

风电光伏并网储能容量的配置优化

杨 旭

华能新能源上海分公司 上海市浦东新区 200126

摘 要: 为了提升电网的稳定性、经济性, 本文通过梳理风电光伏发电特性, 分析风电光伏并网储能容量配置的影响因素, 包括新能源的出力特性、负荷需求的变化规律、电网运行时的约束条件、储能设备的技术参数以及经济性指标, 并总结归纳了多种优化策略, 涵盖基于技术约束、经济性、不确定性、智能算法的优化方法并借助具体的公式推导和数据加以论证, 为形成科学合理的风电光伏储能系统赋予了理论支撑和操作指南。

关键词: 风电; 光伏; 并网; 储能容量; 配置优化

前言

全球能源转型背景下, “双碳”战略目标的提出对风能和太阳能的可持续发展十分有利。这两种清洁能源依靠资源丰富且环境影响小的特点, 成为改进能源结构的重要驱动力。风力发电和光伏发电受到天气影响, 发电出力具有很强的波动性。储能技术作为电能时空转换的关键载体, 其应用能够明显改善新能源发电的随机性及波动状况, 并提升电网对可再生能源的接收能力, 但其投入较大, 并且还有着长期的维护支出, 储能设施设置过度时, 就会造成浪费现象; 如果容量不够, 则很难维持电力系统的正常运行。基于此, 本文通过对风电光伏并网储能容量的配置优化进行深入研究, 以促进新能源的高效利用, 保障电力系统安全稳定运行。

1 风电光伏发电特性

作为典型的间歇性和随机性可再生能源, 风能自身特点决定了风力发电出力具有明显的波动性和不确定性。从时间段上来看, 风电出力具有非常强的短期波动特性和长期演变规律; 在时空多维层面上, 因为各地风能资源分布存在地域性差异, 各区域间在风电日间起伏变化以及季节性波动特征上存在着较大差别^[1]。

光伏发电的发电效率受太阳辐射强度、光照时长、环境温度等气象要素的影响, 阳光辐射强度关乎着光伏发电效率, 有很明显的日循环上下浮波动特征; 温度变化对光伏发电性能的影响十分明显, 光伏组件的光电转换效率具备负温度系数特点, 高温状况下能量转换效能会有所下降。季节变换给光伏发电带来明显影响, 在北半球, 夏天日照时间变长, 太阳高度角变大, 辐射强度增大, 发电效率得到改善; 冬天

日照时间变短, 太阳高度角变小, 辐射强度变弱, 发电量明显减少, 区域纬度不同也加大了这种季节性波动效应, 低纬度地区受季节变化影响不大, 高纬度地区则表现出更明显的周期性波动特点。

2 风电光伏并网储能容量配置的影响因素

2.1 新能源出力特性

风电光伏发电的出力特性成为储能系统容量配置的主要参照, 二者明显的波动与间歇特性直接决定了储能需求的大小以及空间分布是否合理。风电出力主要由风速决定, 其功率特性公式如下:

$$P_w(v) = \begin{cases} 0, v < v_c \text{ 或 } v > v_o \\ P_N \frac{v^3 - v_c^3}{v_N^3 - v_c^3}, v_c \leq v \leq v_N \\ P_N, v_N < v < v_o \end{cases} \quad \text{公式 (1)}$$

式中: $P_w(v)$ 表示风电实际输出功率; v 表示实际风速; v_c 表示切入风速; v_N 表示额定风速; v_o 表示切出风速; P_N 表示额定功率。

基于此模型, 在切入风速到额定风速的范围内, 风电功率与风速的三次方呈线性关系, 很小的风速变化就会造成很大的功率变化。

光伏发电出力受太阳辐射照度、电池温度等因素影响, 其功率计算公式为:

$$P_{pv} = G \times A \times \eta_{pv} \times [1 - \alpha(T_c - 25)] \quad \text{公式 (2)}$$

式中: G 表示太阳辐射强度 (W/m^2); A 表示光伏组件阵列面积 (m^2); η_{pv} 表示标准测试条件下的光电转换效率;

α 表示温度系数（一般取 0.002 ~ 0.005/℃）； T_c 表示电池工作时的环境温度（℃）。

由于太阳辐照度具有很大的随机波动性，光伏系统输出功率也存在明显的波动，在多云天气情况下，其瞬时功率可在几分钟内从额定值的 80% 降到 20%。

2.2 负荷需求特性

电力系统负荷特性是储能容量规划的重要因素之一，主要是利用储能装置对新能源发电量与实际用电需求之间的波动，给电网提供必要的调节能力^[7]。峰谷差变化是储能系统参与调峰服务的核心评价指标，假设某地区日负荷曲线为 $L(t)$ ，新能源发电计划出力曲线为 $P(t)$ ，储能系统充放电功率 $P_{es}(t)$ 需满足以下约束条件：

$$P(t) + P_{es}(t) - L(t) \text{ 公式 (3)}$$

当 $P(t) > L(t)$ 的时候，储能系统就会变成充电模式，它的输出功率 $P_{es}(t)$ 则为正数；反之，如果 $P(t) < L(t)$ ，那么储能系统就会处于放电情况，这时候的 $P_{es}(t)$ 就是负数。

表 1 常见储能技术参数对比

储能技术	充放电效率（%）	循环寿命（次）	响应时间	单位成本（元/kWh）
锂离子电池	85-95	2000-10000	毫秒级	1500-2500
铅酸电池	70-80	500-1500	秒级	500-800
钒液流电池	70-85	10000-15000	毫秒级	3000-4000
抽水蓄能	70-85	>10000	分钟级	800-1200

2.5 经济性因素

储能容量配置优化需重点考虑经济性，包括投资、运维成本及收益等方面。储能系统的总投资成本 C_{inv} 为：

$$C_{inv} = C_{es} \times F_{es} + C_p \times P_{es} \text{ 公式 (6)}$$

式中： C_{es} 表示储能系统单位容量的成本（元/kWh）； F_{es} 表示储能系统的总容量（kWh）； C_p 表示储能装置单位功率的成本（元/kW）； P_{es} 表示储能装置的最大输出功率（kW）。

运维成本 C_{op} 占总投资额的比例一般为 2% ~ 5%，可以用 $C_{op} = k \times C_{inv}$ 来估算，其中 k 表示运维成本占总投资额的百分比。储能系统实现经济价值的主要途径有峰谷电价差套利、提供辅助服务等多元化方式，其中通过峰谷套利获得的收益 $R_{arbitrage}$ 可以用以下公式表示：

$$R_{arbitrage} = \sum (P_{es, discharge}(t) \times (P_{peak}(t) - P_{valley}(t) / \eta_{es})) \text{ 公式 (7)}$$

式中： $P_{peak}(t)$ 表示高峰电价； $P_{valley}(t)$ 为低谷电价。

3 风电光伏并网储能容量的配置优化方法

3.1 基于技术约束的优化方法

该方法以平抑出力波动、跟踪计划出力等电力系统技术

2.3 电网约束条件

电网的传输容量、调峰能力等约束条件对储能容量配置有一定的影响，电网最大传输功率限值 P_{max} 对新能源发电出力形成限制，当新能源实际功率 $P(t)$ 超过此阈值时，多余能量须由储能系统吸收，其充电功率为：

$$P_{charge}(t) = P(t) - P_{max} \text{ 公式 (4)}$$

如果电网调峰能力 $P_{grid, peak}(t)$ 较强，储能系统依赖度就会降低，在这种情形下，储能设备需求量 E_{es} 与电网调峰能力存在负相关关系，两者之间的关系表示为：

$$E_{es} \propto \frac{1}{P_{grid, peak}} \text{ 公式 (5)}$$

2.4 储能技术参数

储能技术的性能参数，包括充放电效率、循环寿命及额定功率等，直接影响容量配置结果。不同储能技术参数差异显著，如表 1 所示，为常见储能技术的参数对比。

要求为目标，确定储能容量。为了实现新能源出力波动的平滑控制目标，新能源联合出力波动一般限制在一定区间内（如 $\pm 5\%$ ）。假设新能源初始出力为 $P(t)$ ，经过储能系统调节后的目标出力为 $P_{target}(t)$ ，则储能功率为 $P_{es}(t) = P(t) - P_{target}(t)$ ，此时储能系统的容量应满足如下约束：

$$E_{es} > \max \left| \int_{t_1}^{t_2} P_{es}(t) dt \right| \text{ 公式 (8)}$$

式中： t_1 和 t_2 表示任意时间区间。

3.2 基于经济性的优化方法

该方法以系统全生命周期成本最小化或收益最大化为目标，综合考虑投资、运维成本及各类收益。通过把最低生命周期成本（LCC）当作优化目标，创建包含储能容量和功率的核心决策变量的数学模型，然后经过求解分析来决定最佳储能规划方案。如表 2 所示，为不同储能规模下的全生命周期成本对比情况，结果显示当储能容量到达 20MWh 的时候，系统总成本就表现出明显的下降趋势。

表 2 不同储能规模下的全生命周期成本对比情况

储能容量 (MWh)	初始投资 (万元)	全生命周期成本 (万元)
10	800	1500
15	1100	1300
20	1400	1200
25	1700	1400

3.3 基于不确定性的优化方法

考虑新能源出力与负荷不确定性,运用概率统计和场景分析方法优化。根据概率统计理论建立新能源发电出力及负荷预测模型,风能出力采用威布尔分布描述,光伏发电出力采用 Beta 分布描述,通过设置多种典型运行工况分别计算储能容量需求,最后通过综合评价方法选择出经济且适应的储能配置方案。

假设场景 s 的发生概率为 p_s , 则该场景的最优储能容量为 E_s , 综合最优储能容量 E_{opt} 可表示为:

$$E_{opt} = \arg \min_s \sum p_s \times LCC_s(E_s) \quad \text{公式 (9)}$$

如表 3 可知,为 1000 个场景的优化结果,与确定性方案相比,考虑不确定因素的储能设备容量增加了大约 10%,整个系统的可靠性也得到了很大的提升。

表 3 考虑 1000 个场景的优化结果

优化方法	储能容量 (MWh)	弃电率 (%)	全生命周期成本 (万元)
确定性方法	18	5.2	1250
不确定性方法	20	2.1	1320

3.4 基于智能算法的优化方法

遗传算法、粒子群优化算法等智能算法适用于求解复杂储能容量优化问题,以遗传算法为例,其优化步骤为:编码→种群初始化→适应度函数→选择、交叉与变异→迭代终止。如表 4 所示,通过对比遗传算法与传统方法的优化结果,表明智能算法在复杂约束下具有更优解的能力。

表 4 对比遗传算法与传统方法的优化结果对比

优化方法	储能容量 (MWh)	全生命周期成本 (万元)	计算时间 (min)
传统线性规划	22	1400	5
遗传算法	20	1300	30

结语

风电和光伏并网系统里储能容量的优化配置牵涉到诸多因素之间的协同作用,包括新能源发电的特性、负荷需求的模式、电网运行所受到的限制条件以及储能技术参数和经济性指标等,共同决定储能系统最合适的配置方式及其形成过程。现存的配置优化策略各有所长,技术导向法的技术规格保障性较强,但也许会缺少综合评判经济收益的整体性;以经济收益为中心的优化方法重视成本把控,却也许会给系统的稳定性能带来隐患;依赖不确定性分析的框架,把新能源属性和负荷动态特性结合进来,使得配置方案的鲁棒程度大幅提高;智能算法驱动法凭借其高效率的求解本领,在较复杂的优化环境中能够更好地发挥其作用。未来,储能容量规划会更加重视多目标协同优化,利用大数据分析和人工智能算法,可以做到资源分配的精确调控和运行效率的全面提高。

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] 刘正婷, 李翔. 分布式风电光伏的储能容量优化配置 [J]. 通讯世界, 2024(10):76-78.
- [3] 段树勋. 面向分布式风电光伏的储能容量优化配置方法研究 [J]. 自动化应用, 2023(19):68-70.
- [4] 饶成成. 大数据下分布式风电光伏储能容量配置方法 [J]. 电子设计工程, 2022(05):118-121+126.