

风电光伏并网储能容量优化配置策略

任麟东

(水电水利规划设计总院有限公司, 北京 100011)

摘 要 储能系统作为促进新能源发电消纳的核心调控手段, 风电光伏并网储能容量优化问题已成为提升新能源消纳水平的关键课题。基于此, 本文详细介绍了储能容量优化配置模型, 并以张北风光储示范工程、澳大利亚霍恩斯代尔储能项目两大项目为例, 剖析了基于多目标优化的配置模型构建、技术经济性视角下的储能选型与容量确定、基于市场机制的储能容量优化配置路径、技术创新驱动的储能容量优化策略等优化配置路径, 以期对相关人士提供参考。

关键词 风电; 光伏; 储能; 容量优化; 多目标模型

中图分类号: TM61

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.026

0 引言

随着“双碳”战略推进,我国风电和光伏装机持续增长,据国家能源局显示,2023 年新增风电设备 7 566 万 kW,太阳能发电设备达 2.16 亿 kW,发电能力达 10.5 亿 kW。但因风电的阶段特征,我国弃风弃光比例长期处于高位,2022 年弃风率 5.1%、弃光率 2.1%。采用“削峰填谷”实现电力平稳,可提高风电、光伏发电容量。基于此,本文针对当前政策与科技发展趋势,对我国风电光伏并网储能容量展开研究。

1 储能容量优化配置模型

1.1 多目标优化框架

以经济性、可靠性和环境效益为主要指标,建立两层式优化模型:

1. 高层建模：以寿命期成本最低为优化目标，采用混合整数线性优化方法，对系统功率平衡、储能容量限制等进行约束。2. 低层建模：利用 PSO 对储能电池荷电状态平衡进行最优充放电功率配置。采用群控组态实施方案，运算速度提高 30% 以上。

1.2 技术经济性分析

根据目前主要储能技术成本数据, 锂离子电池度电每千瓦时价格为 0.39 ~ 2.04 元, 使用周期 5 000 ~ 10 000 次, 适用于短期存储; 全钒液流电池度电成本为 2.2 元 / kW · h, 使用寿命超 20 000 小时, 适合长期存储。

2 典型案例分析

2.1 国内案例：张北风光储示范工程

张北风光储发电项目是世界上较早实现风力发电与储能系统协同运行的示范工程，总装机容量达 70 MW。

该项目的储能系统由 60% 的铁磷酸盐电池和 40% 的液体电池构成，通过虚拟同步机技术对常规发电单元的惯性特性进行仿真模拟，有效将输出频率误差控制在 0.1 Hz 以内。从实际运行效果来看，现场实测数据显示，在加装蓄热装置后，项目弃光率显著降低，由原来的 20% 下降至 8%，年发电能力相应提升了 1.2%，能源利用效率得到明显改善。但是，该工程在发展过程中也面临一定挑战：前期投入高达 540 亿元人民币，建设周期长达 16 年，且项目运营对政府补助存在较明显的依赖性。

2.2 国际案例：澳大利亚霍恩斯代尔储能项目

霍恩斯代尔储能装置规模达 150 MW/194 MW·h, 该系统采用特斯拉的能量回收技术, 响应时间可控制在 0.14 秒以内, 为南澳大利亚电力网络的稳定运行提供了有力支撑。在经济效益方面, 该方案接入电力系统后, 每度电可实现 0.15 元的利润, 年盈利规模超过 2 000 万元。对比来看, 我国在储能领域的主要经验体现为以市场为导向的电价机制, 其中调频业务的收费标准为 3.5 元/kW^[1]。

3 风电光伏并网储能容量优化配置策略

3.1 基于多目标优化的配置模型构建

1. 在具体的储能布局设计环节, 研究运用混合整数线性规划 (MILP) 模型进行深入探究。在实践应用中, 将该模型用于储能装置优化时, 综合纳入初始购置成本、年维护成本以及 5 年后的更新成本等关键经济参数, 建立预测风电功率与电网电价变化的关联机制。测算结果显示: 当蓄电比例设定为 20% 时, 单位成本可实现 0.05 元 / kW · h 的降低, 验证了模型在经济性优化

方面的有效性。为保障电网稳定运行,基于上述优化模型进一步提出了系统性的限制条件。其中,核心限制条件涵盖风电、光伏发电、储能充电与用电的电力均衡限制,通过动态调控各能源模块的出力与消耗,确保电网实时功率平衡。同时,针对储能装置的充放电过程设置了严格约束:明确最大充放电功率、最大充放电时间以及最大充电深度等关键参数阈值。这一措施可有效防止充放电过程中能量存储器件因过度使用或操作不当造成损伤,从而避免器件服役寿命缩短,在保障经济性的同时兼顾系统运行的安全性与耐久性。

2. 以能量存储系统荷电状态(State of Charge, SOC)平衡为核心研究对象,借助微粒群算法建立低层数学模型。在实际应用中,由于各个单体间存在 SOC 不平衡问题,会导致部分单体过量消耗,加速其老化速度,进而降低整体能量存储的可靠性和服役寿命。而利用粒子群算法能够实现对各个单体荷电状态的在线监控,对储能系统的能量分布进行动态优化。例如:将粒子群优化方法引入新的太阳能发电装置后,可显著缓解单体荷电状态失衡问题,使单体平均每天的损耗时间减少 20% 左右,从而有效提高太阳能发电系统的稳定性。并且,基于此提出一种采用动态加载控制配置的方法,该方法通过 Excel 编写实现,具有操作简单、易于编写、控制过程直观、计算和运行高效的特点,便于在工程实践中推广应用^[2]。

3. 在环境保护方面,尽管难以通过数学方式进行定量描述,但该新能源存储系统在提升风力和太阳能的消纳量、减少弃风导致的能量浪费方面效果显著,进而间接降低常规能源的二氧化碳排放量,达成保护环境的目的。例如:利用新能源发电技术提高风力发电的稳定度和消纳能力后,新能源可替代燃煤发电所需的电能,从而减少燃煤发电过程中产生的二氧化碳、二氧化硫等污染物的排放量。

3.2 技术经济性视角下的储能选型与容量确定

1. 锂离子电池在短期存储场合表现突出。目前市场上使用的锂离子电池单位电量成本为 0.39 ~ 2.04 元/kW·h,且使用周期长达 5 000 ~ 10 000 次。这种兼具经济性与长寿命的特性,使其在商用等短期存储场景中具有很大的应用前景。它能够有效抑制太阳能发电的波动,还可通过峰谷电价差实现套利。例如:一家大型商场采用固定容量的锂离子蓄电池储能装置后,可在峰谷时段合理充放电,既减少了自身的电力消耗成本,又缓解了电网的负荷压力。

2. 全钒液流电池适用于长期存储需求。其单位电量价格在 2.2 元/kW·h 左右,虽价格相对昂贵,但具

备充放电深度高、安全性好的优势,因此可用于长期存储场景,如电网级别的储能工程。在部分风电、光伏等新能源供应不稳定的区域,采用全钒液流储能技术,能够实现风电、光伏等机组在极端天气下的连续稳定供电,保障电力供应的可靠性。对于边远山区风电场因距离负荷中心较远、电网基础条件较差导致的风电消纳难题,该技术也能有效缓解,降低弃风率,提升风电场的综合经济与社会效益^[3]。

3. 在为风力发电系统等配置存储装置时,不仅要考虑存储装置自身的特点,还要结合发电系统的功率特性以及用电情况来决定容量。通过统计风力发电及光伏发电系统的历史输出数据,预测其未来发电功率的变化幅度及规律,并依据负载变化规律,判断各阶段所需的蓄/放电功率及容量。以日照充足区域的光伏电站为例,基于历年累计的日照、光伏发电资料,结合日间行业用电峰值特征,采用数据解析方法构建约为光伏发电系统总容量 30% 的存储容量,可保证光伏发电稳定运行,并通过对各阶段发电负荷的优化调度,实现最优的技术经济均衡。

3.3 基于市场机制的储能容量优化配置路径

1. 在容量定价机制方面,针对地区实行 100 元/kW·h 的独立存储容量补贴政策,为储能建设带来了较好的收益。以 300 MW/1 200 MW·h 规模的大型储能电站为例,通过引入“电量定价”机制,实现了年度“电量补偿”。在综合考虑投资成本、运营维护费用和预计服务年限的基础上,结合经济性分析模式与产能定价方式,得出了投资回收期、投资回报率等主要经济参数^[4]。在合理的电量定价策略支持下,实现 10 ~ 12 年的全寿命周期,并达成 8% ~ 10% 的年内回报率,充分体现了其经济效益。这也要求储能企业进行更科学、合理的规划,在保证电力供应的同时实现工程效益最大化。

2. 实时交易制度为储能行业拓展了更多利润空间。在实时电价交易中,通过低价买入、高价卖出的方式,能够实现电能存储的保值增值。具体而言,当电力供给充足且电价较低时,储能装置可进行充电存储;当处于用电高峰且电价较高时,再通过储能装置释发电能供应市场以获取利润。此外,引入调频、调峰等辅助服务也能增加收益。在该模式下,存储设备经营者可依据电网电价和辅助业务需求,对存储设备进行动态调节,实现有效利用。例如:通过在线监控电网价格和运行频率,储能设备能在价格剧烈波动时迅速反应,在电网频率偏移时及时响应,为用户提供更多调频服务,更好地发挥调控功能,提升市场使用效率。

3. 进一步完善相应的市场制度与交易平台,以提

高我国储能资源配置效率。建立健全能源交易制度是保障能源交易公平、透明的基础；构建有效的电网交易平台则能实现电网数据的实时分享与交易，让储能企业快速获取更多市场动态，优化能源管理。例如：构建综合考虑风力发电功率、负荷需求、市场价格、存储设施状态等信息的智能电力市场交易系统，可为存储企业提供准确的市场营销决策支持，辅助其进行合理的存储容量分配与调度，进而提升其在电力市场环境下的经济与社会效益^[5]。

3.4 技术创新驱动的储能容量优化策略

1. 将多种存储方式融合形成优势互补。以锂离子电池和超电容器构成的复合能量存储体系为例，锂离子电池具有比容量高的特点，适用于长期储能；而超级电容器则因比容量大、充电速度快，能够对电源的剧烈波动做出迅速反应。在风力发电系统中，当系统出现短期、大范围的电力波动时，超级电容可快速投入工作，有效抑制系统的高频振荡，减小充放电过程对系统的影响，进而减少设备每天的运行频率，提高其工作寿命。研究结果显示，此类复合式储能器可使动力蓄电池的日利用率降低约 60%，综合效益提升 34%。在容量分配上，需基于风力发电系统的动态变化特点及负载变化规律，采用最优方法对不同类型的储能系统进行匹配，以实现最优性价比。例如：某风力发电工程的数值模拟和仿真研究表明，当锂离子电池与超电容器的容量比例为 7:3 时，系统总寿命费用达到最小，同时能满足风力发电的需求^[6]。

2. 人工智能在电力系统中的运用，对优化电力系统储能能力具有重要意义。科陆电子的“储能+AI”解决方案便是典型案例，该方案利用人工智能强大的计算能力，可精确计算风力和太阳能发电的功率和电量。通过采用深度学习方法，对海量气象、风电、光伏发电等数据进行学习与训练，能够构建高精度的预报模型。例如：通过学习区域内的多个天气、太阳能发电观测资料，可实现对未来几小时乃至几天内太阳能发电功率的精确预报，预报精度较常规方式提升 15%~20%。在此基础上，结合电网电价及储能装置运行状况，利用智能调度方法对蓄电池组进行优化调控：当电力价格处于低位且太阳能发电出现超额时，智能调度系统会控制蓄电设备快速充电；当电力价格处于峰值或太阳能发电功率短缺时，则适时释放储能，从而实现能源的高效存储与合理使用。这种基于人工智能的优化模式，能显著提高储能设备的使用效率，降低对储能设备的配置要求，改善整个电网的综合经济性能^[7]。

3. 钠离子电池作为一种新型可再生能源存储方式，凭借价格低廉、来源丰富等优点，展现出广阔的应用前景。到 2025 年，钠离子动力电池单位电量的价格已降至 0.217 元 /kW·h，使用周期可达 6 000 次以上，逐步实现规模化应用。在家庭用电、小规模商用存储等领域，以钠离子电池为代表的新型低价格储能体系，能够在满足基础存储需求的同时，降低初期投入。在容量分配方面，需结合家庭客户的使用习惯及负载特点进行设计，以在保证正常用电的同时实现最大经济效益^[8]。通过对住宅用户用电资料的统计，为每个家庭配备 2~5 kW·h 的钠储能容量，既能实现峰谷电价套利，又能保证家庭用电的稳定与可靠。

4 结束语

合理规划风电光伏并网储能容量优化配置，是实现新能源高效消纳、保障电网稳定运行与提升经济效能的关键举措。未来，需进一步深化数据模型与智能算法的深度耦合，唯有通过科技创新与体制机制保障的双向驱动，才能实现精准高效的储能能力配置，为新能源高比例接入提供坚实的支撑，进而为我国能源结构优化调整及“双碳”战略的落地实施筑牢基础。

参考文献：

- [1] 张成志. 基于 ACO 与 CSO 算法的风电光伏并网储能容量配置优化 [J]. 电气时代, 2025(02):46-49.
- [2] 许翔. 风电光伏并网储能容量的配置优化 [J]. 能源与节能, 2025(04):4-6,15.
- [3] 陈晓明. 风电光伏并网储能容量优化配置对策研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2024(10):104-107.
- [4] 张海洲. 分布式风电光伏的储能容量优化配置方法分析 [J]. 中国科技期刊数据库工业 A, 2024(05):42-45.
- [5] 张永明. 风电光伏并网储能容量优化配置方法 [J]. 自动化应用, 2023(21):72-74.
- [6] 孟聪. 基于分布式风电光伏的储能容量优化配置方法研究 [J]. 通信电源技术, 2024,41(22):53-55.
- [7] 李建林, 孙浩元, 张敏慧, 等. 计及风电平抑的电-氢混合储能容量优化配置 [J]. 太阳能学报, 2025,46(06):120-129.
- [8] 戴睿, 胥丕庆, 张蔚欣. 面向分布式风电光伏的储能容量优化配置方法研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2024(10):190-193.