

电化学储能站电池舱偏压、偏流的原因分析及设计改进

熊 杰 刘国庆 王 华 曾云贵 张龙飞 陈小飞 刘转标 蒋军山
(华自科技股份有限公司)

摘要: 随着电化学储能电池技术的快速发展、不断成熟和成本的降低,用大容量电化学电池来存储电能的模式正在快速兴起,大规模、大容量电化学储能站的建设具有投资少、占地面积小、建设速度快、运行维护方便、受环境条件影响小的特点。电网侧电化学储能站是在电网负荷低谷时段,用化学电池将电网的剩余电能通过电池存储起来,在电网负荷高峰时段再把电池存储的电能释放出来。在电网侧起到削峰填谷、调频调峰的作用,为电网的安全、稳定运行提供了一定的支撑,为当地经济的发展起到积极的作用。储能电池舱偏压、偏流问题普遍存在,虽然设计制作都符合相关标准要求(相关标准并不完善,也不完全准确),但问题还是不断出现。本文重点分析了电化学储能站化学电池(电芯)、电池簇、电池堆出现偏压、偏流的原因,包括电芯原因、连接电缆原因、绝缘和通风散热原因,通过原因分析揭示了在电池舱的设计选型、配置选择、组装工艺及运行维护方面应关注的重点。详细介绍了被动均流的PACK及电池簇的维护和处理方法,为电化学储能电站的选型设计、方案配置、调试维护、运行管理提供了参考。

关键词: 电池舱; 电池簇; 电池PACK; 电芯; 偏流; 偏压

0 引言

电池舱是电化学储能站的主要设备之一,电池舱是由若干个电池单体(电芯)组成的。本文介绍的电池单体为3.2V/280Ah,16个电池单体组成一个PACK,25个PACK组成一个簇,10簇组成一个电池舱,如图1所示。每个标准集装箱电池舱配置电量为3.584MWh,100MW/200MWh站需要58个集装箱舱,232000个电芯。电芯及外部连接电缆、电芯工作温度及恒温控制系统、绝缘及工艺

的一致性在保证整站效率及正常工作的关键,也是确保储能站安全运行并减少后期运行维护成本的关键。但电化学储能站电池舱偏压、偏流的现象却普遍存在。给运行带来了隐患,给维护带来了工作量和风险。

1 原因分析

运行中的偏流、偏压主要有以下几个方面原因。

1.1 PACK内电芯电量不一致的影响

空调风道															
空调	8	9	18	8	9	18	8	9	18	8	9	18	8	9	18
	7	10	19	7	10	19	7	10	19	7	10	19	7	10	19
	6	11	20	6	11	20	6	11	20	6	11	20	6	11	20
	5	12	21	5	12	21	5	12	21	5	12	21	5	12	21
	4	13	22	4	13	22	4	13	22	4	13	22	4	13	22
	3	14	23	3	14	23	3	14	23	3	14	23	3	14	23
	2	15	24	2	15	24	2	15	24	2	15	24	2	15	24
	1	16	25	1	16	25	1	16	25	1	16	25	1	16	25
	PACK	17	高压盒	PACK	17	高压盒	PACK	17	高压盒	PACK	17	高压盒	PACK	17	高压盒
	簇	1		2		3		4		5		6		7	
空调风道															
10			9			8			7			6			簇
高压盒	17	PACK	高压盒	17	PACK	高压盒	17	PACK	高压盒	17	PACK	高压盒	17	PACK	簇
25	16	1	25	16	1	25	16	1	25	16	1	25	16	1	簇
24	15	2	24	15	2	24	15	2	24	15	2	24	15	2	簇
23	14	3	23	14	3	23	14	3	23	14	3	23	14	3	簇
22	13	4	22	13	4	22	13	4	22	13	4	22	13	4	簇
21	12	5	21	12	5	21	12	5	21	12	5	21	12	5	簇
20	11	6	20	11	6	20	11	6	20	11	6	20	11	6	簇
19	10	7	19	10	7	19	10	7	19	10	7	19	10	7	簇
18	9	8	18	9	8	18	9	8	18	9	8	18	9	8	簇
空调风道															

图 1 电池舱内部布置图

电芯电量不一致导致在统一充放电过程中，电芯的内阻表现不同。在充放电过程中，电芯的极化内阻是变化的^[1]，充电时的内阻变化与放电时的内阻变化也不一致，如图 2 所示。不能用测量的方法来判断电芯的电量，也不能通过电压和内阻判断电芯的电量。放电时，电量少的电芯的内阻要大于电量多的电芯，且先进入非线性区，电量多的电芯还在线性区，因此影响到该回路（簇）的电流会偏小。图 3 显示不同放电量所表现出的电芯电压变化。据产品资料介绍，磷酸铁锂在正常充放电过程中，内阻在 30~80mΩ 之间变化，如表 1 所示。

1.2 簇欧姆电阻的影响

簇欧姆电阻包括电芯欧姆电阻、汇流电缆电阻、PACK 之间的串并联电缆电阻。偏流、偏压与均匀性有直接联系。一个电池舱 / 电池堆数量多的有十几个簇，一个簇多的有几十个 PACK，一个舱的连接电缆多达几百根，PACK 连接电缆的一致性差是引起

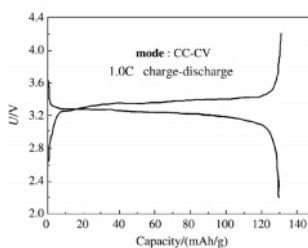


图 2 锂电池的充放电曲线

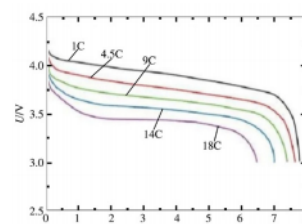


图 3 不同放电量的电压变化

表 1 磷酸铁铝的内阻在 30~80mΩ 之间变化

项目	性能
典型容量 (mAh)	1000~1400
标称电压 (V)	3.2
终止充电电压 (V)	3.6 ± 0.05
终止放电电压 (V)	2.0V
内阻 (mΩ)	30~80
最大充电电流 (A)	1~1.50
一般充电电流 (A)	0.2~0.5
最大放电电流 (A)	5~100
一般放电电流 (A)	0.5~1
工作温度范围 (°C)	充电: 0~45°C; 放电: -20~60°C

簇偏流的最主要原因。

1.2.1 连接电缆不等长的影响

由于 10 个簇到汇流柜的距离不等有可能导致簇到汇流柜的汇流电缆不等长，汇流电缆不等长的影响见表 2，当汇流柜放在簇 5 与簇 6 之间时，表 2 的簇 1~ 簇 5，簇 6~ 簇 10。欧姆电阻在初期对偏压、偏流的影响是很小的，小到可以忽略（簇偏流 < 10%），这正是设计容易忽视的，但又不应该被忽略，因为这种固定的微小影响会在整体充放电过程中，对电芯的极化电阻产生影响，见表 3。

汇流电缆会形成固定的偏流。汇流电缆是各簇连接电缆的一部分，也是连接各簇到汇流柜的连接电缆，离汇流柜近的簇，连线短，离汇流柜远的簇，连线长，各簇充放电电流呈现出明显的规律性变化（见表 2），离汇流柜近的簇电流大，离汇流柜远的簇电流小，实测最小影响相差近 10A。

每个簇 PACK 外部连接电缆的电阻不均，将直接或间接引起偏流，直接原因与欧姆电阻有关，间接原因与电芯的极化电阻有关。初期是欧姆电阻引起的微小固定偏压、偏流，还在允许的范围内，重复的充放电

过程会缓慢改变电芯的极化电阻极化条件，使电量发生改变。在统一充放电过程中，充电时，电阻大的簇及 PACK 充电少（电芯电压低），电阻小的簇及 PACK 充电多（电芯电压高）；放电时电阻大的簇及 PACK 放电少，电阻小的簇及 PACK 放电多，长期运行会越来越偏，使偏压、偏流会慢慢变得越来越大，偏流会越来越严重，直到整个电池舱 / 堆无法正常使用，这是个发散的过程，形成恶性循环，这时已经可以忽略欧姆电阻的影响了，主要表现为电池电量不同的影响。

1.2.2 电缆头压接工艺的影响

有的 PACK 之间及簇到汇流柜之间是用电缆连接的，电缆头的压接工艺也是引起欧姆电阻不均的原因，连接电缆的电阻不仅会形成簇偏压和偏流，还会增加功率损耗。

1.3 电芯极化电阻的影响

1) 电芯外部环境的影响。初期电芯的极化电阻在容量、温度、压差及充放电电流一定时，是相对固定的，不会对偏流造成影响，一旦环境条件发生改变，而又不及时纠正，就会使电芯的极化电阻表现出较大差异。表 3 为实测某项目的簇偏流数据，极化电

表 2 汇流电缆不等长及空调不同步对簇偏流的初期影响

簇	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
电压 (V)	1338.5	1336.4	1338	1337.1	1335.7	1338.7	1336.6	1338.9	1338.1	1337.1
电流 (A)	-61.2	-62	-63.1	-64.1	-65.7	-66.6	-65.9	-64.9	-63.8	-62.3
SOC (%)	37	36	38	38	37	35	37	37	37	35
SOH (%)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
压差值 (V)	0.013	0.012	0.012	0.013	0.012	0.067	0.012	0.013	0.013	0.012
温差值 (°C)	4	4	3	3	4	2	2	2	2	2

表 3 极化电阻对簇偏流的影响

簇	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
电压 (V)	1308.6	1308.6	1309.8	1309.1	1310	1309.6	1308.3	1310	1309.8	1308.8
电流 (A)	70	69.4	70.1	35.8	71.5	44.8	71.5	72.7	71.4	40.9
SOC (%)	83	83	83	87	83	86	84	83	84	86
SOH (%)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
压差值 (V)	0.017	0.020	0.019	0.036	0.019	0.031	0.019	0.018	0.019	0.036
温差值 (°C)	7	4	5	5	5	4	3	4	4	3

阻引起偏流的比例超过了 103%。

2) 电芯的一致性差。经验要求电芯投运前的一致性要好，偏压小于 0.03V，内阻差小于 0.05mΩ，容量差小于 5Ah。电芯一致性要求是减小偏压、偏流的重要措施，因为每个电芯都不是孤立运行的，电芯的不一致会在运行中形成短板效应和累积效应，会降低电池舱、站的标定容量，严重时会带来安全隐患。

1.4 温度与湿度的影响

1.4.1 温度的影响

温度会影响到电芯极化电阻的变化，使电芯电压发生改变，温度高的电芯转换效率会大一些，会形成电芯的偏压，如图 4 所示。引起电芯温度不均的原因主要是通风散热系统，包括风道的合理性及恒温空调的控制逻辑的合理性。特别是同一 PCS 下多空调的启停一定要同步，否则会引起簇或 PACK 的偏压和偏流。因为空调的启停是有差调节，若多空调的测温探头处在舱内不同位置，势必存在温差，再加上有差调节的偏差，会产生叠加温差，表 2 展示第 6~10 簇的电流要比 1~5 簇的电流整体偏高，这正是由于 6~10 簇与 1~5 簇的空调启停不同步引起的。电芯及 PACK 温湿度影响，是引起偏流的间接因素。

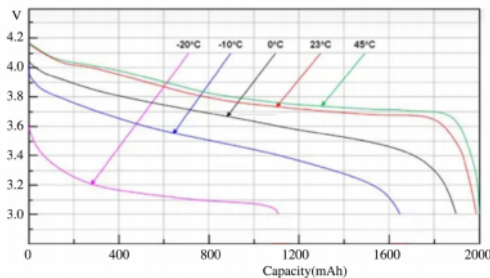


图 4 温度对电芯放电的影响

1.4.2 湿度的影响

1) 湿度对绝缘的影响。电芯及 PACK 质量主要体现在绝缘的变化，电芯及 PACK 受湿度的影响较大，只要相对湿度大于 70%，电芯的绝缘电阻就会大

幅度下降，经验认为正常的湿度应小于 60%，这时的绝缘电阻应大于 10000kΩ；湿度大于 90%，绝缘电阻就会大幅度下降甚至会低于 5000kΩ，虽然还在相关标准^[2]允许的范围之内，但相关标准并未界定突变的影响，经验表明，电芯绝缘超 20% 的突变会带来严重的安全风险。

2) 舱体的密闭性。舱体的密闭性不仅会影响到舱体的湿度变化，还会增加运行功耗。舱体密闭性有以下几种表现：①固有密闭性：表现在舱体的加工精度方面，特别是门、空调连接处的密封条位置的密闭性。②舱体安装工艺：舱体与外界有连接的电缆口封堵不严。③人为因素：在检修、调试、巡检过程中，经常性开门或关门不严。③空调的控制策略不合理：空调的除湿功能受到温度的制约，在空调不启动的温度范围内湿度很大时，无法除湿。

2 总结及建议

2.1 电池问题

1) 电芯的一致性。电芯的一致性确保储能站正常运行的关键，至少要确保同一 PCS 下的舱 / 堆的电芯一致性，当电芯在出厂分容时，要确保容差 ≤ 5Ah，压差 ≤ 3mV，内阻差 ≤ 0.05mΩ，温差 ≤ 5°C。

2) PACK 的组装工艺。PACK 的组装工艺也是引起电芯特性不一致的原因之一，安装工艺可能导致局部绝缘低或出现局部放电。

3) 由于特定的温度、连接电缆、局部放电的微小影响都会被电芯的充放电特性所放大。所以，能及时纠偏电芯的主动均衡（均压均流）方案，可大大减小偏压、偏流的累积效应，这时才可以忽略温度的微小变化和连接电缆阻值的影响，减少后期的维护成本。

4) 电芯的主动均衡（均压、均流）必须具备两个条件，一是 PACK 必须支持，二是 BMS 要具有该功能，两者缺一不可。

2.2 舱体问题

1) 电池舱的密闭性问题，密闭性影响到舱内的湿度，湿度大会降低电芯及 PACK 的绝缘，严重时会影响电池舱的开停机；密闭性差还会增加空调的功耗。所以，在结构上要考虑舱体的密闭性问题。密闭性容易出现在舱门、空调的进出风口、电缆沟的封堵等部位。

2) 电池舱空调的功能和运行控制模式要有除湿功能，特别是潮湿地带或季节，在调试检修过程或首次投运时，除湿尤为重要。不能用制冷功能来代替除湿，当温度在设定的温度范围内，而湿度又很大时，会影响正常的开停机，单靠制冷来除湿，达不到除湿的效果。

3) 强迫风冷的进出风口的风量、风向、防尘、防虫问题是重点。空调外循环的出风口与进风口要保持一定距离，且方向不能一致，避免出风被吸入引起保护停机；进风口要设置防尘网，且要定期清洗更换，避免阻塞；出风口要设置防虫网，防止停机时虫子进入，要注意防虫网与防尘网的区别。

4) 电池舱空调的配置既要考虑制冷 / 制热功率，还要考虑与 PCS 的匹配，这一点往往容易被忽略。因为同一 PCS 下的堆 / 簇是同步进行充放电运行的，如果多空调启动时刻不一致，再加上空调启停的回差，就会造成 PACK 的温度差异，这种固定的影响，在充放电过程中，会被电芯持续放大，加大电芯 / PACK / 簇的偏压、偏流。所以，同一 PCS 下的堆 / 簇，最好配一套空调系统，若必须配多套，应考虑怎么确保空调的同步起停。

5) 空调的风道要对导风和风阻进行严格计算和仿真，要确保到达每个簇、每个 PACK 的风均匀。温度对电芯的影响是非常大的，偏差最好不超过 2°C，否则会影响到电芯的一致性，对偏流产生一定影响。

6) 内置式舱内空调的内循环冷凝器积水盘的排水设计要合理，不能有积（存）水。以减少舱内的湿度。

7) 并联各簇的连接电缆（包括 PACK 与 PACK 之间的串联电缆和汇流电缆）的电阻值要相等，这也是容易被忽视的。这恰恰是目前各厂家电池舱引起偏流的最主要原因。

连接电缆阻值的影响。其一，因为电缆的线阻是毫欧级的，而电芯的内阻也是毫欧级的，两者在同一个量纲级别上，所以影响是不容忽略的；其二，这种持续固定的影响（哪怕再小）都会在充放电过程中，被电芯放大，这是由电芯的充放电特性所决定的，不同温度下，同一电量的充放电曲线是一个簇（序列），同一温度，不同充放电曲线又会是不同的簇（序列），电芯的内阻表现也是不同的。初期只是一点点（1A），随着不同电量充放电过程的持续，电芯的充放电会累积、放大这个偏差，后期电芯的偏差会越来越大，反而线缆阻值偏差的占比会越来越小，要从源头上减小汇流电缆对偏流的影响。

8) 舱体的结构设计要考虑荷载的重量和位置，要防止地基变形沉降的影响。

9) 电池舱的整舱吊装要设置吊装点和吊具（支架结构强度及吊绳受力和长度）；长途运输要设计舱内电池簇及 PACK 支撑，防止垮塌。

参考文献

- [1] 郭炳焜，徐薇，王先友，等. 锂离子电池 [M]. 长沙：中南大学出版社，2002.
- [2] GB/T 36276—2018 电力储能用锂离子电池 [S]. 北京：中国标准出版社，2018.

(收稿日期：2023-10-18)