文章编号：1007 - 4252(2022) 02 - 0002 - 137　　DOI：10.20027/j.gncq.2022.0024

变电站用锂电池替代铅酸电池可行性分析

张仲懿[1]，柯　强[2]，胡经伟[2]，李建坤[2]，李首顶[3]，程　琦[4,*]
(1. 中汽研汽车检验中心(武汉) 有限公司，武汉 430000; 2. 国网湖北省电力有限公司黄冈供电公司，黄冈 438000; 3. 广东瑞科美电源技术有限公司，佛山 528000; 4. 华中科技大学，武汉 430000)

摘要： 变电站直流系统中的电池组为整个直流电源系统设备网络提供电源，电池的安全性决定了变电站的安全，常配置铅酸电池，但其电压波动大、容量衰减快、低温性能差、酸污染对环境有害。本文对铅酸电池和磷酸铁锂电池进行了研究，从循环性能、能量密度、温度性能、安全性能、经济全方位做了综合比较，系统性分析了磷酸铁锂电池替代铅酸电池的可能性，从而为选择最适合变电站使用的电源系统提供了理论指导。

关键词： 变电站; 铅酸电池; 锂离子电池; 磷酸铁锂; 安全
中图分类号： TM912　　**文献标志码：** A

Application analysis of lithium ion battery in substation

ZHANG Zhong-yi[1], KE Qiang[2], HU Jing-wei[2], LI Jian-kun[2], Li Shou-ding[3], CHENG Qi[4,*]
(1. China Automotive Research Center Co., Ltd, Wuhan 430000, China; 2. State Grid Huanggang Electric Power Supply Company, Huanggang 438000, China; 3. Guangdong Rikomay Power Technology Co., Ltd, Foshan 528000, China; 4. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430000, China)

Abstract: The battery in the substation can provide energy for the power supply system, the safety of the battery is very important. Lead-acid batteries are commonly used, but its voltage is instability, capacity decays very quickly, low temperature performance is poor. This paper compared lead-acid battery with lithium ion battery, analyzed their cycle performance, energy density, temperature performance, safety performance and economy, offered a proposal of replacing lead-acid battery with lithium ion battery, provided a theoretical guidance for selecting the most suitable power supply system for substation.

Key words: Substation; Lead-acid battery; Lithium ion battery; Lithium iron phosphate; Safety

收稿日期： 2021-12-20;　　**修订日期：** 2022-03-15
基金项目： 高安全的移动式台区储能设备研究 (5215E021006P) .
作者简介： 张仲懿(1994-) ，男，硕士，助理工程师，主要研究方向为锂电池动力系统产品可靠性 (E-mail: zhangzhongyi@ catarc.ac.cn) .
通信作者： 程　琦(1989-) ，男，研发总监，主要研究方向为锂离子电池回收 (E-mail: 964716664@ qq.com) .

0 引言

直流电源系统作为变电站重要的能源设备，一般用在交流系统出现紧急切换电源后，为变电站的控制系统、自动系统、高压断路器和事故照明等提供电力保障，保证变电站运行平稳，变电站目前采用的是阀控式铅酸蓄电池。变电站铅酸电池室如图 1 所示。

变电站常期处于无人值守且封闭状态，空气对流差，室内温度为 0～45 ℃，电池运行条件比较恶劣，常会在过热和过冷的环境中运行[1]。温度变化会造成电池的性能变化。随着智能化变电站加快发展，常规铅酸电池面临着巨大挑战。铅酸电池热稳定性、循环稳定性和后期维护制约着变电站现代化的进程，智能电网变电站对直流电源运行的可靠性提出了更高的要求。

随着电池技术的不断发展，磷酸铁锂电池已经在技术上和经济性上超越了铅酸电池，完全可适应变电站智能化的要求。磷酸铁锂电池相较于铅酸电池质量轻、体积小、容量大，这些优点使其在变电站系统的应用完全可行[2]。

图 1 变电站铅酸电池室

Fig. 1 Lead-acid battery chamber in Substation

1 铅酸电池的失效机理

铅酸电池的失效是指铅酸电池循环性能大幅度降低。氧化腐蚀、正极活性物质脱落、硫酸盐化、短路和失水等都可导致铅酸电池的失效。这些失效模式又是相互交叉，相互促进的，它们共同造成了性能的衰减。图 2 展示了三种主要失效影响因素。

(1) 活性物质脱落：铅酸电池正极是 PbO_2，PbO_2 放电以后形成 $PbSO_4$，充电时 $PbSO_4$ 还原为 PbO_2，强酸环境中 $PbSO_4$ 只能生成 $\beta-PbO_2$，活性物质 $\alpha-PbO_2$ 脱落，多次充放循环后，活性物质逐渐脱落[3]。

(2) 硫酸盐化：铅酸电池过放，$\beta-PbO_2$ 会大量减少，$\alpha-PbO_2$ 就会放电反应生成 $PbSO_4$，铅酸电池极板活性物质不均匀，过放电，负极就会形成一种硫酸铅，硫酸铅不能充放电。同时，由于体积膨胀，极板软化，造成容量衰减。

(3) 电解液流失：电解液参加化学反应，也是影响容量的重要因素。电解液流失将会导致内阻增大、壳体受损、电解液渗出、接缝处漏液、温度升高[4]。

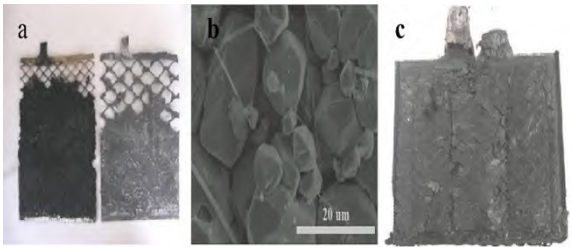

图 2 (a) 活性物质脱落；(b) 硫酸盐化；(c) 电解液干涸[3]

Fig. 2(a) Shedding of active material; (b) Sulfate; (c) Drying of electrolyte[3]

2 变电站用铅酸电池现状

变电站蓄电池使用环境差，偏远机房供电可靠性更低，频繁停电引起频繁充放电。当蓄电池放电到很低电压时，会导致电池内部有大量硫酸铅被吸附到电极表面，它会对电池电性能产生不利影响。如果充电不足，欠充又会使负极板不可逆的发生硫酸盐化，容量难以恢复。造成绝大部分机房电池组达不到 8～10 年的设计使用寿命。主要原因如下：

(1) 环境

夏季温度高，未安装空调的机房易造成电池温度条件差。温度对机房电池的使用寿命和容量影响大。温度过高会导致失水加剧，正极板腐蚀加剧，极板膨胀，电池外壳鼓胀，电池容量下降。从表 1 中数据统计表明当环境温度超过 15 ℃，每升高 5 ℃，电池寿命会减少 5 年。阀控式密封铅酸电池必须避免在高温下使用，同时采取降温措施以延长寿命[5-6]。

表 1 温度与铅酸电池寿命关系

Table1 Relationship between temperature andlead acid battery

温度(浮充: 2.25 V)	15℃	20 ℃	25 ℃	30 ℃
容量/%	93	97	100	104
寿命/年	20	15	10.6	7.6

(2) 浮充电压对电池失效的影响

浮充电压过高会导致热失控。浮充条件下，铅酸电池处在放热状态，浮充电压过高就会发生电池发热量增加的恶性循环。同时浮充电压高，电极反应速度快，造成各单体之间的差异扩大，电池组加速失效。浮充电压过低，电池充电不足，会加剧极板硫酸盐化，无法逆转化为铅和二氧化铅活性物质[7]。

(3) 单体不一致性

电池单体的不一致性会使得电池在浮充电压、开路电压上表现出相应的差异。当蓄电池处于充电状态时，容量较小的单体会析气，电压升高，温度升高，电解水反应加快; 容量较大的电池，充电电压上升较慢，容易产生充电不足。当蓄电池放电时，一旦放电深度较大，容量较小的电池会过度放电，电池容量进一步下降。因此，电池组的单体电压均衡性较差时，容易产生恶性循环[8]。

3　锂电池与铅酸电池比较

铅酸电池负极为 Pb，正极为 PbO_2，电解液是稀 H_2SO_4。磷酸铁锂电池是以磷酸铁锂作为电池的正极，石墨为负极[9]，如图 3 所示。其反应式为:

正极反应: $LiFePO_4 \Leftrightarrow Li_{1-x}FePO_4 + xLi^+ + xe^-$;

负极反应: $xLi^+ + xe^- + 6C \Leftrightarrow LixC_6$;

总反应式: $LiFePO_4 + 6xC \Leftrightarrow Li_{1-x}FePO_4 + LixC_6$

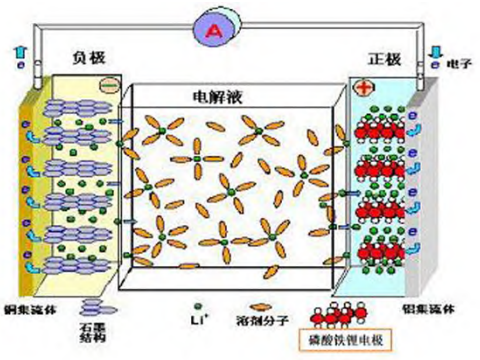

图 3　磷酸铁锂充放电原理[9]

Fig. 3　Charging and discharging principle of lithium ionbattery[9]

磷酸铁锂电池充放电原理是 Li^+ 在正负极之间脱嵌。与铅酸电池相比，磷酸铁锂电池额定电压高、温度特性好，被视为铅酸电池的最佳替代品。

变电站用铅酸电池过压、欠压充电对电池的寿命和容量影响大，容易造成电池组提前报废，一旦保养跟不上，在变电站停电情况下，会给电网运行带来较大隐患。磷酸铁锂电池具有超长寿命、使用安全、无记忆效应、体积小、重量轻等特点，相较于阀控式密封铅酸电池，磷酸铁锂具有无可比拟的优越性，开展变电站直流电源磷酸铁锂电池应用研究意义重大[10]。

3.1　循环寿命

磷酸铁锂电池循环寿命可以达到 2 500 圈，远超过铅酸电池寿命，同时充电时间也只有铅酸电池的一半[11]。

3.2　能量密度

锂电池组的体积能量密度通常是铅酸电池的 1.5 倍左右，所以在相同容量的情况下，锂电池比铅酸电池体积要小 30% 左右。目前的磷酸铁锂能量密度可以达到 160 Wh/kg，普通铅酸电池一般在 40 Wh/kg，磷酸铁锂能量密度是铅酸电池的 4 倍。所以在储能装置轻量化上，磷酸铁锂电池占绝对优势。

3.3　温度性能

磷酸铁锂的低温性能相较于铅酸电池也有优势，如表 2，−20 ℃ 的放电容量是常温容量的 45%，−10 ℃ 放电容量是常温容量的 65%，低温性能明显优于阀控式密封铅酸电池[13]。

表 2　锂电池与铅酸电池在不同温度下的放电性能比较

Table 2 Comparison of discharge performance between lithium ion battery and lead-acid battery at different temperatures

温度/℃	锂电池放电容量/%	盐酸电池放电容量/%
50	103.1	79
20	98.8	68
10	91.8	62
0	86.5	58
−10	65	50
−20	45	40

3.4　安全性能

磷酸铁锂电池正极材料的分解温度在 700 ℃ 左

右,磷酸铁锂电池针刺试验基本不发生着火情况,图4针刺实验也验证了这个结论。铅酸电池的电极主要由铅及其氧化物制成,电解液为硫酸溶液,如果发生漏液或者爆炸,所造成的危害相较于磷酸铁锂电池而言会高很多[14]。

铅酸电池在使用中,要经常进行维护保养,对于环境要求较高。如果在使用的过程中出现了差错就会导致一系列的问题。而锂电池有着众多的保护设计[15]。

总的来说,磷酸铁锂电池相较于铅酸电池安全性要高很多,所以目前市场上,铅酸电池的应用份额正在逐步被锂电池所取代。

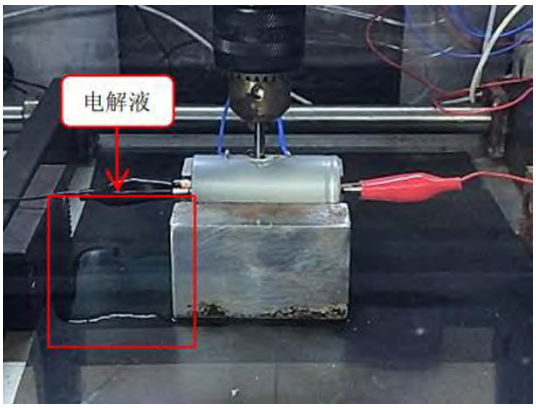

图4 磷酸铁锂的安全性能测试[16]

Fig.4 Safety test of lithium ion battery[16]

3.5 经济性能

虽然磷酸铁锂电池成本比铅酸电池成本高,但是对于小型储能系统,磷酸铁锂电池比铅酸电池更有竞争力,而且随着生产工艺改进,必定有一定成本下降空间,磷酸铁锂电池可能将是变电站储能方式最理想的解决方案。

3.6 国家政策

铅酸电池的生产环节和废弃的铅酸电池对环境危害很大,从国家政策层面看,已经在限制铅酸电池市场规模的扩大,锂离子电池替代性趋势明显。另外磷酸铁锂电池无毒绿色,铅酸电池中却有大量的铅,会对环境造成二次污染[17-19]。

磷酸铁锂电池是铅酸电池作为变电站直流电源的趋势性替代品。预计随着磷酸铁锂电池生产技术的改进,会成为未来电力系统直流电源的主流。

4 展望

本文针对目前变电站直流系统中铅酸电池存在的问题,和磷酸铁锂电池做了比较,列举了变电站应急电源更新换代趋势的可能性。随着电力行业不断发展,磷酸铁锂电池在作为变电站应急电源上的便携性、安全稳定性等特点,更有助于推动整个变电站用电源行业的发展。当然尽管磷酸铁锂电池有很多优点,但是应用于变电站后备电源还是有很多细节问题有待研究,从而为磷酸铁锂电池在变电站的应用推广上提供技术支持。

参考文献:

[1] 李 瑾,张 宇,李景霖,等. 磷酸铁锂电池在变电站系统应用的可行性分析[J]. 华东电力,2019,37(10):1693-1697.

[2] 陈 冬,谭建国,王 丽. 变电站蓄电池失效分析及对策措施[J]. 供用电,2016,33(3):10-14.

[3] 李相俊,王上行,惠 东. 电池储能系统运行控制与应用方法综述及展望[J]. 电网技术,2017,41(10):3315-3325.

[4] 於崇干,等. 浮充式保护型磷酸铁锂电池直流电源系统[M]. 北京:中国电力出版社,2016.

[5] 杨 铭,闻 铖,严玲玲,等. 锂电池健康状态评估在变电站直流系统应用研究[J]. 科学技术创新,2020,7(3):9-10.

[6] 魏增福,苏 伟,钟国彬. 磷酸铁锂电池组在110 kV变电站直流系统的应用[J]. 储能科学与技术,2016,5(2):241-245.

[7] 李网锁,胡如月,阚建飞,等. 锂电池组在变电站蓄电池组核对性放电中的应用[J]. 南京工程学院学报,2019,17(1):75-79.

[8] 钟国彬,周方方,魏增福,等. 磷酸铁锂电池作为变电站用直流电源的特性[J]. 广东电力,2015,28(4):57-61.

[9] 梅成林,赵 伟. 磷酸铁锂电池在变电站的应用安全性分析及其系统设计[J]. 电气技术,2019,20(6):70-73.

[10] 姜星星,李 娜. 变电站直流系统存在问题及解决措施[J]. 大科技,2017,6(5):83.

[11] 李 刚. 变电站直流系统运行维护问题分析[J]. 山东工业技术,2017,5(20):172.

[12] 聂小勇,蒋 兴,陈波波,等. 并联磷酸铁锂电池在110kV变电站的应用研究[J]. 电源技术,2016,40(5):979-981.

[13] 高红亮,陶文伟,刘东超. 基于组网的智能变电站采样

同步问题探讨 [J]. 计算技术与自动化，2017，36(4)：54-59.
[14] 杨艺云，林小峰. 基于磷酸铁锂电池储能的应急电源集成应用研究 [J]. 广西电力，2017，40(6)：60-64.
[15] 谢欢欢，王　炼，纪哲夫. 浅谈铅酸蓄电池修复液修复法的效果 [J]. 通信电源技术，2017，34(3)：156-158.
[16] 李　宇，杜建华，杨世治，等. 圆柱型磷酸铁锂电池针刺热失控实验研究 [J]. 储能科学与技术，2019，8(3)：559-566.
[17] 侯曙光，张海东. 铅酸蓄电池在线监测增强供电系统可用性 [J]. UPS 应用，2017，8(10)：35-39.
[18] 苗俊杰. 智能型铅酸蓄电池及其监测系统的经济效益分析 [J]. 电源技术，2016，40(7)：1390-1392.
[19] 刘　畅，徐玉杰，张　静. 储能经济性研究进展 [J]. 储能科学与技术，2017，6(5)：1084-1093.