飞轮储能技术研究进展及应用

李亨的^{1*} 吴越琼¹ 季桐¹ 徐志强²

1 中国能源建设集团浙江省电力设计院有限公司, 浙江 杭州 310012; 2 中能建数字科技集团有限公司, 北京 100000

摘要: 飞轮储能技术具有瞬时功率大, 充放电快, 效率高特点, 是当前储能领域研究的热点。本文介绍飞轮储能的基本工作原理和系统结构及各部分功能, 详细介绍了飞轮储能在轨道交通、传统电力系统和可再生能源领域的研究和应用。通过实时监测飞轮储能的 SOC 特性并维持在满功率充放区可以有效地减小火电机组出力, 平抑风电功率波动。此外, 根据实际情况切换飞轮储能的不同工作模式可以有效地保证列车的安全运行。在进行飞轮储能控制策略设计时, 兼顾飞轮储能系统的 SOC 特性, 再根据需求进行设计, 将会是未来飞轮储能研究的重点。

关键词: 飞轮储能; 一次调频; 平滑功率; 电压支撑; 协同控制

Research Progress and Application of Flywheel Energy Storage Technology

Li,Hengdi^{1*} Wu,Yueqiong¹ Ji,Tong¹ Xu,Zhiqiang²

1China Energy Engineering Group Zhejiang Electric Power Design Institute Co, Ltd, Hangzhou, Zhejiang, 310012, China

2China Energy Digital Technology Group Co, Ltd, Beijing, 100000, China

Abstract: Flywheel energy storage technology features large instantaneous power, fast charging and discharging, and high efficiency, making it a research hotspot in the current energy storage field. This paper introduces the basic working principle, system structure, and functions of each part of flywheel energy storage, and elaborates on its research and application in the fields of rail transit, traditional power systems, and renewable energy. By real-time monitoring of the state of charge (SOC) characteristics of flywheel energy storage and maintaining it in the full-power charging and discharging area, the output of thermal power units can be effectively reduced, and wind power fluctuations can be smoothed. In addition, switching different working modes of flywheel energy storage according to actual situations can effectively ensure the safe operation of trains. When designing the control strategy for flywheel energy storage, taking into account the SOC characteristics of the flywheel energy storage system and then designing according to requirements will be the focus of future flywheel energy storage research.

Keywords: Flywheel energy storage; Primary frequency regulation; Smooth power; Voltage support; Coordinated control

DOI: 10.62639/sspis15.20250204

引言

在全球能源处于短缺的情况下, 回收存储被浪费的能源显得尤为重要, 储能技术是目前能源领域研究的热点之一^[1]。在众多储能技术中, 抽水蓄能应用最为广泛, 但对水体环境有很高的要求; 化学储能技术相对成熟, 但对环境具有较大的污染; 超导储能技术对材料和环境要求高, 造价昂贵, 暂时不适合大规模应用^[2]。与其他储能技术相比, 飞轮储能具有高功率密度、响应迅速、寿命长等特点, 适用于充放电频次高、响应速度快、功率大且放电时间短的应用场景, 是目前储能领域研究的重点, 在各种领域应用和研究相当广泛^[3]。

飞轮储能作为新型储能技术, 与其他储能方式相比, 飞轮储能具有诸多优势: 瞬时功率较大, 可以快速响应电网调频要求; 寿命周期长, 使用

寿命可达 100 万次以上; 能量转化效率高, 飞轮储能的效率可以达到 85%~95%; 快速充放电能力强, 可以用于平滑功率曲线。基于这些特点, 飞轮储能技术成为轨道交通、传统电力系统和可再生能源领域的研究热点^[4]。

本文主要介绍了飞轮储能轨道交通、传统电力系统和可再生能源领域的应用和研究。阐述了目前飞轮储能的技术特点和路线, 提出了飞轮储能的发展趋势和未来的展望, 以期对飞轮储能今后的工程建设和研究提供参考。

一、飞轮储能工作原理和系统结构

飞轮储能是一种新型的物理储能方式, 通过将电能转换为物体高速旋转的动能来实现能量的存储, 具体工作原理为: 当电能充足时, 飞轮工作在电动机状态, 定子磁场和转子磁场相互作用,

(稿件编号: IS-25-4-1016)

通讯作者: 李亨的 (1990-), 男, 汉, 籍贯: 辽宁省抚顺市, 本科, 高级工程师, 研究方向: 新型储能技术研究与应用、热能动力工程。

作者简介: 吴越琼 (1990-), 女, 汉, 籍贯: 浙江省杭州市, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 新型储能技术研究与应用、光热发电技术、大型燃气-蒸汽联合循环发电技术。

季桐 (1995-), 女, 汉, 籍贯: 浙江省衢州市, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 新型储能技术研究与应用。

徐志强 (1977-), 男, 汉, 籍贯: 湖北省荆门市, 博士研究生, 正高级工程师, 研究方向: 新型储能技术研究与应用。

基金项目: 中国能源建设股份有限公司科技项目: “新型物理储能技术研究” (基金号: CEEC2022-ZDYF-06)。

将电能转换为旋转的动能, 进行能量的存储; 当电能不足时, 飞轮工作在发电机状态, 定子切割转子旋转形成的磁场, 将动能转换为电能, 进行电能的补偿。

飞轮储能系统主要由机械飞轮、轴承、真空室和冷却系统、双向换流器和电机以及控制与监测系统组成^[5]。主要分为飞轮和控制器两大部分, 飞轮部分包括密封壳体、支撑轴承和真空室, 电机和飞轮转子; 控制器部分包括监测系统、冷却系统和磁悬浮系统。

二、在轨道交通领域的应用研究

飞轮储能技术在轨道交通领域的应用主要为回收制动能量和支撑网压。城市轨道交通在运行过程中频繁启停, 行车密度高, 制动产生的能量占牵引能耗的一半左右。飞轮储能技术可以将列车再生制动过程中的能量转换为机械能在飞轮中储能起来。同时这部分储存的能量可以用来支撑网压, 当牵引网压不足或线路故障时, 飞轮储能系统可以作为电源给列车提供动力, 保障列车的安全运行^[6]。

国内飞轮储能技术于 2019 年首次应用于城市轨道交通, 在北京地铁房山线实现商用^[7]。该线路长 27.2km, 飞轮储能装置建设在中间站房山站, 装机容量 1MW, 由 3 套 GTR 333 kW 的飞轮储能装置并联而成, 可把牵引网压稳定在 750~900V 之间。日均节电量为 1450kWh, 节电率为 20%~29%。

对于列车状态和飞轮储能单元的联合调控, 国内学者基于直流牵引网电压, 通过能量管理单元对飞轮储能进行控制。在这种情况下, 飞轮储能工作在五个模式下, 分别为节能模式、电压支撑模式、钢轨电位模式、稳压模式以及应急电源模式。

在这种工作方式下, 先通过监测装置对列车的各项参数: 牵引网压、牵引电流、钢轨电位进行信息采集, 能量管理系统再通过列车状态的实时信息调控飞轮储能的工作模式, 保障列车的安全稳定运行。当牵引网压和钢轨电位都正常时, 列车正常工作, 飞轮储能装置不参与列车运行, 工作在节能模式; 当线路网压跌落时, 飞轮储能工作在电压支撑模式, 保障列车的正常运行; 当牵引网压过高时, 多余的能量转化为飞轮的机械能储存起来, 飞轮储能工作在稳压模式; 当钢轨电位超过设置的阈值时, 飞轮储能工作在钢轨电位模式, 保持正常的钢轨电位; 当线路出现故障时, 牵引所退出供电, 此时由飞轮储能对列车进行供电, 工作在应急电源模式。

在基于直流网压的传统控制方法的基础上, 为避免飞轮储能装置出现长时间满电或长时间缺电、无法响应直流牵引网压变化的情况, 有学者提出考虑飞轮 SOC 值的优化型飞轮充放电控制策略^[5]。与传统的控制方法不同, 这种控制策略下充放电电压的阈值是基于牵引网压和飞轮 SOC 值的变化的函数。结合实时的空载电压和飞轮装

置的 SOC 值, 通过优化算法得到最优的充放电阈值。在飞轮储能装置完成一次充电操作后, 优化出新的充放电阈值参数。

三、在传统电力系统领域的应用研究

在电力系统中, 频率质量是衡量系统安全稳定运行的重要指标之一。传统的调频电源以火电和水电机组为主, 火电和水电机组通过机械装置进行调频, 响应时间长, 不适合短期调频的需求。而飞轮储能响应时间短, 瞬时功率大, 能快速响应电网的调频指令^[8]。据相关研究报告指出, 飞轮储能的调频能力约为水电机组的 1.7 倍, 燃气机组的 2.7 倍。建设飞轮储能与火电机组的联合调频系统成为目前电网调频方向的主流发展趋势。国内首个飞轮储能耦合火电一次调频工程于 2023 年在宁夏武灵建成, 是全球单体功率最大, 储能总功率最大的飞轮储能项目^[9]。该项目共设计安装 36 台飞轮, 单台飞轮额定功率达 500KW, 总容量为 22MW/4.5MWh。该项目投运后一次调频合格率提升了约 30%, 可满足 15 分钟充放电能力, 充放电效率达到 90% 以上, 能够有效支撑大电网的安全稳定运行。

高效的飞轮储能和火电机组联合调频控制策略对系统的快速响应, 稳定电网频率具有重要的作用。学者提出了考虑飞轮 SOC 特性曲线下的飞轮储能-火电机组联合一次调频控制策略。启动时, 飞轮的充放电功率随飞轮转速的提高逐渐增大, 此时采用恒转速控制; 当飞轮的 SOC 达到 0.45 以上时, 飞轮的充放电以最大功率运行, 达到额定功率。该控制策略对飞轮储能系统的实时输出功率进行约束; 保持飞轮储能的 SOC 处于满功率充放区, 以便飞轮储能系统有充足的能力来时刻参与电网调频, 在约束控制下, 当飞轮储能系统的充放电功率小于约束功率时, 进行自恢复指令。从火电机组排放 CO₂ 的角度确定飞轮储能与火电机组的一次调频控制策略^[10]。飞轮储能作为一种清洁能源, 可以大幅减少火电机组因调频燃煤所产生 CO₂ 气体的排放, 带来较大的环境效益。该策略通过建立 CO₂ 排放相关的目标函数, 加入实际运行中的充电效率和放电效率, 进行多目标的负荷分配优化, 实现联合调频系统在降低 CO₂ 排放的影响下对 AGC 指令的响应。

飞轮储能响应速度快, 充放电次数多。山东大学基于这一特性以减小火电机组频繁出力为目的确定飞轮储能于火电机组的一次调频控制策略^[11]。通过逐次变分模态分解技术, 将火电机组的调频信号分解为高频指令和低频指令。充分利用飞轮储能充放电次数多的优势, 由飞轮储能系统响应高频指令, 火电机组响应低频指令, 以此来减少火电机组一次调频过程中的频繁出力。

四、在可再生能源领域的应用研究

新能源如风电、光电的发电具有波动性和随

机性, 直接并网会对电网的电能质量带来不小的冲击。飞轮储能响应速度快, 可以解决风电、光电的并网问题, 平滑功率曲线, 提高电网对清洁能源的消纳能力^[12]。飞轮储能系统经双向变换器与风电机组并联, 以此平滑风电功率的波动^[13]。并联后再经母线接入电网, 减小因风电功率波动对电网产生的影响。

整个系统的工作流程为: 检测风电机组产生的功率大小, 再通过功率平滑算法计算出平滑风电功率所需要的飞轮输出功率的大小, 生成实时变化的功率指令对飞轮侧进行控制。飞轮储能系统产生的功率经过两级级逆变器与风电功率叠加, 平滑风电功率曲线, 进而进行并网, 减小对电网电能质量的影响。

国外的 Beacon Power 公司首次在纽约州史蒂芬镇建设了 20 MW 飞轮储能项目, 该项目是目前全球最大规模的电网侧飞轮储能系统, 将该地剩余的风能进行存储, 用电高峰时用于维持电网的频率稳定和平衡电力供需^[14]。国内由国家电投河南电力有限公司在河南省长丰风电场建设了 5MW/175kWh 的飞轮储能项目, 该项目于 2023 年进行一次调频测试并取得成功。采用 5 台 1MW/35kWh 飞轮储能系统组成 5MW/175kWh 飞轮储能系统阵列, 并联接入 220kV 变电站 35kV 母线上, 经变电站主变升压至 220kV 后接入电网。

对于飞轮储能调控风电功率系统中飞轮储能平滑风电功率的控制策略, 国内学者提出采用自适应滤波的 FESS 无传感器充放电控制方法。通过自适应指数加权滑动平均滤波算法对风电功率的实时信号进行处理, 得到飞轮平滑功率指令, 再对飞轮储能系统进行控制, 进而平滑风电机组的波动功率。

除了对平滑功率指令进行改善外, 华北电力大学还提出了基于飞轮储能的 SOC 特性的功率修正控制, 通过变分模态分解法对风电波动功率分解, 对飞轮储能和锂电池混合系统实时充放电功率进行控制的策略。其控制流程为: 先通过变分模态分解法对风电功率信号进行处理, 分配混合系统中飞轮储能及电池储能的出力功率。再根据监控装置获取的飞轮储能、电池的 SOC 实时状态信息, 判断是否处于最佳功率充放区, 出力功率是否进行修正。保证混合系统的 SOC 处于最佳运行区域后, 进行混合储能系统的功率输出。该方法在一般采集风电功率进行平滑功率指令获取的基础上, 同时对飞轮储能和电池储能的 SOC 进行监测。在完成风电功率平滑的要求下, 通过对飞轮储能系统充放电功率的二次修正来维持飞轮储能的 SOC 保持在满功率充放区, 使飞轮储能系统随时具有最大的充放电能力。

五、结论

通过对飞轮储能工作原理和系统结构的介绍, 及飞轮储能在轨道交通领域、传统电力系统领域、可再生能源领域的应用和研究, 得出以下

结论:

(一) 飞轮储能相比其他储能技术具有功率密度大、效率高的特点, 适用于在轨道交通领域有效利用列车的再生制动能量。针对线路的不同工况灵活设置飞轮储能的控制策略, 实现多种工作模式的自动切换, 将是轨道交通技术发展的未来方向之一。

(二) 飞轮储能得益其快速响应, 短时间内输出功率大的特性, 特别适合应用于电网一次调频中。目前控制策略的出发点都在于让火电机组少出力, 飞轮储能系统多出力, 并同时兼顾飞轮的 SOC 特性。在制定飞轮储能的控制策略时, 应兼顾这些方面, 最大限度地发挥系统的调频能力。

(三) 飞轮储能在可再生能源领域的研究集中于对风电波动功率信号的处理, 考虑飞轮储能的 SOC 特性来调整出力。因此, 结合飞轮储能各个子单元的实时状态再对功率出力信号进行修正, 以此响应风电的波动功率信号, 将会是今后研究的热点。

参考文献:

- [1] 韦媚媚, 项定先. 储能技术应用与发展趋势 [J]. 工业安全与环保, 2023, 49(S1): 4-12.
- [2] 汤匀, 岳芳, 王莉晓, 等. 全球新型储能技术发展态势分析 [J]. 全球能源互联网, 2024, 7(02): 228-240.
- [3] Dai X, Ma X, Hu D, et al. An Overview of the R&D of Flywheel Energy Storage Technologies in China [J]. Energies, 2024, 17(22): 5531-5531.
- [4] 全雨鑫, 王春雷, 刘新宇, 等. 飞轮储能技术及其应用场景探讨 [J]. 工程建设与设计, 2023, (24): 91-93.
- [5] 刘旭泽. 飞轮储能的技术及经济性分析 [J]. 现代工业经济和信, 2023, 13(12): 124-125+130.
- [6] 李玉光, 刘翔, 梁艳召, 等. 飞轮储能装置在轨道交通中的应用研究 [J/OL]. 储能科学与技术, 1-8 [2024-08-06].
- [7] https://www.sohu.com/a/342761051_742793
- [8] 王宪. 飞轮储能技术在电网频率控制中的应用研究 [D]. 华北电力大学(北京), 2018.
- [9] 梁璐, 洪烽, 季卫鸣, 等. 大规模飞轮储能阵列协同火电机组调频的能量管理系统 [J/OL]. 中国电机工程学报, 1-14 [2024-08-06].
- [10] 郝晓光, 金飞, 张文彬, 等. 飞轮储能辅助火电机组自动发电控制策略研究 [J]. 河北电力技术, 2023, 42(06): 77-82.
- [11] 张萍, 刘海涛. 基于逐次变分模态分解的飞轮-火电一次调频控制策略 [J]. 全球能源互联网, 2024, 7(02): 166-178.
- [12] Yang L, Zhao Q. Hardware-in-the-Loop Simulation of Flywheel Energy Storage Systems for Power Control in Wind Farms [J]. Electronics, 2024, 13(18): 3610-3610.
- [13] 郑顺河, 孟克其劳, 张建功, 等. 飞轮储能参与风电平滑的自适应滤波算法及无传感器控制 [J]. 太阳能学报, 2024, 45(04): 347-355.
- [14] 李佳玉, 魏乐, 房方, 等. 飞轮储能控制技术及其在新型电力系统中的应用 [J]. 中国科学: 技术科学, 2024, 54(06): 1003-1020.