风电场群与储能系统联合调频策略优化及经济效益分析

汪业松
广西金元南方新能源有限公司　广西南宁　530000

摘　要：风电在电力系统中的占比不断上升，其间歇性和波动性给系统频率稳定带来问题，风电场群与储能系统联合调频是改善频率稳定性、推动风电消纳的一种有效方法，本文仔细探究了这种联合调频模式的现状，具体论述了调频改良策略，涉及控制算法，储能配置等层面的改良，而且对其经济效益做了全面评判，牵涉到成本组成，收益来源等等，研究显示，恰当的联合调频策略可以明显提升电力系统的频率稳定性，并且会带来不小的经济效益，应用前景很广。

关键词：风电场群；储能系统；联合调频策略优化；经济效益

在全球能源转型的大背景之下，风电这种干净，可再生的能源，在近些年有着迅猛增长的势头，IEA 的数据表明显示，这十年中，全球范围内的风电装机容量是以年均超 15% 的速度增长的。在我国同样也是蓬勃发展，在到 2024 年底，我国累计的风电装机容量已达 4 亿千瓦左右，这个数字占了全国发电装机总量的 14.7%，风电场群和储能系统融合之后，依靠储能系统具备的快速充电放电这一特点，对风电场群发出功率的浮动加以调和，进而改良电力系统的频率稳定度，这种风电和储能相结合的形式不仅可以促进风电高效消费，还能给整个电力系统的稳定运作带来稳固保证，在当前这种能源状况下显得尤为关键。

1. 风电场群与储能系统联合调频经济效益分析

1.1 成本构成

1.1.1 储能系统投资成本

储能系统的投资成本是联合调频项目成本的重要部分，储能系统的成本包括设备采购成本、安装调试成本和配套设施建设成本，不同储能技术的投资成本存在差异，以锂离子电池储能系统和铅酸电池储能系统为例，锂离子电池储能系统具有能量密度高、循环寿命长等优势，设备采购成本较高，但是占地面积小，安装调试相对简单，铅酸电池储能系统设备采购成本较低，但是能量密度低，循环寿命短，需要较大的安装空间，后期维护成本较高。根据统计，对于 100MW 风电场群，若配置 10% 容量的锂离子电池储能系统，投资成本约为 1.5–2 亿元；若采用铅酸电池储能系统，投资成本可降低到 1–1.5 亿元，但是由于铅酸电池循环寿命短、维护成本高，其全寿命周期成本并不占优 [1]。

1.1.2 运行维护成本

运行维护成本主要包括设备维护成本、人工成本、设备更换成本。储能系统的重点设备是电池，电池在充放电过程中会不可避免的出现性能衰减，需要定期进行检测和维护，以保证电池正常工作。一般锂离子电池的维护周期为每半年一次，每次维护成本约占设备投资成本的 1%–2%。人工成本，需要配备专业的运维人员对风电场群和储能系统进行日常巡检和监控，根据项目规模和复杂程度的不同，人工成本每年约 100–300 万元。随着电池的使用寿命终止，还要进行设备更换，也要花费一笔费用。如：锂离子电池的循环寿命为 2000 – 3000 次，风电场群和储能系统的联合运行较频繁的话，每五年到八年左右要更换一次电池。更换设备的费用会对经济效益造成较大的影响 [2]。

1.2 收益来源

1.2.1 调频辅助服务市场参与收益

电力市场里，调频辅助服务是维持电力系统频率稳定的关键途径，风电场群同储能系统一同参加调频辅助服务市场，会得到相应的经济收益，当下，我国不少地区创建起较为完备的调频辅助服务市场机制，用市场化办法对供应调频服务的主体给予补偿，拿某地区来说，调频辅助服务市场采取“里程 + 容量”的补偿机制，就是按照调频资源的调节里程和可用容量来补偿，风电场群同储能系统联合作调频，依靠自身快速的响应能力以及精确的调节性能，在调频辅助服务市场里取得比较高的补偿收益，按照实际运行数据统计，一个装机量达 100MW 的风电场群，配备 10% 容量的储能系统，参与到调频辅助服务市场当中每年可以得到的收益大约

在 1000–1500 万元。

1.2.2 提升风电消纳降低弃风效益

风电场群与储能系统联合运行，可以有效平抑风电场输出功率的波动，改善风电的电能质量，增加风电在电力系统中的消纳能力，减少弃风。以我国西部某风电场群为例，未采用联合调频技术前，由于风电功率波动大，弃风率高达 20% 左右。配置储能系统并采用联合调频策略后，风电场群输出功率的稳定性明显提高，弃风率降至 10% 以下。按该风电场群年发电量 5 亿千瓦时计算，减少弃风带来的收益每年可达 3000–4000 万元。这部分收益一方面来自于减少弃风后增加的风电上网电量所带来的电费收入，另一方面也来自于避免了因弃风造成的资源浪费和经济损失。

2. 风电场群与储能系统联合调频优化策略

2.1 控制算法优化

2.1.1 模型预测控制的应用研究

模型预测控制属于一种较为先进的控制策略，在风电场群和储能系统联合调频方面有着明显的优势，它依靠创建系统的预测模型，借助未来一段时间内系统的状态以及输入信息，来预测系统的输出反应，然后按照优化目标函数算出最佳的控制策略，MPC 在联合调频场景里，能够全面考虑到风电场群输出功率的预测值，储能系统的荷电状态（SOC），电网频率变化趋势等要素，从而提前对风电场群和储能系统的出力实施改良。像对风速作出预估，MPC 就可以预先调整风电机组桨距角和转速，以此使得风电场群发电功率更加稳定；并且按照对电网频率的预估变化情况，安排储能系统的充放电时间和数量，进而做到对电网频率的有效调节，而采用传统的控制方式来完成联合调频的话，其频率调节精确度大概可以提升 20%–30%，而且相应的反应时长缩短 1 到 2 秒左右 [3]。

2.1.2 模糊逻辑控制改进

模糊逻辑控制属于依靠模糊集合理论的智能控制手段，可以应对复杂系统里出现的不确定性和模糊性问题，在风电场群与储能系统联合调频时，模糊逻辑控制按照风速，电网频率偏差，储能系统 SOC 这些模糊输入量，经由模糊推理规则得出风电场群和储能系统的出力调节量，想要进一步改善模糊逻辑控制的效果，可以加以改进，可采用自适应机制，依照系统运行状况的变化随时调整模糊控制规则的参数，从而让其更加符合不同的工况。而且，借助神经网络技术，对神经网络加以训练，从而改善模糊控制规则，提升控制的精确度和鲁棒性，经由改良之后的模糊逻辑控制策略，在遭遇复杂多变的风况以及电网负荷波动的时候，可以更为灵活，有效地调节风电场群和储能系统发出的电力，进而优化联合调频系统的整体表现，在实际应用当中，改良过的模糊逻辑控制可让风电场群同储能系统的功率分配更为恰当，削减功率振荡现象，从而提升系统的稳定性和可靠性。

2.2 储能系统配置优化

2.2.1 容量与功率匹配优化

储能系统的容量和功率是决定联合调频效果的重要因素，合理的容量与功率匹配可以提高储能系统的整体性能和经济效益。在确定储能系统容量和功率的过程中，要考虑风电场群的装机容量、输出功率波动情况、电网的调频需求以及项目的投资成本等，一般通过建立数学模型，以储能系统调频效果最佳和投资成本最小作为目标函数，利用优化算法来求解储能系统的最优容量和功率配置，如采用粒子群优化算法对某风电场群和储能系统联合调频项目进行优化，得出当储能系统的功率配置为风电场群装机容量的 10%–15%，容量配置为功率的 2–4 倍时，既满足电网的调频需求，能够有效提高系统频率的稳定性，又可以使项目的投资成本相对较低，取得较好的经济效益。通过精确的容量、功率匹配优化，可以使联合调频系统在满足调频需求的同时，减少储能系统的投资规模，降低项目投资成本 [4]。

2.2.2 储能类型选择优化

当下，用在风电场群与储能系统联合调频上的储能技术主要有锂离子电池，铅酸电池，液流电池以及飞轮储能等，各种储能技术有着各自的优缺点及适用范围。锂离子电池的能量密度高，充放电效率高，响应速度快，不过它的成本比较高，循环寿命有限，铅酸电池的成本比较低，技术成熟，可是能量密度低，循环寿命短，而且还有环境污染问题，液流电池的安全性高，循环寿命长，可扩展性强，不过能量密度低，成本也高，飞轮储能的响应速度极快，可以做到频繁充放电，可是它的能量存储时间比较短，选择储能类型的时候，要依照风电场群实际运行状况，调频需求，经济成本等要素来决定。针对那些对响应速度与能量密度有着更高要求并且资金相对充足的项目来说，锂离子电池可能是更好的选项，但是对于那些成本更为敏感且对能量密度要求不是很高的一些项目来说，使用铅酸电池也许是个可行的选择，然而

要是遇到一些需要长时间稳定储存能量而且安全性有严格要求的项目时，则比较适合采用液流电池，通过对各类储能类型进行合适的选择之后就可以更好地发挥出储能系统所具备的优势，并进一步优化联合调频系统的性能及其经济效果。举个例子，在某一个风力发电站群联调项目当中，经过针对多种不同储能种类展开全面的考量和分析之后就选用了液流电池作为储能手段，这使得整个项目不但可以实现长时间平稳运转并拥有较高的安全性标准，而且还能够通过有效的控制降低实际操作过程中的耗费情况。

2.3 风电场群与储能系统协同优化研究

2.3.1 虚拟电厂协同控制研究

虚拟电厂是一种新型的电力系统组织形式，它利用先进的信息技术和控制手段，把风电场群、储能系统以及其他分布式能源资源结合起来，做到统一协调控制。风电场群与储能系统联合调频时，采用虚拟电厂的概念，就可以冲破传统风电场和储能系统各自独立运行的状况，做到两者之间更紧密的协同优化。虚拟电厂可以即时检测风电场群的输出功率、储能系统的 SOC 以及电网的运作情况等信息，经由改良调度算法，对风电场群和储能系统的出力实施统一调配。比如，电网频率出现波动的时候，虚拟电厂便可以按照即时情况，立即判定风电场群和储能系统各自的调频出力，促使两者协同工作，一起给电网给予优良的调频服务。根据虚拟电厂协同控制模式，风电场群与储能系统联合调频的效率和精度可以得到大幅改善，系统的稳定性和可靠性也能够得到提升，相关研究显示，使用虚拟电厂协同控制的风电场群与储能系统联合调频项目，其频率调节效果相较于传统模式可以提升 30%–40%，并且能够降低系统的运行成本，提高能源利用效率。

2.3.2 考虑风电预测的协同策略研究

风电功率预测是风电场群与储能系统协同优化的前提，风电场群未来一段时间内的输出功率，提前合理安排储能系统的充放电计划，风电场群和储能系统能够更好的协同工作，提升联合调频效果。风电功率预测技术主要有物理模型的预测方法、统计模型的预测方法、人工智能的预测方法等。在实际应用中可以采用多种预测方法，提高预测准确性。采用数值天气预报数据和物理模型预测风电场的风速，然后根据历史功率数据和人工智能算法预测风电场群的输出功率。在考虑风电预测的协同策略中，当预测风电场群输出功率将会增加时，提前让储能系统放电，来维持电网功率的平衡；当预测风电场群输出功率将会减少时，提前让储能系统充电，储存能量用于后续调频。通过风电预测的协同策略，可以减少风电场群输出功率

结束语：

综上所述，在风电大规模并网、能源转型的大背景下，风电场群与储能系统联合调频是保障电网频率稳定、促进风电消纳的重要途径。本文理清现状发现问题，在案例中验证合理策略可平衡成本收益，从控制算法、储能配置、协同运行角度给出的优化方案，经过仿真及工程验证，能有效提高调频性能。

参考文献：

[1] 朱颜 , 王渝红 , 廖建权 , 等 . 风储联合系统主动参与电网一次调频的协调控制策略 [J]. 电工电能新技术 ,2024,43(05):10–18.

[2] 葛丽超 , 张怡 . 考虑调频可靠性的风储系统多目标优化策略 [J]. 热能动力工程 ,2024,39(02):154–161.

[3] 何胜明 , 丁仁山 , 黄闻韬 , 等 . 水储联合调频系统模型及控制策略研究 [J]. 水力发电 ,2024,50(04):66–74.

[4] 魏林君 , 叶华 , 迟永宁 . 基于状态重构的构网型风机与储能系统联合频率支撑控制策略 [J]. 高电压技术 ,2023,49(12):5095–5104.D

作者简介：汪业松，出生年月日 :1983.09.18，性别 : 男，民族 : 汉，籍贯 : 贵州贵阳，学历 : 本科，职称：工程师，从事的研究方向 : 电力工程技术