



多区域互联电力系统蓄电池组的自适应负荷频率控制

王 淼, 刘 刚, 王钟辉, 李金泽, 王明凯
(国网辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳 110006)

摘 要: 随着电力能源市场结构逐渐向清洁化转型, 多区域互联电力系统的开发成为现代电网的发展核心。我国新型储能与蓄电池行业发展迅速, 蓄电池组作为负荷频率控制 (LFC) 的关键单元, 其性能影响电网稳定性与经济性。多区域互联系统复杂性对蓄电池组提出更高要求, 传统静态控制方法难以适应, 自适应负荷频率控制技术成为提升系统稳定性的重要突破口。对此, 本研究重点介绍了电力系统蓄电池组相关技术研究进展, 包括蓄电池技术迭代、混合储能系统协同、电力市场与蓄电池控制; 还阐述了自适应负荷频率控制技术开发, 如分布式算法下的区域协同控制、数据驱动下的区域协同控制, 即无模型自适应控制和强化学习控制技术等。以期后续研究提供一定理论借鉴。

关键词: 电力系统; 电池组; 自适应

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0852

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 10-3986-03

Adaptive load frequency control of battery pack in multi area interconnected power system

WANG Miao, LIU Gang, WANG Zhonghui, LI Jinze, WANG Mingkai
(State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110006, Liaoning, China)

Abstract: With the gradual transformation of power energy market structure to clean energy, the development of multi regional interconnected power system has become the core of the development of modern power grid. China's new energy storage and battery industry is developing rapidly. As a key unit of load frequency control (LFC), the performance of battery pack affects the stability and economy of power grid. The complexity of multi area interconnected system puts forward higher requirements for battery pack, and the traditional static control method is difficult to adapt. Adaptive load frequency control technology has become an important breakthrough to improve the stability of the system. This research focuses on the research progress of battery pack related technologies in power system, including battery technology iteration, hybrid energy storage system collaboration, power market and battery control; It also describes the development of adaptive load frequency control technology, such as regional cooperative control under distributed algorithm and data-driven regional cooperative control, i. e. model free adaptive control and reinforcement

收稿日期: 2026-09-30; 修改稿日期: 2026-10-08。

基金项目: 国网辽宁省电力公司项目 (SGLN0000DKKX2500269)。

第一作者及通信联系人: 王淼 (1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行与控制、电网安全稳定分析、电力市场技术研究, E-mail: mangm_ln@126.com。

引用本文: 王淼, 刘刚, 王钟辉, 等. 多区域互联电力系统蓄电池组的自适应负荷频率控制[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(10): 3986-3988.

Citation: WANG Miao, LIU Gang, WANG Zhonghui, et al. Adaptive load frequency control of battery pack in multi area interconnected power system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(10): 3986-3988.

learning control technology, in order to provide some theoretical reference for subsequent research.

Keywords: power system; battery pack; adaptive

蓄电池组作为负荷频率控制(LFC)的关键执行单元,其性能直接影响电网的稳定性与经济性。负荷频率控制是维持电网频率稳定的重要手段,而蓄电池组能够快速响应电网频率的变化,通过充放电来调节电网的功率平衡。然而,多区域互联系统的复杂性,如地理跨度大导致不同区域之间的电力传输存在延迟和损耗、可再生能源渗透率高使得电网功率波动更加频繁和难以预测、负荷波动频繁且幅度增大等,对蓄电池组的响应要求也在提升。传统静态控制方法难以适应动态变化的电网环境,自适应负荷频率控制技术通过实时调整控制策略,能够根据电网的实时状态和变化趋势,动态优化蓄电池组的充放电过程,成为提升系统稳定性的关键^[1]。

1 电力系统蓄电池组相关技术研究进展

1.1 蓄电池技术迭代

目前锂离子电池在储能市场上的份额最高,主要是因为其较高的能量密度以及90%以上的充放电效率。二者保证其在高能量密度或者同质量下具有更多的电能储备。目前,已经有技术可以适用350 Ah储能电芯,保证其能量密度提升至300 Wh/kg,接近规模化应用需求。固态电池作为蓄电池未来发展的重要方向,近年来也出现了技术迭代。国内研究团队开发的“固态电解质膜”技术为GW级固态电池国产化提供了可能。目前国内最先进的固态电池已经可以保证在500 Wh/kg的能量密度下,进行超过3000次的循环,足以满足电网长时间的调频需求^[2]。

1.2 混合储能系统协同

目前功能性单一的储能技术已经无法适应市场需求,对此有关研究人员开发了混合储能系统(HESS)。混合储能系统主要是根据实际需求,组合电化学电池设备和超级电容,实现二者优势互补。例如,利用现代锂电池提供基础能量保证,锂电池自带的高能量密度可以帮助设备储存大量电能,提高电网的能量供应时间;在此基础上,应用超级电容,提高频率波动反应速率,从而提升其充

放电速度,保证设备可以在短时间内快速释放大功率。复旦大学团队通过实验仿真,确定了HESS可以在多区域互联电力系统中提升综合性能,其电力频率偏差抑制效果提升了将近40%,蓄电池充放电时间缩短了28%,显著提升了电力工作综合效率。通过进一步的实验分析可以肯定,造成上述实验结果的核心原因是超级电容承担了大部分的快速功率调节任务,减少了锂电池的频繁充放电,从而降低了对锂电池的损耗。而依靠后续开发的智能管理系统,可以进一步动态分配HESS中不同储能单元的功率输出,优化资源利用率。

1.3 电力市场与蓄电池控制

电力市场的运行机制和发展状况对蓄电池组自适应负荷频率控制有着重要的影响。目前较为完善且成熟的电力资源市场,其能源价格普遍会随着电力供需而变动。电力负荷高峰阶段,电价上涨,反之则下降。蓄电池组可以根据电力市场的电价信号,在低谷时段充电储存电能;在高峰时段放电向电网供电,从而获得经济收益。这种基于市场价格的充放电策略不仅能够实现蓄电池组的经济运行,还能在一定程度上平抑电网的负荷波动,对负荷频率控制起到积极的辅助作用。同时,电力市场中的辅助服务市场也为蓄电池组提供了参与负荷频率控制的经济激励。辅助服务市场是为了保障电力系统的安全稳定运行而设立的,其中负荷频率控制是重要的辅助服务之一。蓄电池组运营商可以通过向电网提供负荷频率控制服务,获得相应的补偿费用。这促使蓄电池组运营商不断优化其自适应控制技术,提高控制性能,以在辅助服务市场中获得更多的收益^[3]。

2 自适应负荷频率控制技术开发

蓄电池组负荷频率控制的主要目标是维持系统频率稳定,但实际运行中其控制动作可能影响系统电压和潮流。如蓄电池组大量放电可能导致局部地区电压下降;快速充放电功率调整可能引起潮流大幅变化,影响系统稳定性。因此,系统发生故障或受大扰动时,如发电机组突然停运、输电线路故障

等,需合理控制蓄电池组充放电功率,防止系统频率崩溃、电压失稳和潮流越限等问题。为实现此目标,需建立考虑系统安全稳定的协调控制模型。该模型应综合考虑系统频率、电压、潮流等多方面因素,有机统一频率调节、电压稳定和潮流控制等目标。在协调控制模型基础上,设计相应控制策略。

2.1 分布式算法下的区域协同控制

传统电网的负荷频率控制手段主要依赖于中央调度系统,存在一定单点故障风险。当出现调度问题时,可能会让整个电网频率出现波动,从而影响整体负荷控制效果,甚至出现大规模停电。而现阶段开发的分布式控制技术,可以通过中央权限,赋予各地区电力自主决策权,这样就可以通过分布式算法,保证区域控制协同性^[4]。具体做法就是在固定区域内构建多区域互联系统,各区域可以根据自身频率误差以及邻区信息,通过一致性算法控制电机输出频率。而一致性算法可以保证发电机输出的均衡性,从而实现整个互联系统的频率稳定。仿真实验数据表明,分布式控制技术可使负荷频率恢复时间缩短至2秒,较集中式控制效果提升60%。

2.2 数据驱动下的区域协同控制

基于数据驱动的协同控制可以直接从系统运行产生的大量数据中挖掘信息,以有效控制蓄电池组充放电功率,适应电力系统复杂多变的运行环境^[5]。其主要方式有无模型自适应控制和强化学习控制两种。

(1) 无模型自适应控制。无模型自适应控制技术是一种更为先进的数据驱动控制技术。其最大优势在于不依赖系统建模。传统控制技术需要依赖精准模型,但在多区域互联电力系统中,由于电力系统规模大、结构复杂,存在新能源发电间歇性、负荷随机波动等不确定因素,精确建模较为困难。而无模型自适应控制利用系统输入输出数据,采用特定算法实时估计系统动态特性。它持续收集不同时刻的输入信号(如控制指令)和输出信号(如系统频率、蓄电池组充放电功率等),基于这些数据构建系统动态模型描述,虽然不是传统精确模型,但能反映当前运行状态下的动态行为,增强了自适应性。而在蓄电池组负荷频率控制应用中,无模型自适应控制器根据系统频率实时变化自动、迅速调整控制参数。系统频率出现偏差时,控制器依据实时采集数据,快速分析系统动态响应特性,改变对蓄

电池组充放电功率的控制指令。从整体应用上看,无模型自适应控制技术具有较强鲁棒性,在电力系统出现波动时可以稳定控制系统运行,能够应对不同工况下的电力系统问题,具有较强的研究价值。

(2) 强化学习控制。强化学习控制技术核心原理就是通过与智能环境交互信息,分析电力环境因素,给出相应指令。相关环境因素主要包括发电机运行状态数据、电力负荷数据以及新能源发电数据。通过强化学习算法,可以让智能体模型不断尝试控制行为,再对每次控制行为进行动作评估。随着大规模尝试,智能体可以根据不同的电力系统状态分析出最优的控制策略。例如当系统负荷较轻、频率略高于额定值时,智能体学习到应适当增加蓄电池组充电功率,吸收多余有功功率;当系统负荷高峰、频率下降时,智能体迅速增大放电功率,为系统提供额外有功支持。

3 结 语

多区域互联电力系统不断发展,蓄电池组的自适应负荷频率控制技术至关重要。分布式算法与数据驱动控制方法的应用,带来了新的技术突破,保障了电网的稳定运行。未来,随着技术的不断进步,自适应负荷频率控制技术有望进一步完善,更好地适应电力系统的发展需求,为清洁能源的高效利用和电力系统的可持续发展贡献更大力量。

参 考 文 献

- [1] 蔡国伟,张斌,王建元,等.云模型理论在互联电力系统负荷频率控制中的应用[J].中国电机工程学报,2015,35(2):353-358.
- [2] 王志鹏,陈向勇,刘华伟,等.多区域互联电力系统的自适应滑模负载频率控制[J].控制理论与应用,2023,40(7):1252-1260.
- [3] 符家骥.基于改进差分进化算法的两区域互联电力系统负荷频率控制[D].芜湖:安徽工程大学,2023.
- [4] 张逸为,许德智,杨玮林,等.含混合储能的互联电力系统传感器容错负荷频率控制[J].控制与决策,2021,36(5):1069-1077.
ZHANG Y W, XU D Z, YANG W L, et al. Sensor fault-tolerant load frequency control for multi-area interconnected power system with hybrid energy storage system[J]. Control and Decision, 2021, 36(5): 1069-1077.
- [5] 秦艺涛,张俊,张珍珍,等.含电动汽车的多区域互联电力系统频率控制策略[J].电力工程技术,2025,44(6):114-122,133.
QIN Y T, ZHANG J, ZHANG Z Z, et al. Frequency control strategy for multi-area interconnected power systems with electric vehicles [J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(6): 114-122, 133.