

尾流效应下风机功率波动的时空特征与稳定控制策略研究

郭林聪

(大唐新能源(文山)有限公司, 云南 文山 663000)

摘要 本研究主要针对风能发电过程中尾流效应对风机功率波动的影响进行研究, 并分析尾流效应对风机功率波动的时空特征。对不同的风速、风向、尾流长度等参数进行模拟, 得出尾流效应引起功率波动的规律性以及空间分布特征。为了减轻尾流效应对风电机组性能造成的不良影响, 提出基于动态参数调节与阵列布局优化的协同控制策略, 旨在抑制尾流效应导致的功率波动, 提升风电场整体运行稳定性, 为风电场精细化布局与智能控制提供技术参考, 对促进风电资源高效利用具有实践价值。

关键词 尾流效应; 风机功率波动; 时空特征; 智能化风电控制系统

中图分类号: TM614

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.004

0 引言

风能属于清洁、可再生的能源, 已经成为全球能源结构改善的关键部分。随着风电场规模的不断扩大, 风机之间的尾流效应也成为影响风电场整体功率输出稳定性、效率的主要因素之一。尾流效应是风机在运转时, 因为风速减小、气流混乱, 造成下游风机的风能获取能力变差, 引起风机功率的波动。目前的研究表明, 尾流效应对风机的输出功率会产生影响, 而且会造成风机运行负荷的不均衡, 加大设备的磨损程度, 还会对风电场的总发电能力造成影响。

1 尾流效应对风机功率波动的影响

1.1 风机位置与尾流效应的关系

风机在风电场中位置的不同, 使得它所受到的尾流效应强度和表现不同。风电场阵列中, 风向上游的风机一般能够得到比较稳定的气流, 所以功率输出比较平稳, 波动小。但是, 处于阵列下游的风机受到尾流效应的影响比较明显。上游风机工作时, 会对下游风机产生气流扰动, 使下游风机遇到风速减小、气流湍流等状况。这些扰动不但会造成下游风机的功率波动, 还会使风机叶片的载荷不均匀, 加大机械疲劳的风险^[1]。特别是在大风或者阵风的时候, 尾流的影响就更明显了, 造成风机功率的波动也更大, 从而严重影响整个风电场的发电能力。因此, 认识风机位置对尾流效应的影响, 对风电场设计、优化阵列布局、提高发电稳定性都十分重要。

1.2 风速和风向的变化对功率波动的影响

风速、风向是风机功率波动的重要影响因素。风电场中风速随位置变化很大, 尤其是在尾流影响下, 风速减小更明显。风机的功率输出与风速有关, 当风速较低的时候, 风机的发电效率下降, 功率输出波动加剧。尾流效应使下游风机的风速变小, 功率输出一般会出现剧烈的波动, 甚至出现停机。风向变化也会引起风机功率的变化。风向发生变化的时候, 风机叶片的角度可能不会和风流方向处在最理想的状态, 这样就会引发功率输出出现波动。尤其当风电场设计不合理的时候, 风机间的距离过小, 尾流交错引起风速、风向的不规则波动, 从而增大功率波动。因此, 风速、风向变化都要考虑, 这样才能使风机的功率输出比较稳定。

1.3 风电场阵列布局对尾流效应的影响

风电场阵列布局对尾流效应的影响是提高风电场发电稳定性和效率的重要因素。风电场的阵列布局决定了风机之间的相互影响, 进而影响尾流效应的强度和功率波动的频率^[2]。因此, 合理优化风电场阵列布局是减少尾流效应、降低功率波动和提高风电场发电效益的关键。风机的布置形式和排列密度直接影响尾流效应的传播范围和强度。在风电场中, 风机之间的间距至关重要。若风机之间的距离过小, 则上游风机产生的尾流会互相叠加, 使下游风机所受的气流扰动更为剧烈。风速的变化和湍流的增强会导致功率波动加大, 甚至出现部分风机失效或停机的情况。这种情

况不仅降低了风电场的整体发电效率，还会加速风机设备的磨损，提高维护成本。增大风机间距是一种有效的缓解尾流效应的方法，可以减少尾流的交织影响，从而减轻功率波动的幅度。风电场阵列布局应根据风速和风向的变化规律进行合理规划。风速和风向通常具有季节性和区域性的变化特征，因此，风电场的布局需要考虑到这些长期气候因素。采用对角线布局或者将风机布置在风速较高的区域，可以最大限度地减少风机之间的尾流干扰。如通过优化风电场阵列布局，可以确保下游风机处于较少尾流干扰的区域，保持稳定的风速和气流，从而保证稳定的功率输出。

2 风机功率波动的时空特征分析

2.1 短期功率波动与尾流强度的关系

风机的功率波动，短期表现主要是功率的瞬时波动。风电场中风机受尾流效应的影响，多个风机集中布置的阵列中尾流效应对下游风机的功率输出影响较大。上游风机的气流一经过，就会改变下游风机的风速和气流方向，造成功率的波动。波动一般表现为周期性的变化，风速急剧改变时更明显。风机功率波动幅度、周期性波动的频率都会受到尾流效应强度的直接控制。例如：风速较低的时候，上游风机造成的尾流效应会导致下游风机的风速急剧降低，进而引起风机输出功率的大起大落。风机的转速和风速的关系也会加重波动的现象。风速快速变化时，风机转速无法立即做出调整，造成功率输出的波动更为剧烈。对风机功率输出进行实时监测，可以得到功率波动的详细数据，从而让我们对功率波动有更深入的了解，进而对风机运行参数进行优化^[3]。风电场设计和运行过程中，掌握短期功率波动的特性有利于通过实时监控系统对风机进行调节，减小风速变化及尾流干扰的影响。需要结合气象数据和风电场的运行状态进行动态调整，保证风机在不同的风速、风向条件下功率输出比较平稳。采用智能控制系统，风机叶片角度、转速可随气流变化而快速调整，从而减小短期功率波动，提高风电场发电效率。

2.2 长期功率波动与尾流效应的持续影响

风机的功率长时间波动是尾流效应造成的。不同于短期的周期性波动，长期波动指的是在很长一段时间里风机的总发电量下降。尾流效应对下游风机的持续影响，主要是功率长期不稳定。风电场里下游的风机由于受到上游风机尾流的影响，风速长期处于较低水平，功率输出也一直在下降的状态。这并不是短期的风速波动造成的，而是尾流效应累积所造成的。

风机在受到尾流干扰的时候，风速的变动致使风机发电效率一直处在低水平状态，风电场阵列布置若不合理，多个风机之间相互叠加的尾流效应会造成更加明显的功率波动。一些风电场尾流效应对造成的长期功率波动，还会加重风机的机械负荷不均问题，造成设备提早出现磨损和故障。长期功率波动造成风机长期运行中处于负荷不均的状态，一方面降低了风机的使用寿命，另一方面也增大了风机的维护、维修成本。因此，评价风电机组功率波动的长期特性对风电场的远期规划是很重要的。通过模拟不同的气候、风速下长期波动来预测风电场的发电量变化趋势，进而提出风电场优化方案，减少尾流效应对风电场长期发电效率的影响。

2.3 时空分布特征与环境因素的交互影响

风机功率波动的时空分布特征，除了风电场阵列布局的影响之外，还会受到环境因素的较大影响。特别是风速、风向、气候条件等外界因素，在不同时间、空间尺度上都会给风机功率波动带来较大影响。风速变化是造成风机功率波动最重要的一个因素。当风速较低的时候，风机的功率输出会明显下降，在尾流干扰大的情况下，下游风机的风速一般较低，功率波动较大。在风速较高的情况下，风机可以获得更多的风能，功率输出的波动较小，但是此时的尾流效应也可能变得更加复杂，特别是在风速剧烈变化的时候，风机功率的波动会更明显。风向也是造成风机功率波动的因素之一。当风向发生变化的时候，风机的叶片角度不能迅速调整到最佳位置，造成风机发电效率降低，功率波动变大。气候条件的变化会引起风电场的功率输出发生变化。在极端天气状况下，风速、风向大幅度变化的时候，尾流效应就会比较明显，造成波动比较大。因此，准确掌握环境因素对风机功率波动的影响，再结合风电场的阵列分布进行分析，就成为优化风电场运行的重要一环。对风电场多个风机的功率输出数据进行时序分析，可以发现不同风机在空间上的功率波动情况，特别是风电场下风向的风机，其功率波动较大，而上风向风机的功率波动较小。因此，风电场设计要考虑到这些时空特性，合理布置风机位置，减小尾流相互影响，改善功率输出。这对提高风电场整体发电效率、稳定性有重要的指导意义。

3 尾流效应的稳定控制策略

3.1 动态调节风机运行参数

对于尾流效应造成的风机功率波动，采用动态调节风机运行参数的方式是一种有效的控制手段^[4]。风

电场中的风速、风向时刻在变化，使得风机的风能捕获能力也随之波动很大。因此，根据实时监测到的风速、风向等气象数据来动态调节风机的运行参数，可以有效地减小功率波动。通过改变风机叶片角度（变桨控制）和转速（变速控制），可以实现风机在不同的气象条件下最佳的运行状态。在低风速时适当改变风机的转速和叶片角度，增大风机的负载能力，防止功率输出过小；在高风速或者阵风天气时通过改变叶片角度、转速使风机避免过载，并保持稳定的功率输出。采用这种动态调节的方式，一方面可以减小尾流效应的影响，另一方面可以使风机在风速变化较大的情况下有更好的适应性，从而使整个风电场的功率输出更加平稳。另外，动态调节能削减风速波动对叶片造成的损伤，延长风机的使用年限。通过实时数据采集与分析，结合先进的控制算法，可以及时应对气象条件的改变，进而改善风机的运作状况，削减尾流干扰带来的不利影响。数据驱动的控制方法将会成为风电场稳定运行的又一项重要技术。

3.2 风电场阵列布局优化

风电场阵列布置可以有效减小尾流效应。风电场中风机之间的间距和排列方式影响尾流的传播范围和强度。风机距离太近尾流效应就会叠加、加强，造成下游风机受更大强度的尾流干扰，功率输出波动更大。合理优化风电场阵列布局，可减轻风机间尾流干扰程度，稳定功率输出。风电场设计阶段可以利用模拟和优化算法，对不同的阵列布局所造成的尾流效应进行分析。通过优化风机的间距和排列方式，使风机之间互相影响最小化。比如用对角线或者曲线排列，这样就能防止风机处在相邻的位置时出现强烈的尾流叠加状况，进而减小风机功率波动的程度。此外，还需考虑风速风向变化的长期气候数据，根据不同的季节和气候条件下风速分布的不同，设计出更合理的风电场阵列布置方案，进而提高风电场整体稳定性。优化阵列布置不仅可以减少尾流效应造成的功率波动，还可以提高风电场的空间利用率以及发电效率。因此阵列布局的优化是实现风电场稳定运行、提高发电量的重要手段，可以在一定程度上减小风电场风速波动性对风电场整体发电量的影响。

3.3 智能化风电控制系统的应用

智能化控制系统为风电场稳定运行提供了一个先进的解决方案。随着物联网（IoT）、大数据、人工智能（AI）技术的发展，风电场的控制也由原来的手工控制转变为智能化、自动化控制。采用智能控制系统，

风机可以对气象条件、风速变化、尾流效应做出及时反应，自动调节运行参数来达到优化功率输出的目的。智能控制系统的核心就是数据处理以及预测的能力。安装传感器网络实时监控风速、风向、温度、湿度等气象条件，把数据传给中央控制系统^[5]。系统通过大数据分析和预测模型，可以依据历史数据及目前环境，对尾流效应对风机的可能影响做出预判，提前做出调整。前瞻性调整不仅可以减小功率波动，还可以降低设备的运维成本。通过系统的学习能力，智能控制系统可以对风电场长期运行数据进行分析，并以此调整控制策略来提高风电场的运行效率和稳定性。智能控制系统在风电场群体控制方面也起着很重要的作用。利用多台风机的协同控制可以在风电场内达到风机之间的协调工作，减少风机间的不必要的干扰，从而有效降低尾流效应对功率波动造成的影响。智能化控制系统的使用，将会成为今后风电场管理、优化的重点，对风电场发电效率、稳定性的提升起到极大的促进作用，也为可持续发展提供强有力的保障。

4 结束语

本研究系统揭示了尾流效应对风机功率波动所造成的影响，并且提出了以动态调节以及阵列优化相结合的稳定控制策略，从而减少风电场的功率波动，提高风电场整体的稳定性及运行效率。研究结果表明，尾流效应对风机功率波动的影响是多因素、多层次的，必须采用综合控制措施才能减少尾流效应对风机功率波动的不利影响。随着风电技术不断发展以及智能化控制手段的运用，风电场的功率波动问题将得到更好的解决，为可再生能源的发展提供更加稳定的保障。

参考文献：

- [1] 莫丰源,王卫华,郭前.基于MADM-QM的风电机组风功率异常数据处理方法[J].可再生能源,2025,43(03):339-345.
- [2] 张庆富,成云朋,李斌,等.基于直流侧电压的风电输出功率平滑控制策略比较与研究[J].大电机技术,2024(06):117-129.
- [3] 李闯,田春华,刘家扬,等.风力发电机组对风偏差检测算法研究与应用[J].可再生能源,2020,38(05):620-624.
- [4] 彭文,谢凤呈,张智源.考虑相似时段聚类的风电功率短期预测算法[J].电力系统及其自动化学报,2019,31(10):81-87.
- [5] 张梦梦,傅晓锦.中小型风力机功率曲线的分析与优化[J].科学技术与工程,2018,18(03):39-44.