

大型风电机组塔架主动阻尼控制技术研究

汪志伟

国投广西新能源发展有限公司 广西 南宁 530200

摘要: 本文深入探讨了大型风电机组塔架主动阻尼控制技术,详细阐述了其基本原理、控制策略、实现方案及阻尼器设计。通过理论分析和设计,提出在现有风电机组变桨控制环中新增塔架主动阻尼控制环的方法,旨在增加塔架前后一阶模态的阻尼,从而显著降低机舱和塔架的振动及载荷,提高风电机组的运行稳定性和寿命。

关键词: 风电机组; 塔架; 主动阻尼控制; 变桨控制; 载荷优化

引言

随着全球能源结构的转型和可再生能源的快速发展,风电机组作为清洁能源的重要组成部分,其技术水平和运行效率的提升成为行业关注的焦点。然而,风电机组在运行过程中,特别是在高风速和复杂风况下,塔架振动问题成为制约机组性能的关键因素。因此,研究塔架主动阻尼控制技术,对于提高风电机组的运行稳定性和延长机组寿命具有重要意义。

1 大型风电机组塔架主动阻尼控制基本原理

塔架主动阻尼控制技术是一种集成了高精度传感器技术、先进信号处理技术以及智能控制策略的综合动态控制方案,其核心目标是实时监测并有效抑制塔架结构在风力作用下的振动^[1]。该技术通过精确捕捉塔架顶部前后的加速度变化,动态调整控制参数,以增强塔架一阶模态的阻尼效应,从而达到减振目的。

1.1 高精度传感器技术的应用

为了精确获取塔架顶部的加速度数据,系统采用具有高分辨率、低噪声特性的加速度传感器,如压电式或MEMS(微机电系统)加速度传感器。这些传感器需具备出色的环境适应性,能在极端温度、湿度及电磁干扰条件下稳定工作,确保数据采集的准确性和可靠性。通过合理布置传感器位置,可以实现对塔架振动状态的全面监测,为后续的信号处理和控制提供坚实基础。

1.2 信号处理的深度优化

采集到的原始加速度信号往往混有环境噪声、设备自身噪声等干扰因素,因此需进行严格的信号处理以提取真实振动信息。这包括使用数字滤波技术(如FIR或IIR滤波器)进行频域筛选,去除高频噪声和低频漂移;采用自适应滤波或卡尔曼滤波等高级算法,在动态变化的环境中实时估计并抑制噪声,提高信号的信噪比。此外,还可能需要应用时频分析、小波变换等方法,以更精细地解析信号的局部特征,为控制策略的制定提供准

确依据。

1.3 先进控制算法的实施

基于处理后的高质量加速度信号,系统采用一系列先进的控制算法来实现主动阻尼控制。虽然PID(比例-积分-微分)控制因其简单实用而广泛应用,但在面对塔架振动这种非线性、时变系统时,其控制效果可能受限。因此,研究引入了更为复杂的控制策略,如LQG(线性二次高斯)控制,它结合了状态估计与最优控制理论,能在存在不确定性的情况下实现最优控制;或者模型预测控制(MPC),通过预测未来系统状态并优化当前控制输入,实现对塔架振动的精准预测与抑制。此外,自适应控制、模糊逻辑控制以及神经网络控制等智能算法也被探索应用,以适应不同风况和塔架动态特性的变化,进一步提升控制系统的鲁棒性和控制精度。

2 大型风电机组塔架主动控制技术的控制规律及实现方案

塔架主动控制技术的控制规律主要包括控制目标、控制策略和控制参数三个方面。

2.1 控制目标

塔架主动控制技术的首要目标是显著减弱机舱与塔架在前后方向上的振动幅度,从而降低塔架所承受的动态载荷,确保风电机组能够在更加稳定的状态下运行,并有效延长其使用寿命。具体而言,该技术旨在通过增强塔架前后一阶模态的阻尼特性,来大幅削减风载荷引起的塔架振动响应,进而减轻塔架结构的疲劳累积损伤,保障机组长期安全运行。

2.2 控制策略的实现

为了精确且高效地实现减轻塔架振动的目标,本研究在现有风电机组变桨控制系统的基础上,创新性地设计并融入了一个塔架主动阻尼控制环路。此策略以实时、高精度的塔架顶部加速度监测为核心,结合先进的信号处理技术和智能控制算法,动态调整并施加阻尼

力,从而显著增强塔架在前后方向上的一阶模态阻尼。以下是该策略各个关键环节的详尽阐述:

2.2.1 加速度信号的全面且精确采集

传感器选择与配置: 选用具有高灵敏度、低噪声、宽动态范围且能抵御恶劣环境(如极端温度、湿度、电磁干扰)的加速度传感器,如高性能压电式加速度传感器或MEMS加速度传感器^[2]。根据塔架的结构特点和振动模式,优化传感器的安装位置和数量,确保能够全面捕捉塔架在不同风向和风速下的振动信息,同时避免传感器之间的相互干扰。

采样率与分辨率设定: 根据塔架振动的频率特性和控制需求,合理设定传感器的采样率和分辨率,以确保能够准确记录振动信号的细微变化,同时避免数据冗余和处理负担。

2.2.2 信号的深度处理与精准特征提取

预处理阶段: 对原始加速度信号进行初步去噪,如通过简单的低通或带通滤波去除高频噪声和低频漂移。进行数据校准和归一化处理,以消除传感器自身的偏差和漂移,确保数据的准确性和一致性。

高级信号处理: 应用卡尔曼滤波或自适应滤波等高级算法,进一步抑制噪声和干扰,提高信号的信噪比。利用时频分析(如短时傅里叶变换、小波变换)或模态分析等方法,从处理后的信号中提取出塔架振动的关键特征,如主频、振幅、相位等。

2.2.3 控制算法的智能计算与优化

算法选择与定制: 根据塔架振动的非线性、时变和不确定性特点,选用或开发自适应PID控制、模型预测控制(MPC)、滑模控制或神经网络控制等高级算法。考虑算法的实时性、稳定性和鲁棒性,确保在复杂风况下仍能实现有效的振动抑制。

阻尼力计算与优化: 基于提取的振动特征和选定的控制算法,实时计算出所需施加的阻尼力大小和方向。通过迭代优化或机器学习等方法,不断调整控制参数(如PID控制器的比例、积分、微分系数),以实现更精准的控制效果。考虑塔架振动与风速、风向、机组运行状态等因素的关联,设计自适应或前馈控制策略,进一步提高控制精度和响应速度。

2.2.4 阻尼力的精确施加与反馈调整

执行机构设计与选型: 选用响应速度快、控制精度高、稳定性好的电磁式阻尼器、液压阻尼器或电动推杆等作为执行机构。考虑执行机构的安装位置、作用力和行程范围,确保能够准确、快速地根据控制指令施加阻尼力。

力反馈与闭环控制: 在执行机构中集成力传感器或位移传感器,实时监测实际施加的阻尼力或位移。将实际值与期望值进行比对,形成闭环控制回路,通过调整控制信号或执行机构的输出,不断微调阻尼力的大小和方向,以实现更精细的振动抑制效果。设计故障检测和诊断机制,及时发现并处理执行机构的故障或异常,确保控制系统的可靠性和安全性。

2.3 控制参数的精细优化与确定

在塔架主动阻尼控制系统中,控制参数的精确选择是确保控制效果达到最优的关键环节。特别是当采用PID控制器时,比例系数(K_p)、积分系数(K_i)和微分系数(K_d)的设定直接决定了控制器对塔架振动响应的敏感度和调节能力。以下是对这些控制参数选取和优化的详细阐述:

2.3.1 参数初选与理论分析

比例系数(K_p): 决定了控制器对误差信号的即时响应速度。较大的 K_p 值可以迅速减小误差,但可能导致系统震荡或不稳定。初选时,需根据塔架振动的幅值和频率特性,以及期望的响应速度来设定一个合理的范围。

积分系数(K_i): 用于消除系统的静态误差,通过累积误差信号来调整控制量。较大的 K_i 值有助于消除长期误差,但可能降低系统的响应速度并增加超调量。初选时,需考虑塔架振动中的低频成分以及期望的控制精度。

微分系数(K_d): 能够预测误差信号的变化趋势,提前进行调整,从而改善系统的动态性能。较大的 K_d 值可以提高系统的响应速度和稳定性,但也可能增加系统对噪声的敏感性。初选时,需关注塔架振动中的高频成分以及期望的系统稳定性。

2.3.2 仿真模拟与参数调整

利用MATLAB/Simulink等仿真软件,建立塔架主动阻尼控制系统的数学模型,包括塔架的动力学模型、PID控制器模型以及执行机构模型等。在仿真环境中,对 K_p 、 K_i 、 K_d 进行参数扫描,观察不同参数组合下系统的响应特性,如振动抑制效果、系统稳定性、响应速度等。通过对比分析,初步确定一组较优的参数组合。对选定的参数组合进行敏感性分析,评估参数变化对系统性能的影响程度,以确保参数选择的鲁棒性。

2.3.3 实验验证与最终确定

在真实的风电机组或模拟实验台上搭建塔架主动阻尼控制系统,安装加速度传感器、执行机构等硬件设备,并配置相应的数据采集和控制系统。基于仿真结果,在实验平台上进行参数微调,观察并记录系统的实际响应数据,如振动幅值、相位延迟、系统稳定性等。

根据实验数据,对控制效果进行全面评估,包括振动抑制效率、系统鲁棒性、能耗等^[3]。通过反复实验和调整,最终确定一组最优的控制参数组合,以实现最佳的控制效果。

3 大型风电机组塔架主动阻尼器的设计

塔架主动阻尼器的设计是实施塔架主动控制技术的核心要素,其性能直接关系到振动抑制的效果和系统的稳定性。本研究提出的塔架主动阻尼器设计,涵盖了结构优化、阻尼力高效生成以及智能控制算法三大核心部分:

3.1 阻尼器结构的优化设计

阻尼器结构需兼具高强度、高阻尼特性与轻量化设计,以确保在承受塔架振动载荷的同时,便于安装、调试及长期维护。本研究设计的阻尼器采用了模块化、可调节的结构设计:阻尼器壳体采用高强度、耐腐蚀的轻质材料(如铝合金或复合材料),通过精密加工确保结构的刚性和密封性。根据工作环境和性能需求,选用高性能的油液或特殊气体作为阻尼介质,以提供稳定的阻尼效果。设计有精密的调节机构,如可变节流孔、可调弹簧等,允许根据塔架振动特性和风况条件,灵活调整阻尼力的大小和响应速度。

3.2 电磁式阻尼力高效生成机制

电磁式阻尼力产生机制是阻尼器的核心创新点,它利用电磁原理实现阻尼力的精确、快速调节:采用高性能电磁铁,其线圈匝数、磁极布置等参数经过优化设计,以确保在较宽的电流范围内都能产生稳定、可调的电磁力。电磁铁通电后,与阻尼介质(如油液)中的磁性颗粒或导电液体产生相互作用,通过改变电流大小,即可精确控制电磁铁与阻尼介质间的相互作用力,进而调节阻尼力的大小^[4]。电磁式机制具有响应速度快(毫秒级)、控制精度高的特点,能够满足塔架主动阻尼控制对实时性和准确性的高要求。

3.3 智能控制算法的应用与优化

控制算法是阻尼器实现智能化、自适应控制的关键:一是基础PID控制:采用经典PID控制算法,通过

实时监测塔架顶部加速度信号,计算并调节电磁铁的电流,以实现阻尼力的精确控制。PID算法的参数(比例、积分、微分系数)根据仿真和实验数据进行优化,以确保最佳的控制效果。二是先进控制策略融合:为了进一步提升控制效果,本研究考虑将自适应控制、模糊控制或神经网络控制等先进算法与PID算法相结合。自适应控制能够根据风况和塔架振动特性的变化自动调整控制参数;模糊控制能够处理不确定性和非线性问题;神经网络控制则能够学习并优化控制策略,以适应更复杂、多变的工况。三是算法实现与验证:通过编程实现控制算法,并在仿真平台和实际风电机组上进行验证。通过对比分析不同算法下的控制效果,如振动抑制率、系统稳定性、能耗等,最终确定最优的控制策略。

结语

本文研究了一种大型风电机组塔架主动阻尼控制技术,通过理论分析和设计,提出了在现有风电机组变桨控制环中新增塔架主动阻尼控制环的方法。该技术通过实时检测塔架顶部前后加速度信号,动态调整阻尼力,有效抑制了塔架振动,降低了塔架载荷,提高了风电机组的运行稳定性和寿命。未来,将进一步优化控制算法和阻尼器结构,提高控制精度和稳定性;同时,探索将塔架主动阻尼控制技术与其他先进控制技术相结合,如独立变桨控制、载荷优化控制等,以实现风电机组性能的综合提升。

参考文献

- [1] 应有,朱重喜,杨帆,等.大型风电机组塔架主动阻尼控制技术研究[J].太阳能学报,2015,36(01):54-60.
- [2] 刘颖明,张书源,王晓东.基于塔架主动阻尼控制的风电机组变速控制参数优化策略研究[J].太阳能学报,2023,44(10):296-305.
- [3] 郝二通,李祎,胡玉龙.风电机组混合塔架结构阻尼比的研究[J].可再生能源,2018,36(11):1704-1710.
- [4] 宋磊建,路绪恒,曹广启.基于实测数据的风电机组塔架阻尼研究[J].风能,2020,(04):80-83.