

基于 MW 级飞轮的混合储能一次调频控制策略分析

李添汇

辽宁大唐国际新能源有限公司, 辽宁 沈阳 110000

DOI:10.61369/ME.2026010024

摘 要 : 本文系统分析 MW 级飞轮的混合储能及一次调频控制核心技术策略, 并借助实验平台搭建以及实验验证得出结果, 通过建立包含上层协调控制层、中层功率分配层和底层设备控制层的分层控制框架, 能够快速响应电网频率变化并将频率偏差控制在 $\pm 0.25\text{Hz}$ 范围内, 可满足一次调频的精度要求。同时实验还验证, 飞轮和锂电池的功率分配比例符合设计目标, 飞轮承担了主要的调节功率而锂电池作为辅助和能量缓冲。

关 键 词 : MW 级飞轮; 混合储能; 一次调频; 控制策略

Analysis of Primary Frequency Regulation Control Strategy for Hybrid Energy Storage based on MW Level Flywheel

Li Tianhui

Liaoning Datang International New Energy Co., Ltd. Shenyang, Liaoning 110000

Abstract : This article systematically analyzes the core technology strategy of hybrid energy storage and primary frequency regulation control for MW level flywheels, and uses experimental platforms to build and verify the results. By establishing a layered control framework that includes an upper coordination control layer, a middle power allocation layer, and a lower equipment control layer, it can quickly respond to changes in grid frequency and control frequency deviation within $\pm 0.25\text{Hz}$, meeting the accuracy requirements of primary frequency regulation. At the same time, the experiment also verified that the power distribution ratio between the flywheel and the lithium battery meets the design goals. The flywheel bears the main responsibility for regulating power, while the lithium battery serves as an auxiliary and energy buffer.

Keywords : MW grade flywheel; hybrid energy storage; frequency modulation once; control strategy

传统调频资源中火电机组虽有一定调频能力, 但其响应速度慢且调节精度低, 难以满足高比例可再生能源接入电网后的快速调频需求。储能技术中飞轮储能具备毫秒级响应速度、高功率密度、长寿命和环境友好等特点, 适合承担电网一次调频任务^[1]。锂电池储能拥有高能量密度、能量转换效率高和布置灵活等优点, 能够提供持续的能量输出。本文针对 MW 级飞轮混合储能系统参与一次调频的应用场景, 深入分析了飞轮 + 锂电池混合储能特性, 设计一种分层控制框架并提出相应控制策略, 希望可为 MW 级飞轮混合储能系统在一次调频领域的应用提供理论依据。

一、MW 级飞轮储能系统特性

MW 级飞轮储能系统属物理储能技术, 基本原理是借助电动机将电能转化成飞轮动能储存, 再通过发电机将飞轮动能转化为电能释放^[2]。其结构组成主要涵盖高速旋转的飞轮转子、低摩擦的轴承系统(磁悬浮或气浮轴承)、高效率的电力电子变流器以及真空腔体等。该系统最突出的特性是功率密度高, 能够在瞬间输出或者吸收大量的功率, 响应速度快。同时, 能够达到数万次充放电循环, 维护需求低, 对环境比较友好, 在改善电能质量如电网调频和风电平滑、脉冲电源应用、高品质 UPS 应用、机车能量回收、航空航天领域的姿态控制等领域(图 1)均有广泛应用。



图 1: MW 级飞轮储能典型应用场景

作者简介: 李添汇 (1990.11-), 女, 蒙古族, 天津市人, 本科, 工程师, 研究方向: 新能源。

二、一次调频原理及需求分析

（一）电力系统一次调频概述

电力系统一次调频指的是当电网负荷出现瞬时变化让频率偏离额定值时，依靠发电机组自身固有的功率-频率调节特性进行初始频率调整的过程^[3]。其频率偏差产生的根本原因是发电侧总出力与负荷侧总用电量之间存在实时不平衡的情况，当负荷增加致使频率下降的时候，所有具备一次调频能力的发电机组调速器会自动检测到频率变化，然后根据其预设的调差系数也就是频率响应系数自动降低发电机组的负荷设定值，从而让机组增加出力。其调节能力受到机组自身旋转惯量、调速器特性以及最大可调范围的限制，一次调频的作用机制是通过这种快速自发的功率调整来尽力抑制频率的剧烈波动，为二次调频也就是自动发电控制争取时间并且提供一定的频率支撑，是维持电网频率稳定的第一道防线。

（二）MW级飞轮混合储能系统一次调频需求

MW级飞轮混合储能系统参与一次调频，其需求需结合电网要求和系统特性综合分析^[4]。在功率需求方面，此系统需具备和电网规模相匹配的功率调节能力，可快速响应电网发出的频率调节指令，为电网一次调频提供或吸收所需的峰值功率，其功率水平通常处于MW级别以满足大型或区域电网调频需求。在能量需求方面，虽一次调频主要任务是快速调节功率，但调节过程可能持续从秒级到分钟级的一段时间，所以系统须具备一定能量缓冲能力，特别是锂电池部分要能支撑飞轮连续调频时的能量循环或作为长时间备用容量。在动态响应需求上，飞轮储能单元毫秒级响应特性使其非常适合一次调频对快速性的苛刻要求，系统需实现近乎实时的功率调整，响应时间要远小于传统调频资源。同时系统还需要具备高调节精度，能精确跟踪频率偏差信号并输出指令功率以减少频率振荡，控制系统须具备高可靠性和鲁棒性，能在复杂电网工况下稳定运行并满足电网对调频资源并网的各类技术要求。

三、MW级飞轮的混合储能一次调频控制策略

（一）总体框架设计

基于MW级飞轮的混合储能一次调频控制系统框架分为上层协调控制层、中层功率分配层和底层设备控制层。上层协调控制层负责接收来自电网调度中心或者本地频率监测单元的指令，其决策出混合储能系统需提供的总调节功率指令（ P_{total} ）。中层功率分配层依据总功率指令、当前电网频率变化趋势、飞轮和锂电池的实时状态，例如飞轮转速、锂电池SOC、温升等，以及两者的特性差异，制定出精确的功率分配方案，从而决定飞轮（Pflywheel）和锂电池（Plithium）各自应承担的功率份额^[5]。底层设备控制层负责执行具体功率调节任务，重点对飞轮储能单元变流器进行控制，实现所需功率输出，对锂电池储能单元充放电进行管理。框架各层协同配合。上层着重于策略方面的决策制定，中层着重于资源的优化配置工作，底层重于设备精确执行操

作，通过高速通信网络来实现各层之间的信息交互与协调，以此确保整个混合储能系统作为一个整体高效且稳定地完成一次调频任务。

（二）信号采集处理

采集电网频率信号（ f ），通过高精度同步相量测量单元（PMU）获取，采样频率至少50Hz，以此捕捉频率的快速变化情况。重点采集电网有功功率信号（ P_{grid} ），计算实际功率不平衡量，辅助判断频率变化趋势走向。分析飞轮实时转速（ n ），确定飞轮动能状态，锂电池荷电状态（SOC），用于评估锂电池的能量存储水平和剩余调节容量。采集锂电池输出/输入功率（ $P_{lithium}$ ），用来监控锂电池的工作状态和累积充放电量。

（三）控制算法优化

鉴于一次调频有着毫秒级响应速度和快速抑制频率偏差的核心要求，结合飞轮混合储能系统自身特点，应采用以快速响应为核心且融合多种控制思想的优化算法，设计一种基于飞轮快速响应特性的前馈控制与PID反馈控制相结合的复合控制策略，其前馈控制依据频率偏差直接快速地调节飞轮输出功率，借助飞轮的机械惯性实现毫秒级响应，PID反馈控制则用于精确消除稳态频率偏差并对系统进行微调，为进一步优化可在PID参数里引入模糊逻辑进行在线整定，以此适应不同频率变化率和系统工况来提高鲁棒性，又或者在功率分配层面采用基于飞轮SOC和频率变化趋势的动态分配算法，优化锂电池的参与程度以兼顾快速响应与能量效率。

四、控制策略实验验证

（一）实验平台搭建

为了验证所设计的基于MW级飞轮混合储能系统一次调频控制策略是否有效实用，专门搭建了与之对应的实验平台，这个平台模拟出了电网频率扰动的相关场景，并且集成了MW级飞轮储能单元、锂电池储能单元、双向DC/DC变换器、统一DC/AC并网逆变器以及基于高性能DSP的控制单元。在实验过程中，通过模拟电网负荷出现突变情况（像突然增加或者减少一定功率）来产生频率偏差，控制系统会采集频率、功率等信号，执行预先设计好的控制策略，实时调节飞轮和锂电池的功率输出或者输入，实验重点对系统在不同频率扰动幅度和速率条件下的响应速度、调频精度以及飞轮和锂电池的功率分配情况进行了测试。

（二）实践结果

实验结果和基于相同系统参数与扰动条件的仿真结果对比发现，实验结果与仿真结果在频率偏差控制效果、恢复时间以及飞轮和锂电池的功率分配比例上均表现出高度一致性（见表1）。频率偏差全都控制在 $\pm 0.25\text{Hz}$ 的范围以内，很好地满足了一次调频的精度方面要求，恢复时间的实验结果和仿真结果比较接近（1.1~1.2秒区间），充分体现出系统具备快速的功率调节能力。在功率分配这方面，不管是增加负荷还是减少负荷，飞轮都承担了主要的调节功率（约占总调节量75%），锂电池承担大约25%的功率，达成利用飞轮快速响应的特性去承担主要调节任务，锂电

池作为辅助以及能量缓冲的角色的设计目标。两者间存在微小差异（恢复时间差 0.1 秒，功率差异 0.05MW）主要源于实验平台里实际设备产生的损耗、控制系统实时性方面的限制以及传感器噪声等因素。实验验证基于 MW 级飞轮混合储能系统一次调频控制可实现快速且精确的调频控制。

表 1: 实验结果

实验 工况	扰动 类型	扰动 幅度 (Hz)	频率最 低 / 高点 (Hz)	恢复 时间 (s)	飞轮平 均功率 (MW)	锂电池 平均 功率 (MW)
实验 结果	负荷 突增	+0.2	50.25	1.2	-1.5	-0.5
实验 结果	负荷 突减	-0.2	49.75	1.2	+1.5	+0.5
仿真 结果	负荷 突增	+0.2	50.24	1.1	-1.55	-0.45
仿真 结果	负荷 突减	-0.2	49.76	1.1	+1.55	+0.45

五、结束语

MW 级飞轮-锂电池混合储能系统中，飞轮储能依靠其超高速毫秒级响应能力、长寿命以及环境友好等特性，天然适合承担电网一次调频任务，可快速精确地吸收或释放功率以有效抑制频率偏差，将飞轮储能与锂电池结合，通过功率与能量的协同控制，能构建出兼顾快速响应与能量持续输出的高性能调频单元，为电网提供可靠快速无污染的一次调频服务，显著提升电网频率稳定性并增强系统抗扰动能力，还能为电网运营商带来可观经济收益，是支撑高比例可再生能源电网安全稳定运行的关键技术之一，具有巨大潜在应用价值。

参考文献

[1] 褚志杰, 韩朋谊, 郑立星, 等. 混合储能参与电网一次调频的综合控制策略研究 [J]. 动力工程学报, 2025, 45(9): 1511-1518.
[2] 徐雷. 混合储能辅助风电平滑功率和一次调频的控制策略研究 [D]. 华北电力大学 (北京), 2023.
[3] 段继兵, 李亮, 于鸿雁, 等. MW 级飞轮混合储能系统在蒙西风电场的实践应用 [J]. 2024(32): 186-189.
[4] 唐亮, 丁汇, 刘颖杰. 飞轮储能在新能源项目一次调频场景下的经济性研究 [J]. 电气时代, 2024(11): 157-161.