

# 风力发电机组功率曲线性能分析与优化实践

曹 晔

国华(赤城)风电有限公司 河北 张家口 075599

**摘要:** 随着全球对可再生能源需求的不断增加,风力发电机组作为清洁能源的重要组成部分,其性能优化显得尤为重要。本文重点对风力发电机组的功率曲线性能进行深入分析,探讨影响功率输出的关键因素,包括风速、风频分布、空气密度等自然条件,以及机组设计、控制策略等人为因素。通过对实际运行数据的采集与处理,进行功率曲线对比分析和机组异常检测。进一步地,本文提出一系列优化实践方案,如叶片设计优化、控制策略调整等,旨在提升风力发电机组的发电效率和稳定性,为风力发电领域的技术进步和产业发展提供有益参考。

**关键词:** 风力发电机组; 功率曲线性能分析; 优化实践

引言: 风力发电作为可再生能源的重要来源,其效率和性能的提升对于促进全球能源结构的绿色转型至关重要。风力发电机组的功率曲线是评估其发电能力和效率的重要指标,它直观展示了不同风速下机组的输出功率。然而,在实际运行过程中,由于多种内外因素的影响,风力发电机组的功率曲线往往偏离理想状态,导致发电效率下降。因此,深入分析风力发电机组功率曲线的性能,并采取有效优化措施,对于提高机组的整体效率和稳定性具有重要意义。

## 1 风力发电机组功率曲线的基本概念与理论

### 1.1 功率曲线的定义及表示方法

功率曲线是一系列规格化数据对(V,P)的集合,其中V代表风速,P代表有功功率。这些数据对通常以图表的形式表示,横坐标为风速(单位通常为m/s),纵坐标为有功功率(单位通常为kW)。功率曲线通过描绘风电机组净电功率输出与风速的函数关系,能够直观地展示机组在不同风速下的发电能力。在实际应用中,功率曲线通常是通过在风力发电机旁设置风速计和功率测量设备来获取的。通过测量不同时间点的风速和对应的功率输出,收集足够的的数据点后,可以进行图形绘制,得到风电机组的功率曲线。值得注意的是,由于自然条件的变异,实际测得的数据点可能不会完全落在一条光滑的曲线上,而是通过最佳拟合线来提供对任何给定风速下功率输出的合理估计。

### 1.2 常见的功率曲线类型

常见的功率曲线类型主要包括定桨距风力发电机组的静态功率曲线和变速变桨风力发电机组的静态功率曲线与实际功率图。(1)定桨距风力发电机组的静态功率曲线:定桨距风力发电机组的桨距角固定不变。随着风速的增加,叶片的攻角也会增大。当攻角达到一定程度

时,叶片所受的升力开始下降,阻力继续上升,叶片开始失速,吸收的风功率开始下降。因此,定桨距风力发电机组的静态功率曲线通常呈现出一个先上升后下降的趋势。(2)变速变桨风力发电机组的静态功率曲线与实际功率图:变速变桨风力发电机组通过调节叶片的桨距角和转速来适应不同风速条件下的运行需求。其静态功率曲线通常呈现出一个较为平滑的上升趋势,直到达到额定功率<sup>[1]</sup>。然而,在实际运行过程中,由于风速的波动和机组的动态响应,实际功率图可能会与静态功率曲线存在一定的偏差。实际功率图通常是一个由多个散点组成的图形,这些散点代表了机组在不同风速下的实际输出功率。

### 1.3 风力发电机组输出功率的影响因素

风力发电机组的输出功率受到多种因素的影响,主要包括风速、风频分布、湍流强度和空气密度等。(1)风速:风速是影响风力发电机组输出功率的最直接因素。一般来说,风速越大,机组捕获的风能越多,输出功率也越大。但是,当风速超过一定范围时,机组可能因过载而停机或降低输出功率以保护自身结构。(2)风频分布:风频分布描述了不同风速出现的概率和持续时间。在风频分布较为集中的风速段,机组能够更稳定地运行并输出较高的功率。(3)湍流强度:湍流强度越大,机组所受的动态载荷越大,可能导致输出功率的波动增加。(4)空气密度:空气密度决定了风能的密度和机组能够捕获的风能数量。在海拔较高或温度较高的地区,空气密度较低,机组能够捕获的风能也会相应减少。

## 2 风力发电机组功率曲线性能分析

### 2.1 数据采集与处理

在风力发电机组功率曲线性能分析中,数据采集与处理是至关重要的第一步。准确、完整的数据是后续分

析的基础。(1)数据来源及采样方法。数据来源主要包括风力发电机组的监控系统和气象站。监控系统能够实时监测并记录风力发电机组的运行状态,包括风速、功率、转速等关键参数。气象站则提供准确的气象数据,如风速、风向、温度、湿度等,有助于我们更全面地了解风力发电机组所处的环境条件。采样方法的选择需考虑数据的代表性、连续性和实时性。一般来说,我们会采用定时采样和事件触发采样相结合的方式。定时采样可以确保数据的连续性,而事件触发采样则能在机组出现异常或特定事件时及时捕获相关数据<sup>[1]</sup>。(2)数据清洗、插补及筛选。原始数据往往存在噪声、缺失值等问题,需要进行清洗、插补和筛选。数据清洗主要是去除无效、异常或重复的数据,确保数据的准确性和一致性。插补则是针对缺失值进行处理,常用的插补方法有线性插补、邻近值插补等。筛选则是根据分析需求,选取符合特定条件的数据进行后续分析。在数据清洗和插补过程中,我们需要谨慎处理,以避免引入新的误差。同时,数据筛选也需考虑数据的完整性和代表性,确保分析结果的可靠性。

## 2.2 功率曲线对比分析

(1)实际功率曲线与标准功率曲线的差异。实际功率曲线是风力发电机组在实际运行过程中记录的功率输出与风速之间的关系曲线。而标准功率曲线则是风力发电机组在理想条件下,根据设计参数和性能标准计算得出的功率输出与风速之间的关系曲线。通过对比实际功率曲线与标准功率曲线,我们可以了解风力发电机组在实际运行中的性能表现。如果实际功率曲线低于标准功率曲线,可能意味着机组存在性能下降或运行异常的情况。这种差异可能由多种因素引起,如叶片磨损、控制策略不当、环境条件变化等。(2)不同风速段的功率曲线表现。风力发电机组在不同风速段的性能表现也是分析的重点。一般来说,在启动风速以下,机组无法启动或输出功率极低;在额定风速以下,随着风速的增加,输出功率逐渐增加;在额定风速附近,输出功率达到最大值并保持相对稳定;在切出风速以上,由于安全保护机制的作用,输出功率可能逐渐降低甚至为零。通过对比不同风速段的功率曲线,我们可以发现机组在不同风速条件下的性能特点,从而采取相应的优化措施<sup>[1]</sup>。例如,在启动风速附近,可以通过优化启动策略来提高机组的启动效率;在额定风速附近,可以通过调整控制策略来最大化输出功率;在切出风速以上,则可以通过改进结构或控制策略来提高机组的抗风能力和安全性能。

## 2.3 机组异常问题分析

在风力发电机组运行过程中,可能会出现各种异常情况,如高温降容、控制策略调整不当等。这些异常情况会对机组的发电性能和功率曲线产生显著影响。(1)高温降容、控制策略调整不当等问题的影响。高温降容是指由于环境温度过高,风力发电机组的冷却系统无法有效散热,导致机组温度升高,输出功率降低的现象。控制策略调整不当则可能导致机组在特定风速条件下无法输出最优功率,甚至引起机组振动、过载等安全问题。(2)对发电性能及功率曲线的影响分析。这些异常情况会对风力发电机组的发电性能和功率曲线产生显著影响。首先,高温降容会导致机组输出功率下降,从而影响整个风电场的发电量。其次,控制策略调整不当可能导致机组在特定风速段无法稳定运行,功率曲线出现波动或异常下降。这些异常情况不仅会降低机组的发电效率,还可能对机组的结构和安全性造成潜在威胁。因此,我们需要密切关注机组的运行状态,及时发现并处理异常情况。通过优化冷却系统、调整控制策略等措施,我们可以提高机组的发电性能和稳定性,确保风力发电机组在安全、高效的条件下运行。

## 3 风力发电机组功率曲线优化实践

### 3.1 优化方案概述

(1)功率曲线优化的重要性。风力发电机组功率曲线反映了不同风速下机组的发电能力,是评估机组性能的重要指标。优化功率曲线,意味着在更广泛的风速范围内提高机组的发电效率,减少能量损失,这对于提高风电场的整体经济效益、降低度电成本具有重要意义。此外,通过优化功率曲线,还能有效减少机组在低风速下的停机时间,提高高风速下的过载保护能力,从而延长机组的使用寿命。(2)常见方法。功率曲线的优化方法主要分为硬件改进和软件优化两大类。硬件改进包括叶片设计优化、发电机效率提升等;软件优化则侧重于控制策略的调整和控制系统的智能化升级。这些方法的综合运用,能够显著提升机组的发电效率和稳定性。

### 3.2 叶片及风电机组结构改进

(1)更换轮毂以调整桨叶角度和风压面积。轮毂作为连接叶片与发电机的重要部件,其设计直接影响叶片的转动效率和能量捕获能力。传统的固定式轮毂限制了叶片在不同风速下的灵活性,导致能量损失。通过更换为可变式轮毂,如液压变桨轮毂或电动变桨轮毂,可以实现对桨叶角度的实时调整,使叶片在不同风速下始终保持最佳角度,最大化捕获风能。同时,调整轮毂设计以改变风压面积,可以优化叶片的气动性能,提高升力系数,减少阻力,进一步提升发电效率。(2)加装涡

流发生器以改善翼尖涡与边界层的能量交换。翼尖涡是风力发电机组在高速旋转时,叶片尖端产生的气流扰动现象,它会导致能量损失和噪声增加。通过在叶片翼尖加装涡流发生器,可以诱导额外的气流扰动,改变翼尖涡的形态和强度,从而减少其对叶片表面能量交换的负面影响。涡流发生器通过增加叶片表面的湍流度,改善边界层的流动状态,提高气流与叶片表面的能量传递效率,从而提升发电性能<sup>[4]</sup>。

### 3.3 控制策略优化

(1) 接近额定风速区段变桨调节。在接近额定风速区段,风力发电机组的输出功率接近最大值,此时微小的风速波动都可能导致机组过载或功率波动。为了维持输出功率的稳定,需要采用精细的变桨调节策略。变桨调节是通过改变叶片的桨距角,来调整叶片捕获风能的能力。在接近额定风速区段,控制系统应实时监测风速变化,并快速响应,通过微调桨距角来控制输出功率的波动,确保机组在高效区稳定运行。这种调节策略要求控制系统具备高度的精确性和响应速度,以实现风速变化的即时跟踪和适应。(2) 转矩补偿量的设计以优化转速调节过程。风力发电机组的转速调节是影响其发电效率的关键因素之一。转矩补偿量是在转速调节过程中,用于补偿因风速波动、机械损耗等因素引起的转矩变化的一种控制策略。通过合理设计转矩补偿量,可以优化转速调节过程,使机组在不同风速条件下都能保持最佳转速,从而实现功率输出的最大化。转矩补偿量的设计需要综合考虑机组的动态特性、外部环境因素以及控制目标的要求,通过精细的调试和优化,确保机组在转速调节过程中保持平稳和高效。

### 3.4 控制系统动态调整

(1) 根据气候变化动态调整最优模态增益值。风力发电机组在运行过程中,会受到多种外部因素的干扰,如风速变化、温度波动、气压变化等。这些因素会影响机组的动态特性和稳定性。为了保持机组的稳定运行和高效发电,控制系统需要根据实时气候变化动态调整最优模态增益值。模态增益值是控制系统中的一个关键参

数,它决定了系统对外部干扰的响应速度和稳定性能。通过实时监测气象数据和机组运行状态,控制系统可以自动调整模态增益值,以适应不同气候条件下的运行需求。这种动态调整策略有助于提高机组的抗干扰能力和稳定性,减少因外部因素引起的功率波动和故障率。

(2) 控制框架的调整以辅助叶轮对风速的跟踪。控制框架是风力发电机组控制系统的核心组成部分,它决定了控制策略的实现方式和效果。为了实现更精确的风速跟踪和功率输出控制,需要对控制框架进行调整和优化。这包括引入先进的控制算法和模型,如自适应控制、预测控制等,以提高控制策略的准确性和鲁棒性。同时,还需要对控制系统的硬件和软件结构进行升级和改进,以提升其处理速度和可靠性。通过优化控制框架,可以使机组在复杂多变的风速条件下保持最佳的发电状态,提高整体经济效益和环保价值。

### 结束语

综上所述,风力发电机组功率曲线的性能分析与优化实践是提高风能利用效率、促进风电行业发展的关键所在。通过深入研究功率曲线的特性和影响因素,我们得以更好地理解风力发电机组的运行机制和性能瓶颈。在此基础上,采取针对性的优化措施,如叶片及风电机组结构的改进、控制策略的优化以及控制系统的动态调整,显著提升了机组的发电效率和稳定性。未来,随着技术的不断进步和创新,我们有理由相信,风力发电将在推动全球能源结构绿色转型中发挥更加重要的作用。

### 参考文献

- [1]王明军,高原生.风力发电机组实际运行功率曲线影响因素分析[J].风能,2019,(04):74-75.
- [2]任阔,李洪奎.两种修正风力发电机功率曲线的方法研究[J].输配电工程与技术,2019,(08),71-72.
- [3]申璞.基于等效风轮风速的风电机组功率曲线测试分析[J].东北电力技术,2020,(05):57-58.
- [4]杨茂;杨琼琼.风电机组风速-功率特性曲线建模研究综述[J].电力自动化设备,2019,(02):22-23.