

考虑锂电池寿命的插电式混合动力客车能量控制策略

王文明, 彭再武, 宋超, 文健峰, 杨杰君, 文多
(湖南中车时代电动汽车股份有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘要: 为了提高锂电池储能系统的使用寿命, 提出了一种串联插电式混合动力客车能量控制策略, 其在电量维持阶段, 整车控制采用功率跟随的控制策略, 并统计锂电池充放电 Ah 量变化, 控制辅助动力单元功率输出大小, 实现动力系统电量自平衡; 根据车辆每天运行里程以及流经锂电池的 Ah 量, 自动调节锂电池系统的充电电流到达限值, 从而控制流经锂电池的能量, 延长锂电池寿命, 满足车辆全寿命周期充放电次数的目标。经评估, 在制动工况极度频繁的条件下, 虽然车辆油耗有一定程度的提高, 但是其全寿命周期使用成本更低。

关键词: 串联插电式电动车; 锂电池寿命; 充放电 Ah 量; 能量控制策略; 电量保持

中图分类号: U469.72; TM912

文献标识码: A

文章编号: 2096-5427(2018)01-0046-06

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2018.01.009

Energy Control Strategy for Plug-in Hybrid Electric Bus Based on Lithium Battery Cycle Life

WANG Wenming, PENG Zaiwu, SONG Chao, WEN Jianfeng, YANG Jiejun, WEN Duo
(Hunan CRRC Times Electric Vehicle Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412007, China)

Abstract: It presented an energy control strategy for plug-in series hybrid electric bus, in view of the limited battery cycle life. In the stage of charge-sustaining, the vehicle controller mainly adopts the power following strategy, combined with counting up the charge and discharge Ah of lithium battery, and controls the output power of APU system, then achieves self balancing of power system. According to the statistical data of daily mileage and the amount of Ah flowing through the lithium battery, the vehicle control strategy automatically adjusts the charging current limit to the lithium battery system, so as to control the energy flowing through the lithium battery, and achieves the purpose that lithium battery cycle times meet the vehicle life cycle. Although the fuel consumption of the vehicle increases with a certain extent under specific working conditions, however, the cost of the vehicle is lower during the life cycle.

Keywords: plug-in series hybrid electric bus; lithium battery cycle life; charge and discharge Ah; energy control strategy; charge-sustaining

0 引言

插电式混合动力汽车可以通过充电装置从电网获取电能, 具有一定的纯电动行驶能力, 因较多地使用电能, 燃料消耗量低, 节能减排效果显著, 在目前充电设施不完善的地区, 是一种最易接受的电动汽车驱动模式^[1-3]。

目前插电式混合动力汽车储能装置主要以锂电池为主, 其充放电使用寿命通常在 2 000~6 000 次之间。为保障

车辆在全生命周期内的正常使用, 如何控制储能系统的充放电次数, 是降低车辆使用成本的最重要因素^[4]。本文以一款串联插电式混合动力系统结构^[5]的公交客车为研究对象, 提出一种能量控制策略, 使储能系统充放电次数满足车辆全生命周期的使用需求。

1 插电式混合动力系统结构及工作原理

串联插电式电动车动力系统结构如图 1 所示, 主要由辅助动力单元 (auxiliary power unit, APU) 系统、辅助动力系统、储能系统及电驱动动力系统组成。

收稿日期: 2017-11-30

作者简介: 王文明 (1986-), 男, 工程师, 主要从事新能源汽车整车控制及动力系统匹配设计工作。

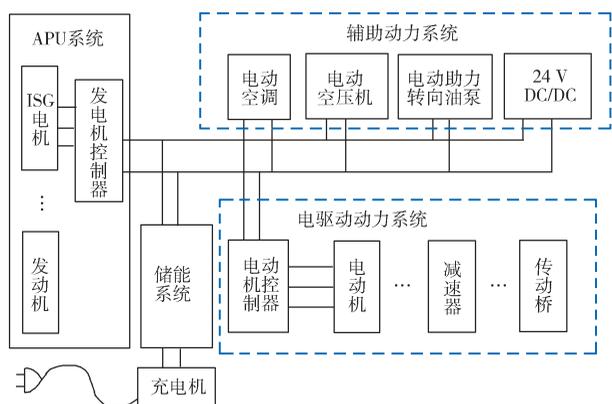


图1 串联式电动车动力系统结构

Fig.1 Power system structure of series hybrid electric vehicle

(1) 辅助动力单元(APU)系统由发动机、ISG电机及发电机控制器组成。发动机驱动ISG电机(发电机)发出三相交流电,经过发电机控制器转换为直流电,同时与储能系统并联,形成串联式动力系统两个能量源,为整车提供电能来源。当发动机需要启动时,由发电机带动发动机启动。

(2) 电驱动动力系统主要由电机、电机控制器等组成。电机控制器将直流电逆变成三相交流电为电机供电,并实现对电机的控制,通过电机输出转矩,驱动车轮,其中电机、电机控制器及减速箱构成电机驱动系统,形成串联式动力系统唯一动力源。

(3) 辅助动力系统包含了电动空调、电动助力转向、电动空压机、24V DC/DC等系统,实现车辆辅助系统电动化。在发动机停机时,车辆能以纯电动方式运行。

(4) 储能系统主要由锂离子电池、电池管理系统(BMS)等组成。BMS实现锂电池的能量管理与监控,储能系统整体实现制动能量的回收并为车辆提供电能来源。

对于串联插电式动力系统,比较合理的能量控制过程主要包含两个阶段^[6-7]:(1)电量消耗阶段,即CD阶段(charge-depleting);(2)电量维持阶段,即CS(charge-sustaining)阶段,如图2所示。当插电式动力系统锂电池储能通过外接充电的方式充满电后,整车控制策略将根据锂电池电量调整APU系统功率输出,逐

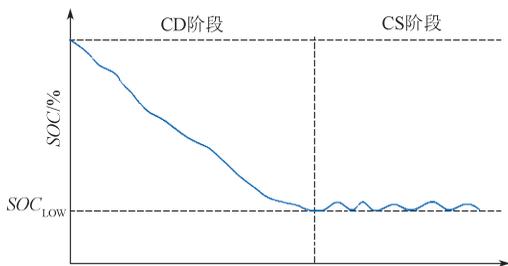


图2 串联插电式能量控制策略 CD-CS 阶段

Fig.2 CD-CS of the energy control strategy

for series hybrid electric vehicle

步释放锂电池存储的电能。当电量下降到一定程度时,APU系统将提高功率输出,成为车辆的主要能量来源,同时维持锂电池荷电状态(state of charge, SOC)在一个合理高效的区间。在没有外接充电装置的情况下,车辆一直工作在CS阶段,如何更好地使用锂电池将非常重要。

2 锂电池充放电寿命对能量控制的要求

本文所述串联插电式动力系统采用磷酸铁锂电池储能系统,电压537.6V,电池容量为100Ah,采用水冷散热系统、恒温控制。某款磷酸铁锂电池系统试验寿命曲线如图3所示,该电池在25℃环境温度下充放电寿命最长;在允许锂电池容量衰减20%的情况下,锂电池100%放电深度(depth of discharge, DOD)时,其充放电次数为5000次左右。

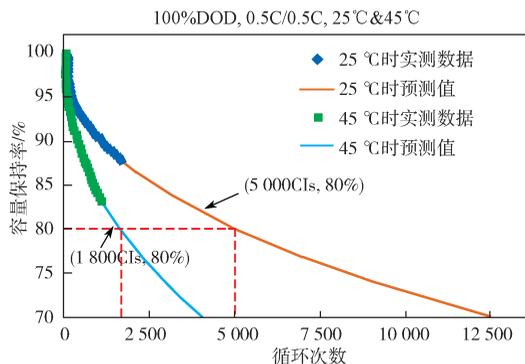


图3 某款锂电池寿命曲线

Fig.3 Life curves of a lithium battery

串联插电式混合动力城市公交客车在运行过程中基本上不可能按照100%DOD充放电,电池系统绝大部分时间处于最佳的浅充浅放状态。利用流经锂电池累计Ah量与电池额定Ah量的比值来评估锂电池的充放电次数^[8-9]:

$$C = \frac{\int I_{放} dt}{E} \quad (1)$$

式中: C ——锂电池充放电次数; $I_{放}$ ——锂电池放电电流; E ——锂电池额定容量,Ah。

在锂电池容量衰竭不超过20%的状态下,要求流经锂电池的能量 W 应满足式(2)所示条件。

$$W = \int I_{放} dt < 5000 \times 100 \text{ Ah} \quad (2)$$

串联插电式混合动力城市客车一般使用年限为8年。为保证8年内锂电池容量衰减不超过20%,平均百公里流经锂电池的能量 W_0 需满足式(3)所示条件。

$$W_0 < \frac{W}{8 \times 365 \times M} \times 100 \quad (3)$$

式中: M ——平均每天运行里程。

根据式(3),每百公里流经锂电池的Ah量应满

足表1的需求。

表1 每百公里流经锂电池 Ah 量需求
Tab.1 Ah amounts flowing through the lithium battery per 100 km

车辆平均每天运行里程 /km	百公里流经锂电池能量/(Ah/100 km)
100	171.3
125	137.04
150	114.2
175	97.9
200	85.6
225	76.1
250	68.5
275	62.27
300	57.08

为满足插电式混合动力城市客车8年全生命周期使用要求,必须根据工况及车辆平均每天运行里程自动控制流经锂电池的能量,为此,需要分析动力系统中影响流经锂电池能量的因素。

3 影响流经锂电池能量的因素

为减少流经锂电池的能量,在CS阶段,整车控制必须采用功率跟随的控制策略;同时分别统计充电时进入锂电池的Ah量和放电时从锂电池输出的Ah量,利用两者的差值控制APU功率输出大小,并最终保持电量的自平衡。

3.1 整车能量控制策略

整车能量控制策略分以下两种情况。

(1)若电池SOC > $x_{SOC,max}$ (电量平衡阶段允许锂电池SOC上限),则不允许APU系统主动给锂电池进行充电,主要依靠制动能量回馈保持电量自平衡^[10]:

$$\left. \begin{aligned} P_m &= P_a + P_o \\ P_{Li} &= P_o + P_{辅} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: P_m ——电机驱动系统需求功率; P_a ——APU系统输出功率; P_o ——从锂电池系统输出给电机驱动系统的功率; P_{Li} ——锂电池输出功率; $P_{辅}$ ——辅助系统消耗功率。

电机驱动系统的功率主要依靠APU系统输出,而APU系统则根据发动机燃油经济型功率曲线输出相应的功率。发动机关闭状态下, $P_o = P_m$; 发动机启动状态下,随着加速踏板深度变化进行调整,踏板深度越大, P_o 越大,反之越小,同时满足:

$$0 \leq P_o \leq (E_{充} - E_{放}) \times U \quad (5)$$

式中: $E_{充}$ ——锂电池累计充电输入的Ah量; $E_{放}$ ——锂电池累计放电输出的Ah量; U ——锂电池总电压; 该阶段 $E_{充}$ 和 $E_{放}$ 值每隔1h清零一次。

(2)若电池SOC < $x_{SOC,min}$ (电量平衡阶段允许锂

电池SOC下限),则允许APU系统主动给锂电池进行小电流充电,但仍然依靠制动能量回馈保持电量自平衡,车辆稳态运行时满足:

$$\left. \begin{aligned} P_m &= P_a - P_o - P_{辅} \\ P_{Li} &= P_o \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

电驱动系统的功率全部依靠APU系统输出,APU系统同时为辅助系统、锂电池提供部分功率,其中 P_o 满足:

$$0 \leq P_o \leq E \times U \div 2 \quad (7)$$

APU动态调整过程或是发动机关闭状态时,仍然需要锂电池输出相应的能量,满足式(4)。只有当APU系统进入稳态工作状态,锂电池才能获得相应能量补充。

3.2 影响流经锂电池能量的因素分析

从整车能量控制策略可以看出,保持电量自平衡的关键在于制动能量回馈,当制动能量回馈较多时,流经锂电池的能量可全部来源于制动能量。影响制动能量回馈量的主要因素是工况、驾驶员操作以及允许制动回馈的电流大小;而工况、驾驶员操作都与车辆本身控制策略无关,因此控制允许制动回馈电流的大小,可有效调整流经锂电池的能量。

选取一台12m串联插电式混合动力车型,以国内某条公交线路工况数据(车辆运行工况曲线如图4所示,总计21km,运行时间3245s,平均车速23.3km/h)为基础,在转毂试验台上进行测试,采用机器人助手实现

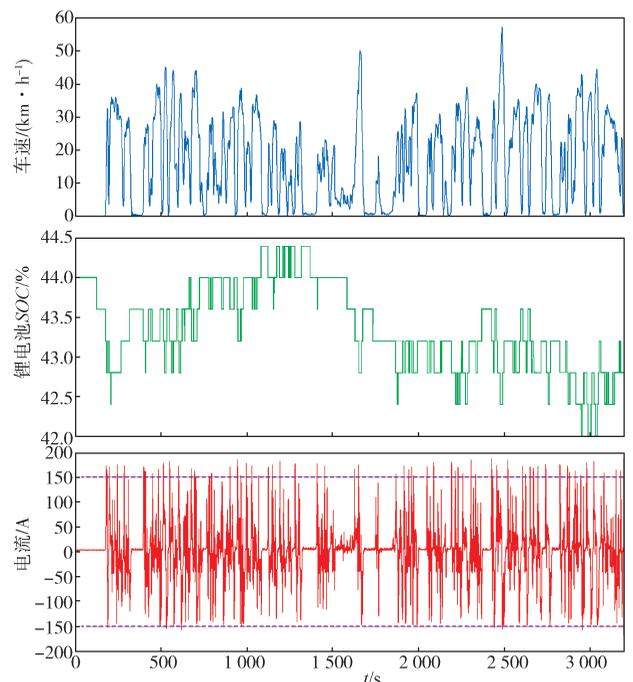


图4 锂电池充放电电流限制为150A时
车辆运行工况

Fig.4 Vehicle's working condition when lithium battery current limit is 150 A

车辆的自动控制, 并按照公交线路车速曲线行驶。根据试验结果, 在不同充放电限制电流情况下, 百公里制动能量回收至锂电池的 Ah 量以及流经锂电池的 Ah 量分别如表 2、表 3 所示。

表 2 不同限制电流时百公里制动能量回收至锂电池的 Ah 量

Tab.2 Amount of recovered energy per 100 km at different limit currents

放电电流 /A	百公里制动回收至锂电池的 Ah 量 /Ah			
	50 A 充电	100 A 充电	150 A 充电	200 A 充电
50	40.2	66.2	78.8	87.5
100	33.12	67.5	82.7	90.4
150	39.8	66.2	83.4	91.54
200	40.2	69.1	83.1	92.4

表 3 不同限制电流情况下百公里流经锂电池的 Ah 量

Tab.3 Amount of energy flowing through lithium battery per 100 km at different limit currents

放电电流 /A	百公里流经锂电池 Ah 量 /Ah			
	50 A 充电	100 A 充电	150 A 充电	200 A 充电
50	41.5	70.1	82.2	90.3
100	46.3	74.2	89.7	98.2
150	54.2	79.2	94.5	105.3
200	57.4	81.5	97.4	107.7

从表 2 实测数据可以看出, 制动回收进入锂电池的能量受锂电池限制电流影响比较大, 限制电流越小, 对制动能量回收影响越大。从表 3 实测数据可以看出, 流经锂电池的能量受放电电流及充电电流限制的共同影响: 放电电流越大, 流经锂电池能量越多; 充电电流越大, 流经锂电池能量也越多。

4 基于综合工况自动匹配的能量分配策略

整车控制系统采用功率跟随的控制策略, 实时统计锂电池充放电 Ah 量, 以此为依据自动控制 APU 功率输出, 并根据工况特点自动调节锂电池系统的充电电流限制, 从而自动控制流经锂电池的能量, 使锂电池寿命满足车辆全生命周期运行的需求。为实现控制系统可根据需求自动限制充电电流的功能, 要求整车控制系统统计如下数据:

(1) $L_i(i=1,2,\dots)$ ——车辆前 10 天每天运行里程, km;

(2) W_i ——在充电电流限制为 $\frac{I_{L\max}}{10} \times i$ 时, 百公里平均流经锂电池的容量, Ah/100 km;

(3) $L_{m.a}, L_m$ ——车辆上一月度平均每天 (不含未运营日期) 运行里程和总里程, km;

(4) $W_{m.a}, W_m$ ——车辆上一月度平均百公里流经锂电池的容量 (Ah/100 km) 和总容量 (Ah);

(5) $L_{y.a}, L_y$ ——车辆上一年度平均每天 (不含未运营日期) 运行里程和总里程, km;

(6) $W_{y.a}, W_y$ ——车辆上一年度平均百公里流经锂电池的容量 (Ah/100 km) 和总容量 (Ah);

(7) L ——车辆累计运行总里程;

(8) T ——车辆保有总天数;

(9) W ——车辆累计流经锂电池的总容量, Ah。

根据上述统计数据可计算达到总使用年限的百公里流经锂电的容量:

$$L_a = \frac{a_0 \sum_{i=1}^{10} L_i}{10} + a_1 L_{m.a} + a_2 L_{y.a} + a_3 \frac{L}{T} + a_4 \frac{L_m}{T_m} + a_5 \frac{L_y}{365} \quad (8)$$

$$a_0 + a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 = 1$$

$$W_s = \frac{C \times E - W}{8 \times 365 - T} \times \frac{1}{L_a} \times 100 \quad (9)$$

$$57.08 \text{ Ah} \leq W_s \leq 171.3 \text{ Ah}$$

式中: L_a ——预测寿命周期内日平均运行里程; T_m ——车辆上一月度运行天数; a_0, a_1, \dots, a_5 ——加权系数; W_s ——百公里允许流经锂电池的 Ah 量。

将 W_i, L_i 进行分组, 并根据 W_i 进行排序; 按照 W_s 在 W_i 中的位置, 采用差值法求取 I_s 的目标值, 同时对 I_s 的目标值进行限制:

$$I_s = \text{rt_Lookup}(I_i, 10, W_s, W_i), 100 \text{ A} \leq I_s \leq I_{L\max} \quad (10)$$

式中: $I_{L\max}$ ——锂电池系统最大允许充电电流; I_s ——控制策略允许锂电池充电电流; $I_i = \frac{I_{L\max}}{10} \times i$ 。

能量分配策略根据 I_s 目标值对电机驱动系统的制动电流进行限制, 从而控制流经锂电池的能量, 最终使锂电池在容量衰减不超过 20% 的条件下, 充放电次数满足 8 年全生命周期使用需求。

5 能量分配策略对车辆经济性的影响

串联插电式动力系统节油率贡献的主要来源是制动能量回收。按照现有 APU 系统的发电效率, 柴油发电效率约为 3.72 kW·h/L (功率跟随), 即车辆百公里制动能量回收每增加 3.72 kW·h, 车辆百公里油耗降低约 1 L。根据各城市不同公交线路百公里制动能量回收的统计, 12 m 新能源公交客车百公里回收制动能量大部分处于 30 kW·h/100 km~50 kW·h/100 km 区间 (根据工况、驾驶行为的不同存在一定的差别)。以 100 Ah 锂电池储能系统为参考对象, 按照每天运行 200 km, 在满足 8 年全生命周期使用寿命需求的条件下, 能量控制策略对车辆运营经济性的影响如图 5 所示。不同锂电池电压等级, 百公里制动能量回收允许限值将呈现一定的差异, 百公里流经锂电池的能量 90% 来自制动回收能量。假定所有城市公交工况均可以实现 50 kW·h/100 km 百公

里制动能量回收量,为满足全生命周期锂电池使用寿命需求,必然需要通过能量分配策略自动降低制动能量回收量,车辆百公里油耗将出现一定程度的提高,但相比寿命周期内更换一套锂电池储能系统,在锂电池系统能量配置较高(配置容量100 Ah,额定电压>508.8 V)时,车辆经济性仍具有较大的优势(按照燃油价格6元/L,水冷锂电池价格2000元/kW·h)。

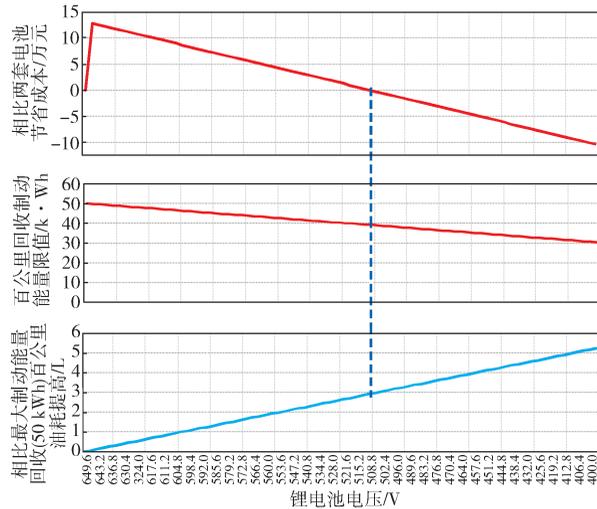


图5 能量控制策略对车辆运营经济性影响

Fig.5 Influence of the energy control strategy on vehicle operation economy

6 公交线路测试

选取一台12 m串联插电式混合动力车型,以国内某条公交线路进行实际路况测试,设置锂电池最大允许充电电流 $I_{Lmax}=250$ A,电驱动系统放电电流限制为150 A,锂电池额定容量 $E=100$ Ah,锂电池系统电压537.6 V,锂电池最大允许充放电次数 $C=5000$ 次, W_i 与 I_i 初值设置如表4所示。

表4 W_i 与 I_i 初值设置表
Tab.4 Initial value setting of W_i and I_i

I_i/A	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250
W_i/Ah	41.4	54.2	69.5	79.2	87.4	94.5	100.2	105.3	108.6	111.3

采集整车控制器统计数据,具体如表5所示。

从表5可以看出,控制系统目标限制电流会随着运行里程和流经锂电池的能量变化而变化。根据表5数据计算得出:

(1) 平均百公里流经锂电池 Ah 量, $W_a=100.39$ Ah/100 km;

(2) 锂电池剩余寿命支撑每天流经锂电池 Ah 量,

$$\frac{C \times E - W}{8 \times 365 - 30} = 171.2 \text{ Ah};$$

(3) 按照当前运营方式,允许百公里流经锂电池

表5 整车控制系统运行数据
Tab.5 Running data of the vehicle control system

日期	$L_i/(km/天)$	$W_i/(Ah/100 km)$	I_i/A	L/km	W/Ah
第1天	103	80.5	100	103	66.0
第2天	181	109.2	250	284	263.7
第3天	180	107.2	250	464	456.7
第4天	159	106.4	250	623	625.8
第5天	183	111.1	250	806	829.1
第6天	160	108.4	250	966	1002.6
第7天	202	107.3	250	1168	1219.3
第8天	95	102.3	250	1263	1316.5
第9天	224	105.8	250	1487	1553.5
第10天	202	104.2	250	1689	1764.0
第11天	182	105.4	250	1871	1955.8
第12天	189	103.6	250	2060	2151.6
第13天	182	105.4	250	2242	2343.4
第14天	183	103.3	250	2425	2532.5
第15天	202	105.5	250	2627	2745.6
第16天	223	106.3	250	2850	2982.6
第17天	203	104.2	200	3053	3194.2
第18天	120	101.6	200	3173	3316.1
第19天	182	103.4	225	3355	3504.3
第20天	183	107.3	200	3538	3700.6
第21天	203	100.2	200	3741	3904.0
第22天	182	106.5	200	3923	4097.9
第23天	223	102.4	200	4146	4326.2
第24天	183	98.7	175	4329	4506.8
第25天	94	101.1	175	4423	4601.9
第26天	121	97.8	200	4544	4720.2
第27天	0	0	200	4544	4720.2
第28天	202	105.2	250	4746	4932.7
第29天	183	104.9	250	4929	5124.7
第30天	182	106.5	250	5111	5318.5

的 Ah 量, $W_{si} = \frac{171.2 \text{ Ah}}{5111/30} = 100.48 \text{ Ah}/100 \text{ km}$ 。

由于 $W_{si} > W_a$,因此认为采用此种限制电流的方式,可以实现车辆8年生命周期内锂电池充放电次数限制在5000次以内。

7 结语

本文针对锂电池储能系统的使用寿命要求,提出了一种能量控制策略,使其满足客车全生命周期使用要求。在CS阶段,整车控制策略采用功率跟随控制,并统计锂电池充放电 Ah 量变化,通过控制 APU 功率输出大小,实现动力系统保持电量自平衡;通过调整允许制动回馈电流的限值,自动控制流经锂电池的能量,达到锂电池满足车辆全生命周期正常使用的目的。在储能系统配置合理的情况下,该能量控制策略的应用可降低插电式混合动力客车总体运营成本,提高经济效益。

参考文献:

- [1] 曹景升,王大鹏,崔盈利.插电式混合动力汽车动力系统设计及仿真[J].控制工程,2017,24(2):346-350.
CHAO J S, WANG D P, CUI Y L. Parameter Matching and Simulation Analysis on Power System for Plug-in Hybrid Vehicles [J].

- Control Engineering of China, 2017, 24(2): 346-350
- [2] 邱利宏, 钱立军, 程伟, 等. 插电式串联混合动力汽车参数匹配及控制策略研究 [J]. 汽车工程学报, 2014, 4(4): 297-303.
QIU L H, QIAN L J, CHENG W, et al. Parameters Matching and Control Strategy of Plug-in Series Hybrid Electric Vehicles [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2014, 4(4): 297-303.
- [3] 庄伟超, 丁洋, 邱立琦, 等. 插电式混合动力汽车控制策略的研究现状及发展趋势 [J]. 机械设计与制造工程, 2016, 45(6): 11-16.
ZHUANG W C, DING Y, QIU L Q, et al. Present Situation and Development of Plug-in Hybrid Vehicle Control Strategy [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2016, 45(6): 11-16.
- [4] 刘晓红. 考虑电池衰减特性的插电式混合动力系统能量管理策略研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
- [5] 王成, 郭淑英, 刘凌. 串联式混合动力系统在公交客车中的开发与应用 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 18-24.
WANG C, GUO S Y, LIU L. Development and Application of Serial Hybrid Electric Power Train System in the Bus [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(2): 18-24.
- [6] 倪成群, 赵强, 张幽彤. 插电式混合动力客车电能消耗阶段控制策略的研究 [J]. 汽车工程, 2014, 36(1): 12-16.
NI C Q, ZHAO Q, ZHANG Y T. A Study on the Control Strategy for PHEB in Energy Depletion Mode [J]. Automotive Engineering, 2014, 3(1): 12-16.
- [7] 罗国鹏, 罗禹贡, 李克强. 基于最佳电能使用的插电式混合动力客车控制策略 [J]. 汽车工程, 2012, 34(6): 475-478.
LUO G P, LUO Y G, LI K Q. Control Strategy for Plug-In Hybrid Electric Bus Based on Optimal Electric Energy Use [J]. Automotive Engineering, 2012, 34(6): 475-478.
- [8] 李学哲, 李孝平, 冯海美, 等. 动力锂电池剩余寿命评价方法及系统的研究 [J]. 电源技术, 2017, 41(4): 551-554.
LI X Z, LI X P, FENG H M, et al. Study on Method and System of Power Lithium Battery Residual Life Evaluation [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2017, 41(4): 551-554.
- [9] 罗玉涛, 王峰, 喻皓, 等. 基于行驶工况的磷酸铁锂电池寿命模型研究 [J]. 汽车工程, 2015, 37(8): 881-885.
LUO Y T, WANG F, YU H, et al. A Study on the Driving-cycle-based Life Model for LiFePO₄ Battery [J]. Automotive Engineering, 2015, 37(8): 881-885.
- [10] 刘天露, 高春艳. 基于多模式切换的插电式混合动力电动汽车能量优化管理方法 [J]. 河北工业大学学报, 2017, 46(3): 39-45.
LIU T L, GAO C Y. Energy Optimization Management Method of Plug-in Hybrid Electric Vehicle Based on Multi-Mode Switching [J]. Journal of HeBei University of Technology, 2017, 46(3): 39-45.

(上接 41 页)

实际应用表明, 基于冗余 PLC 的矿井提升机变频调速系统相比于传统方案, 在控制性能上得到了极大的改善, 其控制策略具有较好的动态和稳态性能, 抗干扰效果良好。系统自动化水平、安全、可靠性都达到了新的高度, 并采用现代化的管理和监视手段保障了提升机的安全运行; 能随时根据提升机的负载情况, 实时调整电机运行状态, 使整个调速范围内系统均具有较高的运行效率, 较传统方式可节约 30% 的能源, 具有较强的工程意义。

5 结语

冗余 PLC 控制变频调速系统采用变频调速的方式, 实现了全过程的无级调速; 同时两台 PLC 一用一热备, 在实现系统自动化控制的同时, 大大提高了其可靠性。工程应用表明, 该系统方案满足了矿井提升机恶劣工作环境和特殊工作性质的要求, 不仅稳定性和可靠性得到了保障, 而且节能效果显著。此外, 在现有基础上扩充

系统的网络功能和智能化水平, 可实现提升机系统无人远程智能化控制。

参考文献:

- [1] 王与卫. 矿井提升机直流调速拖动及其电控系统的研究与设计 [D]. 太原: 太原理工大学, 2007.
- [2] 刘琨, 朱红波. 基于 PLC 控制的多段变频调速在矿井提升机中的应用 [J]. 河北能源职业技术学院学报, 2014, 55(3): 57-61.
LIU K, ZHU H B. The Application of Multi-Stage Variable Frequency Speed Regulation Based on PLC Control in Mine Hoist [J]. Henan College of Industry and Information Technology, 2014, 55(3): 57-61.
- [3] 李万魁. 矿井提升机变频控制系统设计 [J]. 矿山机械, 2014, 42(9): 50-54.
LI W K. Design on VVVF control system for mine hoists [J]. Mining & Processing Equipment, 2014, 42(9): 50-54.
- [4] 谭国俊, 罗金盛, 陶永正, 等. 基于 S7-300 PLC 的提升机变频调速系统设计 [J]. 电气传动, 2007, 37(3): 53-55.
TAN G J, LUO J S, TAO Y Z, et al. Variable Frequency Speed Adjustable System of Mine-hoist Design Based on S7-300 PLC [J]. Electric Drive, 2007, 37(3): 53-55.
- [5] 向小汉. S7-300/400 PLC 基础与案例精选 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 211-222.