

动车组牵引控制单元 DSP 程序设计与实现

王丽, 孙华, 陈敬, 张东
(西安翔迅科技有限责任公司, 西安 710068)

摘要: 文中利用牵引控制单元(TCU)中DSP微处理器运算速度快的优点,设计并实现了一套牵引控制程序;不仅包含运行于DSP上的四象限整流器、PWM逆变器的控制和调制算法程序,而且配套研发了TCU装车后运行在PC上的可在线调试算法程序的上位机软件;最终在dSPACE半实物仿真平台上,牵引控制程序成功驱动列车从车速0稳步提升到320 km/h,同时,用户可通过上位机软件实现实时查看牵引控制程序运行时的关键数据波形、在线修改算法参数、升级牵引控制程序的功能;实验结果验证了文中设计的牵引控制单元DSP程序及上位机软件的可用性、易用性、正确性和实时性,为后续控制算法的优化、创新和验证奠定软件基础。

关键词: 动车组; TCU (traction control unit); DSP; 上位机软件

Design and Implementation of DSP Program for Traction Control Unit of EMU

WANG Li, SUN Hua, CHEN Jing, ZHANG Dong
(Xi'an Xiangxun Technology Co., Ltd., Xi'an 710068, China)

Abstract: The article uses the advantages of the DSP microprocessor in the Traction Control Unit (TCU) to design and implement a set of traction control programs. It not only includes the control and modulation algorithm programs of the four-quadrant rectifier and PWM inverter running on the DSP, but also the PC software that can be used to debug the algorithm program online and run on the PC after the TCU is installed. Finally, on the dSPACE semi-physical simulation platform, the traction control program successfully drives the train to steadily increase from 0 to 320 km/h. At the same time, the user can view the key data waveforms of the traction control program in real time through the host computer software and modify online algorithm parameters, upgrade the function of the traction control program. The experimental results verify the usability, ease of use, correctness and real-time performance of the traction control unit DSP program and host computer software designed in the article, and lay a software foundation for the optimization, innovation and verification of subsequent control algorithms.

Keywords: EMU; TCU; DSP; host computer software

0 引言

铁路运输在我国交通运输领域中一直扮演着举足轻重的角色,根据中长期铁路网规划,到2020年全国铁路营业里程将达到12万公里以上,其中客运专线1.6万公里以上^[1]。2019年铁道统计公报显示,全国铁路营业里程达到13.9万公里,其中,高速铁路营业里程达到3.5万公里;全国铁路机车拥有量为2.2万台,其中电力机车1.37万台^[2]。但是,我国高铁事业飞速发展的脚步仍然不能满足人民日益增长的美好生活需要。

近年来,随着国内动车组的不断发展与全面建设,我国对动车组的性能要求逐渐提升,牵引传动系统作为动车组的动力核心部件^[3],其功能的可靠性和高效性至关重要。牵引传动系统对机车运行的控制、监测和保护等功能还需进一步的深入研究与优化。因此,关于动车组牵引传动系

统的运行机制、监测功能、保护功能,文中做更进一步的研究。

针对牵引传动系统,我国学者开展了众多研究与实践工作。崔恒斌等人基于Matlab/Simulink建立了牵引传动系统离散数学模型,并使用dSPACE实时仿真器^[4-5]搭建了牵引传动系统实时仿真平台,最终通过测试牵引控制单元的车载程序,验证了该平台的有效性和正确性^[6]。高吉磊等设计了基于连续功能图的软件开发平台TKDET,并用于动车组牵引传动系统中CPU板卡软件的开发和调试^[7]。顾春杰等采用RT-LAB实时仿真器,并与GE公司CT11系统为开发平台的控制器,以及列车通信网络组成硬件在环的实时仿真系统^[8]。江程研究了动车组牵引传动系统参数的设计方法,并使用Matlab/Simulink搭建了牵引传动系统的仿真模型,完成对动车组参数的仿真验算^[9]。王琛琛

收稿日期:2021-02-09; 修回日期:2021-08-09。

作者简介:王丽(1987-),女,陕西兴平人,硕士,高级工程师,主要从事机车牵引控制嵌入式软件方向的研究。

通讯作者:孙华(1983-),女,山东泰安人,硕士,高级工程师,主要从事机车牵引控制分析、协议分析和外设控制分析方向的研究。

引用格式:王丽,孙华,陈敬,等.动车组牵引控制单元DSP程序设计与实现[J].计算机测量与控制,2021,29(9):220-225.

等针对大功率电机应用场合中逆变器开关频率低的问题，提出了适用低开关频率的 SHEPWM 和 SVPWM 控制策略，具体分析了各个调制策略的优缺点并对其进行了验证^[10]。

结合我国学者已有的研究成果，文中针对大功率牵引传动系统设计了控制算法和调制策略，以及可在线调测控制算法的上位机软件，最后在 Matlab/Simlink 和 dSPACE 仿真器搭建的动车组牵引传动系统实时仿真平台验证了控制策略、程序设计的可用性、正确性和实时性。

1 系统结构及软件总体设计

动车组牵引传动系统采用交流电动机驱动轮对。动车组的受电弓先从接触网获得 25 kV 的单相交流电，经变压器降压后，再由两个相同结构的四象限整流器变换为电压可调的直流电，直流电通过逆变器和相对应的控制模块将直流电转换为可驱动电机的频率可调的三相交流电，最终电动机的传动轴通过减速齿轮组传递给轮对，从而带动列车运行。

TCU 是交流传动系统中的控制单元，其中包含 CPU 卡、整流卡、逆变卡、数字信号输入输出采集卡、数模信号转换采集卡，其中整流卡发生 PWM 信号，控制四象限整流器输出直流电压，逆变卡发生 PWM 信号，控制 PWM 逆变器发出三相交流电（同时反馈回控制系统）以驱动电机转动。TCU 与主功率电路的控制关系如图 1 所示。

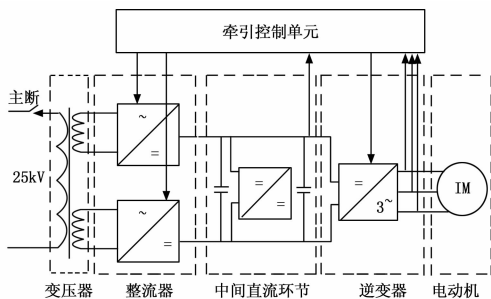


图 1 TCU 与主电路的控制关系图

整流和逆变控制、调制算法（下位机程序）将分别在整流卡和逆变卡的 DSP 芯片中实现。考虑到整流、逆变板卡装上结构壳安装到 TCU 机箱后，无法连接 DSP 程序调测用的仿真器，故为了板卡装箱后便于在线调试 DSP 中的控制程序，设计和开发了 DSP 在线调试软件（上位机软件）。整流和逆变 DSP 程序分别负责系统对四象限整流器和 PWM 逆变器的控制，并为 DSP 在线调试软件提供数据采集和通信支撑。DSP 在线调试软件运行于 PC 机中，通过人机交互界面，为用户提供 DSP 控制程序的关键指标波形绘制和程序升级等功能。牵引传动控制软件架构如图 2 所示。

下位机程序运行于 DSP 微处理器，使用 C 语言编写^[11]。

上位机软件使用 QT、Python 3.8.0、Sqlite3 技术^[12]，

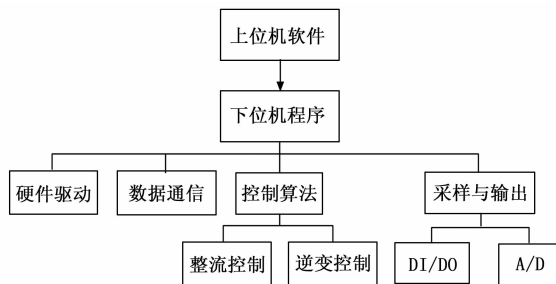


图 2 牵引传动控制系统架构图

通过 RS232 串口连接整流卡和逆变卡进行状态监控、在线调试和下位机程序在线升级。软件由业务层和服务层组成，业务层为用户提供人机交互界面，服务层为业务层提供基础的后台操作支撑。上位机软件类图如图 3 所示。

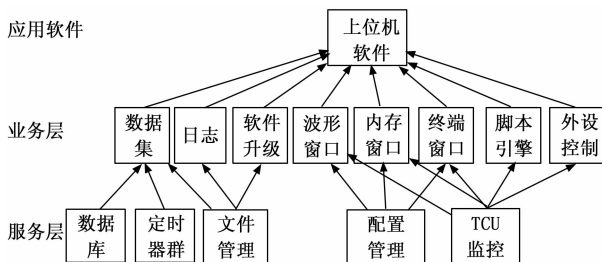


图 3 上位机软件类图

2 系统软件详细设计

2.1 整流控制系统

2.1.1 整流控制算法

整流部分的控制采用瞬态直接电流控制算法，如图 4 所示。控制方式为前馈控制和电压电流双闭环结合的复合控制策略。图 4 中锁相环采集的相角和频率用于计算变压器的端电压（其中 $u_{LN} = \omega L_N i_n^* \cos \omega t$, $u_{RN} = R_N i_n^*$ ）， u_{LN} 为动车组变压器副边网侧电感 L_N 的端电压， u_{RN} 为动车组变压器副边网侧电感 R_N 的端电压，其中 $(u_n - u_{LN} - u_{RN})$ 为前馈控制的扰动信号；电流内环采用适合正弦波谐振的 PR 控制，利用锁相环求得的相角和频率用于计算电网电流给定信号 i_n^* ，实现输出的实际网侧电流 i_n 跟随给定电流 i_n^* ，实现输入端的功率因数接近 1；电压外环采用 PI 算法^[13]，前馈和内外环结合计算的给定电压为 U_{dc}^* ，PI 算法控制流侧电压输出 u_{dc} 跟随给定电流 U_{dc}^* ，实现逆变器的输入电压稳定可控^[14]。

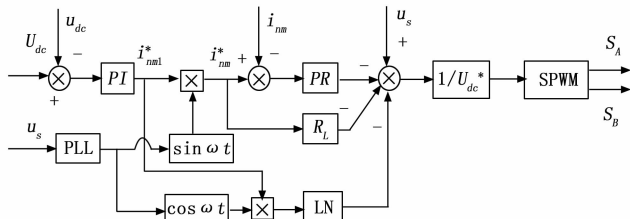


图 4 瞬态直接电流控制原理框图

由图 4 可得：

$$i_{nm1}^* = K_p(U_{dc}^* - u_{dc}) + \frac{1}{T_i} \int (U_{dc}^* - u_{dc}) dt \quad (1)$$

$$i_{nm}^* = i_{nm1}^* \sin \omega t \quad (2)$$

$$u_{ab}(t) = u_s(t) - \omega L_N i_{nm}^* \cos \omega t - R_N i_{nm}^* \sin \omega t - K[i_{nm}^* \sin \omega t - i_n^*(t)] \quad (3)$$

其中： T_i 和 K_p 为调节器的参数， I_L 为直流侧负载电流平均值， u_{nm} 为网侧电压峰值， K 为比例放大系数， ω 为网侧电压角频率。为了减轻直流环节电压 PI 调节器的负荷，改善 PI 调节器的动态响应，采用直流环节电流 I_L 来计算给定电流的有效分量 i_{nm2}^* ，通过式 (3) 可获得参考电压信号即调制信号 $u_{ab}(t)$ 。

调制算法采用双极性 SPWM 调制方式^[15]。当调制波 u_{am} 大于三角波 u_{cm} 时，输出 1，反之为 0。

2.1.2 整流控制程序设计

整流控制程序分为主控部分和算法部分。主控部分包括系统时钟配置、定时器中断配置、LED 灯配置、I/O 引脚配置、中断等待和中断处理。图 5 为主控程序流程图。

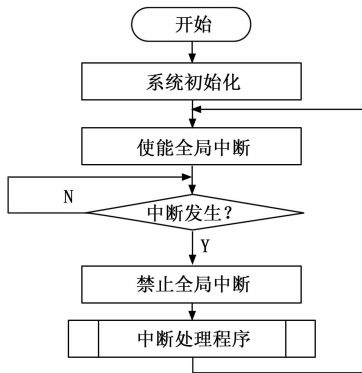


图 5 主控制程序流程图

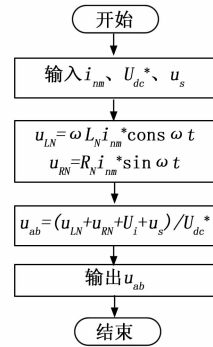
定时器中断服务程序是控制程序的关键，控制算法被中断服务程序调用。定时器中断按照固定周期触发一次，中断触发后读取采样值，执行瞬态直接电流控制算法，即完成电网角度的锁相环控制、给定电网电流的 PI 控制、调制波计算中间量 U_i 的 PR 控制以及调制波生成等。

调制波生成流程和 SPWM 信号生成流程分别如图 6 中 (a) 和 (b) 所示。将 DSP 算法生成的调制波与三角波比较，生成整流器 4 个开关的 PWM 信号。调制算法计算出每一中断周期 4 个 PWM 信号，分别向 4 个复用为 PWM 功能的 GPIO 写 0 或 1 即可。

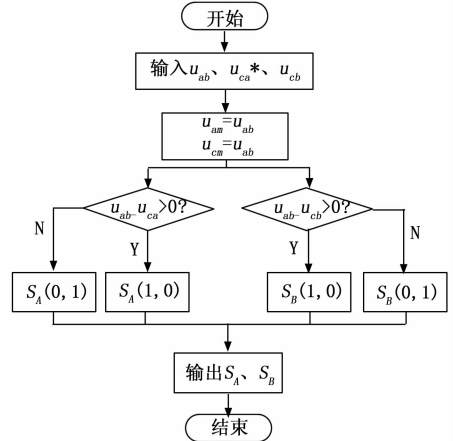
2.2 逆变控制系统

2.2.1 逆变控制算法

本文采用间接磁场定向控制^[16-17]，如图 7 所示，将采集的三相电流按照转矩和磁链的控制进行解耦，算法即等效为类似于直流电机的控制方式，其中，控制的主要思想



(a) 调制波生成流程图



(b) SPWM 信号生成流程图

图 6 瞬态直接电流控制算法流程图

是通过对转子磁场同步角频率的积分来获得磁场定向角 φ 。

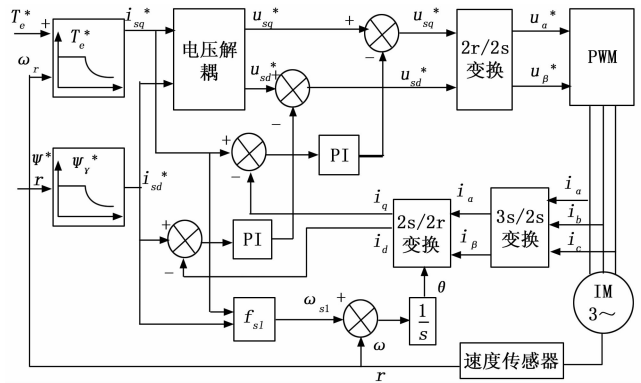


图 7 间接磁场定向矢量控制原理框图

转差角频率为：

$$\omega_{sl} = \frac{L_m}{T_r} \frac{i_{q1}}{\psi_{d2}} \quad (4)$$

利用转速传感器得到转子角频率 ω_r ，则转子磁场同步角频率为： $\omega_s = \omega_r + \omega_{sl}$ ，对其进行积分运算即可得到转子磁场定向角：

$$\bar{\omega} = \int \omega_s dt \quad (5)$$

经 3/2 变换和 2/2 变换所得的 dq 轴坐标系下，求得转子磁链电压模型的状态方程，如式 (6)。

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} - \omega_s \psi_{sq} - \frac{d\psi_{sd}}{dt} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_s \psi_{sd} - \frac{d\psi_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{sd}}{dt} = \frac{\psi_{sd}}{\sigma L_s T_r} + \frac{\omega_s \psi_{sq}}{\sigma L_s} - \frac{(R_s L_r + R_r L_s) i_{sd}}{\sigma L_s T_r} + \omega_{sl} i_{sq} + \frac{u_{sd}}{\sigma L_s} \\ \frac{di_{sq}}{dt} = \frac{\psi_{sq}}{\sigma L_s T_r} - \frac{\omega_s \psi_{sd}}{\sigma L_s} - \frac{(R_s L_r + R_r L_s) i_{sq}}{\sigma L_s T_r} - \omega_{sl} i_{sd} + \frac{u_{sq}}{\sigma L_s} \end{cases} \quad (6)$$

式中, 漏磁系数 $\sigma = 1 - L_m/L_s L_r$, 转子电磁时间常数为 $T_r = L_r/R_r$ 。

电压控制单元的表达式为:

$$\begin{cases} u_{sq}^* = u_{sq} + \Delta u_{sq} \\ u_{sd}^* = u_{sd} + \Delta u_{sd} \end{cases} \quad (7)$$

其中: u_{sd} 、 u_{sq} 为前馈电压, 与式 (6) 一致, Δu_{sd} 、 Δu_{sq} 为 PI 运算求得的反馈电压。

根据动车组的牵引特性曲线可知, 牵引电机运行方式为恒转矩—恒功率。电机运行在低频区时, 为了减小电路中的多次谐波和定子产生稳定均匀的磁场, 在低频区一般采用开关频率相对较高的异步调制方式; 当电机启动后考虑开关频率切换的平滑性和电路对电机的控制要求较低, 电机在中高速采用同步调制模式; 在高速区, 考虑逆变器的母线电压的利用率, 采用方波模式^[18-19]。

2.2.2 逆变控制程序设计

逆变控制系统的主控制程序流程和整流控制系统一致, 此处不再赘述。

根据间接磁场定向矢量控制算法, 绘制程序流程图, 如图 8 所示。

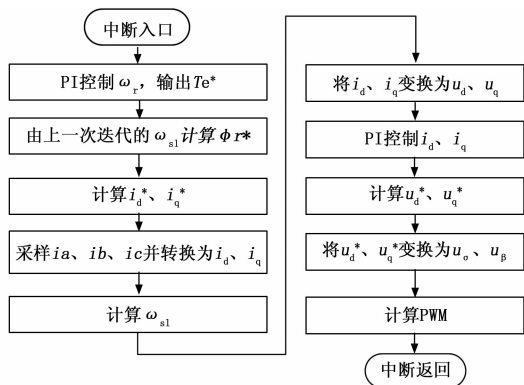
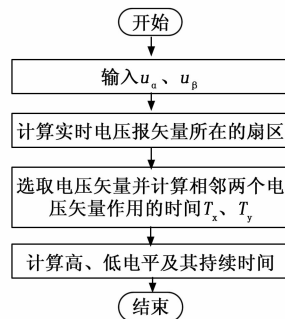


图 8 间接磁场定向矢量控制算法流程图

动车组在低速区, 采用七段式 SVPWM 异步调制策略, 如图 9 (a) 所示。在恒功率阶段, 逆变器采用方波控制技术^[20]。全速域 PWM 逆变器的调制过程如图 9 (b) 所示。

2.3 上位机软件

上位机软件用于实时查看整流卡、逆变卡中牵引传动控制运行状态, 其中包含人机交互界面、DSP 支撑程序和二者数据通信程序。用户通过上位机软件针对 TCU 整流、



(a) 七段式 SVPWM 信号产生流程图

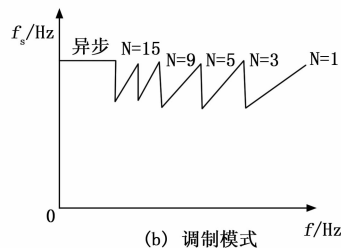


图 9 全速域牵引逆变器的调制策略

逆变控制系统进行数据监控与实时操作。

2.3.1 人机交互

用户界面由多个窗口组成, 完成多个关键信息界面的组合嵌套显示。主界面由串口连接图标、状态栏、工具栏和菜单栏组成, 完成 TCU 的连接、变量波形展示、集成终端、内存值窗口等功能。

上位机软件的启动经历线缆连接、启动软件、载入配置文件、初始化界面元素 4 个过程, 如图 10 所示。

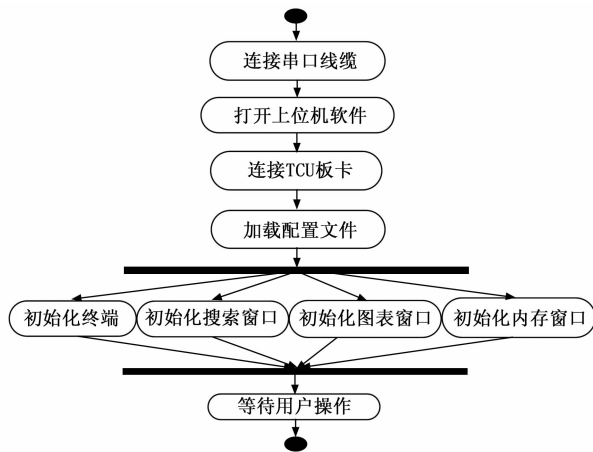


图 10 上位机软件启动的 UML 活动图

在上位机软件上观测的每一个物理量 (如中间环节直流电压) 都对应一个 TCU DSP 程序中的重要变量。数据库为上位机软件提供可随时更新的离线变量名信息集, 上位机的变量查询以及变量设置均需依赖于数据库信息。变量信息表设计如表 1 所示。

变量信息与分组信息通过数据库主/外键进行关联, 在

表 1 变量信息表

名称	类型	属性	功能
ID	整数	主键(非空)	数据的唯一标识
名字	字符串	非空	变量名称
组 ID	整型	外键(非空)	变量分组 ID

进行远程变量数据操作时“分组名+变量名”构成一个合法的变量标识, 分组信息表设计如表 2 所示。

表 2 分组信息表

名称	类型	属性	功能
ID	整型	主键(非空)	数据的唯一标识
名字	字符串	非空	分组名称

TCU 程序升级包分为两种类型: 系统程序和应用程序。升级包文件头部的 8 个字节包含文件类型、文件版本、烧写地址。剩余部分均为待写入 Flash 的目标程序。

2.3.2 DSP 支撑程序

DSP 支撑程序分为驱动程序和应用程序。驱动程序包含 SCI、EMIF、Timer、LED、FLASH、I²C、EEPROM 配置功能。应用程序包含获取算法程序版本号、上位机版本号、变量信息、板卡类别、内存值等功能, 设置变量值、内存值、升级程序, 以及控制外设等。

2.3.3 上、下位机通信协议设计

为保证数据的有效传输, 本文在 RS232 链路层协议之上另设计一层传输层协议, 保证命令帧和文件帧能够可靠传输, 如表 3 所示。

表 3 传输层协议帧格式

类型	内容		
头 (共 7 帧)	传输结束标志(1 字节)	类型(2 字节)	错误号(5 字节)
	数据部分实际传输长度(8 字节)		
	第 1 个帧索引号(8 字节)		
	第 2 个帧索引号(8 字节)		
	第 1 个帧的总帧数(8 字节)		
	第 2 个帧的总帧数(8 字节)		
	数据校验和(8 字节)		
数据 (共 241 帧)	第 1 个数据帧(8 字节)		
	⋮		
	第 241 个数据帧(8 字节)		

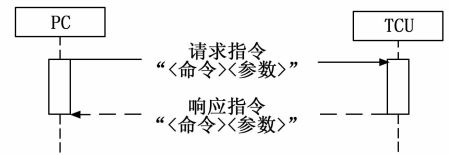
传输层支持两种格式的协议帧, 分别是命令帧和文件帧。对于命令帧, 数据部分包含了命令字和参数信息; 对于文件帧, 数据部分第一个字节为文件传输请求的命令字, 剩余字节为文件流数据。

数据帧遵循交互式的“请求—响应”模式。命令帧遵循一次性“请求—响应”, 分别如图 11 (a) (b) 所示。

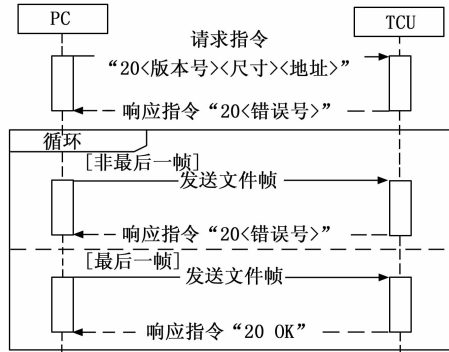
3 实验结果与分析

3.1 牵引传动控制系统

牵引传动系统实时仿真平台包含牵引控制单元实物、



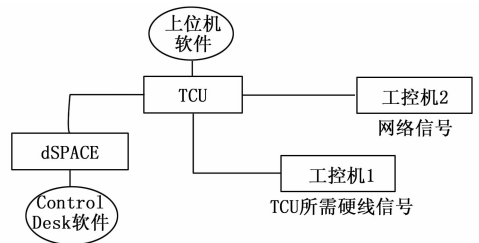
(a) 命令帧传输过程



(b) 文件帧传输过程

图 11 命令帧和文件帧传输

dSPACE 仿真器、接口箱、上位机 PC (安装有 TCU 整流卡和逆变卡的上位机软件)、工控机等设备。系统如图 12 所示。



主功率电路 Simulink 模型

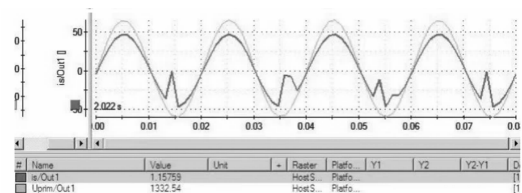
图 12 牵引传动系统半实物仿真平台架构

从 dSPACE 仿真软件中可以看到, 经过整流(锁相环)控制后, 网侧电流与网侧电压的频率相同、相位相同, 如图 13 (a) 所示。中间直流环节输出的直流电压跟随给定电压 2 700 V 上下波动, 如图 13 (b) 所示。当牵引工况车速达到 320 km/h 时, 逆变器输出的电流为互差 120 度的三相交流电, 如图 13 (c) 所示。电机输出的三相相电压为 0、±U_d、±U_d/3、±2U_d/3, 如图 13 (d) 所示。牵引特性曲线如图 13 (e) 所示。

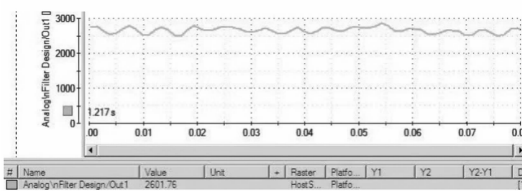
3.2 上位机软件

上位机主界面里的变量列表窗口列出了所有可以查询的变量名称和分组名称, 变量波形窗口绘制了变量实时值的波形图, 命令窗口显示了本软件支持的命令, 如查询变量实时数据等, 内存值窗口显示了 DSP CPU 内存相应地址中的实时内存数据。

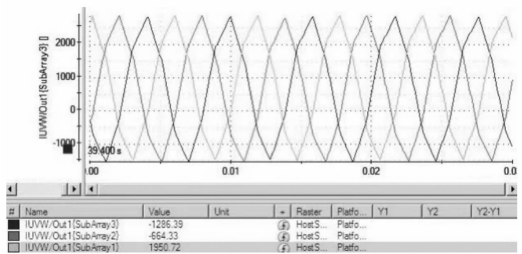
使用串口线连接 PC 与 TCU 整流和逆变卡后, 可以使用服务监控软件完成 DSP 控制程序的在线升级。



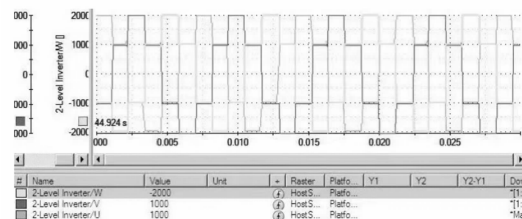
(a) 电网输出电压和电流



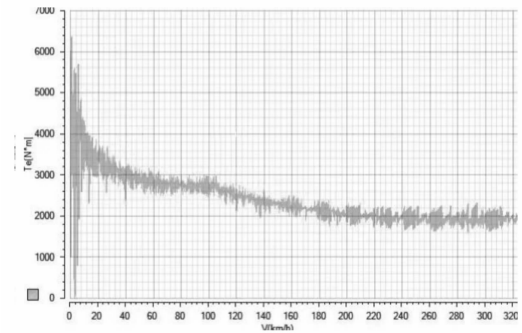
(b) 中间直流环节电压



(c) 逆变器输出的三相电流



(d) 逆变器输出的三相电压



(e) 牵引特性曲线

图 13 牵引工况下, 关键指标波形图

4 结束语

文中基于牵引控制单元 DSP 微处理器, 设计并实现了一整套包含整流和逆变的控制、调制程序, 以及配套在线调试上位机软件的牵引传动控制系统, 其在 dSPACE 半实物仿真平台上成功驱动列车从 0 平稳提速并稳定至 320 km/h。实验证明, 此牵引传动控制程序和配套上位机软件, 具有良好的实时性、准确性、易用性, 下一步将在此基础上完成整流、逆变控制算法以及上位机软件的优化工作。

参考文献:

- [1] 发改基础 [2008] 2901 号 中长期铁路网规划 (2008 年调整) [Z]. 2008.
- [2] 国家铁路局. 2019 年铁道统计公报 [R/OL]. (2020-04-30) [2021-02-09]. <http://www.nra.gov.cn/xxgkml/xxgk/xxgkml/202004/P020200430612271004598.pdf>
- [3] 杨超, 彭涛, 阳春华, 等. 高速列车牵引传动系统故障测试与验证仿真平台研究 [J]. 自动化学报, 2019, 45 (12): 2218-2232.
- [4] 马培蓓, 吴进华, 纪军, 等. dSPACE 实时仿真平台软件环境及应用 [J]. 系统仿真学报, 2004 (4): 57-60.
- [5] SMITH M K, BARTON M, BASS M, et al. DSpace: an open source dynamic digital repository [J]. D-Lib Magazine, 2003, 9 (1): 10-17.
- [6] 崔恒斌, 马志文, 韩坤, 等. 电动车组牵引传动系统的实时仿真研究 [J]. 中国铁道科学, 2011, 32 (6): 94-101.
- [7] 高吉磊, 郑雪洋, 马驰, 等. 高速动车组牵引传动系统软件开发平台的设计与优化 [J]. 铁道机车车辆, 2017, 37 (2): 37-41.
- [8] 顾春杰, 韦巍, 何衍. 基于 RT-LAB 的高速动车组牵引传动系统实时仿真 [J]. 机电工程, 2013 (2): 218-222.
- [9] 江程. 动车组牵引传动系统设计方法研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [10] 王琛琛, 王堃, 游小杰, 等. 低开关频率下双三相感应电机矢量控制策略 [J]. 电工技术学报, 2018, 33 (8): 1732-1741.
- [11] 张卿杰, 徐友, 左楠, 等. 手把手教你学 DSP: 基于 TMS320F28335 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015.
- [12] 王维波, 栗宝鹏, 张晓东. Python Qt GUI 与数据可视化编程 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2019.
- [13] 阮毅, 陈伯时. 电力拖动自动控制系统: 运动控制系统. 第 4 版 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [14] 代云中. 单相电压型四象限整流器控制策略研究与实现 [D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [15] 王兆安, 刘进军. 电力电子技术. 第 5 版 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [16] RASHED M, MACCONNELL P F A, STRONACH A F, et al. Sensorless indirect-rotor-field-orientation speed control of a permanent-magnet synchronous motor with stator-resistance estimation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54 (3): 1664-1675.
- [17] YOO A, HONG C, HA J I. On-line rotor time constant estimation for indirect field oriented induction machine [C] // Energy Conversion Congress & Exposition. IEEE, 2013: 3860-3865.
- [18] BOSE B K. 现代电力电子学与交流传动 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [19] 沈本荫. 现代交流传动及其控制系统 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1997.
- [20] 宋文胜, 冯晓云. 电力牵引交流传动控制与调制技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.