

# 风力发电控制技术

于吉祥

辽宁龙源新能源发展有限公司 辽宁 沈阳 110000

**摘要:** 本文围绕风力发电控制技术展开论述,介绍了风力发电系统构成与发电原理,阐述了功率控制、变桨距控制、并网控制等核心控制技术,还提及偏航控制与塔架振动控制等其他关键技术,并分析了智能化发展、多技术融合等风力发电控制技术的发展趋势,为风力发电技术进步与优化提供理论参考。

**关键词:** 风力发电;控制技术;变桨距控制;并网控制;智能化发展

引言:在全球能源转型与环保需求背景下,风力发电作为清洁能源代表,发展迅猛。风力发电控制技术是保障机组高效稳定运行的关键,其涵盖功率控制、变桨距控制等多方面内容。深入研究风力发电控制技术,掌握其系统构成、原理与核心控制方法,并把握智能化及多技术融合发展趋势,对提升风力发电效率、可靠性与经济性意义重大。

## 1 风力发电系统构成与原理

### 1.1 系统构成

风力发电机组机械结构由多个关键组件协同工作。风轮作为首要部件,其叶片依照空气动力学设计,独特的曲面造型使得气流流经时,叶片上下表面产生压力差,形成驱动风轮转动的动力。传动系统是连接风轮与发电机的桥梁,其中低速轴直接与风轮相连,承接风轮的转动动力。因风轮转速较低,齿轮箱发挥作用,将低速轴的转速提升,再通过高速轴传递给发电机,满足发电所需的转速条件。机舱安装在塔架顶部,充当重要设备的保护外壳与支撑平台。机舱内部空间紧凑,容纳传动系统、发电机、控制系统等核心设备,为其运行提供稳定环境。塔架作为支撑主体,采用高强度材料建造,具备稳固的结构。塔架将机舱与风轮抬升至一定高度,使风轮能够获取更优质、稳定的风力资源,高度优势减少了地面障碍物对气流的干扰。电气设备方面,发电机是实现能量转化的关键装置。不同类型的发电机,如双馈异步发电机、永磁同步发电机,虽构造和运行方式存在差异,但都遵循电磁感应原理,将机械能转化为电能。变流器在电能传输中扮演重要角色,其根据电网的电压、频率等参数要求,对发电机输出的电能进行调节和转换,保证电能质量符合并网标准<sup>[1]</sup>。控制系统依靠各类传感器实时监测风力发电机组的运行状态,收集风速、风向、转速等数据。依据预设程序,控制系统对风轮角度进行调整,确保风轮始终以最佳姿态捕获风能,

并对发电机的运行参数进行控制,维持系统稳定运行。

### 1.2 发电原理

风能转化为机械能始于风轮。风吹拂叶片时,空气在叶片表面的流动差异产生升力,推动风轮绕轴旋转,完成能量的初步转换。风轮转动带动低速轴运转,低速轴将动力传递至齿轮箱,齿轮箱经过多级齿轮传动,把转速提升后经高速轴传递给发电机。在发电机内部,转子在高速轴驱动下旋转,转子上的永磁体或励磁线圈产生磁场。随着转子转动,磁场不断切割定子绕组,根据电磁感应定律,在定子绕组中产生感应电动势,进而形成电流,机械能由此转化为电能。但此时发电机输出的电能,其频率、电压等参数可能与电网要求不符。发电机输出的电能先流入变流器,变流器内的整流电路先将交流电转换为直流电,随后逆变电路再把直流电转换回交流电。在这一过程中,变流器依据电网的实时需求,对电能的频率、电压幅值和相位进行精准调节,使电能的各项参数与电网一致。经过变流器处理后的电能,最终通过输电线路输送至电网,实现从风能捕获到电能供应的全过程。

## 2 风力发电核心控制技术

### 2.1 功率控制技术

#### 2.1.1 最大功率点跟踪控制

风力发电系统运行中,最大功率点跟踪控制旨在使机组在不同风速工况下最大限度捕获风能。风资源具有不确定性,风速时刻变化,这就要求控制系统具备动态调节能力。叶尖速比法实现最大功率捕获,基于风轮叶尖线速度与风速比值和功率的关系。当风速改变时,控制系统依据预先设定的叶尖速比与功率曲线,调节发电机转速,改变风轮叶尖线速度,使叶尖速比维持在对应风速下的最优值,确保风轮处于最佳气动性能状态,从而捕获最大风能。该方法原理直观,通过对风轮转速的精确控制,实现风能高效利用。功率信号反馈法通过监

测发电机输出功率变化,判断当前运行点与最大功率点的位置关系。若功率呈上升趋势,表明当前运行点在最大功率点左侧,控制系统增大发电机电磁转矩,降低风轮转速;若功率呈下降趋势,则减小电磁转矩,提高风轮转速。如此反复调节,直至功率达到最大值,实现最大功率点跟踪。这种方法直接以功率为反馈信号,实时调整系统运行状态,适应风速变化。

### 2.1.2 功率调节控制

高风速时,为保障机组安全稳定运行并维持功率输出在额定值附近,需进行功率调节。调整桨距角是常用手段之一。变桨距系统在接收到控制指令后,伺服电机驱动传动机构,改变叶片与风轮旋转平面夹角。桨距角增大,叶片对风的阻挡作用增强,风轮捕获的风能减少,从而降低发电机输入功率。通过精确控制桨距角变化速率与幅度,可实现对功率的有效调节。控制发电机电磁转矩也能实现功率调节<sup>[2]</sup>。当风速过高,发电机转速有超出额定值趋势时,控制系统增大电磁转矩,使发电机转子转速降低,限制输入功率。反之,风速降低导致转速下降时,减小电磁转矩,保证发电机稳定运行。这种方式通过调节发电机电气参数,实现对机械功率的间接控制,与桨距角调节相互配合,确保机组在高风速下稳定运行。

## 2.2 变桨距控制技术

### 2.2.1 系统结构与工作流程

变桨距系统主要由伺服电机、传动机构、传感器和控制器组成。伺服电机作为动力源,依据控制器指令提供驱动力矩。传动机构将伺服电机的旋转运动转化为叶片桨距角的变化,常见的传动方式有齿轮传动、丝杠传动等。传感器实时监测叶片桨距角、风速、发电机转速等参数,并将数据反馈给控制器。工作流程中,控制器先接收传感器采集的各类数据,依据预先设定的控制算法和逻辑,判断当前工况。若风速低于额定风速,为提高风能捕获效率,控制器发出指令使伺服电机驱动传动机构,减小桨距角,让叶片更充分接受风力;当风速高于额定风速,为限制功率输出,控制器控制伺服电机增大桨距角,降低风轮捕获的风能。整个过程通过闭环控制,实现对叶片桨距角的精确调节。

### 2.2.2 控制策略分析

定桨距控制策略下,叶片桨距角固定不变,依靠叶片自身气动特性调节功率。低风速时,叶片能较好捕获风能;但风速过高,无法有效限制功率,机组易过载。这种策略结构简单、成本低,适用于小型风力发电机组或特定工况。电动变桨距控制采用电机驱动,通过

丝杆、齿轮等传动部件实现桨距角调节。具有响应速度快、控制精度高、维护方便等优点,可根据不同风速和工况精确调节桨距角,广泛应用于大中型风力发电机组。液压变桨距控制利用液压系统提供动力,具有输出力矩大、抗干扰能力强特点。在恶劣环境下能稳定工作,可快速响应大功率调节需求,但系统结构复杂,维护成本较高,常用于大型海上风力发电机组。

## 2.3 并网控制技术

### 2.3.1 并网条件与影响

风力发电机组并网需满足严格条件,这是保障电网安全稳定运行的关键。在电压幅值方面,机组输出电压必须与电网电压幅值精准匹配<sup>[3]</sup>。若二者偏差过大,在并网瞬间会产生巨大的冲击电流,这种冲击电流极有可能损坏机组内部的电气元件以及电网的相关设备,造成严重的经济损失。频率也需与电网频率严格一致,频率的不一致会导致有功功率和无功功率出现失衡现象,进而影响整个电网的稳定性,可能引发局部或大面积的停电事故。相位同样需要同步,若相位不同步,并网瞬间会产生较大的环流,对电网和机组造成不可逆的损害。风力发电具有间歇性和波动性,并网后会对电网稳定性产生显著影响,风速变化导致机组功率波动时,会引起电网电压和频率波动,大量机组集中并网若控制不当,可能引发电网振荡,威胁电网安全运行。

### 2.3.2 控制方法介绍

矢量控制技术基于坐标变换,将三相交流电流分解为相互独立的励磁电流和转矩电流分量分别控制。通过精确调节这两个分量,实现对发电机电磁转矩和无功功率的独立控制,使机组输出电流与电网电压同频同相,满足并网要求。该技术能快速响应电网变化,提高并网稳定性和电能质量。直接功率控制则直接以发电机输出的有功功率和无功功率为控制目标。通过检测电网电压和机组输出电流,计算有功功率和无功功率实际值,与给定值比较后,经控制器直接生成变流器开关控制信号,调节变流器输出,实现有功功率和无功功率快速跟踪,保证机组平滑并网与稳定运行。

## 2.4 其他关键控制技术

### 2.4.1 偏航控制技术

偏航控制系统作用是使风轮始终对准风向,提高风能捕获效率。风向变化时,风向标检测风向角度,将信号传递给控制器。控制器根据风向与风轮当前方位偏差,判断偏航方向和角度,驱动偏航电机带动偏航齿轮转动,调整机舱和风轮方位。偏航过程中,为避免过度频繁动作,设置死区范围,当风向偏差在一定范围内

时,不触发偏航动作,保证系统稳定性。

#### 2.4.2 塔架振动控制技术

塔架振动由多种因素引起。风的湍流特性使风轮受力不均,产生周期性激励,引发塔架振动;机组运行中不平衡力、齿轮传动振动等也会传递至塔架。主动控制通过在塔架上安装执行机构,如同服电机、液压作动器等。传感器实时监测塔架振动状态,将数据反馈给控制器。控制器依据振动信号分析结果,发出控制指令,驱动执行机构产生与振动方向相反的作用力,抵消振动能量,减小塔架振动幅度。被动控制则采用安装阻尼器方式,如调谐质量阻尼器、粘弹性阻尼器等,通过阻尼器吸收振动能量,降低塔架振动响应,保障机组安全稳定运行。

### 3 风力发电控制技术的发展趋势

#### 3.1 智能化发展方向

随着科技发展,智能化成为风力发电控制技术重要走向。人工智能、机器学习等技术在其中的应用不断深入,为风力发电带来变革。在功率预测方面,机器学习算法通过对历史风速、风向、功率数据的学习,构建精准预测模型。分析大量复杂数据,挖掘数据内在规律,对未来功率输出进行预测。这些预测结果为风力发电系统的控制策略制定提供依据,使系统提前调整运行参数,优化发电效率。如在风速变化前,依据预测结果调整桨距角,使风轮更好捕获风能,减少功率波动,提升发电稳定性。在控制策略优化领域,人工智能技术发挥关键作用。通过模拟人类决策过程,智能控制系统根据实时工况和预测信息,自动调整控制参数。复杂多变的风力环境中,传统固定控制策略难以适应,智能控制系统能实时感知环境变化,快速做出响应,选择最优控制策略<sup>[4]</sup>。依据不同风速条件,自动切换最大功率点跟踪控制策略,提高风能利用效率。智能故障诊断也是智能化发展的重要体现。利用人工智能算法对传感器采集的设备运行数据进行分析,能及时发现问题潜在故障。分析发电机温度、振动等数据,判断设备是否存在异常,提前预警故障,便于工作人员及时采取措施,降低设备故障率,保障风力发电系统可靠运行。

#### 3.2 多技术融合趋势

控制技术与通信技术、传感技术的深度融合,正在深刻改变风力发电系统的运行方式。先进通信技术为风

力发电机组与远程监控中心之间建立了高效稳定的数据传输通道。遍布于机组各个关键部位的传感器,能够实时采集风速、温度、振动等多类运行参数。这些数据通过通信网络快速传送至监控中心,使远在千里之外的工作人员也能清晰掌握机组的运行情况。一旦发现异常状况,相关人员可以迅速做出响应,及时采取措施,避免问题扩大。传感技术的发展显著提升了数据采集的精度和完整性。高灵敏度传感器能够捕捉设备微小的状态变化,为后续分析提供详实而可靠的信息基础。控制系统结合这些高质量数据,利用先进的故障诊断算法,可以深入识别设备潜在的问题及其具体位置。这种技术协同还推动了预测性维护的实现。通过对设备长期运行数据的持续监测与分析,可较为准确地判断关键部件的磨损程度和剩余使用寿命,从而提前安排维护工作。这种方式有效减少了非计划停机时间,也降低了整体运维成本。随着多种技术的不断融合,风电场逐步实现了集群化运行管理。根据区域内的风能分布特征,系统可对各台风电机组的运行状态进行协调优化,进一步提升整个风电场的发电效率和运行稳定性。这种智能化、网络化的运行模式,为风力发电的高效、可靠发展提供了有力支撑。

#### 结束语

风力发电控制技术在不断提升系统效率与稳定性的同时,也加快了能源结构优化的步伐。从基本的功率调节到复杂的并网控制,再到智能化与多技术融合的发展趋势,各项技术逐步完善并形成体系。未来,随着人工智能、大数据、物联网等技术的深入应用,风力发电控制系统将更加精准、灵活。这些进步不仅提高了设备利用率,也为风力发电的大规模应用提供了坚实基础。

#### 参考文献

- [1]冯尔璋.电气控制技术在风力发电设备中的应用研究[J].造纸装备及材料,2025,54(02):112-114.
- [2]伍卫华,高飞,巴恩,吴晓演.电气控制技术在风力发电系统中的应用[J].科技资讯,2024,22(06):80-82.
- [3]林涛.风力发电并网技术与电能质量控制要点探讨[J].产业与科技论坛,2021,20(05):33-34.
- [4]王晨龙.电力工业中新能源发电风力发电技术的研究[J].现代工业经济和信息化,2024,14(09):258-260.