

大功率风电基础结构的稳定性分析与优化设计

陆卫国

中国华电科工集团有限公司 北京 100160

摘要: 随着全球能源需求的持续增长和环境保护意识的不断提高,风能作为一种清洁、可再生的能源形式,其开发和利用已成为全球能源转型的重要方向。大功率风电基础结构作为风力发电机组的关键支撑部分,其稳定性直接关系到整个风力发电系统的安全、可靠和高效运行。本文详细探讨了大功率风电基础结构的稳定性分析方法,并提出了具体的优化设计措施,旨在为风力发电行业的健康发展提供理论支持和实践指导。

关键词: 大功率风电基础结构; 稳定性; 优化设计

引言

风能作为一种取之不尽、用之不竭的清洁能源,对于缓解能源危机、减少环境污染和推动可持续发展具有重要意义。随着风力发电技术的不断进步和成本的持续降低,大功率风力发电机组的应用日益广泛。然而,大功率风电基础结构在设计和运行过程中面临着诸多挑战,其中稳定性问题尤为关键。基础结构的稳定性不仅影响风力发电机组的正常运行,还直接关系到整个风力发电系统的安全性和经济性。因此,对大功率风电基础结构的稳定性进行深入分析,并提出有效的优化设计措施,对于提高风力发电系统的整体性能和可靠性具有重要意义。

1 大功率风电基础结构概述

大功率风电基础结构主要包括塔架和基础两部分。塔架作为连接风轮和发电机组的支撑结构,需要承受巨大的风力和自身重力,同时还需要具备足够的刚度和稳定性,以确保风力发电机组在复杂多变的风力环境中能够稳定运行。基础则负责将塔架和机组的重量及风力传递给地基,确保整个风力发电系统的稳定。大功率风电基础结构的设计需要综合考虑地质条件、风力荷载、机组重量、塔架高度等多种因素,以确保其稳定性和安全性。

2 大功率风电基础结构稳定性分析方法

2.1 承载力分析

承载力分析主要关注基础在垂直和水平荷载作用下的承载能力。在垂直承载力方面,需要重点考虑土层的承载力特性。这包括土层的抗压强度、压缩性以及可能的沉降量。对于不同类型的土层,如软土、砂土、岩石等,其承载力特性各不相同,因此需要根据实际地质条件进行具体分析。此外,基础的形状、尺寸以及埋深也会对垂直承载力产生影响。例如,扩展基础通过增大底面积来分散荷载,从而提高承载力;而桩基础则通过桩

身将荷载传递到更深层的土层中。在水平承载力方面,需要关注风力荷载对基础的作用。风力荷载是风电基础结构承受的主要水平荷载之一,其大小和方向随风速、风向以及机组高度等因素而变化。为了评估基础的水平承载力,需要考虑土层的抗剪强度、基础与土层的摩擦系数以及基础的侧向刚度等因素。对于桩基础,还需要特别考虑桩身材料、桩径、桩长以及桩周土层的性质对水平承载力的影响^[1]。例如,桩身材料的强度越高,桩的抗弯能力就越强,从而能够提高水平承载力。在进行承载力分析时,通常采用理论计算与实验测试相结合的方法。理论计算可以基于土力学原理和基础结构力学理论,对基础的承载力进行初步估算。而实验测试则可以通过现场静载试验、动力触探等手段获取土层的实际承载力参数,并对理论计算结果进行验证和修正。

2.2 变形分析

变形分析主要关注基础在荷载作用下的位移、沉降等变形参数。在变形分析中,首先需要确定基础的变形模式。对于不同类型的基础结构,其变形模式可能各不相同。例如,扩展基础在荷载作用下可能发生整体沉降和局部倾斜;而桩基础则可能发生桩身弯曲和桩顶位移等。为了准确评估基础的变形情况,需要结合数值模拟和实验测试等方法进行。数值模拟可以采用有限元分析等技术手段,对基础结构在荷载作用下的变形情况进行模拟和预测。通过数值模拟,可以获取基础在不同荷载组合下的位移、应力分布等详细信息,为变形分析提供有力支持。实验测试则可以通过现场监测和数据采集等手段获取基础结构的实际变形情况。例如,可以在基础周围布置测斜仪、沉降观测点等监测设备,定期测量基础的变形参数,并与数值模拟结果进行对比验证。通过实验测试,可以更加直观地了解基础的变形情况,并为后续的变形控制提供依据。在进行变形分析时,还需要

考虑基础与上部结构的相互作用。风力发电机组的塔架、叶片等上部结构对基础的变形也会产生影响。因此,在进行变形分析时,需要将上部结构的荷载和作用考虑在内,以确保分析结果的准确性。

2.3 倾覆分析

倾覆分析主要关注基础在水平荷载作用下的力矩平衡情况。在倾覆分析中,首先需要确定风力荷载的大小和方向。风力荷载是导致基础倾覆的主要原因之一,其大小和方向随风速、风向以及机组高度等因素而变化。为了准确评估基础的倾覆风险,需要获取准确的风力荷载参数。接下来,需要计算基础在水平荷载作用下的倾覆力矩和抗倾覆力矩。倾覆力矩是由风力荷载产生的使基础发生倾覆的力矩;而抗倾覆力矩则是由基础自重、土层摩阻力等因素产生的抵抗倾覆的力矩。通过比较倾覆力矩和抗倾覆力矩的大小,可以判断基础是否满足抗倾覆要求。对于高塔架、大功率风力发电机组来说,其倾覆风险更高^[2]。因此,在进行倾覆分析时,需要更加详细地考虑各种可能的影响因素。例如,需要考虑塔架的高度和刚度对倾覆力矩的影响;需要考虑基础形状和尺寸对抗倾覆力矩的影响等。此外,还需要结合实验测试等方法对倾覆分析结果进行验证。例如,可以通过现场动力触探等手段获取土层的抗剪强度参数,用于计算抗倾覆力矩;可以通过现场监测等手段获取基础的实际倾斜情况,用于验证倾覆分析的准确性。

2.4 疲劳分析

疲劳分析是评估大功率风电基础结构在循环荷载作用下的疲劳寿命的关键环节。在疲劳分析中,首先需要确定风力荷载的频谱特性。风力荷载的频谱特性反映了风力荷载随时间变化的规律,是疲劳分析的基础。通过获取风力荷载的频谱特性,可以了解风力荷载的周期、幅值以及频率分布等信息。接下来,需要考虑基础结构的材料性质对疲劳寿命的影响。不同材料的疲劳性能各不相同,因此需要根据实际使用的材料类型进行具体分析。例如,对于钢材等金属材料来说,需要考虑其屈服强度、抗拉强度以及疲劳极限等参数;对于混凝土等非金属材料来说,需要考虑其抗压强度、抗拉强度以及弹性模量等参数。此外,还需要考虑应力集中对疲劳寿命的影响。应力集中是导致结构疲劳损伤的主要原因之一。在基础结构中,可能存在一些应力集中区域,如焊缝、孔洞、拐角等。这些区域在循环荷载作用下容易产生应力集中现象,从而加速疲劳损伤的发生。因此,在进行疲劳分析时,需要特别关注这些应力集中区域,并采取相应的措施进行加强或优化。

3 大功率风电基础结构优化设计措施

3.1 优化塔架设计

塔架作为风力发电机组的支撑结构,其稳定性和承载能力直接关系到整个系统的安全运行。因此,优化塔架设计是提高基础结构稳定性的重要措施之一。在材料选择上,传统的钢材或混凝土材料虽然具有一定的强度和刚度,但重量较大,对基础的负荷也较大。为了降低塔架的重量和负荷,可以采用高强度、轻量化的材料,如碳纤维复合材料、钛合金等。这些材料具有优异的力学性能和耐腐蚀性,能够显著提高塔架的刚度和稳定性,同时减轻基础的负担。在几何结构优化方面,可以通过调整塔架的尺寸和形状来提高其抗风能力和承载能力。例如,采用变截面设计,根据风荷载的分布情况,在塔架的不同高度处设置不同的截面尺寸,以充分利用材料的性能。此外,还可以在塔架的关键部位增加加强筋,提高其局部刚度和强度,增强抵抗风荷载的能力。制造工艺和连接技术也是影响塔架整体性和可靠性的重要因素。在制造过程中,应采用先进的焊接、螺栓连接等技术,确保塔架各部件之间的紧密连接和良好传力。同时,还应严格控制制造过程中的质量和工艺要求,避免出现焊接缺陷、螺栓松动等问题,确保塔架的整体性和安全性。

3.2 改善地质条件

地质条件是影响基础结构承载能力的关键因素之一。在风力发电场的建设过程中,应充分考虑地质条件对基础结构的影响,并采取相应的措施来改善地质条件,提高基础的承载能力。注浆加固是一种常用的地基加固技术。通过向土层中注入水泥浆或其他固化材料,可以填充土层中的孔隙和裂缝,提高土层的强度和稳定性。这种技术适用于软土地基、砂土地基等地质条件较差的情况。在注浆加固过程中,应严格控制注浆压力、注浆量等参数,确保加固效果达到设计要求。桩基加固是另一种有效的地基加固技术。通过在土层中打入桩基础,将荷载传递给更深层次的土层或岩层,从而提高基础的承载能力。桩基础的选择应根据地质条件和荷载要求来确定,可以选择预制桩、灌注桩等不同类型的桩基础。在桩基加固过程中,应确保桩身的垂直度和打入深度满足设计要求,同时还应注意桩身与土层的摩擦力和端承力的充分发挥。除了注浆加固和桩基加固外,还可以采取排水措施来降低地下水位,改善土层的承载力^[3]。在软土地基上建设风电场时,由于土层中含有大量的水分,导致土层的承载力和稳定性较差。通过采用排水固结法等措施,可以降低地下水位,加速土层的固结过

程,提高土层的承载力和稳定性。在实际工程中,应根据具体的地质条件和工程要求,选择合适的改善地质条件的措施。同时,还应加强对地质条件的勘察和监测工作,及时发现并处理潜在的地质问题,确保基础结构的稳定性和安全性。

3.3 采用先进的基础类型

随着风力发电技术的不断进步和新材料、新工艺的不断发展,出现了许多新型的基础类型。这些新型基础类型具有更好的适应性和承载能力,能够满足不同地质条件和工程要求的需求。复合基础是一种结合浅基础和深基础优点的新型基础类型。它通常由多个部分组成,如扩展基础、桩基础等,可以根据具体的地质条件和荷载要求来进行组合和设计。复合基础能够充分利用土层的承载能力,提高基础的稳定性和安全性。单桩基础适用于水深较浅的海域或陆地风电场。它通过单根桩将荷载传递给土层或岩层,具有结构简单、施工方便等优点。在单桩基础的设计过程中,应充分考虑桩身的承载能力和稳定性要求,确保桩身能够满足设计要求。导管架基础则适用于水深较深的海域风电场。它由多个导管组成,通过导管将荷载传递给海底的土层或岩层。导管架基础具有较好的适应性和承载能力,能够适应复杂多变的海洋环境^[4]。除了上述基础类型外,还可以根据具体的工程条件和要求,探索更多创新的基础类型和优化设计方案。例如,在海上风电场中,可以采用漂浮式基础等新型基础类型来适应复杂多变的海洋环境。漂浮式基础通过浮力来支撑风力发电机组,具有较好的适应性和灵活性,能够降低对海底土层的要求。在选择基础类型时,应充分考虑地质条件、荷载要求、施工条件等因素,选择最适合的基础类型来确保基础结构的稳定性和安全性。

3.4 加强监测和维护

加强监测和维护是确保基础结构长期稳定运行的关键措施之一。通过安装传感器和监测系统,可以实时监测基础结构的变形、位移、应力等参数,及时发现并处

理潜在问题。在塔架和基础的关键部位应安装应变传感器、加速度传感器等监测设备。这些设备能够实时监测塔架和基础的受力情况和振动状态,为评估其稳定性和安全性提供重要数据支持。同时,还应定期对监测数据进行处理和分析,及时发现异常情况并采取相应的措施进行处理。除了实时监测外,定期对基础结构进行检查和维护也是确保其长期稳定运行的重要措施之一。检查内容应包括基础结构的外观、连接部位以及周边环境等情况。对于发现的隐患和故障问题,应及时进行处理和修复,避免其对基础结构的稳定性和安全性造成影响。此外,还应加强对基础结构的维护和管理。建立完善的维护管理制度和流程,明确维护责任人和维护周期等要求。同时,还应加强对维护人员的培训和管理,提高其维护技能和管理水平,确保基础结构的长期稳定运行。

结语

本文通过对大功率风电基础结构的稳定性分析方法进行优化设计措施的探讨,提出了提高基础结构稳定性的有效途径。在未来的研究中,可以进一步结合数值模拟和实验测试等方法,对基础结构的稳定性进行深入分析,并探索更多创新的基础类型和优化设计措施。同时,还需要加强对风电场运行数据的监测和分析工作,以获取更多关于基础结构稳定性和耐久性的实际数据支持。这将有助于推动风力发电行业的健康发展,并为实现可持续发展目标做出更大贡献。

参考文献

- [1]刘刚伟.山地风电基础土岩组合稳定性与施工技术研究[J].中国新技术新产品,2023,(07):86-88.
- [2]朱叶沁.山地风电风机基础土建施工与质量管理研究[J].工程技术研究,2024,9(16):145-147.
- [3]白久林,王瑞毅,王宇航,等.陆上风电装配式基础结构研究综述[J].土木与环境工程学报(中英文),2024,46(03):80-93.
- [4]邓友生,李卫超,王倩,等.风电机组基础结构形式及计算方法[J].科学技术与工程,2020,20(21):8429-8439.