

风电与储能系统联合调频的容量配置优化方法

刘晓 李鹏慧

北京京能清洁能源电力股份有限公司内蒙古分公司

DOI: 10.12238/ems.v8i1.17696

[摘要] 随着风电在电力系统中的渗透率不断提高,其出力的随机性与波动性对电网频率稳定构成了严峻挑战。储能系统因其快速、灵活的功率调节能力,成为平抑风电波动、提升电网调频性能的有效手段。本文旨在探讨风电与储能系统联合参与电网调频的容量配置优化方法。文章首先阐述了联合调频系统的结构与价值,进而深入分析了容量配置优化的核心目标与关键约束条件,最后提出了一套系统性的优化方法与流程。通过对风-储系统容量的科学配置,可在满足电网调频需求的前提下,实现系统全生命周期经济效益的最大化,为高比例新能源电力系统的稳定运行提供技术支撑。

[关键词] 风电; 储能系统; 联合调频; 容量配置; 优化方法

引言

面对全球能源转型的背景,风力发电作为清洁能源的主要力量之一,其装机容量稳步增长。风能本身具有的间歇性与不确定性致使风电出力难以被预测,当其实现大规模并网时,会顶替部分传统同步发电机组的电力输出,进而削弱系统的惯性响应以及一次调频能力,导致电网频率偏差增大、稳定性降低等一系列问题。为消除该矛盾,把具备毫秒级响应速度的储能系统与风电场相联合,组建联合调频系统,已成为学术界及工业界的共识。该联合系统不仅可有效补偿风电功率缺额,更可作为优质调频资源参与电网辅助服务,怎样科学合理地判定储能系统的功率与容量规模,是联合调频系统技术可行性及经济性的核心决定点。本文将围绕系统架构、优化要素及方法流程三个层面展开,系统阐释风电与储能联合调频的容量配置优化方法。

一、联合调频系统的架构与价值

风电与储能联合调频系统凭借协调控制,把两者整合成一个可控、可靠的调频单元体,共同回应电网发出的频率变化信号。

(一) 系统基本结构与工作原理

典型联合调频系统主要由风电场、储能电站、中央控制器与并网接入点构成(见图1)。风电场作为核心发电单元,储能系统充当功率调节单元,中央控制器对电网频率、风电场实际出力和储能系统荷电状态进行实时监测^[1]。当电网频率波动之际,控制器依照预设策略,计算出为稳定频率所需增减的功率值,并同步向风电场和储能系统下达指令。储能系统凭借自身快速响应特性,首先开展功率补偿,而风电场可在一定范围内对超短期功率进行预留或调节,共同实现调频任务。

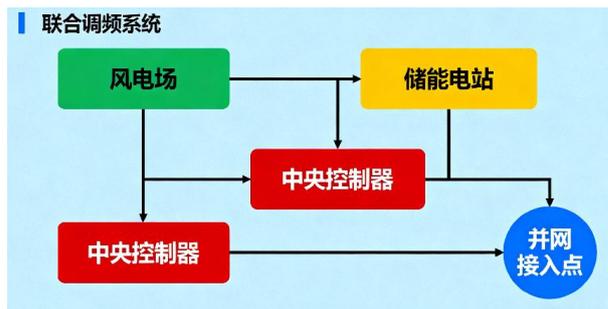


图1 典型联合调频系统

(二) 储能系统在联合调频中的核心作用

储能系统在其中的作用十分关键。它呈现出快速的功率支撑,可在秒级乃至毫秒级时间内填补风电功率缺额或吸收过剩功率,并且能够实现“削峰填谷”,使风电场出力波动实现平滑,降低其对电网造成的冲击。通过合理的能量管理,储能可防止风电场因参与调频而出现弃风问题,在频率稳定及能源利用间实现平衡。

(三) 联合运行的综合效益

风储联合调频模式产生了显著的综合效益。对于技术而言,它切实提升了电网频率稳定性与抗扰动力,控制了风电波动对系统形成的影响,增进了电能质量及供电可靠性。从经济角度看,该模式推动风电场从单一能源供应者转型为辅助服务供应者。经由参与调频市场收获可观额外收益,储能系统在协同运行中达成了自身价值,增进了设备利用效能,进而切实缩减投资回报周期,为新能源及储能的规模化发展提供了可持续的商业途径。

二、容量配置优化的目标与约束

容量配置优化的目标是寻觅满足技术要求且经济性最优的储能功率及容量组合,其进程受到多重目标与约束的共同制约。

(一) 优化目标的多元化

容量配置优化目标一般为多重，首要目标属于技术目标方面，即要保证联合系统可以达成电网调度所下达的调频性能指标，如调节速度、精准度和响应时长等。核心目标即经济目标，追求系统全生命周期内实现净收益最大化或成本最小化，这必须综合考虑储能投资成本、运维成本、调频市场收益以及因减少弃风致使的发电收入增加等。可靠性目标逐渐受到重视，即保证储能荷电状态维持在安全范围，杜绝因过充过放造成调频退出。

(二) 关键约束条件的界定

优化过程一定在一系列约束条件下开展，功率与容量约束最为基本。储能的瞬时出力不得超过其额定功率，所存储的能量不得超出其额定容量，运行约束聚焦储能荷电状态的动态过程，必须设定合理上下限，防止深度充放电损害电池的寿命。此外，还应将电网的调频需求约束纳入考虑范畴，即联合系统所提供的调频功率须能覆盖历史或预测的调频容量需求。

(三) 多目标间的权衡与协调

上述目标跟约束之间往往存在深刻矛盾，配置更大容量的储能系统无疑能显著增进调频性能与供电可靠性，减少频率超出限定范围的风险，但这将直接造成初始投资与后期运维成本的大幅上升，影响到项目经济性^[2]。优化过程的核心本质，正是在相互制约的技术性能与经济成本之间，探求一个动态的最佳均衡点。为处理这一多目标优化难题，一般需借助数学建模方法，如采用加权求和或约束法，将多个冲突目标进行归一化或转化为一个单一的综合目标函数，进而系

统地求解出那一系列非劣的帕累托最优解，给决策者呈上多样化的最优权衡方案。

三、容量配置优化的方法与流程

为达成科学调配，得遵循一套系统化的优化方法及实施流程。

(一) 基于场景生成的需求分析

优化的第一步为精确量化调频需求。该方法以长时间序列的历史数据为基础，涉及风电场出力数据、电网频率偏差数据以及调频指令信号。运用对这些数据的统计分析，生成一系列典型的、包括不同风况与电网状态的运行场景。这些场景成为容量配置的基础输入内容，用以模拟联合系统未来或许会面临的各种调频任务。

(二) 优化模型的构建与求解

在明确需求及约束后，需求构建容量配置优化模型。该模型把储能功率及容量当作决策变量，把全生命周期成本最低或净收益最高作为目标函数，并纳入上述提及的所有技术约束^[3]。采用适宜的优化算法求解，比如遗传算法、粒子群算法等智能优化算法，它们能对非线性、多约束的工程优化问题予以有效处理，得到最优的容量配置方案。

(三) 方案评估与敏感性分析

得到初步优化方案后，要对其进行综合评估及验证。一般采用如下表所示的指标体系，从技术、经济、寿命三个方面开展评估，应实施敏感性分析，考察关键参数（诸如储能成本、电价、调频补偿标准等）波动对最优配置结果的影响，进而评估方案的鲁棒性及投资风险。具体见表 1。

表 1 风储联合调频系统容量配置方案评估指标体系

评估维度	具体指标	说明
技术性能	调频任务完成率	联合系统实际提供的调频功率与调度需求指令的匹配程度。
技术性能	频率偏差改善率	引入联合调频后，电网频率标准差或越限时间的减少比例。
经济性	全生命周期净现值	项目在全生命周期内产生的所有现金流的现值之和。
经济性	投资回收期	项目收益收回全部投资所需的时间。
系统寿命	储能系统年衰减率	考虑调频工况下的电池容量年衰减速度，反映配置方案对寿命的影响。
总结：		更复杂的储能老化模型以及人工智能在优化中的应用。

风电与储能系统联合调频是处理高比例新能源电网频率稳定问题的有效方式，而其中容量配置的优化是项目成败的决定性关键。本文对该问题的三个方面展开系统论述：明晰了联合系统的架构及协同价值；对容量配置中需权衡的多元化目标与关键约束条件展开深入剖析；给出一套包含场景分析、模型构建及方案评估的系统化优化流程。采用这种严谨的优化方法，可指导工程实践的开展，与此同时实现电网安全稳定运行，将风储联合系统的经济与社会效益最大化，推动能源结构实现顺利转型。未来研究可进一步聚焦市场机制、

[参考文献]

[1]石俊逸 贾燕冰 韩肖清 刘佳婕 郭强 孙亮. 基于改进 p-有效点法的多风电场共享储能联合参与一次调频的容量优化[J]. 太阳能学报, 2024, 45 (8) : 503-512.
 [2]陈璐, 汪晓彤, 汪坤, 等. 新能源电站电化学储能系统辅助风电调频方法[J]. 电子设计工程, 2024, 32(22): 151-154.
 [3]杨帆, 王维庆, 王海云, 等. 计及储能放电折损的风储一次调频配置优化方法研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43 (10) : 416-423.