

关于电化学储能系统的电气架构分析及发展趋势

沈 雷

江苏瑞欧宝能源科技股份有限公司, 江苏 扬中 212299

[摘要]随着全球能源转型和电力系统的快速发展, 电化学储能系统作为一种高效、灵活的储能技术, 正逐渐在能源领域占据重要地位。文中旨在探讨电化学储能系统的组成、技术路线以及未来的发展趋势。

[关键词]电化学储能系统; 集中式; 分布式; 集散式; 组串式; 高压级联

DOI: 10.33142/hst.v7i12.14658

中图分类号: TM715

文献标识码: A

Electrical Architecture Analysis and Development Trends of Electrochemical Energy Storage Systems

SHEN Lei

Jiangsu Ruioubao Energy Technology Co., Ltd., Yangzhong, Jiangsu, 212299, China

Abstract: With the rapid development of global energy transformation and power systems, electrochemical energy storage systems, as an efficient and flexible energy storage technology, are gradually occupying an important position in the energy field. The purpose of this article is to explore the composition, technical roadmap, and future development trends of electrochemical energy storage systems.

Keywords: electrochemical energy storage system; centralized; distributed; distributed type; string style; high voltage cascade

引言

在全球碳中和的大背景下, 能源转型在世界范围内已呈现不可逆趋势, 在此基础上, 全球储能市场也步入了飞速发展的阶段。根据 EESA 统计, 2017—2023 全球储能新增装机规模 (GWh) 平均增速超过了 85%, 尤其是在 2020 年后, 呈现出近乎每年翻一番的增长趋势。2023 年全球储能市场新增装机规模达到了 103.5GWh, 已超过全球储能装机的历史累计规模 101GWh。

电化学储能系统 (Electrochemical Energy Storage System, EESS) 通过将电能转化为化学能进行储存, 并在需要时将其释放回电网, 从而实现了电能的存储和调节。近年来, 锂离子储能存在部署快速, 成本低、调度响应速度快等优势得到大规模的推广。

1 电化学储能系统的组成

电化学储能系统主要由以下几个关键部分组成:

(1) 电池组: 电池组是电化学储能系统的核心部分, 负责储存电能。根据应用需求和性能要求, 可以选择不同类型的电池, 如锂离子电池、铅酸电池、钠硫电池等。电池组的大小和容量决定了储能系统的储能能力。

(2) 电池管理系统 (BMS): 电池管理系统是电化学储能系统中的重要组成部分, 电池管理系统负责监控电池组的运行状态, 包括电压、电流、温度等参数。通过智能算法对电池组进行管理和控制, 确保电池组在安全、高效的状态下运行。它主要担任感知角色, 负责电池的监测、评估、保护以及均衡等。

(3) 储能变流器 (PCS): 储能变流器是电化学储能系统中的关键设备之一, 它负责实现直流电与交流电之间

的转换, 控制电池组的充放电过程, 实现对电网有功功率和无功功率的调节。它主要担任执行角色, 控制储能电池组的充电和放电过程, 进行交直流的变换。在储能系统中, 双向 PCS 充当了电池堆与电网端之间的桥梁, 一方面将电网端的交流电转化为直流电为电池堆充电, 另一方面将电池堆的直流电转换为交流电回馈给电网。

(4) 能量管理系统 (EMS): 能量管理系统是电化学储能系统的“大脑”, 负责整个系统的数据采集、处理、分析和优化。通过实时监控电池组、电网以及负载的状态, 制定最优的充放电策略, 实现能量的高效利用和电网的稳定运行。它主要担任决策角色, 负责数据采集、网络监控和能量调度等。

(5) 热管理系统: 电化学储能系统需要控制和调节储能电池系统内部的温度, 使系统能够在最佳的运行环境下工作, 提高电池使用过程中的安全使用寿命等, 电化学储能系统一般采用风冷方式或液冷方式。全浸没作为示范项目研究, 不具备推广的条件。储能电池的充放电过程会大量生热, 而电池本身又是对温度极其敏感的部件, 维持稳定、适中的工作温度会对提高电池效率、延长电池寿命、防止热失控都起到至关重要的作用, 因而储电配套的温控系统不可或缺。

(6) 消防监控系统: 以确保储能系统在发生热滥用情况下可以得到有效控制及抑制, 储能系统都要配置消防监控系统, 起到预警、保护、抑制的作用。

2 电化学储能系统的电气架构技术路线

目前, 电化学储能系统按电气结构划分包括集中式、分布式、集散式、组串式和高压级联直挂式等几种。

集中式: 多个电池簇直接在直流侧的母线并联, 直流

电汇流后通过储能变流器转换成交流。这种方式控制简单，但电池簇之间电压不一致时会产生环流。

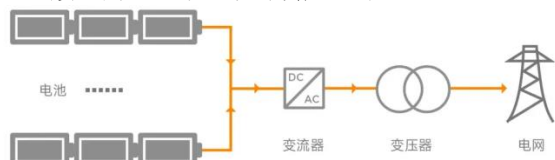


图1 集中式储能系统电气架构示意图

(2) 分布式：每个电池簇单独与一个储能变流器串联，多个储能变流器在交流母线侧进行并联。这种方式可以解决电池簇间的环流问题，每个簇可以单独管理或故障隔离。

(3) 集散式：每个电池簇经过直流变压器（DC/DC）变成一致的电压后在直流侧进行并联。这种方式同样可以解决电池簇间因电压不一样会产生环流的问题，但增加了DC/DC元件和能量损耗。

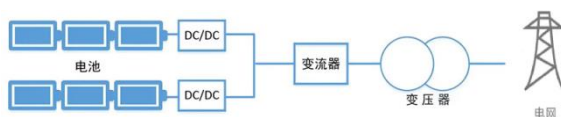


图2 集散式储能系统电气架构示意图

(4) 组串式：与集散式相似，但直流电汇流后通过多个容量较小的变流器转换成交流。单个变流器故障不会影响整个储能系统。

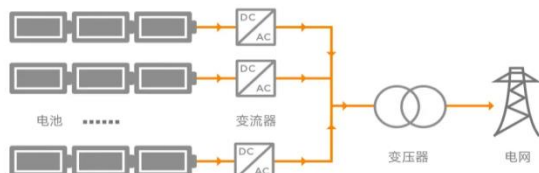


图3 组串式储能系统电气架构示意图

(5) 高压级联直挂式：系统包含多个储能单元，每个储能单元由H桥和独立小电池堆组成，每相由多个储能单元串联至一定的电压直接接入交流电网。无需升压变压器，减小系统损耗和占地面积。

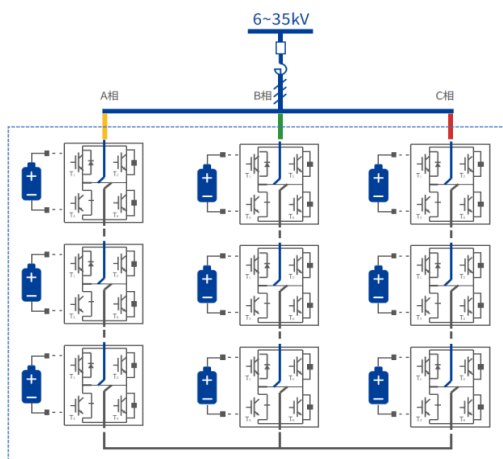


图4 高压级联储能系统电气架构示意图

3 电化学储能系统的发展趋势

目前，电化学储能系统向高安全、长寿命、高效率、高能量密度等方向发展，以下总结目前主要技术发展趋势。

3.1 交直流一体化储能系统

在传统储能系统中，电池直流舱与PCS交流舱是相互独立的，电池单元与PCS设备到项目场地后再进行并网测试。交直流一体方案，通过将以电池单元为核心的直流系统与以PCS为核心的交流系统在结构和应用上实现一体融合，不仅结构更优更简，而且整个储能系统的性能、效率、安全均得到提升。

在性能方面，交直流一体方案可实现电池的簇级管理，解决电池不一致性的短板效应、减少了转化层级，同时可提高能量转换效率，减少故障损失率。交直流一体方案在储能系统全生命周期中整体提升了电池放电量。与传统DCDC+集中式PCS两级转化相比，交直流一体方案也减少了转化层级，使系统循环效率RTE得到提升。在交付方面，交直流一体化储能系统可以在工厂内完成装配，免去现场PCS安装、直流接线、通讯测试、充放电测试四大环节，做到到站即并网、节约工期，大幅提升项目施工效率。在安全方面，交直流一体化储能系统的电池与PCS间采用标准化短线缆连接，且无需直流防雷，从而大大提高储能系统的安全性。

3.2 高压级联式储能系统

高压级联技术是一种在储能系统中应用的拓扑结构，其主要优势在于能够直接输出高压，无需经过变压器。高压级联技术在减小系统损耗、提高效率的同时，降低土地建设施工成本，提高单位建设面积的能量密度。高压级联式储能系统和低压并联分布式储能系统方案相比，省去工频变压器，提高运行效率，整体工作效率可达到98%以上。并且由于省去工频变压器和分布式储能电站储能变流器（DC/AC变换器），可以实现直挂于中高压电网，减小占地约20%。另外，由于高压级联技术无需使用变压器表现出整体成本优势，可以节省一部分设备成本，同时减小了系统损耗，降低了运行成本。虽然高压级联技术在单体设备投入方面可能略高于传统技术，但因其运行效率高、损耗小等优势，总体成本仍然具有竞争力。并且，高压级联式储能系统可通过一套装备实现“传统储能变流器+无功补偿SVG”两套装置的功能，同时提供有功支撑和无功调节，为系统提供转动惯量，减少了无功补偿SVG装置的投资和工程建设成本，在大容量情况下具有经济优势。

3.3 构网型储能技术

目前电网存在高比例可再生能源接入、高比例电力电子设备接入、高比例特高压直流输电等，存在以下问题：

(1) 高比例可再生能源接入：新能源占比的不断提高，其间歇性、随机性、波动性特点快速消耗电力系统灵活调节资源。未来，新能源大规模高比例发展对系统调节能力提出了巨大需求，但调节性电源建设面临诸多约束，区域性新能源高效消纳风险增大，制约新能源高效利用。

表 1 不同电气架构优缺点对比表

按电气架构分类	优点	缺点
集中式	结构简单, 投资成本低, 安装运维成本便宜, 对运维人员要求不高 1. 控制逻辑简单: 集中式储能系统的电池 Pack 直接串联, 控制简单, 易于管理。 2. 系统造价较低: 由于结构相对简单, 集中式系统的初始投资和维护成本较低。	1. 木桶效应: 电池模块直接并联, 电压被强制平衡, 系统的整体寿命取决于寿命最短的电池。 2. 簇间环流问题: 电池簇间因为放电深度不一致, 可能导致环流, 影响系统的充放电效率。 3. 安全性问题: 并联电池簇间可能形成环流, 导致电芯过充, 增加安全风险。 4. 运维复杂: 电流舱现场调试复杂, 调试周期较长; 当系统出现故障时, 一般需要厂家赶到现场维护, 系统停机时间长, 运维成本较大。
分布式	布置更加灵活, 因为单个机柜可以做得更小在消防上有额外优势	供应链体系不够成熟, 成本上有劣势, 之前主要应用在工商侧储能, 最近两年才开始应用于大储领域
集散式	通过增加 DC/DC 直流隔离, 避免直流并联产生的直流拉弧、环流、容量损失, 大大提高了系统的安全性, 从而提升系统效率。	但由于系统需要经过两级逆变, 对系统效率有反向影响; 额外的 DC/DC 隔离, 让整个系统多了一层能量损耗, 整体的效率表现与集中式相当, 不如组串式
组串式	1. 提升系统效率: 组串式架构实现一簇一管理, 提高了电池包的均衡性和充放电效率。 2. 高可靠性和维护方便: 组串式储能系统一簇一管理, 单簇整体运维。系统故障时可精准定位到单簇, 对其他柜体运行无影响 3. 安全性更高: 每个电池簇单独控制充放电, 避免环流影响, 实现故障隔离。 采用一簇一管理的高效热管理系统, 均温性好, 电池寿命长, 系统运行较为稳定。 4. 灵活性强: 单柜体积小, 方便运输、安装, 适用于工商业用户侧、共享储能、新能源配储等多种应用场景; 系统支持新旧电池混用, 可以根据实际需求灵活扩容或者补电, 大大提高了系统的灵活性和可维护性。	1. 集成方式相对复杂: 相比集中式, 组串式系统的集成和调试可能更为复杂。 2. 系统成本增加: 由于采用了更多的优化器和监控设备, 组串式系统的总体成本可能较高。
高压级联式	高效率: 高压级联式储能系统无需升压变压器, 减少了系统损耗, 提高了能源转换效率。相比传统储能系统, 高压级联式在转换效率上通常能高出 5% 左右。 节省空间: 高压级联式储能系统的结构紧凑, 占地面积小, 有利于节约土地资源。通过优化布局, 可以进一步提高单位面积的能量密度。 电池一致性高: 高压级联式储能系统采用多个储能单元串联, 每个储能单元由 B 桥和独立小电池堆组成, 减少了电池簇间的并联情况。这种结构有助于消除电池单体和电池簇的环流现象, 提高电池系统的循环寿命和安全性。 响应速度快: 高压级联式储能系统的响应时间较短, 能够快速响应电网调度需求。这使得高压级联式储能系统更适合用于需要快速响应的储能场景。 降低成本: 在相同输出容量要求下, 高压级联式储能系统的初始安装容量可比集中式少 6%~7%, 同时, 由于内部构造可以省略变压器和开关柜等设备, 进一步降低了制造成本。	电压等级限制: 高压级联式储能系统通常只能输出 6kV、10kV、35kV 等特定电压等级, 在工商业应用中可能缺乏灵活性。这限制了高压级联式储能系统在某些特定场景下的应用。 技术门槛高: 高压级联式储能系统的技术门槛较高, 涉及算法、绝缘技术和项目运维经验等多个方面。 经济可比性: 高压级联式储能系统在 5MW 以上规模时才具有经济可比性。这意味着对于较小规模的储能需求, 高压级联式储能系统可能不是最优选择。 目前渗透率较低, 需要经过多个项目验证可靠性和稳定性。

(2) 高比例电力电子设备接入: 伴随风、光等可再生能源大量接入, 电力电子发电设备在电力系统中占比不断提升, 由于可再生能源发电与传统同步发电机的控制特性差异、电网中诸多电力电子设备控制方案不同, 低惯量、低阻尼、弱电压支撑已成为新型电力系统的显著特征。同时, 输电侧的换流站和潮流控制 (如统一潮流控制器, 静止同步串联补偿器)、用电侧的充电桩等电力电子设备大量接入进一步增加了电网复杂性, 对电网稳定运行提出新挑战。

(3) 高比例特高压直流输电: 我国能源生产、消费呈现逆向分布, 风、光能源大基地、大水电、大核电等集约化开发主要集中在西南、西北、东北、华北地区电力负荷中心主要集中在中东部地区, 以特高压为骨干网架的大

容量、远距离能源输送大通道建设全面加速, 不断深化“西电东送”扩大“北电南送”的能源配置格局。大容量远距离能源输送通道下, 由严重故障引发的局部电网间解列会引起全网功率大范围转移。目前特高压直流母线电压高达 ±1100kV, 当发生换相失败、直流闭锁, 导致功率不平衡、瞬时过电压等问题时会增加系统频率和电压失稳风险, 对变流设备性能如惯量支撑、频率支撑、电压支撑提出更高要求。

(4) 发电系统异常失电时通常是通过柴油机给变压器建立励磁, 相对成本高, 需要变流器可以自行完成交流电压的建立, 为主发电单元提供所需要的励磁, 甚至需要发电单元能自行组建电网。

因此需要提前应对分布式电源渗透率逐步提高和源

网荷储灵活互动的需要,推进变流器并网及电压协调控制技术,实现发配电网大规模分布式电源有序接入、灵活并网和多种能源协调优化调度,推动提升发配电网运行效能势在必行。其中变流器并网及电压协调控制技术尤为关键。

电网构建阶段(Grid-forming, GFM):2020年后,光伏等新能源更大规模接入电网,导致新能源渗透率较高,个别地区超过60%,此时电网的短路容量比(Short Circuit Ratio, SCR)将大幅降低,甚至个别地区SCR低于1.5,由于新能源固有的间歇性、随机性和波动性导致其对电网影响极大,因此变流器不仅仅只是需要其支撑电网,还必须一同构建电网。特别是2050年后,新能源渗透率将全面超过50%,同步发电机在电网系统的占比过低,发电单元主要由电力电子变流器构成,此时必须考虑变流器工作在电压源模式来构建电网,尤其是VSG技术的持续发展,将使变流器逐步具备同步电机的发电特性,进一步保证电网稳定。

3.4 大容量电芯长时储能系统

随着技术的不断进步,大容量电芯在循环寿命、能量密度等方面持续突破,为长时储能提供了有力支持。大容量电芯通过提升单位体积能量密度,减少Pack零部件使用量,从而降低度电成本。同时,大电芯系统串并联减少,BMS管理精度提升,安全性能也会有一定程度改进。当前市场上,以314Ah为代表的300Ah+储能电芯已渐成主流,并逐渐向600Ah、1000Ah以上的大容量电芯迈进。

同时,大容量电芯的热失控能量增加,对安全性能提出更高要求。加强技术研发和创新,不断提升大容量电芯的性能和安全性,推动电芯的标准化和规模化生产,降低成本,提高市场竞争力。

大容量电芯长时储能作为储能行业的一个重要发展方向,具有广阔的市场前景和发展潜力。然而,在发展过程中也需要克服一些技术和市场挑战。通过加强技术研发、推动标准化和规模化生产以及加强产业链合作等措施,可以推动大容量电芯长时储能技术的不断发展和应用。

3.5 电力能源互联网化

如太阳能、风能等可再生能源具有分布式、间歇性和不确定性的特点,需要借助互联网技术和智能电网进行高效管理和利用。电力能源互联网化的发展趋势是当前能源领域的重要变革方向之一,它融合了互联网技术、智能电网、分布式能源等多种技术手段,旨在实现能源生产、输配、消费等环节的互联互通,提高能源利用效率,降低能源消耗,促进能源可持续发展。以下是对电力能源互联网化发展趋势的详细分析。

智能电网是电力能源互联网化的核心组成部分,它通过先进的通信技术和控制技术,实现电力的高效调度和分配,提高电网的可靠性和灵活性。云计算、大数据、物联网等信息技术在电力能源互联网化中发挥着重要作用。这些技术能够实现对能源系统的实时监测、数据分析和智能调度,提高能源系统的运行效率和安全性。电力能源互联

网化不仅局限于电力行业,还与其他行业如交通、建筑、信息等形成了跨界融合,这种跨界融合促进了新技术、新产品和新业态的产生,推动了能源行业的转型升级。电力能源互联网化推动了能源市场的开放和竞争,通过市场化交易机制,能够实现能源资源的优化配置和高效利用。尽管电力能源互联网化具有广阔的发展前景,但在发展过程中也面临一些挑战。如技术难题、市场机制不健全、网络安全问题等都需要进一步加强研究和解决。

3.6 热失控控制技术多样化

电池热失控发展趋势是一个复杂且关键的问题,涉及到电池技术、系统设计、运行环境等多个方面。随着电池储能系统的广泛应用,热失控问题逐渐受到业界的重视。需要明确的是,热失控是电池在特定条件下,如高温、过充、内部短路等,导致电池内部化学反应失控,产生大量热量并可能引发火灾的现象。因此,对于储能BMS来说,预防和控制热失控是保障系统安全的关键。

从发展趋势来看,随着电池技术的不断进步,新型电池材料的应用以及电池管理系统的智能化发展,储能BMS热失控的风险有望逐渐降低。

(1) 新型电池材料:目前,锂电池是主要的储能电池类型。未来,随着固态电池等新型电池技术的研发和应用,电池的热稳定性和安全性有望得到显著提升,从而降低热失控的风险。

(2) 电池管理系统的智能化:智能化是储能BMS的重要发展方向。通过引入先进的算法和传感器技术,可以实现对电池状态的实时监测和预警,及时发现并处理可能导致热失控的异常情况,从而避免热失控的发生。

(3) 系统设计的优化:在储能系统的设计中,通过优化电池包的结构、散热系统、安全防护措施等,可以降低电池在工作过程中产生的热量,提高系统的散热效率,从而减少热失控的风险。

4 结论

电化学储能系统作为能源转型和电力系统中的关键技术之一,从提高安全、降低成本等方面其组成、技术路线以及发展趋势具有多样化,都值得我们深入研究。未来,随着技术的不断进步和应用场景的拓展,电化学储能系统将在全球能源领域发挥更加重要的作用。

【参考文献】

- [1]申屠骁.电化学储能系统产业现状及发展分析[J].机电信息,2023(6):28-30.
 - [2]徐进.关于电化学储能产业发展的深度思考[J].能源,2024(7):25-29.
 - [3]王雅博,朱信霖,李雪强,等.电化学储能系统电池柜散热的影响因素分析[J].电气制造,2022(1):17.
- 作者简介:沈雷(1984.12—),男,学历:本科学士学位,专业:电气自动化,目前职称:电气自动化专业工程师,目前就职单位:江苏瑞欧宝能源科技股份有限公司。