

# 关于电池储能系统集成技术的初步研究

## Research on Battery Energy Storage System Integration Technology

李振山 石浩\*

Zhenshan Li Hao Shi\*

山东电力工程咨询院有限公司 中国·山东 济南 250013

Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250013, China

**摘要:** 随着新能源大规模并网与智能电网的建设, 电池储能系统近年来受到了广泛关注并得到了大量应用。不论是在发电侧、电网侧, 或是在负荷侧, 电池储能系统都能够发挥双向功率控制和能量调控的作用, 使得电力的生产者、调度者和消费者均能基于各自的安全考量和经济利益, 从中汲取最大化价值, 从而增强了电力管理的灵活性。论文综述了多种形式的电能存储方式, 对电池储能集成系统的架构及其关键设备进行了技术研究。最后, 对电池储能集成技术的发展方向进行了探讨。

**Abstract:** With the construction of large-scale grid connection of new energy and smart grid, the battery energy storage system has attracted wide attention and received a lot of applications in recent years. Whether in the power generation side, in the power grid side, or in the load side, the battery energy storage system can play the role of two-way power control and energy regulation, so that the power producers, dispatchers and consumers can be based on their own safety considerations and economic interests, maximize value, thus enhancing the flexibility of power management. This paper summarizes various forms of electric energy storage methods, and studies the architecture of battery energy storage integrated system and its key equipment. Finally, the development direction of battery energy storage integration technology is discussed.

**关键词:** 电池储能技术; 系统集成; 研究分析

**Keywords:** battery energy storage technology; system integration; research and analysis

**DOI:** 10.12346/peti.v4i4.6965

## 1 电池储能概述

目前, 人们已经探索和开发的储能形式, 按照技术路径分类, 储能系统主要分为化学储能和物理储能两大类, 化学储能包含氢能和电池储能。

根据 CNEA 统计, 全球已投运储能项目累计装机规模最大的物理储能——抽水蓄能, 约占总规模的 90.3%。电化学储能累计装机规模紧随其后, 约占 7.5%, 其中锂离子电池规模最大, 约占电化学储能装机规模的 92%。

“十四五”期间, 中国电化学储能市场将正式跨入规模化发展阶段, 以电化学储能为主的新型储能近年来快速发展, 装机占比不断提高。因此, 下面就电池储能系统集成技术进行研究分析。

## 2 电池储能系统集成技术的主要任务

电池储能系统 (Battery Energy Storage System, BESS),

是将储能电池、功率变换装置、本地控制器、配电系统、温度与消防安全系统等相关设备按照一定的应用需求而集成构建的较复杂综合电力单元。

BESS 集成技术的主要任务是在于基于应用领域技术原理及项目整体目标需求, 通过对储能电池、PCS、配电、控制、环境与安全等底层设备的经济配置、有机整合、各自功能的优化运行、彼此间逻辑的有效衔接、电气与温度环境的安全构建, 最终实现 BESS 对内智能化自治管理、对外一体化响应或主动完成功率控制与能量调度<sup>[1]</sup>。

## 3 电池储能系统集成架构

电池储能系统集成架构如图 1 所示。

BESS 内部主要设备包含能量存储、储能变流器、本地控制器、环境和安全管理、配电及预制舱等设备, 并在本地控制器的统一管理下, 独立或接受外部能量管理系统 (EMS)

【作者简介】李振山 (1987-), 男, 中国山东济南人, 本科, 工程师, 从事电力工程相关研究。

【通讯作者】石浩 (1986-), 男, 中国山东新泰人, 硕士, 工程师, 从事电力工程相关研究。

指令以完成能量调度与功率控制，实现安全、高效运行<sup>[2]</sup>。

大规模储能电站往往由多个配置与功能基本独立的储能系统并联组成。

#### 4 电池储能系统技术性能指标分析

BESS 主要性能指标包括：一是与能量的存储能力及有效利用有关，即与容量有关；二是与能量的补充或释放能力有关，即与功率有关。两者关系又被用来区分该储能系统为能量型或功率型。

##### 4.1 系统容量

该指标体现的是储能系统理论最大可存储的能量容量，一般单位用千瓦时（kWh）或兆瓦时（MWh）表示。这是储能系统最重要的一个参数指标，但是，其真正可用容量却又受到了电池充放电深度（DOD）和系统效率的影响。

BESS 系统容量，强调的是可以输出或被利用的能量的大小，这一点和电池容量的定义有所区别。电池容量一般是指在一定条件下（放电率、温度、终止电压等）电池能够放出的电荷量，以安时（Ah）为单位，表示的是电流与时间的积分。

##### 4.2 系统最大功率

系统最大功率，体现的是储能系统最大充放电能力，一般单位用千瓦（kW）或兆瓦（MW）表示。该性能指标决定于电池内部、直流传输回路、PCS 及交流接入的整个主电路设计，甚至通过最大功率运行下的损耗（该损耗将主要转化为热能），而影响温控系统和其他辅助设备的设计。同样容量的储能系统，由于最大功率的不同，而在功能上产生显著差异；即使是同一个储能系统，由于运行功率的不同，

其效率也会产生差异<sup>[3]</sup>。

当功率参数相对容量参数较大时，如 1 MW/500 kWh，将被称为功率型储能系统；而反之，如 500 kW/1 MWh，则被称为能量型储能系统。有时引入时间的概念，如前者可被标记为 1 MW/0.5 h，而后者可被标记为 500 kW/2 h。

##### 4.3 能量损失与效率

储能系统的效率，反映系统在充放电过程中的能量损失，可理解为系统放出能量与充入能量的比值，也称为循环效率。这一损失，不仅仅与储能电池的技术类型有关，也决定于 PCS 等电气环节。狭义的系统效率，将主要表现充放电过程中主电路上的损耗，从电池、直流母线、PCS 最后到变压器（若有）。但是，事实上在工程应用中，温控系统等辅助设备的功率消耗也经常被折算入总的损耗中，对效率产生影响。

此外，电池静置过程中也会产生能量损失，铅酸电池一般为 1%~3%/月，锂电池则小于 1%/月。

##### 4.4 循环次数

电池的循环次数，即为电池的寿命。而整个储能系统中，由于电池的高价值，其寿命也决定了整个储能系统的寿命，循环次数的衰减，会使得电池内阻增加，损耗和发热量也随之上升将进一步加剧循环次数的衰减过程。此外，频繁的过充和过放，将导致电池中金属物质在电解液中的溶解、沉积的往复，也将对电池循环次数和安全产生显著影响。

##### 4.5 响应时间

BESS 功率本身的转换和响应时间均在毫秒级，对于电力系统应用已经足够。这也是 BESS 相较于抽水蓄能等其他物理储能优越的地方。但受电压、安装方式及电芯容量的限制，单个 BESS 的功率及容量均较为有限，在大型储能电站中，如某个由数十组常规低压 5 MW/2 h 储能系统并联组建

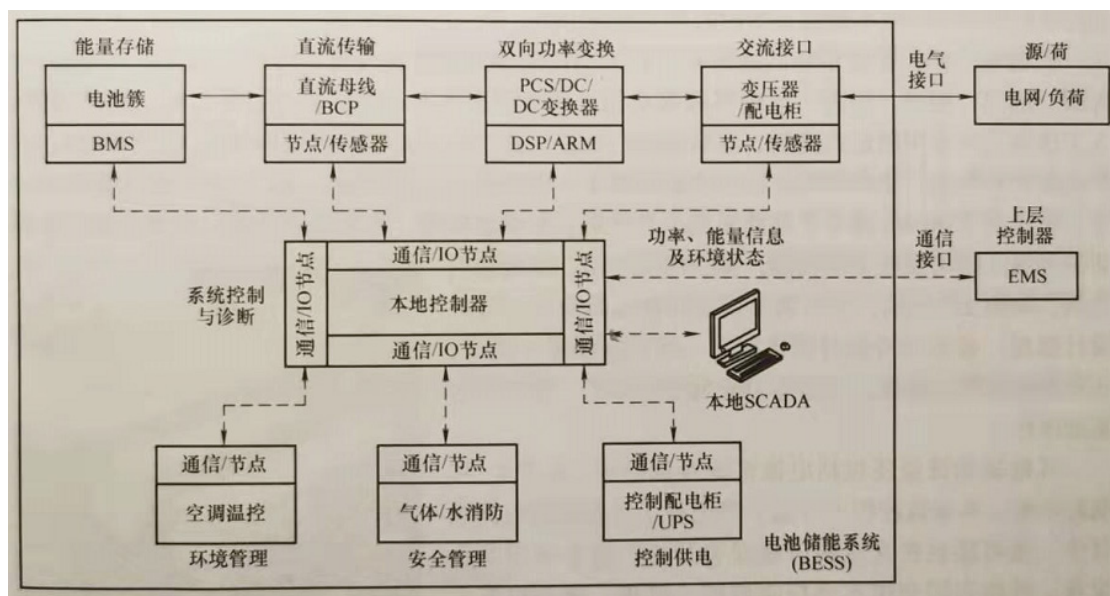


图 1 电池储能系统集成架构

的大型储能电站，其响应时间将主要受限于通信方式和调度机制，将会受到并联设备间功率协同、环流抑制等功能的影响，最终的站级响应时间可能会在百毫秒或秒量级。当然，单体 5 MW/2 h 的 BESS 只是假设，其过多的电池并联本身就存在较大的安全隐患。这一问题需要群控方式的改变，也需要高压直挂等新的储能系统技术的突破和应用。

#### 4.6 其他特性

在其他应用场景或经济性分析中，也会用到比能量（能量与质量之比，Wh/kg）、比功率（功率与质量之比，kW/kg）、单位容量占地面积（能量与占地面积之比，Wh/m<sup>2</sup>）等概念，这在核算项目运输成本、占地空间等方面也具有参考意义。

### 5 电池储能系统的关键设备技术研究

当前主要的储能电池有锂电池、铅酸电池和液流电池，其性能如表 1 所示。

综上，锂电池因功率密度高、寿命长、充放电速度快、效率高等特点已成为最具竞争力的储能电池技术之一，在几 kWh 到百 MWh 储能领域得到了广泛研究与应用，主导地位明显。

本节主要针对锂电池储能系统的关键设备做技术分析。

#### 5.1 电池及电池管理系统

##### 5.1.1 电池

储能锂离子电池电芯，从外观上主要可分为方形硬壳、圆柱形硬壳及软包三种形式；而从内部结构上则由正极、负极、隔膜、电解液、其他（外壳和引出端子等）组成。

每只电芯的容量有限。为了应用于储能系统，以方形硬壳锂电池为例，数只电芯（Cell）通过串、并联组成电池组（Module）；多个电池组再经过串联组成电池簇（Rack）；电池簇通过开关盒（Switch Gear, SG）输出，与相邻电池簇并联，从而最终组成大规模、高电压的锂电池储能系统。

电池组，是储能系统进行集成安装的最小电池单元，内置若干电芯、传感器、均衡电路及电池组 BMS 等；开关盒，是电池簇输出并与其他电池簇并联的开关操作与保护设备，内部器件主要有直流接触器、直流熔断器或断路器、分流器或电流传感器及电池簇 BMS 等。

##### 5.1.2 电池管理系统（BMS）

电池管理系统（Battery Management Systems, BMS）对电芯及电池簇进行有效的监控、保护、能量均衡和故障警报，提高了整个储能电池的工作效率和使用寿命。

基于成本和可扩展性的综合考量，一个完整的储能系

统 BMS 由电池组 BMS、电池簇 BMS 及系统 BMS 组成，这对于由大量电芯串并联组成的大规模储能系统而言，三级 BMS 的设计从最大程度上避免了电芯电压的不均衡及其所导致的过充及过放。

储能电池 BMS 的主要功能包括状态监测与评估、电芯均衡、控制保护、通信及日志记录等。

#### 5.2 储能变流器（PCS）

储能变流器（Power Conversion System, PCS）又称双向储能逆变器，是连接储能电池系统和电网（或负荷）的双向电流可控转换装置。可控制储能电池的充放电过程，在电网和储能系统之间实现交、直流电的转换，在无电网的情况下可直接为交流负荷供电。由直流/交流双向变流器，控制单元，保护和监控等硬软件构成，可实现对电网有功功率和无功功率的调节、电池的保护性充放电、调节输出电压和频率等。与 BMS 相配合，决定了 BESS 对外输出的电能质量和动态特性。

按照电路拓扑与变压器配置方式，PCS 基本类型可分为工频升压型和高压直挂型。

根据级数不同，工频升压型 PCS 又可以分为单级和双级拓扑。对于大容量储能系统中较为常用的锂电池，其输出电压变化范围不大，因此中国现用的大容量储能系统大多采用单级 PCS<sup>[4]</sup>。

为了实现超大规模电池储能电站的应用，避免出现过多电池组的并联，也为了避免工频变压器带来的损耗、降低成本，采用模块化链式结构的高压直挂型 PCS 成为主要的研究方向。与工频升压型 PCS 类似，按照功率变换级数的不同，高压直挂型 PCS 也可分为单级和双级拓扑。高压直挂型 PCS 是解决储能系统超容量带来的安全和效率下降难题的关键解决方案。但对电池组或隔离型 DC/DC 变换器均提出了较高的绝缘要求，制约了其推广与应用，且在超大规模容量的电池集中堆放、电气连接与安全设计方面也存在挑战。

#### 5.3 本地控制及能量管理系统（EMS）

BESS 相关的在线实时控制设备，大致分为两个层级。底层为 BESS 本地控制设备，如本地控制器或储能系统控制器等，主要完成 BESS 内部 PCS、能量存储单元、环境与安全保障设备等底层部件的协同与控制，以使得 BESS 对外呈现为一个统一的可调度、可观测、运行状态自适应、故障状态自恢复的智能化电力单元；顶层为能量管理系统（Energy Management System, EMS），主要依据储能应用场景的经济模型、历史及预测数据、底层设备实时数据、电力电价政策

表 1 电池性能表

储能电池类型	性能			循环次数 / 次	安全性	可回收性
	深度充放电	高倍率充放电	快速响应			
锂离子电池	良好	优秀	优秀	5000~8000	有燃烧爆炸风险	不易回收
铅酸电池	良好	良好	良好	3000~5000	基本无安全风险	不易回收
液流电池	优秀	一般	良好	8000~15000	无燃烧风险，但存在有毒液体泄漏可能	电解液直接回收

等外部信息对 BESS 的运行模式、功率—时间曲线进行优化调度。但 EMS 本身并不 BESS 的一部分，而是一个完全独立于 BESS 之外的控制系统。其控制算法，依据能量系统的复杂性和客户最终对能量供给需求的经济性而不同；其管理对象或管理范围，广义上包括 BESS、新能源发电单元、常规发电机组、输配电设备及用电负荷在内的所有与能量产生、传输、使用、保护等相关的设备或一个相对独立的区域，如微电网、光储电站等。因此，EMS 在网络结构上属于应用层，而其硬件安装位置可以位于 BESS 项目当地，也可以位于云端。

BESS 数据与信息通过网络设备接入 SCADA 系统，实现了储能系统或整个储能电站的数据集中处理、人机交互、监控和数据交换及远端网络接入。SCADA 系统，为 BESS 及其应用系统，如光储系统、微电网系统、火储联合调频系统等提供了内部信息传输、存储、显示及分析基础平台，为 EMS 的决策提供了本地和远程的数据来源，也为 BESS 及应用系统接收远程控制与人工干预提供了接口。

#### 5.4 预制舱

近年来，随着储能应用需求的不断增多，电气、控制等智能化功能不断扩展，对安装平台全寿命周期使用成本与便利性提出了越来越高的要求。固定式建筑物的占地面积大、建设周期长、无法移动、后期扩容不便等缺点逐渐凸显，而以集装箱式为代表的预制舱安装平台则被越来越广泛应用。

装箱式预制舱，改变了 BESS 电气系统布局、土建设计和施工模式，通过工厂生产预制、现场安装两大阶段来完成大型或中小型 BESS 快建设。其标准化设计、模块化组合、工业化生产、集约化施工，在缩短项目的建设周期、减少环境污染的同时，也使得调试过程与后期的维护、扩容获得了极大的便利性。

除集装箱式外，另一种主要的预制舱形式就是户外柜。严格来说，户外柜理论上更加灵活专业化，可以完全按照 BESS 的容量、电气接方式、应用现场与功能等，进行结构强度、防火、耐腐蚀与外观的定制化设计。但集装箱在进行强度、防腐与尺寸等适应性改造后，已经可以从原先单纯的货物容器转变为符合相关规范和标准的电气设备集成平台，并且由于其易获得性与全球物流通用性，在储能项目中，特别是大型储能项目中，依然占据着相当大的比重。从结构防腐、温控管理、消防安全等关键设计内容来看，集装箱式预制舱与户外柜式预制舱，两者具有高度的相通性，可相互借鉴，内部设备安装流程等也基本一致。

#### 5.5 温控系统

温度对 BESS 的性能与安全都有很大的影响。相较于电池室温度控制的严苛需求，对安装 PCS 等设备的电气室处理则相对简易。一般环境温度范围控制在  $-20^{\circ}\text{C}$  ~  $60^{\circ}\text{C}$ ，且可利用岩棉隔板来避免正午太阳光直射。而风道设计，如 PCS，利用其自身排风设备，仅需加装风道将 PCS 出风引至集装箱体外部，并处理好进风口和管路整体风阻、避免回

风及沙尘进入即可。

目前常用的电池热管理方式有三种：以流动液体为介质的液冷、基于相变材料的相变冷却和以流动空气为介质的风冷。目前 BESS 应用最为广泛的为风冷系统，风冷系统结构简单、成本低廉、可靠且易维护；液冷技术具有更高的散热效率和散热速度，基于安全方面的考虑，应用较少，但随着技术日趋成熟，近年来被大力推广；相变技术在 BESS 的应用还需要一段时间的研发和试验。

此外，ESS 安装平台（预制舱等）为 BESS 的各种室内型设备提供符合现场环境等级要求的物理防护与固定空间，配有独立的供电系统、隔热系统、阻燃系统、火灾报警系统、电气连锁系统、机械连锁系统、安全逃生系统、应急系统、消防系统等自动控制和安全保障系统。通过储能电站监控系统，将上述系统状态与储能的运行过程有机结合，保障储能电站安全、优化、高效运行。

## 6 电池储能系统应用

基于目标市场的发展和系统集成的经验积累。可以将 BESS 按照功率等级划分为大功率储能系统（1 MW 以上），主要应用于发电侧或电网侧；中功率储能系统（50~500 kW），主要应用商业；小功率储能系统（50 kW 以下），主要应用于户用。但是，上述功率等级的划分并不完全准确，在具体的项目中存在彼此间功率重叠或覆盖。此外，在其产品集成研发中，依据细分市场需求，考虑容量配置，如功率型、能量型等，将增加储能系统产品的种类，如果再考虑并网、离网和无缝切换等功能性需求，将造成依据项目情况的定制化产品。

## 7 结语

当前，各国按照各自的能源结构转型方向和战略目标，推动了大量的 BESS 工程示范或商业化项目，中国将在“十四五”期间逐步完成 BESS 从商业化初期向规模化发展的转变。因此，面对 BESS 容量不断扩大、应用场景日益增多的趋势，BESS 集成技术水平关系到 BESS 能否在多种应用领域安全、高效、一体化的运行。集成技术已成为电池储能技术发展中的研究热点，处理项目定制需求与标准化产品间的关系，将成为储能系统集成研发与管理重要且长期的内容。

## 参考文献

- [1] 余勇,年珩.电池储能系统集成技术与应用[M].北京:机械工业出版社,2021.
- [2] 吴福保,杨波,叶季蕾.电力系统储能应用技术[M].北京:中国水利水电出版社,2014.
- [3] 唐西胜,齐智平,孔力.电力储能技术及应用[M].北京:机械工业出版社,2019.
- [4] 中国能源研究会储能专委会,中关村储能产业技术联盟.储能产业研究白皮书2021[Z].