

集中式锌溴液流电池储能站的规划设计要点

迟艺娟

湖北省机电研究设计院有限公司, 湖北省武汉市, 430000;

摘要:近年来,我国新型储能行业发展速度加快,推动了锌溴液流电池的发展,技术水平不断提升。锌溴液流电池具有容量大、使用寿命长、能量密度高、绿色环保等优势,在大型储能系统中应用广泛。本文在实际建设投产的项目经验基础上,简要提出集中式锌溴液流电池储能站规划设计的要点,包括电池组合模式、电堆立体布置形式及智能巡查管理三个方面。

关键词: 锌溴液流电池; 储能电站; 高密度; 智能巡查

DOI: 10.69979/3041-0673.26.04.016

1 液流电池发展历程与前景分析

液流电池是一种电化学储能装置,通过电解液中的活性物质进行氧化还原反应来存储和释放能量。早在1970年,液流电池概念首次提出,到1990年,全钒液流电池(VRFB)成为主流。经过近十年的发展到2000年左右,液流电池进入商业化阶段,主要用于大规模储能,如电网调峰和可再生能源集成。目前,随着技术的不断进步,推动了成本下降,应用领域扩展至微电网和电动汽车充电站。

液流电池具有高安全性、长寿命、扩展灵活和相对环保的技术优势。尤其是电解液和电堆分离,大大降低了热失控和爆炸的风险。循环寿命通常超过1万次。能量和功率可以独立调节,适应不同的需求场景。电解液可回收,相对锂电池等,一定程度上减少了对环境的污染。

发展至今,液流电池并未大规模推广使用,主要是技术层面也存在一些挑战。如电解液和膜材料成本较高,且电极和膜材料的性能仍需提升。同时系统比较复杂,相较于其他类型电池,液流电池需要泵、管道等辅助设备,进而增加了系统复杂性。最后就是材料的限制,包括电极和膜材料这些的性能仍需提升。

未来的发展趋势较为明朗,一方面是国家政策支持;另一方面是新材料的开发和系统提升优化,包括简化设计,提高能量密度和效率,并与其他储能技术结合,提升整体性能。

2 锌溴液流电池的特点

在液流电池产品中,锌溴液流电池较为特殊,常以小模块方式出现。电池主要由三部分构成——电极、隔

膜和电解质溶液。锌溴液流电池的正负极电解液均为溴化锌水溶液,正极采用Br-/Br₂电对,负极采用Zn²⁺/Zn电对。

锌溴液流电池的工作电压为1.6V,理论能量密度为419Wh/kg,是铅酸电池理论质量能量密度的1.66倍,实际质量密度可达60Wh/kg,是铅酸电池的2~3倍。锌溴液流电池同全钒液流电池相比,具有开路电压高、能量密度高、成本低等特点,主要优势包括:

- (1) 能量密度高,电解质活性物质成本相对较低。
- (2) 模块化设计,输出功率及储能容量可以独立灵活调控。
- (3) 温度适应能力强(-30~50℃)

但目前来说,锌溴液流电池在产品化和应用方面还未达到成熟,尚存在以下技术难题需要克服:

- (1) 负极金属锌的沉积问题

充电过程中,锌单质会在已沉积的锌金属表面继续沉积。该过程中由于电极材料电阻不均匀、电极边缘效应等因素,会导致锌枝晶的形成。锌枝晶的不断增长可能会穿透电池隔膜,造成电池短路,使得电池报废。另外,锌枝晶形成以后在后续的放电过程中,可能导致部分金属锌脱离电极表面,成为不可再利用的“死锌”,导致电池容量衰减。如何有效地抑制锌枝晶的形成是所有锌基液流电池运行管理控制的重点。

- (2) 单质溴透过隔膜造成的电池自放电问题

单质溴在电解液中的溶解度较高,充电过程中正极的溴单质会透过隔膜与负极活性物质发生反应形成自放电。一般情况下,采用具有高选择性的隔膜材料可以有效降低单质溴的迁移。另外一种方法就是在电池正极电解液中加入溴的络合剂,形成溴络合物,从而降低电

解液中的单质溴的含量，减少溴的迁移。

(3) 电池材料的耐受性

单质溴具有很强的腐蚀性和化学氧化性、较高的挥发性及穿透性，对电池材料耐受性和电堆密封提出很高要求。

锌溴液流电池技术的需求及上述技术难题的存在，一定程度上推动了锌溴液流电池技术的应用和开发。

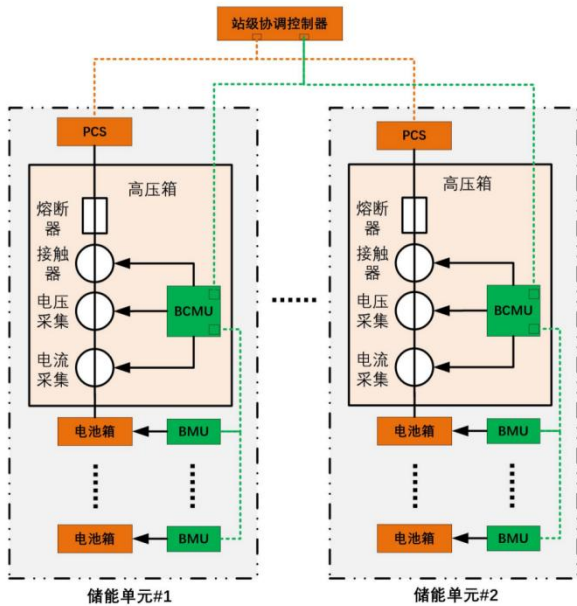
3 集中式锌溴液流电池储能电站规划设计要点

目前国内外锌溴液流电池储能系统的设计主要围绕提高能量效率、延长循环寿命和降低运行成本展开。在集中式电站设计中，需重点考虑电解液配比优化、电极结构改良及隔膜材料的选择，以抑制溴的渗透和提升离子选择性。同时，合理布局电堆模块与储能罐体，保障系统密封性与热管理稳定性，是实现大规模应用的关键。此外，结合智能监控与安全防护系统，可有效应对溴挥发与泄漏风险，提升整体运行安全性。

以山西振兴控股新能有限公司 1000MW/2000MWh 独立储能电站项目为案例，简要分析集中式锌溴液流电池储能电站的规划设计要点，主要包括以下几点：

3.1 高效的电池组合模式

锌溴电池模块由 2 个电堆及配套的电路、液路系统组成。电池模块中所有设备由 BCU 控制器统一控制，电池模块是能够独立工作的最小储能单元。



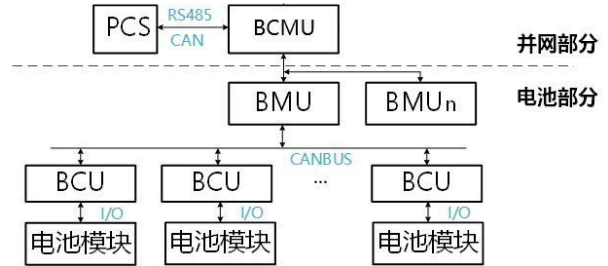
系统架构图

锌溴电池簇由 8 个标准电池模块串联组成，电池端电压进行串联升压，形成 920V 直流端电压；各电池模

块的功率串联汇集，形成 40kW 标准电池簇，由 BMU 统一管理电池簇。锌溴电池储能单元由 25 个标准电池簇并联组成，形成 1000kW 储能阵列，并联接入直流汇流箱。直流汇流箱直流母线电压 920V，配置熔断器、接触器、电流电压采样单元，由 BCMU 统一管理。

锌溴电池储能系统由溴液流电池储能单元(含 BMS 系统、高压接入盒)组成，每个储能单元配置储能变流器(以下简称 PCS)，PCS 储能装置通过电池汇流柜汇流，通过变压器升压后接入目标配电线路。

电池管理系统 BMS 配置——锌溴电池管理系统采用三级管理架构，锌溴电池模块内部 BCU 控制器负责电池模块的数据采集与运行管理(第一层)；电池簇控制单元 BMU(第二层)是电池簇的控制核心，负责电池簇相关的电气控制、通讯控制，以及参数计算；BCMU(第三层)负责管理 PCS 变流器对应的电池储能单元，每台 PCS 变流器都对应有独立的 BCMU 装置。BCMU 装置安装在电池单元高压汇流箱中，一方面负责将锌溴电池储能单元相关信息上传给 EMS；另一方面，将锌溴电池储能单元保护相关信息传递给对应 PCS 变流器。



BMS 系统架构图

锌溴电池管理系统中采集模块与主控模块之间采用数据与保护信号分别传输的方式，提高了系统故障的响应速度，解决了常规数据与保护信号通路传输所造成的保护延迟、响应延迟、故障预警延迟等问题。

BMS 系统具有过充、过放、过温、短路保护功能，实现安全、可靠的电池管理功能，满足储能系统运行的需求。BMS 具备与 PCS 及电站协调控制系统配合的功能，进行电池模块层面和电池簇层面的监控和管理，完成对电压、电流、电池运行温度、SOC 参数的实时监控和计算，并将数据上传至电站协调控制系统，具备电池运行工况的实时监控和紧急情况的报警和保护功能。

储能系统配置一套独立的 EMS 系统。能量管理系统(EMS)，采用了先进的开放分布式应用环境的网络管理技术、面向对象数据库、通信中间件、WEB 技术、

国家标准等为微电网的调度自动化、配电自动化提供支撑平台。通过对能源数据收集、能量管理、网络分析,采用 SCADA/EMS/DMS 技术,对能源系统采取分散控制和集中管理、优化能源调度和平衡指挥系统,实现微电源管理、储能装置的放电管理和负荷管理。

EMS 系统采用分层分级控制方式。包含站控层和就地层。站控层包含中央控制器,EMS 服务器及通信设备。就地层包含就地控制单元和 PCS、电池系统自带的 BMS 电池管理单元。

BMS 电池管理单元并通过 RS485、CAN、Modbus-TCP/IP 等方式与 PCS、就地控制单元建立通信,接受中央控制器等上级管理系统调控,实现同 PCS 联合运行。

中央控制器作为站控层的重要设备,通过与就地控制单元通信,实现对整个储能系统数据信息的采集和指令的上传下达。通过 EMS 系统软件和中央控制器的配合,与就地层的就地控制单元、PCS 的交互,可实现功率跟踪、削峰填谷、计划性充放电、调频调压、电池 SOC 协调管理等功能。

《电化学储能电站设计规范》GB51048-2014 要求大中型储能电站宜采用双机双网双冗余配置。电池管理系统和功率变换系统宜单独组网,并应以储能单元为单位接入站控层网络。因此,本项目站控层采用双机双冗余配置方案,中央控制器,网络交换机等均按照双倍冗余配置。且为提高通信速率,测量通信网络与控制网络分别独立组网,测量通信网络采用 IEC-61850 通信规约,控制网络采用 IEC-61850GOOSE 网络通信,预期达到毫秒级控制速率。

同时,锌溴电池储能系统配置有云端 EMS,可以实现系统的远程监控与调度。云 EMS 平台兼容单个站点和多个站点接入,采用 B/S+C/S 架构,在物理上分为四层:设备层、网络通信层、平台层和应用层。

现场设备层:主要是连接于网络中用于计量、保护、控制、治理的各类传感器,包括充电桩、多功能电表、防逆流装置、电能质量监测、无功补偿装置、微机保护测控装置、弧光保护装置以及第三方的逆变器、光伏逆变器、储能系统柜等。

网络通讯层:包含现场智能网关、网络交换机等设备。智能网关主动采集现场设备层设备的数据,并可进行规约转换,数据存储,并通过网络把数据同时上传至站控层系统和平台。智能网关可在网络故障时将数据存

储在本地,待网络恢复时从中断的位置继续上传数据,保证服务器端数据不丢失。通信网络采用标准以太网及 TCP/IP 通信协议,物理媒介可以为光纤、网线、屏蔽双绞线等。本地站控层系统支持 Modbus RTU、Modbus TCP、CDT、IEC60870-5-101、IEC60870-5-103、IEC60870-5-104、MQTT 等通信规约。

平台层:系统通过数据底座将全部数据按照标准化数据格式动态存储,形成数据实时库和数据历史库,并设定云平台的基本功能权限,如权限管理、同步管理、推送通知管理、数据模型管理、文件管理、任务管理等多种功能模块。

应用层:应用层承载着用户的具体业务应用。平台可以本地、私有云和公有云部署,包含应用服务器、WEB 服务器和数据服务器设置。平台提供 WEB 和 APP 两种访问方式,功能包括变电站综合自动化系统、分布式光伏、风电、储能、充电桩、电力监控、电能管理、电气安全、电能质量、能耗分析、设备管理、运维管理、用户报告等,主要实现远程集中监视和控制、能效分析、能耗及收益等数据统计、策略下发等,对外辅助用户参与需求响应和电力市场交易。同时,制定并自动执行计划曲线、削峰填谷、需量控制、新能源消纳、有序充电、动态扩容、备用电源等控制策略,对内实现源、网、荷、储一体化智慧协同。

3.2 采用密集架立体布置方式

目前国内已建设的液流电池储能项目多采用电池组平铺布置,占地面积较大。为提高建筑利用率,创新采用高架密集电堆的布置形式,因为每个电堆都是一个成熟的电池单体,带有液流泵,所以不用考虑布置太高导致泵的扬程效率问题,将单个 5kW 电堆,放置在高架托盘上。单层储能车间内,高架仓位中一个水平仓位,垂直布置方式为地面往上 3 米为 PCS 及 BMS 仓,PCS 仓位垂直方向向上堆砌 12 个电堆单元,电堆的布置避免跨越建筑变形缝,8 个电堆单元串联为一个电池簇,25 个簇并联形成一个 1000kW 储能矩阵,通过下方 PCS 仓形成一个储能单元。4 组 PCS 再通过汇流柜将储能单元并联组网。高层储能车间内的布置方案是当高架位垂直方向大于等于 3 层时参考单层车间的布置形式,当小于 3 层时,采用水平布置,电堆组网形式同单层厂房。

(1) 密集堆方案思路

通过钢结构框架体系搭建定制尺寸的高架电堆平台,每两行高架间设置自动堆垛巡检机器人,将仓位编码后,机器人自动将单个电堆运送到指定仓位,平时电站运营时,机器人24小时在车间内进行自动巡检,配合电堆单元自带的各类传感器工作,发现故障,坐标发送给机器人,机器人及时过去自主断电,拔出故障电堆,避免发生事故。同时在每行高架仓位背后也设置人工检修马道,垂直方向上每间隔3米设置一层马道,便于人工维护。

(2) PACK 包模式管理系统

采用 PACK 包模式,将电堆进行集成管理,一期 200MW/400MWh 锌溴电池储能系统由 200 套 1MW 锌溴液流电池储能单元(含 BMS 系统、高压接入盒)组成,每个储能单元配置一台 1MW 的储能变流器(以下简称 PCS),4 个 PCS 储能装置通过电池汇流柜汇流,通过一台 4200kVA 的变压器升压到 35kV,接入 35kV 配电线路。

(3) 快插模块助力自动化

通过与厂商优化电堆单元,将产品电源接口、通讯接口、水冷等接口集成为快插形式,减少线束,同时实现让机器人自己安装和拆卸,提高运维效率。

3.3 智能巡查管理模式

大容量锌溴液流储能电站,在国内外的工程实践不多,密集电堆方案的技术风险可能存在电堆支架结构安全,漏液,溴腐蚀,锌枝晶,析氢等风险。针对这些风险,电站采用智能巡查管理模式,通过部署传感器网络实时监测电堆状态、冷却系统运行及环境参数,结合 AI 算法实现故障早期预警与诊断。同时配置巡检机器人定期对电堆单元进行视觉识别与温湿度、气体浓度检测,及时发现漏液、腐蚀等异常情况,提升系统安全性和运维智能化水平,有效降低人工巡检强度与响应时间。主要措施包括以下几点:

(1) 针对电堆故障漏液风险,每个电堆均设置有接液托盘,安装泄漏检测传感器,检测到电解液泄漏时会有相应的报警并执行停泵和其他相应保护动作。

(2) 针对溴腐蚀风险,在设计时,对储能车间进行溴浓度监测传感器,投产前以及运营过程中对电池系

统按规范进行试验,溴离子时间加权平均允许浓度(PC-TWA)应小于 0.6mg/m³。

(3) 针对锌枝晶问题,目前考虑采用两种方案来解决,一是优化电解液配方,在电解液中添加枝晶体抑制剂;二是在电池运行控制策略上进行优化,即在电池充放电一定次数之后,通过智能控制系统让电池自动进行一个内部维护,把产生的锌枝晶溶解掉,一般 7~8 个充放电循环就要做一次维护,这样就能最大程度上避免锌枝晶产生。

(4) 针对析氢问题,计划在电解液中加入含有乙酸根的添加剂,降低运行过程中的析氢量,稳定电解液 pH,提升电池循环稳定性。同时,通过精确的电解液管理和电堆操作条件控制来实现,以减少副反应的发生。在储能电池车间设计时做好通风处理设施,设置氢气浓度传感器,在电站日常运营过程中,电池系统定期进行试验,氢气浓度应小于一级报警(高限)设定值(小于或等于 25%LEL)。

4 结语

液流电池在大规模储能领域具有广阔前景,尽管面临成本和技术挑战,但随着技术进步和政策支持,未来有望在能源存储中发挥更大作用。包括电网储能中用于调峰填谷和频率调节;通过可再生能源集成来解决风能和太阳能发电的间歇性问题;在工业储能中用于备用电源和负载平衡;以及快速充电服务等。本文总结归纳三个集中式锌溴液流电池储能电站的设计要点,包括首次创新使用的密集架立体布置方式,以及最新的智能化巡查管理系统,都将助力液流电池储能电站的长远发展。

参考文献

- [1] 王波. 全国单体容量最大共享储能电站并网发电[J]. 能源研究与信息, 2024(3).
- [2] 陈立泉. 混合电动车及其电池[J]. 电池, 2004(63).
- [3] 刘开绪. 等锂离子电池组能量均衡控制[J]. 长春工业大学学报, 2010(4).

作者简介: 迟艺娟(1984.08.23-), 女, 汉族, 籍贯: 山东蓬莱, 学历: 大学本科, 职称: 高级工程师, 研究方向: 总图规划。