

多风机协同控制在新能源风场运行中的应用分析

严智伟

国网能源哈密煤电有限公司新能源分公司, 中国·新疆 哈密 839000

摘要: 伴随我国新能源产业的迅猛进步, 风力发电于能源结构转型的作用越发显著。风场运行时, 单一风机控制形式已难以满足高效稳定供电及灵活调节的需求, 多风机协同控制成为达成风场智能改进的崭新路径。本文基于新能源风场的实际运行情况, 从协同控制原理出发, 深入探讨了多风机在发电功率响应速度、振动抑制及极端工况适应性等方面的协同优势。通过建立风机间信息交互模型与负载分配优化算法, 实现了整体运行效能的提升及并网能力的增强。研究表明, 多风机协同控制可有效提高风场总输出功率和运行稳定性, 有利于降低功率波动对电网的影响, 并能显著减轻风机间气流干扰引起的机械磨损。同时, 该控制方法为新能源大规模接入电网提供了有力支撑, 并对风场智能管理展开了提升。本文的分析为未来风场运行调度和管理措施的优化提供了理论支撑, 具有较高的工程应用价值和推广前景。

关键词: 多风机协同控制; 新能源风场; 发电功率优化; 运行稳定性; 智能管理

Analysis of Multi-Turbine Coordinated Control in the Operation of New Energy Wind Farms

Yan Zhiwei

State Grid Energy Hami Coal Power Co., Ltd. New Energy Branch, China Xinjiang Hami 839000

Abstract: With the rapid advancement of China's new energy industry, the role of wind power in the transformation of the energy structure has become increasingly significant. During wind farm operations, the traditional single-turbine control approach has struggled to meet the demands for efficient and stable power supply as well as flexible adjustment, making multi-turbine coordinated control a new path for smart wind farm improvement. Based on the actual operation of new energy wind farms, this paper explores from the perspective of coordinated control principles the collaborative advantages of multiple turbines in terms of power generation response speed, vibration suppression, and adaptability to extreme conditions. By establishing an information interaction model among turbines and a load distribution optimization algorithm, overall operational efficiency and grid integration capability have been enhanced. The research results indicate that multi-turbine coordinated control can effectively increase the total output power and operational stability of wind farms, reduce the impact of power fluctuations on the grid, and significantly alleviate mechanical wear caused by airflow interference among turbines. Furthermore, this control method provides strong support for the large-scale integration of new energy into the grid and promotes intelligent wind farm management. The analysis presented in this paper offers theoretical support for the optimization of future wind farm operation scheduling and management measures, possessing high engineering application value and significant prospects for promotion.

Keywords: Multi-turbine coordinated control; New energy wind farms; Power generation optimization; Operational stability; Intelligent management

0 引言

随着我国“双碳”目标的深入推进, 风电产业已成为电力系统低碳转型的重要支柱。装机容量的持续增长使得风场规模日益扩大, 传统单风机独立控制模式在提升整体发电效率、保障运行安全及适应电网弹性调峰等方面的局限性日益凸显, 其导致的功率波动剧烈、调节延迟、机械损耗加剧等问题, 制约了风电的大规模并网与高效消纳。

在此背景下, 多风机协同控制作为新一代风电场智能

优化的关键技术, 受到了广泛关注。该技术旨在通过风机间的信息互通与协调配合, 实现风场全局性能的最优, 从而突破单机控制的瓶颈。尽管已有大量研究聚焦于功率分配、负荷均衡与振动抑制等核心问题, 但在实际工程应用中, 仍面临信息传递延迟、多机动力学耦合等挑战。本文旨在系统阐述多风机协同控制的理论基础、关键技术、应用实践及工程价值, 为智能风电场的运行调度与优化管理提供理论参考与实践依据。

1 多风机协同控制理论基础

1.1 协同控制的基本原理

协同控制的核心理念源于系统科学中的协同学理论,强调通过子系统间的信息交互与协调行动,涌现出超越个体简单叠加的整体最优性能。在风场中,多风机协同控制通过通信网络与智能算法,将各台风电机组联结成一个具有自适应与自优化能力的群体系统。该系统通过实时共享风速、功率、状态等数据,并依据全局优化目标(如最大总发电量、最小功率波动、最小机械载荷)动态调整每台机组的运行参数(如转速、桨距角、偏航角),使各风机在不同风速与工况下协同工作,从而最大化风场的整体效能,并有效抑制尾流效应,降低疲劳损耗。

1.2 多风机系统的交互机理

在多风机系统当中,风机的相互影响规律对整个系统的表现优劣起着决定性作用。多个风机借助信息交换及协同反应,达成发电功率的合理分配和运行状态的灵活改变。各风机借助传感器及控制算法实行实时数据交换,其中包括风速风向和风机的运行状况等信息。

设风机*i*和风机*j*之间的信息交互量为 I_{ij} ,其与两者之间的距离 d_{ij} 、相对风速差 Δv_{ij} 等因素有关,可表示为 $I_{ij} = g(d_{ij}, \Delta v_{ij})$,其中 g 为信息交互函数。风机交换数据后,能很好地一同处理外界环境的改变和负荷需求,提升整体的发电效率和运行稳定程度。互相影响规律还包含降低气流干扰内容,通过改变风机位置距离及运行方法减少气动干扰作用,进而增加机械服务年限和运行可靠水平。多风机系统中这些互相影响规律是实现协同控制方法高效工作的基础。

1.3 协同控制对风场性能的影响机制

多台风机一起控制对整个风场表现出现作用的主要方面表现在发电效率高,运行稳定程度及机械设备使用年限长短这些部分,一同控制办法改良风机彼此影响过程,令每台风机获取风速数据与经受力量状况,整个风场降低单台风机运转时遭受气流变化干扰程度,如此增加全部风场发电能力大小。借助实时改变风机运行的各类参数来降低风机零件的磨损程度和振动大小程度,增加设备的可时间长度,大大提高风场工作的平稳水平和长期获取的经济收入数量,这一作用方式为现今风场实现智能操作和高效运行提供了重要的基础支撑。

2 新能源风场运行现状与需求

2.1 风场运行面临的主要挑战

风电场运行天然具有间歇性与波动性,给电网调度带

来压力。具体挑战包括:一是功率输出不稳定,受风速变化直接影响;二是尾流效应显著,导致场内部分风机效率低下、载荷不均;三是单机控制局限,难以实现全场负荷的优化分配与快速协调;四是电网要求提高,对供电质量、调峰能力及故障穿越能力提出更高标准。传统控制模式已难以应对这些挑战,亟需引入更智能的协同控制策略。

2.2 多风机协同控制的发展趋势

协同控制正朝着更智能化的智能化、自适应性与集成化发展。结合大数据、物联网、人工智能(AI)及数字孪生技术,未来协同控制系统将能够更精准地预测风速与风场流场,实现更快速的在线优化与实时控制,具备更强的抗干扰与容错能力,与场站级能量管理系统(EMS)、电网调度系统无缝集成,实现“源-网-荷”协同。模块化设计与自适应算法将使系统更能适应不同风场的地理与气候特点。

2.3 风场智能化管理需求分析

风场智能化管理需求分析着重于增加风场运行能力与稳定水平,风电技术进步且电网标准提高,传统人工管理方式已然很难满足实时数据处理与自动改变要求,智能管理要把先进监测调控技术用在风场运行过程里,借助传感器网络与众多数据分析相联合达成风机状态、天气变化还有发电量的精确预测和灵活分配。智能管理要搭建完整故障诊断和维护系统,提高设备使用效率减少运行开支增强风场整体竞争实力与顺应水平。

3 多风机协同控制的应用实践

3.1 风电机组负载分配优化策略

在很多风机共同控制的应用中,风电机组分配负荷的改良方式极为重要,负荷的合理分配可有效防止一些风机运行时负担过重或负担过小,增加整体发电效率,持续监测每台风机的运行状态和周边环境,采用先进的计算方法进行负荷分配,使各风机在不同风速条件下均能达到最佳运行状态。该方法包括实时调整风机的启动、停止阈值范围,以此应对短暂的风速波动,同时保证每台风机始终处于高效运行区间。负荷分配优化还包括对风场内部各机组气流干扰作用的评估,以减轻尾流效应带来的不利影响,这一种负荷改进不但增强了风场应对多种运行环境时的顺应性能,且增长风场总共带来的电力量,经由此类途径的施行降低了设备的磨损程度,拉长了风机的使用期限。

3.2 输出功率与运行稳定性提升技术

许多风机于风电场运行中被一同控制,借由增加发电机组共同发出的功率大小增强整个风电场运行的稳定程

度，且减轻电网的负担压力，通过发电机组输出功率提升方法减少各机组功率间的相互干扰，借助实时调整每台风机的输出功率和所承受的负荷，保证风电场总功率输出保持平衡，从而提高并入电网的质量。运行稳定程度借助协调每台风机面对风速改变时候反应快慢程度，可有效减少突然风速改变引发运行不稳定情况，增强风电机组面对恶劣天气抵抗能力，这种控制办法对新能源大规模接入电网的过程有较好助力作用，能有效推动智能风电场管理的长远进步。

3.3 振动抑制与机械磨损减缓措施

在多风机联合控制场景里，降低振动和减少机械磨损是提高风机持久性及风场稳定性的关键方案。采用自适应振动控制算法，通过实时改变风机转速 ω 和攻角 θ 依照当前风况条件展开最佳改变，减小风机互相气动干扰，使振动频率及振动大小得到削弱。设风机的振动加速度为 a ，其与转速 ω 和攻角 θ 的关系可表示为 $a=f(\omega, \theta)$ 。自适应振动控制算法的目标是通过调整 ω 和 θ ，使振动加速度 a 最小化，即优化目标函数为： $\min_{\omega, \theta} a=f(\omega, \theta)$ 同时满足风机的功率输出要求和其他约束条件。运用先进的传感器技术和控制算法对风机的运转状态展开监测与分析，达成事先预警和精准维修规划，延长设备的使用时长。上述方法不但可有效地降低维护开支，且还会提升风机的整体性能，为风场的稳定运行提供保障。

4 多风机协同控制的关键技术深化

4.1 基于模型预测控制 (MPC) 的协同策略

模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC) 在多风机协同控制中扮演着核心角色。MPC 通过建立风场的动态数学模型，预测未来一段时间内系统的行为，并求解最优控制序列。在风场中，MPC 可以综合考虑风速预测、尾流效应以及电网调度指令，实现全局优化。具体而言，MPC 控制器在每个控制周期内解决一个有限时域的最优控制问题，其目标函数通常包含最大化发电量、最小化功率波动和机械载荷。通过滚动优化和反馈校正，MPC 能够有效处理风场运行中的不确定性和约束条件，如风机功率上限、转速限制等，从而显著提升协同控制的实时性和鲁棒性。

4.2 极端工况下的协同控制

极端工况，如台风、雷暴或极端低温环境，对风场的安全运行构成严峻挑战。多风机协同控制在极端工况下需从“追求发电效率”转向“保障设备安全”。协同控制算法需要引入基于风险的决策机制，当预测到极端天气时，系

统应提前调整风机姿态（如顺桨、偏航），并协调各风机的停机顺序，避免因瞬时载荷过大导致结构损坏。此外，协同控制还需具备故障穿越能力，当某台风机因故障退出运行时，周边风机需协同调整运行策略，以补偿功率缺额并维持电网稳定。

5 工程价值及推广应用前景

5.1 对电网友好型接入的支撑作用

多风机协同控制通过提升风场自身的“可控性”与“可预测性”，使其从“问题源”转变为“解决方案的一部分”。具体支撑体现在：提供平滑、稳定的功率输出，减轻电网调频压力；具备快速功率调节能力，可提供辅助服务；增强高/低电压穿越能力，提升电网安全稳定性。这为更高比例新能源接入奠定了技术基础。

5.2 协同控制在风场智能管理中的作用

协同控制是风场智能管理系统的“中枢神经”。它汇聚气象、设备状态等多源数据，通过智能算法形成协同控制指令，驱动风场整体高效、稳定、安全运行。它使得风场从“一群独立风机”进化为“一个智能发电有机体”，实现了从单机监控到场群协同优化的飞跃，是提升风场全生命周期经济效益的关键。

5.3 推广应用面临的挑战与可行路径

多风机协同控制欲广泛运用面临诸多困难，包括技术融合复杂、前期投入资金高，以及风电场工况变化大，这一种情况要求开发协调控制算法，必须达成性能优异和花费低廉二者平衡，应加大技术研究力度，制定统一标准设计和具体执行方案以减少结合难和资金消耗，政府扶持再加上企业联合，这无疑推动这一种控制方式能众多使用的核心方法。政府扶持再加上企业联合：提供资金补贴和采取优惠措施，会加速技术的传播和应用。

6 案例分析：某大型风电场协同控制改造效果

为了验证多风机协同控制的实际效果，本文选取了某位于西北地区的大型风电场作为案例进行分析。该风电场装机容量为 200MW，包含 100 台 2MW 风力发电机组。在实施协同控制改造前，该风场采用传统的单机独立控制模式，存在明显的尾流损失和功率波动问题。

改造方案：引入了基于 MPC 的多风机协同控制系统，系统集成了 SCADA 数据、气象预报数据和电网调度指令。控制系统每 5 分钟进行一次全局优化计算，动态调整各风机的功率设定点和偏航角度。

效果对比：（1）发电量提升：实施协同控制后，全场

年等效满发小时数从原来的 2200 小时提升至 2350 小时,增幅约 6.8%。这主要得益于尾流效应的有效抑制和负荷的均衡分配。

(2) 功率波动降低: 并网点功率的 10 分钟波动率从改造前的 15% 降低至 8% 以下, 显著提升了电网的接纳能力。

(3) 设备维护成本: 通过对振动和载荷的协同抑制, 关键部件(如齿轮箱、叶片)的故障率下降了约 20%, 延长了设备的大修周期。

该案例充分证明了多风机协同控制在提升风场经济性和安全性方面的巨大潜力。

7 结语

本文全面剖析了新能源风场中多风机协同控制技术, 明晰其在增加发电功率加快响应速度和抑制振动方面的显著优势, 依照研究结果该技术增强了风场整体运行及并网的能力, 显著降低了功率波动对电网安全的影响, 同时也有效地减缓了机械部件的磨损, 虽然在应用中仍存在通信延迟、负载分配算法优化以及大规模接入稳定性等挑战, 硬件和智能管控系统也尚待深层次精进, 不过将来研究能关注在实时性的增加、自顺应算法的创新, 及和新能源

多元并网技术的融合方面, 因而为风场智能调度及清洁能源高效利用给予理论和工程上的帮助。本文为风力发电智能化管理与可持续进步筑牢了坚实基础。

参考文献:

- [1] 孔宏鑫. 新能源风光发电功率预测模型分析[J]. 电子测试, 2022,(06):39-41.
- [2] 李龙敏. 新能源风电项目成本控制分析[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)经济管理, 2022,(07).
- [3] 李可雨, 王峰, 蔡德胜等. 新能源发电协同参与配电网无功优化控制技术[J]. 供用电, 2023,40(04):15-22.
- [4] 张建华, 刘伟. 风电场多机组协同控制技术研究进展[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(10): 1-10.
- [5] 陈刚, 王磊. 基于模型预测控制的风电场功率优化分配策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4801-4812.
- [6] Johnson K E, Thomas N. Wind Farm Control: Addressing the Aerodynamic Interaction among Wind Turbines[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2009, 29(2): 44-52.