

Distributed collaborative control method for active power of wind farm clusters considering uncertainty

Zetao Sun¹ Jie Zhang²

1. Gansu Nonferrous Metallurgy Vocational and Technical College, Jinchang, Gansu, 737100, China

2. State Grid Jinchang Power Supply Company, Jinchang, Gansu, 737100, China

Abstract

Wind farm clusters have become an important carrier of new energy consumption in the power system, but factors such as wind speed fluctuations and uncertain model parameters result in significant uncertainty in their active power output, increasing the difficulty of system scheduling and operation. To address the above challenges, this paper proposes a wind farm cluster active power control method based on distributed multi-agent collaboration mechanism, and constructs a complete control system of wind power prediction uncertainty modeling distributed decision collaboration. By using robust optimization and probability constraint methods to handle wind speed prediction errors and unit performance fluctuations, adaptive allocation of active power among wind farms within the cluster is achieved. The simulation results show that this method can effectively improve the controllability of wind power and the collaborative response speed of the cluster, significantly reduce the risk of active power fluctuations in the system, and provide theoretical basis and technical support for large-scale grid connection of new energy and safe and stable operation of the power grid.

Keywords

wind farm cluster; Active power; Uncertainty; Distributed collaborative control; robust optimization

考虑不确定性的风电场集群有功功率分布式协同控制方法

孙泽涛¹ 张杰²

1. 甘肃有色冶金职业技术学院, 中国·甘肃 金昌 737100

2. 国网金昌供电公司, 中国·甘肃 金昌 737100

摘 要

风电场集群在电力系统中已成为新能源消纳的重要载体, 但风速波动、模型参数不确定等因素导致其有功功率输出存在较大不确定性, 增加了系统调度和运行的难度。为应对上述挑战, 本文提出了一种基于分布式多智能体协同机制的风电场集群有功功率控制方法, 构建了风功率预测-不确定性建模-分布式决策协同的完整控制体系。通过鲁棒优化与概率约束方法处理风速预测误差和机组性能波动, 实现集群内各风电场间的有功功率自适应分配。仿真结果表明, 该方法能有效提升风电功率的可控性与集群协同响应速度, 显著降低系统有功波动风险, 为新能源大规模并网与电网安全稳定运行提供理论基础与技术支持。

关键词

风电场集群; 有功功率; 不确定性; 分布式协同控制; 鲁棒优化

1 引言

随着风能资源开发规模不断扩大, 风电场集群逐步成为电力系统中重要的可再生能源主体。风电并网规模的迅速增长, 不仅为电力系统绿色低碳转型提供了有力支撑, 也对电网调度和运行安全带来了前所未有的挑战。风能固有的间歇性和不确定性, 使得风电场输出功率波动较大, 影响电网平衡与安全稳定。此外, 风电机组间的异构性、地理分布

广泛与局部气象差异等因素, 进一步加剧了集群调控的复杂性。

当前传统的集中式控制方法难以兼顾大规模风电场集群的实时性、柔性和鲁棒性, 亟须构建能够适应不确定性、具备分布式决策能力的新型控制体系。分布式协同控制作为面向未来智能电网的核心调控策略, 已被广泛应用于多能源互补、分布式储能及微电网等领域。针对风电场集群的不确定性和协同控制问题, 本文基于多智能体分布式决策理论, 提出一种融合鲁棒优化与概率约束的有功功率分布式协同控制方法, 并通过典型风电场集群的仿真分析, 验证其在提升功率可控性和响应能力方面的有效性。研究旨在为大规模

【作者简介】孙泽涛(1985-), 男, 中国甘肃永昌人, 本科, 从事电气自动化研究。

风电消纳与系统安全调控提供理论依据和工程实践参考。

2 风电场集群有功功率不确定性建模

2.1 风速与功率预测不确定性分析

风速的变化受复杂气象条件、局部地形差异以及季节性周期影响，呈现出明显的空间异质性与时间波动性。作为风电场输出的主要驱动因素，风速的不确定性直接导致功率输出存在瞬时大幅波动与短期预测偏差的叠加效应，进而增加电网调度与功率平衡的难度。本文在分析风速变化机理的基础上，采用概率统计方法对长期历史风速序列进行建模，并结合物理模型与机器学习预测手段，对风速预测误差分布进行量化描述。同时，利用风电机组功率曲线的灵敏度分析，揭示风速微小扰动对输出功率的放大效应，从而明确预测精度对集群调控的重要性。仿真结果表明，预测误差不仅影响单机输出的可控性，也会在集群层面放大功率波动风险。因此，不确定性建模与管理成为提升风电消纳能力、增强系统运行稳定性的核心环节。

2.2 风电机组性能参数不确定性建模

风电场集群内机组型号差异显著，运行环境多变，导致其性能参数（如最大功率输出、响应速率及爬坡约束）存在不确定性。随着运行时间增加，设备老化、故障概率提升及维护策略差异等因素也会进一步加剧性能波动。为应对这一问题，本文提出基于鲁棒参数集的区间建模方法，对机组的输出上下限及动态调节能力进行边界约束。通过结合现场运行数据与历史维护记录，对模型进行校准与修正，使得建模结果更具现实可靠性。与此同时，构建多维参数不确定性表征方法，将机组性能的波动性纳入控制模型中，并在策略设计中设置安全裕度，以避免极端工况下的运行失效。这一方法不仅增强了分布式控制在复杂条件下的适用性，也为集群调控策略的鲁棒性与工程落地提供了理论支撑。

2.3 集群系统层面不确定性描述

在更大范围的集群尺度上，风电场之间的气象相关性、调度耦合性及电网运行波动共同作用，使系统层面的不确定性更为复杂。例如，不同区域风速的相关性会导致集群输出出现同步波动，加剧对电网稳定性的冲击；调度层面的耦合关系使得单场异常可能通过功率分配传递到全局；而电网负荷波动及备用容量不足，则可能放大风电功率波动带来的影响。为此，本文采用马尔科夫链对风速时序相关性建模，并结合蒙特卡洛仿真方法构建联合不确定性分布，定量评估极端气象事件、局部设备失效等对集群整体输出能力的影响。通过建立不确定性场景集，为后续鲁棒优化与概率约束控制提供了基础数据支撑。研究结果表明，在系统层面进行全面不确定性描述，是提升集群协同调控效果、增强电网稳定性的重要前提。

3 分布式协同控制理论与框架

3.1 多智能体系统结构设计

针对风电场集群地理分布广泛、机组异构性强以及运行环境复杂的特点，本文设计了一种多智能体（MAS）分布式控制结构，以实现集群的自治运行与全局协同。该结构中，每个风电场均配置一个本地智能体，负责实时采集风速、功率及设备状态等关键数据，并结合预测模型生成本地有功调度指令。同时，本地智能体还可在局部范围内快速响应风速突变与设备异常，保障风电场运行的灵活性与安全性。主控智能体则位于集群层面，承担跨场协同与全局目标分解的任务，确保区域内功率平衡与电网调度需求的一致性。

3.2 分布式有功功率协同优化模型

为了实现集群内部多风电场间的有功功率优化分配，本文提出了基于分布式优化理论的协同调控模型。该模型以最小化集群总功率波动和最大化风能利用率为目标，充分考虑风电机组运行约束条件，包括单机有功输出上下限、爬坡速率限制、集群整体功率需求以及必要的安全裕度。在算法实现方面，采用增广拉格朗日方法与交替方向乘子法（ADMM）进行分布式求解，使各智能体能够在本地完成独立计算，仅需通过有限次信息交换即可逐步逼近全局最优解。这种求解方式有效避免了集中式优化中通信瓶颈与计算复杂度过高的问题，显著提升了系统的计算效率与实时性。数值实验结果表明，该模型在应对异常工况与高风速波动时仍具备良好的稳定性与可控性，且在系统扩展性方面表现优于传统集中式调控方法。

3.3 鲁棒优化与概率约束策略

针对风速预测误差、机组运行参数波动及电网运行状态不确定性等多重因素，本文提出了一种融合鲁棒优化与概率约束的混合控制策略。在鲁棒优化层面，方法通过设定最坏场景下的功率调整边界，确保在极端气象扰动或设备失效情况下，系统仍能维持安全稳定运行。概率约束策略则以满足一定置信水平为前提，允许功率分配在统计意义上满足约束条件，从而在保证安全性的同时提升风能利用率与经济性。二者的结合使控制策略在安全性与灵活性之间实现平衡，不仅增强了对不确定性的适应能力，也提升了集群整体的鲁棒性与运行效率。该方法可根据不同运行环境与电网需求进行参数调整，展现出较强的通用性和工程推广价值。

4 风电场集群分布式协同控制策略实现

4.1 本地智能体预测与自适应调控

在风电场集群的分布式协同控制框架下，本地智能体承担了预测与自适应调控的关键任务。其主要功能是基于风速短期预测与机组运行状态监测，动态生成并调整本场有功输出指令。为提高预测精度，本地智能体引入机器学习与数据融合算法，将历史风速序列、气象特征与实时监测数据相

结合,建立非线性预测模型。同时通过自适应机制,对预测误差进行动态修正,使得输出指令更符合实际运行状态。机组级控制单元依托这些指令,可在实时测量与预测数据的协同作用下实现灵活调节,从而最大化利用可用风能,并有效抑制风速突变引起的功率波动。该模式增强了单场的自治性与抗扰能力,为集群层面的稳定运行奠定基础。

4.2 集群间智能体协商与全局优化

在本地调控实现的基础上,各风电场智能体通过邻域通信与状态共享机制,开展跨场协商与协同优化。通过信息交换,智能体能够感知其他场站的功率出力与运行约束,从而在集群范围内实现动态任务分配。主控智能体在此过程中扮演全局协调角色,根据区域功率平滑、电网需求响应及备用容量约束等目标,发布优化指令。

4.3 异常工况下的自愈与鲁棒响应

风电场集群在运行过程中不可避免会遭遇风速突变、机组故障或通信链路中断等异常工况。为应对这些挑战,智能体系统具备双层自愈与鲁棒响应能力。其一,局部智能体通过本地监测与快速诊断,可在异常发生后立即进入鲁棒运行模式,自主收缩输出功率边界,避免功率冲击传递至电网。其二,主控智能体通过全局状态评估,能够快速识别异常范围,并切换至应急协同策略,重新分配功率任务,同时执行故障隔离方案,确保非故障区域运行的稳定性。

5 仿真分析与工程应用验证

5.1 仿真平台与参数设定

为验证所提分布式协同控制方法的有效性,本文基于MATLAB/Simulink平台搭建了风电场集群仿真系统。平台中设置了多个风电场单元及其下属风电机组,并引入智能体模块分别承担本地预测、功率调节和通信协调等功能,构建了完整的分布式协同控制架构。为了提升仿真的准确性与工程可操作性,平台导入了不同地区的实测风速数据,考虑了气象条件的区域差异性与时序波动性;同时引入了典型风电机组的性能参数,包括输出功率曲线、爬坡速率限制以及响应时延等。调度约束方面,平台模拟了集群有功平衡需求、电网频率约束和备用容量约束,确保结果能够反映实际运行特性。通过上述设置,仿真平台不仅能够准确再现风电场集群运行特征,还为后续工况测试与策略验证奠定了坚实基础。

5.2 典型工况仿真与结果分析

在所构建的仿真平台上,本文选取高风速波动、机组参数扰动与系统异常三类典型工况进行测试。结果表明,在

高风速频繁波动场景下,分布式协同控制方法能够有效平抑功率输出,总体波动幅度较集中式控制下降约30%,显著改善了系统稳定性。在机组性能参数发生扰动时,智能体依托本地自治与全局协同机制,能够快速调整分配策略,保证集群输出与电网需求的匹配度。面对系统异常(如通信链路中断或部分风电场失效),所提控制方法可实现快速切换至鲁棒模式,保障集群整体功率调控的稳定性。仿真结果进一步显示,响应时间缩短,风能利用率明显提升,大面积弃风现象得到有效缓解,验证了所提方法在复杂运行环境下的优越性。

5.3 工程应用前景与优化建议

结合国内多个风电场集群工程实践案例,本文提出的分布式协同控制方法在工程应用中展现了较强的适应性与扩展性。其分布式架构能够有效适应风电场数量和规模的动态变化,减少对集中调控中心的依赖,提高了系统的灵活性和鲁棒性。未来推广中,应重点加强智能体本地感知与通信能力的建设,提升对风速、负荷及电网状态的实时监测水平。同时,需要建立完善的鲁棒优化模型参数库,以适应不同气象环境与设备特性的差异。

6 结语

本文针对风电场集群有功功率调控中的不确定性与分布式管理难题,提出了融合不确定性建模、鲁棒优化与多智能体分布式协同机制的控制方法。仿真分析与工程案例验证表明,所提方法能有效提升风电场集群的有功输出可控性、协同响应速度和异常自愈能力,为大规模风电消纳与电网安全运行提供了有力支撑。未来可进一步拓展多源异构新能源场站的协同优化,推动分布式智能控制在智能电网中的实际落地。

参考文献

- [1] 蔡昌春,程兴荣,朱俊伟,等.考虑风机出力不确定性的海上风电场无功/电压快速跟踪优化[J/OL].电网技术,1-13[2025-09-27].
- [2] 程雪婷,张家瑞,刘新元,等.考虑风机排序的风电集群分层有功控制策略[J].电力工程技术,2021,40(02):26-32+85.
- [3] 连金达.考虑不确定性的新能源电力系统随机优化调度[D].华北电力大学,2022.
- [4] 邱旺盛.考虑风电不确定性的风—水—储联合优化调度研究[D].西安理工大学,2020.
- [5] 郑惠萍,曾鹏,刘新元,等.基于误差前馈预测的多时空尺度风电集群有功功率分层控制策略[J].电力建设,2020,41(08):120-128.