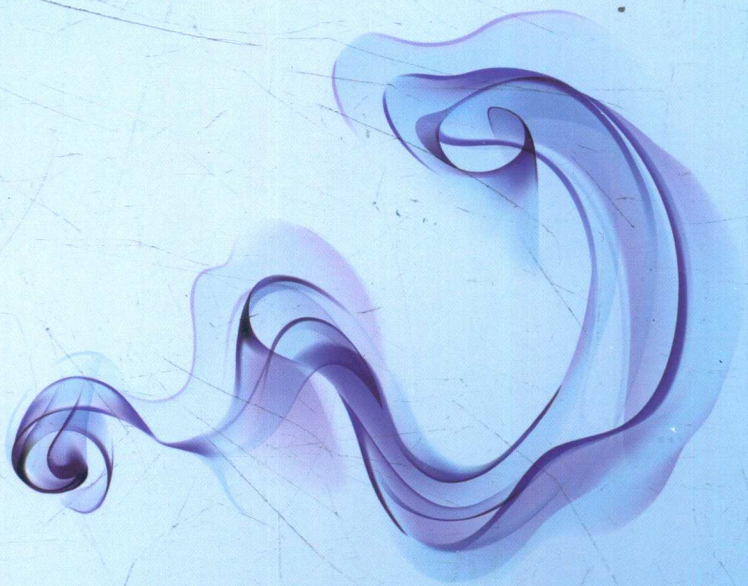


# 浮充式保护型 磷酸铁锂电池直流电源系统

FUCHONGSHI BAOHUXING  
LINSUANTIE LIDIANCHI ZHILIU DIANYUAN XITONG

本书编写组 编著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

# 浮充式保护型 磷酸铁锂电池直流电源系统

FUCHONGSHI BAOHUXING  
LINSUANTIE LIDIANCHI ZHILIU DIANYUAN XITONG

本书编写组 编著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书是关于浮充式保护型磷酸铁锂电池在电力工程直流电源系统中研究和应用方面的一本实用工程技术书。全书共分6章，主要内容有概述、FBL磷酸铁锂电池直流电源系统试验、FBL磷酸铁锂电池与阀控式铅酸蓄电池比较、FBL磷酸铁锂电池直流电源系统总体规定、FBL磷酸铁锂电池应用实例、FBL磷酸铁锂电池应用展望。

本书可供从事电力工程直流电源系统设计、制造、安装、运行维护和管理等相关专业技术人员参考使用。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

浮充式保护型磷酸铁锂电池直流电源系统/《浮充式保护型磷酸铁锂电池直流电源系统》编写组编著. —北京: 中国电力出版社, 2016.9 (2016.12重印)

ISBN 978 - 7 - 5123 - 9585 - 5

I. ①浮… II. ①浮… III. ①锂离子电池-直流电源-研究 IV. ①TM912

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 171953 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京九天众诚彩色印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2016年9月第一版 2016年12月北京第二次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 8.25印张 130千字

印数1001—2000册 定价 68.00元

### 敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪  
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究





浮充式保护型磷酸铁锂电池直流电源系统

## 本书编写组

於崇干 孙 茗 蒋新华 杨忠亮 侯耀华

盛和乐 刘百震 贾江涛 李生爱




# 前言

## PREFACE

在电力工程直流电源系统中，因阀控式铅酸蓄电池维护简单、性能相对稳定、价格低廉，目前在发电厂、变电站中采用阀控式铅酸蓄电池的比例高达 95% 以上。通过多年运行经验来看，阀控式铅酸蓄电池在实际应用中还存在着一些缺陷，如电池质量大，占地面积大，充放电效率较低，充放电过程繁琐且耗时较长，浮充状态下蓄电池实际容量不足时不易发现，对环境温度特别敏感导致运行寿命短等。此外，铅酸蓄电池中含有对环境有污染的重金属铅和有毒溶液，会对人体和大气环境造成危害和污染。

随着无人值守变电站的普及以及发电厂、变电站系统自动化程度的大幅提高，对蓄电池组性能和直流电源系统安全可靠性提出了更高要求。发展新型高效节能、先进环保、资源循环利用的电池替代铅酸蓄电池成为研究方向。磷酸铁锂电池是锂电池的一种，其不含任何重金属与稀有金属，无毒无污染，不会对环境造成危害，被公认为绿色环保电池。近年来磷酸铁锂电池开始在电动汽车、新能源储能、通信、应急照明等领域和设备开始广泛应用，在国内 110kV 变电站直流电源系统中也有少量应用。

由于磷酸铁锂电池设计原型是适用于频繁充放电的起动型蓄电池，要在电力工程直流电源系统中以浮充电方式长期运行，就不是简单的替换阀控式铅酸蓄电池，而是需要从整个直流电源系统来综合考虑。不仅需要获得一套完整的磷酸铁锂电池特性曲线和技术数据，同时还要对磷酸铁锂电池容量选择计算、直流电源系统保护电器选择及配合、电缆选择计算等问题进行研究，确定磷酸铁锂电池在电力工程的应用范围、技术参数、直流电源系统构成及直流设备选择等相关技术要求。



华北电力设计院有限公司直流规程编制组与上海航天电源技术有限公司、深圳供电局有限公司、上海凯华电源成套设备有限公司、上海良信电器股份有限公司的有关人员历经三年的持续工作，研发出一种适用于电力工程直流电源系统的新型磷酸铁锂电池——浮充式保护型磷酸铁锂电池，并完成全部试验工作，获取了磷酸铁锂电池一系列基本特性的原始数据，经过分析归纳、计算论证、几经反复不断完善，终于完成一套符合电力工程所需的磷酸铁锂电池数据、曲线和计算公式，其广度和深度超越了以往所编写的阀控铅酸蓄电池内容，基本涵盖了电力工程直流电源系统设计所需的全部电池数据。

在各项试验过程中重点解决了以下六个问题：

一是确定磷酸铁锂电池持续浮充运行的可行性。通过持续 32 个月持续浮充电运行、数十次充放电试验证明及理论分析获得结论，采用多重过电压保护措施和恰当的控制策略，磷酸铁锂电池是可以持续浮充电运行的。

二是磷酸铁锂电池的安全性。通过电池出口短路试验（破坏性试验）结果说明，除电池本体应具有承受短时耐受电流性能外，合理设计直流电源系统是保证电池安全运行的必要条件。

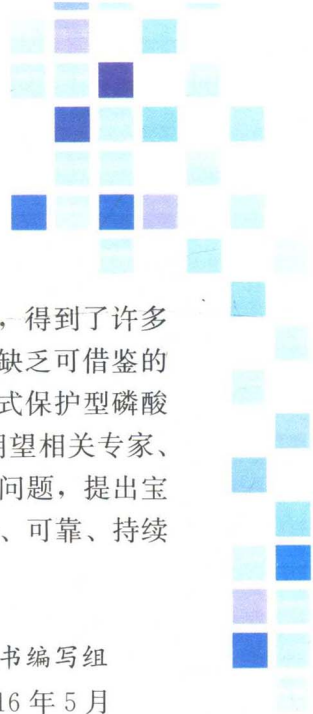
三是直流电源系统智能化。将具有自主均衡功能的磷酸铁锂电池和具有高级功能的监控装置+BPD（电压均衡保护、检测装置）合理结合，是提高直流电源系统智能化水平和实现磷酸铁锂电池安全运行的重要手段。

四是直流电源系统保护电器选择性配合。由于磷酸铁锂电池内阻偏小，其提供的短路电流远远大于铅酸蓄电池的短路电流，在直流电源系统保护电器选择性配合设计中应予以重点考虑，同时还要注意保护电器和导体配合问题。

五是电池技术规范。根据试验数据，对浮充式保护型磷酸铁锂电池产品提出合理的技术规范要求。

六是电源系统运维。根据实际工程运行情况，向运行维护部门提供磷酸铁锂电池技术参数和维护参考方法。

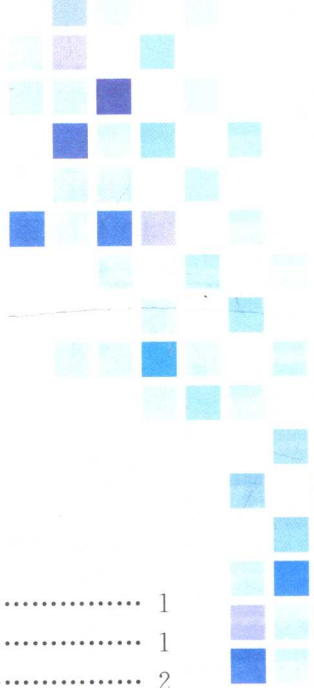
浮充式保护型磷酸铁锂电池试验数据及计算方法在深圳新百 110kV 无人值班变电站直流电源系统改造工程中得到应用，该工程已于 2015 年 8 月通过深圳供电局有限公司验收后投入运行，目前运行情况良好。



在浮充式保护型磷酸铁锂电池直流电源系统研究过程中，得到了许多相关单位的积极支持和热情协助，在此一并表示感谢。由于缺乏可借鉴的国内外磷酸铁锂电池相关标准、文献和试验方法，有关浮充式保护型磷酸铁锂电池试验数据也有局限性，本文难免有不完善之处。期望相关专家、技术人员关注磷酸铁锂电池以浮充方式在电力工程中的应用问题，提出宝贵意见，共同来完善和实现浮充式保护型磷酸铁锂电池安全、可靠、持续运行。

本书编写组

2016年5月



# CONTENTS

# 目录

## 前言

### 1 概述

1.1	铅酸蓄电池应用现状 .....	1
1.2	磷酸铁锂电池特点 .....	1
1.3	磷酸铁锂电池结构及工作原理 .....	2
1.4	磷酸铁锂电池在电力工程应用重点研究的问题 .....	5
1.5	浮充式保护型磷酸铁锂电池简介 .....	7
1.6	BPD 系统简介 .....	8

### 2 FBL 磷酸铁锂电池直流电源系统试验

2.1	自均衡特性试验 .....	12
2.2	均充电特性试验 .....	14
2.3	放电特性试验 .....	21
2.4	温度特性试验 .....	25
2.5	浮充电运行设计预期寿命 .....	27
2.6	核对性放电试验 .....	31
2.7	浮充电状态端电压试验 .....	32
2.8	电池短时耐受电流试验 .....	36
2.9	电池内阻及出口短路电流试验 .....	38
2.10	FBL 磷酸铁锂电池容量换算系数 .....	45
2.11	保护电器选择性配合试验 .....	46

### 3 FBL 磷酸铁锂电池与阀控式铅酸蓄电池比较

3.1	FBL 磷酸铁锂电池特点和优势 .....	49
3.2	FBL 磷酸铁锂电池与阀控式铅酸蓄电池主要技术 参数比较 .....	52
3.3	FBL 磷酸铁锂电池与阀控式铅酸蓄电池经济比较 .....	59



<b>4</b>	<b>FBL 磷酸铁锂电池直流电源系统总体规定</b>	
4.1	系统设计原则 .....	61
4.2	FBL 磷酸铁锂电池技术参数 .....	61
4.3	FBL 磷酸铁锂电池特性 .....	62
4.4	直流回路电缆允许电压降 .....	64
4.5	直流监控装置+BPD 系统 .....	64
4.6	直流监控装置高级功能 .....	65
4.7	直流电源绝缘监测装置 .....	68

<b>5</b>	<b>FBL 磷酸铁锂电池应用实例</b>	
5.1	新百变电站工程概况及特点 .....	70
5.2	本工程直流电源系统设计原则 .....	71
5.3	蓄电池组容量选择 .....	75
5.4	充电装置容量选择 .....	76
5.5	110V 直流电源系统电缆选择 .....	77
5.6	110V 直流电源系统短路电流计算 .....	78
5.7	保护电器选择 .....	79
5.8	导体与保护电器配合计算 .....	79
5.9	保护电器选择配合及导体配合计算结果 .....	82
5.10	工程运行情况 .....	84

<b>6</b>	<b>FBL 磷酸铁锂电池应用展望</b>	
6.1	220kV 变电站 220V 直流电源系统计算算例 .....	93
6.2	500kV 变电站直流电源系统应用展望 .....	101
6.3	发电厂单元机组用直流电源系统应用展望 .....	101
6.4	发电厂直流电源成套装置应用展望 .....	102
6.5	FBL 磷酸铁锂电池研究和应用的意义 .....	103

## 附录 A 相关试验报告

A.1	上海航天电源技术有限公司相关试验报告 .....	104
A.2	上海良信电器股份有限公司相关试验报告 .....	109
A.3	上海凯华电源成套设备有限公司相关试验报告 .....	112

<b>参考文献</b> .....	<b>115</b>
-------------------	------------

# 1

## 概 述

### 1.1 铅酸蓄电池应用现状

铅酸蓄电池的发展已有 100 多年的历史，其技术成熟，性能稳定可靠，价格便宜，广泛用于电力、通信、交通领域，在工业电源领域中，铅酸蓄电池发挥着巨大的作用。目前发电厂、变电站的直流电源系统基本都采用阀控式密封铅酸蓄电池，较之前的普通防酸式铅酸蓄电池，阀控式密封铅酸蓄电池在性能方面有了很大提高，但在实际生产、运行、维护中还存在以下问题：

(1) 阀控式密封铅酸蓄电池能量质量比、能量体积比较低，电池质量大、占地面积大，对建筑物楼板承重或房屋面积要求较高。

(2) 阀控式密封铅酸蓄电池对运行环境温度要求高，当温度变化范围大时，需要采取采暖和空调等措施，否则将对蓄电池使用寿命影响很大。

(3) 阀控式密封铅酸蓄电池充放电时间长，给现场运行维护带来困难。电池对过充电较为敏感，在过充情况下有燃烧和爆炸危险。

(4) 阀控式密封铅酸蓄电池在浮充状态下，即使容量已远低于标准容量，而测量的端电压、温度仍正常，电池无漏液，不易发现电池异常。一旦交流失电，电池会在短时间内发生容量“跳水”崩溃，给电力系统运行造成很大的潜在危险。

(5) 铅酸蓄电池大量使用重金属铅，对人体和大气环境造成很大危害和污染。

### 1.2 磷酸铁锂电池特点

自从 1980 年美国科学家 Goodenough 教授等提出了钴酸锂 ( $\text{LiCoO}_2$ )

作为锂充电电池的正极材料，开启了锂离子电池的应用历程以来，锂离子电池凭借其特有的优势，在短短 30 多年里得到了突飞猛进的发展。目前已经实现商业化的锂离子电池正极材料主要有四种：钴酸锂 ( $\text{LiCoO}_2$ )、锰酸锂 ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ )、磷酸铁锂 ( $\text{LiFePO}_4$ )、镍钴锰三元 [ $\text{Li}(\text{Ni}, \text{Co}, \text{Mn})\text{O}_2$ ]。以具有橄榄石型结构的磷酸铁锂 ( $\text{LiFePO}_4$ ) 作为新型正极材料的锂离子电池，因其具有较高的理论比容量、适中的电压平台、超长的循环寿命、优良的安全性能以及原料广泛、对环境友好等优点，更是在各大应用领域中倍受青睐。

磷酸铁锂电池主要特性如下：

(1) 能量密度高，体积小、质量轻。

(2) 循环次数可高达 2000 次，使用寿命较长。

(3) 工作温度范围宽，耐高温；对运行环境的要求低于阀控式铅酸蓄电池。

(4) 无记忆效应，大倍率充、放电性能和效率高，放电电压平稳，带载能力强；充放电时间短，方便运行和维护。

(5) 与其他锂离子电池相比，目前以  $\text{LiFePO}_4$  为正极材料的磷酸铁锂电池在挤压、穿刺、耐过充方面属于安全性最好的锂电池。

(6) 不含任何重金属与稀有金属，对环境和人身均无污染、无伤害。

磷酸铁锂电池解决了人们之前担心的钴酸锂和锰酸锂等锂离子电池的安全性问题，其安全性能完全可以与镍镉、铅酸蓄电池媲美；磷酸铁锂电池属于无毒、无污染的新型环保电池，将具有逐步成为替代镍镉、镍氢、铅酸等电池的应用潜力。

## 1.3 磷酸铁锂电池结构及工作原理

### 1.3.1 磷酸铁锂电池结构

锂离子电池主要由正极、负极、电解质、隔膜及外壳等组成。正极、负极及电解质在材料上的不同及工艺上的差异使锂离子电池具有不同的性能以及不同的名称。

$\text{LiFePO}_4$  具有有序的橄榄石结构，属于正四面体结构，如图 1-1 所示。

橄榄石结构的  $\text{LiFePO}_4$  作为电池的正极，由铝箔与电池正极连接，中间是聚合物的隔膜，把正极与负极隔开，锂离子 ( $\text{Li}^+$ ) 可以通过而电子

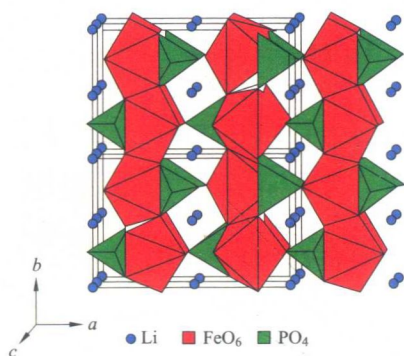


图 1-1 橄榄石型  $\text{LiFePO}_4$  的晶体结构示意图

( $e^-$ ) 不能通过, 右边是由碳(石墨)组成的电池负极, 由铜箔与电池的负极连接。电池的上下端之间是电池的电解质, 电池由金属外壳密闭封装。

$\text{LiFePO}_4$  的理论容量为  $170\text{mAh/g}$ , 相对锂的电极电势约为  $3.45\text{V}$ 。锂离子电池的正负极均为能够可逆嵌锂和脱锂的化合物。

### 1.3.2 磷酸铁锂电池工作原理

磷酸铁锂电池正极材料是一种嵌锂式化合物, 主要材料为磷酸亚铁锂( $\text{LiFePO}_4$ ), 在外界电场下化合物中的( $\text{Li}^+$ )可以从晶格中脱出和嵌入。负极主要材料为碳 C, 电极浸润在电解液六氟磷酸锂( $\text{LiPF}_6$ )盐的有机溶剂中。磷酸铁锂电池工作原理如图 1-2 所示。

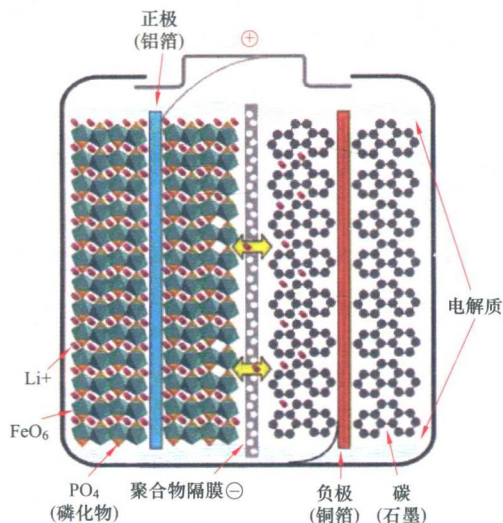
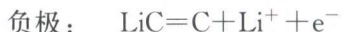


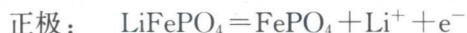
图 1-2  $\text{LiFePO}_4/\text{C}$  电池工作原理示意图



放电时电极反应为



充电时电极反应为



充电时，正极材料中的锂离子开始脱离正极，进入电解液并穿过隔膜向负极迁移。在负极上捕获一个电子被还原为 Li，存贮在有层状结构的石墨中。

放电时，在负极中锂会失去一个电子而成为  $\text{Li}^+$ ，进入电解液并穿过隔膜向正极方向迁移，并存贮在正极材料中，如图 1-3 所示。

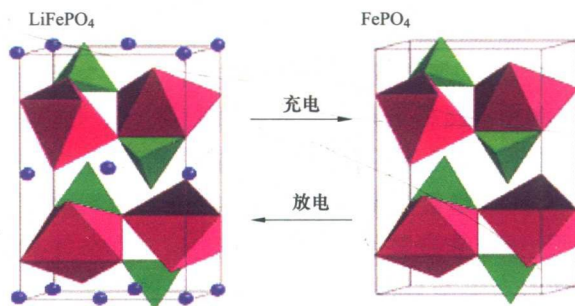


图 1-3 磷酸铁锂电池材料的反应机理

### 1.3.3 传统磷酸铁锂电池组与电池组管理系统 (BMS) 接线

由于目前磷酸铁锂电池单体容量都比较小，较大容量电池是由若干个小电池并联组成的，1 个电池或几个并联组成的电池，通称为单体电池或 XXAh 单体电池。为便于安装和参数检测，将若干个单体电池串联后组成电池模块、每个模块配置 1 套 BMS；蓄电池组根据电池容量和系统电压选择模块数量，模块之间通常用绝缘软导线连接。

目前国内变电站或轨道交通采用的磷酸铁锂电池组直流系统基本原理接线如图 1-4 所示。在蓄电池组主回路上串联一组由逆止二极管并联接触器与熔断器组成的系统保护电路，保护电路在系统出现短路、过充、过放时对直流电源系统进行保护。

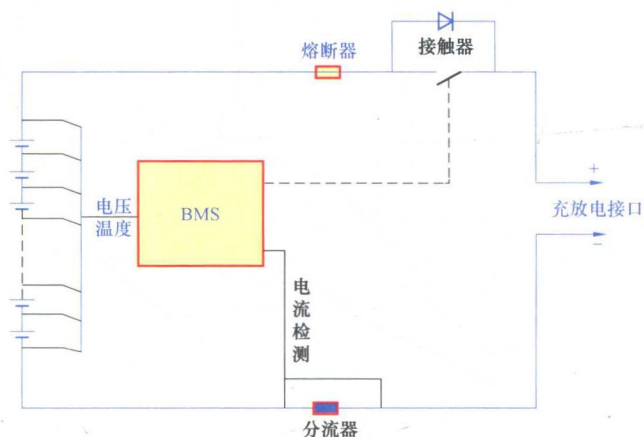


图 1-4 传统磷酸铁锂电池组与 BMS 接线原理图

鉴于电力工程中直流电源系统的重要性，在蓄电池组主回路上串接逆止二极管和接触器并联回路增加了直流主回路的故障机率，降低了系统可靠性。因此传统磷酸铁锂电池与 BMS 接线不适应于电力工程中直流电源系统持续浮充电的工作模式，BMS 功能也不能完全取代直流电源系统监控装置和满足电力工程直流电源的运行要求。

## 1.4 磷酸铁锂电池在电力工程应用重点研究的问题

磷酸铁锂电池原型是不适宜浮充电运行的，要满足 DL/T 5044—2014《电力工程直流电源系统设计技术规程》中：“蓄电池组正常应浮充电运行”的要求，则需要开发新型的磷酸铁锂电池。为了在电力工程中更好地推广和应用磷酸铁锂电池，需要研究解决以下关键技术问题：

(1) 研究解决如何将磷酸铁锂电池从频繁充放电运行方式转化为正常浮充电运行方式。磷酸铁锂电池直流电源系统在电力工程应用尚需建立新的设计理念、积累必要运行和管理经验。

(2) 现有磷酸铁锂电池设计原型是 5h 放电率的启动型电池，原有的试验数据、曲线不能适应电力工程的设计、计算以及运行维护要求，因此需要一套完整的磷酸铁锂电池 10h 放电率充放电特性曲线、温度特性曲线、电池内阻测试方法及蓄电池组内阻计算公式、电池容量换算系数及电池短

路耐受电流能力等试验曲线、参数及计算方法。

(3) 研究通过采用具有自均衡能力的电池, 开发新型电池电压保护装置(BPD)及合适的充放电控制策略等方法, 使磷酸铁锂电池在浮充或均充状态的端电压不均衡偏差在可控范围内, 使电池组中电压上升较快的电池不会被过充电, 其余电池还可正常充电, 最终达到均衡充电的效果。

(4) 研究磷酸铁锂电池短时电流耐受问题。磷酸铁锂电池内阻远小于铅酸蓄电池, 故障时短路电流大很多, 对电池本体安全性及直流设备选择都有影响。

(5) 磷酸铁锂电池在电力工程推广应用时必须提供完整的试验数据和计算方法, 不能直接套用规程中铅酸蓄电池的技术参数和技术要求。磷酸铁锂电池持续浮充电运行安全性评估和措施是至关重要的。

(6) 完善和提高电力工程直流电源系统智能化功能。研究具备直流电源实时仿真系统、信号报警显示系统、自动诊断系统、远程访问及维护系统等功能的新型直流电源设备; 建立集中数据信息平台, 实时在线监测直流系统各种运行状态; 配备直观图形图像界面, 对数据进行综合展示, 支持可视化运行维护; 扩展智能告警、信息综合分析、自诊断及远程维护等功能应用; 采用信息加密、密码认证等安全技术, 满足远传信息通信安全的要求; 以提高系统的智能化水平和运行维护水平。

(7) 根据 DL/T 5044—2014《电力工程直流电源系统设计技术规程》选择性配合方法, 研究磷酸铁锂电池直流系统短路电流计算以及磷酸铁锂电池容量选择、保护电器选择性配合计算、电缆截面选择及电缆耐热性能校验, 保证磷酸铁锂电池直流电源系统的可靠性。

因制造和使用条件不同, 磷酸铁锂电池组中的单体电池在特性上存在差异, 而这些差异在充、放电过程中若没有得到有效控制将会不断加大, 从而会严重影响电池组的使用寿命。另外, BPD失效也会导致个别单体电池在长期浮充工况下过充, 造成电池容量和寿命的急剧下降, 进而导致整组电池失效或引发系统安全隐患。传统磷酸铁锂电池过充电时, 过多的锂离子从阴极材料中释出, 多余的锂离子被硬塞进碳阳极结构里或沉积在碳表面形成锂枝晶, 使阴极材料的结构逐渐塌陷, 对电极结构造成永久损坏; 同时, 电解液成分在高电位阴极表面发生不可逆氧化分解, 产生气体并放出大量的热, 致使电池内压和温度急剧上升, 从而产生安全隐患。为解决磷酸铁锂电池在长期浮充工况下的过充隐患, 上海航天电源技术有限责任公司研发出一种新型磷酸铁锂电池——浮充式保护型磷酸铁锂电池。



## 1.5 浮充式保护型磷酸铁锂电池简介

### 1.5.1 浮充式保护型磷酸铁锂电池定义

为适应发电厂和变电站的磷酸铁锂蓄电池组正常情况下应以浮充电方式运行要求，在常规磷酸铁锂电池电解液中添加一定比例的氧化—还原剂，在某一电压区间内完成氧化和还原，确保电池组中每只电池充满电，且不过充电，该方法称为自主均衡法。

浮充式保护型磷酸铁锂电池是将具有自主均衡功能的磷酸铁锂电池和具有高级功能的监控装置+BPD 功能进行合理完整的结合，构成具有多重保护功能和良好控制策略的新型磷酸铁锂电池，适用于在持续浮充电工况下安全运行的磷酸铁锂蓄电池组直流电源系统。浮充式保护型磷酸铁锂电池简称为 FBL 磷酸铁锂电池。

### 1.5.2 自主均衡基本原理

自主均衡基本原理是在电解液中添加一定比例的氧化—还原添加剂，在电池内部建立一种防过充的电化学自我保护机制，可有效地解决电池的过充问题。在持续浮充电状态，氧化—还原剂相对稳定地存在于电解液中，不参加任何化学或电化学反应，对电池宏观电化学性能没有影响；当电池电压达到或超过电池上限电压（3.85V）时，还原剂在正极表面被氧化，氧化产物扩散到负极表面被还原成还原产物，再扩散到正极继续被氧化，整个过程沿氧化—扩散—还原—扩散循环进行，这样正极电位就被锁定在氧化还原电对的氧化电位负极直到充电结束。在过充电过程中，充电电流仅通过可逆的氧化还原反应来承载，过充的电量既没有被储存在两电极，也没用于电解液的不可逆氧化分解，只是伴随着氧化还原反应以热的形式释放出来，使电池组中电压上升较快的电池不会被过充电，其他电池还可以正常充电最终达到均衡充电的效果。还原反应过程以热的形式释放。持续自主均衡的副作用是：电池外壳温度上升内部产生气体可能使外壳发生鼓胀。

### 1.5.3 自主均衡表现形式

（1）电池荷电状态（SOC）可以反映电池的剩余容量状况，由于电池生产过程的不一致性，电池组各单体电池的 SOC 状态也会不一致，长期下去会影响电池组寿命。采用自主均衡电池，可通过预先设置，使得 SOC 较



高的电池在充电过程中稳定在一定的电压范围内，调整电池组中每个单体电池 SOC，等待其他未充满电的电池充电，最终保证每个电池状态达到一致，均充到 100% SOC。

(2) 浮充电持续运行状态，若电池组中某只单体电池 SOC 较高，导致该单体电池电压上升。自主均衡电池可通过自身均衡能力（即抗过充能力）将电池电压控制在安全范围内，并在持续充电过程中，与其他电池相互影响，使各单体电池电压趋于一致。

(3) 自主均衡电池在其电解液中具有包含氧化—还原添加剂的自主均衡载体。该自主均衡电池能在特定电压下进行长时间的小电流定电流充电，通过内部自主均衡载体的作用，将多余电能转化为热能，使得电池不被过充，解决了过充电对电池带来的安全隐患。

## 1.6 BPD 系统简介

### 1.6.1 BPD 系统组成

BPD 系统框图如图 1-5 所示。

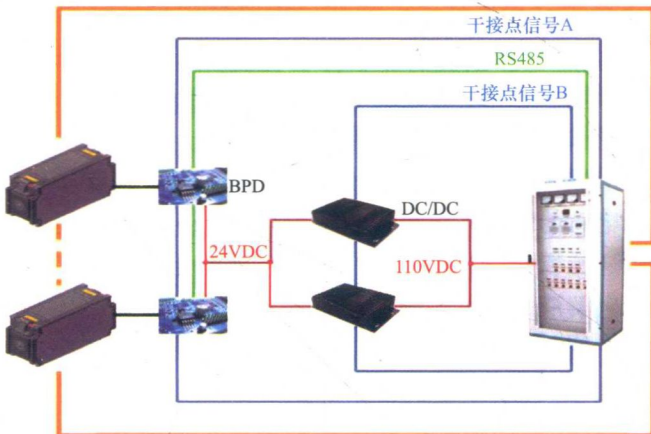


图 1-5 BPD 系统框图

### 1.6.2 BPD 原则接线

BPD 原则接线图如图 1-6 所示。