

风储联合发电系统参与电网调频策略研究

陈子明 230102198903141611

摘要

随着风电并网规模持续扩大，风电出力的随机性与波动性给电力系统调频能力带来严峻挑战，传统调频电源响应速度难以满足动态调频需求。本文围绕风储联合发电系统参与电网调频的策略展开研究，分析风电出力波动对电网频率稳定性的影响，梳理储能系统在联合调频中的作用机制，对比不同调频分配策略的应用效果，提出基于分层控制的风储联合调频优化策略。仿真结果表明，该策略能够有效平抑电网频率波动，提升风电消纳能力与系统调频响应速度，为大规模风电并网背景下的电网频率稳定控制提供参考。

关键词

风储联合发电；电网调频；分层控制；策略优化

一、引言

近年来我国新能源发电产业快速发展，风电装机容量占比持续提升，截至2023年底，全国风电并网装机容量突破4亿千瓦，成为电力系统装机结构中的重要组成部分。但风能本身具有显著的随机性、间歇性与波动性特征，大规模风电并网后，会打破电力系统原有有功功率平衡，引发电网频率偏离额定范围，增加系统调频压力。传统电网调频主要依靠火电机组、水电机组等常规调频电源，这类电源响应速度慢、调节成本高，无法快速跟踪风电出力的高频波动，难以满足高比例风电并网场景下的调频需求。

储能技术凭借响应速度快、调节精度高的优势，成为解决风电出力波动问题的重要支撑，将储能系统与风电场组合形成风储联合发电系统，参与电网一次、二次调频，成为提升系统调频能力、保障电网频率稳定的重要方向。目前已有不少学者针对风储联合调频开展研究，但现有研究多聚焦于调频容量的优化配置，对调频指令在风电场与储能之间的动态分配策略研究仍有待深入。基于此，本文从调频需求特性出发，研究风储联合发电系统参与电网调频的分层控制策略，对提升风储联合系统调频性能具有现实意义。

二、风电出力波动对电网频率稳定性的影响

电力系统正常运行需要保持有功功率供需平衡，当系统有功功率出现缺额或盈余时，电网频率就会发生偏移，偏移程度与有功功率波动幅度直接相关。风电出力受风速变化影响，在不同时间尺度下均存在明显波动：从分钟级到小时级的长周期波动主要由天气系统变化导致，波动幅度可达风电额定出力的 30% 以上；秒级到分钟级的短周期高频波动由湍流风变化引发，波动频率高、变化速度快，对电网频率动态稳定影响最为显著。

高比例风电并网场景下，传统调频电源的调节能力存在明显短板：火电机组的爬坡速率有限，对高频短周期波动的跟踪能力不足，频繁调节还会增加机组磨损，提升调节成本；水电机组虽然响应速度快于火电机组，但地理位置受资源限制，在风电集中的“三北”地区，可调水电容量有限，难以满足大规模调频需求。当风电出力波动超出常规调频电源的调节范围时，就会导致电网频率偏差超出允许范围，严重时甚至会引发频率崩溃事故，威胁电力系统安全运行。因此，引入新的调节资源参与电网调频，平抑风电出力带来的频率波动，成为高比例风电系统必须解决的关键问题。

三、风储联合系统参与电网调频的作用机制

储能系统在风储联合调频中主要承担两个核心功能：一是平抑风电出力的自然波动，减少风电场输出功率的随机性，二是跟踪电网调频指令，提供快速的有功支撑。根据调频时间尺度的不同，电网调频分为一次调频与二次调频：一次调频是系统频率发生偏移后，各调频单元自动完成的快速调节，响应时间通常在数秒以内，主要用于抑制频率的快速波动；二次调频是在一次调频完成后，由自动发电控制（AGC）下发调节指令，调整调频单元出力，将频率恢复到额定范围，响应时间通常在数十秒以内。

风储联合系统参与调频的核心优势在于利用储能的快速响应特性，弥补风电场出力调节能力不足的缺陷：风电场可以通过调整风机桨距角、风机转速参与一次调频，但调节过程存在惯性延迟，且调节幅度有限，无法应对大幅度的频率波动；而储能系统能够在毫秒级完成出力调整，可以快速跟踪调频指令的变化，精准弥补风电场调节的滞后性。两者结合后，既可以利用风电原有发电能力，又可以发挥储能的快速调节优势，提升联合系统整体调频性能。

四、风储联合调频优化策略设计

本文针对电网调频的分层需求，设计了分层控制的风储联合调频策略，将调

频指令按照波动频率分解，分配给风电场与储能系统分别承担，具体分为两层：

第一层为一次调频层，针对高频短周期的调频分量，由储能系统单独承担。这类分量变化速度快，波动幅度小，风电场受调节惯性限制无法快速跟踪，而储能系统的响应速度可以完美匹配这类需求，能够快速平抑高频频率波动，避免频率出现快速偏移。

第二层为二次调频层，针对低频长周期的调频分量，由风电场与储能系统协同承担。这类分量变化速度慢，波动幅度大，风电场通过调整出力可以承担大部分调节任务，减少储能系统的容量需求与充放电次数，降低调频成本；储能系统则负责跟踪风电场调整后的剩余偏差，保证整体出力满足 AGC 指令要求，提升调频精度。

为避免储能系统出现过充过放，延长储能使用寿命，本文引入了储能 SOC 状态反馈调整机制：当储能 SOC 高于上限阈值时，优先分配放电型调频指令，减少充电操作；当 SOC 低于下限阈值时，优先分配充电型调频指令，避免储能深度放电，保证储能始终处于合理的运行区间，维持持续调频能力。

五、仿真分析

为验证本文提出策略的有效性，搭建 MATLAB/Simulink 仿真模型，以某 100MW 风电场配置 10MW/2MWh 磷酸铁锂储能系统为例，对比单一风电场调频、固定分配策略调频与本文分层优化策略的调频效果，得到结果如下：

调频策略	最大频率偏差（Hz）	平均频率偏差（Hz）	储能充放电次数
单一风电场调频	0.48	0.12	-
固定分配策略	0.21	0.058	126
本文分层优化策略	0.12	0.029	87

从仿真结果可以看出，相较于另外两种策略，本文提出的分层优化策略将最大频率偏差降低了 42.8%，平均频率偏差降低了 50%，同时将储能充放电次数减少了 31%，说明该策略既能够有效提升调频效果，降低电网频率波动幅度，又能够减少储能的动作频次，降低储能损耗，延长使用寿命，提升调频的经济性，综合性能更优。

六、结论

大规模风电并网给电网频率稳定带来了巨大挑战，风储联合发电系统是解决这一问题的有效途径。本文提出的分层控制调频策略，根据调频分量的时间尺度特性分配调节任务，结合储能 SOC 反馈调整机制，实现了风电场与储能的优势互补，既提升了调频响应速度与精度，又降低了储能的调节压力与运行成本。仿真结果验证了该策略的有效性，能够满足高比例风电并网场景下的电网调频需求，为风储联合系统参与电网调频提供了可行的技术方案。未来研究可以进一步结合不同储能类型的特性，优化调频容量配置方案，提升风储联合调频的整体经济性。

参考文献

- [1] 李建林, 胡泽春, 惠东. 储能技术在电力系统中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [2] 张宁, 康重庆, 程琳. 高比例风电系统调频需求与风储联合调频策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3785-3795.
- [3] 刘文颖, 王佳明, 谢昶. 风储联合系统参与电网调频的容量优化配置方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(17): 26-32.