

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2026.02.001

超级电容等新型储能技术发展及在新型电力系统应用

超级电容储能系统在火电调频与电网支撑中的集成技术 及应用展望

杨沛豪^{1,2,3}, 赵俊杰⁴, 吴昌兵^{1,2}, 张宝川⁵, 郝天琦⁶, 蒋迎伟⁷, 霍超⁸, 兀鹏越^{1,2},
宋政湘^{3,14}, 张宇博^{1,9}, 孟锦豪³, 李敏¹⁰, 钟少龙¹¹, 解国强¹², 贡晓旭¹³, 李祎婧¹⁴

(1. 西安热工研究院有限公司, 西安 710054; 2. 高效灵活煤电及碳捕集利用封存全国重点实验室, 北京 102209;
3. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049; 4. 国家能源投资集团有限责任公司, 北京 100011; 5. 国家能源集团
江西电力有限公司, 南昌 330029; 6. 新南威尔士大学工程学院, 悉尼 NSW2052, 澳大利亚; 7. 中国电力科学研
究院有限公司, 北京 100192; 8. 国家电网有限公司西北分部, 西安 710048; 9. 中国华能集团有限公司, 河北 雄
安 071000; 10. 大唐陕西发电有限公司, 西安 710065; 11. 清华大学电机系, 北京 100084; 12. 国能神华九江发电
有限责任公司, 江西 九江 332000; 13. 清华四川能源互联网研究院, 成都 610213;
14. 西安交通大学未来技术学院, 西安 710049)

摘要: 随着新能源接入比例上升和电力电子设备普及, 电网的转动惯量下降, 频率难以稳定, 调节资源不够等问题涌现。面对高频大幅功率波动时响应无法及时跟随, 影响设备寿命, 现有的系统已经无法应付新型电网的灵活调节需求。超级电容与高功率锂离子电池这类功率型储能技术, 有着响应速度在毫秒级, 功率密度高, 循环寿命长等特点, 成为解决上述瓶颈的关键。本文从超级电容的储能原理讲述展开, 再分析关键材料如何影响器件的倍率特性和循环寿命, 然后介绍兆瓦级储能的系统集成方案、火电与储能协同的功率分配策略, 以及构网型控制技术, 最后讨论基于物理模型和数据驱动的使用寿命评估方法。希望这项技术的应用能在保障电网安全方面提供一些理论参考。
关键词: 新型储能; 超级电容; 高比例新能源; 火储联合调频; 惯量支撑; 状态评估

Integrated Technologies and Application Prospects of Supercapacitor Energy Storage Systems in Thermal Power Frequency Regulation and Grid Support

YANG Peihao^{1,2,3}, ZHAO Junjie⁴, WU Changbing^{1,2}, ZHANG Baochuan⁵, HAO Tianqi⁶,
JIANG Yingwei⁷, HUO Chao⁸, WU Pengyue^{1,2}, SONG Zhengxiang^{3,14}, ZHANG Yubo^{1,9},
MENG Jinhao³, LI Min¹⁰, ZHONG Shaolong¹¹, XIE Guoqiang¹², GONG Xiaoxu¹³, LI Yijing¹⁴

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 2. National Key Laboratory of Efficient and Flexible Coal-fired Power Generation and Carbon Capture, Utilization and Storage, Beijing 102209, China; 3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 4. National Energy Investment Group Co., Ltd., Beijing 100011, China; 5. Jiangxi Electric Power Co., Ltd. of National Energy Group, Nanchang 330029, China; 6. School of Engineering, University of New South Wales, Sydney NSW 2052, Australia; 7. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China; 8. Northwest Branch, State Grid Corporation of China, Xi'an 710048, China; 9. China Huaneng Group Co., Ltd., Hebei Xiong'an 071000, China; 10. Datang Shaanxi Power Generation Co., Ltd., Xi'an 710065, China; 11. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing

收稿日期:2026-03-04; 修回日期:2026-03-11

基金项目: 陕西省重点研发计划(2024GX-YBXM-442); 中国华能集团有限公司总部科技项目(HNKJ25-H159, HNKJ25-H168); 国家能源投资集团有限责任公司总部科技项目(GJNY-25-29)。

Project Supported by Shaanxi Provincial Key Research and Development Program (2024-YBXM-442); Science and Technology Project of the Headquarters of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ25-H159, HNKJ25-H168); Science and Technology Project at the Headquarters of China Energy Investment Corporation Limited (GJNY-25-29)。

100084, China; 12. Guoneng Shenhua Jiujiang Power Generation Co., Ltd., Jiangxi Jiujiang 332000, China; 13. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610213, China; 14. School of Future Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: With the increasing proportion of new energy sources and the widespread use of power electronic equipment, such issues as decrease of rotational inertia of the power grid, unstable frequency and insufficient regulation resources have occurred. In view of the issues that in frequent and significant power fluctuations, the response cannot keep up in time, which affects the lifespan of the equipment. The existing system has no way to deal with the flexible regulation requirements of the new type of power grid. Power storage technologies such as supercapacitors and high-power lithium-ion batteries possess such advantages as millisecond-level response speeds, high power density, long cycle life, and have become key to overcoming these bottlenecks. In this paper, starting from the explanation of the energy storage principle of supercapacitors, how key materials affect the rate capability and cycle life of the devices is analyzed. Then, megawatt-level energy storage system integration schemes, power allocation strategies for the synergy of thermal power and energy storage as well as grid-based control technologies are introduced. Finally, the life assessment methods based on physical models and data-driven approaches are discussed. It is hoped that this paper can provide some reference for applying this technology to ensure power grid security.

Keywords: new energy storage; supercapacitor; high penetration of renewable energy; hybrid thermal-storage frequency regulation; inertia support; condition assessment

0 引言

在“双碳”战略目标的指引下,我国能源结构正在快速向清洁低碳转型。电力系统是这场转型的关键,电源结构正从化石能源转向新能源^[1]。不过,目前我国能源体系中火电仍是主力。截至2023年,全国火电装机容量达13.9亿千瓦,其中煤电为11.6亿千瓦,占总装机容量的46.1%,贡献了约60%的发电量,达6.3万亿千瓦时^[2]。新能源占比逐年上升清华大学碳中和研究院《2025全球碳中和年度进展报告》的数据印证了这一点。2024年,中国新增可再生能源装机占全球64%,已提前完成2030年目标^[3]。这一爆发式增长加速了新型电力系统的构建,在带来绿色收益的同时正在重塑电网的物理特性。

由于新能源发电具有波动性和随机性,电力电子设备取代了传统惯量,电网频率越来越难稳住。全球电力系统惯性持续走低,丹麦等新能源渗透率高的地区,电网惯性时间常数近二十年来大幅衰减,部分国家预计到2040年接近零惯量^[4]。国内情况也不乐观,预计2030年系统等效惯性时间常数可能降到2s以下^[5]。低惯量会放大功率扰动对频率的冲击,2016年南澳大利亚、2019年英国、2023年巴西的大规模停电,都跟高比例新能源接入后缺乏足够惯量支撑和快速频率响应有关,深刻揭示了高比例新能源接入下,系统因缺乏足够的惯量支撑和快速频率响应能力而面临的脆弱性^[6]。

面对上述挑战,传统调节手段越来越力不从心。作为传统的主力调节电源,火电机组容量虽大,但机械惯性和爬坡速率限制了响应速度,跟不上高频、大幅度的功率波动^[7]。此外,长期深度调峰或频繁变负荷还会加剧设备磨损、缩短机组寿命,同时增加煤耗和污染物排放,很难满足新型电力系统对“快速、精准、清洁”调节能力的需求^[8]。

目前功率型储能技术,比如超级电容器是解决新能源并网难题的一个方法。超级电容器有功率密度高、毫秒级响应快、循环寿命长的优点,在提供虚拟惯量、抑制频率突变和平抑高频波动上有明显优势^[9]。本文将围绕超级电容在高比例新能源电力系统中的技术与应用,讨论材料器件特性、系统集成架构、协调控制策略,以及火储协同与电网支撑的具体模式。

1 高性能超级电容器与高功率锂电储能材料及器件制备技术

超级电容器是一种性能介于传统电容器与二次电池之间的新型储能器件,解决了传统电容器电量不足与化学电池功率密度受限之间难题,目前在新型电力系统的瞬态调节中发挥着关键作用。随着我国电力装机结构变化及相关政策的发布,超级电容器的应用越来越广泛。近年我国电力装机结构如图1所示,国家关于新型储能及火储联合调频的主要政策汇总如表1所示。

表1 近年来国家关于新型储能及火储联合调频的主要政策汇总

Table 1 Summary of main policies on new energy storage and hybrid thermal-storage frequency regulation in recent years in China

时间	参与单位	政策名称	相关材料
2021年7月	发改委、能源局	《关于加快推动新型储能发展的指导意见》	以实现碳达峰碳中和为目标,将发展新型储能作为提升能源电力系统调节能力,支撑新型电力系统建设的重要举措
2022年1月	发改委、能源局	《“十四五”新型储能发展实施方案》	推动多时间尺度新型储能技术试点示范。针对负荷跟踪、系统调频、惯量支撑等秒级和分钟级应用需求,推动短时高频储能技术示范
2024年12月	发改委、能源局	《电力系统调节能力优化专项行动实施方案(2025—2027年)》	着力提升火电调节能力。按照2027年实现存量煤电机组“应改尽改”原则制定灵活性改造推进方案。鼓励煤电企业结合市场需求自主配置调频储能
2025年2月	工信部、发改委、能源局等八部门	《新型储能制造业高质量发展行动方案》	积极鼓励探索火电合理配置新型储能,支持开展新型储能配合调峰、调频等多场景应用

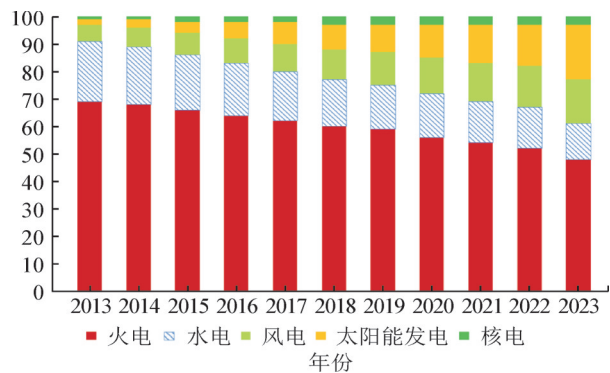


图1 近年我国电力装机结构

Fig. 1 Power installation capacity in recent years in China

1.1 超级电容器的储能机理与器件结构特征

超级电容器从储能机理上可分为双电层电容

器和赝电容器两大类。双电层电容器能量存储过程主要发生在电极与电解质界面。当外加电压施加于电极两端时,电解质中的正、负离子在电极表面发生定向吸附,分别形成紧密排列的电荷层,从而在纳米尺度上构建起双电层结构^[10]。这纯粹是物理吸附没有化学反应,所以可逆性高、阻力小,能毫秒级充放电,循环百万次以上,代价是能量密度低。以行业典型的美国 UCAP Power 公司的双电层碳基产品为例,虽然其比功率高达 18.9 kW/kg,能完美胜任短时高频调节,但比能量仅为 8.6 Wh/kg,难以独立满足长续航需求,如表 2 所示。

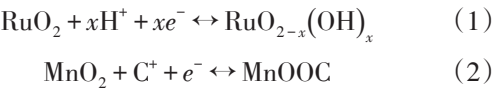
与双电层电容器不同,赝电容器的能量存储机理靠电极材料表面或近表层发生的快速、可逆法拉第反应进行^[11]。常用赝电容器材料有过渡金属氧化

表2 国内外从事高功率储能器件相关研究的主要机构及产品性能

Table 2 The main institutions conducting research on high-power energy storage devices at home and abroad as well as the product performance

机构名称	器件类型	比功率/(kW/kg)	比能量/(Wh/kg)	成果应用情况及备注
UCAP Power 公司 (美国)	双电层碳基超级电容器	18.90	8.6	原 Maxwell 公司,世界市场份额最大的超级电容器生产商,广泛应用于铁路公交系统、新能源发电和汽车
武藏能源解决方案 (日本 Musashi)	锂离子超级电容器	4.00	24.0	原 JM Energy。应用于电力系统、新能源发电、城市公交系统等
Skeleton Tech(德国)	混合型超级电容器	5.40	73.0	基于先进碳材料开发柱状电容器的初创公司,已实现批量生产和销售
Vinatech 公司(韩国)	混合型超级电容器	4.40	61.1	世界产量最大的圆柱形小型超级电容器制造商
SAFT 电池(法国)	高功率锂离子电池	14.00	57.0	国际上性能最优的高功率锂离子电池,已应用于舰船、航空及运输等装备
万裕科技有限公司	双电层碳基超级电容器	3.20	4.1	国内第二大电动客车生产商金龙客车最大的供应商
上海奥威科技	混合型超级电容器	9.50	100.0	应用于城市电动公交车(无轨电车)、电动游览车等
锦州凯美能源	锂离子超级电容器	3.50	28.0	应用于轨道列车的制动能量回收系统
南通江海储能	混合型超级电容器	11.45	104.5	应用于电动客车、风电变桨、智能电网功率平衡、地铁轨道交通、装甲车辆等领域

物、导电聚合物和掺杂型碳材料等。离子在电极表面嵌入/脱嵌或发生氧化还原,比容量因此更高。以典型的二氧化钌(RuO_2)和二氧化锰(MnO_2)为例,其储能机理涉及快速氧化还原反应为



式中, C^+ 表示碱金属阳离子。赝电容器储能机理通常可进一步分为 3 类: 欠电位沉积型赝电容器、表面氧化还原型赝电容器、插层型赝电容器。相较于双电层电容器,赝电容器在循环稳定性和寿命方面通常存在一定折衷,其工程应用需在容量提升与寿命可靠性之间进行取舍。

在工程应用中,为兼顾高功率密度与较高能量密度,逐渐发展出混合型超级电容器结构,即在同一器件中同时引入双电层电极材料与赝电容器或电池型电极材料。该类器件综合发挥了双电层电容器快速响应、长寿命的优势,以及电池型材料高比容量的特点^[12]。从表 2 可见,国外的 Skeleton Technologies 和 Vinatech 公司开发的混合型器件,比能量已提升至 60~73 Wh/kg。我国在这一领域也进行了前瞻性布局,上海奥威科技与南通江海储能等企业的混合型产品比能量更是突破 100 Wh/kg,同时保持了 9~11 kW/kg 的高功率特性。这种“高功率+中高能量”的特性,使其在城市公交、轨道交通能量回收及智能电网调频等场景中展现出不可替代的优势。赝电容器的电荷存储机制如图 2 所示。

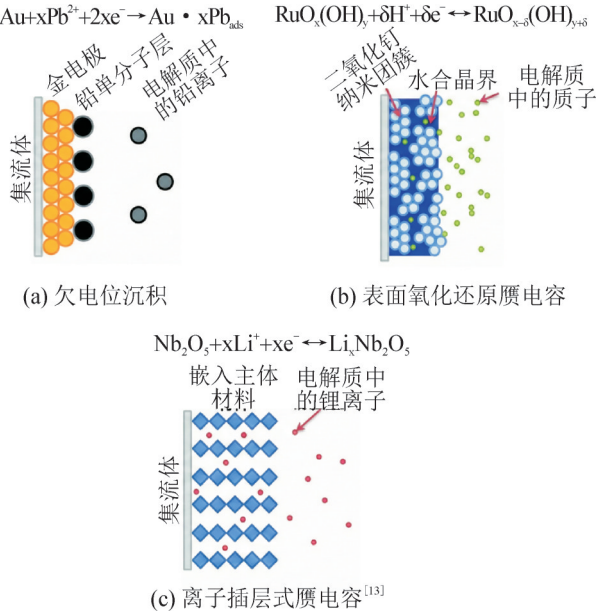


图2 赝电容器的电荷存储机制
Fig. 2 Charge storage mechanisms of pseudocapacitance

超级电容器的结构如图 3 所示,基本结构包括

正负电极、集流体、隔膜和电解质。集流体负责收集和传输电流,它的导电性和接触特性决定了器件内阻。隔膜隔开正负极,同时让离子通过,孔结构和化学稳定性关系到功率表现和安全性。电解质是离子传输的介质,决定了工作电压范围和环境适应性。不同类型电解质各有取舍。水系电解质安全、离子扩散快,但电压上不去。有机电解质能把电压做高,但安全和环保是问题。固态电解质和离子液体安全性好、电化学窗口宽(最高 6 V),可惜内阻偏高,限制了功率输出,其电化学窗口最高可达 6 V,但其较高内阻仍制约功率输出能力^[14]。

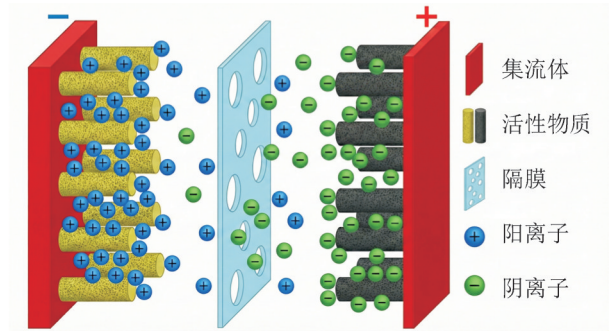


图3 超级电容器的结构图
Fig. 3 Structural diagram of supercapacitor

响应速度上,超级电容是微秒到毫秒级(实际系统约 10~50 ms)。高功率锂电池受电化学动力学限制,响应在秒级。火电机组更慢,锅炉和汽轮机的机械惯性让调节延迟达到分钟级。这种差距意味着超级电容能完全覆盖高频随机功率扰动的瞬时偏差,在表 3 中进行具体比较。

表3 传统电容器、超级电容器与二次电池性能对比^[15]
Table 3 Performance comparison among traditional capacitors, supercapacitors and secondary batteries^[15]

性能指标	传统电容器	超级电容器	二次电池 (如锂电)
储能机理	物理极化	双电层吸附/ 赝电容反应	电化学氧化 还原反应
功率密度/ (W/kg)	>1 0000	4 000~20 000	1 000~3 000
能量密度/ [(Wh)/kg]	<1	5~50	150~260
响应速度	微秒级	毫秒级	秒级/分钟级
循环寿命/次	>500 000	500 000~ 1 000 000	50~10 000
主要应用	高频滤波、脉 冲功率	功率支撑、快 速调频	能量存储、 削峰填谷

总的来说,超级电容器靠界面储能和快速动力学,在功率密度、响应速度和循环寿命上有明显优势,但能量密度受限于储能原理和电压窗口。在新

型电力系统里,它更适合做功率型储能,负责高频调节和频率支撑,或者与锂电池等能量型储能配合使用。器件的这些物理特性,也给材料优化、系统集成和控制策略划定了边界。

1.2 超级电容器电极材料及其性能优化方向

超级电容器的储能性能在很大程度上受限于

电极材料的组成、结构及其电荷传输特性。当前研究主要围绕碳基材料、钛基及相关过渡金属化合物展开,并通过孔结构调控、导电网络构建及复合化设计,实现容量与倍率性能的协同提升。不同材料体系的核心特征与性能瓶颈总结如表4所示。

表4 典型超级电容电极材料体系及性能优化方向对比
Table 4 Comparison of typical electrode material systems for supercapacitors and their performance optimization directions

材料体系	主要储能机理	结构/性能优势	关键性能瓶颈	主要优化方向
活性炭	双电层电容	比表面积高、成本低、化学稳定性好、工艺成熟	微孔占比高,离子扩散受限,倍率性能不足	构建多级孔结构;表面功能化;异质原子掺杂
石墨烯 / CNT	双电层+少量赝电容	导电性优异,电子传输快,结构可设计性强	易团聚、体积密度低、成本较高	三维组装;防团聚结构设计;复合活性材料
TiO ₂ 等钛基氧化物	赝电容	化学稳定性好,安全性高,理论容量较高	本征导电性差,活性位点利用率有限	纳米化;碳包覆;缺陷/晶相调控
MXene(Ti ₂ C ₂ Tx等)	表面赝电容+插层反应	高导电性、层状结构、亲水性好	层间堆叠、氧化稳定性问题	插层调控;表面改性;复合结构构建
过渡金属氧化物	赝电容	比电容高,能量密度优于碳材料	导电性低,体积效应导致循环衰减	纳米结构设计;与碳材料复合
导电聚合物	赝电容	高比容量、柔性好、加工性强	电化学稳定性不足、循环寿命有限	复合化;结构稳定化;界面强化

碳基材料仍是当前超级电容器中应用最为成熟的电极体系,其性能核心在于电解液可达表面积的有效利用率^[16]。单纯追求高比表面积往往导致微孔比例过高,在高电流密度下出现明显的扩散极化。因此,近年来研究逐渐由“高比表面积导向”转向“多级孔结构协同设计”,以在容量保持与倍率性能之间取得平衡。钛基氧化物及MXene类材料通过可逆氧化还原反应或表面插层过程提供赝电容贡献,在提升能量密度方面具有明显优势^[13]。然而,其实际应用受限于导电性不足和结构稳定性问题。通过缩短离子扩散路径、引入高导电骨架材料,是当前改善其倍率性能和循环稳定性的主要技术路线。

构建连续、低阻抗的导电网络,现在是各类电极材料体系的普遍做法。碳纳米管、石墨烯这些材料在复合电极里既是导电通道,又能缓冲活性材料循环时的体积变化,让结构更稳定。但导电相加多了,活性材料负载量就得降,能量密度也会受影响。实际应用中,电极材料性能往上提的同时,还得考虑能不能大规模制备、批次是否一致、成本控不控制得住。那些结构太复杂、合成条件太苛刻的材料,实验室测出来数据再好,产业化能不能走得通还得再看。

1.3 超级电容器与高功率锂电池的性能比较及工程化挑战

在储能技术中,高功率锂离子电池与超级电容

器同属“功率型”储能器件,两者在新型电力系统中均扮演着解决短时功率冲击的关键角色。本节通过对比分析这两类器件的特性,可以更清晰地界定超级电容器的应用边界与独特优势。

传统的锂离子电池和超级电容器在功率和能量密度之间存在固有权衡。作为高功率锂离子电池负极材料的代表,尖晶石型钛酸锂因其“零应变”特性和较高的嵌锂电位,在性能上显著优于磷酸铁锂等传统能量型电池,展现出向超级电容器靠拢的趋势。其全寿命周期内的能量吞吐量是普通锂电池的4~5倍,在短时高频功率调节场景响应速度可达毫秒级,同时其高电位避免了析锂枝晶风险,在-30℃环境下仍保持较高活性^[17]。高功率钛酸锂电池与常规磷酸铁锂电池特性对比见表5。

表5 高功率钛酸锂电池与常规磷酸铁锂电池特性对比
Table 5 Characteristic comparison of high-power LTO and conventional LFP batteries

比较维度	磷酸铁锂电池	钛酸锂电池
功率密度	中/低	高
循环寿命	3 000~6 000次	20 000次
安全性	较高(存在析锂风险)	极高(无析锂风险)
能量密度	较高(140~180 Wh/kg)	较低(70~100 Wh/kg)

通过表5的对比可见,即便作为电池中“速度最快、寿命最长”的代表,钛酸锂在应对极高频调频需求时,相较于超级电容仍存在本质差距。

尽管超级电容器和高功率锂电池的单体性能不错,但做成兆瓦级系统仍面临诸多工程化挑战。这些挑战目前主要集中在器件参数一致性、低阻抗封装、高功率热管理以及复杂工况下的寿命衰减。

1) 器件参数离散性与成组一致性。电力储能系统通常要串并联几千甚至上万个单体。生产工艺有波动,单体在容量、内阻、自放电率这些参数上肯定会有差异。短时高频大电流充放电时,这点差异就会引发“木桶效应”超级电容模组里容量小的单体容易过压,电解液分解加快;锂电池则是动力学性能不匹配,导致内部荷电状态(state of charge, SOC)偏离,系统可用容量受限。循环次数越多,离散度越会非线性扩大,单靠出厂筛选很难保证全生命周期的一致。

2) 低阻抗封装结构与机械可靠性。要发挥新型储能器件毫秒级响应和大倍率放电的能力,封装结构的接触电阻得够低,机械强度得够高。传统电池的极耳在大电流冲击下容易发热,新型器件改用全极耳或多极耳设计,缩短电子传输路径,减少内阻损耗。风电变桨、调频这些场景震动频繁、功率冲击大,模组内部的电气连接容易疲劳失效。螺栓连接会松动氧化,最好选择用激光焊接来降低接触阻抗。连接处阻抗太大,会使系统效率会下降,局部过热还可能引发安全事故。

3) 高功率工况下的热稳定性与热管理。热管理是高功率储能系统安全运行的短板。按焦耳定律算,10 C~50 C 高倍率下,哪怕器件内阻很低,瞬时产热也很可观。混合型超级电容器或高功率锂电池用的是有机电解液,热稳定性一般,高温容易触发副反应^[18]。大规模模组内部温度分布不均,会加快单体性能分化。工程上用主动液冷或相变热管理,把电芯温差控制在 5℃以内,避免局部热失控,延长系统寿命。

4) 复杂工况下的寿命衰减与安全性。实际电网调频或脉冲支撑工况波动大、不确定性强,器件的电化学稳定性面临考验。以钛酸锂为例,“零应变”特性确实抑制了晶格体积变化,但长期高电位或高温运行,电极/电解液界面还是可能发生副反应产生微量气体,软包器件会“胀气”,内部结构受损。另外,低温大倍率充电或过充时,电解液分解形成的 SEI 膜可能增厚,阻碍离子传输,功率性能随之衰减。

要解决这些问题,得从系统集成层面入手,基于优化电气拓扑、电池管理系统主动均衡、精细化热管理等几方面配合才能既发挥器件性能,又控制住运行风险。系统集成不只是解决单体器件的短

板,还要协调多器件之间的相互作用和动态性能,这样新型储能器件才能在实际工程中用得住。

2 超级电容储能系统的大规模系统集成技术

2.1 兆瓦级超级电容储能系统架构与成组技术

2.1.1 系统分层集成方式

一种典型的电池舱体内部层级结构如图 4 所示。兆瓦级超级电容储能系统通常由单体超级电容器经串并联成组形成模组,多个模组进一步构成簇,最终在直流侧汇集为系统级储能阵列并通过 PCS 接入交流母线或直流母线^[19]。该分层集成方式的关键价值首先在于电压等级可扩展,通过串联提升直流侧电压等级,降低系统电流与铜耗;其次在于功率等级可扩展,通过簇级并联实现电流分担与容量扩展,便于兆瓦级并机;最后有利于可靠性与运维友好,通过簇级隔离、旁路与模块化更换实现故障影响域收敛。



图4 储能电池舱体典型层级结构

Fig. 4 Typical hierarchical structure of an energy storage battery compartment

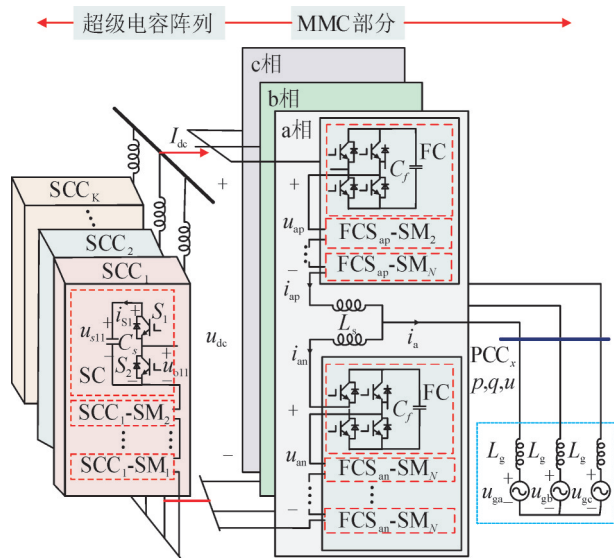
超级电容在恒流充放电过程中时间-电压关系通常近似线性。该特性决定了系统直流侧电压随 SOC 变化呈“宽范围摆动”,从而对后续 PCS 拓扑选择、控制策略与一致性管理提出更高要求。

2.1.2 大容量高功率条件下的电气拓扑

在兆瓦级系统中,超级电容端电压宽范围变化是直流侧设计的首要约束。在电池-超级电容混合储能系统中,超级电容的电压范围更宽,因此更适合采用部分隔离或全隔离的多端口变换器结构以提升适配性与安全性。同时,非隔离多端口变换器具有器件少、体积小、效率高等优点,但其端口间电气不隔离带来安全性约束,更适用于较低电压等级场景。

结合兆瓦级高功率工程需求,常见拓扑设计思路可归纳为 2 类:

1) 宽直流母线直挂型:超级电容簇直接并接直流母线/逆变器直流链路,结构简洁、链路损耗低,但需要 PCS 具备更宽直流输入范围与更强的过流/过压抑制能力^[20]。宽直流母线直挂型拓扑如图 5 所示。

图5 宽直流母线直挂型拓扑图^[20]Fig. 5 Topology of direct-connected wide DC bus structure^[20]

2) DC/DC 解耦型:通过双向 DC/DC 将超级电容宽电压与并网直流母线解耦,实现恒压母线运行与簇级功率可控分配,工程上更利于“多簇并联扩容+分区保护+一簇一管理”。DC/DC 解耦型拓扑如图 6 所示。

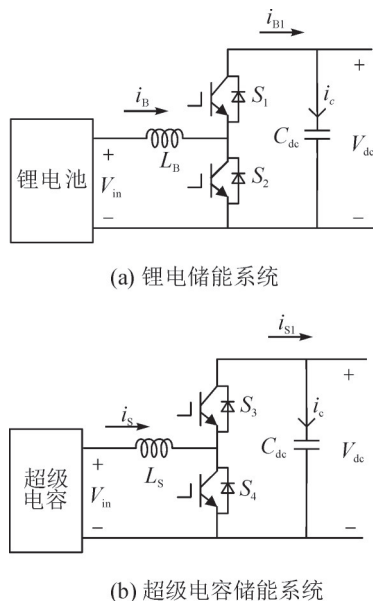


图6 DC/DC解耦型拓扑图

Fig. 6 DC/DC decoupling topology diagram

兆瓦级并联系统的 PCS 一般采用功率模块并联设计,既便于制造又能提供冗余。文献[21]在研究双有源桥(dual active bridge, DAB)等高频变换器时发现,控制策略可以从单模块扩展到多模块,让各子模块分担功率。这对兆瓦级超级电容系统的模块化并机和均流控制很有参考价值。

2.1.3 一致性与均衡管理

随着串联数与系统电压等级提升,单体参数的离散性(容量、内阻、漏电/自放电、热特性等)会在运行中逐渐放大。弱单体提前触及电压/温度边界,出现“木桶效应”,整簇的可用容量、效率和寿命都会受影响。兆瓦级超级电容系统的一致性管理,一般采用“离线分档配组+在线均衡+热-电协同监测”的组合策略。在线均衡拓扑选得好不好,直接关系到工程能不能落地、系统能效高不高^[22]。

能量均衡方案按能量是否耗散分为耗散型均衡与非耗散型均衡两类。面向兆瓦级应用,通常按“均衡速度—损耗—复杂度—可维护性”开展分层选型:

1) 耗散型均衡:通过并联能耗元件释放过充单体能量,使其回归平均水平。该方案结构简单、成本低、易工程化,但在大容量系统中会带来额外热损耗与散热负担,适用于均衡频率低或作为“保护级均衡”的场景。耗散型均衡拓扑如图 7 所示。

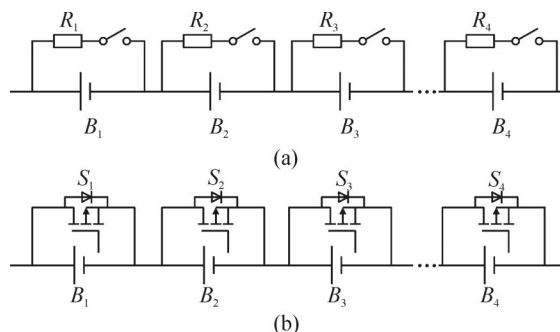


图7 耗散型均衡拓扑示意

Fig. 7 Schematic diagram of dissipative equalization topology

2) 开关电容均衡:利用电压差驱动电容在单体间转移能量,属于非耗散型均衡的典型代表,可在降低热损耗的同时提升均衡效率,适合中等串联规模的模组级均衡。电压差驱动的开关电容均衡拓如图 8 所示。

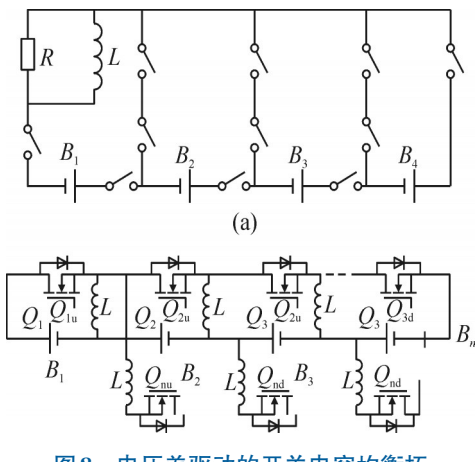


图8 电压差驱动的开关电容均衡拓

Fig. 8 Schematic diagram of switched-capacitor equalization topology driven by voltage difference

3)开关电感均衡:利用电感储能和电流方向控制来迁移能量。这类方案通过调节电路,把过充单体的能量转移到欠充单体,电感负责储能、维持电流方向和传递能量。相比开关电容方案,它的跨级能量调度能力更强,但控制复杂度和器件应力也更大,适合高电压、大容量簇级均衡或对均衡速度要求高的场景。

兆瓦级超级电容系统的一致性管理,最好采用层级化的思路:单体级快速保护(过压/欠压/过温)是底线;模组级均衡用来抑制离散性放大;簇级状态估计和功率分配则负责系统层面的“均流-均压-均热”协同。这样在大功率快速充放电工况下,才能保证安全和可用。

2.2 基于模块化与分区控制的系统可靠性提升

面向混合超级电容储能系统的大规模工程应用,系统可靠性往往不再由单体器件指标单独决定,而更受系统架构的“可分割性”与“可控可隔离性”影响。典型思路包括“一簇一管理”与“模块化功率解耦”,其核心是将高功率储能系统划分为若干具备独立监测、独立变换与独立保护能力的簇级单元,在簇内实现一致性约束,在簇间实现能量与故障的边界控制,从而降低故障传播概率并提升运维效率^[23]。

1)典型架构为由集中式到簇式分区的可靠性演进

混合超级电容储能系统的构建可归纳为集中式与簇式两条技术路线:集中式通常由大量单体串并联形成统一外部端口,直接接入单级 DC/AC 的 PCS,结构简洁、易于装配,但由于阵列内串并联结构难以避免内部环流,当单体发生失效时更容易触发系统级故障甚至事故,对单体均衡与储能管理提出更苛刻要求。

簇式架构将系统划分为多个功率/容量更小的储能簇,通常采用两级 PCS,即簇侧 DC/DC 负责簇端口电压与 PCS 内部直流母线的功率变换,母线侧 DC/AC 完成并网变换。该类能够削弱簇间不匹配与不可控环流影响,提升系统安全性,在失效率、系统安全与运维效率方面相较集中式更具优势^[24]。

集中式与簇式 HUCESS 结构对比示意如图 9 所示。

2)一簇一管理:分区监测与分级保护实现故障隔离

“一簇一管理”不只是物理分簇,更重要的是管理系统在数据链路和决策链路上的分区自治。要做到可靠管理,一是优化传感电路设计,提高监测

数据质量和冗余度,配合异常状态下的自诊断和应急策略;二是采用扁平化、分布式的管理思路,优化层间/层内数据模型,让协同管理更高效可靠。

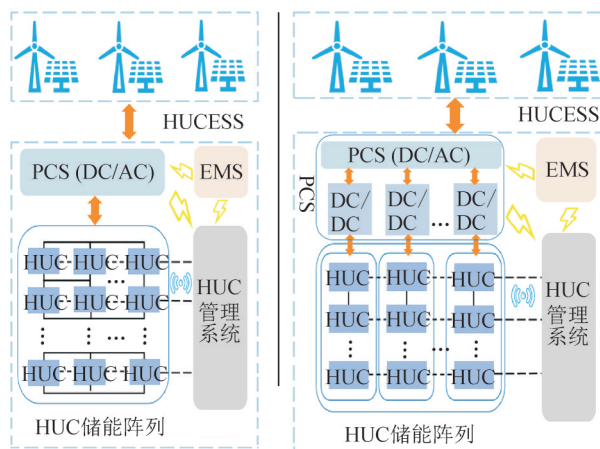


图9 集中式与簇式 HUCESS 结构对比示意^[24]
Fig. 9 Comparison schematic diagram between centralized and cluster-oriented HUCESS structure^[24]

在此框架下,单体开路/短路、簇内失配恶化、簇侧 DC/DC 异常等可簇级故障被限制在簇边界内,保护动作优先在簇侧完成快速降额、切离或旁路,系统层仅需进行功率重分配与有功/无功支撑策略切换,从“系统级硬停机”转变为“簇级可控退化”,显著降低非计划停运概率。

3)模块化功率解耦:冗余配置与可维护性

模块化功率解耦一般采用簇侧变换器和公共母线结合的电气结构,这为系统冗余和在线维护打下基础。以电池储能舱为例,电池从“包”到“簇”再到“舱”逐级集成,簇级到舱级的可靠性提升更明显,主要是因为舱内大量并联结构,并联对可靠性有天然增益。当更换的电池包数量达到一个簇的规模时,可靠度提升的贡献度接近 1。这是因为舱内各簇之间是并联关系,换掉其中一个簇,整体可靠度就能显著恢复。所以 $N+1$ 或备用簇配置下,单簇退出后系统可以通过功率重分配维持并网和服务能力,保持可靠运行。

4)分区控制:抑制故障传播与风险外溢

工程实践表明,热失控这类灾变故障会让系统可靠度提前衰减。考虑热失控传播的情况下,系统可靠度降到 80% 的时间会明显提前,故障一出现可靠性就快速下降。而且热失控传播时,失控电池数量会逐渐增加,传播速度很快。所以分区和隔离不只是电气层面的要求,还得跟舱级布局、热管理、消防策略一起设计,把故障限制在最小范围。储能系统集成设计也强调要从控制/管理层、系统布局、热管理、安全消防等方面共同提升安全性与可靠性。

控制层面,分布式/分层控制能提升系统可靠性和响应速度,让模块化系统在故障和通信不确定条件下也能稳定运行。

5)构建早期预警与分级联动阻断机制

分区控制架构之上,系统可靠性要进一步提升,需要从被动隔离转向主动防御。混合储能系统热失控早期会伴随气体析出,针对这一特点建立“单体—簇—系统”三级联动的安全预警体系,是阻断故障蔓延的关键。如图 10 所示,该安全预警系统采用底层物理感知与顶层逻辑决策相结合的闭环控制架构。



图 10 储能电站早期安全预警系统结构图
Fig. 10 Structural diagram of the early-warning safety system for energy storage power stations

2.3 混合储能系统的协同集成模式

目前,基于锂离子电池的能量密度优势和超级电容器的功率密度优势,这两种复合储能系统的混合超级电容逐渐成为储能器件的研究热点^[22]。其核心在于:利用超级电容低内阻、高功率密度与毫秒级动态响应能力承担负荷/母线功率的突变分量与高频波动,而由锂电池承担低频、持续能量支撑任务,从而在满足瞬态稳定与功率品质要求的同时,降低电池峰值电流与纹波应力,延长寿命并提升全寿命周期经济性^[25]。随着阳极和阴极材料及电解液的持续发展,混合超级电容将成为电网和电动汽车短期高频电力支持的有前景的储能解决方案。

在系统集成层面,混合储能由直接并联逐步演进至变换器解耦结构。功率型与能量型储能既可直接接入系统,也可通过双向 DC/DC 接入公共直流母线并进一步经 DC/AC 并网,引入 DC/DC 后可实现功率分配的可控化与电压范围的适配化,提高容

量利用率,并避免仅依靠器件本征阻抗进行被动分担所导致的能量型储能利用不足^[26]。功率型和能量型储能对比见表 6。

表 6 功率型和能量型储能对比
Table 6 Comparison between power type and energy type energy storage systems

对比维度	功率型储能	能量型储能
主要功能定位	快速抑制高频/突变功率分量	承担低频/慢变能量支撑
时间尺度	毫秒 - 分钟级短时补偿(短时高频)	分钟 - 小时级持续能量输出
响应速度	极快,适合高频、小幅调节	相对较慢,受倍率与热约束
适配的功率波动特征	高频、小幅、突变、脉冲负荷	低频、持续、能量回补/平衡
典型接口/拓扑诉求	端电压变化范围大,常需 DC/DC 适配	相对更稳定的工作电压窗口
直接并联的主要问题	易“被动分担”,可控性不足	易出现利用率不足或受冲击
EMS/功率分配策略	执行高频通道(快环)	执行低频通道(慢环)
对寿命与热应力的影响	承担冲击电流与高频循环	避免高倍率与频繁循环更有利
效率与经济性影响	适合“高频调节效率”与快速功率品质提升	适合“长时能量效率/容量支撑”

协同控制通常以能量管理系统为核心,在 SOC、电压、电流等运行约束下实现功率分配;既可采用规则型策略,也可采用优化型策略输出电池与超级电容的功率分配系数,并以最小化能量损耗、抑制电池应力和避免过充过放为目标实现闭环调度^[27]。协同配置对系统效率与经济性的提升主要来源于应力迁移与寿命增益。将高倍率与高频功率由超级电容承担,可降低电池侧 I^2R 损耗与热负荷,减少等效循环深度与循环次数,从而延长电池寿命并降低全寿命周期成本。相关研究表明,BS-HESS 在运行超过 900 天后相较纯电池方案更具成本效益,且超级电容纳入系统框架可显著提升储能系统寿命,体现出混合配置在长期运行中的经济潜力^[28]。

3 超级电容储能系统的能量管理与协调控制策略

3.1 面向调频应用的功率分配与响应策略

自动发电控制(automatic generation control, AGC)调度指令本质上是让机组跟踪有功出力变化,通常表现为阶跃或斜坡形式。火储协同调频的建模和仿真中,为了简化动态过程,一般把 AGC 信号抽象

成带约束的阶跃或斜坡信号,这样更接近实际调度指令频繁、小幅度、速率受限的特点^[29],这类信号模型可以作为不同调频工况下功率分配控制策略设计的基础。火电机组响应 AGC 具体指令的过程如图 11 所示。

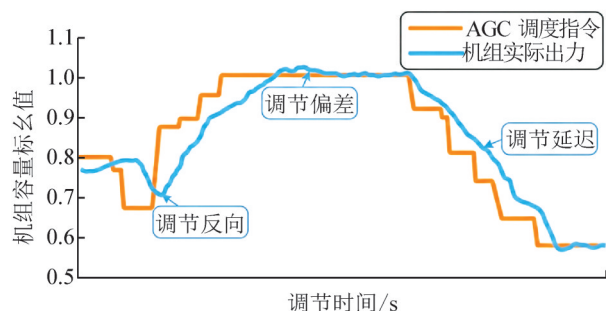


图 11 火电机组响应 AGC 指令过程
Fig. 11 Process of thermal power units responding to AGC commands

传统火电机组在快速响应 AGC 与维持机组运行稳定之间存在明显矛盾,火电机组锅炉侧具有大惯性、大迟延和强非线性特性,其热机械动态幅度受限,导致在快速功率跟踪场景下往往出现响应不足、爬坡受限等问题。进一步的典型负荷分析表明,在实际运行中,超临界燃煤机组单次调节幅度常集中在几十至百兆瓦量级,但与负荷变化的动态匹配可能存在连续数十分钟至数小时的滞后,这使得短时功率缺口需要外部快速响应资源补偿。

为解决上述时间尺度失配问题,面向调频应用的协同控制策略通常采用将火电机组承担低频基荷响应、储能承担高频快速响应的设计框架。在这一框架下,可将储能出力的控制目标设定为 AGC 指令与机组实发功率之间的偏差项,作为储能快速辅助功率的参考信号,由储能系统优先补偿机组受限导致的功率不足或过剩,形成快速闭环响应。多数研究通过 Matlab/Simulink 等仿真工具构建典型联合作用场景验证了此类控制策略在提升 AGC 指令跟踪性能方面的有效性^[29]。

评估兆瓦级超级电容储能对火电机组调频能力的提升,可以从功率补偿和动态响应时间两方面来看。以一台 600 MW 超临界燃煤机组为例:典型 AGC 爬坡能力是 6 MW/min,但电网实际调度需求可能达到 20~30 MW/min。配上 15 MW 功率型超级电容储能后,储能可以先顶上瞬态功率缺口,公式为

$$P_{\text{储能}} = P_{\text{AGC}} - P_{\text{火机}} \quad (3)$$

机组爬坡受限时,储能能释放约 15 MW 的瞬时调节能力,让机组等效调节速率提升到原来的 3~4 倍。

响应时间上,火电机组从收到 AGC 指令到稳定出力一般要等 5~30 s,超级电容响应不到 20 ms,差了 3 个数量级。调频初期,储能能明显缩短功率偏差持续时间,提高 AGC 跟踪精度。

3.2 火电机组与储能系统的协同控制机制

超临界机组的控制难点源于其非线性特性及多变量耦合特性。传统 PID 控制在负荷扰动工况下存在较大的纯迟延与超调量,促使储能系统成为优化系统动态性能的创新技术路径。储能系统在负荷瞬变、机组启停等瞬态过程中能够发挥功率缓冲作用,以缓解火电机组的调节压力。构建火储协同控制系统已成为保障机组全工况高效运行的技术关键,实现不同工况下的稳定功率输出。典型火电机组配置储能系统结构如图 12 所示。

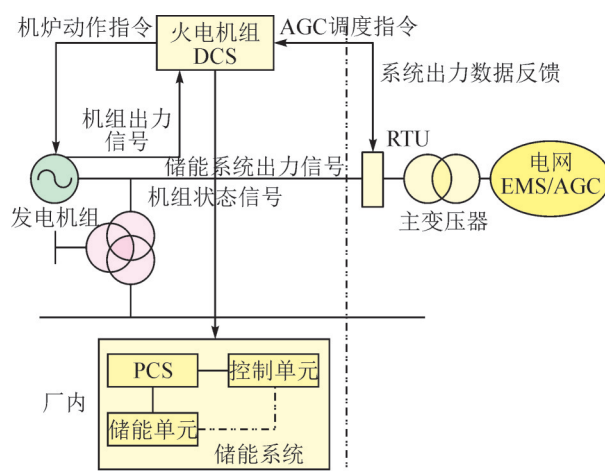


图 12 火电机组配置储能系统结构图
Fig. 12 Schematic diagram of thermal power unit integrated with energy storage system

引入超级电容能明显提升火电机组 AGC 调度的综合调节性能指标(K 值)。实际运行中,超级电容能把机组调节精度 K_1 提到 0.95 以上,响应速度 K_2 提高 2~5 倍。火储协同模式下,超级电容承担 80% 以上的高频往复指令,机组锅炉主蒸汽压力波动减小,阀门频繁动作的磨损减少 30%~50%,既释放了机组深度调节潜力,也延长了设备寿命。

具体协调机制上,协同控制就是短时储能顶峰、长时机组接管的动态过程。AGC 指令阶跃或快速斜坡变化时,储能先快速输出或吸收功率,补上机组因爬坡率和热工滞后造成的瞬时缺口^[30]。等锅炉燃烧和汽水系统慢慢建立新热平衡、汽轮机功率升降后,储能功率逐步回撤进入能量回补阶段,让 SOC 恢复到能持续调节的水平。这样既能降低机组主蒸汽压力波动和阀门频繁动作的热应力与磨损,又能让机组在可承受速率下实现长期能量支

撑,兼顾调频性能和运行安全。

防止储能与机组在过渡阶段出现对抗调节或功率振荡,工程上一般会引入分配系数、死区和限幅等约束,同时结合机组爬坡率和储能 SOC 边界对储能功率进行动态调整。高频小幅偏差由储能主导快速调节;偏差持续或幅值较大时,逐步提高机组承担比例,实现从功率补偿到能量接管的平滑切换。多时间尺度协调下,储能能弥补火电机组调节滞后,提升 AGC 跟踪精度和调节速度,还能降低机组热工扰动和调节成本,让火储联合调频稳定运行。

3.3 兼顾调频性能与寿命的能量管理方法

调频场景下储能频繁充放电、功率快速切换,寿命劣化往往由大倍率冲击、深度充放电和高频往复循环共同驱动。因此,工程化能量管理通常以“性能—寿命”权衡为主线,在满足 AGC 快速跟踪的前提下,通过对功率指令与 SOC 边界的联合约束,抑制等效循环与热应力累积。电池储能的充放电深度是制约寿命的关键因素,长期过充过放会显著加速寿命衰减,因而在火储协同控制中引入计及 SOC 的充放电控制策略对储能输出功率进行修正,以避免寿命敏感区间的过度动作。典型实现方式是对 SOC 进行分区管理,设置禁充/禁放区与充放电限制区,并在满功率工作区以外对功率进行限幅或渐进修正,从控制层面将深度充放电约束为可执行的运行规则。

与此同时,为降低高频功率往复对电池的损伤,工程上常通过平滑功率输出或削峰填谷的方式将高频、小幅扰动从能量型器件中剥离。目前规则型策略因结构简单、鲁棒性强、易于实现而被广泛采用,但其自适应修正能力有限。优化型策略则通过在线优化在性能与寿命约束之间寻优,实现更稳定的综合效果。以 MPC 为代表的优化型能量管理可将预测区间内总能量损耗最小化等指标纳入目标函数,并显式施加避免电池或超级电容过充过放的约束,从而在跟踪性能可接受的条件下实现对寿命敏感变量的系统性抑制^[31]。

4 超级电容等新型储能耦合火电调频关键技术及示范应用

超级电容调频主打功率型储能,强调秒级到分钟级的快速功率吞吐,适合一次调频的快速分量和二次调频的高频分量。这种模式结构简单,控制链路短,动态性能好,但能量撑不了太久,需要机组或其他能量源来补足持续偏差、恢复 SOC^[32]。

混合储能调频的核心是功率型和能量型分层

配合:功率型负责高频,能量型负责低频,机组慢慢接管。这样既能保证调频性能,又能延长寿命;功率型承担高频往复和冲击功率,减少锂电池的大倍率充放电和频繁循环;锂电池负责低频能量分量和 SOC 回补,提升系统持续服务能力。相比全功率型方案,控制和接口复杂一些,但更利于长期稳定运行和综合收益优化。多技术路线并存一般针对调频、调峰、供热约束叠加等复杂场景,通过功率型、能量型和机组本体的分层配置实现多时间尺度协同,强调系统鲁棒性和业务适配性,但对规划配置、控制协同和安全可靠要求更高。新型储能耦合火电调频的关键技术如下:

1)容量与功率配置方法。配置要同时满足动态响应、持续时长和 SOC 可恢复的要求。全功率型方案重点校核高频功率需求和可用 SOC 窗口;混合方案需要匹配功率型额定功率和能量型容量,让高频分量被有效剥离,且 SOC 能在典型调频周期内恢复;多路线并存方案则要在一次/二次调频和深度调峰等多业务之间分配容量、匹配收益,避免资源在时间尺度上错配导致效率和寿命损失。框架如图 13 所示。

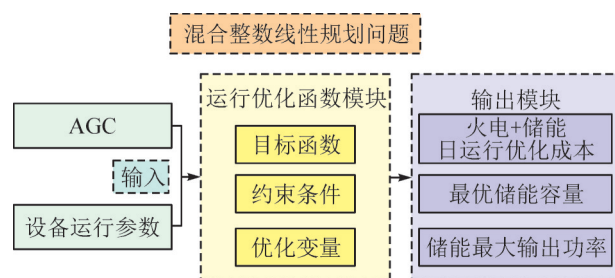


图 13 储能容量配置模型框架
Fig. 13 Framework of the energy storage capacity configuration model

2)功率变换与并机接口。兆瓦级工程应用中,PCS 一般采用模块化并联和分区接入,既便于制造和维护,又能提供冗余容错。端电压变化大的功率型单元,通常通过簇级接口实现电压匹配和功率可控;混合系统引入双向 DC/DC,可以解耦功率、抑制环流、提高容量利用率,但要在效率、成本、体积和控制复杂度之间取舍。

3)协同控制与能量管理。火储联合调频的核心是多时间尺度协调:储能负责机组快不了的功率分量,机组在较长时间尺度上接管并完成能量回补。混合系统进一步通过滤波/分频、阈值/边界或优化策略分配功率,同时用 SOC 窗口、充放电深度限制、功率爬坡约束和功率平滑等手段平衡性能和寿命,避免能量型电池在高频工况下等效循环累积

和热应力升高。

4)安全可靠与运维机制。兆瓦级系统要强化分级保护和故障隔离边界,“一簇一管理”实现簇级快速切离、旁路和降额运行。还要建立在线监测、热管理和健康评估机制,形成从单体一致性到簇级均衡、从 PCS 容错到系统级重构运行的闭环保障。火电耦合调频中不同储能技术路线的模式对比与适配性归纳见表 7。

表 7 火电耦合调频中不同储能技术路线的模式对比与适配性归纳

Table 7 Mode comparison and adaptability summary of different energy storage technology routes in thermal power coupled frequency regulation

模式	结构形态	主要承担的功率分量	典型适配业务	关键优势
全超级电容调频	功率型单元直接参与调节	高频、小幅、快速往复分量	一次调频快速分量;二次调频高频补偿	动态响应快、循环耐受性强、控制链路短
锂电容调频	准功率型单元参与调节	高频分量为 主,兼顾一定能量	一次/二次调频的高频动作场景	功率—能量折中、适于频繁动作
超级电容+锂电池混合调频	功率型、能量型分层	高频由功率型承担;低频与能量由电池承担	二次调频;可兼顾过渡性调峰需求	兼顾性能与寿命;降低电池应力、提升持续服务能力

一次调频更强调秒级快速功率注入与抗扰支撑,功率型储能具备优势;二次调频具有连续跟踪与高频往复特征,混合储能通过分层协同在性能与寿命之间更易取得折中^[33]。深度调峰及供热约束

工况下,机组可调空间更受限,采用多技术路线分层配置更有利于在保证热工安全的前提下兼顾调频与调峰目标。近年来我国典型储能调频项目如表 8 所示。

表 8 近年来我国典型储能调频项目

Table 8 Typical energy storage frequency regulation projects in recent years in China

项目	地点	储能系统规模	投运时间
浙能萧山电厂储能项目	浙江-萧山(网侧)	50 MW/100 MWh 磷酸铁锂电池	2022 年 8 月
华能玉环电厂百万机组火储调频项目	浙江-台州(火电机组侧)	30 MW/30 MWh 磷酸铁锂电池	2022 年 9 月
罗源电厂 20 MW 混合储能调频项目	福建-罗源(火电机组侧)	15 MW/7.5 MWh 磷酸铁锂电池;5 MW/4 min (0.33 MWh)超级电容器	2023 年 4 月
广东能源集团 20 兆瓦新型储能系统示范项目(金湾电厂)	广东-珠海(火电机组侧)	16 MW/8 MWh 磷酸铁锂电池;4 MW/10 min (0.67 MWh)超级电容器	2023 年 11 月
华能左权电厂超级电容混合储能调频项目	山西-左权(火电机组侧)	10 MW/10 MWh 锂电池;10 MW/6 min 超级电容器	2024 年 12 月
华能阳逻电厂超级电容混合储能调频项目	湖北-阳逻(火电机组侧)	14 MW/14 MWh 磷酸铁锂电池;6 MW/6 min 超级电容器	2024 年 12 月
华能伊敏电厂全超级电容储能调频项目	蒙东-伊敏(火电机组侧)	16 MW/10 min 全超级电容储能系统	2025 年 2 月
华能铜川电厂超级电容混合储能调频项目	陕西-铜川(火电机组侧)	15 MW/15 MWh 锂电池;5 MW/6 min 超级电容器	2025 年 6 月
大唐沈东热电超级电容储能调频项目	辽宁-沈阳(火电机组侧)	10MW×10min 超级电容储能系统	2025 年 6 月

从我国已投运的项目看,MW 级混合储能系统中功率型与能量型资源的配比正趋于优化。广东珠海 20 MW 项目采用 4 MW 超级电容配合 16 MW 锂电池的方案实现功率占比 20%,其超级电容单元可提供额定容量 1.2~1.5 倍的瞬时无功支撑。在 30 s 内的短时调频脉冲下,超级电容通过极高的比功率实现在不牺牲电池寿命的前提下,独立覆盖 5 MW 级别的瞬态有功缺口。

5 新型储能 在高比例新能源电网中的支撑作用

5.1 高比例新能源接入对电网稳定性的影响

新能源机组通过电力电子设备并网,其出力特性与同步发电机存在本质差异:一是新能源缺乏物理旋转惯量,导致系统等效惯量随新能源比例增加而降低;二是新能源出力具有强随机性与波动性,

加剧了电网频率调节的复杂性。对于负荷需求大,新能源发电占比较高的电网而言,低惯量特征尤为突出,严重恶化了系统抗扰能力。因此,如何科学衡量并有效改善高比例新能源的电网抗扰能力已成为电网规划和调度运行中需要关注的重要问题。

2016年9月28日,风光发电占比超48%的南澳电网受台风极端天气影响致使风电场集群脱网等一系列事故,最终有功缺额达到52%,系统频率在0.4 s内由49.5 Hz跌落至47 Hz,频率跌落速率远大于频率变化率装置的阈值,致使电网频率崩溃^[34]。2019年8月9日,低惯量特征明显的英国电网遭受雷击引起故障,分布式能源因保护动作脱网150 MW,随后风电脱网887 MW,累计损失功率过多使系统惯量水平降低,较高的频率变化率触发分布式电源保护动作,从而造成分布式能源再次脱网350 MW和后续火电意外脱网,低频减载动作^[35]。

典型事故过程在工程层面印证了上述风险链条。在高渗透率新能源场景下,一旦发生故障冲击、极端天气或关键设备退出造成功率缺口,系统频率可能在亚秒级时间尺度内快速跌落。较大的频率变化率(RoCoF)会让很多分布式电源的保护装置动作,进而引发一连串脱网,最后可能导致频率彻底崩塌,或者触发大范围低频减载。核心原因归根结底是系统惯量太低,频率变化得太快,扰动刚开始时几乎没有足够的“能量缓冲”和反应时间窗口。

高比例新能源不光让整体惯量下降,还带来了惯量在时间和空间上的不均匀这个系统性难题。新能源出力在时间上随机性强、间歇性明显、对极端天气特别敏感;在空间上不同区域渗透率差别很大,新能源集中的地方很容易形成低惯量“薄弱区”,而传统同步机组集中的区域惯量还相对较高,整个系统的稳定控制难度明显加大^[36]。光靠传统火电机组去调节和支撑越来越吃力,对它们的动态响应速度要求变得非常苛刻。未来必须引入响应更快、调节能力更强的新型储能,来提前抑制低惯量场景下的频率风险,并在扰动发生后快速提供支撑。

5.2 新型储能的快速频率响应与惯量支撑机理

上小节事故的共性机理在于高比例新能源条件下系统惯量水平偏低,扰动发生后频率变化率过大,频率动态过程过快,常规一次调频资源难以及时介入,进而触发保护动作并放大失稳过程。因此如何量化不同类型新能源/电力电子资源的惯量贡

献,聚合多类型可控资源的惯量潜力,并设计有效的协同提升策略以维持频率安全边界,是新型电力系统安全稳定运行的核心课题之一。高比例新能源区域惯量时空分布特性如图14所示。

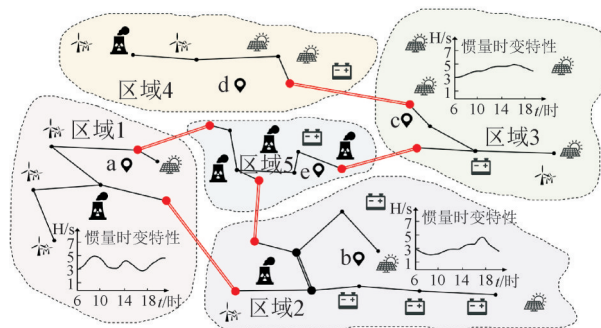


图14 高比例新能源区域惯量时空分布特性^[37]
Fig. 14 Spatio-temporal distribution characteristics of regional inertia in power systems with high penetration of renewable energy^[37]

在低惯量系统中,频率扰动初期的关键矛盾在于功率失衡的瞬态发生与常规调频资源响应滞后之间的时间尺度错配。惯量支撑的本质是以能量缓冲方式在扰动初期提供功率补偿、降低RoCoF并为一次调频争取响应时间,但惯量本身并不消除净功率不平衡,仍需后续调频功率注入完成再平衡^[38]。因此,新型储能的功能定位在于依托电力电子接口实现快速有功功率注入/吸收,在扰动早期以等效惯量支撑抑制RoCoF,并在频率恢复阶段以一次调频能力增强降低频率偏移与稳态偏差^[39]。

从控制机理看,储能可通过虚拟惯性控制与虚拟下垂控制实现对同步机频率响应特性的模拟:其有功功率调节通常以频率偏差 Δf 与频率变化率 $d(\Delta f)/dt$ 为反馈量,分别对应“虚拟下垂出力”和“虚拟惯性出力”,从而在不同阶段释放/吸收能量以参与系统功率平衡。

在工程适配性方面,超级电容器等功率型储能器件由于具备高功率密度、充放电切换快、循环耐受性强等特性,尤其适用于高频、小能量的频率支撑场景。其优势并非长时间能量搬移,而在于覆盖扰动初期最敏感的动态阶段,以小能量代价提供高功率瞬态支撑,显著抑制RoCoF并为后续一次/二次调频资源争取时间窗口。与此同时,等值摇摆方程的近似线性与等效聚合特性,为将频率安全约束映射为惯量与支撑功率需求提供了分析基础,从而有利于开展多资源惯量聚合与参数整定,形成面向区域电网的协同支撑策略。各种新能源虚拟惯量的对比见表9。

表9 各种新能源虚拟惯量的对比
Table 9 Comparison of virtual inertia of different renewable energy sources

电源类型	惯量来源	特点与限制
风电	转子动能	受风速和运行状态限制
光伏	直流侧电容或外接储能	惯量较小,需额外设备支持
储能	电化学能量或其他能量	可调性强,响应快

量化评估系统惯量支撑,核心在于虚拟惯量控制对 $d(\Delta f)/dt$ 的实时响应。凭借超高功率密度,超级电容能够精准填补扰动发生后最危险的 0~500 ms 功率缺口。仿真结果显示,在新能源占比过半的极端工况下,仅需配套额定容量 3%~5%的超级电容,就能强力抑制 30%以上的 RoCoF 峰值。这种“快速补位”不仅能有效规避 UFLS 的过早切除,更为后续一次调频的切入赢得了宝贵的 2~3 s 缓冲期。

5.3 构网型储能与电压支撑能力分析

在高比例新能源与弱电网条件下,系统同步支撑能力下降、电压刚度减弱,电压对功率扰动的敏感性显著增强,传统跟随型并网控制在相角抖动、短路比偏低等工况下更易出现控制受限与支撑不足。构网型储能系统稳定性视角扩展了储能的功能边界:其不再依赖外部电网提供稳定的电压与频率参考,而是通过构网型控制主动形成电压幅值与频率基准,使储能由电网跟随者转变为局部电网的基准源与稳定性资源。目前构网型技术已形成相应测试方法与技术指标体系,并在国内开展了构网型储能测试工作,为其工程化应用提供了可检验基础。

从作用机理看,构网型储能的电压支撑能力可概括为建立基准、提供刚度、抑制扰动的链条。在正常运行时,通过电压/无功下垂或等效电压源控制主动调节无功输出,提高并网点电压刚度并抑制由新能源出力波动引起的电压偏移;在扰动过程中,通过主动相角与频率调节提供稳定锚点,降低弱电网下电压—相角耦合引发的动态放大效应,从而提升系统抗扰动能力。

构网型储能的支撑作用不仅体现在局部控制层面的电压调节,还可在配置与运行协同优化中被显式刻画。相关研究在优化建模中同时引入节点电压幅值及其偏移约束、节点相角约束以及发电机功角约束,并结合储能功率与 SOC 边界进行多时段

调度,使电压安全范围与暂态稳定边界被统一纳入可行域内协调优化。

构网型储能的电压支撑能力可通过 PCS 视在功率容量进行量化。设 PCS 容量为 S ,当有功出力为 P 时,其可提供无功容量为 Q ,公式为

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$
 (4)

该无功支撑能力可显著提升弱电网短路比水平,提高并网点电压刚度并抑制电压波动。

5.4 火电—储能协同支撑新型电力系统的模式

由于高比例新能源接入削弱了系统动量,频率调节正面临瞬时功率冲击与持续能量需求的双重挤压。传统火电受限于机械惯性,其响应时滞与爬坡速率已无法匹配高频波动的抑制需求。因此,火电与新型储能的融合不再是冗余配置,而是演变为一种互补的时间尺度分工。这种架构的核心在于利用超级电容支撑频率突变后的首个周期,再由锂电池平抑后续能量缺口,从而构建起覆盖频率动态全过程的混合支撑体系。火电—储能协同响应 AGC 指令的功率补偿原理如图 15 所示。

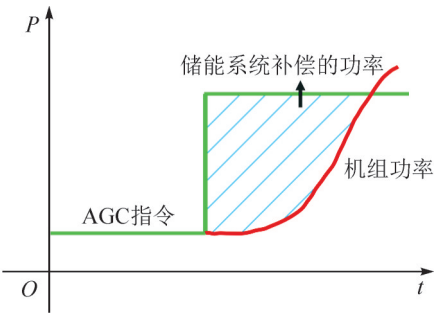


图15 火电—储能协同响应 AGC 指令的功率补偿原理
Fig. 15 Power compensation principle of coordinated AGC response for thermal power energy storage system

从运行机理看,火储协同支撑可以很清晰地对应频率响应的几个典型阶段。如图 15 所示,传统火电机组因为有机机械惯性和热工特性,出力曲线(红色实线)没法瞬间跟上 AGC 指令那种阶梯式跳变(绿色实线)。这两者之间的功率差,就天然成了储能的发力空间。这种协同机制对应了频率响应的典型阶段,扰动刚发生的前几百毫秒到几秒,储能靠超快的功率注入或吸收把 RoCoF 压下去,临时“补”了一部分惯量,同时给火电的一次调频争取出宝贵的响应时间。随后,火电机组在自己爬坡速度和热工约束允许的范围内,慢慢接过功率缺口,把能量补回来。这样系统就能从瞬态的功率“硬扛”阶段,平滑过渡到长期的能量平衡状态。

在系统实际落地的层面,火储协同目前基本可以总结成3种复用的模式:

1)偏差补偿型。储能的功率指令直接就等于“系统要的总指令”减去“火电现在实际发出来的功率”。这样能最快地把高频偏差堵住,弥补火电响应慢的问题。

2)分频分担型。把调频需求按频率高低拆开,高频、快变的这部分让储能来扛,低频、慢变的交给火电。这样既能保持快速响应,又能实现长时间的持续调节。

3)分区/分层支撑型。在弱电网或者新能源特别集中的区域,先让储能快速建起局部的电压和频率“基准”,提供毫秒级的支撑;火电则在更大的时间尺度上负责补容量和能量。这样就能兼顾局部稳得住和全系统最终平衡^[40]。

6 新型储能寿命评估与运行状态在线监测技术

6.1 新型储能寿命退化机理与特征参数

超级电容器出现电容显著下降、等效串联内阻异常增大,或发生变形、开路等物理损伤时,即可判定其进入老化状态。工程上,如果这个储能设备无法满足特定场景需要的能量或功率输出,可定义为达到寿命终点。

在工业上评估器件退化主要依据能量、功率及器件完整性3大指标,这3者的权重会根据具体应用场景来定。目前超级电容器大多用作短时储能,其充放电脉冲不超过30 s,真正卡住性能的是最低截止电压下还能提供的最小功率。有轨电车动能回收、波浪发电功率平抑的研究,表明负载侧的功率需求决定了超级电容系统全生命周期的性能边界。超级电容器电极的初始状态和退化状态如图16所示。

电容缩减与等效串联内阻增长对模组的末期性能有一定影响,但二者重要程度在不同工况下有所差异。对于短时功率脉冲,等效串联内阻的增加是限制性能的关键因素;而对于长时宽脉冲场景,电容容量及模组整体能量保持率的影响更重要。

此外从器件完整性角度来看,老化过程中产生的气态物质也是重要监测对象。在超级电容器老化的过程中,气体的产生造成压力升高,有壳体破裂的风险,因此工业中常需集成安全泄压装置。一旦泄压阀启动,电容器密封破坏丧失使用功能。

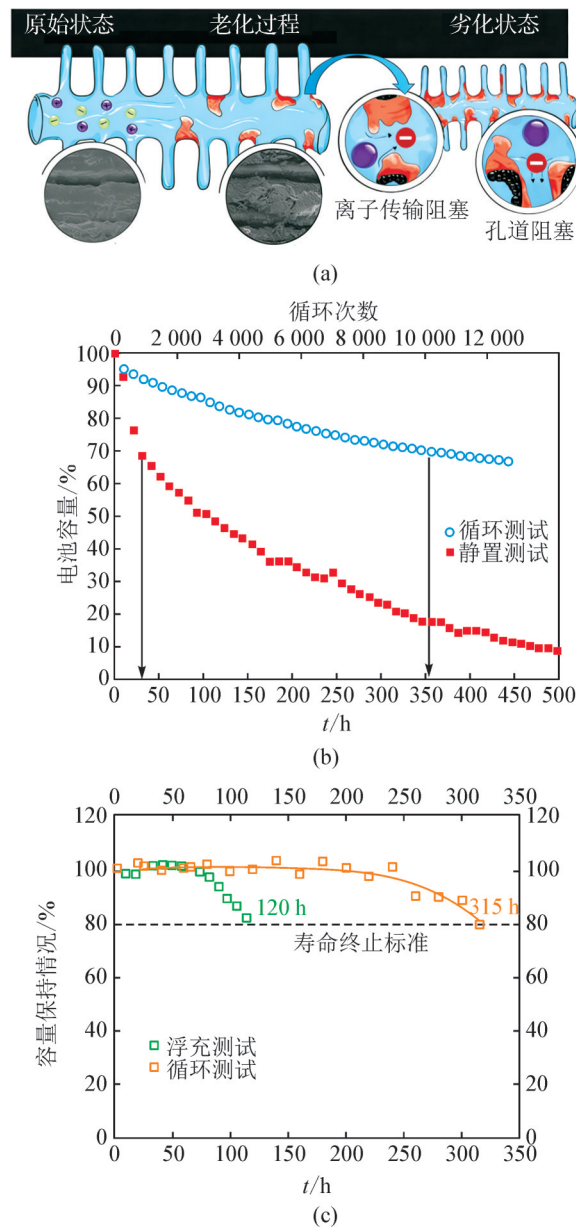


图16 超级电容器电极的初始状态和退化状态示意图^[41]
Fig. 16 Schematic diagram of initial and degraded states of supercapacitor electrodes^[41]

6.2 基于物理模型的状态评估方法

工程应用中的状态评估方法主要受限于算力资源,因为实时采集的数据无法得到及时应用,所以基于物理模型的方法是当前监测的主流方案。

1)基于等效电路模型的评估框架:该方法将超级电容器复杂的电化学反应简化成由电阻、电容和电压源搭成的等效电路。该方法物理含义明确,关键参数直接对应着器件老化特征,比如电解液干涸、活性材料损失等,便于监测与评估^[42]。常用的模型有一阶RC模型和Thevenin模型等,等效电路模型如图17所示。

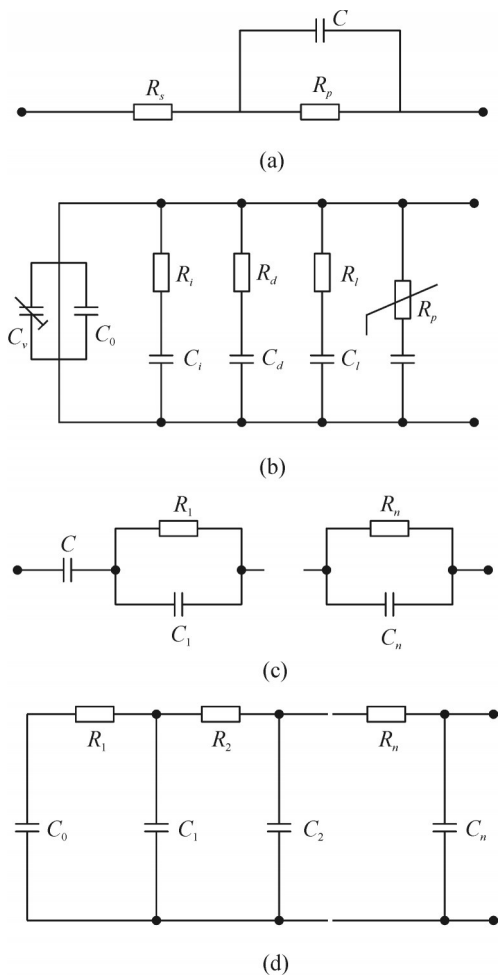


图17 等效电路模型
Fig. 17 Equivalent circuit model

2)参数在线辨识与状态估算:实际运行中,这些模型参数会随着老化程度、温度、电压实时变化,所以必须用在线辨识算法来实时估健康状态(state of health, SOH)。工程里用得最多的就是扩展卡尔曼滤波(extended kalman filter, EKF),它通过建一个状态观测器,在闭环里不断修正模型参数,从而实时给出等效串联电阻(equivalent series resistance, ESR)和电容的估计值。这类方法既有明确的物理意义,计算复杂度又低,非常适合直接部署到电池管理系统(battery management system, BMS)里,简单、靠谱、实时性强,是目前工业界在线监测的首选。

6.3 数据驱动与深度学习评估方法

随着新型储能系统的扩大和运行场景逐渐复杂,传统的物理模型在面对高度非线性的老化过程时准确度无法保证。随着人工智能近些年的迅猛发展,数据驱动和深度学习方法近年成为热门方向。

1)处理复杂工况与非线性退化:数据驱动方法不需要对复杂的电化学机理进行完整理解,仅利用电流、电压、温度等运行历史数据,建立输入变量与

输出结果之间的关系^[43]。以数据为核心可以在多因素共同作用的情况下识别电池老化的变化特征,因此在难以构建物理模型的复杂环境中具有较好的适应性。

2)泛化能力提升与技术融合:由于数据驱动方法依赖训练数据的数量和质量,可以引入迁移学习等策略,将实验环境下获得的老化特征迁移到实际运行工况中,从提升模型的适用性。未来可以将物理模型与数据驱动方法结合,物理模型提供状态约束和机理解释,而深度学习方法则用于挖掘复杂的非线性特征,以在保证模型解释性的同时提高预测精度和稳定性^[44]。

7 发展挑战与未来展望

在新型电力系统持续发展的背景下,电网结构中新能源占比越来越高,系统惯量越来越低。超级电容及其混合储能技术由于响应速度快、循环寿命长等优势,在火电机组参与联合调频以及电网稳定支撑等场景中展现出较好的应用潜力。然而,从示范工程迈向大规模商业化推广,还需要在材料器件性能、系统集成方案以及相关技术标准等方面进一步突破和完善。

7.1 关键技术瓶颈与工程化挑战

1)能量密度与成本的制约。超级电容在功率密度方面具有显著优势,但其能量密度相对偏低,无法独立支撑长时间的能量需求。虽然近年来混合型超级电容在比能量方面有所提升,可电极材料贵、工艺复杂,单位能量成本比锂电池高。因此,未来需要在保持高功率输出特性的前提下,通过优化电极结构设计、开发性能更优的新型电解质等途径进一步提升能量密度,同时逐步降低系统整体成本。

2)兆瓦级系统集成的热管理与一致性难题。火电调频工况下,储能系统频繁大电流充放电,焦耳热大,热量散不出去,局部就形成热点,从而电解液分解、器件老化都会产生加速。另一个问题是单体差异,兆瓦级系统由成千上万个单体组成,出厂时参数就有差别存在,长期运行后差异会被放大。整个系统性能被最差单体限制,被动均衡无法保证长期一致性,需要主动热管理和动态均衡技术的支持。

3)复杂工况下的安全机理问题。在高电压运行以及频繁功率冲击的条件下,混合储能系统的安全机理仍需进一步深入研究。比如软包器件长时间循环可能产气,导致鼓胀,严重时会发生热失

控。目前多数安全预警方法主要基于电压或温度阈值进行判断,但析气、枝晶生长等微观副反应早期很难发现。因此,有必要发展更加精细化和智能化的监测与诊断技术。

7.2 标准体系与市场机制建设

1)并网测试与评价标准缺失。功率型储能参与火电调频或电网支撑,测试方法和评价标准还不成熟。现行标准主要针对能量型电池设计,超级电容这种短时高频设备无法适配。构网型控制性能怎么评、惯量支撑能力怎么量化,行业目前没有统一的测试方法和认证体系。这在一定程度上影响了储能电站的并网验收流程以及后续运行考核。

2)全寿命周期价值评估与市场回报机制。超级电容初始投资高,但寿命长、响应快,具备显著的长期运行优势。然而,当前电力市场中针对辅助服务的补偿机制侧重于短期调节效果,对全生命周期成本以及长期安全收益考虑不足。需建立能够体现功率型储能“快速响应”与“长寿命”价值的市场回报机制,以激发投资动力。

7.3 未来发展趋势与技术展望

1)技术路线的融合。未来储能系统的发展趋势将由单一技术形式逐渐转向能量型和功率型混合的模式。其中,超级电容主要承担高频功率波动的快速调节任务,锂离子电池则负责能量平衡。控制策略也将由传统的跟网型控制逐步向构网型控制转变,通过模拟同步发电机特性,主动为弱电网主动提供电压与频率支撑。

2)物理模型与数据驱动融合。随着数字化与智能化技术的不断发展,能量管理系统(energy management system, EMS)将采用物理模型与人工智能算法结合,从而对SOH进行秒级在线估算,实现并对剩余寿命进行更加准确的预测,降低运维成本,为储能系统的梯次利用提供可靠的数据支持。

3)应用场景的多元化拓展。除了火电调频,超级电容还能用在风电光伏一次调频、直流微电网功率波动抑制、轨道交通再生制动能量回收等方面。尤其是在低温或极寒环境条件下,超级电容低温性能好,高寒地区新能源消纳和保供能发挥作用。

超级电容储能技术正处于由示范应用向规模化推广过渡的关键阶段。通过在材料体系、系统集成、智能运维以及相关标准体系等方面持续推进技术创新与完善,才能在新型电力系统里真正发挥作用。

参考文献

[1] 侯恺,刘泽宇,贾宏杰,等. 含高比例可再生能源的电力系统运行可靠性解析评估方法综述[J]. 高电压技术,

2023, 49(7): 2697-2710.

HOU Kai, LIU Zeyu, JIA Hongjie, et al. Review of analytical methods for operation reliability assessment of power systems with high-penetration renewable energy[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2697-2710.

[2] 王放放,杨鹏威,赵光金,等. 新型电力系统下火电机组灵活性运行技术发展及挑战[J]. 发电技术, 2024, 45(2): 189-198.

WANG Fangfang, YANG Pengwei, ZHAO Guangjin, et al. Development and challenge of flexible operation technology of thermal power units under new power system[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(2): 189-198.

[3] 全球碳中和进程论坛暨《2025全球碳中和年度进展报告》发布会在清华大学举行[EB/OL]. [2026-01-23]. <https://www.icon.tsinghua.edu.cn/info/1070/2005.htm>.

[4] 刘勃,陈中,周涛,等. 面向新型电力系统的等效惯量评估、需求及优化研究综述与展望[J]. 高电压技术, 2025, 51(3): 1251-1268.

LIU Bo, CHEN Zhong, ZHOU Tao, et al. Review and prospects on equivalent inertia estimation, requirement, and optimization for new type power systems[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(3): 1251-1268.

[5] 傅国斌,杨凯璇,孙海斌,等. 低惯量电力系统频率安全约束优化运行研究综述与展望[J]. 中国电力, 2025, 58(9): 148-163.

FU Guobin, YANG Kaixuan, SUN Haibin, et al. Frequency security constrained optimal operation of low-inertia power systems: review and prospects[J]. Electric Power, 2025, 58(9): 148-163.

[6] 王博,杨德友,蔡国伟. 高比例新能源接入下电力系统惯量相关问题研究综述[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2998-3006.

WANG Bo, YANG Deyou, CAI Guowei. Review of research on power system inertia related issues in the context of high penetration of renewable power generation[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2998-3006.

[7] 陈国平,李明节,许涛,等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 20-26.

CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-26.

[8] LI J, ZHANG J, MU G, et al. Dynamic partitioning method for independent energy storage zones participating in peak modulation and frequency modulation under the auxiliary service market[J]. Applied Energy, 2024, 361: 122842.

[9] 李菁华,兀鹏越,李更丰,等. 超级电容储能在新电力系统短时高频功率补充场景中的应用[J]. 电气技术, 2025, 26(11): 18-26.

LI Jinghua, WU Pengyue, LI Gengfeng, et al. Application

- of supercapacitor energy storage in short-time and high-frequency power supplementation scenes in new-generation power system[J]. *Electrical Engineering*, 2025, 26(11): 18-26.
- [10] DAR M A, MAJID S R, SATGUNAM M, et al. Advancements in supercapacitor electrodes and perspectives for future energy storage technologies[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 70: 10-28.
- [11] MOLAHALLI V, K C, SINGH M K, et al. Past decade of supercapacitor research-lessons learned for future innovations[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 70: 108062.
- [12] DONG L, YANG W, YANG W, et al. Multivalent metal ion hybrid capacitors: a review with a focus on Zinc-ion hybrid capacitors[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7(23): 13810-13832.
- [13] ANJANA P M, AMINABHAVI T M. Supercapattery: energy storage devices combining functionalities of battery electrodes and supercapacitor electrodes[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 134: 118265.
- [14] PAL B, YANG S, RAMESH S, et al. Electrolyte selection for supercapacitive devices: a critical review[J]. *Nanoscale Advances*, 2019, 1(10): 3807-3835.
- [15] 孙学文, 张克良, 李晨, 等. 超级电容器概述: 机理、材料、器件和安全特性[J]. *电工电能新技术*, 2025, 44(10): 117-135.
- SUN Xuewen, ZHANG Keliang, LI Chen, et al. Overview of supercapacitors: mechanisms, materials, devices, and safety characteristics[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2025, 44(10): 117-135.
- [16] ZHANG L L, ZHAO X S. Carbon-based materials as supercapacitor electrodes[J]. *Chemical Society Reviews*, 2009, 38(9): 2520-2531.
- [17] 李路, 赵亚杰, 林飞, 等. 超级电容与钛酸锂电池混合储能能在城轨再生制动能量回收中的特性分析[J]. *都市轨道交通*, 2025, 38(3): 123-130.
- LI Lu, ZHAO Yajie, LIN Fei, et al. Characteristic analysis of supercapacitor-battery hybrid schemes for regenerative braking energy utilization in urban rail transit[J]. *Urban Rapid Rail Transit*, 2025, 38(3): 123-130.
- [18] 彭鹏, 王成东, 陈满, 等. 某钛酸锂电池储能电站热失控致灾危害评价[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(4): 1617-1630.
- PENG Peng, WANG Chengdong, CHEN Man, et al. Hazard assessment of thermal runaway in a Lithium-Titanate battery energy storage power plant[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2025, 14(4): 1617-1630.
- [19] KOBEŠČAK K, BAŠKARAD T, KUZLE I. Survey of supercapacitor energy storage technology, modeling, and ancillary service applications in low-carbon power systems[J]. *IEEE Access*, 2025, 13: 202030-202048.
- [20] 史先强, 李睿, 吴西奇, 等. 直流直挂型超级电容储能系统的改进匹配控制与电流-功率双重限制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2026, 46(4): 1471-1485.
- CHENG Yirun, SHI Xianqiang, LI Rui, et al. Improved matching control and current-power dual limiting strategy for DC direct-mounted supercapacitor energy storage system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2026, 46(4): 1471-1485.
- [21] ZHAO B, SONG Q, LIU W, et al. Overview of dual-active-bridge isolated bidirectional DC-DC converter for high-frequency-link power-conversion system[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(8): 4091-4106.
- [22] DONG Z, ZHANG Z, LI Z, et al. A survey of battery-supercapacitor hybrid energy storage systems: concept, topology, control and application[J]. *Symmetry*, 2022, 14(6): 1085.
- [23] YUAN C, GOU J, YOU J, et al. Modular multilevel converter-based hybrid energy storage system integrating supercapacitors and batteries with hybrid synchronous control strategy[J]. *Processes*, 2025, 13(5): 1580.
- [24] NIU G, SUN L, ZHENG N, et al. Hybrid ultracapacitor-based short-term high-frequency energy storage system for new-type power system[C]// *IEEE*, 2022: 2254-2259.
- [25] PAN C, TAO S, FAN H, et al. Multi-objective optimization of a battery-supercapacitor hybrid energy storage system based on the concept of cyber-physical system[J]. *Electronics*, 2021, 10(15): 1801.
- [26] 曹宇, 胡鹏飞, 蔡婉琪, 等. 基于MMC的超级电容与蓄电池混合储能系统及其混合同步控制策略[J]. *中国电力*, 2024, 57(6): 78-89.
- CAO Yu, HU Pengfei, CAI Wanqi, et al. MMC based super capacitor and battery hybrid energy storage system and hybrid synchronous control strategy[J]. *Electric Power*, 2024, 57(6): 78-89.
- [27] 帅怡, 李维斌, 晏沔. 基于电池-超级电容混合储能系统的控制策略[J]. *强激光与粒子束*, 2025, 37(3): 171-180.
- SHUAI Yi, LI Weibin, YAN Mian. Model predictive control of battery-supercapacitor hybrid energy storage system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2025, 37(3): 171-180.
- [28] 孙培锋, 陆王琳, 白鹏, 等. 锂电池和超级电容混合储能辅助火电调频技术发展现状和趋势[J]. *动力工程学报*, 2024, 44(3): 418-429.
- SUN Peifeng, LU Wanglin, BAI Peng, et al. Development status and trends of Lithium battery and supercapacitor hybrid energy storage assisted thermal power frequency regulation technology[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2024, 44(3): 418-429.
- [29] 沈子伦, 尹忠东, 陈俊晔, 等. 基于SOC预测的火储联

- 合调频控制策略[J]. 电力建设, 2023, 44(9): 129-136.
- SHEN Zilun, YIN Zhongdong, CHEN Junye, et al. Joint frequency modulation control method for energy storage thermal power units based on SOC prediction[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(9): 129-136.
- [30] 庄伟, 康磊, 孙安娜, 等. 火电机组 AGC 协调控制系统优化[J]. 发电设备, 2022, 36(4): 266-271.
- ZHUANG Wei, KANG Lei, SUN Anna, et al. Optimization of AGC coordination control system in a thermal power unit[J]. Power Equipment, 2022, 36(4): 266-271.
- [31] GUO Y, WU Q, GAO H, et al. MPC-based coordinated voltage regulation for distribution networks with distributed generation and energy storage system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(4): 1731-1739.
- [32] 黄策, 燕云飞, 沈迎, 等. 超容储能辅助火电机组调频的电气问题研究[J]. 电气技术, 2022, 23(8): 103-108.
- HUANG Ce, YAN Yunfei, SHEN Ying, et al. Research on electrical problems of frequency modulation of thermal power unit assisted by supercapacitor energy storage[J]. Electrical Engineering, 2022, 23(8): 103-108.
- [33] 王伟, 陈钢, 常东锋, 等. 超级电容辅助燃煤机组快速调频技术研究[J]. 热力发电, 2020, 49(8): 111-116.
- WANG Wei, CHEN Gang, CHANG Dongfeng, et al. Supercapacitor aided fast frequency modulation technology of coal-fired unit[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8): 111-116.
- [34] 曾辉, 孙峰, 李铁, 等. 澳大利亚“9·28”大停电事故分析及对中国启示[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 1-6.
- ZENG Hui, SUN Feng, LI Tie, et al. Analysis of “9·28” blackout in South Australia and its enlightenment to China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 1-6.
- [35] 孙华东, 许涛, 郭强, 等. 英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6183-6191.
- SUN Huadong, XU Tao, GUO Qiang, et al. Analysis on blackout in Great Britain Power Grid on August 9th, 2019 and its enlightenment to Power Grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6183-6191.
- [36] 滕贤亮, 谈超, 昌力, 等. 高比例新能源电力系统有功功率与频率控制研究综述及展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(15): 12-35.
- TENG Xianliang, TAN Chao, CHANG Li, et al. Review and prospect of research on active power and frequency control in power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(15): 12-35.
- [37] 刘长轩. 高比例新能源区域电网的惯量聚合方法及提升策略研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2025.
- [38] NIU D, FANG J, YAU W, et al. Comprehensive evaluation of energy storage systems for inertia emulation and frequency regulation improvement[J]. Energy Reports, 2023, 9: 2566-2576.
- [39] 张怡静, 李智, 时艳强, 等. 基于储能惯量支撑的受端电网频率优化控制方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(11): 3556-3568.
- ZHANG Yijing, LI Zhi, SHI Yanqiang, et al. Optimal frequency control method of receiving power grid based on energy storage inertia support[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(11): 3556-3568.
- [40] 李菁华, 兀鹏越, 黄富强, 等. 超级电容混合储能辅助火电机组 AGC 调频容量配置方案研究与应用[J]. 热力发电, 2025, 54(7): 101-110.
- LI Jinghua, WU Pengyue, HUANG Fuqiang, et al. Research and application of AGC frequency regulation capacity allocation scheme for supercapacitor hybrid energy storage assisted thermal power unit[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(7): 101-110.
- [41] PAMETÉ E, KÖPS L, KRETH F A, et al. The many deaths of supercapacitors: degradation, aging, and performance fading[J]. Advanced Energy Materials, 2023, 13(29): 2301008.
- [42] POONAM, PAREEK K, JANGID D K. Analysis of the effect of different factors on the degradation of supercapacitors[J]. Ionics, 2022, 28(10): 4527-4545.
- [43] ZHOU Y, HUANG Y, PANG J, et al. Remaining useful life prediction for supercapacitor based on long short-term memory neural network[J]. Journal of Power Sources, 2019, 440: 227149.
- [44] ZHANG Y, GU P, DUAN B, et al. A hybrid data-driven method optimized by physical rules for online state collaborative estimation of lithium-ion batteries[J]. Energy, 2024, 301: 131710.
- 作者简介:**
- 杨沛豪(1993—),男,高级工程师,主要从事电源侧储能技术研究及应用工作。E-mail:44960280@qq.com。