

山西省混合储能电站的容量配置及收益分析

金 焯

中国华电科工集团有限公司 北京 100160

摘要：山西是全国唯一的国家资源型经济转型综合配套改革试验区。“十四五”时期全省可再生能源获得了新的发展机遇，将加快步入高质量发展新阶段，但可再生能源发展面临既要大规模开发、又要高水平消纳、更要保障电力安全可靠供应等多重挑战。可再生能源高质量发展的任务艰巨而繁重，这给保障电网安全、调峰、调频和辅助服务市场的建设提出了更高的要求，同时也为储能项目的发展提供了更广阔的空间。由此本文研究了一种新型的混合储能电站，并通过不同类型储能的容量配比计算分析，探讨不同容量的配置方案对电站收益的影响，研究表明，合理的容量配置可以有效提高储能电站的经济效益和环境效益，为山西省的能源转型和可持续发展提供有力支撑。

关键词：山西省；新型混合储能电站；容量配置优化；收益分析；能源转型

1 引言

山西是全国唯一的国家资源型经济转型综合配套改革试验区。山西电网以火电为主，风电、光伏为辅，截至2022年底，山西省装机容量12079.52万千瓦，其中火电7841.51万千瓦、占比64.9%，风电2317.81万千瓦、占19.18%，光伏1695.71万千瓦、占14.04%，水电224.50万千瓦、占1.85%。“十四五”时期是山西省深入开展能源革命综合改革试点、打造全国能源革命排头兵的关键期。全省可再生能源获得了新的发展机遇，将加快步入高质量发展新阶段，但可再生能源发展面临既要大规模开发、又要高水平消纳、更要保障电力安全可靠供应等多重挑战，必须加大力度解决扩展开发空间、高比例消纳、关键技术创新、产业链供应链安全、稳定性可靠性等关键问题，可再生能源高质量发展的任务艰巨而繁重，这也给保障电网安全、调峰、调频和辅助服务市场的建设提出了更高的要求，同时也为储能项目的发展提供了更广阔的空间。

2 混合储能电站技术路线

2.1 飞轮储能的选择与应用场景

飞轮储能技术发展以提高能量密度、效率以及降低成本为目标。通常，依据轴系的旋转速度6000~10000 r/min为限，分成低速和高速两类，但低速飞轮直径较大，边缘圆周速度远高于通用旋转机械，达到200~300 m/s，存在结构强度问题，低速飞轮储能不以高能量密度、高功率密度为目标，主要发挥其技术成熟、效率高、成本低廉的优势。

飞轮储能系统是一种优质的调频资源。此外，在功率型储能应用领域，飞轮储能装置优于电池储能。基于飞轮储能系统的快速调频方法与传统调频方法相较，能

够获得约20倍的调频效益，即1MW飞轮储能装置辅助调频能够取代原有的20MW传统燃煤机组的调频。由于充放电率对循环次数没有影响，飞轮的循环次数可以达到105~107次，寿命一般为20年。飞轮储能装置能量密度大，转换效率高，能够达到85%~95%左右，提高能源利用率。飞轮装置对温度、湿度等环境条件不敏感，具有灵活的环境适用性，同时无污染物排放，是对环境友好的清洁装置，能够节省环境维护成本。

考虑到储能项目建设成本较高，单一功能无法满足项目建设收益目标，储能系统的功能复用是目前解决储能项目收益问题的直接方法，因此本项目建成后的对外应充分参与调峰调频辅助服务，对内应充分协调储能系统功能应用，提升储能系统多功能利用率，增加项目收益，而调频收益作为项目不可忽视的收益部分，而飞轮储能具有单机功率大、效率高、循环寿命长、响应速度快并且转换效率大于90%及响应速度快、几乎不需要运行维护等优点，能够实现毫秒级的快速准确响应，解决火电机组爬坡速率慢，响应时滞长带来的无法精准跟踪指令，以及弥补锂电池系统从开始执行调度指令到达标的过渡过程中的缓冲问题。

本储能电站欲采用的单体4MW飞轮是目前全球电力行业单体最大功率飞轮，设备先进，占地面积小，节省了诸多设备成本和施工成本，系统集成简单方便，电网调度更加灵活可靠，维护量极小，成本造价低。全部覆盖了一二次调频应用目前在国际范围内独立复合型储能电站使用。

2.2 锂电池的选择与应用场景

本示范储能电站规划建设规模为100MW/200MWh，铅酸及铅炭电池系统充放电倍率较低，无法完全满足本

工程应用需求。全钒液流电池能量密度低，占地面积大，属能量型电池，而且市场造价较高，系统配置容量很大才具有经济性，故本工程不适合全部采用全钒液流电池储能。锂离子电池国内技术成熟，厂家众多，可以满足本示范项目的应用条件和应用目的。重点考量各储能电池的能量密度、充放电倍率、效率、温度适应性、运行可靠性以及电池运行寿命特征等几大因素，本次采用磷酸铁锂电池。

2.3 全钒液流电池的选择与应用场景

全钒液流电池其具备功率能量独立、功率大能量大、能量效率高、响应速度快、可瞬间充电、循环寿命长、安全可靠、全寿命成本低、选址自由度大、工作环境要求低等技术特点。其中解决电网灵活调节问题、安全性、循环寿命长的特点尤为突出。全钒液流电池利用不同价态钒离子之间的相互转化，通过储存、释放化学能从而实现充放电的过程。与目前储能电站的主流电池——使用非水电解液的锂电池不同，由于全钒液流电池电解质离子存在于水溶液中，发生过热、爆炸的可能性大大降低，液流电池的安全性能让其在电池领域脱颖而出。全钒液流电池储能系统的充电和放电时间在4小时以上，能为国家或区域电力网络所需的灵活性提供有效解决方案，对本项目整体储能系统能起到重要“润滑”作用，即稳定电力系统发电端和受电端电力平衡，需要建立高可靠、强弹性的保障机制。

3 混合独立储能市场盈利分析

3.1 一次调频

(1) 根据山西电科院数据：山西日调节800-1000次，每次调节的里程需求大概120MW。

(2) 按照“一次调频市场容量需求上限为运行日新能源场站预测最大发电出力的10%”，根据山西电力调度中心数据，山西电网单日一次调频动作需求380-1000次，单次调频里程需求约120MW。本项目中标里程取总需求的1/5（参考山西在建及规划储能项目情况估算， $100/5260 \approx 1/50$ ，综合考虑各个场站配置储能有用于调峰或者调频，以及本项目为能源局示范项目，考虑优先调度，故暂按1/5核算），则单次一次调频里程约24MW。

山西省能源局《“十四五”新型储能发展实施方案》提出的2025年新型储能规划容量6GW的发展目标，6.33GW的储能项目分配如下。

考虑到后期储能并网数量增多竞争加剧，但同时新能源装机扩大，一次调频需求增多，故600次/天为全生命周期平均次数。若按照每天调用600次动作去核算的话，

每天每2.4min调用一次。

按照每2.4min调用一次的话，则飞轮系统的配置6套4MW/139kWh/2min即可满足场站一次调频调度需求。一次调频单价5元/MW，日调用600次，单次一次调频里程约21.6MW；一年参与300天，综合性能为2。

3.2 二次调频（AGC调频）

调频里程补偿和调频容量补偿作为调频辅助服务市场中重要的补偿形式，在我国福建、广东、蒙西采用二者结合的方式进行补偿，山西、山东、甘肃等地采用调频里程补偿的方式。调频里程补偿根据调频里程、出清价格、综合性能指标决定。

由于年初国家能源局的相关规定，原则上性能系数最大不超过2，调频里程出清价格上限不超过每千瓦0.015元。

根据出清价格情况，暂选用每天晚高峰时段参与AGC辅助服务，则二次调频单价12元/MW，每3分钟调用1次（山西暂无数据，参考甘肃地区数据），日调用40次，单次二次调频里程约 $50 \times 0.85 = 42.5\text{MW}$ ；一年参与300天，综合性能为2。首年调频里程（首年容量衰减4%）约为489600MW，首年二次调频的收益为1175.04万元。

3.3 电力现货市场交易

(1) 独立储能电站可以通过报量报价或报量不报价方式参与现货市场；

(2) 初期暂时仅参与日前现货市场，具备条件时参与实时现货市场；

(3) 因现货市场与调峰辅助服务融合，故不再参与电力调峰辅助服务市场；

政策依据《山西省电力现货市场交易实施细则V13

交易名称	成交电量 (亿千瓦时)	成交均价 (元/兆瓦时)	最高价 (元/兆瓦时)	最低价 (元/兆瓦时)	电量日前均价（元/兆瓦时）	部分市场均价情况 (元/兆瓦时)	成交均价与现货市场均价 (元/兆瓦时)
2023 年年度普通用户双边协商电力直接交易（新能源）	13.65	370.1	398.4	320	\	\	\
2023 年年度普通用户双边协商电力直接交易（火电）	29.63	383.78	400	355.6	\	\	\
2023 年二季度普通用户双边协商电力直接交易（新能源）	1.04	353.24	300	400	\	\	8.3
2023 年二季度普通用户双边协商电力直接交易（火电）	18.46	375.13	350	410	\	\	30.19
2023 年1月普通用户双边协商电力直接交易（新能源）	7.54	344.43	65	420	全天274.21 9-16段274.7	风电383.55 光伏245.55	70.22
2023 年2月普通用户双边协商电力直接交易（新能源）	3.77	357.3	85	450	全天415.24 9-16段250.83	风电380-390 光伏235-265	-57.84
2023 年3月普通用户双边协商电力直接交易（新能源）	10.42	366.63	115	480	全天336.04 9-16段211.46	风电355-365 光伏245-290	30.59
2023 年4月普通用户双边协商电力直接交易（新能源）	11.24	343.03	85	440	全天336.267 9-16段234.072	风电360-370 光伏210-230	4.76
2023 年5月普通用户双边协商电力直接交易（新能源）	11.63	358.27	125	405.29	全天335.05 9-16段268.99	风电360-370 光伏230-235	1.32
2023 年6月普通用户双边协商电力直接交易（新能源）	5.32	383.14	185	505	全天344.38 9-16段281.31	风电390-395 光伏280左右	38.76

图1 年度、季度、月度普通用户双边协商电力直接交易成交情况

从普通用户双边协商电力直接这个交易窗口来看,新能源(包括风电和光伏)1-6月的月度双边成交均价仅在2月低于现货日前出清均价,其余月份均高于现货日前出清均价,其中1月份正价差最高,达到70.22元/兆瓦时,4、5月份正价差较低,分别为4.76元/兆瓦时以及1.32元/兆瓦时,2月份出现负价差,负价差为57.94元/兆瓦时。

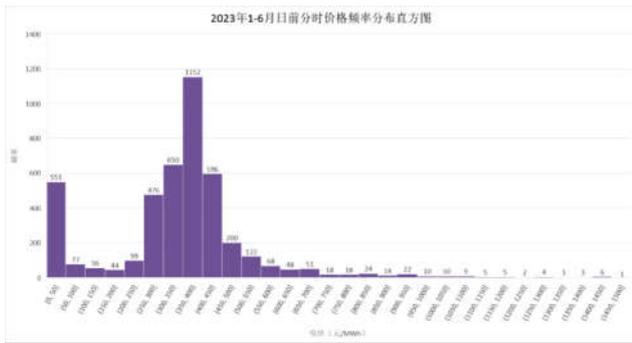


图2 2023上半年日前分时价格频率分布直方图

从日前出清价格的频率分布图来看,日前出清价格分布主要集中在0元/MWh-50元/MWh、250元/MWh-450元/MWh价格区间。其中,300元/MWh-400元/MWh为全年频数分布最多的区间,匹配大部分电厂的成本水平。

根据山西过往数据,价差在0.4元/kWh的条件下(买入按照50元/MWh,卖出按照450元/MWh),参与循环会大于1,考虑到现货交易的变动性,故取1个循环作为全生命周期平均值)。

若此部分配置容量为26MW/100MWh,则此部分收益为:971.03万元

3.4 其他

(1) 调峰辅助服务

政策依据《山西独立储能和用户可控负荷参与电力调峰市场交易实施细则(试行)》。山西省电力现货市场开展后,调峰辅助服务市场关闭。

(2) 容量租赁

趋势存在,在山西省《2023年全省电力市场交易工作方案》中提出研究出台新型储能共享容量租赁交易机制,但目前无明确政策,山西并未要求强制配储,也暂未了解到有落地案例。本文测算中,如按全容量租赁考虑,暂定12万元/MWh。

4 混合储能容量规划对比分析

通过对以上政策及收益分析,储能电站中三种储能形式的容量配比影响着整个储能电站的总收益,下面做

出三种容量配比方案进行收益对比分析:

方案1:飞轮储能 28MW/0.973MWh+磷酸铁锂电池10.35MW/26.838MWh+全钒液流电池61.65MW/172.2MWh

方案2:飞轮储能 28MW/1.834MWh+磷酸铁锂电池10.35MW/20.7MWh+全钒液流电池61.65MW/177.466MWh

方案3:飞轮储能 28MW/2.695MWh+磷酸铁锂电池64MW/133.305MWh+全钒液流电池8MW/64MWh

从上述三个方案的收益表格中可以看到:飞轮储能在进行调频收益中起到很大的作用,方案2和方案3中替换原有的小容量飞轮,增加了2台1000kWh容量的飞轮产品,从而增加了飞轮储能在二次调频中的收益。锂电池储能的收益主要体现在二次调频,现货交易,以及容量租赁中,方案1和方案2中的锂电池容量基本相同,所以收益基本相同,而方案3中的锂电池的容量较大,可以看到二次调频的收益增加幅度较大,从而整站的收益增幅都比较大。全钒液流电池储能的收益主要体现在现货交易和容量租赁中,而在容量租赁的收益政策还不明确的情况下,收益也是不可理想的,而且全钒液流电池的造价也比锂电池的造价要高,所以方案3与方案2调整了锂电池与全钒液流电池的容量,通过比较可以看到收益有明显的增加。虽然本文中未对电站的造价进行核算,但按照单瓦时造价来看,方案3的造价要低于方案2的造价。

5 结论

本文通过对不同类型储能的容量配比进行收益计算分析,得出不同容量的配置方案对电站收益的影响,结果表明,合理的容量配置可以有效提高储能电站的经济效益和环境效益,未来山西省对独立储能电站的政策会更为明确,独立储能电站的收益模式也会更明朗。本文的分析也为山西省的能源转型和可持续发展提供有力支撑。

参考文献

- [1]郭晓,杨帆.风电场接入对电网调峰能力的影响分析[J].中国电力,2019,52(8):123-128.
- [2]张伟.新能源并网对电网稳定性的影响研究[J].电力系统自动化,2020,44(7):89-93.
- [3]高飞,杨凯,惠东,等.储能用磷酸铁锂电池循环寿命的能量分析[J].中国电机工程学报,2013,33(5):41-45
- [4]中关村储能产业技术联盟.储能产业研究白皮书2023[R].北京:中关村产业技术联盟,2023.