

湍流强度高地区风力发电机组偏航系统优化研究

鲁鹏旗

国华（赤城）电有限公司 河北张家口 075500

【摘要】随着风能开发深度的持续拓展，高湍流强度区域已成为风电开发的重点领域，随之而来的风电机组运行稳定性问题日益突出，而风向波动特性与湍流强度的交互作用将对机组载荷产生显著影响，这将会使偏航控制系统与风能捕获效率具有更紧密的关联性，从而使风电机组运行变得更为复杂。本研究首先剖析了高湍流强度条件下风电机组偏航系统的动态特性、控制逻辑及其响应规律，然后介绍了湍流强度高环境下偏航系统的工作机制和控制方法，最后提出偏航控制策略优化方案。

【关键词】湍流强度；风电机组；偏航控制；优化策略

Optimization study on yaw system of wind turbines in areas with high turbulence intensity

Lu Pengqi

Guohua (Chicheng) Electric Co., Ltd. Zhangjiakou, Hebei 075500

【Abstract】 With the continuous expansion of wind energy development depth, high turbulence intensity areas have become a key area of wind power development, and the accompanying stability issues of wind turbine operation have become increasingly prominent. The interaction between wind direction fluctuation characteristics and turbulence intensity will have a significant impact on the load of the unit, which will make the yaw control system more closely related to wind energy capture efficiency, thereby making wind turbine operation more complex. This study first analyzed the dynamic characteristics, control logic, and response laws of the yaw system of wind turbines under high turbulence intensity conditions. Then, the working mechanism and control methods of the yaw system under high turbulence intensity environments were introduced. Finally, an optimized yaw control strategy was proposed.

【Key words】 turbulence intensity; Wind turbines; Yaw control; optimization strategy

引言

随着风电技术持续进步、风电场规模不断扩大，高湍流强度区域已进入大规模开发阶段，做好风电机组在复杂风况下的运行控制工作至关重要。风电机组的稳定运行，应以提升发电效率、降低机械疲劳载荷为目标，所有控制系统都应适应风况动态变化，确保安全可靠和高效运行。在高湍流强度环境下风电机组面临诸多挑战，与常规风况相比，其风向变化更为剧烈，对偏航系统提出了更高要求。偏航控制系统应该加强动态特性研究，分析湍流强度、风向突变和风切变对偏航控制的影响，优化控制参数，充分考虑风轮气动载荷和塔架振动特性及其相互作用，提升系统鲁棒性。然后，在风况预测、湍流识别和参数自整定等方面开展深入研究，对偏航系统从多维度进行优化设计，确定控制阈值，确保响应速度和控制精度均达到工程应用标准，从而建立以风速波动为基准，以风向变化率为依据，以载荷优化为目标、符合高湍流强度区域特性的偏航控制策略。

1 高湍流强度区域风况特征分析

高湍流强度环境下的风速波动是风电机组运行面临的主要挑战之一，或风资源不稳定性的直接体现。在湍流扰动影响下，风电机组将承受频繁的风速与风向变化，建立精确、可靠的风况预测模型，优化机组控制策略。因此，湍流强度评估，在风电机组设计与运行的全生命周期中，核心就是风况特性分析和载荷计算，亦即：①以湍流强度作为场址评估的关键指标；②把控制策略的重点从稳态风况转移到瞬态风况和极端风况上来；③以风速波动特性和风向变化率作为偏航系统优化设计的核心参数。在实际应用中，还需要考虑地形影响，并将其纳入风资源评估的范畴，尤其是复杂地形以及近海区域，需要全面评估地形效应、大气稳定度、风切变带来的影响，以此构建风况数据库和预测模型，保证数据可靠性，同时能够优化其控制策略^[1]。

随着风电技术的不断发展和应用，风电机组的运行效率和可靠性已备受关注，高湍流强度区域的风电开发必须实施针对性设计，采用适应性控制。在常规风况下，偏航系统运行相对平稳，可根据风向变化进行缓慢调整；但当遭遇高湍流强度时，要先识别湍流特征，再调整控制参数的响应，这不仅是控制系统的基本要求，更是安全运行和经济效益的保

障。可见,偏航系统的控制应结合风况实时变化,融合风速预测并动态调整。按照高湍流强度下风电机组运行特性的要求和挑战,风电机组控制系统的设计和优化,现在有着基于数据驱动的智能控制方法在实际应用中的探索。

2 风电机组偏航系统的基础理论

2.1 偏航系统的工作原理与组成

随着风能转换技术的不断进步,风电机组将更加智能化,成为电力系统的重要组成部分和具有高可靠性的能源转换装置。作为一个复杂的机电系统,其目标是在满足电网要求和环境约束的前提下,使风能转换效率最大化,为电网提供稳定可靠的电能。因此,偏航系统设计,例如风向传感器、偏航驱动、偏航制动和控制系统,以及机械结构和电气系统的集成或优化等,基本上由风电机组整体设计决定,以确保安全运行为前提,实现风能捕获效率和机械载荷之间的平衡、系统的可靠性以及运行经济性的最优化。从系统工程分析,对于偏航系统需要建立精确的数学模型,如运用流体力学及动力学仿真技术,能够通过数值模拟对风轮气动特性、结构动力学等进行分析,这样才能对控制系统进行优化设计,从而提高性能。作为控制系统更要合理地运用智能算法,以及先进的控制理论,保证风向跟踪和载荷抑制能够协调工作,促使系统性能提升,也能提升设备寿命。

2.2 偏航系统的规划与设计

但是,由于湍流强度的影响,风力发电面临的主要挑战:①对发电量的影响,即对年发电量的降低;②对机械载荷的影响,即湍流强度对机组结构的疲劳载荷;③对控制系统的影响;④对电网连接和电能质量的影响,即对电网稳定性和电能质量的影响。而且,在风电场规划中,将气象数据与地理信息以空间分析与优化设计。因此,在考虑其对发电量各方面影响的前提下,做好这些关键参数在高湍流强度环境下的优化设计。随着风电技术的发展,促使风电场规划得以优化,机组设计也在向智能化、精细化方向推进,风电场的规划应该构建科学决策体系,其中应该包括风资源评估、机组选型等,同时要合理地考虑地形效应、湍流特性等影响因素,对风电机组的布局进行优化及调整,以保证发电效率更高。另外,更要加强数据驱动、智能优化算法,形成科学的决策、系统的规划方法^[1]。

2.3 高湍流强度对偏航系统的影响分析

(1) 风向波动加剧。受到大气稳定度和地形特征的影响,湍流强度会不稳定增加,风向将向随机化发展,由于风向变化的快速性和不可预测性,风向传感器的测量也会波动,则控制系统也会面临更大的挑战。风向变化率和风向突变频率的增加,这是影响偏航性能、控制精度、系统稳定性

的关键。(2) 控制响应延迟。随着控制算法的复杂性,控制系统由传感器根据风向信号,控制指令的执行往往存在时间延迟,这对高湍流强度下的风向跟踪来说都是不利因素,给系统带来额外的载荷。(3) 频繁偏航动作带来的机械磨损,包括偏航驱动系统和偏航轴承的过度磨损等。在控制过程中,控制系统从平均风向出发,会增加不必要的偏航动作,导致轴承磨损加剧,系统也更容易失效。并且,随着风向变化频率增加,偏航动作的频率也将增加,甚至可能超过设计极限,这些都增加了系统失效的风险,原来的控制策略可能不再适用。可以采用智能控制策略,以便实现更精确的风向跟踪和更少的偏航动作。(4) 传感器精度下降。例如,由于湍流强度的增加导致风向传感器的测量精度是受限的。(5) 控制策略适应性问题。控制系统中有些参数存在固定的控制阈值,而湍流强度的变化往往是动态的、非线性的,这样就会对控制系统的适应性带来挑战。(6) 机械载荷增加。湍流强度的增加会给风电机组带来更大的机械载荷,而这往往是难以预测的。

3 高湍流强度区域偏航系统优化研究

3.1 偏航系统在高湍流环境下的挑战

随着湍流强度的增加,在风电机组运行时,将面临更加复杂的风况特征,最终在风速和风向的变化中表现突出,而风速和风向的快速变化则仍构成风电机组的主要挑战。复杂风况决定了风电机组将作为一个动态的、复杂的控制系统,风向跟踪和载荷控制的目标,向电网提供稳定、可靠和高质量的电能,并确保系统安全,以提高其可靠性和经济性的目标。在高湍流环境下,风电机组运行也发生改变,更需要精确控制,具备快速响应的能力与抗干扰特性,偏航系统运行期间,控制系统要确保风向跟踪精度,同时要满足动态载荷需求,如疲劳载荷、极限载荷等。另外,智能控制、先进传感等技术的快速发展,作为控制系统需要加强算法的适应性鲁棒性,这样才能提升系统性能。在控制中,传感器、控制器等关键部件的性能是系统优化的重中之重,这样更能够为风电机组提供可靠支持。偏航系统应综合考虑,对风向变化、风速波动、湍流特性、结构响应,以及电网需求、气象数据、历史运行记录和实时监测数据等参数综合分析,优化控制策略和参数设置。另外,还要关注湍流对机械部件及其疲劳寿命的影响,加强载荷监测和寿命预测等方面的优化研究^[1]。

3.2 偏航系统的优化措施

控制系统要优化控制策略,使风向跟踪精度和动作频率,相对于传统的控制策略来说更加优化。如何平衡风向跟踪精度和机械载荷的控制,是偏航系统优化的关键问题。

具体优化措施包括:(1)对风向传感器的精度和可靠性来说,需要高精度的传感器、先进的信号处理及智能的数据融合和滤波。(2)对控制系统来说,控制策略必然使风向跟踪精度提高并降低载荷,一旦风向变化,容易引起不必要的偏航动作,因此需要采取智能预测或基于模型的控制策略来优化系统的动态响应和载荷特性。由于风力发电系统的复杂性、动态性,因此在优化中还要考虑系统的稳定性。好的控制策略应能平衡风向跟踪精度和载荷抑制,并能适应不同湍流强度和风况,以提高系统的整体性能。(3)优化系统设计,针对机组湍流超标,考虑到机组安全性,需精准进行扇区管理。通过科学合理的扇区管理,深入分析每台机组所处的地理位置,充分考量地形地貌、风向风速变化等因素,因地制宜地为每台机组量身定制专属的扇区控制策略,有效分散机组受力降低机组疲劳载荷,提高机组各部件使用寿命,减少故障率及机组不必要的停机次数,同时能够在最佳状态下捕获风能,全方位提升机组运行性能,实现机组整体发电量的显著提升^[1]。(4)提高偏航系统的动态响应能力和可靠性,可以考虑对偏航装置进行升级。一是更换更大功率的偏航电机,以获得更大的扭矩和更快的响应速度来适应风向变化及频繁偏航的需求;二是增加偏航驱动的数量或者采用多驱动的方式,以减小单个部件所承受的负载,减少其损耗,并提高整个系统的可靠性。在以上硬件改进的基础上,采用合适的控制方法可以有效提高在阵风工况下的风向跟踪能力,并降低相关设备损耗,满足在强风区长时间工作的条件。

3.3 偏航系统优化的技术支持

随着控制理论的发展,偏航控制策略也将更加智能化,从而使控制的精确度提升为系统优化,其核心是从风况特征分析出发,从风电机组整体性能的角度,即风能捕获效率和机械载荷的平衡是其优化的核心目标。重点要关注下列的关键技术:

(1)智能控制算法。随着人工智能和控制理论的发展,使得控制策略方面更加先进,例如模型预测控制等,它们实现的是精确的风向跟踪。现在控制系统的要求越来越高,控制系统的智能化,控制系统越来越复杂,例如模型预测控制在风速预测、风向跟踪和载荷控制中的应用。智能控制算法

具有自适应性和鲁棒性。(2)基于湍流强度的分层控制。偏航控制是风电机组的关键,是提高效率的重中之重。目前,偏航控制系统在理论研究和工程应用方面都取得了进展,但高湍流强度下的控制仍面临挑战。为了优化控制系统,需要关注以下关键问题:确定控制策略的参数及湍流强度分级的阈值和方法;根据湍流强度动态调整控制参数;对控制策略进行仿真验证和现场测试;工程应用中对控制效果进行评估,控制策略的调整应基于实际数据^[2]。(3)风向预测技术。由于湍流强度一般导致风向快速变化,因此,当风向变化时,将增加预测的风向、风速和变化趋势,提高系统的前瞻性,这就要求控制系统的预测模块进行专门的设计。(4)多目标优化控制。例如,风向的跟踪会增加载荷,因此控制系统的设计时,还必须考虑对机械载荷的影响。另外,可以在传统的控制策略基础上引入智能算法和优化方法,例如深度学习引入了神经网络对风向变化趋势进行了预测,并得到了更精确的风向预测结果。为了能够让偏航控制系统有更高的性能,可以采用模型预测控制、模糊逻辑控制等,使得控制系统能够达到精确跟踪、减少动作等目的,这样能够提高其性能。对于控制策略的优化,还需要专门的测试验证,尤其要在实际风况上进行充分的测试。对于湍流强度,需要建立分级机制,如阈值设定等都整合到控制系统内,从而实现智能控制。

4 结语

风力发电和风电技术紧密相连,因此需要对风电机组的控制、优化及系统集成等方面深入研究,以适应复杂风况的发展需求。偏航控制系统的优化将推动风电技术发展,风电场的运行也需要智能化的管理,风电机组的风能捕获、载荷控制、效率提升、可靠性提高和寿命延长等都将受益,而且需要专业的技术支持。在风电技术下,风力发电已经实现了规模化,它更趋向于智能化的发展,风力发电能够实现高效稳定,更能促进可再生能源发展,同时能够优化运行性能。

参考文献

- [1]孙哲杰,白聪儿,陈斌,等.基于多体动力学的风电机组偏航系统载荷响应分析[J].机电工程,2024,41(11):1947-1957.
- [2]雷超,宋昭,魏湛栩.风力发电机组偏航液压制动系统研究[J].河南科技,2023,42(12):14-18.
- [3]尚志刚,马亮.风力发电机组偏航能量传导在滑动偏航系统中的应变研究[J].企业管理,2023,(S2):364-365.
- [4]王蔚源.湍流风环境下多风机阵列发电效率优化研究[D].湘潭大学,2024.
- [5]林保从.考虑湍流影响机理的风电机组一次调频控制研究[D].南京理工大学,2023.