

基于风场聚合效应的风电机组 稳定运行控制方法

李建林 高 坡 刘志强
(国华(山西)新能源有限公司)

摘要：为有效地控制风电机组的运行状态，确保其在各种工况下都能保持高效、稳定的运行，基于风场聚合效应，开展了风电机组稳定运行控制方法研究。首先，采集风电机组运行相关数据，提取与设备状态密切相关的特征信息，进而识别风电机组运行状态；其次，根据风电机组频率偏离阶段与频率恢复阶段，设计风电机组动态频率控制权重系数，优化风电机组在动态频率控制中的表现；在此基础上，利用 Copula 函数，描述风速数据之间的相关性结构，建立风场聚合模型，基于风电机组的转速和功率输出特性，对其稳定运行作出控制。实验结果表明，该方法应用后，能够更有效地减少风电场输出功率的波动，具有较强的适应性和鲁棒性，可以显著提高风电场的稳定运行能力。

关键词：风场聚合效应；风电机组；稳定；运行；控制；输出功率

2025.02.DQGY
39

0 引言

风力发电技术作为风能利用的重要手段，其发展和应用对于促进能源结构的转型、实现碳中和目标具有重大意义。风电机组作为风力发电系统的核心组成部分，其稳定运行直接关系到整个风电系统的发电效率和经济效益。在风电技术的不断进步和风电市场快速发展的背景下，风电机组的单机容量和发电效率不断提升。然而，风电机组在运行过程中面临着诸多挑战，如风速的随机性和波动性、极端气候条件的影响、设备老化及故障等，这些都可能对风电机组的稳定运行造成不利影响。因此，有效地控制风电机组的运行状态，确保其在各种工况下都能保持高效、稳定的运行，成为当前风电领域亟待解决的关键问题。现

阶段，针对风电机组稳定运行控制方面的研究日益成熟，且取得了一定的研究成果。但是，传统的控制方法在实际运行中仍然存在不同程度的不足。其中，文献[1]提出的方法通过虚拟同步控制参数优化，实现风电机组稳定运行控制。该方法的控制效果有限，难以完全适应复杂多变的风速条件。文献[2]提出的方法基于反馈控制原理对风电机组的运行工况作出实时控制，虽然可以在一定程度上保障机组的安全运行，但在复杂工况下的运行效率和稳定性难以达到最优。

风场聚合效应是指在一个风场内，由于机组间地理位置、风速分布、风向变化等因素的相互作用，导致整个风场的输出特性与单个机组的输出特性存在显著差异的现象^[3]。在风电机组稳定运行控制中，可以

充分利用风场聚合效应的互补性，实现对风场整体输出特性的有效控制，提高整个风场的发电效率^[4]。基于此，本文利用风场聚合效应，开展风电机组稳定运行控制方法研究。

1 风电机组运行状态识别

运行状态识别是风电机组稳定运行控制中的重要环节，为后续控制提供指导方向。首先，明确需要收集风电机组状态数据的具体时刻。这个时刻可以是实时的，也可以是历史某个时间点。其次，列出需要收集的具体数据项，如输出功率、自然风速、桨距角等。根据数据特性，将采集频率设置为5Hz。启动数据采集设备，开始收集目标时刻的风电机组状态数据。数据中心实时接收从数据采集设备传输过来的数据，并对数据进行校验^[5]。对于缺失值，可以采用插值法进行填充，公式如下：

$$y = y_1 + \frac{(x - x_1) \times (y_2 - y_1)}{x_2 - x_1} \quad (1)$$

式中， y 为插值结果； x 为插值点； (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 均为已知的数据点。对插值后的数据进行标准化处理，公式如下：

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

式中， x 为原始值； $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 分别为风电机组运行数据的最大值与最小值。通过标准化处理，消除数据存在的量纲影响。将标准化处理后的数据按照预定的格式和规则存储在数据中心的相应位置。

对风电机组运行状态信号进行维数压缩和去冗余处理，提取与设备状态密切相关的特征信息，如功率波动、风速响应特性等^[6]。基于粒子群算法，确定风电机组运行数据集的初始聚类中心，并进行聚类，形成多个数据簇，代表对应的运行状态^[7]。根据各数据簇的统计量，制定判别准则，基于各风电机组的状态

数据所属的数据簇，识别并判断其运行状态（包括正常、低效率、故障等）。

2 风电机组动态频率控制权重系数设计

风电机组运行状态识别完毕后，获取到当前机组的运行状态（包括正常、低效率、故障等），对风电机组动态频率控制权重系数进行设计，为后续机组稳定运行控制奠定良好的基础。

在风电机组系统频率响应的过程中，针对 $\frac{df}{dt}$ 及 Δf 的动态特征，灵活调整机组的虚拟下垂控制与虚拟惯性控制的参数设置^[8]。为优化控制效果，本文引入惯性控制权重系数 λ_d 和下垂控制权重系数 λ_p ，并确保在整个控制流程中维持两者权重和满足 $\lambda_d + \lambda_p = 2$ 的约束条件。在此框架下，风电机组通过惯量控制所提供的附加功率 ΔP 可以进一步表达为与上述权重系数相关的函数形式，如下所示：

$$\Delta P = \left(\lambda_d K_{df} \frac{df}{dt} + \lambda_p K_{df} \Delta f \right) \delta \quad (3)$$

$$\delta = \frac{\omega^2 - \omega_{\min}^2}{\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2} \quad (4)$$

式中， δ 为风电机组运行过程中转子的动能反馈系数，该系数能够有效地避免风电机组出现转子动能过度释放的情况； $\omega_{\max}$ 、 $\omega_{\min}$ 分别为风电机组转子转速运行的上限与下限。

风电机组频率响应如图1所示。

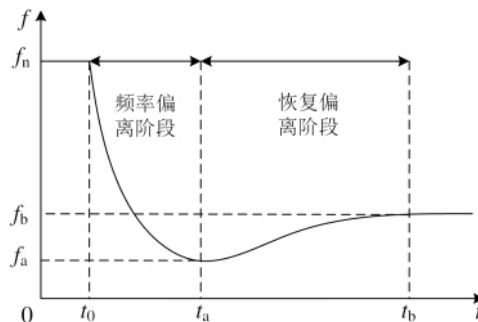


图1 风电机组频率响应示意图

图 1 中, t_0 为风电机组运行扰动发生的时刻; t_a 为风电机组频率变化极值点对应的时刻; t_b 为风电机组运行到达一次调频稳态频率对应的时刻^[9]。通过图 1, 可以将风电机组频率响应区间划分为两个不同的阶段。不同阶段应选择适合风电机组的动态频率控制策略, 其对应的惯性控制权重系数 λ_d 和下垂控制权重系数 λ_p 存在一定的差异。其中, 在风电机组频率偏离阶段, 即 $t_0 < t < t_a$ 时段, 将惯性控制权重系数 λ_d 设置为较大的数值, 调整不同控制目标之间的优先级和平衡关系, 削弱虚拟惯性控制的权重占比, 模拟同步发电机的惯量特性来提供频率支撑。在风电机组频率恢复阶段, 即 $t_a < t < t_b$ 时段, 将下垂控制权重系数 λ_p 作为主导, 通过调整下垂特性的斜率和响应速度, 控制风电机组的输出功率来响应系统频率的变化, 促进机组频率的快速恢复。

通过合理的权重系数设计, 可以优化风电机组在动态频率控制中的表现, 提高电力系统的稳定性和经济性。

3 基于风场聚合效应的风电机组稳定运行控制

在上述风电机组动态频率控制权重系数设计完毕后, 有效地强化了风电机组的频率支撑效果, 改善了机组频率偏差问题。在此基础上, 利用风场聚合效应, 对风电机组稳定运行进行全方位的控制。

首先, 使用风速测量设备在风电场内的不同位置采集风速数据。对每个位置的风速数据进行统计分析, 确定其边缘分布类型。利用 Copula 函数, 描述风速数据之间的相关性结构。设随机变量 $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 的边缘分布函数分别为 $(F_1(X_1), F_2(X_2), \dots, F_n(X_n))$, 它们的联合分布函数为 $(F(X_1, X_2, \dots, X_n))$, 则存在一个函数 $C: [0, 1]^n \rightarrow [0, 1]$, 使得:

$$F(X_1, X_2, \dots, X_n) = C(F_1(X_1), F_2(X_2), \dots, F_n(X_n)) \quad (5)$$

$$C(u_1, u_2, \dots, u_n; \rho) = \Phi_R(\Phi^{-1}(u_1), \Phi^{-1}(u_2), \dots, \Phi^{-1}(u_n)) \quad (6)$$

式中, C 为 Copula 函数; Φ 为标准正态分布函数; Φ^{-1} 为逆函数; Φ_R 为相关系数为矩阵 R 的 n 维正态分布函数; ρ 为风速数据之间的相关系数矩阵^[10]。通过引入 Copula 函数对风场内风速的相关性进行分析, 建立风场聚合模型, 更准确地描述风电场内风速的时空分布特性和风速之间的相关性。在此基础上, 求解风场聚合模型, 得到风场整体输出功率, 公式如下:

$$P_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N P_i(v_i, \theta_i, S) \quad (7)$$

式中, P_{total} 为风场整体输出功率; v_i 为第 i 台风电机组处的风速; θ_i 为风向角; S 为其他参数, 包括风电机组的额定功率、转速、叶片桨距角等。根据风电机组的转速和功率输出特性, 调整风电场内风电机组的数量、布局, 实时控制转速以追踪最大功率点。

综上, 基于风场聚合效应的风电机组稳定运行控制是一个综合性的过程, 旨在通过考虑风场内不同风电机组之间的相互作用和风速变化, 优化风电机组的运行, 以提高整个风场的稳定性和效率。

4 实验分析

4.1 实验准备

选取一个包含 10 台风电机组的小型风电场 A 作为研究对象。该风电场总面积为 10km^2 , 呈矩形布局, 长 4km , 宽 2.5km , 位于北纬 40° , 东经 120° 的开阔地带, 该区域年平均风速约为 7m/s , 具有典型的风速日变化和季节性变化特征。风电场内布置有 10 台风电机组, 编号为 WT1~WT10。所有风电机组均为同一型号的 2MW 级风力发电机组, 采用三叶片水平轴设计。每台风电机组的轮毂高度均为 80m , 叶片长度为 50m 。风电机组参数介绍如表 1 所示。

表 1 风电机组参数

序号	项目	参数
1	额定功率	2MW
2	切入风速	3m/s
3	额定风速	12m/s
4	切出风速	25m/s
5	调节范围	机组转速可根据风速变化在 8~20r/min 之间调节; 桨距角可从 0° (最大风能捕获) 调整至 90° (完全失速保护), 用于控制高速下的输出功率。

风电场通过一条 110kV 高压输电线路接入当地电网, 接入点位于风电场的东南部, 靠近电网变电站。基于历史气象数据和地形特征, 为风电场内的每台风电机组设置不同的初始风速值, 风速差异模拟实际风场中的风速变化梯度。所有机组在实验开始前均处于待机状态, 转速为 0, 桨距角设置为最大风能捕获角度 (0°或接近 0°)。

通过上述实验样本对象描述, 为基于风场聚合效应的风电机组稳定运行控制方法的实验提供了具体的数值和场景设定, 为实验奠定了基础。

4.2 控制结果分析

在上述实验准备完毕的基础上, 应用上文提出的风电机组稳定运行控制方法, 开展实验。为了评估本文提出的基于风场聚合效应的风电机组稳定运行控制方法 (方法 A) 的效果, 将其与两种传统控制方法 (方法 B: 文献 [1] 方法; 方法 C: 文献 [2] 方法) 进行对比。实验在模拟的小型风电场环境中进行, 通过 Simulink 仿真平台搭建风电场和电网的模型, 并设置不同的风速场景进行测试。设计 6 组不同的风速场景, 以全面测试控制方法的适应性。在每种风速场景下, 分别应用三种方法进行仿真运行, 记录风电场的输出功率数据。对仿真得到的输出功率数据进行处理, 计算每种控制方法下的输出功率标准差, 作为评估稳定性的主要指标。输出功率标准差计算公式如下:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8)$$

式中, n 为输出功率数据的数量; $\bar{x}$ 为数据的平均值。风电机组运行输出功率标准差对比结果如图 2 所示。

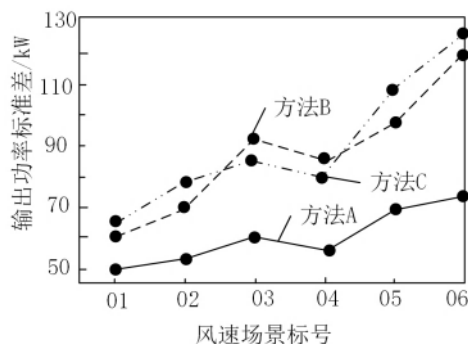


图 2 风电机组运行输出功率标准差对比结果

图 2 中, 01 表示稳定风速场景; 02 表示渐变风速场景; 03 表示突变风速场景; 04 表示周期性风速场景; 05 表示复杂多变风速场景; 06 表示极端风速场景。通过图 2 的对比结果可以得知, 在所有风速场景下, 本文提出的控制方法的输出功率标准差均低于两种传统控制方法, 特别是在复杂风速条件和极端条件下, 也能保持相对较低的输出功率波动, 表明该方法能够更有效地减少风电场输出功率的波动, 适应性和鲁棒性较强, 能够显著提高风电场的稳定运行能力。

5 结束语

风电机组的稳定运行控制方法的研究是风电领域的重要课题之一。通过本研究的深入探索和实践应用, 可以为风电场的优化调度和运行策略的制定提供科学依据和技术支持, 推动风电技术的持续进步和风电产业的健康发展。展望未来, 随着新能源的大规模接入和电力系统的不断升级, 风电机组在电网中的作用将愈发重要。因此, 继续深化对风场聚合效应的研究, 优化风电机组的控制策略, 将是保障电力系统安

全稳定运行的关键。期待在未来的研究中，能够进一步探索更加先进、智能的控制技术，以应对更加复杂多变的电力系统运行环境，为实现绿色低碳的能源发展目标贡献力量。

参考文献

[1] 曹俊英, 姚骏, 刘育明, 等. 考虑一次调频死区的风电机组虚拟同步控制参数优化研究 [J]. 电工电能新技术, 2023, 42 (12): 29-38.

[2] 胡阳, 王蔚然, 房方, 等. 风电机组运行动态数字孪生建模及半物理仿真 [J]. 系统仿真学报, 2024, 36 (3): 636-648.

[3] 熊浩, 葛亚明, 黄曲梁, 等. 考虑风电机组调控潜力的交直流有功功率协调控制策略 [J]. 南方电网技术, 2023, 17 (8): 37-47.

[4] 李臻博, 代林旺, 李少林, 等. 双馈风电机组电压源电流源双模式运行平滑切换控制策略 [J]. 电气传动, 2022, 52 (22): 13-20.

[5] 李世春, 申骛, 薛臻瑶, 等. 考虑权重系数的风电机组动态频率控制策略 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35 (6): 22-29.

[6] 邓桢彦, 王伟, 王晗, 等. 电压源风电机组的全风速段惯量响应控制 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42 (S1): 12-25.

[7] 吕金历, 冯智慧, 孙亚璐, 等. 直流微电网中风电机组的双向扩展惯性控制方法 [J]. 电网与清洁能源, 2022, 38 (6): 89-97.

[8] 葛畅, 阎洁, 刘永前, 等. 海上风电场运行控制维护关键技术综述 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42 (12): 4278-4292.

[9] 陈继明, 王元皓, 李其莹, 等. 基于低电压穿越能力评价的双馈风电机组风电场无功出力控制 [J]. 太阳能学报, 2021, 42 (4): 466-472.

[10] 秦世耀, 代林旺, 王瑞明, 等. 考虑风电机组功率跌落和机械载荷优化的虚拟惯量控制方法 [J]. 电网技术, 2021, 45 (5): 1665-1672.

(收稿日期: 2024-07-19)