

山西省新能源储能调频技术应用

白皮书

(2025年12月)

山西省电力行业协会

山西省新能源储能调频技术应用

(2025 年 12 月)

山西省电力行业协会

目录

一、前言

二、储能调频技术发展现状与趋势

2.1 全球及中国储能调频发展概况

2.2 山西省电力系统调频需求分析

2.3 主要储能调频技术路线对比

三、核心技术与装备创新：全球单体规模最大超级电容项目、国家绿色低碳先进技术项目、山西省能源领域首台（套）重大技术装备示范项目混合储能独立调频的偏关示范

3.1 示范项目概况：偏关 100MW 混合储能独立调频电站

3.2 关键技术装备：“60MW/30s 超级电容储能设备”

3.3 技术突破

3.4 技术经济性与安全性评估

四、混合储能独立调频技术的应用价值与实践意义

4.1 全面增强自主创新能力，抢占科技发展制高点

4.2 在新型电力系统中的应用价值

4.3 在能源转型中的实践意义

4.4 典型案例运行成效分析

五、技术迭代与推进发展

5.1 技术先进性、经济适用性

5.2 对山西省储能产业政策建议

5.3 迭代发展与市场展望

六、 结束语

一、前言

能源是国民经济的命脉。建设清洁、低碳、安全、高效的新型能源体系，是实现高质量发展、建设美丽中国的必然要求，也是山西省推动能源革命综合改革试点的战略举措。能源转型，直接呼唤加快新型电力系统建设，强化电力系统灵活调节能力，推动储能等新型调节资源规模化发展与技术创新。

随着“双碳”战略目标的深入推进，我国能源结构正经历深刻变革，以风电、光伏为代表的新能源装机容量持续快速增长。据国家能源局数据显示，截至 2025 年三季度，全国风电、光伏总装机容量突破 17.1 亿千瓦，同比增长 36.4%，占全国发电总装机容量的 46%。然而，新能源发电固有的间歇性、波动性与随机性，对电力系统的实时平衡与频率稳定构成了严峻挑战。调频服务已成为电力系统升级的重中之重。储能技术，特别是具备毫秒级响应能力的功率型储能，成为提升应对高比例新能源接入的关键手段。

山西省作为国家重要的能源基地和电力输出大省，正处在从传统能源向新能源和可再生能源转型的关键时期。省内电网以火电为主，新能源渗透率不断提升，调峰调频压力日益凸显。截至 2025 年 6 月底，全省新能源装机达 7568 万千瓦，占比超 47%，按新能源容量 15%—20%配置储能测算，全省储能需求高达 1135 万—1513 万千瓦，当前缺口巨大，且

每年新增需求达 150 万—200 万千瓦。根据电网运行数据，频率波动问题亟待解决。大力发展储能调频技术，不仅是保障山西电网安全稳定运行的现实需要，也是推动能源产业转型升级、培育新质生产力的重要抓手。

山西省电力行业协会与深圳市今朝时代股份有限公司、山西中电金谷储能科技有限公司联合发布本白皮书，旨在系统总结山西省在储能调频领域，特别是依托山西省能源领域首台（套）重大技术装备、全球单体规模最大超级电容混合储能独立调频示范项目所取得的技术突破与应用经验，明确混合储能技术发展路径，为全省乃至全国规模化推广储能调频应用提供“山西方案”。

二、 储能调频技术发展现状与趋势

2.1 全球及中国储能调频发展概况

国际电力，已将储能广泛纳入调频辅助服务市场，形成了成熟的商业模式。美国、日本、韩国、欧盟等国家均把超级电容器项目作为国家级的重点研究和开发项目，同时也有众多的公司从事超级电容器业务。技术路线从单一的锂电池储能，向飞轮储能、超级电容储能以及多种技术结合的混合储能系统发展，以追求更优的响应速度、循环寿命和全生命周期经济性。

在中国，随着电力市场化改革深化和新能源占比提升，储能参与调频从“示范”走向“规模化应用”。国家层面政策持续加码，中共中央关于“十五五”规划建议明确提出，全面提升电力系统互补互济和安全韧性水平，大力发展新型储能。新能源储能调频技术应用等行业研究，正推动相关技术标准与市场规则的完善。应用场景从早期的火储联合调频，正快速向电网侧储能独立调频、新能源场站配套调频拓展。

2.2 山西省电力系统调频需求分析

山西电网是“西电东送”的重要通道，电源结构以煤电为主，近年来风电、光伏等新能源装机占比迅速提高。这种电源结构特性导致系统惯量下降，频率调节能力不足问题日益突出。相关研究表明及运行数据反映，电网频率偏差事件频发，对电网安全稳定运行和电能质量造成影响。

2025 年 3 月，山西省将有偿一次调频辅助服务纳入“两个细则”，通过考核补偿机制激励独立储能电站、配储火电机组等并网主体提供额外调频出力，储能调频成为保障电网安全稳定的关键手段。正是在各地差异化发展、多点开花的格局中，偏关首台（套）混合储能独立调频项目正式运营。

独立储能电站、特别是能够提供瞬时功率支撑的混合储能系统，成为弥补系统调频能力短板、提升新能源消纳空间、优化电网运行质量的有效解决方案。

2.3 主要储能调频技术路线对比

当前应用于调频的主流储能技术主要包括：

锂离子电池储能：能量密度高，技术成熟，是目前调频市场的主流选择。但其循环寿命（数千次级）与频繁的秒级调频指令匹配度有待提升，存在一定的安全风险。

飞轮储能：功率密度高，响应速度快，寿命长。但能量密度低，维持时间短，且存在机械磨损和成本较高的问题。

超级电容储能：功率密度极高，响应速度可达毫秒级，循环寿命超百万次，安全性好（物理储能机制），工作温度范围宽。其短板在于能量密度低，适合短时大功率场景。

混合储能系统：将能量型储能（如锂电池）与功率型储能（如超级电容、飞轮）相结合，通过智能能量管理，实现优势互补。超级电容/锂电池混合系统，由超级电容承担高频、短时的功率波动，锂电池提供持续的能量支撑，能显著提升

系统整体响应速度、调节精度，并大幅延长锂电池的使用寿命，是当前技术发展的前沿方向。

表 1：主要调频储能技术特性对比

表1 主要调频储能技术特性对比				
技术指标	锂离子电池	飞轮储能	超级电容	超级电容+锂电池混合系统
功率密度	中	高	极高	高（继承超级电容优势）
能量密度	高	低	低	中高（继承锂电池优势）
响应速度	秒级	毫秒级	毫秒级	毫秒级 毫秒级
循环寿命	数千次	>100万次	>100万次	系统寿命显著延长
安全性	需严格热管理	机械风险	本征安全	安全性提升
适应场景	分钟-小时级调频	秒级调频、瞬态支撑	秒级及以下瞬时调频	全频段、高性能调频

三、核心技术与装备创新：全球单体规模最大超级电容项目、国家绿色低碳先进技术项目、山西省能源领域首台（套）重大技术装备示范项目混合储能独立调频的偏关示范

3.1 示范项目概况：偏关 100MW 混合储能独立调频电站

项目地位：全球已投运单体规模最大的超级电容调频电站，国家发改委第二批绿色低碳先进技术清单入选项目，山西省能源领域首台（套）重大技术装备示范项目。

基本情况：位于山西省忻州市偏关县，由山西中电金谷储能科技有限公司投资建设，深圳市今朝时代股份有限公司提供双电层超级电容、能量调度核心装备以及系统集成。项目总装机容量 100MW/42.5MWh，于 2025 年 8 月实现全容量并网。

技术路线：采用“超级电容+磷酸铁锂电池”混合储能技术路线。其中，超级电容系统装机 60MW/30s（12 套 5MW/30s 单元），锂电池系统装机 45MW/45MWh（9 套 5MW/5MWh）。两套混合型储能通过先进的能量管理系统（EMS）协同控制，共同参与电网一次、二次调频。

3.2 关键技术装备：“60MW/30s 超级电容储能设备”

该装备是首台（套）认定的核心，也是混合储能系统实现功率响应与快速调节的重要支撑。

装备构成：由 3000F/3V 高性能双电层超级电容单体、高可靠性模组 PACK、专用主动均衡电容管理系统（SCMS）、液

冷热管理系统、消防系统及预制舱等集成。

技术规格与水平：

超高功率与快速响应：额定功率 60MW，可实现电容本体响应时间小于 1ms，调频性能系数（K 值）显著优于传统储能。

超长循环寿命：超级电容单体循环寿命 ≥ 100 万次（100% 深度充放电），远超调频场景需求，保障了系统全生命周期的经济性。

高安全与宽温域：采用物理储能机制，从根本上避免热失控风险。工作温度范围 -40°C 至 65°C ，适应山西复杂的气候环境。

高精度状态管理：创新开发了高精度单体等效串联电阻（ESR）在线确定方法和模组精确荷电状态（SOC）计算模型，提升了系统运行可靠性与安全性。

自主化率：从电极材料、单体制造、成组技术到系统集成，实现了全链条关键技术自主可控，核心装备自主化率达 100%。

3.3 技术突破

1. 材料与工艺创新：开发了多级孔道活性炭电极材料，首创“八步混料法”与正负极差异化极片工艺，实现了电极材料的高均匀分散与长寿命设计。

2. 结构设计创新：采用“中空轴”集流结构及过盈配合

设计方案，有效降低内阻，提高功率密度和循环寿命。

3. 系统集成创新：在国内首次成功集成并应用 MW 级（5MW 单元）双电层超级电容储能系统，攻克了大功率超级电容系统的一致性管理、频繁充放电、动态均衡、热管理、状态估计等集成难题。

4. 混合控制策略创新：研发了基于模糊逻辑和模型预测控制（MPC）的动态功率分配算法，实现了超级电容与锂电池的毫秒级协同，使超级电容优先响应高频波动，有效降低调用锂电池充放电次数，且根据现有项目情况可以提升系统寿命 200%。

3.4 技术经济性与安全性评估

经济性：超级电容凭借其超长循环寿命（10 年百万次以上）、较低的运营成本、以及在混合储能系统中作为调频主力所发挥的作用，使得混合储能系统全生命周期成本（LCOE）具备显著竞争力，目前偏关项目通过参与电力辅助服务市场已产生稳定收益。

安全性：超级电容的物理储能机制决定了其极高的本质安全性。项目构建“本质安全+主动防护+智能监控”三重安全体系，安全性达到行业领先水平，并通过严格的出厂测试、现场调试与运行监控，确保了电站的整体安全。项目已投保相关保险，风险可控。

四、混合储能独立调频技术的应用价值与实践意义

4.1 全面增强自主创新能力, 抢占科技发展制高点

1. 多元的技术路线: 超级电容调频系统的关键技术包括高性能低成本电容炭技术、高电导率电解液技术、低内阻电极制造工艺、超级电容器单体技术和组合模块技术。这些技术共同构成了超级电容调频系统的核心, 使其在调频应用中表现出色。

2. 典型的应用场景: 深圳市今朝时代股份有限公司已形成系列化产品矩阵, 超级电容在发电侧调频应用主要与火电机组联合调频, 目前已在山西、山东、内蒙古、福建、湖北、珠海等多个省市投产。除了电力系统和新能源领域, 超级电容储能调频技术的应用场景还将延伸至高精密制造、重型工业设备等工业领域, 轨道交通、电动汽车与充电桩、港口与船舶等交通运输领域, 航空航天与军事领域。

3. 智能化、绿色化、融合化方向: 混合储能技术通过计算机、物联网等新技术手段, 能够对储能系统中的各种储能设备进行协调控制, 同时实现对供电网络的动态调节和优化调度。通过原始创新、开放创新、集成创新大规模消纳绿电, 体现了鲜明的融合化、绿色化导向。

4.2 在新型电力系统中的应用价值

1. 提升电网频率稳定水平: 混合储能毫秒级响应能力可快速平抑新能源出力波动和负荷突变引起的频率偏差, 将

频率合格率提升至更高水平。

2. 增强系统调节能力与灵活性：为电网提供优质的快速调频资源，缓解传统机组调节压力，提升高比例新能源接入下系统的灵活调节能力。

3. 提高新能源消纳能力：通过快速调节，为风电、光伏等波动性电源提供“缓冲”，减少弃风弃光，提升清洁能源利用率。

4. 保障重要用户供电质量：可为对电能质量敏感的高精密制造、数据中心等用户提供电压支撑和瞬态频率保障。

4.3 在山西省能源转型中的实践意义

1. 示范引领作用：偏关项目作为首台（套）重大技术装备成功应用，为山西省乃至全国大规模混合储能调频电站的建设、运营提供了可复制、可推广的技术范式和商业模式。

2. 推动产业升级：带动了从核心材料、高端装备制造到系统集成、智能运维的储能全产业链在山西的发展，培育新的经济增长点。

3. 支撑能源革命综合改革试点：是山西构建新型电力系统、实现能源绿色低碳转型的关键技术支撑，符合国家能源战略方向。

4. 创造社会经济综合效益：在保障电网安全的同时，通过市场化交易获得经济收益；项目建设和运营带动地方就业与税收；促进区域绿色经济发展。

4.4 典型案例运行成效分析

以偏关 100MW 混合储能独立调频电站为例，其并网成果显著，各项指标均达到或超过设计要求，实现环境效益、社会效益与经济效益的有机统一。

调频性能：自并网试运行以来，系统综合调频性能指标（如响应速度、调节精度、K 值）显著优于单一锂电池储能电站，能够精确追踪频率变化，进行一次调频调节。

运行可靠性：系统可用率超过 99.5%，超级电容系统运行稳定，未发生安全事故。

经济收益：已初步验证了其在山西电力辅助服务市场规则下的盈利能力，为投资者带来稳定回报。

社会效益：项目作为标杆工程，已接待多批次行业专家、政府领导考察，起到了良好的技术科普与产业宣传效果。

五、 技术迭代与推进发展

5.1 技术先进性、经济适用性

1. 节本空间：高性能超级电容等核心部件成本仍有下降空间，需通过规模化生产和技术迭代持续降本。

2. 标准体系：混合储能系统的设计、测试、并网、运维等技术标准和安全规范仍需进一步建立健全。

3. 市场机制：当前电力辅助服务市场的价格机制、补偿标准对混合储能等高性能调频资源的激励作用有待进一步优化，投资回报预期需更加清晰稳定。

4. 系统协同：混合储能涉及多类设备的协调控制，对系统集成和智慧运维提出了更高要求。

5.2 对山西省储能产业政策建议

1. 强化政策引导与支持：

落实并优化首台（套）装备保险补偿、示范项目奖励等政策。

研究制定针对混合储能等先进技术的专项扶持政策。

推动将更体现调频性能价值的市场机制纳入山西电力市场规则。

2. 加快标准体系建设：

支持行业龙头企业、科研机构联合制定混合储能调频系统的省级地方标准或团体标准。

推动相关标准上升为行业或国家标准。

3. 打造产业集群与创新平台：

围绕偏关等示范项目，规划建设储能产业园区，吸引上下游企业集聚。

支持建立省级储能技术创新中心或重点实验室，持续攻关关键材料与核心技术。

4. 推动多元化场景应用：

在新建新能源场站、大型工业用户、微电网等场景中，鼓励配置混合储能系统。

探索“共享储能”、“云储能”等新模式在调频领域的应用。

5.3 迭代发展与市场展望

技术趋势：未来储能调频技术将向更高效、更安全、更智能、更低成本方向发展。混合储能（超级电容+锂电池/钠电池等）将成为主流技术路线之一。数字化、人工智能技术将深度赋能储能系统的状态预测、智能运维与市场交易。

市场展望：随着新能源渗透率持续提高和电力市场改革深化，全国范围内对优质调频资源的需求将呈爆发式增长。预计未来 5-10 年，储能调频市场规模将达到千亿元级别。山西省凭借先行先试的示范优势、扎实的产业基础和明确的政策导向，有望在全国储能调频产业发展格局中占据重要地位。

六、结束语

山西省依托能源革命综合改革试点优势，在储能调频技术研发、装备制造、工程应用等方面走在全国前列，已形成“技术研发-装备制造-工程示范-商业化运营”的完整产业链。偏关 100MW 混合储能独立调频电站及 60MW/30s 超级电容储能设备这一国家绿色低碳先进技术示范项目、山西首台（套）重大技术装备项目的成功实践，标志着在“超级电容+锂电池”混合储能调频技术领域取得了重大突破，走在了全国前列。

今朝时代作为核心技术提供商，凭借全链条自主创新能力，为项目成功落地提供了关键支撑。其研发的混合储能技术以极速响应、超长寿命、高安全性和卓越的经济性，不仅有效解决了山西电网高比例新能源接入下的频率稳定难题，更提供了可复制、可推广的“山西方案”，为全国新型电力系统建设提供了重要借鉴。

展望未来，储能调频技术将成为构建新型电力系统的基石之一。山西省紧抓能源革命战略机遇，充分发挥示范项目的引领作用，持续优化政策环境，完善标准体系，壮大产业集群，推动储能调频技术从“示范应用”走向“规模化发展”，将为保障国家能源安全、推动绿色低碳转型、实现高质量发展贡献更大的力量。