

新能源风力发电中的控制技术研究

冯少帅

榆林国远风电有限公司 陕西 榆林 719000

摘要：本文深入探讨了新能源风力发电中的关键技术，包括风力发电系统的基本构成与控制需求，各组成部分的作用与关系，以及核心控制技术如风速测量与风能捕获控制、变桨距控制技术、变频调速控制技术和并网控制技术。通过实际案例分析，展示了这些控制技术在提高发电效率、保障系统安全和稳定并网方面的应用效果。同时，文章还分析了当前风力发电控制技术面临的挑战，并展望了智能化控制、模块化与标准化、高可靠性与容错控制、协同控制与电网互动以及轻量化与节能化等未来发展趋势。

关键词：新能源；风力发电；控制技术

引言：随着全球能源需求的不断增长和环境问题的日益严峻，新能源的开发利用成为迫切需求。风力发电作为新能源的重要组成部分，具有清洁、可再生、分布广泛等优势。然而，风力发电系统的复杂性和风能的不确定性给控制技术带来了巨大挑战。因此，研究风力发电中的控制技术，对于提高发电效率、保障系统稳定运行具有重要意义。

1 风力发电系统构成及控制需求

1.1 风力发电系统基本构成

风力发电系统主要由风轮、传动系统、发电机、控制系统、储能系统及并网设备等组成。风轮是捕获风能的关键部件，由叶片和轮毂组成，其将风能转化为机械能；传动系统包括主轴、齿轮箱等，用于将风轮的低速旋转运动传递给发电机并增速；发电机将机械能转化为电能，常见的有异步发电机、同步发电机等；控制系统是整个系统的核心，负责监测系统运行状态、调节风轮转速和桨距角、控制发电机输出等；储能系统用于存储多余电能，以应对风能波动导致的供电不稳定；并网设备则将发电机输出的电能转换为符合电网标准的电能并接入电网。

1.2 风力发电系统控制需求

风力发电系统的控制需求主要体现在以下几个方面：一是最大化风能捕获，通过优化控制策略使风轮始终工作在最佳叶尖速比附近，提高风能利用系数；二是保障系统安全稳定运行，在风速过高或过低、电网故障等情况下，及时采取保护措施，避免机组损坏；三是提高电能质量，控制发电机输出电压、频率稳定，减少谐波污染，满足电网并网要求；四是实现系统的协调控制，使风轮、传动系统、发电机等各部件之间协同工作，提高系统整体效率和可靠性^[1]。

2 风力发电系统各组成部分在发电过程中的作用与关系

2.1 齿轮箱提升发电机转速

齿轮箱是风力发电系统中的关键组件之一，其主要功能是提升发电机转速，以适应不同风速条件下风轮产生的旋转动力。风车的叶片在风的驱动下旋转，但由于风速和风能的限制，直接驱动发电机通常无法达到理想的发电效率。因此，齿轮箱通过一系列齿轮的精密啮合，将风轮的低速旋转转换为发电机所需的高速旋转。齿轮箱的设计不仅要考虑传动效率，还要兼顾可靠性、耐久性和维护便捷性。高效的齿轮箱传动能够最大限度地减少能量损失，提高整个系统的发电效率。此外，齿轮箱还具有一定的扭矩调节功能，能够在风速波动时保持发电机的稳定运行；齿轮箱的性能直接影响发电机的输出功率和系统的整体性能。因此，在风力发电系统的设计和维护中，齿轮箱的选择和状态监测至关重要。定期检查和更换磨损的齿轮，以及保持润滑系统的良好状态，都是确保齿轮箱长期稳定运行的关键措施。

2.2 偏航系统调整风轮扫掠面

偏航系统是风力发电系统中负责调整风轮方向的重要组件。它的主要任务是根据风向的变化，自动或手动调整风轮的扫掠面，使其始终面向来风方向，从而最大化捕获风能。偏航系统通常由偏航电机、偏航轴承、传感器和控制器等组成。传感器实时检测风向，并将数据传递给控制器。控制器根据风向信息，计算出偏航角度，并通过驱动偏航电机来转动风轮。偏航轴承则承受风轮和机舱的重量，并在偏航过程中保持稳定的转动；偏航系统的准确性和可靠性对于提高风力发电系统的发电效率至关重要。精确的偏航调整可以确保风轮始终处于最佳迎风角度，从而最大化捕获风能。另外，偏航系

统还需要具备一定的抗风和自锁能力，以确保在极端天气条件下风轮的稳定性和安全性^[2]。

2.3 刹车系统与液压系统在停机时的配合运行

刹车系统和液压系统是风力发电系统中确保安全停机的重要组件。当需要停机时，刹车系统通过摩擦或液压方式将风轮的旋转动能迅速转换为热能，从而实现快速制动。而液压系统则为刹车系统提供必要的动力和控制信号。刹车系统通常包括机械刹车和气动刹车两种类型，机械刹车通过刹车盘和刹车片的摩擦来减速和停止风轮旋转。气动刹车则利用空气阻力来降低风轮速度。在停机过程中，液压系统为刹车系统提供稳定的压力和控制信号，确保刹车动作的迅速和准确；刹车系统和液压系统的协同工作对于风力发电系统的安全性至关重要。在紧急情况下，如风速过高或系统故障时，刹车系统必须能够迅速响应并制动风轮，以防止设备损坏或人员伤亡。同时，液压系统的可靠性和稳定性也是确保刹车系统正常运行的关键因素。

3 新能源风力发电核心控制技术

3.1 风速测量与风能捕获控制

风速测量是实现风能高效捕获的基础，常用的风速测量设备有杯式风速计、超声风速仪等。杯式风速计结构简单、成本低，但测量精度受安装位置和环境影响较大；超声风速仪测量精度高、响应速度快，能够测量三维风速，但成本较高。风能捕获控制的核心是通过调节风轮转速，使风轮的叶尖速比保持在最佳值，从而最大化风能利用系数。在低风速段，采用最大风能追踪（MPPT）控制策略，通过控制发电机的电磁转矩来调节风轮转速，实现最大功率输出。常用的MPPT算法有爬山法、扰动观察法、功率曲线法等。爬山法通过不断调整风速指令，寻找功率最大点，算法简单但动态响应较慢；扰动观察法通过对风速进行小幅度扰动，根据功率变化方向调整风速，响应速度较快但可能出现震荡；功率曲线法根据预先设定的功率-转速曲线进行控制，精度较高但对曲线的准确性要求较高。

3.2 变桨距控制技术

变桨距控制是通过调节叶片的桨距角来改变风轮的捕获风能能力，适用于中高风速段。当风速超过额定风速时，增大桨距角，减小风轮吸收的风能，使发电机输出功率稳定在额定值附近，避免机组过载损坏。变桨距控制系统由传感器、控制器、执行机构等组成。传感器用于测量风速、风轮转速、发电机功率等参数；控制器根据测量参数和预设的控制策略，计算出目标桨距角；执行机构通常采用液压或电动驱动方式，驱动叶片旋转

以达到目标桨距角。变桨距控制策略主要有PID控制、模糊控制、自适应控制等。PID控制算法简单、可靠性高，在实际工程中应用广泛，但在系统参数变化或存在非线性干扰时控制效果不佳；模糊控制不依赖系统精确数学模型，对非线性和不确定性系统具有较强的适应性，但控制精度受模糊规则和隶属度函数设计影响较大；自适应控制能够根据系统运行状态自动调整控制参数，适应系统参数变化和外部干扰，控制效果较好但算法复杂。

3.3 变频调速控制技术

风力发电系统中，由于风速变化范围大，风轮转速随之变化，导致发电机输出频率不稳定，需要通过变频调速技术将不稳定的频率转换为恒定频率，以满足并网要求。变频调速控制技术主要包括交-直-交变频和直-交变频两种方式；交-直-交变频技术首先将发电机输出的交流电整流为直流电，再通过逆变器将直流电逆变为工频交流电。该技术具有调速范围宽、控制精度高、输出波形好等优点，是目前风力发电系统中应用最广泛的变频调速方式。其核心是逆变器的控制，常用的控制策略有空间矢量脉宽调制（SVPWM）、正弦脉宽调制（SPWM）等。SVPWM技术能够提高直流电压利用率，减少谐波含量，输出电流波形更接近正弦波，因此在高性能变频调速系统中得到广泛应用；直-交变频技术主要用于永磁同步发电机等直流输出的发电机，直接将直流电逆变为交流电。该技术结构简单、效率高，但适用范围较窄^[3]。

3.4 并网控制技术

并网控制技术是确保风力发电系统安全、稳定接入电网的关键，其主要任务是控制发电机输出的电压、频率、相位与电网一致，实现平滑并网，并在电网故障时快速断开，保护机组和电网安全。并网控制策略主要包括恒压恒频控制、变速恒频控制等。恒压恒频控制适用于同步发电机，通过调节发电机的励磁电流来控制输出电压和频率，实现与电网的同步并网。变速恒频控制则适用于异步发电机和永磁同步发电机，通过变频调速技术使发电机输出频率保持恒定，再通过并网逆变器实现与电网的同步；在并网过程中，还需要考虑无功功率补偿和谐波抑制问题。无功功率补偿可以提高电网功率因数，改善电能质量；谐波抑制则可以减少发电机输出电流中的谐波成分，避免对电网造成污染。常用的无功功率补偿装置有静止无功发生器（SVG）、并联电容器等；谐波抑制措施主要有采用滤波器、优化逆变器控制算法等。

4 风力发电控制技术应用案例分析

4.1 某大型风电场变桨距控制应用案例

该风电场位于我国西北地区，安装有50台2MW风力发电机组，采用变桨距控制技术。在风速低于额定风速时，桨距角保持在0°，通过MPPT控制策略实现最大风能捕获；当风速超过额定风速时，变桨系统动作，增大桨距角，将发电机输出功率稳定在2MW。实际运行数据表明，采用变桨距控制技术后，风力发电机组在额定风速以上时的功率波动幅度控制在±5%以内，显著提高了发电稳定性。同时，通过优化变桨控制算法，叶片的响应速度提高了20%，减少了因风速突变导致的功率冲击，延长了机组使用寿命。

4.2 海上风电场变频调速与并网控制案例

某海上风电场采用3MW永磁同步风力发电机组，配备交-直-交变频调速系统和先进的并网控制装置。变频调速系统采用SVPWM控制策略，确保发电机输出电流谐波含量低于5%；并网控制装置能够实时监测电网参数，在电网电压波动、频率偏移等情况下，快速调整发电机输出，实现稳定并网。该风电场的运行结果显示，变频调速系统使发电机的调速范围达到0-18rpm，风能利用系数提高了8%；并网控制装置的响应时间小于10ms，在多次电网故障中均成功实现了机组的安全脱网和重新并网，保障了风电场的稳定运行。

5 风力发电控制技术面临的挑战与未来发展趋势

5.1 面临的挑战

当前风力发电控制技术面临的主要挑战包括：一是复杂风况的适应性，风能的随机性和波动性使得传统控制策略难以在各种风况下都保持最佳控制效果，特别是在阵风、湍流等复杂风况下，如何提高系统的抗干扰能力和控制精度仍需进一步研究；二是系统集成优化，风力发电系统各部件之间的耦合关系复杂，如何实现风轮、传动系统、发电机、控制系统等的整体优化控制，提高系统整体效率和可靠性，是当前面临的重要课题；三是成本控制，高精度传感器、先进控制芯片等核心部件的成本较高，限制了控制技术在中小型风力发电系统中的应用；四是电网兼容性，随着风力发电在电网中的占比不断提高，其对电网的稳定性、电压调节能力等要求越来越高，如何提高风力发电系统的电网支撑能力，实现与电网的友好互动，是亟待解决的问题^[4]。

5.2 未来发展趋势

未来风力发电控制技术的发展趋势主要体现在以下几个方面：一是智能化控制，结合人工智能、大数据、物联网等技术，实现风力发电系统的智能感知、智能决策和智能控制。例如，利用机器学习算法对历史运行数据进行分析，优化控制策略，提高系统对复杂风况的适应性；通过物联网技术实现风电场各机组之间的信息共享和协同控制，提高风电场整体发电效率。二是模块化与标准化，开发模块化的控制组件和标准化的接口，提高控制系统的通用性和可扩展性，降低系统开发和维护成本。三是高可靠性与容错控制，采用冗余设计、故障诊断与容错控制技术，提高控制系统在部件故障情况下的可靠性和安全性，减少停机时间。四是协同控制与电网互动，研究风力发电系统与储能系统、电网的协同控制策略，实现风能的高效利用和电网的稳定运行，参与电网调峰、调频等辅助服务。五是轻量化与节能化，开发小型化、低功耗的控制设备，降低控制系统的能耗，提高系统的整体能效。

结束语

综上所述，新能源风力发电中的控制技术对于提高发电效率、保障系统安全和稳定并网具有至关重要的作用。随着技术的不断进步和创新，未来风力发电控制技术将朝着智能化、模块化、高可靠性、协同控制和轻量化等方向发展。这将进一步提升风力发电系统的整体性能，推动新能源产业的持续健康发展。同时，我们也应关注控制技术在实际应用中的挑战和问题，不断探索和优化解决方案，为构建更加绿色、低碳的能源体系贡献力量。

参考文献

- [1]徐川.新能源风力发电中的控制技术研究[J].电力设备管理,2024(3):94-96.
- [2]廖文朋.新能源风力发电系统中自适应控制技术的应用及未来前景研究[J].城市情报,2020(24):87-88.
- [3]张浩楠.新能源风力发电中的控制技术分析[J].数字化用户,2024(33):125-126.
- [4]胡晓东.新能源风力发电中的控制技术分析[J].电脑校园,2024(18):124-126.