

文章编号: 1000-128X(2019)01-0078-05

3 000 马力节能环保型调车机车电气系统设计

温吉斌, 刘景来, 魏宏, 董飞, 王明岩, 邓岳

(中车大连机车车辆有限公司 技术开发部, 辽宁 大连 116022)

摘要:介绍了3 000 马力节能环保型调车机车的设计背景, 概略地说明了该机车的配置、主要技术参数和预期的牵引、动力制动性能要求。重点介绍了机车主传动系统、辅助传动系统、动力电池管理系统和机车控制系统, 对各系统的工作原理、系统组成和主要部件参数进行了介绍, 最后对机车调试和试验情况进行了阐述。试验证明电气系统运行稳定可靠, 性能优良。

关键词:内燃机车; 调车机车; 动力电池; 主传动系统; 辅助传动系统; 逆变器

中图分类号: U260.9⁺3; U262.33

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2019.01.016

Electric System Design of 3 000 HP Energy-saving and Environment-friendly Shunting Diesel Locomotive

WEN Jibin, LIU Jinglai, WEI Hong, DONG Fei, WANG Mingyan, DENG Yue

(Technology Development Department, CRRC Dalian Co., Ltd., Dalian, Liaoning 116022, China)

Abstract: The design background of 3 000 HP energy-saving and environment-friendly shunting diesel locomotive was introduced. Configuration, main technical parameters and expected traction and braking performance requirements of the locomotive were briefly described. The main drive system, auxiliary drive system, power battery management system and locomotive control system were mainly introduced. The working principles, system components and parameters of the main components of the system were introduced. Finally, the locomotive commissioning and test conditions were described. The test proved that the electric system was stable and reliable, with excellent performance.

Keywords: diesel locomotive; shunting locomotive; traction battery; main drive system; auxiliary drive system; inverter

0 引言

目前, 国内调车场的调车机车以 DF₅ 和 DF₇ 等系列机车为主。截至 2018 年 5 月, 这些机车共有超过 1 900 台, 最后一批 DF₇G 机车配属机务段距今已有 13 年, 这些机车普遍存在严重老化问题。虽然这些机车功率已经达到 3 000 马力 (2 205 kW), 但是它们的主传动系统是直流传动, 在启动牵引力和低速牵引力上明显低于交流传动机车。近几年, 随着 HX_N3B 和 HX_N5B 大功率交流传动内燃机车的开发和应用, 在一定程度上缓解了调车场的瓶颈现象, 尤其对大编组的牵入牵出和小运转工况优势明显, 但对于一些小编组的调转和推峰等作业, 功率稍大。为了满足国内调车

作业多样性需求、保障编组站作业、更新换代老化的直流传动调车机车, 3 000 马力功率等级交流传动调车机车的开发势在必行。基于此, 2015 年 2 月中国铁路总公司下发了《3 000 马力节能环保型调车机车技术研究》招标任务书, 该任务书确定由中车大连机车车辆有限公司联合中车戚墅堰机车有限公司和中车资阳机车有限公司共同开发 3 000 马力节能环保型调车机车。

1 机车概述

3 000 马力节能环保型调车机车为单机室、外走廊、底架承载的结构, 采用了 12V240H 柴油机, 继承了国内新一代交流传动内燃机车平台技术的调车机车优势。该机车配置了 180 kW·h 动力电池, 实现了制动能量的回收, 为机车单机运行和辅助系统提供能量, 从而减少柴油机的排放、噪声和工作时间, 达到节能环保的目的。

收稿日期: 2018-05-29; 修回日期: 2018-11-23

基金项目: 中国铁路总公司科技研究开发计划课题 (2015J002-A)

1.1 机车主要性能参数

机车采用 32 位网络微机控制系统和架控技术, 轴式为 C_0-C_0 , 最大启动牵引力 560 kN, 持续牵引力 540 kN, 采用分布式网络智能模块机车空气制动系统。机车具有高牵引力、高黏着利用率、高效率、低能耗、低排放等特点, 最高运用速度 100 km/h, 具体参数见表 1。

表 1 3 000 马力节能环保型调车机车主要性能参数

技术参数	数值或说明
用途	调车, 小运转
主传动方式	交直交电传动
柴油机最大运用功率 /kW	2 500
轴式	C_0-C_0
最大运用速度 / (km·h ⁻¹)	100
持续速度 / (km·h ⁻¹)	12.6
最大启动牵引力 /kN	560
持续牵引力 /kN	540
最大电阻制动力 /kN	300
动力电池容量 / (A·h)	240
轮周动力制动功率 /kW	1 900
轮周牵引功率 /kW	1 900

1.2 机车牵引和制动性能

为了保证机车有充足的牵引力和制动力, 具有宽广的恒功运行速度范围, 机车牵引传动齿轮比选取 91:16, 牵引电动机采用 YJ116C。机车预期的启动牵引力最大 560 kN, 持续牵引力 540 kN, 持续速度 12.6 km/h。机车具有启动和持续牵引力大、持续速度低的特点, 非常适合调车工况。机车电阻制动最大制动力为 300 kN, 预期的牵引和电阻制动特性见图 1。

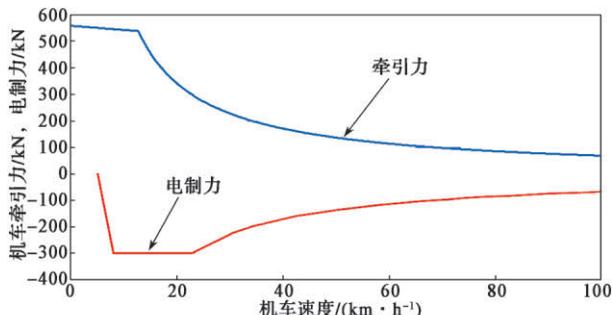


图 1 机车牵引 / 电制动特性曲线

2 机车主传动系统

机车主传动系统采用交直交电传动系统、主辅一体供电方式。机车具有 2 组独立的中间直流环节, 采用架控风冷的牵引逆变系统, 相比轴控逆变系统其结构更为简单, 牵引逆变系统可以方便地集成在电器柜内。采用架控和轴控牵引逆变系统均可以实现高的牵引黏着因数^[1]。主传动系统主要由主发电机、整流斩波模块、动力电池、牵引逆变模块、交流牵引电机和制动电阻装置等组成, 如图 2 所示。牵引逆变模块由大功率 IGBT 模块组成, 采用电压型、二电平电路结构, 冷却方式采用强迫风冷。2 个牵引逆变器分别为前、后架牵引电动机供电。在牵引工况下, 牵引逆变器采用变压变频方式向牵引电机供电; 在制动工况下, 牵引逆变器通过交直变换, 将牵引电动机发出的三相交流电转换成直流电, 回馈到中间直流环节。

机车采用三电平双向 DC 斩波模块对动力电池进行充电控制。由于采用了三电平技术, 可以提高斩波模块斩波的开关频率, 实现动力电池充电功率更精准控制。在牵引逆变模块内部增加制动斩波模块, 实现对制动电阻消耗的能量进行控制,

制动反馈的能量首先满足整车辅助系统使用, 多余的能量给动力电池进行充电, 当超过动力电池能吸收的最大能量时, 剩余能量在制动电阻装置上消耗。此外, 制动斩波模块还具有中间直流环节过压保护作用, 当中间直流环节过压时, 微机系统控制制动斩波模块开通, 将中间直流环节电容上多余的能量在制动电阻装置上消耗。

2.1 中间直流电压的选择

中间直流电压是内燃机车交流传动系统的一个关键参数, 它决定了主发电机、主整流器、主逆变器、制动电阻装置以及牵引电动机等系统主要设备的功率等级, 决定了设备的输入以及输出电压、电流, 进而

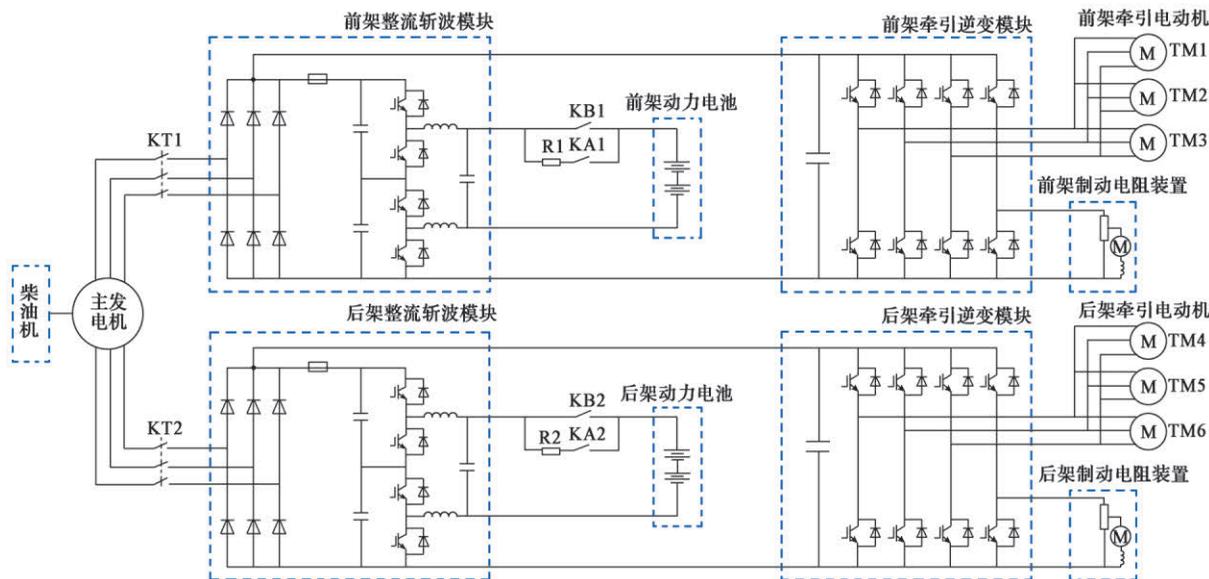


图 2 机车主传动系统

决定了设备的体积、重量。中间直流环节电压的优化选择、控制调节是一个复杂的系统问题。对于 3 000 马力功率等级的架控机车，选择 1 500 V 电压等级的中间直流电压，牵引逆变器的最大电流不大于 1 200 A^[2]，机车中间直流电压、电流处于一个相对合理的范围内。通过对 1 500 V 和 1 800 V 2 种中间直流电压方案进行牵引逆变器损耗计算对比分析，结果如图 3 所示。从图 3 可以看出，DC 1 800 V 方案在机车全速度范围内牵引逆变器损耗比 DC 1 500 V 方案低。

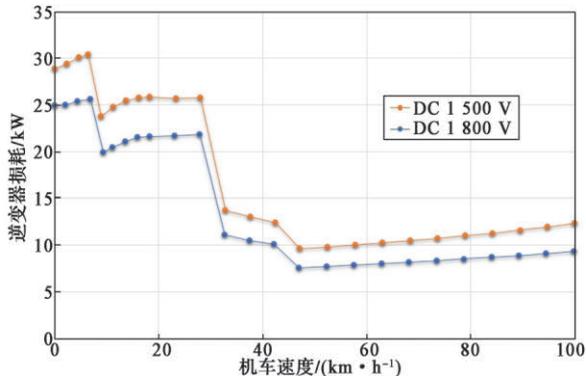


图 3 1 500 V 和 1 800 V 2 种电压等级牵引逆变器损耗对比

同时，对于 2 种电压等级牵引电机效率进行了对比计算分析，结果如图 4 所示。从图 4 可以看出，DC 1 800 V 方案牵引电机效率在机车全速度范围内比 DC 1 500 V 方案要高。

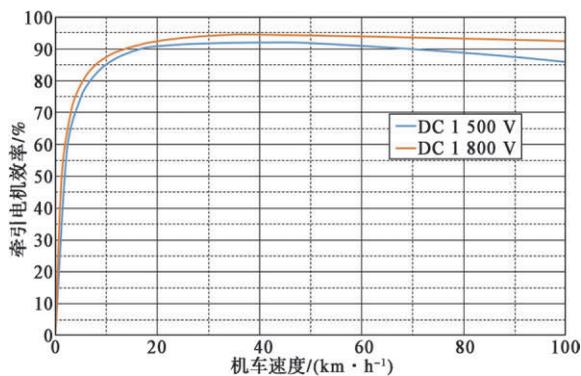


图 4 1 500 V 和 1 800 V 2 种电压等级牵引电机效率对比

3 000 马力节能环保型调车机车采用主辅一体供电方式，机车仅配备主发电机，主传动系统和辅助传动系统均从中间直流环节取电。机车采用辅助调压模块将中间直流环节高压电隔离降压为稳定的 DC 600 V，输出到辅助传动系统的辅助中间直流环节，然后通过小功率辅助逆变器驱动各个辅助负载。为保证机车在惰转时辅助调压模块仍可以输出 600 V，中间直流电压选择 1 800 V 更有利于降低主发电机磁负荷，减小主发电机体积和重量。

基于以上几点，3 000 马力节能环保型调车机车将中间直流环节最高电压选择为 1 800 V，机车设有 8 个挡位，惰转工况时机车中间直流环节最低电压为 730 V。

2.2 机车混合动力管理系统及控制策略

3 000 马力节能环保型调车机车不是严格意义上的

混合动力机车，机车动力还是以柴油机为主。通过配备 180 kW·h 动力电池提供辅助动力，实现回收制动能量，为机车单机运行和辅助系统提供能量，从而减少柴油机的排放、噪声和工作时间，达到节能环保的目的。因此，机车的控制策略与混合动力机车不同，机车设有“电池供电”和“柴油机动力”2 种工作模式，司机通过操纵台开关进行模式的选择。

2.2.1 “电池供电”模式

在“电池供电”模式下，当动力电池电量充足时，0~4 挡手柄位由动力电池供电，当手柄位处于 5 挡或更高并且维持一段时间，机车自动启动柴油机。柴油机启动前由动力电池维持 4 挡手柄功率和牵引力；当柴油机启动后柴油发电机组为整车供电，同时给动力电池进行充电，充至 90% 停止充电。当手柄位从 5 挡位回到 4 挡及以下维持一段时间，同时满足 2 架动力电池电量高于 80% 时，柴油机停机。

当动力电池电量不足时，机车开始自动启动柴油机。启动过程中，仍然由动力电池为机车供电。当柴油机启动后，由柴油机为机车供电，同时给动力电池进行充电。

2.2.2 “柴油机动力”模式

当动力电池电量充足时，手柄位在 0~3 挡时机车由动力电池供电，手柄位在 4~8 挡时机车由柴油机供电。

当动力电池电量不足时，由柴油机为机车供电，同时为动力电池进行充电。

2.3 主要部件参数

2.3.1 主发电机

3 000 马力节能环保型调车机车主发电机是在 TQFR3000 系列主发电机基础上借鉴 YJ117 主发电机磁极技术研发，采用额定转速 1 000 r/min、有刷、自通风、18 极凸极结构的单轴承支撑电机。该主发电机主要技术参数见表 2。

表 2 主发电机主要技术参数

技术参数	数值或说明
定子绕组 / 套	2
额定容量 / (kVA)	2 500
额定电压 / V	1 406
额定电流 / A	2 × 516
额定转速 / (r·min ⁻¹)	1 000
功率因数	0.95
额定频率 / Hz	150
额定效率 / %	95.5
通风方式	自通风
绝缘等级	H

2.3.2 牵引逆变器

3 000 马力节能环保型调车机车用牵引逆变器由 2 个单元组成，U、V 两相组成逆变单元 1，W 相和制动斩波回路组成逆变单元 2。机车中间直流环节直流电经牵引逆变器逆变为交流电后分别为同一个转向架上的 3 台牵引电动机的 U、V、W 三相供电，另外制动电阻通过逆变单元 2 的斩波电路接入到中间直流环节，牵引逆变器主要技术参数见表 3。

2.3.3 牵引电动机

牵引电动机采用三相鼠笼式异步交流电动机，额

定功率 324 kW, 满足机车小运转要求。电机从设计角度选取了较低的热负荷, 满足高温环境要求。该牵引电动机适用于“电池供电”和“柴油机动力”2种供电模式。在这2种供电模式下, 高速、低速均有较高的效率和功率因数, 同时该牵引电机进行轻量化设计以降低整机重量, 主要技术参数见表4。

2.3.4 制动电阻装置

制动电阻装置采用双单元顶置卧式结构, 装置包含2套独立的电阻带单元, 每套电阻带配1套风机, 电阻带采用强迫风冷散热, 风机电机为直流电机, 由电阻带抽头供电, 电阻带材质为镍铬合金, 制动电阻装置主要技术参数见表5。

2.3.5 动力电池

1) 动力电池主要参数

3 000 马力节能环保型调车机车采用钛酸锂电池作为机车的动力电池。相比其他锂电池, 钛酸锂电池的安全性能、大功率充放电性能及低温性能更适合调车机车的使用环境与运用要求。动力电池装置内部由电气隔离的2个容量相同电池模组组成。每个模组由相同的蓄电池模块先串联再并联组成。蓄电池模块在满足电池装置参数条件下, 单体和电池模块参数可适当调整。动力电池主要技术参数见表6。

2) 动力电池管理系统

动力电池配备了智能的动力电池管理系统, 可以实时监测和管理各子系统的运行状态参数, 实现部件管理及控制等功能, 并可通过以太网通信方式将动力电池相关信息传输给机车控制系统, 可在机车微机显示屏中显示相关状态、故障信息。同时为了保证动力电池系统的安全性、冗余性及实时的人机交互, 动力电池管理系统具有以下功能:

①可以检测每个串节点电池的电压和温度;

②具有 SOC/SOH 估算功能;

③具有串节点电压和温度的硬线冗余保护功能;

④具有对系统状态的分级保护功能;

⑤具有自动均衡功能。

2.3.6 控制蓄电池

机车控制蓄电池同样采用了钛酸锂电池。采用钛酸锂电池作为控制蓄电池可以减小控制蓄电池体积, 提高机车控制蓄电池使用寿命。控制蓄电池主要技术参数见表7。

3 机车辅助电气系统

机车采用主辅一体供电方式, 辅助传动系统直接从中间直流环节取电。辅助电气系统主要由辅助调压模块、辅助逆变器、辅助电动机、主发电机励磁斩波模块、110 V 充电器及其他辅助设备组成, 如图5所示。辅助调压模块将中间直流环节的直流电降压隔离后为辅助逆变器、主发电机励磁斩波模块和110 V 充电器等设备供电。辅助调压模块输出具有电压环和功率环双闭环控制方式, 会随着辅助负载的变化自动地进行均流和输出功率分配。此外, 辅助调压模块还具有超温、过压、过流、短路等保护功能。辅助电机全部采用逆变器驱动的控制方式, 这种控制方式可以实现辅助电机的无级调速, 使辅助系统达到最佳工况, 起到明显节能效果。此外, 逆变器驱动方式可以实现辅助电机变频启动, 电机启动电流小, 对电气系统及机械系统冲击小, 能显著延长电控元件及电机的寿命, 可以达到免维护运用^[3]。为了使机车各辅助电动机可以根据机车具体的需要调整自身工况, 不同的辅助电动机采用了不同的控制方式: 空压机采用定压变频(CVCF)的控制方式; 冷却风扇采用变压变频(VVVF)的控制方式; 对于功率较小的辅助电动机, 如除尘风机、动力室通风机、动力电池通风机等, 将这些电机并联采用定压变频(CVCF)的控制方式, 并在这些电机和辅助逆变器之间配备交流接触器, 用于断开相对应的辅助电动机, 满足机车能够单独关闭某些情况下不必要的辅助电动机的需求, 实现节能。机车采用励磁斩波模块对主发电机励磁电流进行控制, 励磁斩波模块从辅助中间直流环节600 V取电, 最大输出电流 $I \leq 200$ A, 从机车调试及试验结果看, 该励磁斩波模块可以实现对主发电机励磁电流的精确调节。

4 机车控制系统

机车控制系统由实现机车控制、通信、诊断和保护功能的软、硬件构成。机车内部各系统主要通过以太网环网通信方式进行信息交换, 整车网络拓扑结构如图6所示。机车控制系统的功能符合调车及小运转

表3 牵引逆变器主要技术参数

技术参数	数值或说明
额定输入电压/V	1 800
额定输出电压/V	1 404
输出电流/A	885
额定效率/%	98
冷却方式	强迫风冷

表4 牵引电动机主要技术参数

技术参数	数值或说明
额定功率/kW	324
额定电流/A	282
启动电流/A	300
额定转速/(r·min ⁻¹)	318
功率因数(持续点)	0.87
额定转矩/(N·m)	9 760
额定效率(持续点)/%	90
启动转矩/(N·m)	10 080
绝缘等级	200级
冷却方式	强迫风冷

表5 制动电阻装置主要技术参数

技术参数	数值
输入电压/V	1 746
额定功率/kW	2 × 1 150
电机额定功率/kW	36
电机额定转速/(r·min ⁻¹)	3 300

表6 动力电池主要技术参数

技术参数	数值或说明
标称电压/V	772.8
容量 C1/(A·h)	240
电池类型	钛酸锂
单体标称电压/V	2.3
单体额定容量/(A·h)	20

表7 控制蓄电池主要技术参数

技术参数	数值或说明
标称电压/V	103.5
容量 C1/(A·h)	80
电池类型	钛酸锂
单体标称电压/V	2.3
单体额定容量/(A·h)	20

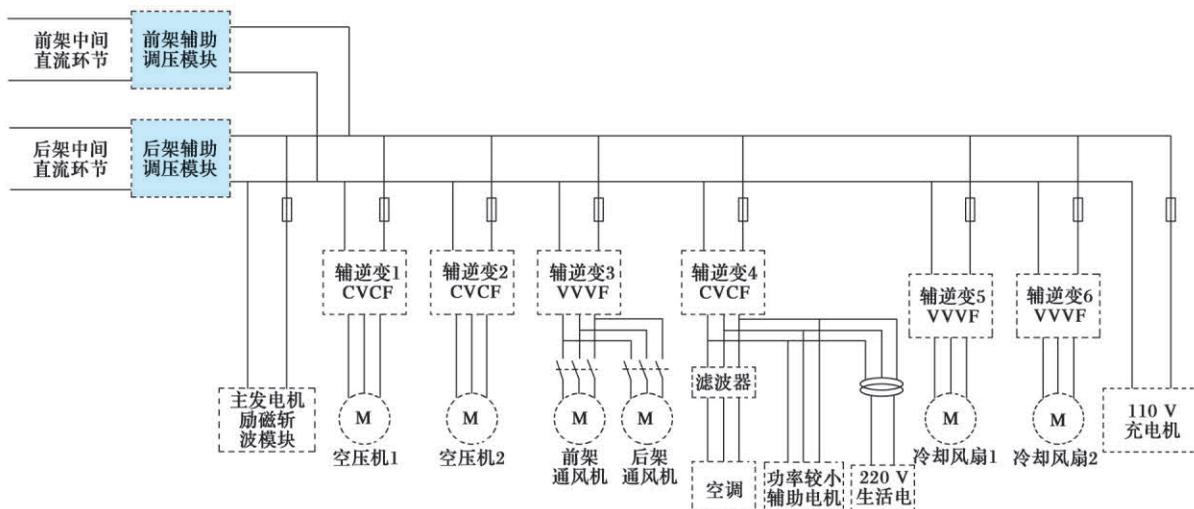


图5 机车辅助传动系统

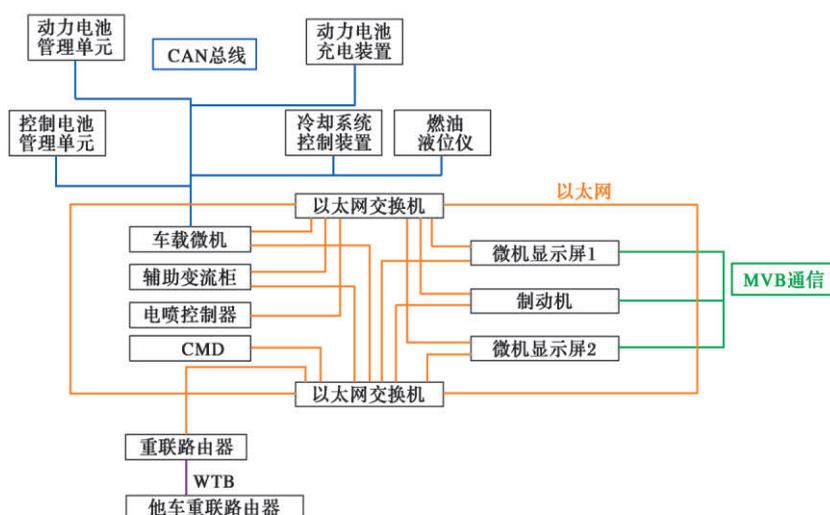


图6 机车网络拓扑图

工况的控制需求。

4.1 机车控制单元

机车控制单元接收司机操纵台或其他车重联线发来的指令信号，按照机车运行特性要求，结合机车的运行状态，生成实时指令，传送到机车控制系统其他相应模块单元上，以完成机车的运行控制和保护。

4.2 输入输出接口单元

输入输出接口单元采集各种传感器信息，经处理后再传输到相应的控制单元，同时，将控制单元发出的指令转换成合适的驱动信号，控制相应的电子-机械执行装置。

4.3 牵引控制单元

牵引控制单元接收机车控制单元发出的指令信号和牵引电机的状态信息，对牵引逆变器进行实时控制，为牵引电机提供调频调压的三相交流电，以实现牵引电机转矩与转速的控制。

4.4 柴油机控制单元

柴油机控制单元接收来自机车控制单元和柴油机的各种状态信息，实现对柴油机燃油喷射控制和转速控制，同时具有对柴油机完善的保护功能。

4.5 显示单元

机车显示单元具有机车牵引逆变器、主发电机、牵引电动机、制动系统、中间直流环节、辅助电机和动力电池等部件的运用状况、运行参数以及各类故障信息的显示功能。

4.6 机车诊断、保护及记录

机车具备对动力电池进行诊断、保护及记录的功能；具备对柴油机油/水温度、压力、电气短路、接地、过压、过流、空转/滑行、机车超速、锁轴等的保护。

5 技术创新点

机车在动力制动过程中，将原来驱动轮对的牵引电动机转变为发电机，利用机车或列车的惯性由轮对带动电动机转子旋转而发电，从而产生反转力矩，消耗机车或列车的动能，从而达到产生制动作用的目的；同时利用发出的电能给动力电池进行充电，实现制动能量的回收利用。由于机车动力电池最大充电功率是一定的，当机车反馈的制动功率大于动力电池所能吸收的最大功率时，动力制动会失效，此时机车自动或司机手动将动力制动转为空气制动。在制动方式转换过程中，会出现机车冲动现象，影响机车的安全性。

为了解决上述问题，3 000 马力节能环保型调车机车采用三电平双向 DC 斩波模块对动力电池进行充电控制，同时在制动电阻电源输入侧增加制动斩波模块，实现对制动电阻消耗的能量进行控制，保证制动反馈的能量首先满足整车辅助系统需要，将多余的能量给动力电池进行充电。当可用于充电的能量超过动力电池能吸收的最大能量时，剩余能量在制动电阻上消耗。机车能量管理系统对回收的制动能量进行合理分配，保证了机车制动的平稳性。

(下转第 86 页)

励磁斩波器输入的接触器 AFC (7KM) 闭合, 电容开始充电。由于没有预充电电路, 充电回路中也没有充电电阻, 电源在给电容充电的瞬间相当于处在短路的状态, 充电瞬间引起 DC 74 V 电源电压跌落。

2.2.2 ±15 V 电源的验证试验

为了进一步验证该问题, 进行了如下的试验:

用示波器测试 TCU 给 TV1 电压传感器供电的 ±15 V 电源波形, 该电源由 DC 74 V 供电, 经过多级 DC-DC 电源模块变换为 ±15 V, 发现同样出现电压跌落的问题, 导致 TCU 报欠压过流故障, 电源波形如图 9 所示。



图 9 ±15 V 电源电压跌落波形

图 9 中电压跌落的时刻, 对应于机控开关打到运行位的时刻, 即 DC 74 V 电源电压跌落的时刻, 验证了蓄电池 DC 74 V 电压跌落也造成了 ±15 V 电源电压跌落。

3 解决措施及试验验证

3.1 软件处理

在模式判断中对钥匙信号和紧急停机信号做消抖处理, 过滤掉因电源电压瞬间跌落引起的错误信号, AFD (11KM), AFC (7KM), DCOP (22KM), DCCL (21KM) 接触器跳变的问题得到解决, 测试正常。但是通过软件滤波处理, 会影响系统响应的实时性。

3.2 硬件处理

软件处理方案仅仅是规避了数字信号跳变, 为了解决电源电压跌落问题, 作为验证方案, 在 7KM 接触器的 2 个主触点上分别并联上 2 个电阻, 总阻值为 5 760 Ω, 进行测试的结果如下:

①斩波器中间电容充电时间约 1 min, 充电电压值约 64 V; 放电时间约 1 min。

②机控开关打到运行位, 钥匙信号和紧急停机信号无跳变, AFD (11KM), AFC (7KM), DCOP (22KM), DCCL (21KM) 接触器无跳变, 牵引软件无报警。

③恢复无消抖处理的 LCU 逻辑测试, 钥匙信号和紧急停机信号无跳变, AFD (11KM), AFC (7KM), DCOP (22KM), DCCL (21KM) 接触器无跳变, 牵引软件无报警。

3.3 后续计划

在 7KM 接触器的主触点上并联电阻可解决故障, 验证了对故障原因分析的正确性及解决措施的可行性, 后续计划增加预充电电路, 彻底解决该问题。

4 结语

本文详细介绍了 1 000 kW 交流传动重型轨道车辅助系统励磁斩波器的设计调试过程, 在实践中改进斩波器应用方案后, 提高了辅发电压控制的稳定性, 但却带来了新的问题—辅助系统重复投切。通过进一步查找、研究, 找到了问题根源, 并加以解决, 系统目前运行良好。

参考文献:

- [1] EMD 公司. JT56ACe 型机车运用手册 [M]. Grange La, Illinois, USA: Electro-Motive Diesel, Inc., 2007.
- [2] 包学志, 马明伟, 张志刚. HXn3 型内燃机车运用与操纵 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.

作者简介: 周国卷 (1969—), 男, 教授级高级工程师, 从事电传动系统应用研究。

(上接第 82 页)

6 结束语

3 000 马力节能环保型调车机车 2018 年 11 月还在进行运用考核, 从整车调试、型式试验及目前运用考核的结果来看, 机车的牵引、动力制动、动力电池快速充电、动力制动能量回收及自负荷等工况运行平稳, 整车操控方便、黏着控制效果良好, 柴油机转速波动小、工况转换良好, 表明电气系统满足整车设计要求。

参考文献:

- [1] 王强. 大功率交流传动内燃机车产品技术平台的建立 [J]. 铁道机车车辆, 2011(2): 11-15.
- [2] 刘连根. 内燃机车中间直流电压的选择与变流系统标准化设计 [J]. 机车电传动, 2002(2): 19-22.
- [3] 封建坤, 尚玲. 内燃机车交流辅助传动系统的现状与发展 [J]. 内燃机车, 2003(1): 28-31.

作者简介: 温吉斌 (1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事内燃机车电传动系统的研发工作。