

电动汽车用锂离子电池组充电方法

文 锋,姜久春,张维戈,郭慧萍
(北京交通大学电气工程学院,北京 100044)

[摘要] 提出了电池管理系统和充电机协调配合的一种新型充电模式,由电池管理系统根据电池的当前状态计算电池组的最大允许充电电流,并将该数据实时地传送到充电机,控制充电机改变充电策略和输出电流,实现优化充电。分析了影响电池充电电流的因素及其最大允许充电电流的计算方法。

关键词: 电动汽车;电池组;电池管理系统;优化充电

Charging Method for Li-ion Battery Pack in Electric Vehicles

Wen Feng, Jiang Jiuchun, Zhang weige & Guo Huiping

School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044

[Abstract] A new charging mode combining and coordinating battery management system and battery charger is proposed. Specifically, battery management system calculates the maximum allowable charging current according to the current state of batteries and then sends it to charger real time to control the charging strategy and output current of charger, thus the optimized charging is realized. Factors influencing charging current and the calculation method of allowed maximum charging current are also analyzed.

Keywords: electric vehicle; battery pack; battery management system; optimized charging

前言

电动汽车事业取得了长足的进步,但是电池系统的相对脆弱是电动车发展的瓶颈^[1]。锂电池具有能量密度和体积密度高、工作电压高、无记忆效应、自放电低又无环境污染问题的优点,是电动汽车的理想动力源,但锂电池的抗过充电能力较铅酸电池差。传统基于电池组端电压的充电方法使得电池组中部分电池在充电过程中存在严重的过充电现象,使得电池的容量下降迅速,电池的寿命严重缩短,车辆的运行成本增加,阻碍了电动汽车的发展。文中提出电池管理系统和充电机协调配合的充电模式能有效地解决电池的过充电问题,提高电池充电的安全性,对于电池循环次数的增加有重要的意义。

1 问题的提出

长期以来,铅酸蓄电池作为主要的动力源或后备电源得到了广泛的应用。铅酸电池的抗过充能力较强,可通过充电后期的涓流充电对电池进行均衡。20世纪90年代,镍氢电池和锂电池出现以后,多用于手机、笔记本电脑以及数码相机等小功率场合。

电动汽车对电池的要求更高,原因是:(1)需要容量大;(2)大量串并联使用;(3)电池的工作电流大且变化迅速;(4)工作环境恶劣,包括道路颠簸和散热条件有限等。由于在生产和使用电池过程中,单体电池之间会因为初始容量、发热以及自放电等不完全相同而导致实际容量的差异,且容量越低的电池在使用过程中越容易出现过充电和过放电,容量衰减越严重,表现出正反馈,使得电池的一致性越来越差;为了达到均衡的效果,均衡器的容量、体积和质量都大,这与车辆空间以及高的运行效率之间形成矛盾。

由于锂电池的过充电能力较弱,不能像铅酸电池一样通过充电后期的涓流充电实现均衡,所以即

便在电池出厂时进行了严格的筛选,使用一段时间后,单体电池之间的容量依然会出现差异,这样在充电过程中,势必出现部分电池先充满电的现象发生。基于电池组端电压的充电方法由于并不能及时有效地得知电池组中是否有个别电池已经充满电,使得先充满电的电池出现过充电。即便是铅酸电池,采用基于端电压的充电模式也会因为发生了严重的过充电而导致电池大量发热和电池的容量衰减迅速,寿命严重缩短。

对于锂离子电池而言,过充电会使得电池的电解液分解,产生的气体压力增加、电池的温度迅速上升。继续充电会导致电池的隔膜热闭合、隔膜溶解、电池的正负极断路大量发热,使得电池着火甚至爆炸,损毁电池^[2]。锂电池的循环寿命和容量衰减问题得到广泛关注^[3-6]。

2 协调配合的充电模式

电池管理系统(BMS)是对电池的性能和状态了解最为全面的设备,所以将BMS和充电机之间建立联系,就能使充电机实时地了解电池的信息,从而有效地解决部分电池的过充电问题。

文中提出BMS和充电机协调配合充电模式的原理为: BMS通过对电池的当前状态(如温度、单体电池电压、电池工作电流、一致性以及温升等)进行监控,并利用这些参数对当前电池的最大允许充电电流进行估算;充电过程中,通过通信线将BMS和充电机联系起来,实现数据的共享; BMS将总电压、最高单体电池电压、最高温度、温升、最大允许充电电压、最高允许单体电池电压以及最大允许充电电流等参数实时地传送到充电机,充电机就能根据电池管理系统提供的信息改变自己的充电策略和输出电流。

当BMS提供的最大允许充电电流比充电机设计的电流容量高时,充电机按照设计的最大输出电流充电;当电池的电压、温度超限时,BMS能实时检测到并及时通知充电机改变电流输出;当当前的充电电流大于最大允许充电电流时,充电机开始跟随最大允许充电电流,这样就有效地防止了电池过充电,达到延长电池寿命的目的。充电过程中一旦出现故障,BMS可以将最大允许充电电流设为0,迫使充电机停机,避免发生事故,保障充电的安全。

在该充电模式下,既完善了BMS的管理和控制功能,又能使充电机根据电池的状态,实时地改变输

出电流,达到防止电池组中所有电池发生过充电以及优化充电的目的,同时充电机具有了更好的适应性,充电机不需要区分电池的类型,只需要得到BMS提供的电流指令就能实现快速、安全的充电,提高了充电的安全性和智能化水平,还简化了充电工作人员设置充电参数等繁琐的工作。

3 最大允许充电电流

锂电池组是一个复杂的系统,其最大允许充电电流与电池容量 Q 、温度 T 、电池的荷电状态 SOC 、电池的老化程度 SOH 以及电池的一致性 EQ 均有重要关系,且表现出较强的非线性,所以电池的最大允许充电电流 I 为

$$I = f(Q, T, SOC, SOH, EQ) \quad (1)$$

3.1 容量

仅从充电电流大小来衡量电池性能是不恰当的,容量大的电池的充电电流会增加,所以引入倍率或时率来衡量电池的充电电流,有

$$I = k_c Q_r \quad (2)$$

式中 k_c 为倍率系数,与电池的类型和性能有关,锂电池大约为0.3~1; Q_r 为电池的额定容量。

3.2 温度

温度与电池的最大允许充电电流可分为3段^[3,5,7]: (1)温度在20~45(不同厂家的电池略有差异,下同),这是电池的最佳工作温度范围,电池的倍率特性好而且容量衰减较小;(2)温度低于20时,电池的内阻上升,电池的可接受充电电流降低;(3)温度高于45以后,虽然电池可接受的充电电流可能更大,但是电池的容量衰减大大加速^[6],因此也不适合电池充电。所以,电池的温度对最大允许充电电流的补偿系数 k_t 为

$$k_t = \begin{cases} k_{t1} e^{k_2 T}, & -20 < T < 20 \\ 1, & 20 < T < 45 \\ (50 - T) / 5, & 45 < T < 50 \\ 0, & T < -20 \text{ 或 } T > 50 \end{cases} \quad (3)$$

式中 k_{t1} 、 k_2 为温度系数,不同厂家的略有不同。按照0时电池的电流下降到20时的1/3考虑,可得到 $k_{t1} = 0.33$, $k_2 = 0.0549$ 。

3.3 荷电状态

电池的荷电状态与充电电流的关系可分为3个阶段进行描述:(1) SOC 低端(如 $SOC < 10\%$),电池的内阻较大,电池不适合大电流充电;(2)电池的

SOC中间段 (如 $10\% < SOC < 90\%$), 电池的可接受充电电流增加, 电池可以以较大的电流充电; (3) 电池的 SOC 高端 (如 $SOC > 90\%$), 为了防止锂的沉积, 电池可接受的充电电流下降^[4]。电池的 SOC 对最大允许充电电流的补偿系数 k_{SOC} 为

$$k_{SOC} = \begin{cases} k_{SOC1} + \frac{(1 - k_{SOC1}) \times SOC}{10}, & 0 < SOC < 10\% \\ 1, & 10\% < SOC < 90\% \\ 9.1 - 0.09SOC, & 90\% < SOC < 100\% \\ 0.1, & SOC = 100\% \end{cases} \quad (4)$$

式中 k_{SOC1} 为 $SOC = 0$ 时的补偿系数。由于电池充电过程充电效率 < 1 , 所以电池的 $SOC = 100\%$ 时, 电池可能尚未完全充满, 为了更加充分地利用电池的容量, 需要对电池进行补充充电, 同时为了防止过充电, 电池的充电电流限制到约最大充电电流的 $1/10$, 这时停止充电的条件由最高单体电池的电压控制。

3.4 SOH

电池的 SOH 主要考虑电池的容量衰退和电池内阻的增加。对于容量的下降, 采用容量修正系数 $k_{SOH1} = QQ_r^{-1}$ 进行修正; 对于电池内阻的增加 (仅考虑欧姆内阻), 通过热的方式进行补偿, 电池的发热 $P = I^2R$, 所以内阻对电池的充电电流的补偿系数为 $k_{SOH2} = kR^{-0.5}$ 。电池的最大允许充电电流对 SOH 的补偿系数 k_{SOH} 为

$$k_{SOH} = k_{SOH1} k_{SOH2} = kQQ_r^{-1} R^{-0.5} \quad (5)$$

3.5 一致性

电池使用一段时间以后, 电池的一致性会变差。电池组的最大允许充电电流 I_{max} 为

$$I_{max} = \min(I_{max1}, \dots, I_{maxj}, \dots, I_{maxn}) \quad (6)$$

式中 I_{maxj} 表示第 j 节电池的最大允许充电电流。

综上所述, 电池的最大允许充电电流 I_{max} 为

$$I_{max} = \min(k_{c_j} Q_r k_{ij} k_{SOC_j} k_{SOH_j}) \quad (7)$$

式中下标 j 表示为第 j 节电池的的参数。

4 应用实例

所提出的充电方法在北京 121 路电动公交充电站得到试行。车辆的电池配备情况: 电池容量 $360 \text{ A} \cdot \text{h}$; 电池类型为锰酸锂电池; 串联电池数为 104 节; 充电端电压限制为 437V ($4.2 \times 104 = 436.8\text{V}$); 最大单体电压限制: 4.23V , 充电机最大输出电流为 100A 。充电站的系统结构见图 1。车载电池管理系统和充电机之间通过 CAN 总线实现数据的交换。充电机和监控 PC 相连, 实现充电机的监控

和起停控制等。充电过程被 PC 机记录, 并进行数据库管理, 监控 PC 机与打印机连接, 实现统计报表的打印。

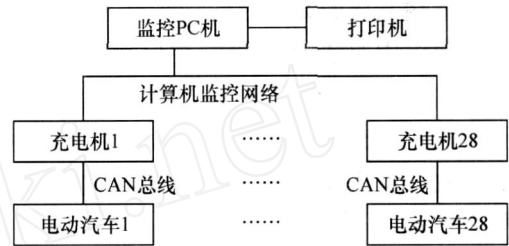


图 1 充电站系统结构

电池管理系统和充电机协调配合的充电模式下的实际充电曲线参见图 2。厂家提供的最大充电电流为 150A , 所以 $k_c = 150/360 = 0.4$; 由于电池的充电过程温度为 $34 \sim 39^\circ\text{C}$, 所以 $k_t = 1$; 充电电流电池的内阻约为 $50\text{m}\Omega$, 电池的容量下降小, 所以 $k_{SOH} = 1$; 最高单体电池电压和最低电池电压之间的电压差约为 100mV ; 电池的起始 $SOC = 48\%$, $k_{SOC} = 1$; 当 $SOC = 90\%$ 以上, k_{SOC} 开始下降, 依据式 (4), 最大允许充电电流依据 k_{SOC} 线性下降, 从 $SOC = 90\%$ 的 150A 下降到 $SOC = 100\%$ 的 15A 。

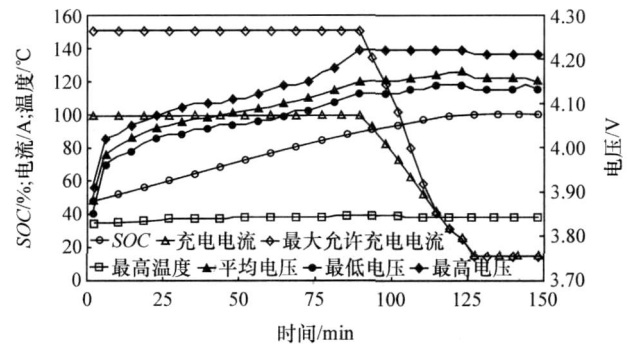


图 2 实际充电曲线

从图 2 可以看出: 在充电初期, 电池最大允许充电电流较高, 所以充电机按照最大设计电流 (100A) 输出。为了防止部分电池过充电, 当最高电池单体的电压上升到限制电压 (4.23V , 电池厂家提供数据) 时, 虽然电池的端电压为 431V (图中平均电压仅为 4.15V), 未达到限制电压 437V , 但是充电电流开始下降, 并在以后的过程中可以看到, 最高单体电池的电压一直未超过 4.23V , 有效地防止了电池出现过充电。另外, 在充电的后期, 当电池的最大允许充电电流下降到充电电流以下后, 充电机的输出有效地跟踪了最大允许充电电流, 当电池的 $SOC = 100\%$ 后, 可以看到, 充电电流降到 15A , 进行充电效率的

补偿充电。可以看到,单体电池的电压有一定的降落,当单体电池的最高电压再次上升到限制电压(4.23V)或电池组端电压到限制电压(437V)后充电结束。

5 结论

分析了电池发生过充电的原因并提出了电池管理系统和充电机协调配合的充电模式,有效地解决了充电机充电的盲目性,通过充电机和电池管理之间的数据通信,使得充电机能跟随电池的当前状态调节输出电流,从而杜绝电池出现过充电,当电池出现过温、过压等严重故障时,电池管理系统能及时通知充电机停机,防治进一步过充电而发生事故,保障了充电的安全性。该充电方法在北京121路电动公交车站运用,充电过程未出现电池冒烟或着火事故,证明该方法可有效杜绝电池的过充电,能保障电池充电的安全性。

(上接第791页)

要功能,尤其是对锂离子动力电池组来说,其安全管理更加重要。

对电池组的安全管理是在对电池组的故障诊断基础上实现的。电池管理系统根据电池的单体电压、总电压、电流和温度等信息对电池运行状态进行评估和预测,判断电池故障状态,并生成故障码,通过CAN总线发送到整车控制器和显示仪表上。

为便于判断,把电池可能出现的故障分为两级,级和级故障:级故障为严重故障,电池管理系统监测到严重故障时,将通过CAN总线向整车控制器发送切断强电请求,如果故障持续了一定时间整车控制器没有做出相应的动作,电池管理系统则自行切断成组继电器以保证电池组的安全;级故障为报警故障,当电池管理系统通过CAN总线发送级故障时,整车控制器应调整控制参数,减小电池输出电流与功率,避免电池受到进一步的伤害。

4 结束语

电池管理系统是动力电池和整车之间的联系桥梁,配置电池管理系统能够提高动力电池的性能和可靠性。文中针对所应用的锂离子动力电池组的特点,设计了符合整车要求的电池管理系统,采用双

参考文献

- [1] Affanni Antonio, Bellini Alberto, et al Battery Choice and Management for New-Generation Electric Vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(5): 1343 - 1349.
- [2] 杨军,解晶莹,王久林.化学电源测试原理与技术[M].北京:化学工业出版社,2006.
- [3] Ramadass Premanand Capacity Fade Analysis of Commercial Li-ion Batteries[D]. Columbia: University of South Carolina, 2003.
- [4] Zhang Sheng Shui The Effect of the Charging Protocol on the Cycle Life of a Li-ion Battery[J]. Journal of Power Sources 2006, 161: 1385 - 1391.
- [5] Zhang S S, Xu K, Jow T R. Charge and Discharge Characteristics of a Commercial LiCoO₂-based 18650 Li-ion Battery[J]. Journal of Power Sources 2006, 160: 1403 - 1409.
- [6] Ramadass Premanand, Haran Bala, White Ralph, et al Capacity Fade of Sony 18650 Cells at Elevated Temperatures Part II Capacity Fade Analysis[J]. Journal of Power Sources 2002, 112: 614 - 620.
- [7] Zhang S S, Xu K, Jow T R. Study of the Charging Process of a LiCoO₂-based Li-ion Battery[J]. Journal of Power Sources 2006, 160: 1349 - 1354.

CAN总线的分布式结构,减少了系统的连线,便于安装调试。设计的电池管理系统采用可靠性高、抗干扰强的采样电路对动力电池组的单体电池电压、总电压、电流和温度等电池信息进行采集,根据这些电池信息采用了基于Kaman最优滤波理论的SOC估计方法对电池SOC进行估计,采用故障分级措施对电池进行故障诊断,实现动力电池的安全管理。该电池管理系统已在天津清源公司研制的纯电动汽车上成功应用。

参考文献

- [1] 陈清泉,等.现代电动汽车技术[M].北京:北京理工大学出版社,2002.
- [2] 吴红杰.混合动力电动车镍氢动力电池管理技术[D].北京:北京航空航天大学,2006.
- [3] 吴友宇,等.基于CAN总线的分布式动力电池管理系统[J].汽车工程,2004,26(5).
- [4] 邬宽明.CAN总线原理和应用系统设计[M].北京:北京航空航天大学出版社,1996.
- [5] 齐国光,等.电动汽车电量计量技术的研究[J].清华大学学报(自然科学版),1997,37(3).
- [6] 王志贤.最优状态估计与系统辨识[M].西安:西北工业大学出版社,2004.
- [7] 查全性.电极过程动力学导论(3版)[M].北京:科学出版社,2002.