

文章编号:1671-251X(2024)S2-0249-04

电动轮矿用自卸卡车油电混合动力系统研究及应用

张建国

(国能准能集团有限责任公司 哈尔乌素露天煤矿, 内蒙古 鄂尔多斯 010300)

摘要:电动轮矿用自卸卡车主流车型仍以柴油机作为动力源,存在耗油量大,污染严重等问题。对电动轮矿用自卸卡车进行节能改造,设计相应的 BMS 系统为电池充放电过程提供测量、控制和保护等功能,通过 DC/DC 变流器,将钛酸锂电池直接连接到原车传动系统,用以在车辆制动时吸收制动能量,在牵引时将吸收的能量用掉。经在哈尔乌素露天煤矿实验,结果显示节油效果显著,成功实现节能减排,具备广泛的推广与应用价值。

关键词:电动轮自卸卡车; 蓄电池; 油电混合; 节能; 传动方式

中图分类号:TD67 文献标志码:A

Research and application of oil-electric hybrid power system for
electric wheel mining dump truck

ZHANG jianguo

(Harwusu Open-pit Mine, CHN Energy Zhunneng Group Co., Ltd., Ordos 010300, China)

0 引言

自卸卡车市场保有量大,但存在耗油量大、环境污染严重等双重压力。以国能准能集团有限责任公司哈尔乌素露天煤矿小松 930E 车型为例,每天三班制运行单台车辆柴油耗油量为 4 t。巨大的耗油量使得车辆成为一个污染源,而高昂的燃油费用也成为矿企的一种负担。油电混合动力系统市场前景良好,技术成熟可靠,它是目前自卸卡车实现节能环保及降低燃油消耗的最好方式。

对电传动矿用自卸卡车(也称为电动轮矿用自卸卡车)的节能改造,目的是通过在电动轮矿用自卸卡车上加装一定的蓄电池和相应设备,用以在车辆制动时吸收制动能量,在牵引时将吸收的能量用掉,达到在总牵引功率不变的情况下减少柴油机功率输出,从而实现节能减排的目的。

1 电动轮矿用自卸卡车电传动系统控制逻辑及特性

电驱动矿用自卸卡车是用柴油发动机带动发电机发电,再驱动电动马达带动轮胎行驶^[1]。电动轮是大型矿用自卸车中的关键驱动元件之一,其高性

能和高可靠性对矿用自卸车的运行状况至关重要。电动轮采用电动机和轮边减速器集成结构,电动机通过花键套将旋转机械能传递到轮边减速器的浮动太阳轮,然后通过减速器的传动将旋转运动变为驱动力矩,驱动扭力筒的旋转,进而带动轮毂的旋转,轮胎安装于轮毂上带动自卸车的运行。目前新型电动轮矿用自卸卡车基本都采用 AC 交流驱动系统,交-直-交驱动方式。

国内矿用自卸卡车应用最广泛的是 GE 电驱动系统。其牵引工作过程为柴油机带动主牵引发动机旋转,发出三相交流电,经过整流模块整流后变为直流电,进入牵引变频器后逆变成调频调压的三相交流电,驱动交流牵引电动机带车辆行走;其制动工作过程为车轮带动牵引电动机运转,电动机在牵引逆变器的控制下处于发电状态,所发电能经制动斩波器控制消耗在制动电阻上。电传动系统主电路如图 1 所示。

踩刹车制动时,发出一个控制信号,让变频器控制电动轮电动机进入发电状态,电磁转矩由牵引转矩变为制动转矩,电动机发电导致母线电压升高,当超过设定阈值时,投入制动电阻。制动电阻将电动机产生的能量转化为热能进行散热,并限制电动机

收稿日期:2024-11-25;编辑:郑海霞。

作者简介:张建国(1987—),男,内蒙古呼和浩特人,工程师,硕士,研究方向为油电混合动力系统在露天煤矿电动轮自卸卡车上的应用,

E-mail:415020737@qq.com。

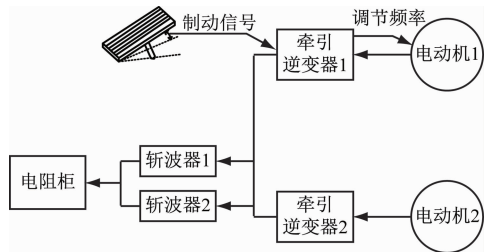


图 1 矿用自卸卡车电传动系统主电路

在运动中的惯性,从而有效地减缓或停止电动机的运动。制动电阻通过耗散减速过程中产生的能量,防止电压过高对变频器造成损害。

2 电动轮自卸卡车油电混合动力系统方案设计

2.1 设计方案选择

常见的油电混动动力系统技术方案设计:方案 1,通过锂电池或超级电容等储能原件直接连接到原车传动系统;方案 2,通过 DC/DC 变流器,将超级电容直接连接到原车传动系统;方案 3,通过 DC/DC 变流器,将锂电池直接连接到原车传动系统。

在直连方案中,由于储能元器件的动态特性直接影响整车控制性能,所以储能元器件的设计需与原车直流环节的电压和电流等相匹配,通常需要定制化设计。通过 DC/DC 变流器可实现电压和电流的高效转换,确保传动系统与储能单元之间的可靠连接。同时,DC/DC 变流器内部的电容等元件可优化动态响应,提升系统稳定性。超级电容虽具备优异的动态特性,但其成本高于锂电池,且批量应用技术不如锂电池成熟。综合考虑节能改造的性能、成本和可靠性,方案 3 更适合实际需求。

2.2 系统改造方案分析

原车的传动回路为柴油发电机、变频器、电动机(内嵌在车轮内),如图 2 所示。

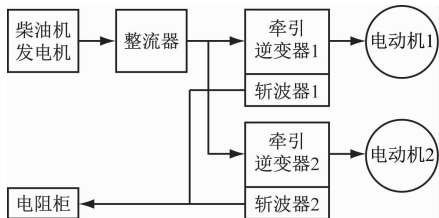


图 2 改造前原车传动回路

现需要将驱动力改为油电混合驱动,因此需在原车基础上增加一套储能系统,该系统包括 DC/DC、锂电池、辅助散热系统,改造后传动回路如图 3 所示(增加部分为虚线框图)。

经过对哈尔乌素露天煤矿生产用车作业分析,对运煤车进行改造可以实现下坡时的制动能量回收和再利用,所以确定以运煤作业为主的 930E 电动轮自卸车进行油电混合动力系统改造。通过对运行

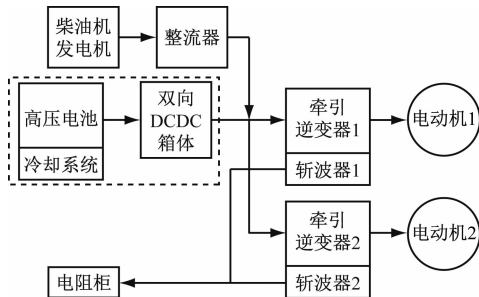


图 3 改造后传动回路

路线进行统计分析,被改造电动轮矿用自卸卡车运输作业路线的基本数据为:重载上坡(11 min),空载下坡(6 min),其余为装载、卸载、平路空载、平路重载运输时间,一次大约 28 min;经过对原车车载记录仪数据解读和制动时的电功率数据分析、计算,每次下坡可回收电能约 40~50 kWh。

研究上述能量转换过程,结合新型的钛酸锂电池高倍率充放电等优势和大功率 DC/DC 变流器技术和产品研究,结合新型钛酸锂电池与大功率 DC/DC 变流器技术在能量转换过程中的协同作用,建立从电动机到中间直流环节、到大功率 DC/DC 变流器,实现电池充电的能量吸收过程;然后从电池到大功率 DC/DC 变流器、到中间直流回路,实现电池能量的释放过程。通过对能量吸收和释放过程的深入研究及静态计算和动态分析,实现系统能量转换过程的平衡稳定和高效率,保证电动轮功率不减、运行平稳的前提下,达到节油减碳的效果。

3 电动轮自卸卡车油电混合动力系统工作特性

3.1 电池系统组成及工作原理

电池系统由 8 个串联在一起的电池模组(每个模组有 32 个电芯串联)、BMS 电池管理系统和水冷系统组成,如图 4 所示。

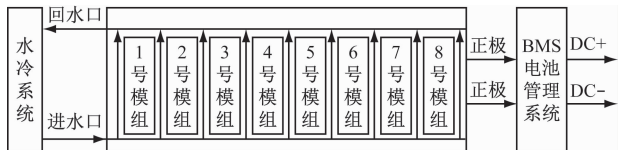


图 4 电池柜组成

BMS 电池管理系统是由数据采集单元和控制电路等构成,为电池系统充放电过程提供测量、控制和保护功能。通过采用先进的电池均衡采集芯片,当某节电池电压过高时,打开并联在该电池上的 MOS 管可将其多余的能量释放掉,多个 MOS 管可同时打开,实现电池组的实时均衡。

3.2 BMS 电池管理系统配置

BMS 电池管理系统由 BMU 电池管理单元、BSU 采集均衡模块、连接线束、电流传感器及接触器等部件组成。主控模块 BMU 通过内网 CAN 总

线与 BSU 进行通信,通过接收到的数据对整车电池进行分析处理,再通过整车 CAN 总线把电池数据上传给 VCU 整车控制器(即 DC/DC 变流器系统),达到对电池状态的监控,并进行故障报警,发送指令给 DC/DC 变流器系统,负责整个电池组的检测、电流采集与 SOC 计算和绝缘电阻检测等。BSU 采集均衡模块负责单体电池电压的采集、故障诊断、电池均衡管理等,并将收集到电池组的单体电池电压和温度数据等上传 BMU。此外,系统内含有温度传感器,当电池温度升高到预警值后,系统会暂停充放电,提高系统安全性。

3.3 启动电池和蓄电池设计

启动电池技术指标是根据原车启动电池(铅酸电池)使用工况,测算出不同温度下电动轮矿用自卸卡车启动电流、启动时间、启动电压等参数,通过确定启动电池的容量、输出电压和输出电流等,设计出满足工况的钛酸锂启动电池系统。

蓄电池技术指标根据 DC/DC 变流器回收能量控制方案确定其容量、电压、电流等参数;通过 CAN 总线汇总实时数据信息和 BMS 对电池状态数据处理,实现电池充放电的管理及控制;通过对组端电压进行隔离采集处理,实现对组端电压的实时检测;通过分流器对电流进行隔离采集处理并实时检测;可根据电压、电流、温度、SOC、SOH 等阈值报警功能,实现故障检测功能;BMS 可对电池参数进行实时监控、故障诊断、绝缘检测、显示报警、远程监控等,并通过 CAN 总线与 DC/DC 变流器进行信息交互,实现设备的高效、可靠、安全运行。

3.4 锂电池模组选型

根据以上技术指标的功能需求,该电池系统需满足:工作环境温度:−30~40 ℃,最大工作电流:340 A,循环次数:1 万次/年,不允许发生起火爆炸等。钛酸锂电池作为新型的储能器件,具有充放电速度快、无污染、寿命长等优点。电动轮矿用自卸卡车的启动和制动频繁、能量交互多,功率等级高,钛酸锂电池特性能够较好地匹配电动轮矿用自卸卡车的运行特点。因此,电动轮矿用自卸卡车油电混合动力系统根据 340 A 充电电流和每次充电时间 8 min 的工况环境,选择 4C 倍率、70 Ah 钛酸锂软包电芯、32 个软包电芯串联组成一个模组、模组两侧均贴有水冷板、水冷板和模组直接填充导热硅胶垫,可以高效的将电芯发热能量导出,电芯极耳使用超声波焊机进行焊接,焊点≥32 个,可满足过流能力^[2]。

电池模组通过 PDU 箱控制系统与 DC/DC 变流器连接,通过系统自诊断功能,系统上电后对电

压、温度、通信、存储器、内部通信等部件进行检测,并提供相应的故障代码及等级,检测正常后系统接触器闭合,电池正负极输入到 DC/DC 变流器中。当电池模组出现以下情况时模块通过 CAN 总线可将报警信号发送至整车 CAN 总线:例如单体电压过高、单体电压过低、电池包总电压过高、电池包总电压过低、电池容量过低、电池容量过高、单体电池温度过高、单体电池温度过低、绝缘故障(漏电)、通信异常、电池管理系统异常^[3]。

3.5 DC/DC 变流器应用

由于电动轮矿用自卸卡车牵引系统直流母线电压为 DC 1 500 V 等级,蓄电池电压为 DC 700 V 左右,故不能直接将蓄电池与牵引系统相连,需加入 DC/DC 变流器。根据原车主电路控制原理和回收能量控制方案,考虑电动轮上可安装结构空间,设计需要的大部件 DC/DC 和电池 PACK,主要确定电池 PACK 的容量、输出电压、电流、DC/DC 的输入(电池端)电压、电流及输出(电动轮直流母线端)的电压、电流;大功率 DC/DC 需要在系统设计阶段进行全面详细的理论研究,主要包括系统拓扑的选择、零部件参数设计、仿真模型的搭建等,在设计过程中,主要考虑的因素包括安全保护功能、过载能力、响应时间、可靠性等客户关心的性能指标,同时还要综合评估各器件成本和产品整体的市场竞争力,从理论研究阶段就做好产品定位工作^[4]。直流变换器根据输入和输出之间是否电气隔离分为无电气隔离的直流变换器和有电气隔离的直流变换器。适用于电动轮矿用自卸卡车油电混合动力系统的三电平双向 DC/DC 变流器采用无电气隔离式变换器方式^[5]。

三电平双向 DC/DC 变流器工作在 Buck 和 Boost 2 种状态,2 种状态的电流方向是相反的。双向 DC/DC 模块通过高效率的三电平双向 DC/DC 变流器将外部 DC 800~2 000 V 的输入转换成电池所需要的 DC 400~900 V 直流电压;在缩小体积的同时,为了保证三电平双向 DC/DC 变流器可靠工作,模块采用了水冷散热结构^[6]。

由于电动轮矿用自卸卡车直流母线电压等级高,要实现良好的节能效果要求动力电池充的充放电电流大,结合三电平 DC/DC 拓扑的优点,采用三电平双向 DC/DC 变流器与钛酸锂动力电池共同构成电动轮矿用自卸卡车油电混合动力系统成为了较为理想的选择^[7]。

根据系统特性及前后端的电气参数,以不影响原车牵引和制动性能为出发点,选用三电平双向 DC/DC 变流器模块,通过 PWM 控制器进行控制。

双向 DC/DC 变流器的控制原理如图 5 所示。

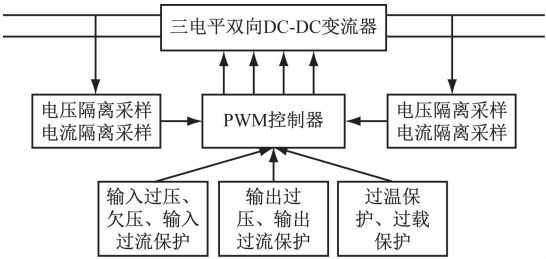


图 5 DC/DC 变流器控制原理

由于目前采用的方案不改动现有车辆的制动系统和动力系统,且蓄电池组或 DC/DC 变流器有故障时有多个接触器、熔断器等开关器件可以保证将加装的系统从原车系统上脱离开,此过程不需要停车亦不需要人工参与,故该加装系统具有很好的独立性和安全性。DC/DC 变流器和原车直流母线之间通过高压接触器连接,和电池端通过直流断路器连接。当出现 DC/DC 变流器或者电池组等故障时,可以通过高压接触器将 DC/DC 变流器和原车直流母线断开,通过断开直流断路器将 DC/DC 变流器和高压电池组断开,从而将故障端和原车完全断开而不影响原车的行驶和使用^[8]。DC/DC 模組的控制功能包括:① 根据电动轮矿用自卸卡车母线电压、电池特性、牵引和制动控制逻辑等实现对电池的充放电控制;② 控制器和电池组 BMS 系统等进行实时通信及数据交换;③ 监控和保护 DC/DC 变

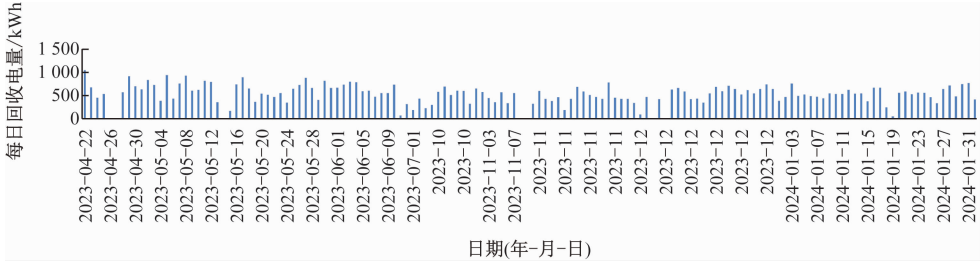


图 6 DC/DC 变流器柜内回收能量统计

5 结论

- 1) 通过新型钛酸锂电池与大功率 DC/DC 变流器的能量转换,建立了能量吸收和释放转换过程的系统控制模型,保证电动轮功率不减、运行平稳。
- 2) 现场应用结果显示,在相同工况下与同类型电动轮自卸卡车相比,通过油电混合动力系统改造,单趟节油量在 6.9 L 以上,节油率在 6.5% 以上,应用效果显著,成功实现节能减排,具有广泛的推广价值。

参考文献:

[1] 薛成. 基于虚拟样机矿用自卸车电动轮的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.

流器各部件,具有故障记录和自诊断功能;④ 通过控制单元的接口模块,便携式测试单元可实时读取故障及其他数据。

4 现场应用

系统稳定运行后,通过 PACK 远程检测,实时传递系统的充放电状态和节能数据,以及现场操作工人记录作业任务、车数、路线和每天加油量,对系统进行测量验证,改造后车辆(# 30230)和对比车辆(# 30205)在拉煤工况下的单次运输耗油量做对比,得出节油率指标,详细运行情况见表 1。

表 1 节油率指标详细运行情况

车号		单趟平均油耗/L
# 30205	2022 年	108.5
	2023 年	105.8
# 30230		98.9

由表 1 可看出,在相同工况下节油率在 6.5%~8.8%。单趟拉煤节油量在 6.9~9.6 L,按每年单车拉煤 7 700 趟计算,可节油约 5.3~7.3 万 L,节油率 6.5%~8.8%。据 DC/DC 变流器柜内统计,2023 年 # 30230(改造车辆)共回收电量 40 046.72 kWh,按每趟平均消耗电量 22 kWh 计算,相当于 1 820 趟的消耗电量,按每趟节油 7.2 L 计算,共节油 1.31 万 L。

DC/DC 变流器柜内回收能量统计如图 6 所示。

[2] 肖礼军. 新能源汽车电池极耳激光焊接焊缝成形及组织性能研究[D]. 上海:上海应用技术大学,2021.

[3] 刘宁,王家雁,吴明瞭,等. 动力电池包系统在纯电动汽车上的应用[J]. 北京汽车,2014(6):30-34.

[4] 胡浩,闫英敏,陈永利. 新型无源软开关变换器[J]. 电子设计工程,2013,21(5):140-142,145.

[5] 陈亚爱,梁新宇,周京华. 双向 DC-DC 变换器拓扑结构综述[J]. 电气自动化,2017,39(6):1-6.

[6] 贺笑. 低压光伏储能系统设计与实现[D]. 扬州:扬州大学,2021.

[7] 胡斌,杨中平,黄先进,等. 用于超级电容储能系统的三电平双向直流变换器及其控制[J]. 电工技术学报,2015,30(8):83-89.

[8] 索红亮,娄丽丽. 复合型储能吸收回馈装置在地铁试验线牵引系统中的应用[J]. 电子技术与软件工程,2019(3):218.