

飞轮—锂电池混合储能单元关键技术应用研究

李星

中国大唐集团有限公司辽宁分公司 辽宁沈阳 110000

DOI: 10.32629/ems.v8i2.18526

[摘要] 当前,全球能源结构正加速转型,以风能和太阳能为代表的可再生能源装机规模持续扩张。但其固有的间歇性与波动性特点使得电网频率和电压稳定性下降,弃风、弃光现象频繁发生,严重制约能源转型进程。本文基于此,围绕飞轮—锂电池混合储能单元关键技术应用展开分析。期望能够实现能源的高效灵活安全利用提供全新思路。

[关键词] 锂电池;混合储能;场景化关键技术

随着能源结构不断转型以及可再生能源大规模发展,高效且可靠的储能技术成为支撑电网稳定运行、提高能源利用效率的关键环节。传统单一锂电池储能技术在实践中存在局限性,一定程度上限制锂电池储能技术的普及,为克服单一锂电池储能技术固有短板,将两种或多种具有互补特性的不同类型储能技术结合,形成协同工作整体,已然成为实现能源高效、灵活、安全利用的新方案。其中,飞轮储能具备功率密度高、响应速度达毫秒级、寿命长循环次数高、环境友好无污染等优点。不过其能量密度相对较低且存在自放电和轴承损耗情况,锂离子电池有着能量密度高、成本相对较低、技术成熟度高、能量转换效率较高等特点。然而,功率密度有限、响应速度较慢且存在循环寿命和安全性问题,将两者结合起来能够扬长避短构建性能更优适应性更强的储能系统并在多种应用场景展现独特技术优势。

1. 传统单一锂电池储能技术局限性分析

锂电池,全称为锂离子电池,是一种以锂离子在正负极材料之间移动来实现充放电的可充电电池。其工作原理基于电化学氧化还原反应。通常由三个主要部分组成:正极(阴极)、负极(阳极)和介于两者之间的电解质隔膜(图1)。充电时,外部电源施加电压迫使正极材料里的锂离子脱离,通过电解质移动到负极并嵌入负极材料的晶格结构中。同时电子从正极流出通过外部电路到达负极,为负极提供还原所需电子,此时正极被氧化而负极被还原。放电时,过程与充

电相反,负极中锂离子在电场作用下脱出,通过电解质移动回正极并嵌入正极材料的晶格结构中,电子从负极流出通过外部电路到达正极,为正极提供氧化所需的电子,此时负极被氧化而正极被还原,进而对外部电路输出电能^[1]。

传统单一储能技术依赖储能介质,只使用单一锂电池、超级电容器或者抽水蓄能这类技术方式,其结构相对简单,在实际应用中存在诸多局限性。例如,在性能表现方面,功率密度与能量密度难以实现平衡。在高能量密度情况下,功率输出会受到限制,快速充放电容易引发过流、发热等一系列问题,进而影响电池寿命。而高功率型号又可能牺牲能量密度或者增加成本,难以同时满足高能量与高功率的需求。其循环寿命受深度充放电的影响较大,电网调频等需要频繁深度充放电的场景会加速电池老化,从而降低经济性。在动态响应速度方面,和超级电容器等相比,锂电池响应比较慢,难以应对毫秒级的电网瞬时频率偏差或者电压骤降等需求,进而影响系统稳定性。

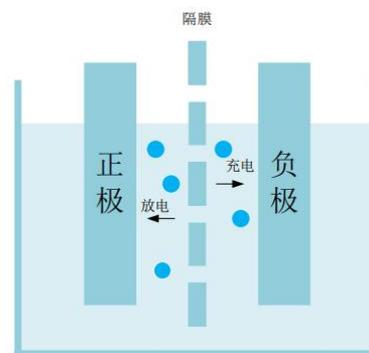


图1 锂电池组成示意图

2. 飞轮-锂电池混合储能系统概述

2.1 混合储能系统定义

为了克服传统单一锂电池储能技术在功率性能、循环寿命、动态响应、温度适应性、安全性和经济性等方面所存在的一定局限性,混合储能系统成为储能技术,这是当前技术发展的重要方向。该技术指将两种或两种以上不同类型且通常具有互补特性的储能技术通过拓扑结构和管理策略进行组合,形成协同工作储能单元。目的在于整合不同储能技术的优势,克服单一储能技术的局限性,进而在整体性能如功率密度、能量密度、循环寿命、效率、成本、可靠性等方面达到最优或者满足特定应用场景的复杂需求。目前,常见混合储能系统组合有锂离子电池和超级电容器结合,此组合既能实现长时间能量存储又能应对瞬间功率需求。锂离子电池和飞轮储能系统组合,可有效提升整个系统动态性能,适用于大规模储能场景。锂离子电池和氢储能系统组合在可再生能源利用方面有显著优势。总体而言,混合储能系统涵盖多种储能技术优势,通过不同技术互补实现储能系统优化配置满足不同应用场景需求。

2.2 飞轮-锂电池混合储能系统组成

飞轮-锂电池混合储能系统由飞轮储能单元、锂离子电池储能单元、双向 DC/DC 变换器、控制器以及能量管理系统等部分所组成的,属新型锂电池混合储能技术。其飞轮储能单元借助高速旋转的飞轮把电能转化成动能来进行存储,并且在需要的时候将动能转化为电能释放出来。锂离子电池储能单元通过电化学反应达成电能的存储与释放。双向 DC/DC 变换器用于连接飞轮和锂电池以实现能量高效转换与传输,控制器负责采集各单元状态信息并执行协调控制策略,同时管理能量流向保护各单元运行在安全边界内。能量管理系统实现系统智能监控、优化调度以及故障诊断来确保系统高效稳定运行^[2]。目前,飞轮-锂电池混合储能系统应用广泛。在电网辅助服务当中可提升调频性能与经济性,在可再生能源并网的时候能提高并网质量与接纳能力,在电动汽车及轨

道交通等领域可减轻主锂电池所承受的负担,在数据中心等 UPS 及备用电源系统里面可提供应急供电方面的保障。

3. 飞轮-锂电池混合储能系统关键技术应用

3.1 功率与能量协同控制

为确保飞轮和锂电池混合储能系统在功率和能量特性上能够相互补充,需建设分层控制架构。在实际操作时,需首先用状态空间平均法来建立飞轮的动力学模型,同时基于等效电路模型来描述锂电池的动态特性。在控制层,需采用双闭环控制结构。外环既是功率分配控制器,负责根据实时负载需求和电网指令把总功率需求分解开来,让飞轮承担高频波动分量部分的功率,让锂电池承担低频稳态分量部分的功率。内环则是能量管理控制器,通过模糊 PID 算法来动态调整双相 DC/DC 变换器的占空比,从而实现飞轮和锂电池之间能量的平滑转移过程。在具体操作中,还可通过引入二次调节机制来防止飞轮和锂电池之间出现能量过冲的现象,从而确保整个系统运行的稳定性^[3]。

3.2 自适应能量管理

面对可再生能源接入电网时功率波动存在不确定性的状况,须使用自适应能量管理策略。该策略核心是利用在线辨识算法来实现储能单元的动态优化配置工作。整个实施过程包含三个步骤,保证系统稳定运行。其一,要建立一个包含功率预测误差和电池 SOC 状态以及飞轮转速的多维状态空间模型,然后使用扩展卡尔曼滤波器对整个系统状态进行实时估计和监测。其二,开发基于强化学习原理的自适应控制器,通过深度 Q 网络算法在系统运行过程中持续优化储能单元的能量分配策略,最终形成一套动态的控制规则库供系统调用。其三,实现能量管理系统在线重构,当系统检测到运行工况发生变化的时候,比如风速突然改变或者光照强度出现波动,系统可自动调用之前存储好的优化策略或者触发全新策略的学习过程。在实际操作时,需通过部署在并网接口位置的 PMU 装置来采集实时功率数据信息,这些数据经过小波变换分解处理之后就能获取不同时间尺度下的功率分量,然后根据各

个分量的特性来动态调整储能单元的参与程度^[4]。例如,对于持续时间在5到10秒之间的功率波动,采用飞轮主导的控制模式处理,而对于持续时间超过30秒的功率波动,则切换到锂电池主导模式运行。

3.3 多物理场耦合控制

多物理场耦合控制是通过构建含电磁场、温度场和机械场的耦合模型来实现系统状态精确预测与控制的。具体实施时,先利用有限元方法构建飞轮储能单元电磁-机械耦合模型,且考虑轴承摩擦热、涡流损耗等非线性因素。同时,构建锂电池热-电耦合模型,并用生热-散热平衡方程描述电池温度分布。在控制层面,采用模型预测控制(MPC)算法,把多物理场耦合模型纳入预测域,并通过滚动优化生成控制序列^[5]。具体操作中,系统部署高精度传感器网络,采集飞轮转速、轴承温度、电池温度和电压等参数,经数据融合后输入耦合模型进行状态预测。当检测到轴承温度超过55℃时,控制器自动降低飞轮转速,并激活锂电池承担部分功率,以避免热失控风险。当电池温度低于-10℃时,系统启动飞轮预加热机制,通过飞轮旋转产生热量预热电池组。该技术还包含故障预测与容错控制模块,基于支持向量机(SVM)算法对运行数据进行故障特征提取,提前识别潜在故障并调整控制策略。

3.4 网络化协同控制

在针对大规模储能电站应用场景方面,飞轮-锂电池混合储能系统采用了网络化协同控制技术。此项技术通过建立多代理控制系统(Multi-Agent System)来实现分布式储能单元的协调优化。具体实施需构建包含本地控制器、区域协调器和中央调度器的三级控制架构,采用基于ZigBee和4G/5G的混合通信网络,以实现数据的高速传输与实时交互,开发基于共识算法的分布式优化算法,以解决多单元协同控制中的计算复杂度问题。值得注意,在具体操作时,每个储能单元应作为独立代理运行本地控制策略,同时可通过区域协调器与其他单元交换状态信息,来形成分布式优化决策。当系

统接收到电网调度指令时,中央调度器会将总任务分解为子任务,再通过拍卖机制分配给各储能单元。各单元依据自身状态和收益函数决定参与度。为此,需重点关注分层能量市场模型的建设,通过将控制指令转化为能量价格信号,引导各储能单元自主调整运行策略。例如,可在电网调频辅助服务市场中,将飞轮单元对价格信号响应系数设定为1.2,而锂电池单元设定为0.8,从而使飞轮优先响应高频调频需求。

结束语

综上所述,飞轮-锂电池混合储能系统,可显著提升系统整体性能、延长系统使用寿命、降低系统运行成本并且拓宽系统应用范围。在其应用过程中要依据场景化情况来做针对性技术选择,同时通过对关键技术进行持续优化,进一步推动能源转型和可持续发展。

[参考文献]

- [1]杨璞. 飞轮+液流电池混合储能辅助火电机组参与电网ACE调频控制策略研究[J]. 电工技术, 2025, (20): 13-15+19.
- [2]唐卫华, 陈长青, 史清芳, 等. 基于数据分解的“飞轮+锂电”混合储能系统辅助风电调频容量配置研究[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(09): 132-140.
- [3]滕伟, 许庆祥, 王亚军, 等. 平滑风电波动的飞轮协同电池混合储能系统经济性配置[J]. 动力工程学报, 2024, 44(07): 1101-1108.
- [4]张继红, 刘云飞, 吴振奎, 等. 飞轮与电池混合储能的直流微网母线电压波动抑制策略[J]. 化工自动化及仪表, 2022, 49(06): 699-706.
- [5]杨文强, 常彬. 计及多影响因素的发电侧混合储能系统容量配置方法及配置工具[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(10): 3246-3256.

作者简介: 李星, 1984.4.17, 男, 汉族, 河北邢台人, 大学本科, 高级工程师, 研究方向: 火电技术。