

双源电动汽车受电弓充电功率控制策略研究

黄一峰, 卢雄, 冯斌, 彭兴宇, 杨杰君, 文健峰

(中车时代电动汽车股份有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘要:双源电动汽车采用动力电池系统和受电弓充电系统两种电源,为防止由于电池过充或过放而导致电池出现性能和寿命衰减过快问题,需要合理控制受电弓充电系统中的车载隔离 DC/DC 输出功率。对此,本文提出一种基于动力电池 SOC 的受电弓充电功率控制策略,并予以验证。

关键词:双源电动汽车;受电弓;车载隔离 DC/DC;电池 SOC

中图分类号:U469.72⁺2

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2024)03-0011-04

Research on Pantograph Charging Power Control Strategy of

Dual-source Electric Vehicles

HUANG Yifeng, LU Xiong, FENG Bin, PENG Xingyu, YANG Jiejun, WEN Jianfeng

(CRRC Electric Vehicle Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China)

Abstract: Dual-source electric vehicles use a power battery system and a pantograph charging system as two power supplies. To prevent the rapid decline of performance and life of the battery due to overcharge or overdischarge, it is necessary to reasonably control the on-board isolated DC/DC output power of the pantograph charging system. This paper proposes and verifies a pantograph charging power control strategy based on power battery SOC.

Key words: dual-source electric vehicle; pantograph; vehicle isolation DC/DC; battery SOC

我国公路货运以及矿山运输存在“效率、效益、环保”三者之间的矛盾。为解决此问题,电气化公路双源电动货车应运而生^[1-2]。这是一种采用双源电动技术的电动车辆,即在车辆上同时安装动力电池系统和受电弓充电系统。其中,动力电池系统主要用于车辆离开电气化公路时的行驶工况^[3];而受电弓充电系统则主要用于车辆在电气化公路上直接利用其供电网电力驱动车辆,并为车载动力电池适时充电的行驶工况。但如何合理调节受电弓充电系统中的车载隔离 DC/DC 输出功率以防止由于电池过充或过放而导致电池出现性能和寿命衰减过快的问题亟待解决。对此,本文以一辆 18 t 重型牵引车为研究对象,设计

一种双源电动汽车的受电弓在网充电的功率调控策略。

1 整车电源系统模型

整车电源系统采用双回路设计^[4],如图 1 所示。当整车有用电需求时,除了通过动力电池系统放电获得电源外,还可通过车载受电弓与充电网连接,中间经过车载隔离 DC/DC 后获得电源;当整车有充电需求时,除了外接插枪充电和电制动进行能量回收充电两种方式外,还可通过车载受电弓与充电网连接,经过车载隔离 DC/DC 后给动力电池充电。

收稿日期:2024-03-03。

第一作者:黄一峰(1992—),男,工程师;主要从事新能源汽车电气设计与开发工作。E-mail:925096526@qq.com。

通讯作者:卢雄(1996—),男,工程师;主要从事新能源汽车整车控制与辅助驾驶控制软件开发工作。E-mail:925096526@qq.com。

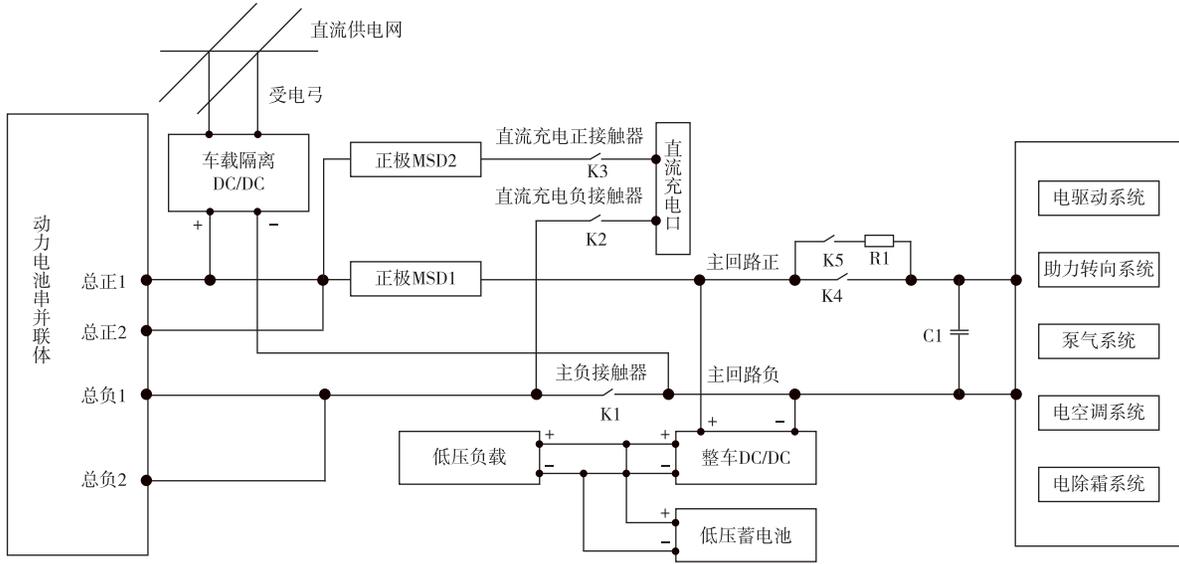


图1 整车电源系统模型

2 受电弓在网充电功率的控制策略

2.1 整车最大允许放电功率估算

整车最大允许放电功率 P_{VDMax} 等于动力电池最大允许放电功率 P_{BDMax} 与车载隔离 DC/DC 最大允许放电功率 P_{FdcMax} (本文车载隔离 DC/DC 最大允许放电功率为 250 kW, 即 $P_{FdcMax} \leq 250$ kW) 之和, 即:

$$P_{VDMax} = P_{BDMax} + P_{FdcMax}, \text{ 其中 } P_{BDMax} = U_{Bat} \cdot I_{DMax}$$

式中: U_{Bat} 为动力电池总电压; I_{DMax} 为动力电池最大允许放电电流。

2.2 整车最大允许充电功率估算

整车最大允许充电功率 P_{VCMMax} 等于动力电池最大允许充电功率 P_{BCMMax} , 即:

$$P_{VCMMax} = P_{BCMMax}, \text{ 其中 } P_{BCMMax} = U_{Bat} \cdot I_{CMax}$$

式中: I_{CMax} 为动力电池最大允许充电电流。

2.3 整车行车目标功率估算

整车行车时主要由电机驱动系统、集成泵气 DC/AC 系统、整车 DC/DC 三大系统协同工作^[5-6]。因此整车行车目标功率 P_{VTar} 为上述三大系统目标功率之和, 即:

$$P_{VTar} = |P_{Mot}| + P_{VDcac} + P_{VDcdc}$$

式中: P_{Mot} 为电机驱动系统目标功率(放电为正, 回收充电为负); P_{VDcac} 为集成泵气 DC/AC 系统目标功率; P_{VDcdc} 为整车 DC/DC 系统目标功率。

1) 电机驱动系统目标功率 P_{Mot} 。根据车辆在道路

上行驶的力学平衡方程, 可以得到电驱动系统目标扭矩 T_{tq} :

①当电机驱动时

$$T_{tq} = \frac{\left[\left(\delta m a_0 + m g f \cdot \cos \alpha + \frac{C_D A v^2}{21.15} + m g \cdot \sin \alpha \right) r \right]}{i_o \cdot \eta_T}$$

$$T_{tq} < T_{MotDMax}$$

②当电机制动时

$$T_{tq} = \frac{\left[\left(\delta m a_0 - m g f \cdot \cos \alpha - \frac{C_D A v^2}{21.15} - m g \cdot \sin \alpha \right) r \right]}{i_o \cdot \eta_T}$$

$$|T_{tq}| < T_{MotBMax}$$

两种情况的 $P_{Mot} = T_{tq} \cdot n \cdot 1000 / 9549.3$

式中: $T_{MotDMax}$ 为电机驱动峰值扭矩; $T_{MotBMax}$ 为电机制动峰值扭矩; m 为整车载重; a_0 为需求加速度(与驱动踏板开度、车速相关联, 驱动时为正, 制动时为负); f 为滚动阻力系数; g 为重力加速度; α 为坡道角度(上坡为正, 下坡为负); C_D 为风阻系数; A 为迎风面积; v 为车速; δ 为旋转质量换算系数 ($\delta > 1$); r 为半径; i_o 为后桥速比; η_T 为传动效率; n 为电机转速。

2) 通过查询, 本文集成泵气 DC/AC 系统正常工作状态下的额定输出功率为 6 kW, 假设车辆行驶时泵气 DC/AC 系统以额定功率进行输出, 则 $P_{VDcac} = 6$ kW。

3) 通过查询, 本文整车 DC/DC 系统正常工作状

态下的额定输出功率为 4 kW, 假设车辆行驶时整车 DC/DC 系统以额定功率进行输出, 则 $P_{\text{VDcdc}} = 4 \text{ kW}$ 。

2.4 车载隔离 DC/DC 输出功率控制策略

当车载隔离 DC/DC 正常上电后, 其功率输出通道会被使能。本文基于动力电池 SOC 的变化, 设定以下 4 种模式的车载隔离 DC/DC 输出功率控制策略。

2.4.1 电池单源放电模式

当 $\text{SOC} \geq 90\%$ 时, 为避免因动力电池过充而对动力电池产生伤害, 车辆正常行驶时由动力电池优先放电提供能量。此时整车行车目标功率完全由电池独立承担, 即 VCU 请求车载隔离 DC/DC 的目标输出功率 $P_{\text{FbDcdcR}} = 0$ 。

2.4.2 电池优先放电模式

当 $80\% \leq \text{SOC} < 90\%$ 时, 分工况进行控制:

1) 整车为驱动模式且当整车行车目标功率 $P_{\text{VTar}} \leq$ 动力电池最大允许放电功率 P_{BDMax} 时, 同样为避免动力电池过充问题, 电池优先放电, 此时整车行车目标功率由电池独立承担, 即 $P_{\text{FbDcdcR}} = 0$; 当 $P_{\text{VTar}} > P_{\text{BDMax}}$ 时, 需求功率差值由车载隔离 DC/DC 进行补偿, 即 $P_{\text{FbDcdcR}} = P_{\text{VTar}} - P_{\text{BDMax}}$, 且其不能超过电池当前最大允许充电功率, 即 $P_{\text{FbDcdcR}} \leq P_{\text{BCMax}}$ 。

2) 整车为制动模式时, 整车制动能量回收产生的电能优先被整车负载消耗, 剩余的电能存储至动力电池, 即此时 $P_{\text{FbDcdcR}} = 0$ 。

2.4.3 电池保电模式

当 $75\% \leq \text{SOC} < 80\%$ 时, 分工况进行控制:

1) 整车为驱动模式时, 为维持 SOC 值在设定范围内, 优先使车载隔离 DC/DC 从充电网取电提供能量, 此时整车行车目标功率全部由车载隔离 DC/DC 独立承担, 即 $P_{\text{FbDcdcR}} = P_{\text{VTar}}$ 。

2) 整车为制动模式时, 此时整车制动能量回收产生的电能优先被整车负载消耗, 剩余的电能存储至动力电池中, 即此时 $P_{\text{FbDcdcR}} = 0$ 。

2.4.4 电池补电模式

当 $\text{SOC} < 75\%$ 时, 为避免因动力电池过放而对动力电池产生伤害的同时, 需时刻使动力电池 SOC 值

保持较高水平以应对脱弓后用电需求, 在满足整车负载功率需求的同时, 希望车载隔离 DC/DC 快速对动力电池进行补电, 并分工况进行控制:

1) 整车为驱动模式时, 在车载隔离 DC/DC 最大允许放电功率范围 ($\leq 250 \text{ kW}$) 内, 车载隔离 DC/DC 输出功率越大越好, 即车载隔离 DC/DC 从电网取的电能一部分用于满足后端负载消耗, 另一部分用于及时补充动力电池, 则 $P_{\text{FbDcdcR}} = P_{\text{VTar}} + P_{\text{VCMax}}$ 。

2) 整车为制动模式时, 若 $P_{\text{VCMax}} \leq P_{\text{VTar}}$, 则 $P_{\text{FbDcdcR}} = 0$; 若 $P_{\text{VCMax}} > P_{\text{VTar}}$, 则 $P_{\text{FbDcdcR}} = P_{\text{VCMax}} - P_{\text{VTar}}$ 。

2.4.5 车载隔离 DC/DC 目标功率仲裁

由于车载隔离 DC/DC 实际输出功率会由设备散热器温度和输入输出电压线性来决定, 即其输出功率并不一定全部响应 VCU 的目标请求功率, 因此 VCU 需对目标功率进行仲裁, 仲裁模型示意图如图 2 所示。车载隔离 DC/DC 系统最终输出的目标功率 P_{TFbDcdc} 为:

$$P_{\text{TFbDcdc}} = \text{Min}(P_{\text{InV}}, P_{\text{T}}, P_{\text{Rated}}, P_{\text{FbDcdcR}})$$

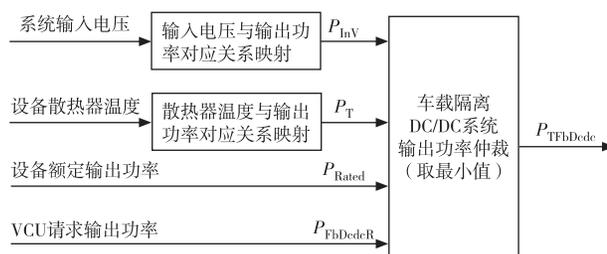


图2 车载隔离 DC/DC 目标功率仲裁模型示意图

3 控制策略验证

试验车辆在电池不同 SOC 的状态下以 40 km/h 的车速进行升弓运行, 分别采集了上述 4 种模式下的数据, 并对每种模式下运行 3 min 的数据进行分析。为便于论述, 计算每个参数在对应时长数据段内的平均值并进行分析。

3.1 电池单源放电模式测试

当 $\text{SOC} \geq 90\%$ 时, 动力电池处于单源放电模式, 整车无论是驱动还是制动, 车载隔离 DC/DC 目标输出功率始终为 0。具体测试数据见表 1, 测试数据符合设计预期。

表1 电池单源放电模式测试数据

参数	驱动工况数据 制动工况数据	
	驱动工况数据	制动工况数据
SOC/%	92.06	91.36
电池最大放电功率/kW	338.46	349.63
整车最大放电功率/kW	563.46	579.82
电池/整车最大充电功率/kW	96.85	99.46
整车目标功率/kW	260.63	85.27
车载隔离 DC/DC 目标输出功率/kW	0	0

3.2 电池优先放电模式测试

当 $80\% \leq \text{SOC} < 90\%$ 时,动力电池处于优先放电模式。当整车驱动且整车目标功率 $P_{\text{VTar}} \leq P_{\text{BDMax}}$ 时,车载隔离 DC/DC 目标功率输出为 0;当整车驱动且 $P_{\text{VTar}} > P_{\text{BDMax}}$ 时,车载隔离 DC/DC 进行功率补偿;当整车为制动状态时,车载隔离 DC/DC 目标功率输出为 0。具体测试数据见表 2,测试数据符合设计预期。

表2 电池优先放电模式测试数据

参数	驱动工况数据		制动工况数据
	$P_{\text{VTar}} > P_{\text{BDMax}}$	$P_{\text{VTar}} \leq P_{\text{BDMax}}$	
	SOC/%	87.98	
电池最大放电功率/kW	338.46	341.50	350.92
整车最大放电功率/kW	563.46	568.30	581.23
电池/整车最大充电功率/kW	126.87	128.71	130.19
整车目标功率/kW	460.78	259.59	84.76
车载隔离 DC/DC 目标输出功率/kW	122.32	0	0

3.3 电池保电模式测试

当 $75\% \leq \text{SOC} < 80\%$ 时,动力电池处于保电模式。当整车为驱动状态时,为维持电池 SOC 保持稳定,在车载隔离 DC/DC 输出能力范围内,整车目标功率全部由车载隔离 DC/DC 承担;当整车为制动状态时,车载隔离 DC/DC 目标功率输出为 0。具体测试数据见表 3,测试数据符合设计预期。

表3 电池保电模式测试数据

参数	驱动工况数据 制动工况数据	
	驱动工况数据	制动工况数据
SOC/%	78.08	77.37
电池最大放电功率/kW	339.78	350.92
整车最大放电功率/kW	565.57	581.23
电池/整车最大充电功率/kW	167.58	170.10
整车目标功率/kW	245.93	112.10
车载隔离 DC/DC 目标输出功率/kW	245.93	0

3.4 电池补电模式测试

当 $\text{SOC} < 75\%$ 时,动力电池处于补电模式。当整车驱动时车载隔离 DC/DC 在最大允许输出功率范围内,其输出功率为整车目标功率与整车最大允许充电功率之和;当整车制动且整车目标功率 P_{VTar} 小于电池/整车最大充电功率时,车载隔离 DC/DC 目标功率输出为两者的差值,否则其功率输出为 0。具体测试数据见表 4。测试数据符合设计预期。

表4 电池补电模式测试数据

参数	驱动工况数据	制动工况数据	
		$P_{\text{VTar}} < P_{\text{VCMax}}$	$P_{\text{VTar}} \geq P_{\text{VCMax}}$
		SOC/%	58.99
电池最大放电功率/kW	338.46	350.92	342.94
整车最大放电功率/kW	563.46	581.23	570.61
电池/整车最大充电功率/kW	174.05	177.10	175.84
整车目标功率/kW	72.1	132.63	191.21
车载隔离 DC/DC 目标输出功率/kW	246.15	44.47	0

4 结束语

本文提出了基于电池 SOC 的充电功率调控策略,试验结果表明,其能有效地调节车载隔离 DC/DC 输出功率,防止动力电池出现过充或过放而导致电池性能和寿命衰减过快的的问题。当然,本文的研究仅针

(下转第 24 页)

- 方法研究[J]. 客车技术与研究, 2020, 42(1): 19-22.
- [2] 王海涛, 刘慧卓, 张学永, 等. 基于单目视觉的车辆屏显式封闭驾驶舱前视视野重现方法[J/OL]. 吉林大学学报(工学版): 1-10[2024-03-03]. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb20220782>.
- [3] 郭剑鹰, 陈晓, 高升. 高级驾驶辅助系统前视摄像头硬件在环测试[J]. 光学仪器, 2018, 40(3): 22-27.
- [4] 林绿开, 钮倩倩, 李毅. 基于棋盘标定板的优化相机参数标定方法[J]. 计算机技术与发展, 2023, 33(12): 101-105.
- [5] ZHANG Wentao, SONG Huansheng, LIU Lichen. Automatic calibration for monocular cameras in highway scenes via vehicle vanishing point detection [J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2023, 149(7): 1-11.
- [6] 黄文文, 彭小红, 李丽圆, 等. 相机标定方法及进展研究综述[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(16): 9-19.
- [7] ZHANG Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [8] FENG Mingchi, HUANG Shuai, WANG Jingshu, et al. Accurate calibration of a multi-camera system based on flat refractive geometry [J]. Applied Optics, 2017, 56(35): 9724-9734.
- [9] CANO M A, LAMBERT J, EDAHIRO dahiho M, et al. Single-shot Intrinsic calibration for autonomous driving applications [J]. Sensors, 2022, 22(5): 2067.
- [10] 赵云涛, 孙军华, 陈勘, 等. 基于球几何特征的摄像机内参分步标定方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(4): 558-563.
- [11] 高田. 面向智慧农业的单目摄像头内参标定高度不变性方法[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- [12] MARTINS F P, COSTELHA H, BENTO C L, et al. Monocular camera calibration for autonomous driving—a comparative study[C]//2020 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC). IEEE, 2020: 306-311.

(上接第 14 页)

对特定场景下的充电功率调控问题, 对于不同工况和应用场景下的充电策略优化仍有待进一步探讨。例如, 考虑到充电站容量和电网稳定性等因素的情况下, 需要研究更为智能化和综合化的充电策略。此外, 双源电动货车在运行过程中, 如何充分利用充电系统的优势提高整车能量利用效率, 同时确保电池系统安全、稳定运行, 也是未来研究的重要方向^[7-8]。

参考文献:

- [1] 宋一凡, 牡丹丰. 高速公路接触网电力货车受电弓的技术研究[J]. 产业与科技论坛, 2019, 18(11): 54-55.
- [2] 杨思凡. 分布式能源接入下电气化公路能量管理策略研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022.
- [3] 金红超. 城市客车燃料电池热管理系统控制策略设计[D]. 贵阳: 贵州大学, 2022.
- [4] 代广贵, 何晋, 张博嘉. 考虑不同容量的储能 SOC 均衡与功率分配策略[J]. 电力建设, 2023, 44(6): 12-22.
- [5] 冯启飞, 霍崇亚, 邱勇, 等. 面向电气化公路的重卡模型研究[J]. 重型汽车, 2023(1): 6-8.
- [6] 闫晓健, 刘建业, 张鹏强, 等. 基于优化算法的混合储能功率分配策略[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(6): 13-17.
- [7] 张磊冲, 胡治国, 司少康, 等. 混合储能单元功率分配策略[J]. 上海电机学院学报, 2023, 26(1): 28-33.
- [8] 毛蕴娟, 朱月阳, 李恒杰, 等. 基于公平权重的电动汽车充电功率分配策略[J]. 兰州理工大学学报, 2022, 48(6): 81-87.