

分布式发电与储能系统联合运行优化配置研究

彭铭涵 宓倩 王振一 王娜

青岛城市学院, 山东青岛, 266100;

摘要: 本文就分布式发电和储能系统联合运行的改良设置问题开展系统研究, 先梳理联合运行的基本原理和技术框架, 阐述二者协同工作的本质原因, 再从规划设置、运行调度和经济效益这三个维度分析当下联合运行遭遇的主要阻碍, 如储能选址定容缺少科学依据、多源协调调度机制不够完备、投资回报时间过长等实际困难。在此基础上, 给出面向多目标改良的设置模型形成方法, 分层分区协同调度策略以及考虑全生命时段的经济性评价体系, 并联系典型应用环境来证明所提方案的可行性和有效性。研究表明, 通过科学的改良设置及协同调度, 可以明显改善分布式发电的消纳水平, 降低系统运行成本, 为推动能源结构转型提供理论支持和技术参考。

关键词: 分布式发电; 储能系统; 联合运行; 优化配置; 协同调度

DOI: 10.69979/3041-0673.26.02.117

引言

近些年来, 学术界和产业界针对分布式发电与储能系统的联合运行展开了诸多探究, 最初只是对单个储能配置展开研究, 渐渐发展成多源协同优化这样一项系统工程^[1]。但是客观来讲, 当下的研究仍然存在一些不足之处: 其一, 很多配置模型只关注经济性这个单一目标, 对可靠性和环境效益没有给予足够全面的考虑; 其二, 多数调度策略依靠集中式架构, 无法很好地应对大规模分布式接入所带来的复杂情况; 其三, 全生命时段经济性分析的框架尚未完全成熟, 这限制了储能技术的大范围推广应用, 依托于此, 本文打算从改良设置的角度入手, 深入剖析分布式发电与储能系统联合运行的理论方法及其达成途径, 希望为相关的工程操作提供有用的参考。

1 分布式发电与储能系统联合运行概述

(1) 分布式发电与储能协同的基本原理

分布式发电和储能系统协同运行的核心逻辑在于, 储能装置具备能量缓冲能力, 可以填补分布式电源出力 and 负荷需求在时间上的不契合之处, 从物理原理来讲, 分布式光伏发电系统依靠半导体材料的光生伏特效应, 把太阳辐射能直接变成直流电能, 然后通过逆变器转为交流电能来供应给负荷或者接入电网^[2]。

光伏电池的输出功率会随着辐照强度和温度发生剧烈波动, 特别是在云层遮挡或者日落时期, 出力也许会在很短时间里出现大幅缩减情况, 储能系统经由电化学反应或者电磁感应等途径, 把电能转变成化学能, 磁场能等形式储存起来, 等到需要的时候再反向释放出来。当光伏产生的电力超出负载需求时, 多余的电能就被储

能系统吸纳, 避免了弃光造成的损失; 而当光伏产生的电力不够用时, 储能系统可以立即供电来填补缺口, 维持供电的连贯性, 这样一种“削峰填谷”的协同机制, 让本来无法控制的分布式发电有了一定的调度能力, 极大地改善了系统对电网的友好性。储能系统的充放电行为不是简单的能量搬运, 其涉及荷电状态保护、充放电效率损耗、循环寿命衰减等诸多复杂因素, 这些均需在联合运行策略中细致考虑。

(2) 联合运行系统的技术架构与组成

分布式发电和储能系统联合运行的技术框架常常采用分层控制体系, 该体系自下而上可划分为设备层、协调控制层以及优化调度层这三层, 设备层是系统的物质根基, 包含分布式光伏阵列, 风力发电机组, 储能电池组, 双向变流器, 电池管理系统以及检测保护装置等众多设备, 储能电池组在整套系统中充当能量汇集点, 当前较为成熟的技术路径涉及锂离子电池, 铅酸蓄电池和液流电池等, 它们之间存在各自的优缺点, 锂离子电池能量密度大, 响应速度也快, 比较契合功率型应用环境; 铅酸蓄电池技术已臻成熟, 成本较为低廉, 只要对能量密度没有过高的要求就可满足需求; 液流电池具备较长的循环寿命, 安全性能良好, 适用于大规模且持续时间较长的储能任务^[3]。

双向变流器肩负着直流与交流能量双向转换的重要职责, 其转换效率会直接左右系统整体的性能表现, 协调控制层需接收上级调度指令, 还要参照本地负荷预测情况、光伏出力预测信息等, 及时调整储能系统的充放电功率, 这个层面往往运用模糊控制或者模型预测控制之类的智能算法, 来解决分布式发电出力存在不确定性的难题, 而优化调度层站在全局角度, 要综合考量电

价信号、负荷预测、气象预报等诸多方面的信息，从而制定出从一天开始到更长时间范围的调度方案。以某城市配电网的多台区分布式光储系统为例，该系统在配电网侧设置了多套储能装置，经由分层分区控制架构，达成了台区内的自治消纳以及台区之间的功率互助。

(3) 优化配置的目标函数与约束条件

分布式发电和储能系统的联合运行优化配置属于多目标、多约束的综合优化问题，从目标函数来看，要综合考虑经济性，可靠性和环境效益这三个方面，经济性目标就是要降低系统整个生命周期的综合成本，包括光伏发电设备的投资成本、储能系统的采购及更换成本、电网购电成本以及运维费用等^[4]。而可靠性目标是通过储能的协同调节来保障电力供需协调，确保电网的电压和频率处于允许范围之内，并降低供电中断的可能性，环境效益目标则是要最大程度提升可再生能源的利用率，削减化石能源的消耗量和碳排放量。

在约束条件方面，要符合诸多物理限制及运行要求，光伏发电出力受限于天气状况，安装倾角等要素，存在最大和最小出力界限。储能系统的充放电功率受到变流器容量的限制，荷电状态应保留在安全范围内以保障电池寿命，从电网角度而言，分布式发电与储能注入的功率要随时和负荷需求保持协调一致，并且要符合电压质量、线路容量等安全限制，伴随电力市场化改革不断深入，分时电价信号成了调配时不可轻视的外部因素，储能系统需要在低谷电价时期充电，高峰电价时期放电，以此达成最大的经济收益。

2 分布式发电与储能系统联合运行现状

(1) 规划配置层面的主要问题

当下，分布式发电和储能系统协同运行时，在规划配置方面遇到的主要难题在于储能选址及定容缺少系统的科学方法，不少已经完工的光储项目，在早期规划时期，储能容量的确定大多依靠工程经验或者简化的供需均衡估计，并未充分考虑到分布式发电出力在时空上的分布特征以及负荷需求的动态改变状况，这样粗放式的设置方式常常引发两种极端情形：其一，储能容量设置得过多，致使设备空置，投资被浪费掉，进而加大了系统的初始成本，拉长了投资回报时间；其二，储能容量设置得太少，不能很好地抑制光伏出力的波动，弃光率一直很高，系统经济性也受到了损害^[5]。

(2) 运行调度层面的突出矛盾

从运行调度角度来看，分布式发电和储能系统共同运行时遇到的主要矛盾就是多源协调调度机制存在漏洞。如今，分布式光伏和储能装置大量接入配电网，系

统的调控复杂程度近乎呈指数形式上升。以往的集中式调度模式无法很好地满足众多分布式节点随时相互协调的需求，存在信息延误以及计算受限的情况，极大地限制了调度效率，而且，不同种类的分布式电源其调节能力差别很大，光伏发电量的反应速度较快但无法控制，储能的响应比较灵活，但受到自身容量的限制，要想让这两者相互协作，需要有精准化的控制策略，可是当下的调度计划大多是按照预先设定好的规则或者只是依靠简单的逻辑推理来执行，并没有针对不确定因素具备自动调节的能力，所以一遇到像极端天气或者负荷突然发生变化之类的状况就很容易产生调度失误。

(3) 经济效益层面的现实困境

从经济效益角度而言，分布式发电和储能系统共同运行遇到的实际难题集中在投资成本过高与收益模式单调这两者之间的冲突上，储能系统，特别是锂离子电池储能，即便技术逐渐成熟，单位能量的成本仍处于较高水平，而且电池的循环寿命比较短，需要定时更换，这就使得整个生命周期内的成本增加了不少。当下，储能系统的收入主要依靠峰谷电价差来获取利润，收入途径十分单一，在一些地方，因为峰谷电价差小或者电力市场机制不完善，储能系统的经济收益无法弥补投资成本，造成项目资金回笼时间变长，社会资本参与的热情也就低。储能系统参与辅助服务市场的机制仍在考察当中，调频、调峰等辅助服务的补偿标准不够清晰，这在某种程度上制约了储能的商业化推行。

3 分布式发电与储能系统联合运行优化配置研究

(1) 面向多目标优化的配置模型构建

规划配置方面，储能选址定容缺少科学依据。本文给出一种面向多目标优化的配置模型构建方法。此模型以系统综合运行成本最小化、可再生能源利用率最大化、碳排放最小化作为三个优化目标，通过线性加权法或者帕累托前沿分析法把多目标问题转化为可求解的单目标或者多目标优化问题。在模型形成时，充分考虑到光伏出力的概率分布特点，运用场景生成与缩减技术，把不确定性转化为在有限个典型运行场景之下的确定性优化问题。约束条件包含储能容量的上下限、充放电功率的限制、荷电状态的安全范围、电网功率的协调以及电压安全等诸多物理约束。模型的决策变量涉及储能安装位置，额定容量，充放电功率时序曲线以及光伏系统的安装容量等，在求解算法上，由于问题是非线性的且具有高维特性，所以采用改良的多目标遗传算法或者粒子群优化算法来做全局寻优，从而防止掉进局部最优解

当中。

以某城市多台区配电网的光储联合设置为例,此模型综合考虑了各个台区的光伏资源优劣,负荷特征以及电网接入情况,通过多目标优化得到一组帕累托改进解集,决策者按照自己的实际偏好,可以从侧重经济性,侧重环保性或者综合兼顾等不同方案当中作出选择,实际情况显示,相比于传统的固定比例设置方案,改良过的设置方案既提升了光伏消纳率,又大幅缩减了系统的全生命时段成本,这很好地证实了多目标改良模型在设置决策方面具有的优势。

(2) 分层分区协同调度策略设计

针对运行调度层面多源协调机制存在不足这一情况,本文提出一种分层分区协同调度策略,此策略参考微电网分层控制理念,把整个联合运行系统分成三层,即改良调度层、区域协调层以及设备执行层。改良调度层处于顶层,依靠当日光伏出力预测、负荷预测以及电价信息,以将系统综合运行成本降至最低为目标,制订各个区域储能的当日充放电计划以及台区之间的功率交换方案,该层利用量子编码遗传算法这样的全局优化算法来求解,可以在比较长的时间范围内实现全局优化,区域协调层位于中间层,接收到上一层下达的调度计划以后,再结合超短期预测信息和本地真实的运行状况,采用模糊控制策略对储能充放电指令进行动态修正。

以包含许多配电台区的分布式光储系统为例,处于提前计划阶段的时候,改良后的调度层按照各个台区的光伏出力预测曲线以及负荷曲线,算出各个台区储能的最合适的充放电时间表以及台区之间的功率互助方案。到了中午这个光伏出力达到顶峰的时期,那些光伏资源很充裕的台区会把储能装置开到最大功率来充电,并且把多余的电量传送给光伏资源短缺的台区;而一到傍晚这种负荷量很大的时间段,各个台区的储能设备就会一同放电以维持用电需求,不过在实际运作过程中,假如某个台区由于云层遮挡使得光伏出力突然大幅下降,那么区域协调层就会马上采用模糊控制方法,命令这个台区的储能设施提升放电功率,而且还要告知周边台区加强供电支持。

(3) 全生命周期经济性评价框架

在投资回报存在经济效益不足这一困境时,本文构建了一种全生命周期经济性评价框架,这个框架突破了以往仅仅关注初始投资和峰谷套利收益的局限性,将储能系统的全生命周期成本与多元化收益纳入同一个评

价体系当中,在成本方面,除了设备购置费和安装费之外,还涉及运行维护费、电池更换费、充放电损耗成本以及退役回收处理费等,在收益方面,除了峰谷电价差套利以外,也将需求响应补贴、辅助服务补偿、容量电费收入以及碳交易收益等多元化收入渠道纳入考量。

以某工业园区的光储一体化示范项目为例,利用该评价框架进行计算,结果显示,如果只是把峰谷套利这种单一收益模式算进去,项目的内部收益率就达不到社会资本所需的最低回报要求,但是把需求响应补贴和辅助服务补偿也考虑进来之后,项目的内部收益率就上升到一个可以接受的水平,投资回收期也被压缩到合理区间之内。

4 结论

本文对分布式发电与储能系统联合运行的优化配置情况进行深入研究,涵盖基本原理、技术框架、现存瓶颈以及实现途径等四个方面,研究显示,分布式发电与储能相互配合运行,可以有效地稳定可再生能源出力,加强其消纳能力并削减用电成本,这是支撑新型电力系统构建的关键技术手段。当下,联合运行在规划配置、运行调度以及经济效益这三个方面面临很大的难题,造成这些问题的原因主要是配置方法比较粗放,缺乏协调机制以及评价体系不够完善,针对这种情况,本文给出了多目标优化配置模型、分层分区协同调度策略以及全生命时段经济性评价框架,分别从“配置合理”“调度良好”和“计算清晰”这三个角度提供了系统的解决方案,并通过典型应用场景验证了这些方案的可行性和优势。

参考文献

- [1] 彭伟,郑连清,郑天文. 分布式光伏储能系统的优化配置方法[J]. 四川电力技术, 2022, 45(1): 45-49.
- [2] 徐强. 基于 NSGA-III 算法的分布式光伏储能系统优化配置方法[J]. 综合智慧能源, 2025, 47(1): 26-33.
- [3] 金向朝,董镝,唐鹤,等. 考虑电能质量提升的分布式光伏储能系统容量优化配置方法[J]. 能源与环保, 2025, 47(3): 243-250.
- [4] 文城. 分布式风电及光伏系统的创新设计与优化策略探讨[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2025(5): 060-063.
- [5] 高国强,王建静,胡乃欣. 电力系统分布式能源资源优化配置与协同管理研究[J]. 消费电子, 2025(4): 248-250.