

风力发电机组功率特性分析与建模研究

王伟

甘肃天祝华电能源发展有限公司, 甘肃省武威市, 733208;

摘要: 随着全球能源结构向清洁化与低碳化方向转型, 风力发电作为可再生能源的重要组成部分, 已成为推动能源可持续发展的关键技术路径之一。风力发电机组的功率特性直接决定了风电场的发电效率、运行稳定性与经济性, 其建模与分析是实现风电系统优化设计与控制的核心环节。本文基于风能转换理论与气动学原理, 系统分析了风力发电机组的功率输出特性及其主要影响因素, 并在理论推导与实测数据基础上建立了多类型功率特性模型。研究通过对风速、叶片气动参数、机组转速、控制策略以及发电机效率等因素的综合建模, 提出了非线性动态功率预测模型, 并利用风电场实测数据进行了验证。结果表明, 该模型能够准确反映机组在不同风速与运行状态下的功率变化规律, 预测精度较传统静态模型显著提升。进一步研究发现, 风能资源的时空波动、控制系统的动态响应以及叶片气动特性的实时调整对机组功率输出具有复杂影响。研究成果为风电系统的功率优化控制、运行调度及智能化维护提供了理论支撑与实践参考, 对提升风能利用效率和促进绿色能源转型具有重要意义。

关键词: 风力发电机组; 功率特性; 非线性建模; 风能转换; 动态优化

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 11. 040

引言

近年来, 全球能源危机与环境污染问题不断加剧, 发展可再生能源成为各国实现碳中和目标的重要战略。其中, 风能以其清洁、安全与储量丰富的优势, 已成为最具发展潜力的可再生能源之一。根据国际能源署(IEA)统计数据, 全球风电装机容量持续增长, 风电在电力系统中的占比逐年提升。然而, 风能具有随机性、波动性与不可预测性, 其功率输出受风速变化、机组特性及控制策略等多重因素影响, 导致风电系统输出功率波动较大, 影响并网稳定与电能质量。因此, 研究风力发电机组的功率特性并建立精确的数学模型, 对于实现风电系统的高效运行与智能调度具有重要意义。

目前, 国内外学者已对风力机的气动性能、功率曲线拟合及控制策略进行了大量研究。传统研究主要依赖于理论气动方程与经验数据构建静态功率模型, 但由于风场环境复杂多变, 传统模型在动态响应与非线性描述方面存在局限。近年来, 随着数据采集与计算技术的发展, 基于实测数据的非线性建模与智能算法在风电领域得到了广泛应用, 使功率预测与控制更趋精准。本文从风能转换原理出发, 系统分析风力发电机组的功率特性, 构建多维度建模框架, 并通过实证数据验证模型有效性, 旨在为风电机组运行优化提供理论与工程支持。

1 风力发电机组功率特性理论分析

1.1 风能转换基本原理

风力发电机组的能量转换过程包括风能捕获、机械能传递与电能输出三个阶段。风能首先作用于叶片表面, 通过气动力使叶轮旋转, 将风能转化为机械能, 再经传动系统驱动发电机产生电能。风能功率可表示为:

$$P_w = 1/2 \rho A v^3$$

其中, ρ 为空气密度, A 为风轮扫掠面积, v 为来流风速。风力机的能量利用效率由功率系数 C_p 决定, 其理论最大值为贝茨极限(0.593)。实际运行中, 由于机械损耗、气动干扰、控制系统延迟及环境变化等因素, 风力机的功率系数通常在 0.3~0.45 之间。功率系数与叶尖速比 λ 及桨距角 β 密切相关, 存在高度非线性关系, 可表示为 $C_p = f(\lambda, \beta)$ 。在小风速区, 叶尖速比变化显著影响风能捕获效率; 在高风速区, 桨距调节起到限制功率、防止过载的重要作用。因此, 建立精确的 C_p 模型是描述机组气动特性与功率输出性能的关键环节, 也是风电系统设计与运行控制的重要基础。合理的功率系数模型不仅能准确反映机组在不同工况下的输出规律, 还能为最大功率点追踪(MPPT)与智能控制算法提供数学依据, 提升系统能量转换效率与稳定性。

1.2 功率输出特性与影响因素分析

风力发电机组的功率输出受多因素耦合影响, 包括

风速分布特性、叶片结构参数、控制策略及环境条件等。在低风速区，机组尚未启动，输出功率近似为零；当风速进入额定区间，功率随风速立方关系上升；当风速达到额定值后，机组进入恒功率运行阶段，通过桨距角调节保持输出稳定。若风速继续升高至停机阈值，为防止结构损伤，系统自动切断运行。机组的整体功率特性曲线呈现典型的“S”形非线性规律，反映出能量捕获效率与控制策略之间的动态平衡。影响功率输出的因素中，风速变化最为直接，而叶片气动结构、发电机效率、控制系统响应速度以及风切变、湍流强度等外部条件也起到显著作用。不同类型的风机在运行特性上差异明显，如定速恒频机组主要依靠桨距调节实现稳功率控制，而双馈异步发电机组可通过转子侧变频器灵活调节有功与无功功率，实现更宽风速范围内的高效运行。近年来，变速恒频与直驱永磁同步机组逐渐普及，其优越的控制性能和能量转换效率为风电系统的稳定输出提供了重要保障。通过对功率特性曲线的精确建模，可实现机组运行状态的预测与优化，为风电场经济调度与功率平衡提供可靠依据。

1.3 风能资源与机组特性耦合关系

风能资源的空间分布与时间波动对机组输出特性具有显著影响。风速的概率分布通常服从威布尔（Weibull）分布，其形状参数 k 和尺度参数 c 共同决定了风场的能量密度。风能资源受地形地貌、气候条件、海拔高度及季节变化等因素影响，呈现出明显的地域差异与周期波动。风电机组选型与安装高度必须结合风能资源特性进行优化，以实现能量捕获的最大化。叶片长度、气动设计、塔架高度及发电机效率共同决定了风能转换效率。通过将功率曲线与风速分布进行耦合分析，可实现机组年发电量的定量评估，从而为风电场的选址规划、运行管理和经济性分析提供重要依据。不同地区的风速特性对机组类型选择有显著影响，例如沿海与高原地区风速稳定性较好，适合大功率变速机组；而内陆低风速地区则更适合采用低启风速、高效率的中小型风机。风能资源评估与机组特性匹配的优化不仅能提高发电效率，还能延长设备寿命，降低运行维护成本，提升整体系统的可靠性与经济性。这种资源—设备协同优化已成为现代风电开发的核心研究方向，也是风电场数字化、智能化管理的重要技术支撑。

2 风力发电机组功率特性模型构建

2.1 理论模型的建立与改进

理论建模主要基于气动方程与能量守恒原理，通过对风能转换过程的定量描述，建立功率输出模型。经典模型为：

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p(\lambda, \beta) \eta_m \eta_g$$

其中， η_m 为机械传动效率， η_g 为发电机效率。为了提高模型精度，本文在传统模型基础上引入叶片气动阻尼与风速扰动项，建立动态修正模型：

$$P_t = k_1 v^3 + k_2 v^2 + k_3 v + k_4 + \varepsilon(t) \quad P_t = k_1 v^3 + k_2 v^2 + k_3 v + k_4 + \varepsilon(t)$$

其中， $\varepsilon(t)$ 表示环境随机扰动项， k_i 为拟合参数。该模型能够反映机组在非稳定风场下的功率变化特征。

2.2 基于实测数据的经验建模方法

随着数据采集系统的完善，利用实测数据进行经验建模成为重要研究方向。通过分析风速与输出功率的对应关系，可采用多项式回归、支持向量机（SVM）或神经网络模型进行拟合。本文选取某风电场 8 周运行数据，采用 BP 神经网络建立非线性功率模型，输入变量包括风速、桨距角、叶尖速比与气压，输出为机组功率。网络训练采用梯度下降算法，结果显示拟合精度 R^2 达到 0.984，预测误差小于 5%。该方法能有效捕捉复杂非线性特征，具有较强的泛化能力。

2.3 多因子耦合建模与模型验证

考虑到风速波动与机械参数间存在强耦合关系，本文在神经网络模型基础上引入模糊逻辑系统，建立混合智能模型（FNN）。通过规则集与隶属函数描述非线性映射关系，实现风速区间内的自适应调节。模型验证采用交叉验证法，结果表明 FNN 模型的 RMSE 较传统回归模型降低约 37%，在中高速风区段表现更优。该模型可为实时功率预测与机组控制提供更可靠的算法支持。

3 功率特性数据分析与模型对比研究

3.1 风速与功率分布特性分析

基于风电场实测数据统计发现，风速在 2~12 m/s 之间分布最为集中，符合威布尔分布规律，形状参数 $k=2.1$ ，尺度参数 $c=7.3$ 。功率输出随风速增大呈三段式特征：启动区（0~3 m/s）、爬升区（3~10 m/s）与额

定区 (10^{12} m/s)。在额定区内, 机组通过桨距调节保持输出稳定。数据拟合结果表明, 实际功率曲线与理论模型存在一定偏差, 主要源于风切变、空气密度变化及测量误差等因素。

3.2 模型性能对比与误差分析

本文分别比较了多项式回归模型、BP 神经网络模型与模糊神经网络模型的拟合效果。实验结果表明, 多项式回归模型在低风速区拟合效果较好, 但在高风速区出现饱和误差; BP 神经网络模型能较好地描述整体特性, 但对局部突变响应不足; 模糊神经网络模型在全区间表现最佳, 其平均绝对误差 (MAE) 为 18.7kW, 较传统模型降低约 25%。误差分析表明, 混合模型在捕捉非线性特征、抗噪性能与泛化能力方面具有显著优势。

3.3 功率预测与控制策略优化

基于模型结果, 可构建实时功率预测系统, 为风电场能量调度与功率平滑控制提供依据。通过短期风速预测与模型耦合, 实现机组输出功率的前馈调节。研究发现, 采用 FNN 模型结合模糊控制策略, 可有效降低功率波动幅度约 15%, 提高电网稳定性。该方法在风能资源利用率与机组寿命延长方面具有显著应用价值。

4 模型应用与系统优化研究

4.1 模型在风电场运行监测中的应用

建立的功率模型可广泛应用于风电场运行监测与故障诊断。通过对实时监测数据与预测值的偏差分析, 可判断机组运行状态。当功率偏差超过阈值时, 可提示桨距系统或传动部件异常。基于模型的智能诊断系统已在部分风电场试运行, 结果显示能有效提前发现机组故障, 减少非计划停机时间, 提高设备可利用率。

4.2 模型在功率控制与优化调度中的拓展

在风电并网运行中, 功率波动是影响电能质量的重要因素。基于本文提出的模型, 可实现动态功率平滑控制。通过引入储能系统与预测模型的协同运行, 实现功率输出的优化调度。仿真结果表明, 模型预测结合能量平衡控制可使功率偏差降低 20% 以上, 显著提高电网适应性。此外, 模型还可作为风电场群控制系统的核心模

块, 为分布式风电系统协调运行提供技术支撑。

5 结语

本文围绕风力发电机组功率特性分析与建模问题, 从理论分析、模型构建、数据验证及应用优化等方面进行了系统研究。研究发现, 机组功率特性具有显著的非线性与时变性, 传统静态模型难以准确反映实际运行规律。基于实测数据与智能算法的非线性建模方法, 可有效提高功率预测精度与模型适应性。混合模糊神经网络模型在拟合精度、抗噪性能及动态响应方面表现优异, 具有较高工程应用价值。研究结果不仅为风电场运行优化与智能控制提供了技术支撑, 也为未来风电系统的数字化与智能化发展奠定了基础。未来研究可在两个方向展开: 一是结合高分辨率风场仿真与物理模型构建多尺度耦合模型; 二是融合人工智能与边缘计算技术, 实现机组功率的实时预测与自适应控制, 以推动风电系统向高效、智能与绿色方向发展。

参考文献

- [1] 梁瑞利, 王志林, 肖进. 新版 IEC 61400-12《风能发电系统风力发电机组功率特性测试》和 IEC 61400-50《风能发电系统风速测量》系列国际标准解读[J]. 中国标准化, 2024, (S1): 174-178. DOI: CNKI: SUN: ZGBZ. 0. 2024-S1-063.
- [2] 全国风力发电标准化技术委员会 (SAC/TC 50). 风能发电系统 风力发电机组功率性能测试的数值场标定方法: GB/Z 44048-2024[S]. 中国标准出版社, 2024.
- [3] 杨宁恺. 风力发电机功率特性测量系统设计[D]. 南京信息工程大学, 2023. DOI: 10. 27248/d. cnki. gnjqc. 2023. 000754.
- [4] 杨世林, 冯煜, 王清飞, 等. 提高短叶片风力发电机组一次调频期间功率响应速率[J]. 船舶工程, 2024, 46 (S2): 135-141. DOI: 10. 13788/j. cnki. cbgc. 2024. S2. 26.
- [5] 呼木吉乐图. 基于小波包分析的风力发电机组全功率变流器异常识别研究[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43 (11): 29-32+38. DOI: 10. 20033/j. 1003-7241. (2024) 11-0029-05.