

风力发电与储能系统的协调控制策略研究

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：在能源转型与碳中和目标背景下，风力发电因清洁、可再生等特性成为重点方向。但风能的随机性与波动性影响电网稳定。储能系统的引入可有效平滑功率、提升稳定性。本文分析风电功率特性与储能动态特征，构建基于风速预测的功率平滑与能量分配模型，提出双层协调控制体系。仿真结果表明，该策略能有效抑制波动、提升频率稳定与能量利用率，为风电并网提供理论与工程参考。

关键词：风力发电；储能系统；协调控制；功率平滑；能量管理

DOI：10.64216/3080-1508.25.12.047

引言

风力发电作为最成熟的可再生能源发电形式之一，已在全球能源体系中占据重要地位。近年来，随着大规模风电场的建设与并网比例的提升，电力系统面临着由风能固有的波动性和间歇性带来的功率波动、频率偏移及电压不稳定等问题。传统电网调频手段难以完全消除这种波动性，导致系统运行的安全裕度下降。为了增强电网对风电波动的承受能力，引入储能系统成为风电并网的重要解决方案。储能设备具有快速响应和双向调节特性，可在风功率输出过剩时吸收多余能量，在功率下降时释放能量，从而实现功率平滑与系统稳定。

目前，国内外针对风储系统的研究主要集中在储能选型、控制策略与能量优化管理等方面。学者们普遍认为，风储协调运行的关键在于建立合理的控制机制，实现风电输出与储能充放电的动态匹配。然而，现有研究多聚焦于单机系统或静态控制模型，对多层级电网环境下风储耦合特性与协调优化缺乏深入研究。本文基于风储系统的动态特性，从功率分配、能量优化与控制策略三个层面展开分析，提出一套适用于多场景运行的风储协调控制体系。研究目标在于实现风储系统的高效能量利用、平滑输出及电网稳定支撑，为高比例风电并网提供系统化技术方案。

1 风力发电与储能系统的理论基础

1.1 风力发电功率特性分析

风力发电机组通过叶片捕获风能，将其转化为机械能并经发电机输出电能。风能功率计算公式为：

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p$$

其中， ρ 为空气密度， A 为风轮扫掠面积， v

为来流风速。由于风速与功率呈立方关系，哪怕风速的微小波动也会导致机组输出功率出现显著变化，造成风电系统输出的非平稳特性。风力机输出功率可进一步表示为：

$$P_t = C_p(\lambda, \beta) \frac{1}{2} \rho A v^3$$
$$C_p(\lambda, \beta) = \frac{16}{27} \lambda^3 \left(\frac{\beta + 1}{\beta + 2} \right) \left(\frac{\beta + 1}{\beta + 2} \right)^2$$

其中， C_p 为功率系数，取决于叶尖速比 λ 与桨距角 β 的匹配程度。理论上，贝茨极限规定了 $C_p \leq 0.593$ ，但在实际运行中，由于叶片气动损失、尾流效应、机械摩擦以及控制系统延迟等因素的影响，功率系数通常在 0.3~0.45 之间。风速的不确定性使得风电机组输出功率呈现出强烈的随机性与波动性，容易引起电压闪变、频率偏移及并网功率不稳定等问题。此外，空气密度、湍流强度、海拔高度以及叶片污染等外部环境因素也会对风能转换效率产生重要影响。风电场的整体运行稳定性取决于风能资源特征、机组控制策略、变桨与变速调节性能以及电网接入条件之间的综合耦合关系。为了实现风电系统的最优运行，需要对机组功率特性曲线进行精确建模，考虑风速分布、叶轮动态响应及电机效率等多因素，才能为后续的储能匹配与功率控制策略提供可靠的理论基础。

1.2 储能系统的功能与动态特性

储能系统在风电并网中发挥着至关重要的调节与支撑作用，其核心功能包括能量平衡、功率调节、频率支撑以及应急备用。通过在风功率波动时快速响应，储能可有效吸收风功率过剩部分或在风速下降时释放能量，从而实现输出功率平滑化与系统稳定化。常用储能

形式主要包括电化学储能（如锂电池、钠硫电池、液流电池）、机械储能（如飞轮储能、压缩空气储能）和电磁储能（如超级电容器、超导磁储能）等。不同类型储能在能量密度、功率密度、循环寿命及经济性方面存在差异。例如，锂电池储能响应速度快、效率高、能量密度大，适用于中短期功率调节；而超级电容器储能具有毫秒级响应特性，更适用于瞬态功率补偿。储能装置的功率—能量曲线表征其可运行区域，而其充放电控制策略直接决定系统的动态性能与安全性。为了维持系统能量平衡，储能系统需根据风电功率波动实时调节输出，其控制目标是 최소화功率偏差、稳定电网频率并保持 SOC（荷电状态）在合理范围内。若 SOC 过高，储能无法继续吸收多余能量；若 SOC 过低，则会导致储能失效或寿命衰减。因此，动态 SOC 管理算法成为储能控制的关键。近年来，随着智能控制与功率电子技术的发展，储能系统逐步实现了自适应控制与预测调节，可根据风速趋势、负荷需求及电价信号进行动态优化，实现经济性与稳定性的双重提升。

1.3 风储系统的耦合运行机理

风力发电与储能系统的协同运行机制体现为能量匹配与动态调节的综合过程。风电功率的波动由储能系统进行平衡补偿，使整体输出功率更加稳定，减少对电网的冲击。在此过程中，储能装置需根据风速预测结果、负荷变化趋势及调度指令实时调整充放电状态，以保持系统能量流动态平衡。风储系统的能量流可用能量守恒方程描述：

$$P_g = P_w + P_s - P_{loss}$$

$$P_g = P_w + P_s - P_{loss}$$
 其中， P_g 为并网功率， P_w 为风电机组输出功率， P_s 为储能系统充放电功率， P_{loss} 表示系统能量损耗。该方程反映了风储系统的能量流向与耦合特征。在功率突变情况下，储能系统的响应速度和容量决定了能否实现平稳过渡。例如，当风速骤升时，储能吸收部分多余功率，防止过载；当风速骤降时，储能释放能量，保障功率连续性。通过对风电输出与储能行为的协调控制，可显著降低输出波动率，提高系统的稳定性和电能质量。此外，风储系统的耦合运行还受到逆变器控制精度、电网阻抗特性和能量调度策略的影响。科学的风储协同控制应综合考虑风电功率预测、储能动态建模和电网状态反馈，建立多层次协调控制机制，实现功率分配

的最优与 SOC 的动态平衡。未来，随着大数据与人工智能的引入，风储系统的耦合控制将更加智能化与自适应化，能够实现从“被动响应”到“主动预测”的转变，从而更好地支撑高比例可再生能源电网的安全高效运行。

2 风储系统协调控制的总体架构

2.1 控制系统层级结构

风储系统协调控制通常采用分层分区架构，分为上层能量管理层和下层执行控制层。上层负责功率预测与能量优化调度，下层负责风电机组与储能设备的实时控制。上层调度根据短期风速预测与负荷需求，确定风电输出与储能充放电的目标值，下层通过变流器控制策略、转矩控制与桨距调节实现动态响应。两层之间通过通信网络实现数据交互，确保系统协调一致运行。该层级设计实现了风储系统的全局优化与局部控制兼顾，提升了系统的鲁棒性与自适应能力。

2.2 功率平滑控制策略

功率平滑控制是风储协调控制的核心。其主要任务是减弱风功率波动对电网的影响。常见方法包括滑模控制、模糊控制与预测控制等。滑模控制具有强抗干扰特性，适用于非线性风功率系统；模糊控制能根据风速变化自适应调整储能输出；预测控制通过利用短期风速数据提前分配能量，实现最优功率跟踪。本文基于混合控制思想，构建风储功率协调模型，通过实时监测风功率偏差与储能 SOC 状态，动态调整充放电策略，使输出功率维持在设定区间内。仿真结果显示，该策略在强风速扰动下依然能保持平稳输出。

3 储能系统的优化配置与控制方法

3.1 储能容量配置原则

储能系统的容量配置是实现经济性与稳定性平衡的关键环节。容量过小无法有效平滑功率，容量过大则增加投资成本。储能容量设计通常基于风速统计模型和功率波动分析。采用威布尔分布描述风速概率特性，根据不同风速段的功率波动幅值，确定储能系统的功率容量 P_{sP_sPs} 与能量容量 E_{sE_sEs} 。配置目标为：

$$\min_{\sigma_P} (C_{inv} + C_{op}) \quad s.t. \quad \sigma_P \leq \sigma_{ref} \quad \min(C_{inv} + C_{op}) \quad s.t. \quad \sigma_P \leq \sigma_{ref}$$

其中 C_{inv} 为投资成本, C_{op} 为运行维护成本, σ_P 为功率波动标准差。通过多目标优化算法 (如 NSGA-II) 可实现经济与性能的综合平衡。

3.2 能量管理策略设计

风储系统的能量管理策略决定其长期运行效果。有效的能量管理应兼顾功率平衡与 SOC 约束。本文设计的策略以双目标函数为核心: 最小化输出功率波动与 SOC 偏离度。能量分配遵循以下原则: 当风功率高于期望值时, 储能吸收多余能量; 当风功率低于期望值时, 储能释放能量。通过引入自适应权重系数, 实现功率波动与 SOC 平衡的动态调整。实际运行中, 能量管理系统可结合短期风速预测与历史数据, 采用滚动优化算法实现实时更新, 提高预测精度与响应速度。

3.3 风储协调优化算法研究

为提高风储系统的全局协调能力, 研究采用基于模型预测控制 (MPC) 与强化学习相结合的优化算法。MPC 根据系统动态模型预测未来功率趋势, 在约束条件下求解最优控制序列; 强化学习通过环境交互学习储能动作策略, 实现自适应优化。两者结合可兼顾短期控制精度与长期最优性。仿真结果表明, 该算法在多扰动条件下能有效降低输出波动, 并维持 SOC 在合理范围内, 系统稳定性较传统 PID 与模糊控制显著提高。

4 风储系统的动态协调运行研究

4.1 风储系统的实时调控机制

实时调控机制依赖于高精度监测与快速通信系统。通过 SCADA 平台采集风速、发电功率、储能 SOC、电网频率等数据, 实时调整风储输出。控制系统以功率偏差为反馈信号, 采用双闭环结构: 外环控制输出功率平滑度, 内环控制储能电流响应。系统通过预测模型提前判断功率趋势, 协调风机输出与储能动作, 实现毫秒级响应。该机制使风储系统具备良好的自适应性与抗干扰能力。

4.2 协调控制在多场景下的应用验证

为验证控制策略的通用性, 研究构建了多场景仿真模型, 包括孤岛微电网、并网运行及区域能源互联网等情形。在孤岛运行中, 储能承担主要调频与调压功能,

协调控制可保持电压波动小于 $\pm 2\%$; 在并网运行中, 风储系统通过有功/无功双向调节改善电网频率稳定性; 在区域能源系统中, 储能与负荷侧响应协同, 实现风能的高效消纳与能量优化分配。实验结果显示, 该协调控制策略在多种工况下均表现出优异的动态稳定性与经济性。

5 结语

本文针对风力发电的间歇性与波动性问题, 提出了风储系统的多层次协调控制策略。研究从风电功率特性出发, 分析了储能系统动态响应与容量配置原则, 构建了功率平滑与能量管理模型。在此基础上, 设计了融合预测控制与智能算法的协调优化体系, 实现风储联合运行的高效与稳定。仿真结果表明, 该策略能有效抑制功率波动、平衡 SOC 并提高系统能量利用率。研究结论为高比例风电并网提供了理论参考, 对智能电网与能源互联网的发展具有指导意义。未来工作可在以下方向深化: 一是结合人工智能算法实现风速与负荷的更高精度预测; 二是引入多源储能系统 (如氢能储能) 以提升系统灵活性; 三是开展风储系统在大规模并网场景下的实验研究, 为新能源系统的稳定运行提供数据支撑与工程示范。

参考文献

- [1] 邱政嘉. 飞轮储能系统在风力发电系统中控制策略研究[D]. 太原科技大学, 2024. DOI: 10.27721/d.cnki.gyzjc.2024.000118.
- [2] 刘泽健, 杨苹, 林旭, 等. 基于海上风力发电机组中虚拟飞轮储能系统的频率支撑协调控制策略[J]. 智慧电力, 2024, 52(02): 101-107. DOI: CNKI: SUN: XBDJ. 0. 2024-02-014.
- [3] 程跃森, 王润和, 辛晓瑜, 等. 并网型风光储联合发电系统荷电状态控制方法研究[J]. 电力设备管理, 2024, (17): 93-95. DOI: CNKI: SUN: DSG. 0. 2024-17-033.
- [4] 周涛, 向永建, 杜可可, 等. 风机与储能参与电网调频协调控制技术综述[J]. 浙江电力, 2024, 43(07): 45-55. DOI: 10.19585/j.zjdl.202407006.
- [5] 张帅旗. 离网型风光耦合制氢系统建模与控制研究[D]. 河北科技大学, 2024. DOI: 10.27107/d.cnki.ghbk. 2024.000058.