

# 风力发电电气控制系统研究

王文超 靳毅

内蒙古华电辉腾锡勒风力发电有限公司 内蒙古 呼和浩特 010000

**摘要:** 本文全面概述了风力发电电气控制技术,包括变桨距、主动失速、定桨距失速、低电压穿越及变速风力发电技术。探讨了这些技术的原理、优势及在风力发电系统中的应用。同时,提出优化图纸设计、合理施工方案及电缆工作施工等关键技术选型与系统设计策略,确保风力发电系统的高效、稳定运行。通过详细分析系统实现与测试过程,为风力发电电气控制系统的设计与实现提供了理论依据与实践指导。

**关键词:** 风力发电; 电气控制; 技术应用

## 1 风力发电电气控制技术概述

风力发电电气控制技术是确保风力发电系统高效、稳定运行的核心技术之一。它集成了现代电力电子技术、自动化控制理论、信号处理技术以及计算机技术,旨在实现对风力发电机组的精确控制、优化能量转换效率,并确保电力输出质量符合电网要求。在风力发电过程中,电气控制技术首先通过高性能传感器实时监测风速、风向、转子转速、发电机输出功率等关键参数,为控制系统提供精确的数据支持。基于这些数据,电气控制系统运用先进的控制算法,如最大功率点跟踪(MPPT)算法、变桨距控制算法等,动态调节发电机转速、桨叶角度等参数,以最大限度地捕获风能并转化为电能。电气控制技术还负责将发电机产生的电能通过变流器转换为适合电网并网的交流电,同时保证并网过程中的电压、频率、相位等参数与电网同步,减少谐波污染,提高供电质量<sup>[1]</sup>。

## 2 风力发电电气控制技术

### 2.1 变桨距发电技术

变桨距发电技术是风力发电电气控制中的一项关键技术,其核心在于通过调整风力发电机叶片的桨距角来优化风能的捕获效率和电能的转换质量。在风速变化时,控制系统会根据风速传感器反馈的信号,精确计算并控制桨距角的大小,以适应不同风速下的最佳运行状态。当风速较低时,叶片处于较小的桨距角,以最大化捕获风能;而当风速过高时,则增大桨距角,减少叶片对风的阻力,避免机组过载,保护风力发电机组的安全运行。变桨距发电技术的优点在于能够实现对风速变化的快速响应和精确控制,提高发电效率,并确保风电机组在极端天气条件下的稳定性。同时,它还有助于减少因风速波动引起的机械应力和疲劳损伤,延长机组的使用寿命。

### 2.2 主动失速发电技术

主动失速发电技术是一种结合传统失速控制与先进控制算法的风力发电电气控制技术。该技术通过在风力发电机组的控制系统中引入主动失速控制环节,使叶片在特定条件下自动失速,以限制风轮吸收功率,防止机组因风速过高而超载。与传统的被动失速发电技术不同,主动失速发电技术能够更精确地控制失速过程,实现更优的能量管理和系统稳定性。通过实时监测风速和机组状态,控制系统能够迅速判断是否需要启动失速控制,并精确调节叶片的迎风角度,以达到既限制功率又保持系统稳定的目的。

### 2.3 定桨距失速发电技术

定桨距失速发电技术是一种较为传统的风力发电电气控制技术,其主要特点在于叶片的桨距角在机组运行过程中保持不变,通过叶片自身的气动特性来实现对风速变化的适应性。当风速超过风力发电机组的额定设计风速时,叶片会产生失速效应,即叶片表面的气流开始分离,导致升力减小、阻力增加,从而限制风轮吸收功率的进一步增加。定桨距失速发电技术的优点在于其结构简单、成本低廉且易于维护。由于不需要复杂的桨距调节机构和控制系统,该技术能够显著降低风力发电机组的制造成本和运维难度<sup>[2]</sup>。然而,其缺点也较为明显,即在高风速下机组的效率会显著下降,且容易受到极端天气条件的影响而导致机组损坏;定桨距失速发电技术在控制上的灵活性也相对较差,难以满足现代风力发电系统对高效、稳定运行的要求。

### 2.4 低电压穿越技术

在风力发电领域,低电压穿越技术是一项至关重要的电气控制技术,它直接关系到风力发电机组在电网电压暂降时的稳定性和可靠性。随着风力发电在全球能源结构中的占比日益增加,电网对其稳定性与兼容性的要

求也越来越高。在电网发生故障，如短路、断线等导致电压骤降时，传统的风力发电机组可能会因保护机制而迅速脱网，这不仅加剧了电网的失稳风险，还可能引发更大范围的停电事故。低电压穿越技术正是为了应对这一挑战而发展起来的。它通过在风力发电机组的控制系统中集成专门的LVRT控制策略，使机组在电网电压跌落至一定范围时仍能维持并网运行，持续向电网输送电能或提供无功支持，帮助电网快速恢复稳定。LVRT技术的核心在于对机组的有功和无功功率进行快速、精确的调节，以及优化机组内部的能量分配和动态响应能力。当检测到电网电压跌落时，LVRT控制系统会迅速评估电压跌落的程度和持续时间，并据此调整发电机组的控制参数。一方面，通过调整变频器的控制策略，优化机组的输出功率特性，使其在电压跌落期间仍能维持一定的有功输出；另一方面，通过调节机组的无功输出，为电网提供必要的无功支撑，增强电网的电压稳定性。LVRT技术还会与机组的保护系统相协调，确保在极端情况下机组能够安全脱网，避免设备损坏。

### 2.5 变速风力发电技术

变速风力发电技术是风力发电领域的一项重大创新，它打破了传统定速风力发电模式的局限，通过引入先进的电力电子技术和智能控制算法，实现了风力发电机组在更宽风速范围内的高效、稳定运行。变速风力发电技术的核心在于其能够根据风速的变化自动调整发电机组的转速，使风轮始终保持在最佳叶尖速比附近运行，从而最大限度地捕获风能并转化为电能。与传统定速风力发电技术相比，变速风力发电技术具有诸多优势。它提高了风能的利用率和发电效率。由于能够根据风速变化实时调整转速，变速风力发电机组能够更充分地利用风能资源，特别是在低风速和高风速条件下，其发电效率均优于定速机组；变速风力发电技术改善了机组的运行稳定性和可靠性。通过智能控制算法的优化调节，机组能够更好地适应风速的波动和电网的负荷变化，减少机械应力和疲劳损伤，延长机组的使用寿命。风力发电技术还具备更好的电网兼容性和灵活性；它可以根据电网的需求调整输出功率和功率因数，为电网提供必要的无功支撑和频率调节服务，增强电网的稳定性和可靠性。

## 3 风力发电电气控制技术的发展策略

### 3.1 优化图纸并制订合理的施工方案

风力发电项目涉及复杂的电气系统布局、高精度的设备安装以及严格的安全规范，施工前期的图纸设计与施工方案规划显得尤为重要。第一，图纸优化是确保设

计合理性与可行性的基础。在图纸设计阶段，应充分考虑风力发电场的实际地形、气候条件、风力资源分布等因素，结合电气控制技术的最新发展成果，对发电机组的布局、电缆走向、变电站选址等进行精细化设计<sup>[3]</sup>。通过运用先进的CAD设计软件和仿真分析技术，对设计方案进行多次迭代优化，确保图纸的准确无误和施工的顺利进行。第二，制订合理的施工方案是保障施工效率与质量的必要条件。施工方案应明确施工目标、任务分工、时间节点、质量标准等关键要素，并充分考虑施工过程中各种可能风险与应对措施。针对风力发电电气控制系统的特殊性，施工方案中应特别关注电缆敷设、变频器安装、控制系统调试等关键环节，确保每一步施工都符合技术要求和安全规范。还应注重施工队伍的培训和管理，提高施工人员的专业技能和安全意识，为项目的顺利实施提供有力保障。第三，在优化图纸和制订施工方案的过程中，还应注重技术创新与资源整合。通过引入先进的施工技术和管理模式，提高施工效率和质量；通过加强与相关产业链上下游企业的合作与交流，实现资源共享和优势互补，共同推动风力发电电气控制技术的发展。

### 3.2 风力发电施工过程中要做好电缆工作施工

电缆工作施工是风力发电电气控制系统建设中的重要环节，其质量直接关系到整个系统的运行稳定性和安全性。根据风力发电系统的实际需求和技术要求，选择合适的电缆型号和规格，确保其具有良好的电气性能、机械性能和耐候性能。加强对电缆供应商的资质审查和质量控制，确保采购的电缆质量可靠、价格合理。在电缆敷设过程中，应严格按照施工图纸和技术规范进行操作，确保电缆走向合理、固定牢固、无损伤。特别是在穿越复杂地形和恶劣环境时，应采取有效的保护措施，防止电缆受到机械损伤或环境侵蚀。在电缆安装过程中，还应注意与其他设备的接口连接和绝缘处理，确保电缆的电气性能和安全性能符合要求。建立完善的质量管理体系和验收标准，对电缆施工过程中的每一个环节进行严格的监督和检查，确保施工质量符合设计要求和技术规范。

## 4 风力发电电气控制系统的设计与实现

### 4.1 系统设计原则与要求

在风力发电电气控制系统的设计与实现过程中，遵循一系列明确的设计原则与要求是至关重要的。可靠性是系统设计的基石，它要求系统在恶劣的自然环境条件下（如高温、低温、高湿、沙尘等）仍能保持长时间稳定运行，减少因系统故障导致的发电量损失；安全性

同样不容忽视,系统必须具备完善的安全保护机制,能够在电网故障、设备异常等紧急情况下迅速响应,确保人员和设备的安全。此外,经济性也是设计的重要考量因素,通过优化系统结构、降低能耗、提高转换效率等方式,降低整个风力发电项目的建设和运营成本。在满足上述基本原则的基础上,风力发电电气控制系统还需要根据客户的定制化需求进行功能实现。这包括但不限于:特定风速条件下的最优功率追踪、不同电网接入标准的适应性调整、远程监控与故障诊断功能的集成等。

#### 4.2 关键技术选型与方案设计

为了实现上述设计原则与要求,风力发电电气控制系统在关键技术选型与方案设计上需要精心考虑。控制器与处理器作为系统的核心部件,其性能直接影响系统的整体表现。在选择时,需综合考虑处理能力、实时性、功耗、可靠性等因素,选用高性能、低功耗的工业级控制器和处理器,以确保系统的高效稳定运行。传感器与执行机构的配置也是系统设计的关键;传感器用于实时监测风速、风向、发电机转速、电压、电流等关键参数,为控制系统提供准确的数据支持;执行机构则根据控制指令执行相应操作,如调整叶片角度、调节发电机输出功率等。在配置时,需根据实际需求选择合适的传感器类型和精度,并设计合理的执行机构布局和控制逻辑<sup>[4]</sup>。通过采用先进的控制算法(如MPPT算法、变桨距控制算法等)和优化策略(如能量管理策略、故障预测与诊断策略等),可以实现对风力发电机组的精确控制和优化管理,提高系统的发电效率和稳定性。

#### 4.3 系统实现与测试

在硬件方面,包括控制器的电路设计、传感器的选型与布局、执行机构的安装调试等;在软件方面,则包括控制程序的编写、调试与优化等。在软硬件实现过程中,需注重模块化设计和代码的可维护性,以便于后期的维护和升级。完成软硬件实现后,进行系统集成与调试。系统集成是将各个硬件模块和软件模块按照设计方案连接起来,形成一个完整的系统;调试则是通过一系列测试来验证系统的功能是否满足设计要求,发现并解决存在的问题。在调试过程中,需采用多种测试方法(如单元测试、集成测试、系统测试以及压力测试

等),以确保风力发电电气控制系统的全面性和可靠性。(1)单元测试:针对系统中的每一个模块或组件进行独立的测试。这包括控制器的功能测试、传感器的数据采集准确性测试、执行机构的响应速度测试等。通过单元测试,可以确保每个模块都能按照预期工作,为后续的系统集成打下坚实基础。(2)集成测试:在单元测试通过后,将各个模块按照系统架构集成起来进行测试。此阶段主要关注模块间的接口是否兼容、数据传递是否准确、控制逻辑是否正确等。通过集成测试,可以发现并解决模块间可能存在的冲突或不一致问题。(3)系统测试:在系统集成完成后,对整个系统进行全面的测试。这包括功能测试、性能测试、稳定性测试等。功能测试验证系统是否满足所有设计需求;性能测试评估系统在不同工况下的发电效率、响应速度等关键指标;稳定性测试则考察系统在长时间运行下的可靠性和稳定性。(4)压力测试:模拟系统在高负载或极端条件下的运行情况,以检验系统的抗压能力和恢复能力。通过压力测试,可以发现系统潜在的瓶颈和脆弱点,为后续的优化提供方向。

#### 结束语

随着全球对可再生能源需求的不断增加,风力发电作为清洁能源的重要组成部分,其电气控制技术的发展至关重要。深入探讨风力发电电气控制技术的多方面内容,从原理到应用,从设计到实现,均进行详尽阐述。未来,随着技术的不断进步和创新,风力发电电气控制系统将更加智能化、高效化,为实现全球能源结构转型和可持续发展目标贡献力量。

#### 参考文献

- [1]周利鹏.风力发电电气控制技术发展探讨[J].科技创新导报,2021,15(23):2-3.
- [2]李武东.谈风力发电电气控制技术及应用实践[J].科技与创新,2021(18):147+150-151.
- [3]丁江流.风力发电电气控制技术及应用实践探析[J].科技创业月刊,2020,29(22):142-143.
- [4]李光宇.风力发电电气控制技术发展探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2020(15):1622.