

新能源电力系统储能的关键技术与应用探索

刁延伟

寰泰储能科技股份有限公司 上海 201613

摘要：本文聚焦新能源电力系统储能技术，重点剖析全钒液流电池的核心价值。针对新能源发电的间歇性特征，阐述储能技术在平抑波动、提升电网稳定性中的作用，对比不同储能技术路线的优劣，详解全钒液流电池的工作原理、安全与经济性优势，分析其在分布式与集中式场景的应用潜力，为新型电力系统转型提供技术参考。

关键词：新能源电力系统；储能技术；全钒液流电池；新型电力系统；可再生能源

1 引言

全球能源结构向可再生能源转型的进程中，风电、太阳能等新能源占比持续攀升，但发电的间歇性与波动性对电力系统稳定运行构成严峻挑战。储能技术作为平衡新能源出力、保障电力供需匹配的核心手段，其技术突破与应用推广成为新型电力系统建设的关键。本文以全钒液流电池为研究重点，系统探讨新能源电力系统的储能需求、技术路径及应用场景，为推动高比例新能源电力消纳与能源结构低碳转型提供理论与实践支撑^[1]

2 新能源电力系统特性与储能需求

2.1 新能源发电的间歇性与波动性特征

对于风电、太阳能等新能源发电领域，受太阳辐射实时干扰以及风场变化的影响，电力输出表现出明显的间歇性不稳定特征，太阳能在白天阳光充沛阶段，发电产出会快速增长，在无光照的夜间或雨天，产能会大幅下跌，风电系统由于风速不确定，发电出力不稳定，全钒液流电池凭借充放电灵活可控的特性，能在发电不足时释放储存电量，针对新能源发电盈余进行电能存储，实时跟踪新能源出力变化，避免功率输出大幅波动威胁电网频率稳定和电压质量，提升电力供应可靠性。

2.2 储能技术对新能源系统的价值定位

在风光储一体化系统中，储能技术起着至关重要的作用，是助力新能源电力时空调配与高效运用的关键环节。全钒液流电池作为一种新型储能方式，具有出色的能效表现，能够将新能源发电的不稳定电力转化为稳定输出能源。在新能源发电高峰时，全钒液流电池储存多余的电能，避免电能的浪费；在发电低谷时，电池放电，保障电力的持续供应。例如，在一个包含风力发电和光伏发电的风光储一体化项目中，当风力发电在夜间出现高峰，而此时用电负荷较低时，全钒液流电池可以储存多余的风电；在白天光伏发电高峰但用电负荷相对稳定时，^[2]电池同样可以储存多余的光电。通过这种调节

作用，有效改善了可再生能源电力的接纳状况，减少了风光发电的浪费比例。

2.3 储能技术与新能源协同的关键指标

衡量储能与新能源协同运作的关键技术指标包括动作延迟时长、能量留存占比、使用寿命以及输出可调节区间。在动作延迟时长方面，全钒液流电池能够在毫秒级做出响应，快速处理新能源发电时的瞬时功率变动，实现毫秒级的充放电状态切换。这使得它能够及时应对新能源发电的快速变化，有效平抑功率波动，保障电网的稳定运行。相比之下，一些传统储能技术的响应速度较慢，无法满足新能源发电快速变化的需求。

全钒液流电池具有良好的能量留存占比，能够有效把控存储和转换环节的能量损耗，使新能源得以高效转化利用。在能量存储过程中，电池的能量损失较小，能够最大限度地储存新能源发电产生的电能；在放电过程中，也能够高效地将储存的电能释放出来，为电力系统提供稳定的电力支持。这一特性提高了新能源的利用效率，减少了能源的浪费。

从使用寿命来看，全钒液流电池的循环寿命参数处于行业领先地位，能够完成一万次以上充放电循环，且性能不会明显降低，可满足新能源发电设施的长期运行需求。与其他一些储能技术如锂离子电池相比，全钒液流电池的使用寿命更长，不需要频繁更换电池，降低了维护成本和资源消耗，提高了储能系统的可靠性和稳定性。

该电池设备容量可依据新能源发电需求灵活配置，能与不同规模的新能源项目相适配。无论是大规模的集中式新能源发电项目，还是小型的分布式新能源项目，全钒液流电池都可以根据实际需求调整容量，实现最佳的储能效果，提高了储能系统的适应性和灵活性。

2.4 新型电力系统对储能的多元化需求

新型电力系统正朝着可再生能源主导、分布 - 集中混合模式的方向变革，这对储能技术提出了多方面的

要求。在分散式新能源使用场合，如企业厂区、居民片区，需要配备轻巧、标准的储能单元，以支持分布式能源的灵活管理和功率平衡。这些储能单元能够存储分布式能源产生的多余电能，在能源不足时释放，保障分布式能源系统的稳定运行。在企业厂区，当光伏发电在白天产生多余电能时，储能单元可以储存这些电能，供夜间或阴天使用，减少企业对外部电网的依赖，降低用电成本。

在集中式大规模新能源场站，必须依靠大规格、长时段的储能手段，来减少新能源集中发电的不稳定性，稳固电力外送通道。大规模的新能源场站发电功率大，其输出的不稳定性对电网的影响也更大。长时段的储能系统可以在新能源发电过剩时储存大量电能，在发电不足时持续释放电能，保障电力的稳定外送。例如，在一些大型风电场或太阳能发电基地，全钒液流电池储能系统可以储存多余的风电或光电，在电网负荷高峰或新能源发电不足时，将储存的电能输送到电网中，确保电力供应的可靠性。

全钒液流电池凭借显著的规模化储能特性、良好的使用寿命、可靠的安全性能以及可自由组合的模块构造，能够适应新型电力系统各类应用场景的多样化储能需求，对新型电力系统稳定起着关键的支撑作用。在农村新能源微电网中，其模块化设计可灵活对接户用光伏板，解决农网末端供电不稳问题。农村地区的用电负荷相对分散，且受自然条件影响较大，全钒液流电池的模块化设计可以根据农户的实际需求进行灵活配置，为农户提供稳定的电力供应。在高海拔风电基地，耐受极端气候的电池性能能保障冬季连续供电。高海拔地区气候条件恶劣，冬季气温低、风速大，对储能设备的性能要求极高。全钒液流电池能够在这样的极端环境下正常工作，确保风电基地在冬季也能稳定运行，为电网提供可靠的电力支持。这种场景适应性让其成为新型电力系统升级的重要储能选项。

3 主要储能技术路线对比

3.1 储能技术对比

储能技术种类繁多，主要可分为物理储能和电化学储能两大类别。物理储能主要包括抽水蓄能、飞轮储能、压缩空气储能、重力储能等。抽水蓄能是利用水的势能进行储能，在电力负荷低谷时，利用多余电能将水从下水库抽到上水库，储存能量；在电力负荷高峰时，将上水库的水放至下水库发电，释放能量。这种储能方式具有容量大、技术成熟、效率较高（综合效率约在75%左右）等优点，是目前应用最为广泛的物理储能技术。

然而，抽水蓄能对地理环境要求苛刻，需要有合适的地形条件来建设上下水库，这在很大程度上限制了其大规模推广应用。

飞轮储能则是利用高速旋转的飞轮储存动能，通过电机将电能转化为飞轮的动能进行储存，在需要时再将动能转化为电能输出。它具有响应速度快、寿命长、维护成本低等优点，但能量密度较低，储存的能量相对较少，目前主要应用于一些对功率响应要求较高的场合，如不间断电源（UPS）等。^[3]

电化学储能主要包括磷酸铁锂电池、全钒液流电池、钠离子电池等。磷酸铁锂电池是目前应用较为广泛的电化学储能技术之一，它具有能量密度较高、循环寿命较长（循环次数可达2000次以上）、安全性能较好等优点，在新能源汽车、储能电站等领域得到了广泛应用。但它也存在一些缺点，如对温度较为敏感，在低温环境下性能会有所下降，且初始投资成本相对较高。^[4]

全钒液流电池作为一种新型的电化学储能技术，具有诸多独特的优势，如安全性高、循环寿命长（循环次数可达20000次）、放电深度可达100%、容量可在线恢复等，尤其在大容量中长时储能场景中表现出色，成为近年来研究和应用的热点。

钠离子电池是一种新兴的电化学储能技术，具有资源丰富、成本较低、安全性好等优点，但目前能量密度相对较低，循环寿命和稳定性等方面还需要进一步提高，处于技术研发和产业化初期阶段。^[5]

4 全钒液流电池技术剖析

4.1 工作原理

全钒液流电池是一种以钒为活性物质呈循环流动液态的氧化还原电池，其工作原理基于钒离子价态的变化实现电能与化学能的相互转化。在全钒液流电池中，钒电解液作为电能存储介质，被存储在电池外部的储罐中。通过循环系统，钒电解质溶液被输送进入电堆，在电极表面发生氧化还原反应。

具体而言，当电池放电时，正极发生还原反应， VO_2^+ 得到电子并与2个 H^+ 结合，生成 VO^{2+} 和 H_2O ，电极电势差降低，化学能转化为电能；负极发生氧化反应， V^{2+} 失去电子生成 V^{3+} 。而在充电过程中，反应方向相反，正极发生氧化反应， VO^{2+} 失去电子并与 H_2O 反应生成 VO_2^+ 和2个 H^+ ，负极发生还原反应， V^{3+} 得到电子生成 V^{2+} ，电极电势差升高，电能转化为化学能，从而实现了电能的存储与释放。

由于全钒液流电池的正极和负极均为钒溶液，正极为4价和5价钒，负极为2价和3价钒，虽然价态不同，但

物质完全相同，因此被称为全钒液流电池。这种独特的结构使得电池的功率部分和容量部分相互独立，即功率与容量解耦。在功率固定的情况下，如需增加储能时长，只需要增大电解液储罐即可，这一特性使得全钒液流电池尤其适合大容量中长时储能场景，储能时长越长，单位瓦时的造价成本越低。

4.2 技术优势

4.2.1 安全性

全钒液流电池系统主要由金属、工程塑料、水系电解液等组成，这些材料均为不易燃物质，从根本上降低了火灾和爆炸的风险。系统在常温常压下运行，最高温度不超过40°，无需特殊的高压或高温环境，减少了因压力或温度异常导致的安全隐患。这种本征安全的特性使得全钒液流电池非常适合在电力系统大规模储能场景中应用，能够有效保障储能系统的安全稳定运行，降低了因储能系统故障引发的安全事故风险，为电力系统的可靠运行提供了有力保障。^[6]

4.2.2 经济性

从全生命周期的角度来看，全钒液流电池在现有主要电化学储能技术中，具有显著的全生命周期度电成本优势。其日历寿命高达20-25年，与电力系统其他主要设备的日历寿命基本持平，能够长期稳定地为电力系统提供储能服务，减少了因设备更换而带来的成本和资源浪费。全钒液流电池的循环次数可达20000次，且在20000次循环后容量衰减不超过10%，这意味着在长期使用过程中，电池的性能稳定，能够持续高效地进行充放电操作，降低了单位电量的成本。^[7]

在全钒液流储能系统中，电解液的成本占到总成本的50%以上，而在全生命周期内，电解液不消耗、不衰减，可永久性循环使用，且电解液独立存放于储罐中，回收极其简单。全钒液流储能电站退役时，可回收残值

高达50%以上，这进一步降低了全生命周期的成本。相比之下，其他一些储能技术如锂离子电池，虽然初始投资成本相对较低，但由于其使用寿命较短，循环次数有限，且回收价值较低，导致全生命周期度电成本较高。综合考虑日历寿命、循环次数和回收残值等因素，全钒液流电池在现有电化学主流技术中具有明显的经济性。

5 结论

随着电解液特性的不断优化和模块部署的加速，全钒液流电池在集中式基地和分布式场景中的应用将大幅增加。这不仅有助于保障新型电力系统对高比例可再生能源电力的消纳能力，还将推动电力系统朝着低碳清洁的方向变革，在实现“双碳”目标的征程中发挥关键作用，^[8]成为未来新能源储能领域的核心技术之一。

参考文献

- [1]边家瑜,周专,于志勇,等.高比例新能源电力系统下基于多尺度的构网型储能配置优化研究[J].可再生能源,2025,43(06):839-845.
- [2]柳曦.能源互联网下新能源电力系统中的储能技术[J].智慧中国,2025,(05):122-123.
- [3]孙文彬.储能技术在新能源电力系统中的应用分析[J].中国设备工程,2025,(10):218-220.
- [4]王萍.基于储能技术的新能源电力优化设计研究[J].中国高新科技,2025,(09):59-61.
- [5]施卫华.电力储能技术在新能源电力系统中的应用与发展[J].绿色科技,2025,27(06):214-220+227.
- [6]李春生,王生春,孔祥宇.储能主动安全技术在新能源电力系统的应用[J].电工技术,2025,(06):59-64.
- [7]李军徽,黎静华.高比例新能源电力系统中储能优化控制和配置技术[J].东北电力大学学报,2025,45(01):7-8.
- [8]汲国强,张煜,张莉莉.中国电力供需分析报告(2025)[J].国网能源研究院国家气候中心2025,7