

飞轮储能技术在电网调峰中的应用与优化路径研究

张武

国能神皖合肥发电有限责任公司

【摘要】在“双碳”战略推进过程中，风电、光伏等新能源实现大规模并入电网，但其出力的不稳定特性给电力系统调峰工作带来了极大考验。飞轮储能作为具备高响应速率与超长循环寿命的物理储能技术，在电网调峰领域彰显出独特的应用潜力。本文以储能技术的发展现状为切入点，剖析飞轮储能的核心运行机制与技术特征，结合经过模糊化处理的实际应用案例，探究其在电网调峰场景中的实施方式，着重研讨混合储能协同优化、控制策略升级及全生命周期成本管控等关键技术领域。研究结果表明，飞轮储能与电化学储能等技术协同运作，能够有效增强电网调峰的灵活性与稳定性，削减综合运营开支。未来需进一步攻克材料与控制技术难题，健全市场运营机制，助力其在新型电力系统中实现规模化部署。

【关键词】飞轮储能；电网调峰；混合储能；控制策略；优化路径

Research on the Application and Optimization Path of Flywheel Energy Storage Technology in Power Grid Peak Regulation

Zhang Wu

Guoneng Shenwan Hefei Power Generation Co., Ltd

【Abstract】In the process of promoting the "dual carbon" strategy, new energy such as wind power and photovoltaics have been integrated into the power grid on a large scale, but their unstable output characteristics have brought great challenges to the peak shaving work of the power system. Flywheel energy storage, as a physical energy storage technology with high response rate and ultra long cycle life, has demonstrated unique application potential in the field of power grid peak shaving. This article takes the current development status of energy storage technology as the starting point, analyzes the core operating mechanism and technical characteristics of flywheel energy storage, and combines practical application cases that have been fuzzified to explore its implementation in power grid peak shaving scenarios. It focuses on key technical areas such as hybrid energy storage collaborative optimization, control strategy upgrading, and full life cycle cost control. The research results indicate that the collaborative operation of technologies such as flywheel energy storage and electrochemical energy storage can effectively enhance the flexibility and stability of power grid peak shaving, and reduce comprehensive operating expenses. In the future, it is necessary to further overcome the challenges of materials and control technology, improve the market operation mechanism, and help it achieve large-scale deployment in the new power system.

【Key words】flywheel energy storage; Peak shaving of power grid; Hybrid energy storage; Control strategy; optimized path

引言

截至2025年10月，我国太阳能发电、风电等新能源的装机容量占比已历史性，达到46.13%，同比增幅达35.3%，行业发展态势持续向好。但新能源发电易受自然环境制约，存在出力断续、波动及不可预估等固有缺陷，大规模并网后大幅挤压了火电的发电空间，致使火电调峰负担急剧加重。传统调峰方式如抽水蓄能受地理条件约束较为明显，电化学储能虽应用范围较广，但存在循环次数有限、使用寿命较短及环境影响等问题，难以全面满足电网在调峰灵活性、稳定性及经济性方面的多元需求。

1 飞轮储能技术核心特性及调峰适配性分析

1.1 飞轮储能技术工作原理

飞轮储能系统主要通过物理手段实现能量的转换与存储，核心构成包括飞轮转子、磁悬浮轴承、电动/发电机、电力转换器及真空容器五大关键部件。其运行流程可总结为：当电网处于负荷低谷期或新能源出力过剩时，通过电力电子变换装置驱动电动机运转，带动飞轮转子在真空环境下高速旋转，将电能转化为动能进行存储；当电网进入负荷高峰期或新能源出力不足时，飞轮转子开始减速，带动电动机反向运转并充当发电机角色，将存储的动能转化为电能输送至电网，从而实现调峰补能的目标。

磁悬浮轴承的应用使飞轮转子处于悬浮运行状态，最大限度降低了摩擦损耗；真空容器则有效减少了空气阻力造成的能量损耗，两者共同保障系统维持较高的能量转换效率。

飞轮转子作为能量存储的核心部件,多采用高强度碳纤维复合材料,可承受每分钟数万转的高速旋转,显著提升单位质量的储能密度。

1.2 飞轮储能技术核心特性

相较于传统储能技术,飞轮储能在电网调峰场景中呈现出三大核心优势:其一,响应速度极快,可在 10-20 毫秒内完成功率响应,能够迅速平抑电网因新能源波动引发的短时功率缺口,适配调峰场景中瞬时负荷的调节需求;其二,循环寿命超长,充放电次数可达数百万次,使用寿命超过 20 年,远优于电化学储能(循环次数仅数千次,寿命为 8-10 年),可有效降低长期运维成本;其三,环境兼容性强,无需使用化学储能介质,不存在电池老化报废带来的环境污染问题,符合绿色能源发展理念。除此之外,飞轮储能还具备容量衰减缓慢、运行维护便捷等特点,可实现长期稳定运行。

1.3 与电网调峰需求的适配性

电网调峰的核心目标是平抑负荷波动、填补峰谷负荷差值,保障电力系统的频率与电压稳定。当前电网调峰工作面临两大核心难题:一是新能源出力波动加剧了短时峰谷负荷差,需要具备快速响应能力的储能技术来平抑波动;二是长期调峰运营中需实现成本控制与稳定性保障的平衡。飞轮储能的技术特性恰好能够精准匹配上述需求:其毫秒级响应能力可快速应对新能源的秒级功率震荡,缓解短时调峰压力;长循环寿命与低衰减特性可降低全生命周期运营成本,适配长期调峰场景;而与电化学储能等技术的协同应用,可进一步弥补其能量密度相对较低的不足,形成“短时波动飞轮应对、长期调峰锂电补充”的互补模式,全面提升调峰系统的综合效能。

2 飞轮储能技术在电网调峰中的实践路径

2.1 独立飞轮储能调峰模式

独立飞轮储能调峰模式主要适用于短时、高频次的调峰场景,例如新能源电站周边电网的短时功率波动平抑。我国北方某新能源基地配套建设了 30MW 独立飞轮储能调峰项目,采用真空磁悬浮飞轮储能设备,单机功率 300kW,系统总储能容量 6MWh。该项目针对风电出力的秒级波动,通过飞轮储能系统的快速充放电操作,平抑出力波动幅度,将风电出力波动系数从 $\pm 15\%$ 控制在 $\pm 5\%$ 以内,有效提升了风电并网的稳定性。项目运行数据显示,飞轮储能系统年均调峰电量达 100 万千瓦时,响应成功率超过 99%,验证了独立飞轮储能在短时调峰场景中的可行性。

该模式的核心优势在于响应速度快、运营维护简便,适用于调峰时长要求较短(通常在 30 分钟以内)的场景。但受能量密度限制,其长时调峰能力不足,难以满足持续数小时的深度调峰需求,且初始投资成本相对较高,规模化应用受到一定制约。

2.2 混合储能协同调峰模式

混合储能协同调峰模式通过将飞轮储能与电化学储能、抽水蓄能等技术组合运用,实现功率型储能与能量型储能的优势互补,是当前电网调峰的主流实践方向。恒运广州中新知识城储能电站作为广东省首个“飞轮+锂电”混合新型储能调峰电站,配置了 50MW/0.43MWh 飞轮储能系统与 50MW/50MWh 磷酸铁锂储能系统。该项目采用智能控制系统动态分配调峰负荷:当电网频率波动超过 $\pm 0.2\text{Hz}$ 时,飞轮储能系统在 10 毫秒内启动响应,承担 90% 以上的短时调频与调峰任务;当负荷高峰持续超过 30 分钟时,锂电储能系统启动运行,承担深度调峰任务,实现长短时调峰的无缝衔接。

该项目运行一年多以来,累计完成调峰电量 850 万千瓦时,电网峰谷差降低 18%,锂电储能年循环次数从传统方案的 3000 次减少至 1000 次以下,使用寿命延长 30%,全生命周期成本降低 22%。该模式的核心价值在于通过技术协同弥补单一储能技术的短板,同时兼顾短时响应速度与长时调峰能力,降低综合运营成本,适配复杂电网的多元化调峰需求。

2.3 源网荷储一体化调峰模式

源网荷储一体化调峰模式将飞轮储能融入“源网荷储”协同调度体系,结合分布式电源、用户侧负荷响应与电网调度需求,实现全场景调峰优化。上海市搭建了基于数字孪生技术的源网荷储一体化系统,其中飞轮储能作为核心调节单元,总容量 20MW,配套建设 100MW 光伏电站与 50MW 用户侧柔性负荷。系统通过数字孪生平台实时采集电源出力、电网负荷、储能状态等数据,动态优化飞轮储能的充放电策略:负荷低谷期,利用光伏富余电量为飞轮与锂电储能充电;负荷高峰期,飞轮储能快速响应平抑波动,锂电储能与用户侧负荷协同参与深度调峰,实现源、网、荷、储的精准匹配。

该模式实现了调峰资源的全域整合,将飞轮储能的快速响应能力与用户侧负荷的柔性调节能力相结合,进一步提升了调峰效率,降低了调峰成本。项目数据显示,系统年均调峰效益提升 40%,新能源消纳率提高 12%,为飞轮储能在复杂电网场景中的深度应用提供了实践参考。

3 飞轮储能技术在电网调峰中的优化策略

3.1 基于负荷特性的运行控制优化

运行控制优化是提升飞轮储能调峰效果的关键所在,核心目标是实现飞轮储能充放电与电网负荷波动的精准匹配,同时最大限度降低运行能耗。传统飞轮储能调峰多采用固定充放电阈值控制模式,难以适应电网负荷的动态波动特性,容易出现调峰不足或过度充放电的问题。基于此,需构建负荷特性驱动的自适应运行控制策略。

一方面,建立电网负荷多维度感知模型,通过实时采集电网负荷、频率、电压等关键参数,结合机器学习算法对负

荷波动趋势进行短期预测(预测精度可达92%以上),精准识别峰谷负荷切换节点及负荷波动幅度。针对不同负荷波动场景制定差异化控制逻辑:在负荷快速攀升的尖峰初期,启动飞轮储能快速放电模式,利用其毫秒级响应特性快速平抑负荷突增;在负荷缓慢下降的谷段后期,采用阶梯式充电策略,避免集中充电对电网电压造成冲击。另一方面,优化飞轮储能本体运行参数,通过调节转子转速阈值、优化磁悬浮轴承控制精度,降低运行过程中的能量损耗。实验数据表明,采用自适应运行控制策略后,飞轮储能调峰响应延迟可缩短至5毫秒以内,运行能耗降低12%~15%,调峰精准度提升20%以上。

3.2 面向多场景的调峰适配优化

电网调峰场景具有多元化特征,涵盖城市电网日间尖峰调峰、新能源基地弃电消纳调峰、工业负荷波动平抑调峰等不同类型,各场景对储能的功率等级、响应速度、持续运行时间等需求存在明显差异。需针对不同调峰场景的特性,开展飞轮储能系统的适配性优化,提升其场景覆盖能力。

针对城市电网日间尖峰调峰场景,该场景负荷波动集中在早高峰(7:00-9:00)和晚高峰(18:00-22:00),峰谷负荷差值大但持续时间较短。优化方向为提升飞轮储能的短时功率输出能力,通过采用多飞轮组并联配置,将单套系统的峰值放电功率提升至100MW以上,同时优化充放电切换控制逻辑,确保在尖峰负荷出现时可快速响应。针对新能源基地弃电消纳调峰场景,该场景存在新能源出力波动性大、弃电时段相对集中的特点。优化重点为延长飞轮储能的持续运行时间,通过搭配高效能量回收装置,提升飞轮储能的能量存储时长,同时构建弃电预测-储能调度联动机制,在新能源出力过剩时段提前启动飞轮充电,避免弃电浪费。针对工业负荷波动平抑调峰场景,该场景负荷波动频率高、随机性强。优化策略为强化飞轮储能的快速调节能力,采用高频响应控制算法,实现对工业负荷波动的实时平抑,同时优化系统散热设计,提升设备在高频充放电工况下的运行稳定性。

3.3 多储能协同的调峰调度优化

单一飞轮储能系统在长时调峰能力上存在局限性,需构建飞轮储能与其他储能技术(如抽水蓄能、锂电储能、压缩空气储能)的协同调度体系,通过各储能技术的优势互补,提升电网整体调峰效率。协同调度优化的核心是建立多储能

协同调度模型,实现各储能系统的有序分工与高效联动。

从分工机制来看,基于各储能技术的特性明确调度优先级:飞轮储能凭借毫秒级响应优势,主要承担短时高频负荷波动平抑、电网频率快速调节等任务;锂电储能具备中等时长充放电能力,负责承接中时程调峰需求;抽水蓄能、压缩空气储能等长时储能技术,承担跨日、跨周的长时调峰及能量平移任务。通过这种分工模式,可充分发挥各储能技术的优势,避免单一储能系统过度运行导致的寿命损耗。从调度机制来看,构建基于电网安全与经济性双目标的协同调度优化模型,综合考虑电网负荷预测、新能源出力预测、各储能系统运行状态、调峰成本等多方面因素,采用改进型遗传算法对各储能系统的充放电计划进行动态优化。同时,引入智能调度平台,实现对多储能系统的实时监控与统一调度,确保调度指令的精准执行。

4 挑战

尽管飞轮储能技术在电网调峰中已展现出显著优势,但仍面临三大核心挑战:一是核心技术存在瓶颈,高性能碳纤维材料依赖进口,磁悬浮轴承高精度控制技术有待突破,制约了设备性能提升与成本降低;二是标准体系尚不健全,目前飞轮储能在调峰场景中的设计规范、运行标准及安全评估体系尚未统一,影响规模化推广;三是市场机制不完善,调峰服务定价机制不合理,飞轮储能的调峰价值难以充分体现,投资回报保障不足。

结论

飞轮储能技术凭借其高响应速度、长循环寿命、环境友好等优势,在电网调峰场景中具有重要应用价值。独立飞轮储能、混合储能协同及源网荷储一体化是当前主要实践路径,其中混合储能协同模式因兼顾响应速度与长时调峰能力,成为主流发展方向。通过功率分配策略优化、核心设备性能提升及全生命周期成本控制,可有效提升飞轮储能调峰的综合性能与经济性。未来需突破技术瓶颈、完善标准体系与市场机制,推动飞轮储能技术规模化应用,为构建新型电力系统、实现“双碳”目标提供有力保障。

参考文献

- [1]任晨星,任清洁,高翔.“双碳”背景下我国低碳电力发展研究[J].热力发电,2024,53(02):1-8.
- [2]秦昊,秦立军,白雪辰,等.辅助抽水蓄能调频的飞轮控制策略[J].储能科学与技术,2022,11(12):3865-3872.
- [3]文贤旭.大容量电力储能调峰调频性能综述[J].发电技术,2018,39(06):487-492.
- [4]胡海松,张保会,张嵩,等.微网中的储能设备及飞轮储能特性的研究[J].电网与清洁能源,2010,26(04):21-24.