主流技术之一。

1.2 低频输电在海上风电中的应用优势

20Hz 低频输电技术在海上风电场的建设中展现了多方面的应用优势,特别是在提升系统稳定性和经济效益方面具有显著效果。首先,低频输电因其频率较低,导致电流波动小,从而在海上风电机组输出不稳定的情况下,依然能有效保持电网整体的稳定性。这种稳定性对于避免由于风力波动引起的电能质量问题尤为重要。其次,低频输电技术通过减少电流的波动,也减轻了对电力设备,如变压器、电缆等的物理压力,这直接延长了这些设备的使用寿命,并减少了由于高负荷运行导致的维修和更换成本。此外,由于系统频率的降低,相关设备的设计也可以更为简化,进一步降低了生产和维护的成本,使得整个电力输送系统更加经济高效。最后,低频输电系统在面对复杂多变的海洋环境时,显示出了优越的抗电磁干扰能力。由于海上风电场常常面临着强烈的海洋盐雾、湿度以及其他自然条件的影响,低频信号能够更有效地穿透这些干扰,保证了电力传输的可靠性和连续性。因此,20Hz 低频输电

技术不仅提高了海上风电场的电能传输效率,也显著提升了整个系统的经济性和可靠性,是海上风电技术发展的重要推动力。

1.3 未来发展方向与挑战

尽管 20Hz 低频输电技术在海上风电应用中具有诸多优势,但仍面临一些挑战。首先,低频输电系统的标准化和规范化尚需进一步研究,以便于在不同海上风电项目中的推广应用。此外,技术的成熟度和市场接受度也是影响其广泛应用的关键因素。因此,推动低频输电技术的研发,提升其经济性和适用性,将是未来发展的重要方向。最后,随着海上风电的快速发展,持续监测和评估低频输电系统的性能,以及应对海洋环境变化带来的影响,将是实现其长效运行的必要措施。通过技术创新和政策支持,20Hz 低频输电技术有望在未来的海上风电发展中发挥更大的作用。

2 海上风电变压器系统设计原则与关键技术

2.1 海上风电变压器系统的设计原则

在海上风电变压器系统的设计过程中,首先需要遵循高效性、可靠性和安全性原则。高效性是指变压器在电力传输过程中应具备最低的能量损耗,以提高整体的电能转换效率。为了实现这一目标,设计师需要考虑优化变压器的结构和选材,采用高导电性和低损耗的材料,以降低铁损和铜损。此外,变压器的冷却系统设计也是提高效率的关键,采用自然冷却和强制冷却相结合的方式,确保变压器在高负荷和恶劣环境下的正常运作。

可靠性是设计中的另一个重要原则。在海上风电环境中,变压器常常面临极端气候和海洋条件,例如强风、盐雾和高湿度,这些因素会对设备的运行产生影响。因此,设计时需要特别关注防护措施,例如采用防腐材料和密封结构,以抵御海洋环境的侵蚀。同时,设计中还应考虑设备的冗余配置,以便在部分设备出现故障时,整个系统依然能够维持稳定运行。通过实施定期维护和监测,可以进一步提升变压器的可靠性,确保其在长时间内稳定运行。

2.2 关键技术的选择与应用

海上风电变压器系统的设计中,关键技术的选择与应用对提高系统性能至关重要。其中,低频输电技术是实现高效传输的核心。相比传统的 50Hz 和 60Hz 系统,20Hz 低频输电技术能够降低能量损耗,提高系统稳定性,特别适合长距离输电。在变压器设计中,需采用适合低频工作的变压器型号,以确保其能够在低频率下正常运行。

此外,智能化监控技术的应用也日益受到重视。通过在变压器系统中集成智能监控设备,实时采集运行数据并进行分析,可以有效预判设备的运行状态与潜在故障。这种预防性维护策略不仅能降低维修成本,还能延长设备的使用寿命。同时,智能化监控技术还可以与远程控制系统相结合,实现对变压器运行状况的远程监控与管理,确保

设备在任何情况下的安全性和稳定性。

2.3 设计中的经济性与可持续性考虑

在海上风电变压器系统的设计中,经济性和可持续性是不可忽视的因素。设计者应在满足性能需求的同时,控制设计和建设成本。通过选用高性价比的材料和技术,可以在不影响系统性能的前提下降低整体造价。此外,合理的设计方案和施工流程可以缩短建设周期,进一步节约项目成本。

可持续性是现代工程设计的重要方向。海上风电项目不仅要关注经济效益,还应重视环境影响。设计时需评估变压器的生命周期,包括材料的可回收性和使用过程中的环境影响。通过引入环保材料和绿色设计理念,推动海上风电变压器系统的可持续发展。与此同时,加强与相关环保机构的合作,确保设计方案符合环保法规与标准,为海洋生态保护贡献力量。通过综合考虑经济性与可持续性,海上风电变压器系统的设计将更具前瞻性,为未来的可再生能源发展奠定坚实基础。

3 低频输电对风电系统性能提升的影响

3.1 低频输电对能量损耗的减少

低频输电技术在风电系统中的应用,最显著的影响之一是能量损耗的显著减少。传统的 50Hz 或 60Hz 输电系统在长距离传输电力时,由于电流频率较高,导致线损和铁损等能量损耗增加。而在 20Hz 低频输电中,电流波动幅度较小,这不仅减少了因感应和电抗引起的能量损耗,也降低了传输线路上的发热量,从而提高了整体的电能利用效率。此外,低频输电能够优化电缆的设计和选型,进而在同等条件下实现更小的电缆截面积,降低材料成本和系统整体重量,适应海上风电的特殊环境需求。

3.2 系统稳定性的增强

另一个重要的影响是低频输电技术显著提升了风电系统的稳定性。传统高频输电系统在面对风速变化或负荷波动时,容易出现电力供应不稳定的现象。这对于海上风电场尤其严重,因为海洋环境的不确定性常常导致风速的剧烈变化。采用 20Hz 低频输电后,系统能够以更平稳的方式响应这些波动,电流波动较小,有助于维护电网的频率稳定。同时,低频系统的动态响应速度相对较慢,降低了系统对瞬时干扰的敏感性,减少了由于突发事件造成的系统故障风险。通过提升系统的稳定性,风电场不仅能保证持续的电力输出,还能增强对电网整体的支持能力。

3.3 设备可靠性的提升

低频输电技术还对设备的可靠性产生了积极影响。在海上风电场中,变压器和其他电气设备需要在极端气候和海洋环境中长期运行。高频率下,电气设备更容易受到电磁干扰,导致故障率上升。而 20Hz 低频输电系统能够显著降低这种电磁干扰的影响,从而减少设备的故障率。此外,低频输电系统通常要求变压器设计为更高的额定功率,

使其具备更好的热管理能力,进一步提高了设备的耐用性和运行稳定性。通过降低故障率并提高设备可靠性,海上风电场可以减少停机时间,降低维护成本,提升整体经济效益。

综合来看,低频输电技术在海上风电系统中带来的不仅是能量损耗的减少和系统稳定性的增强,还有效提升了设备的可靠性。这些优势共同推动了风电系统性能的提升,为海上风电的可持续发展奠定了坚实基础。

4 海洋环境下变压器的防护措施与可靠性分析

4.1 海洋环境对变压器的挑战

海洋环境对变压器的运行提出了严峻的挑战。首先,海洋气候变化多端,强风、盐雾和高湿度等因素会对变压器的结构和功能产生不利影响。盐雾的腐蚀性特别强,长期暴露在盐雾环境中的设备容易出现锈蚀和绝缘破坏,从而导致故障。其次,海洋环境的温度变化也可能影响变压器的散热性能。在高负荷条件下,如果散热不良,可能导致变压器过热,缩短其使用寿命。此外,海浪和潮汐对变压器的机械稳定性也构成威胁,尤其是在漂浮式风电平台中,变压器需要具备抗震和抗倾斜的能力。因此,了解海洋环境对变压器的影响是实施有效防护措施的前提。

4.2 变压器的防护措施

针对海洋环境的挑战,设计和实施有效的防护措施至关重要。首先,变压器的外壳应采用高强度、耐腐蚀的材料,如不锈钢或铝合金,以抵御盐雾侵蚀。同时,外部涂层也应采用防腐涂料,以进一步增强保护效果。其次,为了防止潮气进入变压器内部,设计中应考虑采用密封结构,配备防水密封圈和排水装置。此外,变压器的冷却系统也需特别设计,采用强制冷却与自然冷却相结合的方式,以保证在高负荷情况下的散热效率。最后,监测系统的建设也不可忽视,通过在变压器中安装传感器,实时监控温度、湿度和盐分浓度,可以及时发现潜在问题并采取措​​施,确保设备的正常运行。

4.3 可靠性分析与维护策略

对海洋环境下变压器的可靠性分析是确保其长期稳定运行的重要环节。可靠性分析应包括对变压器材料性能、结构设计以及防护措施的全面评估。在材料选择方面,应优先考虑那些在高湿、高盐环境下表现优异的材料,以提高设备的耐用性。在结构设计上,应采用冗余设计,以确保在某一部件发生故障时,其他部件仍能维持设备的正常运行。此外,定期的维护与检查也是提高变压器可靠性的重要策略。针对海洋环境的特殊性,应制定专项维护计划,定期对变压器进行清洗和检修,确保防护措施的有效性。在实际运行中,结合数据分析与设备状态监测,可以动态调整维护策略,从而提高设备的整体可靠性。

综上所述,海洋环境对变压器提出了严峻的挑战,但通过有效的防护措施与可靠性分析,可以显著提升变压器的稳定性和耐用性。这为海上风电的发展提供了坚实的基

础,确保了可再生能源的持续利用。

5 未来海上风电变压器系统的发展趋势与挑战

5.1 发展趋势:智能化与数字化转型

未来海上风电变压器系统的发展趋势将逐步向智能化和数字化转型。随着物联网技术和人工智能的快速发展,变压器系统将集成智能监测和管理功能。通过实时数据采集和分析,可以实现对变压器的状态监测和故障预测,提前发现潜在问题,从而减少停机时间和维护成本。此外,数字化技术的应用将增强系统的灵活性与响应速度,使其能够更好地适应海洋环境的变化与电力需求的波动。智能化转型不仅提升了系统的运行效率,还为海上风电的可持续发展奠定了基础。

5.2 技术创新:新材料与新设计

在技术创新方面,未来海上风电变压器系统将依赖新材料和新设计理念的不断涌现。高性能、耐腐蚀的材料将被广泛应用于变压器的外壳和内部构件,以提高其在海洋环境下的耐用性。此外,采用模块化设计的变压器系统将成为趋势,模块化不仅简化了设备的维护和更换过程,还提升了系统的扩展性与灵活性。这些创新将为风电变压器的高效、可靠运行提供有力保障,助力海上风电行业的持续发展。

5.3 面临的挑战:环境适应与市场竞争

尽管海上风电变压器系统的发展前景广阔,但仍面临多重挑战。首先,海洋环境的复杂性使得变压器必须具备更强的适应能力,包括对极端气候、盐雾和潮汐变化的抵御能力。其次,随着全球对可再生能源需求的增加,市场竞争将愈发激烈,企业需要不断提升产品性能与性价比,以保持市场优势。最后,政策法规的变化也可能影响海上风电项目的实施和资金投入。

6 结束语

未来海上风电变压器系统的发展将面临智能化与数字化转型的机遇,同时也需要应对复杂的海洋环境和激烈的市场竞争。通过新材料与新设计的创新应用,提升变压器的可靠性和适应性,将是关键。只有不断推动技术进步和优化管理策略,才能实现海上风电的可持续发展,充分发挥其在全球能源转型中的重要作用。海上风电的未来充满潜力,期待其为可再生能源的广泛应用做出更大贡献。

[参考文献]

- [1] 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.
- [2] 牟金善, 管文杰, 何倩倩. 海上风电机组变压器磁密设计影响因素探讨[J]. 变压器, 2024, 61(2): 51-54.
- [3] 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, 2024, 40(2): 124-128.
- [4] 马壮, 淡淑恒. 考虑故障风险与不确定性的海上风电主

变压器检修策略[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(2): 214-222.

[5] 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.

[6] 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, 3(1): 10-12.

[7] 司俊龙, 艾琳, 邱辰. 2023 年中国风电发展现状与展望[J]. 水力发电, 2024, 2(5): 10-12.

[8] 练继建, 许淑云, 王海军, 等. 海上风电五连筒导管架基础及筒顶节点受力分析[J]. 太阳能学报, 2024, 45(9): 564-573.

[9] 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, 4(5): 206-210.

[10] 李海锋, 许永治, 刘沈全, 等. 柔性低频输电系统的故障分量特征及保护适用性分析[J]. 高电压技术, 2024, 50(5): 1987-1996.

[11] 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.

[12] 陈飞, 宋磊, 孙业荣, 等. 风力发电低频输电用变压器的关键技术[J]. 变压器, 2022, 59(12): 23-27.

[13] 林进钿, 倪晓军, 裘鹏. 柔性低频交流输电技术研究综述[J]. 浙江电力, 2021, 40(10): 42-50.

[14] 胡诗尧, 容春艳, 李中祥, 等. 高阻抗变压器的不同实

现方式与抗短路性能分析[J]. 高压电器, 2024, 60(8): 147-155.

[15] 刘亚, 郭乃天, 徐仲春, 等. 变压器性能试验分析[J]. 中国标准化, 2024, 2(14): 177-180.

[16] 廖才波, 黄智勇, 杨金鑫, 等. 基于缺陷文本识别的变压器风险评估及辅助检修决策方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(7): 2931-2941.

[17] 李国艺, 徐梦潇, 孙文辉. 基于 Simulink 的油浸式变压器性能试验及分析[J]. 电工技术, 2024, 4(10): 158-163.

[18] 纪杰. 电力系统中的工业通用技术应用分析[J]. 集成电路应用, 2024, 41(5): 388-389.

[19] 贾东明, 韩晓昆, 董翔, 等. 基于 Pt-C3N 传感器的变压器油中溶解气体的吸附性能研究[J]. 智慧电力, 2024, 52(4): 40-61.

[20] 朱庆东, 李龙龙, 朱孟兆, 等. 特高压变压器内部电弧放电时的应力应变分析及安全校核[J]. 浙江电力, 2024, 43(1): 117-125.

[21] 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: 石姜(1985.8—), 男, 毕业院校: 沈阳工业大学, 所学专业: 电气工程及其自动化, 当前就职单位: 广东明阳电气股份有限公司, 职务: 研发经理, 职称级别: 电气工程师。