

1-15-2021

Modeling and Simulation of Traction System in Hybrid Shunting Locomotive

Kun Shen

1. Institute of Physics and Information Science, Hunan Normal University, Changsha 4100B1, China; ;

Wang Ling

1. Institute of Physics and Information Science, Hunan Normal University, Changsha 4100B1, China; ;

Wang Jian

2. CSR Times Electric Co. Ltd., Zhuzhou 412001, China;

Xiaoyang Yao

2. CSR Times Electric Co. Ltd., Zhuzhou 412001, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Modeling and Simulation of Traction System in Hybrid Shunting Locomotive

Abstract

Abstract: The structure of traction system in hybrid shunting locomotive was analyzed, and the working principles of traction system under multiform power models were introduced. Based on which, *the models of traction system and power accumulators of this hybrid shunting locomotive were built by MATLAB/Simulink, then the simulation experiments on hybrid shunting locomotive with the power models of hybrid power, and pure diesel generator power or pure accumulator power were done respectively.* The simulation results show that hybrid shunting locomotive can achieve reliable operation in different conditions by the designed main circuit structure, parameters and system energy management strategy.

Keywords

hybrid shunting locomotive, traction system, modeling, simulation

Recommended Citation

Shen Kun, Wang Ling, Wang Jian, Yao Xiaoyang. Modeling and Simulation of Traction System in Hybrid Shunting Locomotive[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(6): 1388-1393.

混合动力调车机车牵引系统建模与仿真

沈坤¹, 王玲¹, 王坚², 姚晓阳²

(1. 湖南师范大学物理与信息科学学院, 长沙 410081; 2. 南车时代电气股份有限公司技术中心, 株洲 412001)

摘要: 分析了混合动力调车机车牵引系统的结构, 介绍了多种动力模式下牵引系统的工作原理。在此基础上采用 MATLAB/Simulink 构建了混合动力调车机车牵引系统的主电路模型及动力蓄电池模型, 对所构建的混合动力调车机车牵引系统模型进行了混合动力牵引、纯柴油发电机牵引、纯动力蓄电池牵引等工况的仿真实验。仿真结果表明, 该混合动力调车机车的主电路结构、参数及系统能量管理策略可以实现混合动力调车机车在不同工况下的可靠运行。

关键词: 混合动力调车机车; 牵引系统; 建模; 仿真

中图分类号: TP391.9; U260.9+3
DOI:10.16182/j.cnki.joss.2015.06.033

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 06-1388-06

Modeling and Simulation of Traction System in Hybrid Shunting Locomotive

Shen Kun¹, Wang Ling¹, Wang Jian², Yao Xiaoyang²

(1. Institute of Physics and Information Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China;

2. CSR Times Electric Co. Ltd., Zhuzhou 412001, China)

Abstract: The structure of traction system in hybrid shunting locomotive was analyzed, and the working principles of traction system under multiform power models were introduced. Based on which, the models of traction system and power accumulators of this hybrid shunting locomotive were built by MATLAB/Simulink, then the simulation experiments on hybrid shunting locomotive with the power models of hybrid power, and pure diesel generator power or pure accumulator power were done respectively. The simulation results show that hybrid shunting locomotive can achieve reliable operation in different conditions by the designed main circuit structure, parameters and system energy management strategy.

Keywords: hybrid shunting locomotive; traction system; modeling; simulation

引言

当前, 在能源危机及环境污染的双重压力下, 基于混合动力概念的动力模式已在汽车领域得到了广泛关注和深入研究, 并取得了很好的实际效果^[1-2]。在机车领域, 由于调车机车作业具有宽负荷范围、短运送距离、柴油机空转时间长及运行速度低等特点^[3], 因此出于节约能源、减少污染的考虑, 混合

动力调车机车已成为了国内外混合动力机车研究的热点^[3-6]。其中文献[3]介绍了阿尔斯通公司在 202 型内燃机车基础上研发的混合动力调车机车, 该车采用蓄电池与柴油发电机并联于中间回路直流侧的主电路结构, 根据工况实现对蓄电池的充、放电操作。文献[5]介绍了加拿大 Rail Power Technology 公司研发的 Green Goat 混合动力调车机车; 文献[6]介绍了基于飞轮和蓄电池的混合动力机车, 并给出了有效的能量管理策略。上述文献对混合动力调车机车的系统结构与工作原理进行了理论论述, 并给出了部分试验数据, 但缺乏对混合动力调车机车牵引系统的深入研究。



收稿日期: 2014-05-14 修回日期: 2014-09-11;
基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ6070);
作者简介: 沈坤(1984-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为变流器系统建模仿真及模型预测控制; 王玲(1962-), 女, 博士, 教授, 博导, 研究方向为信息系统及信号处理。

<http://www.china-simulation.com>

• 1388 •

本文首先分析了某型混合动力调车机车牵引系统的主电路结构及其工作原理, 应用 MATLAB/Simulink 构建了系统仿真模型, 结合调车机车的工作过程进行了混合动力牵引、纯柴油发电机牵引、纯动力蓄电池牵引等多种工况的仿真实验, 并分析了仿真结果, 最后给出了结论。

1 混合动力调车机车牵引系统与工况需求分析

1.1 混合动力调车机车牵引系统结构

由南车集团某公司设计的混合动力调车机车牵引系统结构框图如图 1 所示^[4]。其主电路由柴油机-主发电机系统、整流器、中间回路、主逆变器、

牵引电机、辅助逆变器、辅助电机及动力蓄电池组成。其中动力蓄电池由 220 个串联的单体磷酸铁锂电池组成, 并与牵引逆变器及辅助逆变器并联在中间回路上。系统控制主要由司控器、微机控制器、蓄电池管理系统、DCU(交流传动控制系统)及辅变控制器等控制器完成。其中司控器给出牵引级位(0-16 级), 微机控制器实现对不同级位下系统能量的管理, 即作为机车级中央控制单元对柴油机-主发电机系统、牵引逆变器、辅助逆变器及动力蓄电池进行控制。DCU 实现对四象限整流器的实时控制及逆变器即交流异步牵引电动机的实时控制和粘着控制。蓄电池管理系统实现对动力蓄电池参数的监控^[4]。

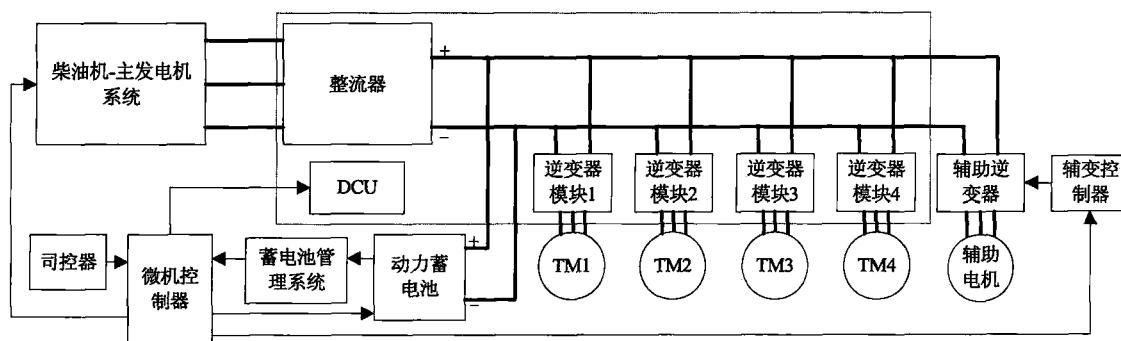


图 1 混合动力调车机车牵引系统结构框图

1.2 工况需求分析

依据混合动力调车机车牵引系统动力来源的不同, 将混合动力调车机车工况分为以下 3 种^[4]:

(1) 纯柴油机提供牵引动力工况

纯柴油发电机牵引工况时动力蓄电池未并入中间回路, 机车运行所需动力均由柴油机提供, 该工况即为当前内燃机调车机车的工作过程。司控器给出的动力形式为“纯柴油动力”, 牵引手柄级位调节范围为 0-10 级。每级对应的柴油机转速、主发电机输出功率、主逆变器及辅助逆变器吸收功率基本恒定, 在此基础上调节主发电机励磁电流, 使牵引系统稳定工作。若级位超过 10 级微机控制器自动封锁级位输出信号, 将级位信号限制在 10 级。

(2) 纯动力蓄电池提供牵引动力工况

纯动力蓄电池牵引工况为柴油机不牵引, 由动力蓄电池牵引机车运行, 主要适用于机车轻负载或工作接近结束时。司控器给出的动力形式为“纯动力蓄电池动力”, 此时柴油机处于停机状态, 牵引手柄级位调节范围为 0-6 级。依据司控器牵引手柄级位给定主逆变器吸收功率, 通过调节主逆变器 IGBT 导通脉冲的宽度, 来控制机车输出功率即控制了动力蓄电池组的放电功率, 同时根据动力蓄电池状态如电池电压及放电电流等调整主逆变器输出功率并提供保护。

(3) 混合动力牵引工况

混合动力工况是混合动力调车机车的主要工作状态, 司控器给出的动力形式为“混合动力”。按照所给牵引级位的不同, 其工作过程可分为 3 个阶段: 第 1-9 级为柴油机优先提供牵引动力, 多

余部分向动力蓄电池充电阶段。此时微机控制器根据牵引级位所对应的主逆变器吸收功率、辅助逆变器吸收功率及动力蓄电池最大允许充电功率确定出主发电机输出功率,进而调节柴油机给定转速及发电机励磁电流以满足主发电机输出功率要求。第 10 级为柴油机满负荷牵引阶段,此时微机控制器控制主发电机励磁电流,使主发电机发出的电压略高于动力蓄电池组的电压,这样动力蓄电池组的充电或放电电流接近于 0,不允许向动力蓄电池组充电,使柴油机-主发电机系统的输出功率全部用于机车牵引。第 11-16 级为柴油机与动力蓄电池混合牵引阶段,此时主发电机输出功率为一定值,微机控制器根据牵引级位所确定的主逆变器及辅助逆变器吸收功率调节动力蓄电池放电电流,同时监控动力蓄电池状态,保证其工作在安全的电压及充、放电电流范围内。

2 仿真模型建模

按照图 1 所示系统结构框图,采用

MATLAB/Simulink 构建的混合动力调车机车牵引系统主电路模型图如图 2 所示。在图 2 中,为简化分析及侧重考察整个牵引系统能量传输及管理特性,本文将柴油机-主发电机系统简化为同步发电机模型,通过控制同步发电机的输出功率及励磁电压模拟对柴油机-主发电机系统输出功率的控制及输出电压的调节。利用二极管整流器对同步发电机输出的三相交流电进行整流,得出中间回路直流电压。动力蓄电池模块及逆变器模块并联在中间回路上,其中逆变器采用通用三相 IGBT 桥模块,牵引电机为三相异步电机。通过控制异步电机给定转矩来模拟系统负载,辅助逆变器吸收功率则被平均分配到各主逆变器上。最后通过逆变控制模块实现对异步电机的控制。本文的系统仿真模型结构采用分层结构,在图 2 所示牵引系统主电路仿真模型的上一级模型中,司控器仿真模型主要用于设定系统动力模式以及牵引级位,由动力模式决定当前系统将进入的工况,而牵引级位则对应着主发电机输出功率及逆变器吸收功率。

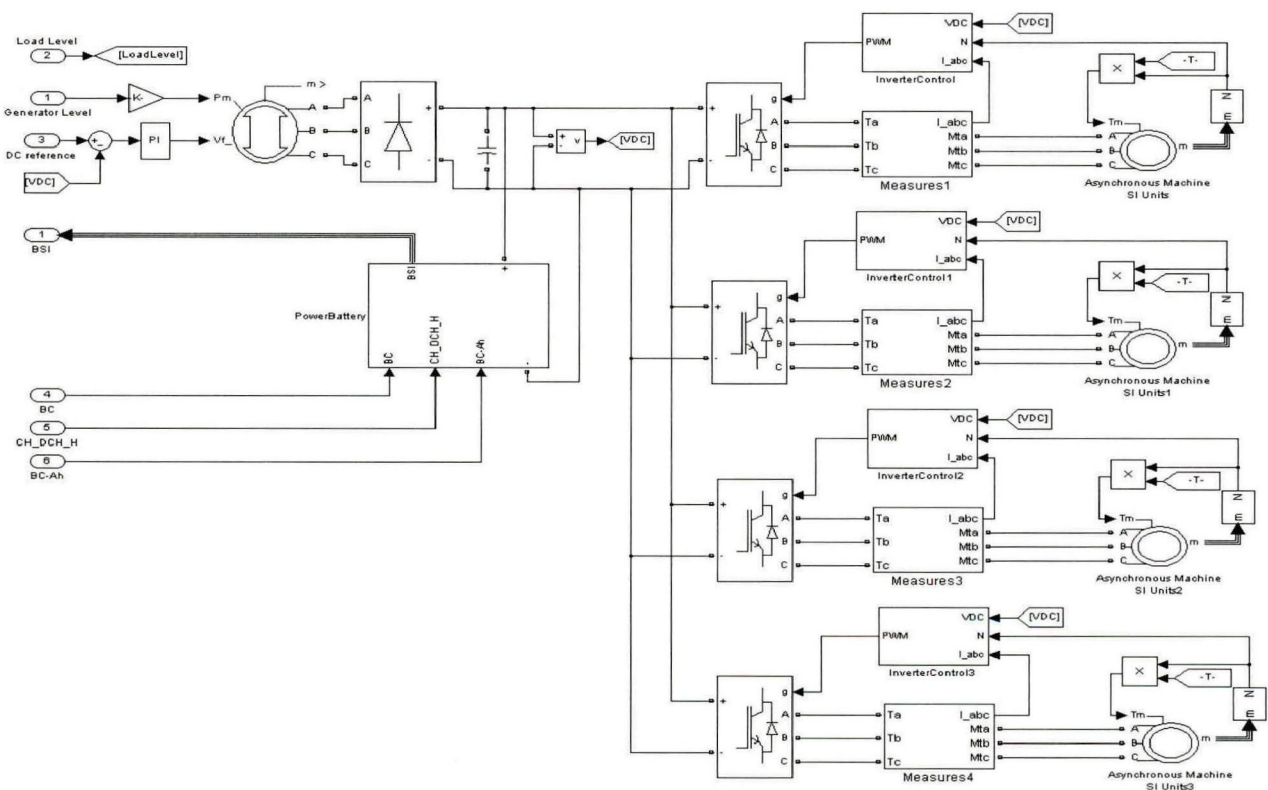


图 2 混合动力调车机车主电路 MATLAB 模型图

在图 2 中, 同步发电机的输出功率由牵引级位对应的主发输出功率给定, 而对中间回路电压的控制则通过 1 个 PI 调节器实现。在逆变控制模块中, 采用磁场定向控制(Field Oriented Control, FOC)算法实现对三相异步电机的控制, 在仿真模型中, 直接由异步电机测量模块生成电机转速, 采用速度和磁通双 PI 控制环结构, 生成三相逆变器电压调制波, 再经过 SVPWM 调制生成 PWM 控制信号。

动力蓄电池的 MATLAB 模型图如图 3 所示, 在本文中动力蓄电池采用受控电压源与电阻串联的方式模拟, 并假设各单体电池的特性均匀、一致。在已知单体电池充、放电电压与其 SOC 值特性曲线的基础上, 由蓄电池管理系统计算出蓄电池当前 SOC 值。同时由微机控制器给出的蓄电池充、放电指令来选择蓄电池充、放电特性表, 根据 SOC 值查表得出当前蓄电池的电压值。最后通过控制串联电阻值实现对动力蓄电池输出电流的控制。

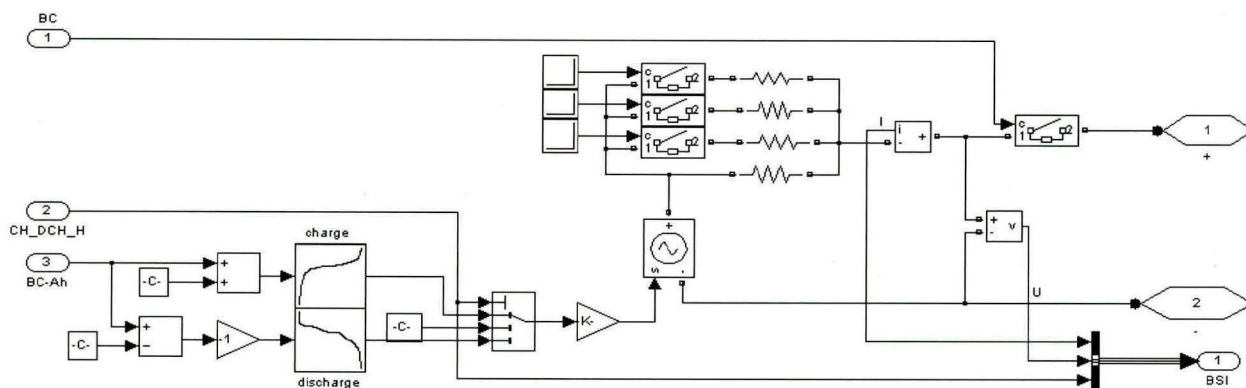


图 3 动力蓄电池 MATLAB 模型图

3 仿真实验

为验证混合动力调车机车牵引系统的性能, 在构建上述仿真模型的基础上, 本文对混合动力调车机车的 3 种工况进行仿真实验。仿真系统主电路参数如表 1 所示^[4]。

3.1 纯柴油发电机牵引工况仿真

在此工况下, 司控器牵引手柄级位控制在 10 级及以下, 仿真结果如图 4 所示。其中图 4(a)为中间回路电压波形图, 可见纯柴油发电机牵引时牵引系统中间回路电压基本不变, 维持在 720 V 左右。图 4(b)为发电机输出功率波形图, 在 10 级之前发电机输出功率随司控器牵引手柄级位的上升而逐步上升, 在 10 级之后基本不变, 维持在 558 KW 左右。图 4(c)为牵引电机转速波形图, 牵引电机的转速随牵引手柄级位的上升而逐渐增大, 至 10 级时达到最高速度。

表 1 系统主电路参数

参数类型	数值
主发电机参数	
额定容量	600 KVA
额定输出电流	AC621 A
额定转速	1800 r/min
额定效率	95%
三相整流器参数	
额定交流输入电压	AC585 V
额定直流输出电压	DC720 V
额定直流输出电流	790 A
支撑电容	38 mF
三相逆变器参数	
开关频率	1000 Hz
额定输出电流	490 A
输出电压	AC0~550 V
输出电压频率	0~130 Hz
牵引电机参数	
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	5358 N·m
动力蓄电池(单体) 参数	
电池容量 C	180 Ah
充电截至电压	3.6 V
标准充电电流	54 A
放电截至电压	2.5 V
标准放电电流	54 A
最大放电电流(2C)	360 A

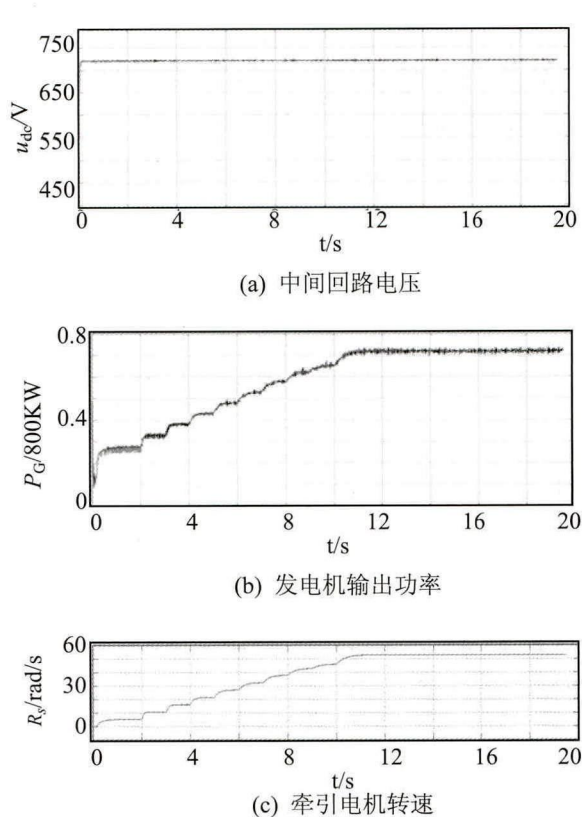


图4 纯柴油发电机牵引工况波形图

3.2 纯动力蓄电池牵引工况仿真

在此工况下，司控器牵引手柄级位控制在6级及以下，仿真结果如图5所示。其中图5(a)为中间回路电压波形图，动力蓄电池从90%满荷电状态开始放电建立中间回路电压，中间回路电压建立后最终稳定在680V左右。图5(b)为动力蓄电池组放电电流波形图，仿真开始时，由动力蓄电池建立牵引系统中间回路电压，因此开始时电池放电电流较大，在中间回路电压建立后，电流达最小，之后动力蓄电池组放电电流随司控器牵引手柄级位升高而逐步上升(在本文中电池放电电流为负，充电电流为正)，但放电电流最大值没有超过360A。图5(c)为动力蓄电池组输出功率波形图，待系统中间回路电压建立后，动力蓄电池组输出功率随司控器牵引手柄级位升高而逐步上升。图5(d)为牵引电机转速波形图，牵引电机的转速随手柄级位的上升而逐渐增大，至第6级时达到最高速度。

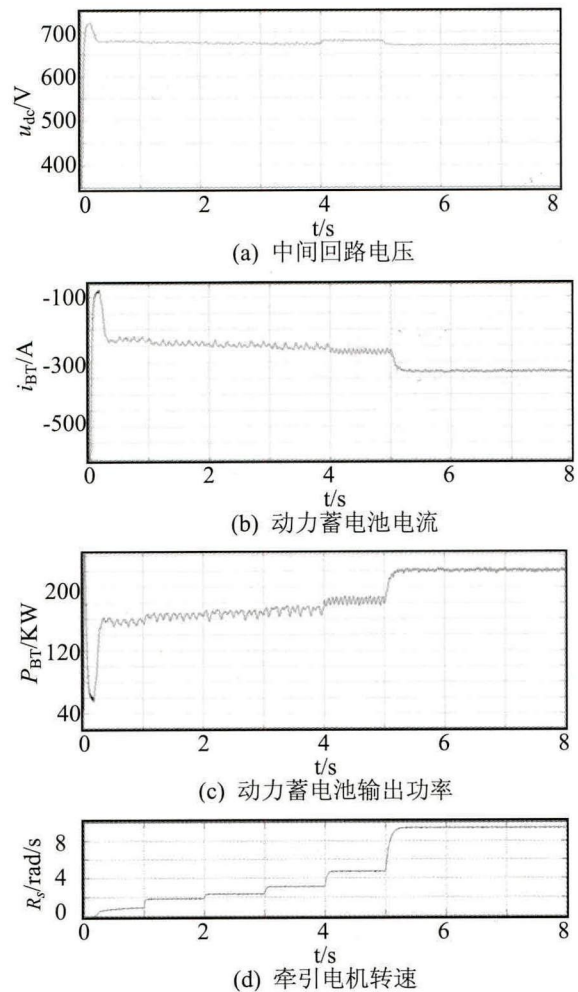


图5 纯动力蓄电池牵引工况波形图

3.3 混合动力牵引工况仿真

在混合动力牵引工况仿真实验中，在时刻1秒之前，司控器手柄级位为1级，对应的柴油机转速级位为1级，此时动力蓄电池未接入中间回路，系统建立中间电压。在1s后，动力蓄电池并入中间回路，司控器手柄级位按1级每秒的速度升高至10级，10级后按1级每1.5s的速度升高至16级。仿真结果如图6所示。其中图6(a)为中间电压波形图，图中在10级之前中间电压基本不变，维持在720V左右，而10级之后中间电压有所下降，仿真结束时稍低于700V。图6(b)为蓄电池充放电电流波形图，在10级之前电池的充电电流在慢慢减小，但10级时人为停止充电，使其充电电流接近0，而11级之后电池放电电流随司控器手柄级位升

高而增大。图 6(c)为发电机输出功率波形图, 在 10 级之前主发输出功率随司控器牵引手柄级位的增高而逐步上升, 在 10 级之后基本不变, 维持在

558 KW 左右。图 6(d)为牵引电机转速波形图, 牵引电机的转速随手柄级位的上升而逐渐增大, 至 16 档时达到最大。

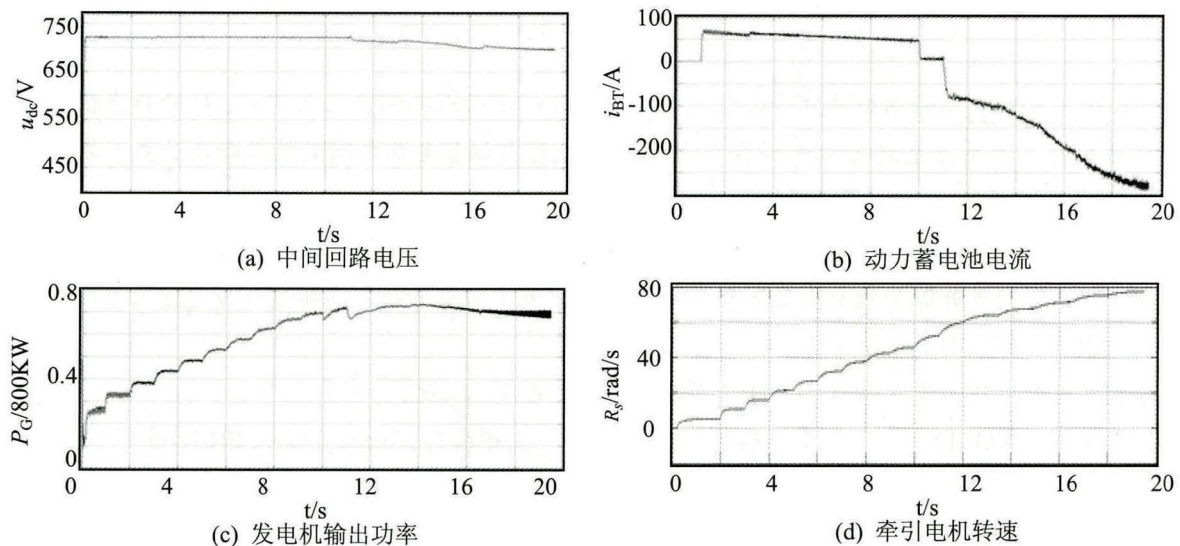


图 6 混合动力牵引工况波形图

4 结论

本文应用 MATLAB 构建了某型混合动力调车机车牵引系统的仿真模型, 并进行了混合动力牵引、纯柴油发电机牵引、纯动力蓄电池牵引等工况的仿真实验, 仿真结果表明:

(1) 该混合动力调车机车牵引系统主电路结构及参数可以实现混合动力调车机车在混合动力牵引、纯柴油发电机牵引、纯动力蓄电池牵引等工况下的可靠运行。

(2) 在不同工况下的能量管理策略可以实现该工况下调车机车的可靠运行。

参考文献:

[1] 叶心, 秦大同, 胡明辉, 等. ISG 型中度混合动力汽车能量管理策略研究 [J]. 系统仿真学报, 2011, 23(4): 832-837. (Ye Xin, Qin Datong, Hu Minghui, *et al.* Investigation to Energy Management Strategy of Medium Hybrid Electric Vehicle with ISG [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2011, 23(4): 832-837.)

[2] 范立云, 隆武强, 马修真, 等. 多级组合发动机混合动力电动汽车燃油经济性的数值模拟 [J]. 系统仿真学报, 2012, 24(5): 966-970. (Fan Liyun, Long Wuqiang, Ma Xiuzhen, *et al.* Numerical Simulation of Multi-level Combination Engine HEV on Fuel Economy [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2012, 24(5): 966-970.)

[3] J Oostra, W Dungen. Hybrid shunting locomotive: technology and practice [J]. ZEV rail Glasers Annalen (S1618-8330), 2009, 133(9): 365-369.

[4] 何良, 姚晓阳. CKD6E 混合动力机车电传动及控制系统 [J]. 机车电传动, 2012 (4): 18-22.

[5] Cousineau Ray. Development of a hybrid switcher locomotive the railpower green goat [J]. Instrumentation & Measurement Magazine (S1094-6969), 2006, 9(1): 25-29.

[6] Jaafar Amine, Akli C R, Sareni B, *et al.* Sizing and energy management of a hybrid locomotive based on flywheel and accumulators [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology (S0018-9545), 2009, 58(8): 3947-3958.