

研
究
开
发CKD6E 混合动力机车
电传动及控制系统

何 良, 姚晓阳

(株洲南车时代电气股份有限公司 技术中心, 湖南 株洲 412001)



摘 要: 对我国研制的首台节能环保型混合动力机车——CKD6E 机车进行了介绍, 对机车电传动电路、控制系统、工作方式进行了设计说明, 提出了机车开发调试过程中的关键问题及解决措施, 总结了混合动力机车区别于传统机车的特点, 并提出了改进建议。

关键词: 混合动力; 内燃机车; 柴油发电机组; 动力蓄电池; 变流器; 控制系统

中图分类号: U267; U262.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2012)04-0018-05

作者简介: 何 良 (1975-), 男, 工程师, 长期从事内燃机车微机控制开发、交流传动内燃机车电传动系统技术集成方面的研究工作。

Electric Drive and Control System of CKD6E Hybrid Power Locomotive

HE Liang, YAO Xiao-yang

(Technology Center, Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: CKD6E locomotive, the China's first developed hybrid power locomotive with energy conservation and environmental protection, was introduced, and electric drive circuit, control system and working methods were illuminated. Key issues and solutions measures of the locomotive development and debugging process were proposed. In addition, hybrid power locomotive features different from the traditional were summarized, and improving countermeasures were proposed.

Key words: hybrid power; diesel locomotive; diesel generator sets; power battery; traction converter; control system

近几年, 混合动力机车在世界范围内开始兴起。加拿大RailPower公司正在研制生产Green goat系列混合动力机车, 并实现了小批量生产; 美国GE、法国ALSTOM等公司也在进行混合动力机车的研制, 并已生产出样机; 日本也推出了混合动力轻轨车。

为响应国家节能减排号召和推动技术革新进步, 2009年底南车资阳机车股份有限公司组织开始混合动力交流传动内燃机车的研制工作, 其中, 南车株洲电力机车研究所有限公司承担了电传动系统、微机网络控制系统、动力蓄电池管理系统等核心设备的研制开发。

CKD6E 混合动力机车轴式为 B_0-B_0 , 用作调车牵引, 设计时速 80 km/h, 以柴油机发电机组和动力蓄电池作为动力源, 动力混合度比为 3:1, 柴油机提供 600 kW 功率, 动力电池提供 200 kW 功率。下面对其传动和控制系统进行介绍。

1 机车主要技术参数

CKD6E 混合动力机车主要用于调车牵引, 其主要

参数如下:

轨距	1 435 mm
传动方式	交直交电传动
运用条件	使用环境温度 -25~40 , 海拔 1 400 m 湿度 90%
轴式	B_0-B_0
轮径	1 050 mm(新轮) 1 012.5 mm(半磨耗) 976 mm(全磨耗)
轴重	23 t
计算整备质量	92 t
装车功率	1 150 kW
柴油机	
装车功率	600 kW
额定转速	1 800 r/min
动力蓄电池	
容量	180 A·h
持续 15 min 放电功率	250 kW
机车轮周功率	650 kW(柴油机加动力蓄电池)
机车速度	

收稿日期: 2012-04-23

最大运行速度	80 km/h	齿轮传动比	5.786 (81/14)
最大恒功速度	65 km/h	2 机车主电路及技术参数	
持续速度	10.1 km/h		
机车牵引力		CKD6E 混合动力机车主电路示意图如图 1。机车采用油电混合动力、交直交驱动系统和辅助交流传动系统, 采用两架轴控方式。	
启动牵引力	350 kN		
持续牵引力	230 kN		

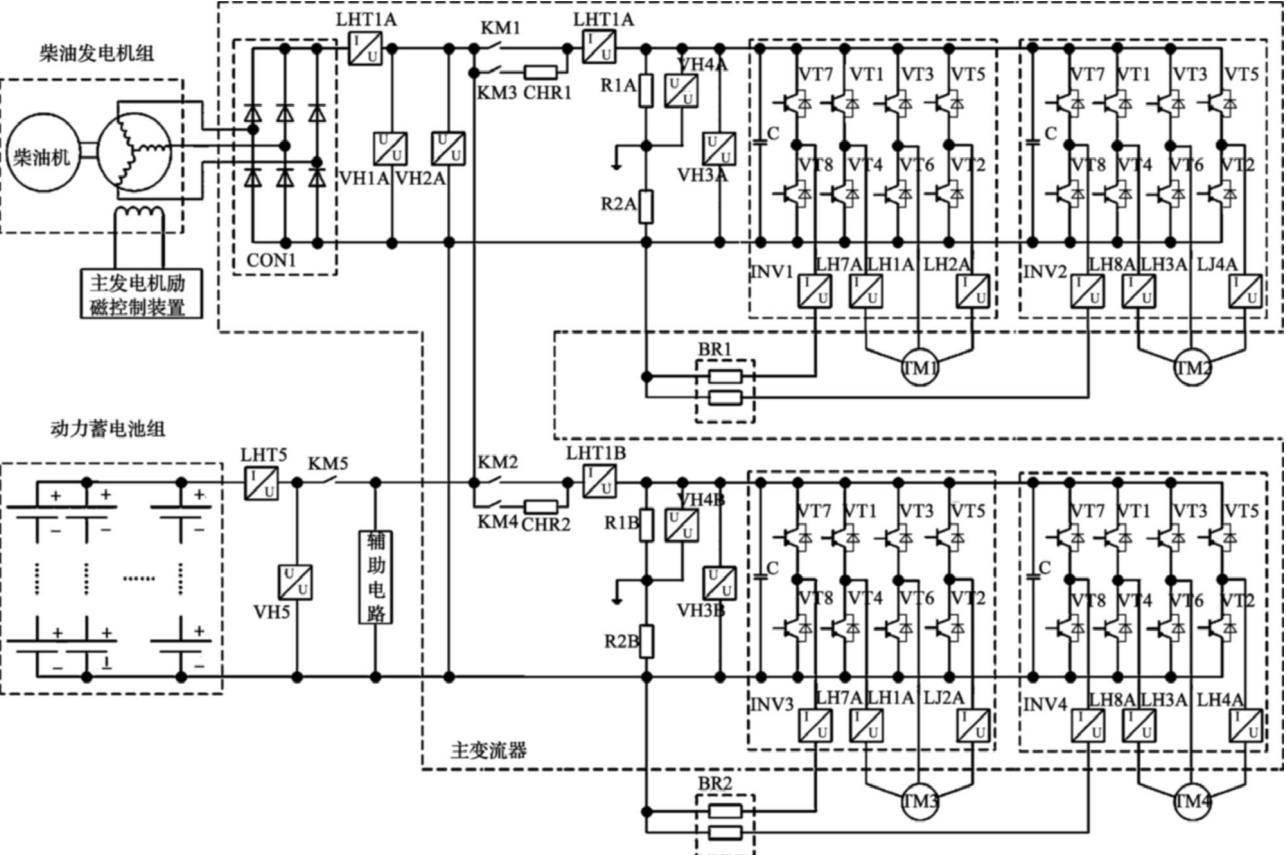


图 1 机车主电路示意图

柴油机拖动单绕组主发电机, 主发电机励磁控制装置调节主发电机的励磁电流, 主发电机输出三相交流电压, 通过主变流器柜内整流装置输入到中间直流环节。中间直流环节包括各类电流、电压检测传感器, 线路接触器, 固定放电电阻, 电容等。动力蓄电池通过隔离开关 KM5 直接接入中间直流环节。控制系统通过逻辑组合驱动 KM3 充电接触器、KM1 短接接触器以及 KM4 充电接触器、KM2 短接接触器, 直流电源通过线路接触器接入牵引逆变器电路, 逆变器将直流电逆变成频率可调、电压可调的三相交流电, 给 2 个转向架上 4 台异步牵引电动机供电。

主要设备及参数:

1) 主发电机

额定容量	600 kVA
定子结构	单绕组
额定输出电压	AC 585 V
额定输出电流	AC 621 A
额定转速	1 800 r/min
额定效率	96%

额定功率因数	0.95
输出电压范围	AC 0~585 V
励磁方式	无刷励磁
冷却方式	径向自通风

2) 动力电池

电池类别	锂电池
单体电压	3.2 V
数量	220 节
容量	180 A·h (单块)
连接方式模块	串联
最大允许放电电流	360 A
最大允许充电电流	180 A
储存能量	130 kW·h

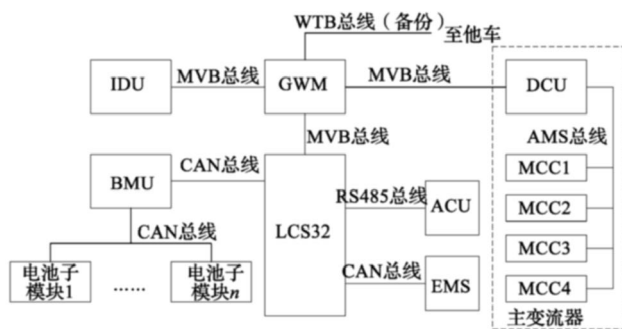
3) 牵引电动机

额定频率	31.3 Hz
额定功率	300 kW
额定电压	454 V
额定电流	493 A
额定转矩/牵引力	5 358 N·m/240 kN

额定效率	91.03%
额定功率因数	0.813 4
额定转差率	2.37%
质量	1 550 kg
最大电流	695 A
最高转速	2 518 r/min(全磨耗976 mm, $V_m=80$ km/h)
最大转矩	7 816 N·m
通风方式	强迫外通风 通风量 $Q=80$ m ³ /min
4) 主变流器	
三相整流器	
额定交流输入电压	AC 585 V
额定直流输出电压	DC 720 V
额定交流输入电流	AC 621 A
额定直流输出电流	790 A
冷却方式	强迫风冷
中间直流环节	
标称直流电压	DC 720 V
支撑电容	38 mF
VVVF逆变器	
标称输入电压	DC 720 V
输出电压	三相AC 0~550 V
输出电压频率	0~130 Hz
额定输出电流	4 × 493 A
最大输出电流	4 × 710 A
额定效率	99%
开关频率	500 Hz
冷却方式	强迫风冷

3 机车微机网络控制系统

机车微机网络拓扑结构如图3所示。



GWM——网关；LCS32——机车级微机控制系统；IDU——机车显示器；DCU——传动控制系统；EMS——柴油机控制器；BMU——蓄电池管理系统；ACU——辅助变流器控制单元；MCC——电机控制器

图3 CKD6E 混合动力机车网络拓扑

CKD6E 机车控制系统是一个多处理器分布式控制系统，通过多级通信网络实时通信，完成机车的全部控制功能。

机车主通信网络采用TCN网络，作为车辆级一级通信网络通过MVB总线互相连接。车辆级一级通信网络连接的设备包括TCN网关GWM、机车级微机控制系

统LCS32、传动控制单元DCU、显示器IDU等，系统预留列车级WTB总线。

机车级微机控制系统LCS32管理车辆级二级网络，协调各执行部件工作：通过CAN总线与柴油机控制器EMS互联，管理柴油机的工作；通过CAN总线与蓄电池管理系统BMU互联，完成动力蓄电池工作状态信息的获取（动力蓄电池主要工作状态信息包括动力电池荷电状态SOC值、允许的充电电流、放电电流等）；通过RS485与ACU辅助变流器控制单元互联，协调辅助系统设备的工作。

机车级微机LCS32是机车控制系统的核心，其作为中央控制单元，完成机车逻辑动作控制，柴油机启停控制；进行柴油机转速调节，通过调节主发电机励磁控制柴油机功率输出；按照机车牵引特性曲线计算机车牵引力等等。

传动控制单元DCU是主变流器的控制器，接受LCS32给定的力矩指令和机车状态，采用直接转矩控制策略完成机车牵引力控制，并具备机车粘着控制功能和对中间直流环节的过压调节和保护控制功能等等。传动控制单元通过内部AMS总线实现控制器MCC与电机信号等的通信。

蓄电池管理系统BMU主要由电池管理主板、电池管理子板、传感器、箱体、管理系统线束5部分组成，是机车储能系统核心部件，主要负责监视220只锂电池模块的单体电压、总电流、总电压、SOC估算、电池箱温度检测等信息，通过CAN网络传送给机车级微机LCS32（或充电机单元），同时控制储能系统风机进行储能系统热管理，并实时存储储能系统故障信息，为售后维护提供有效信息。

辅助变流器主要为机车的冷却风扇、牵引通风机、空压机、空调及车体风机等负载提供变频电源。辅助变流器从机车主变流器的中间直流环节取电，变流柜根据机车实际工况要求输出相应频率、电压的交流电源提供给负载，完成辅助系统直流到交流的变换。

4 机车牵引特性

根据柴油发电机组和动力蓄电池的2种能量来源将机车区分为3种运用工况，其牵引特性曲线如图2。

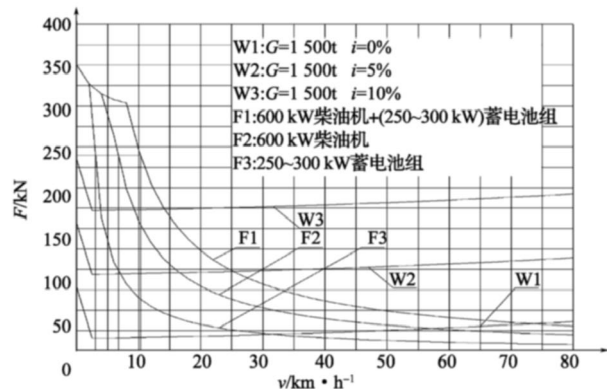


图2 牵引特性曲线

1) 纯柴油机动力工况

该工况机车等同传统交流传动机车, 动力蓄电池不投入工作, 动力蓄电池接触器KM5断开。柴油发电机组向主变流器提供三相交流电, 主变流器通过AC-DC-AC变换, 将三相交流电源转化为牵引电动机工作的变频变压电源, 驱动牵引电动机。通过辅助变流器驱动辅助用电设备。

2) 纯动力电池工况

动力蓄电池组单独向牵引逆变器、牵引电动机、辅助负载提供动力源, 柴油发电机组不投入工作, 柴油机可选择处于停机状态, 机车主发电机励磁接触器断开。该工况适用于短途轻负载作业。

3) 混合工况

柴油发电机组与动力蓄电池联合投入, 视牵引功率要求和动力蓄电池容量确定动力蓄电池的充电和放电状态: 一是柴油机发电机组单独供电不足, 且动力电池荷电状态SOC值不低于某一限值时, 动力蓄电池放电, 柴油发电机组和动力蓄电池联合向牵引逆变器、牵引电动机、辅助负载提供动力; 二是柴油机发电机组单独供电不足, 且动力电池荷电状态SOC值低于某一限值时, 动力蓄电池禁止放电, 机车完全依靠柴油发电机组, 降低输出功率运行; 三是柴油发电机组供电富裕时, 柴油发电机组单独向牵引逆变器、牵引电动机、辅助负载提供动力, 同时将多余能量向动力蓄电池充电。

5 机车实现的功能特点

与传统交直交传动内燃机车相比, CKD6E混合动力机车实现了如下特点:

机车通过600 kW小功率柴油机匹配250 kW动力蓄电池, 可以在动力蓄电池允许的范围短时发挥较大的850 kW功率, 适合调车作业要求。通过比较传统的需要装配850 kW大功率的柴油机内燃机车, CKD6E机车具备明显的节能减排优势。

机车控制系统控制机车柴油机最大限度作业在额定功率的高性能区域, 将多余的能量向动力蓄电池进行充电, 由动力蓄电池进行存储, 不足的部分由动力蓄电池补充提供。系统提高了柴油机运行效率, 提高机车整体节能减排效果和运用经济性。

机车控制系统将机车制动运行工况下的牵引电机再生制动能量部分进行回收, 储存至动力蓄电池, 使得部分废弃能量能够再生回收利用, 提高机车节能减排效果和运用经济性。

由于有动力蓄电池的稳定支撑, CKD6E机车设计的辅助系统改变了传统交流传动机车采用辅助发电机供电的方式, 直接从中间直流环节(动力蓄电池)取电, 采用DC/AC传动, 电能获取便利, 节省了传动齿轮箱、交流辅助发电机、整流等环节和设备。电路简洁,

谐波含量少, 可靠性和效率得到提高。

为适应节能减排, CKD6E混合动力机车电传动核心主变流器采用通风冷却方式散热, 与主发电机、牵引电动机共用串联冷却风道, 冷却风机由辅助变流器驱动, 进行精确转速调节。提高了系统的风道利用率, 提高了机车节能减排效果。

CKD6E机车在机车上首次应用了大容量能量型锂离子蓄电池组作为动力蓄电池。经实践验证, 锂离子蓄电池组能够满足设计要求, 虽然采购成本高于阀控铅酸蓄电池, 但从全生命周期内经济性考虑, 具有显著优势。采用新型绿色高性能大容量磷酸铁锂电池作为混合动力内燃机车储能蓄电池, 具有显著的创新特征。

6 混合动力机车开发过程中关键问题及解决措施

CKD6E机车采用了柴油发电机组和动力蓄电池双动力源, 在机车开发以及调试过程中, 与传统交流传动内燃机车相比, 存在以下几个方面的主要重点难点问题:

1) 动力蓄电池过充、过放问题

为提高柴油机经济性, 使柴油机尽量运行在高性能区, 在柴油机功率有裕量时, 设计要求以蓄电池允许的最大充电电流180 A进行快速充电。而另一方面, 与传统交流传动内燃机车相同, CKD6E机车采用了励磁发电机控制主发电机励磁的二级励磁方式, 励磁调节无法实时响应柴油机升速/降速的加速度趋势, 尤其是柴油机加速度较大的低转速位, 动力蓄电池充电/放电很容易出现过充、过放问题。试验过程中, 机车情转给定动力蓄电池最大允许180 A进行充电时, 在柴油机加速作用下最大充电电流冲击到了512 A。在司机从较高手柄位回到零位瞬间, 随着牵引力的突卸, 也存在动力蓄电池过充、过放问题。

抑制动力电池的过充、过放3个措施是: 一是适当调低正常状态下的最大允许充电和放电电流给定值; 二是按照柴油机升降速加速度分段限制柴油机的升速和降速速率; 三是按照牵引特性曲线分段降低牵引力上升和下降斜率。通过采取以上措施, CKD6E机车动力蓄电池最大充电电流限制在允许的180 A以内, 最大放电电流限制在允许的360 A以内, 满足动力蓄电池的充放电要求。

2) 动力蓄电池一致性问题

CKD6E机车动力蓄电池由220只单体锂电池串联组成, 每节单体电池额定工作电压为3.2 V, 个体性差异使得电池的一致性难以得到保障, 特别是在较大的充电电流或放电电流情况下, 个别单体电池差异性表现明显, 如电池电压容易偏高或偏低, 温升增大。

当个别单体电池电压偏离平均值较大时, CKD6E

机车控制系统可以根据蓄电池管理系统对动力蓄电池实时监视状态,调整缩小动力蓄电池的充电和放电流,减小对缺陷单体电池的持续影响,同时蓄电池管理系统进行单体电池的差异性记录。动力蓄电池一致性问题使得相应的机车运用功率减小,影响机车的整体性能发挥。

3) 动力蓄电池容量问题

动力蓄电池设计输出功率250 kW,实际在试验过程中,电池在最大允许360 A放电电流工作时,中间直流环节电压由740 V降至了643 V,降幅接近100 V,电池一致性差异也表现明显,动力蓄电池长时间难以发挥250 kW的额定功率,实际应用过程中限制动力蓄电池可以短时输出250 kW功率,超过微机根据蓄电池反馈的状态计算结果后限制输出200 kW的功率。

4) 系统设备效率问题

机车混合运用工况,发电机和牵引电动机在工作的各个转速范围,中间电压都被动力蓄电池稳定钳位在700 V,不利于电机的磁路和电路设计,发电机、牵引电动机效率整体偏低。

5) 机车对动力蓄电池的充分应用问题

通过在柴油机功率有富裕的情况下动力蓄电池进行充电,在柴油机功率不足时由动力蓄电池进行补充,在机车短途轻负载作业时用动力蓄电池完成等措施,可充分提高对动力蓄电池的利用率。混合动力机车可以充分提高柴油机以及整个机车的运用经济性。

CKD6E机车通过较长时间的调试和应用修改,目前充放电应用切换频繁,电池SOC值大部分时间维持

在40%~90%的水平,达到了较佳的状态,但仍需继续加深对动力蓄电池更佳应用状态和对机车节能环保的探索和研究,譬如配合采用地面充电系统,以及进行更深层次的机车混合度匹配、控制策略等系统领域的研究。

7 结语

CKD6E混合动力机车2010年底完成调试,2011年进行线路运用考核,完成部分性能改进,增加了制动再生能量回收功能、地面充电功能等,目前机车运行状态良好。由于具备动力蓄电池的支撑,机车启动无需等待柴油机转速上升,启动迅速,加速快,适合调车作业要求,很受司乘人员喜爱。

CKD6E混合动力机车柴油发电机组与动力蓄电池功率混合度为3:1,180 A·h动力蓄电池选用偏小,动力蓄电池单独作业时间较短,不足以单独完成一个调车作业周期。如加大混合度,按照机车作业特点,提高动力蓄电池的容量,让动力蓄电池能够独立完成一个作业周期,应该可以起到更好的节能减排效果。

CKD6E混合动力机车的研制和运用标志着我国具备完全自主知识产权的新型节能环保型机车进入了一个新的阶段,具有深远的意义。

参考文献:

- [1] 李 斌. DF_{8CJ}型交流传动内燃机车牵引传动及控制系统[J] 机车电传动, 2006(4)
- [2] 陈智豪, 张 义, 杨 格, 何 良. HXN5大功率交流传动内燃机车电传动系统[J] 大功率变流技术, 2010(3)

(上接第17页)

装调试后,在北京铁道科学研究院环行道试验基地完成了试验大纲所规定的全部辅助电路试验项目。另外,在铁道部产品质量监督检验中心牵引电气设备检验站完成了辅助变流柜型式试验。辅助电路经过各项严酷的性能试验和环境试验证明其参数性能及部件选择完全满足设计任务书的要求,完全满足大功率货物运输要求。同时机车通过各种新技术、新材料、新工艺的运

用,提高了列车运行的安全性、先进性和系统可靠性。

参考文献:

- [1] 张曙光. HXD2型电力机车[M] 北京:中国铁道出版社, 2009.
- [2] 熊成林. 不同结构的列车辅助供电系统分析与比较[J] 机车电传动, 2008(2).
- [3] 郭晓燕. 铁道机车车辆的辅助电源系统[J] 机车电传动, 2008(4).