

磷酸铁锂电池在电力系统中的应用研究

唐偲, 鲁丽娟

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 磷酸铁锂电池拥有诸多优越的特性, 特别是在高功率或大容量电池中具有良好的充放电特性及热稳定性, 引起各行各业的广泛关注。通过对磷酸铁锂电池在电力系统中的应用, 结合其工作原理与技术特性, 分析了磷酸铁锂电池在未来的应用前景, 提出了磷酸铁锂电池在电力系统中应用的工作建议。

关键词: 磷酸铁锂电池; 变电站; 直流电源; 储能电站

中图分类号: TTM611

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)S1-0039-04

Study on the Application of Lithium Battery in Power Grid System

TANG Si, LU Lijuan

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: Lithium battery has many excellent features, especially in high-power or high-capacity battery has a good charge-discharge characteristics and thermal stability, causing widespread concern in all walks of life. In this paper, the application of lithium iron phosphate in power system, combined with its working principle and technical characteristics, analysis of lithium battery in the future application prospects, put forward the work of lithium power system in the work of the proposed recommendations.

Key words: lithium iron phosphate battery; substation; DC power supply; energy storage power station

随着磷酸铁锂电池性能的提升, 价格的下降, 其应用范围越来越广, 除了用于储能电站、电动汽车外, 磷酸铁锂电池在其它领域也得到了广泛的应用。目前用于电力系统的铅酸蓄电池维护工作量大, 对环境温度要求高, 寿命达不到预期, 使得磷酸铁锂电池应用于电力系统的研究越来越多^[1-5]。

1 磷酸铁锂电池技术特点

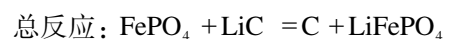
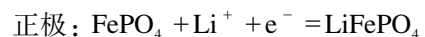
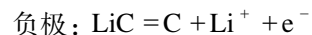
1.1 磷酸铁锂电池的工作原理

电池基本都由五大部件组成: 正极、负极、隔膜(铅酸电池称为隔板或隔栅)、电解液和外壳, 其中正负极由参加电化学反应的活性物质和导电粘结等材料组成, 是电池的核心部分。蓄电池的不同分

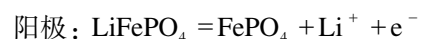
类主要是因为正负极所用材料、电动势不同所致, 但所有蓄电池的工作原理基本相同: 当蓄电池放电时, 电子经由负极通过外电路流入正极, 电池内部正负离子在电解液中分别向两极作定向移动形成电流, 两个电极上同时发生化学反应, 负极失去电子发生氧化反应, 正极得到电子发生还原反应, 电池化学能转化为电能供用电设备使用; 当蓄电池充电时, 电极上发生放电反应的逆反应, 电极活性物质获得再生, 将电能以化学能的形式重新贮存起来。

磷酸铁锂电池负极主要材料为炭(C), 正极主要材料为磷酸亚铁锂(LiFePO₄), 电极浸润在电解液六氟磷酸锂(LiPF₆)盐的有机溶剂中。

放电时极反应为:



充电时电极反应为:



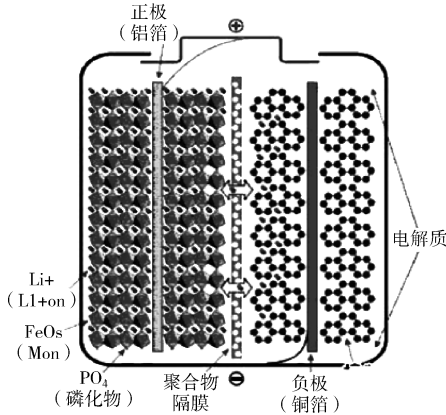
收稿日期: 2016-11-10

基金项目: 中国能建广东院科技项目“柔性直流输电控制与保护设备技术要求”(ER03391W)

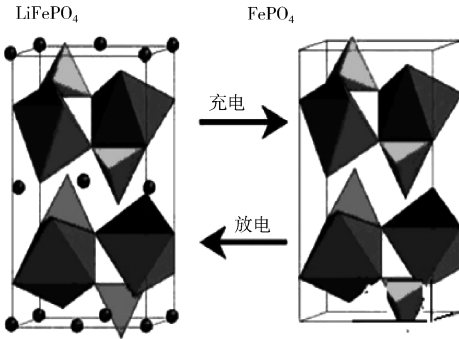
作者简介: 唐偲(1985), 男, 湖南怀化人, 工程师, 硕士, 主要从事变电站设计, 电力市场开发工作(e-mail)Tangsi@gedi.com.cn。

总反应： $C + LiFePO_4 = FePO_4 + LiC$

简单讲，磷酸铁锂电池充放电原理就是锂离子在正负极之间的迁出和嵌入。原理如图1所示。



(a) 磷酸铁锂电池物理原理图



(b) 磷酸铁锂电池化学原理图

图1 磷酸铁锂电池的工作原理

Fig. 1 The principle of lithium battery works

1.2 磷酸铁锂电池的技术特性

磷酸铁锂电池相关技术特点，具体如下：

1.2.1 单体电池技术参数

目前单体最大容量可达到 500 Ah 左右，但成规模化生产的单体 400 Ah。标称电压 3.2 V，放电终止电压 2.5 V，能量密度(体积)为 190 kWh/m³，能量密度(重量)为 90 kWh/kg，单体重量约为 13.6 kg。充放电效率 97%，电池内阻小，自放电小。

1.2.2 充放电特性

磷酸铁锂电池在充电初期为恒流充电，当电池电压达到稳定值时，进行恒压充电；磷酸铁锂电池放电曲线较平稳，在大部分放电时间内能保持稳定的电压，能够支持高倍率放电。

1.2.3 循环寿命

根据厂家的调研资料，550 mAh 小容量磷酸铁锂电池实测数据，1 C 充电，4 C 放电，100% DOD

(循环深度)，充放电循环 5 350 次后，剩余容量为初始容量的 87.2%，循环寿命较铅酸电池更长，如图 2 所示。

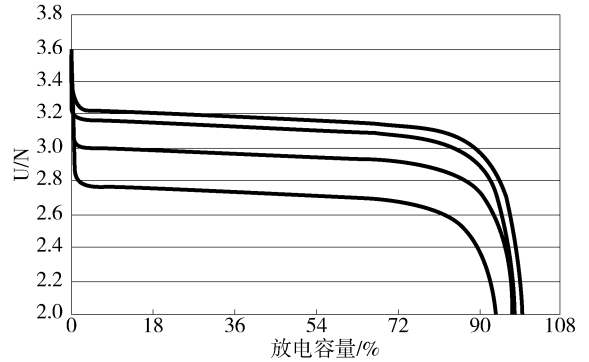


图2 磷酸铁锂电池倍率放电倍率曲线

Fig. 2 The rate of discharge of lithium battery

1.2.4 绿色环保

制造磷酸铁锂电池的材料为无毒材料，与常规电池比具有良好的环保性能。并可提取废弃电池中有效成份进行重复利用，降低资源消耗，减少环境污染。

2 磷酸铁锂电池在电力系统中的应用

目前磷酸铁锂电池主要作为储能元件应用于电力系统中，按使用功能分类，主要包括：变电站直流电源、新能源接入、系统调节等。

2.1 磷酸铁锂电池在变电站直流电源中的应用

2.1.1 蓄电池容量的选择

磷酸铁锂电池的应用仍处于起步阶段，但是由于积累的运行数据有限，根据目前调研获取的资料，若磷酸铁锂电池应用于变电站直流电源中存在电池容量选择困难的问题。论文[1]叙述了 110kV 变电站磷酸铁锂电池容量的选择，该文在计算时借用了铅酸电池的数据，实验证明，磷酸铁锂电池在相同放电时间下，其容量系数高于铅酸蓄电池。

磷酸铁锂电池与铅酸电池恒流放电的数据比较，如表 1 所示。

表1 某磷酸铁锂电池以及铅酸电池恒流放电的数据比较
Tab. 1 Lithium battery and lead-acid battery constant current discharge data comparison

时间/min	15	20	30	60
磷酸铁锂电池(终止电压 2.5 V)/A	370	280	190	100
铅酸电池(终止电压 1.65V)/A	175	140	100	6

2.1.2 直流系统的拓扑结构

受当前电池制造水平的限制, 磷酸铁锂电池的单体容量最大仅为 500 Ah, 达到一定产能的最大单体电池容量为 400 Ah, 而 500 kV、220 kV、110 kV 变电站按设计规程单个电池模块容量大致为 800 Ah、500 Ah、300 Ah。因此, 将磷酸铁锂电池应用于变电站直流电源存在以下几个方面的问题:

1) 若采用磷酸铁锂电池直接替代铅酸蓄电池, 而维持传统蓄电池串联接入高频开关电源方式, 受单体容量的限制, 只能应用于 110 kV 及以下的变电站, 如图 3 所示。

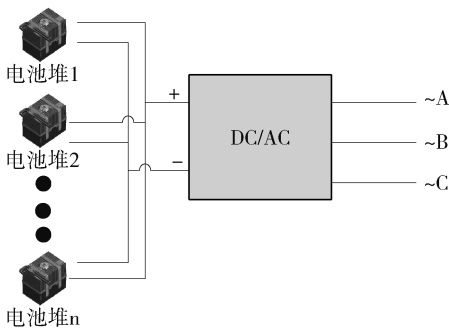


图 3 DC/AC 单极式结构

Fig. 3 DC/AC single-stage structure

2) 若应用于 220 kV 及 500 kV 变电站, 由于单体容量达不到要求, 需对拓扑结构进行优化。所以相比传统的铅酸蓄电池串联方式, 磷酸铁锂电池要应用到 220 kV、500 kV 变电站的直流电源中, 需要采用串并联组合的拓扑结构。

若采用直接串并联拓扑结构如图 4 所示, 电池组并联后, 由于各电池堆电压的差异, 会产生电池环流:

$$I_c = \Delta V / (r_1 + r_2 + \dots + r_j) \quad (1)$$

式中: I_c 为电池环流; ΔV 为磷酸铁锂电池组间的电压差; r_j 为磷酸铁锂电池的内阻。

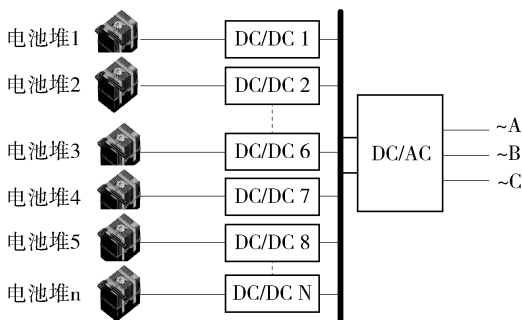


图 4 多组输入的 DC/DC + DC/AC 结构

Fig. 4 Multiple input DC / DC + DC / AC structure

在这种情况下, 挑选一致性较好的电池, 并合理设计电池串并联组合成为需要讨论的问题。若电池一致性较差, 性能不一的电池堆串并联在一起, 则会影响电池的使用寿命, 对电池的健康产生不利的影响。

为了有效抑制电池环流的产生, 可在磷酸铁锂电池组中加入 DC/DC 模块, 分别调整各电池堆的输出, 并起到电池堆与电池堆之间隔离的作用。但如何设计更加高效的直流系统拓扑结构, 成为在磷酸铁锂电池应用于变电站直流系统的道路上亟待解决的问题之一。

2.2 磷酸铁锂电池在电力系统中的储能应用

2.2.1 储能电站在电力系统中的优势

目前, 在电网中承担调峰任务的主要有煤电、水电、水电(具有调节性能的水电)及抽水蓄能电站。在这些能源中, 煤电和水电, 属于火电范畴。由于火电厂造价昂贵, 运行费用高, 起停时间长, 无法担起调峰的任务。从运行的经济性和安全性考虑, 电厂不宜用作调峰电厂。水电调峰能力较强, 但可供使用的资源有限。LNG(液化天然气)电厂造价低, 工期短, 但运行费用高, 起停时间较长, 从经济性和系统响应速度考虑, LNG 电厂的发展也将受到限制。而作为电网主力调峰电源之一的抽水蓄能电站, 因占地面积大, 工期长, 且受地理条件影响, 其发展也受到一定程度的限制。

相比较而言, 电池储能电站作为一项新兴技术, 具有工期短、起停快、占地面积小、安全性高、运行费用低和无污染等优势, 并对建设场所无特殊要求, 具有广阔的应用前景。作为可调控的电源或负荷, 可调节系统的运行状态, 提高用提高电网运行经济性和安全性, 例如用于日负荷曲线调节、系统调频、旋转备用、潮流控制、电能质量调节、低频振荡控制、暂态稳定控制、无功支撑、电压稳定控制等。

2.2.2 磷酸铁锂电池在储能电站中的应用

南网兆瓦级电池储能站试点工程位于深圳龙岗区, 本工程设计规模 10 MW, 分两期建设, 第一期 4 MW, 其中 3 MW 为比亚迪的磷酸铁锂电池, 单体 3.2 V, 200 Ah, 256 节电池组成 1 电池堆, 16 个储能电池堆组成 1 个 500 kW 的储能分系统, 另外 1 M 采用中航锂电磷酸铁锂电池, 单体 3.2 V, 180 Ah, 216 节电池组成 1 电池堆, 12 个电池

堆组成1个500 kW储能分系统。储能系统通过2回10 kV出线接入110 kV站。电池储能站系统原理图如图5所示。

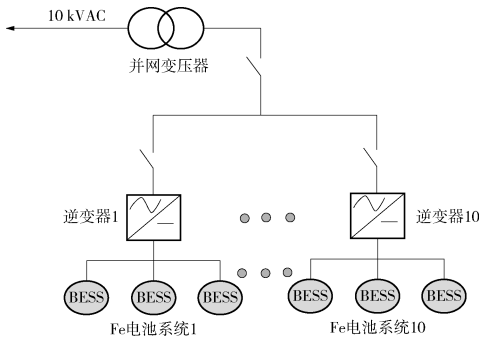


图5 电池储能电站系统原理框图

Fig. 5 Block diagram of battery energy storage system

整个系统经过：降压——电池储能——逆变——升压——并网，实现了能量的存储和转移。电池储能系统的工作模式通过控制系统调节系统的工作状态，其功能如下：

- 1) 削峰填谷。
- 2) 无功支撑(AVC)。
- 3) 有功调节(AGC)。
- 4) 孤岛运行。
- 5) 阻尼控制。

3 结论

本文对磷酸铁锂电池在电力系统中的应用进行了介绍，磷酸铁锂电池技术是于快速发展时期的前沿科技，随着磷酸铁锂蓄电池关键技术的解决，未来电力系统直流电源采用磷酸铁锂蓄电池有望成为主流选型设备。但磷酸电池仍有需要提升和改善的环节，例如电池的循环寿命、电池的一致性、电池管理系统的精度和稳定性问题等。

1) 提高磷酸铁锂电池尤其是单体容量较大的磷酸铁锂电池制造工艺及生产技术水平，提高电池的一致性。

2) 研究磷酸铁锂电池在不同环境温度、运行工况、充放电电流下的特性，尽快积累足够的数

据，对电池充放电特性进行分析及总结。

3) 根据电池专家介绍，单体电池寿命约2 000次，而成组电池的寿命可能只有单体电池的600~800次，在恶劣工况下，寿命可能更短。因此，应开展直流系统拓扑、充放电均衡支路、BMS优化设计等研究工作，通过外部回路提高直流系统的使用寿命。

4) 开展电池成组方式及电池冗余容量配置比例的研究，以便最大限度的提高电池的能量转换效率。

5) 组织编制、补充相应标准及规范指导磷酸铁锂电池应用于电力系统中。

参考文献：

- [1] 王洪, 林雄武, 李丽, 等. 基于磷酸铁锂电池的110 kV变电站直流系统中的电池容量选择[J]. 电源学报, 2011, 37(5): 79-82.
WANG H, LIN X W, LI L, et al. Characteristics of battery capacity selection in 110 kV substation DC system based on lithium iron phosphate [J]. 2011, 37(5): 79-82.
- [2] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 1-7.
CHEN S Y, SONG S F, LI L X, et al. Overview of smart grid technology [J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 1-7.
- [3] 徐海明, 王全胜. 变电站直流电源设备使用与维护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
XU H M, Wang Q S. Application and maintenance of DC power supply in substation [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.
- [4] PADHI A K, NANJUNDASWAMY K S, GOODENOUGH J B. Phospho-olivine as positive electrode materials for rechargeable lithium batteries [J]. J. Electrochem. Soc., 1997(144): 1188-1194.
- [5] 电力规划设计总院. 电力工程直流系统设计技术规程: DL/T 5044—2004 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
Electrical Planning and Design Institute. DC power system design technical specifications: DL/T 5044—2004 [S]. Beijing: China Plan Press, 2014.

(责任编辑 高春萌)