

## A 题 高比例风电电力系统储能运行及配置分析

“碳中和”目标驱动下未来电力系统必将是高比例可再生能源电力系统，可再生能源输出功率强随机波动性导致系统运行中功率实时平衡困难；储能被认为是保障系统功率实时平衡的有效手段，由于储能成本相对昂贵，利用储能平衡系统功率将增加系统运行成本；下面以高比例风电电力系统为例，探究“供给侧”低碳化转型对电力系统运行经济性、可靠性影响。

待研究系统包含火电、风电、储能和负荷，火电机组 3 台、装机容量 1050MW；某日风电、负荷归一化功率（1.0p.u.风电对应其装机容量，1.0p.u.负荷对应最大负荷功率）数据见附件 1，风电渗透率（最大风电功率与最大负荷功率之比）递增可能造成系统弃风、失负荷，影响系统功率平衡。

定义：系统单位供电成本=系统发电总成本/系统总负荷电量，发电总成本=火电成本+风电成本+储能成本+弃风损失+失负荷损失，其中：

- 火电成本包括运行成本、碳捕集成本，其中火电运行成本由运行维护成本和发电煤耗成本构成，发电煤耗与其出力关系： $F = aP^2 + bP + c$ ， $F$ 为机组煤耗量（kg/h）， $P$ 为机组出力/MW；运行维护成本按照 0.5 倍煤耗成本考虑，碳捕集成本取决于碳排放量及碳捕集单价，火电机组相关参数如附表 1 所示，电煤价格为 700 元/t。
- 风电成本仅考虑运维成本，相关参数如附表 2。
- 储能成本由投资成本、运维成本构成，相关参数如附表 3。注：在计算每天成本时，需将投资成本平摊至每天，即平均每天投资成本=总投资成本/运行年限/365 天。
- 弃风损失按 0.3 元/kWh 计算，失负荷损失按 8 元/kWh 计算。

基本题：

假设系统日负荷功率最大值 900MW，单位碳捕集成本分别为 0 元/t、60 元/t、80 元/t、100 元/t，摄动风电渗透率，分析计算以下问题：

1. 无风电接入，火电以最小成本运行，绘制机组日发电计划曲线，计算系统单位供电成本，将结果填于表 1 相应栏（保留三位有效数字）。

2. 风电装机 300MW、替代机组 3 时，系统功率平衡发生什么变化？弃风电

量多少？在此场景下，为减少弃风又不失负荷，风电接入装机容量可以降低多少？

3. 风电装机 600MW、替代机组 2 时，系统功率平衡又发生什么变化？在此场景下，为不失负荷，风电接入容量可增加多少？

4. 针对上述 2-3 风电替代场景，考虑上述 4 种碳捕捉成本，系统按最低发电成本供电，计算系统单位供电成本，并将相关计算结果填入表 2、3。

5. 风电装机 900MW、替代机组 2、3 时，失负荷电量多少？为不失负荷，需要配置的最小储能容量是多少（储能充放电效率 90%）？考虑储能成本、单位碳捕捉成本（取 60 元/t），此时系统单位供电成本多大？

6. 当负荷功率不变，试分析风电替代容量递增给系统可靠供电带来哪些挑战？为保障可靠供电，系统单位供电成本发生了什么变化？结合上述计算结果进行定量分析。

拓展题：

7. 针对附件 2 所示的十五天负荷功率（最大值 1200MW）、风电功率（装机容量 1200MW），在风电替代火电机组 2、3 场景下，系统功率平衡存在什么问题？请设计可能的功率平衡解决方案，并论述方案的可行性和有效性。

表 1 风电电量占比为 0 时系统相关指标统计

碳捕集成本 (元/t)	火电运行成本 (万元)	碳捕集成本 (万元)	总发电成本 (万元)	单位供电成本 (万元)
0				
60				
80				
100				

表 2 风电装机 300MW 替代机组 3 时系统相关指标统计

碳捕集单位成本（元/t）	火电机组运行成本/万元	碳捕集成本/万元	风电运维成本/万元	弃风损失		失负荷损失		单位供电成本（元/kWh）
				弃风电量/MWh	弃风损失/万元	失负荷电量/MWh	失负荷损失/万元	
0								
60								
80								
100								

表 3 风电装机 600MW 替代机组 2 时系统相关指标统计

碳捕集单位成本（元/t）	火电机组运行成本/万元	碳捕集成本/万元	风电运维成本/万元	弃风损失		失负荷损失		单位供电成本（元/kWh）
				弃风电量/MWh	弃风损失/万元	失负荷电量/MWh	失负荷损失/万元	
0								
60								
80								
100								

附表 1 火电机组相关参数

技术参数	机组 1	机组 2	机组 3
机组最大技术出力（MW）	600	300	150
机组最小技术出力（MW）	180	90	45
碳排放量（kg/kW·h）	0.72	0.75	0.79
煤耗量系数 $c/(\text{kg} \cdot \text{h}^{-1})$	786.80	451.32	1049.50
煤耗量系数 $b/(\text{kg} \cdot (\text{MW} \cdot \text{h}^{-1}))$	30.42	65.12	139.6
煤耗量系数 $a/(\text{kg} \cdot (\text{MW}^2 \cdot \text{h}^{-1}))$	0.226	0.588	0.785

附表 2 风电运行成本参数

单位电量运维成本(元/kWh)
0.045

附表 3 储能成本参数（储能全寿命周期：10 年）

投资成本		运维成本
单位功率成本（元/kW）	单位能量成本（元/kWh）	单位电量运维成本(元/kWh)
3000	3000	0.05