

基于 AC/DC 锂电池化成过程节能管理建模与优化

黄锦添

广东南方职业学院, 广东 江门 529000

DOI: 10.61369/ETR.2025510004

摘 要 : 化成是锂电池制造中的必要过程, 每个锂电池化成过程都必须多次充放电。基于化成过程, 提出了一种效率管理方法。建立了以单周期发电成本最小化为目标的优化模型。该优化模型考虑了多个相关约束条件, 同时考虑了 IGBT 充放电机的改造效率和使用价格两个影响因素。通过实例仿真, 证明了 PSO 算法对该数学模型的求解, 所提出的优化策略对电池生产企业的节能和效率优化是有效的。

关 键 词 : 锂电池化成; AC/DC 转换; 节能管理

Modeling and Optimization of Energy-Saving Management for AC/DC Lithium Battery Formation Process

Huang Jintian

GuangDong NanFang Institute Of Technology, Jiangmen, Guangdong 529000

Abstract : Formation is an essential process in lithium battery manufacturing, during which each lithium battery must undergo multiple charge-discharge cycles. Based on the formation process, an efficiency management method is proposed. An optimization model targeting the minimization of single-cycle power generation cost is established. This model takes into account multiple relevant constraints, as well as two influencing factors: the conversion efficiency and usage cost of the IGBT charge-discharge machine. Through case simulation, it is verified that the PSO algorithm can effectively solve this mathematical model, and the proposed optimization strategy is efficient for energy saving and efficiency improvement in battery production enterprises.

Keywords : lithium battery formation; AC/DC conversion; energy-saving management

引言

随着能源和气候变化的挑战越来越大, 如何更好地管理用电负荷, 提高用电效率, 已成为现实和迫切需要解决的问题。再加上风电、储能、电动汽车等对电池需求量巨大的产业的蓬勃发展, 近年来电池产量出现了大幅增长。锂电池以其生产工艺简单、原材料便宜、功率特性好、成本低廉、成本低廉、成本低廉等突出优点, 在通信、铁路运输、电力能源、飞机工业、船舶工业等领域有着广泛的应用, 自放电率低, 高低温性能好^[1]。未来几十年, 锂电池产业仍将有较大的发展和市场潜力。

电池生产作为一个高能耗行业, 其生产过程中的能量损失越来越受到公众的关注。电池的形成过程是锂电池生产过程中的重要步骤之一, 它是以前导为动力, 使新生产的电池的内部化学反应反复循环进行, 以激发电池内部的活性物质^[2]。在电池生产中, 形成过程约占总功耗的60-65%。对许多研究者来说, 提高能量利用率已成为一个亟待解决的问题。为解决这一问题, 提出了一种将成型过程中的多余电能释放到电网中再利用的节能方式, 并在实际生产中得到了广泛应用。但是, 我国明确禁止从低压电网直接向高压电网释放电力。文中提出了一种策略, 即在形成过程中放电的能量通过逆变器反向传输到电网, 以避免浪费在大功率电阻上。然而, 为了防止冲击波对高压电网的冲击, 制造商可能需要为建造合适的电网支付大量费用。因此, 生产成本无法降低, 实施难度较大^[3]。本文提出了另一种基于直流母线拓扑结构的方法, 利用并联大容量储能装置作为能量缓冲器, 降低子网建设成本。这种方法将带来额外的生产成本以及维护费用。本文阐述了一种在不污染电网的情况下, 优化大容量电池形成过程, 实现能量反馈的形成步控制策略。具体来说, 充电过程中释放的能量直接用于并联放电过程。

本文建立了考虑充放电设备(CDM)效率和分时电价的综合能耗优化模型, 旨在降低电能成本, 提高能源利用率。第二点对锂电池的形成过程进行了概述, 第三点建立了电池形成过程的优化模型, 使电池的总耗电量最小。第四点和第五点分别给出了优化算法和实例分析, 最后得出了主要结论。

一、锂电池化成过程分析

目前，锂电池是最受欢迎的电池之一，其制造业是典型的高能耗行业。电力费用占企业总能源成本的90%左右，在用电过程中具有巨大的节能潜力。

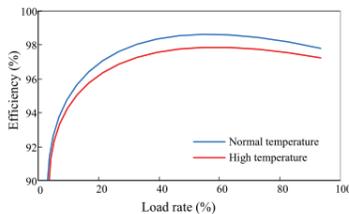
(一) 锂电池的形成过程

在锂电池成品出厂前的生产中，成型工艺是必不可少的。通过优化电池组的形成过程，采用先进的电气设备，可以减小串联电池组之间的差异。通过这些方法可以提高电池的质量，包括使用寿命和初始容量。基本上，化成过程是通过循环充放电使新电池的內部反应，以激活活性物质如 PbO₂和海绵状铅，从而使成品电池能够储存和产生电力。电池的化成过程因不同类型的电池和不同的制造商而异^[4]。不管怎样，电池总是恒流或恒压充电，并以恒流方式放电。不同类型和容量的电池在化成过程中唯一的区别是充放电时间。

(二) 清洁能源发展机制化成过程

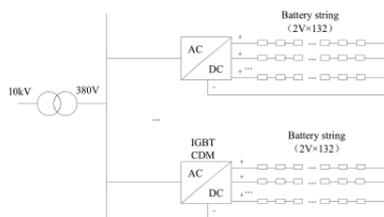
节能的化成过程依赖于理想的清洁发展机制。锂电池用 CDMs 可以看作是一种为蓄电池提供恒流电和耗电负荷的电源，并将能量回馈电网，实现能量再生。针对目前大多数电池生产厂家设备不够先进、能耗大的现状，必须对电气设备进行升级改造，更新生产工艺，以达到节能减排的目的。与可控硅 (SCR) 相比，采用绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 充放电装置具有更高的成形效率，满足了电池制造业未来发展的需要^[5]。

在电池生产过程中，电转换效率是影响 IGBT-CDM 的最重要因素。在化成过程中，转化效率与电能消耗有着直接的关系。如果转化效率不完善，经济成本也会相应增加。因此，高水平的转化效率是节能的关键。



从图1可以看出，转换效率的趋势不是随负荷率而变化的，在负荷率从0%到30%的区间内，转换效率急剧上升。当负载率从30%增长到100%时，转换效率保持在较高水平，甚至在接近结束时会降低一些^[6]。此外，忽略其他因素，操作温度的升高会使转化效率下降。

二、锂电池化成过程优化模型的建立



形成过程的主要设备是 CDM。每台机器都装有多串电池。假设充电电压为 400 V，则意味着每串有 132 个电池，而成品为 2V 电池。显然，串中的每个电池都能获得约 3V 的电压。地层的具体结构如图 2 所示。

(一) 假设条件

为了简化模型，我们进行以下假设：

- 每个 CDM 可以随时启动或停止，没有时间限制，没有时间限制。忽略了由启停引起的温度升高和使用寿命降低，我们仅在每次启停发生时才考虑启停损失。
- 将每串电池都当作一个目标，而忽略它们的内部差异。进行组装时，电池永远不会崩溃。
- 不要考虑电能质量。
- 每串电池具有相同的形成周期，但它们的形成功率曲线可能不同。
- 忽略更换新电池的时间。目标时间段是任何完整的编排周期。
- IGBT CDM 的效率受温度和负载率的影响，但在本文中仅考虑负载率。

(二) 目标函数

由于每个串的形成曲线都不相同，因此不同串中的电池几乎无法同时充电。所有的弦充电或站立效率低下。为避免这种情况，我们采取了几种措施：

- 根据分时电价，我们更改每个串的形成开始时刻，以使更多的电池在底部负载期间可以充电，并在高峰负载期间保持站立或放电。
- 优化每根琴弦的编组开始力矩，以避免所有琴弦电池同时放电。
- 由于高负载率提高了转换效率，因此我们人为地更改了连接到每台 IGBT 机器的串号，以将负载率保持在较高水平^[7]。

在本文中，形成周期 T 是目标时间段。建立了一个最佳模型，以最大程度地减少形成过程的电费

$$C = \min_{u_j(t)} \left\{ \rho(t) \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^J \left(\frac{u_j(t) P_j(t)}{\eta(P_j(t))} + C_j(t) \right) \right\}$$

其中，每个间隔都用 t 表示，t = 1, ..., T，而 P(t) 表示 TOU 电价。对于每个以 j 为索引的 CDM，P(t) 表示负载功率，C(t) 表示启停损耗，u(t) 表示状态变量，当机器工作时等于 1，当机器停止时等于 0。CDM j 的负载功率为

$$P_j(t) = \sum_{k_i(t)=j} P_i(t), \quad k_i(t) = \{1, \dots, J\}$$

三、模型求解算法

通过粒子群优化 (PSO) 算法求解该模型。在优化模型中，k(t) 和 t 表示优化变量，适应度函数是目标函数 C。为了简化计算

过程，我们使用特殊的电池组分配方法来优化 $k(t)$ ：

- 首先，根据其功率值在每个时间间隔对所有电池串进行分类；
- 然后，将最大的两个字符串和最小的两个字符串成对组合，其余的对可以以相同的方式组合；
- 最后，将字符串对连接到每个 CDM。

该方法的优点是每个 CDM 具有相似的负载功率，因此几乎不会发生功率释放。

PSO 的应用是这样的：首先，我们为 t_{0i} 预设一个随机数，并找出 $k(t)$ 。然后让计算机判断组合 $(t, k(t))$ 是否满足给定约束。如果不是，则再次为 t_{0i} 设置一个数字，直到组合满足所有约束条件为止。这些组合是粒子群。将从群体中挑选出最佳粒子，然后通过多次迭代将其应用于优化算法。最后，我们可以找到使整体成型作业成本最低的最佳解决方案。

关键参数的值如下：粒子群大小 $M = 100$ ，惯性因子（每个粒子的速度） $w = 0.6$ ，学习因子 $C1 = C2 = 2$ ，收敛指数 $e = 0.0005$ 。

电池的形成周期分为 T 个间隔作为调度周期。如果让最小切换间隔等于调度周期，则可以消除两个约束：(1) 切换间隔约束；(2) 切换时间约束。

四、案例研究

(一) 案例参数

以某铅酸蓄电池企业形成过程的管理模型和策略为例。该企业的主要产品是 2 V 电池，由 IGBT CDM 以恒定电流形成模式充电。充电电压约为 400 V，每串中有 132 个电池^[9]。整个成型过程持续 100 多个小时，而充电，放电，静置过程则交替进行。另外，精确地设置形成电流和电压以确保电池的质量。

以两种 2 V 电池为例，它们具有不同的容量（400 Ah 和 500 Ah）和相同的形成周期。根据实际操作数据，表 1 和表 2 列出了形成过程的信息（电压，电流，持续时间等）。

序号	形成过程	电流 (A)	时间间隔 (h)	电压 (V)
1	充电	16	4	210-215
2	充电	48	40	215-265
3	充电	20	8	265-268
4	暂停	0	1	-
5	放电	40	8	204-197
6	充电	48	8	206-272
7	充电	24	36	272-275
8	暂停	0	1	-
9	放电	40	10	207-191
10	充电	48	11	216-260
11	充电	20	4	260-271
12	充电	4	4	271

该企业配备了两种 IGBT 变频驱动器 (CDM)。本研究考虑了其中一种容量为 60 千瓦的 IGBT CDM。根据操作手册，表 3 列出了 IGBT CDM 的传输效率与负载率之间的关系数据，据此可以拟合出传输效率函数曲线^[9]。我们还可以从图 1 中的拟合函数曲线中获取每个负载率的传输效率值。

序号	形成过程	电流 (A)	时间间隔 (h)	电压 (V)
1	充电	20	4	211
2	充电	50	45	221-268
3	充电	25	8	253-264
4	暂停	0	1	-
5	放电	50	8	202-205
6	充电	50	10	206-273
7	充电	30	32	273-274
8	暂停	0	1	-
9	放电	50	8	207-191
10	充电	50	12	216-260
11	充电	25	4	271
12	充电	5	2	271

负载率 (%)	效率 (%)
5	94.8
10	97.04
15	97.66
20	98.01
25	98.18
30	98.32
50	98.61
75	98.63
100	98.58

模型中的参数如下：

- 启停损耗设为 0.5 kW，即 $C(t) = 0.5$ 。
- 5 个 CDM 并行工作，并且 18 串电池连接到这些 CDM。
- 每个 CDM 的容量为 60 kW。
- 假设前 8 串电池遵循第一种电池形成模型，而其余 10 串遵循第二种电池形成模型。
- 每个 CDM 最多可以连接 4 串电池。
- 分时电价：高峰时段持续 16 小时，价格为 1.2 元 / 千瓦时，而底层时段持续 8 小时，价格为 0.56 元 / 千瓦时。
- 处罚价格定为 3 元 / 度。
- 编队时间 $T = 135$ 小时分为 135 个发送间隔。

(二) 对优化模型结果的解释

根据上述步骤，我们可以解决地层管理优化模型。为了进行比较，进行了两个优化：在优化 I 中，仅 t_{0i} 被优化，而 $k(t)$ 保持不变；在优化 II 中，同时考虑了两个优化变量 t 和 $k(t)$ 。也就是说，我们不仅优化了每个电池组的开始时刻，而且优化了

电池组分配方法。优化之前的功率曲线如图3所示，最优地层功率曲线如图4和5所示。

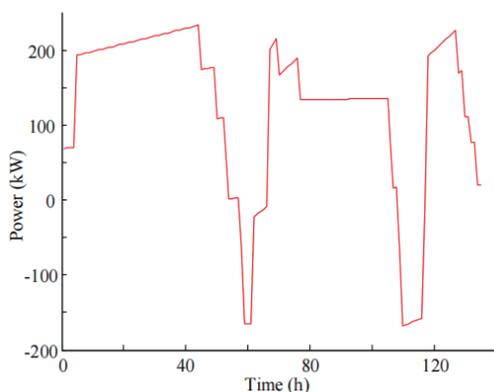


图3 优化前的功率曲线

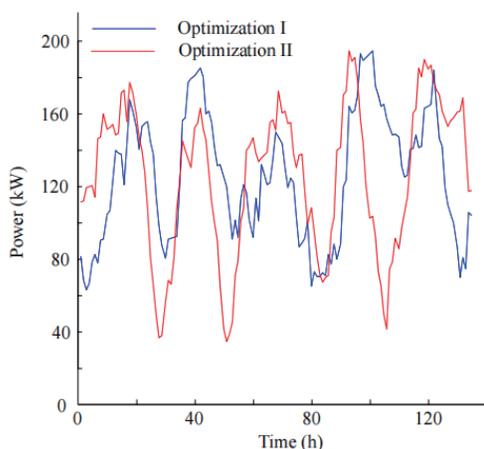


图4 优化I和II的功率曲线

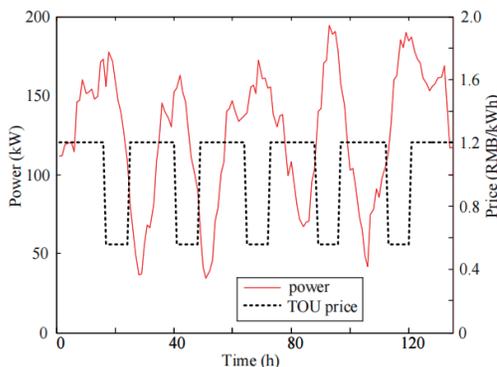


图5 优化II的功率曲线和分时电价

表4 优化前后的结果对比

结果对比	优化前	优化I	优化II
结构构造成本(元)	27994.03	18887.31	18617.1
峰值功率(KW)	233.09	194.71	194.22
谷值功率(KW)	-168.03	62.99	34.35
峰谷功率差(KW)	401.12	131.72	159.87
清洁发展机制(CDM)的平均效率	87.17%	87.96%	87.96%
最大功率释放时间(h)	18	0	0

如表4所示，优化I和II后的电力成本降低了，这意味着电池

的生产成本降低了。同样，我们发现优化后不再发生由地层放电引起的功率释放。这是因为我们更改了成型过程的开始时刻，并使用了特殊的电池组分配优化方法。优化前后的峰谷功率差也会减小。从图4中，我们推断出整个编队功率分布偏向底部装载时间段。当电价低时，总功耗的特征呈现出较高的趋势，而在峰值电价内时，总体功耗的特征则较低，这符合目标函数的目的。

但是，通过将优化I与II进行比较，当采用电池分配方法时，峰值功率和底功率值之间的差异将从131.72 kW扩大到159.87 kW。那是因为最佳的电池分配越多，分时电价就越具有影响力，诱使用电者将负载转移到价格较低的时间段以节省电费^[10]。因此，将出现一个新的负载峰值，并可能导致电源崩溃。这是提出的优化策略的特征：对于铅酸电池制造商而言，它对功率曲线的峰值和谷值之间的差异没有任何限制。

五、结论

本文建立了一个综合的形成过程优化模型，该模型考虑了CDM的转换效率和分时电价，以降低总体形成电力成本。基于分时电价，对形成开始时刻进行了优化，以在底部价格时间内产生大电流，而在峰值价格时间区间则形成小电流。同时，根据CDM转换效率曲线，为连接到CDM的电池串应用合理的分配方法，以避免由于轻微的负荷率而导致CDM的效率降低。在一般的情况下，提出的优化模型将对铅酸电池制造商降低总成本有很大的帮助。

参考文献

- [1] 张绮兰. 三元锂电池碳排放分析及改进研究[J]. 汽车与新动力, 2025, 8(03): 91-96.
- [2] 谢赛男, 倪语涵. 锂电池项目中除湿机节能的应用及思考[J]. 中国战略新兴产业, 2024, (27): 108-110.
- [3] 锂电池碳足迹核算体系正式发布[J]. 信息技术与标准化, 2024, (07): 6.
- [4] 李维波, 彭康, 张茂杰, 等. 基于超级电容和锂电池的消磁电源能量回馈控制策略[J]. 中国舰船研究, 2023, 18(06): 247-256.
- [5] 王文, 罗秋菊, 吴学渊, 等. 雄安新区城市计算中心中压AC直转通信DC+磷酸铁锂电池储能系统的应用探索[J]. 建筑科学, 2023, 39(01): 84-92.
- [6] 王津, 王文斌. 基于DC/DC双向变换器的多电池主动均衡技术[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(10): 40-45.
- [7] 杜鹏英, 李静, 陈慧. 锂电池寿命与整车节能双目标优化的FCEV能量管理策略[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(12): 120-125.
- [8] 张廷尧, 王晓娜, 侯德鑫, 等. 单DC/DC升压型便携式PECT电源系统设计[J]. 电源技术, 2021, 45(10): 1348-1350+1370.
- [9] 杜培德, 李晓露, 朱文锦, 等. 一种模拟3V锂电池供电的DC-DC设计[J]. 电子技术应用, 2020, 46(09): 47-50.
- [10] 宋春宁, 付栋, 李欣. 双向全桥DC/DC变换器在直流微电网中的应用[J]. 电测与仪表, 2020, 57(18): 128-132.