

A-PDF Split DEMO : Purchase from www.A-PDF.com to remove the watermark

CRH3 型动车组牵引传动系统的 直接转矩控制研究*

余丹萍, 周 盛, 江全元*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为了研究高速动车组的具体模型结构及其牵引传动控制系统, 采用直接转矩控制(DTC)系统控制异步牵引电机, 建立了 CRH3 型高速动车组牵引传动系统的 Matlab/simulink 仿真模型, 整流部分由四象限脉冲整流器输出 3 000 V 左右平滑的直流电压, 逆变部分由直接转矩控制系统驱动牵引电机。该系统能根据 CRH3 型动车组的牵引、制动曲线模拟动车组牵引、惰行、制动等各种运行工况。整个运行过程中系统的谐波较小, 电压/电流相位差基本能保持在同相或反相运行, 功率因数基本接近 1; 在网压波动和突然失电情况下, 机车也基本能保持恒速运行。最后, 将该模型仿真结果与京津城际高速铁路的部分数据进行了对比验证。研究表明, 该模型建模基本正确, 同时系统具有良好的稳态和动态性能, 验证了直接转矩控制方法的有效性。

关键词: CRH3 型动车组; 牵引/制动特性; 四象限脉冲整流器; 直接转矩控制; 谐波

中图分类号: TH22; TM922

文献标识码: A

文章编号: 1001 - 4551(2010)10 - 0062 - 07

Research of direct torque control on traction drive system of CRH3 EMU

YU Dan-ping, ZHOU Sheng, JIANG Quan-yuan

(Department of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at studying the specific model and traction control system of high-speed EMU, using direct torque control(DTC) system to control asynchronous traction motors, the Matlab/Simulink model of a high-speed CRH3 EMU traction and drive system was established. DC voltage of 3 000 V was output with four-quadrant pulse rectifier, and drive traction motors was controlled by DTC system in inverter part. According to the traction and braking curves of CRH3 EMU, the traction, idle line, regenerative brake and other operating condition were simulated. In the entire operation process, harmonics are small, voltage/current phase can be maintained at the same phase or reversed-phase, power factor is close to 1. At the situation of net voltage fluctuation and a sudden loss of electricity, the locomotive can maintain constant speed operation. Finally, compared with the data of Beijing-Tianjin inter-city high-speed rail, the results indicate that the model is basically correct, and the system has a good steady-state and dynamic performance, the effectiveness and correctness of direct torque control method are verified.

Key words: CRH3 EMU; traction/braking characteristics; 4-quadrant converter; direct torque control(DTC); harmonic

0 引 言

为进一步缓解铁路运力紧张、提升运输服务品质, 在全国范围内实现高速铁路网是必然的趋势^[1]。目前, 已对高速动车组牵引传动与控制方面有了一些研究, 其中整流部分主要由四象限脉冲整流器组成, 逆变

部分主要采用空间矢量控制的转差频率转子磁场定向系统^[2-7]。

1985 年, 德国学者 M. Depenbrock 首次提出了六边形直接转矩控制(DTC)理论方案^[8]。随后日本学者 I. Takashi 也提出了近似圆形直接转矩控制^[9]。

本研究针对目前我国最典型的高速列车-CRH3

收稿日期: 2010 - 03 - 17

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2009BAG12A09)

作者简介: 余丹萍(1986 -), 女, 浙江宁波人, 硕士研究生, 主要从事高速铁路牵引供电方面的研究。E-mail: yudp1986@163.com

通信联系人: 江全元, 男, 教授, 硕士生导师。E-mail: jqy@zju.edu.cn

型动车组,首先建立 CRH3 型高速动车组牵引传动系统的 Matlab/simulink 仿真模型,从牵引、惰行、制动等不同工况多方面进行仿真分析,并研究 DTC 在电力牵引传动系统中的应用,这些研究对于建立 CRH3 高速动车组的负荷模型、分析机车对牵引网供电系统和电力系统的影响具有重要意义。

1 CRH3 型动车组的牵引传动系统

CRH3 型动车组为 8 辆编组的动力分散交流传动电动车组,4 动 4 拖,其中相邻的两辆动车为一个基本动力单元,每个动力单元具有独立的牵引传动系统,如图 1 所示,主要由 1 台主变压器、2 台牵引变流器和 8 台牵引电机等组成。牵引变压器原边额定电压为单相交流 25 kV/50 Hz,副边为 1 550 V/50 Hz。牵引变流器输入侧为四象限脉冲整流器(4QC),2 个 4QC 并联为一个共同的 DC 连接供电,中间电容区部分存储能量,输出平滑的直流电压。输出端为一个 PWM 逆变器,将 DC 连接电压转换成牵引系统所要求的变压变频三相电源驱动 4 个并联的异步牵引电机^[10-11]。本研究采用 DTC 系统来控制逆变和电机驱动部分,并对整个牵引传动系统进行建模研究。

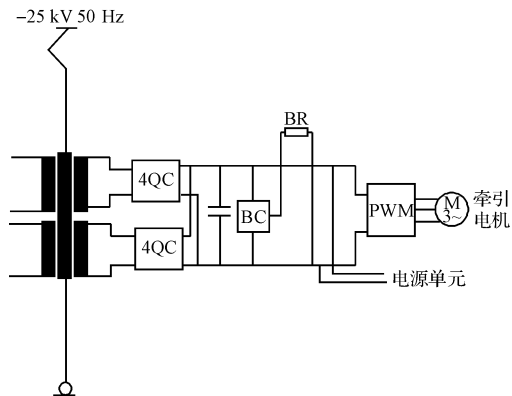


图 1 CRH3 动车组一个动力单元的基本结构

1.1 CRH3 动车组的牵引/制动特性

CRH3 型动车组在不同的速度时刻根据牵引/制动曲线输出所需的牵引力,使动车组顺利完成牵引或制动过程。

牵引工况时,牵引力和速度的数学关系为:

$$\begin{cases} F = -0.285v + 300 & v \leq 119 \text{ km/h} \\ F = 31\,500/v & v \geq 119 \text{ km/h} \end{cases} \quad (1)$$

再生制动时,制动力和速度的数学关系为:

$$\begin{cases} F = 59.8v & v \leq 5 \text{ km/h} \\ F = -0.285v + 300 & 5 \text{ km/h} \leq v \leq 106.7 \text{ km/h} \\ F = 28\,800/v & v \geq 106.7 \text{ km/h} \end{cases} \quad (2)$$

式中 F —1 个编组(16 台电机)轮轨牵引力/制动力, kN; v —动车组速度, km/h。

上式所对应的 CRH3 型动车组的牵引和再生制动特性曲线如图 2、图 3 所示。

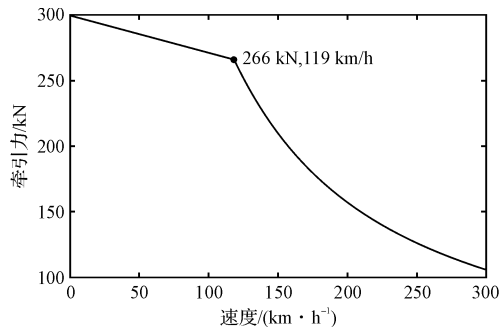


图 2 CRH3 型动车组牵引特性曲线

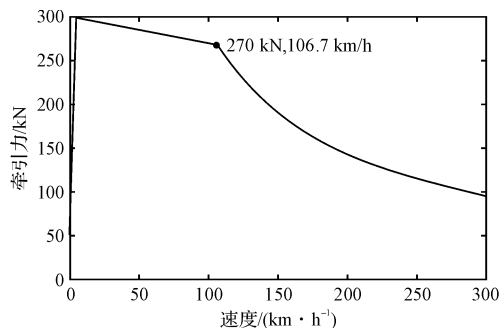


图 3 CRH3 型动车组制动特性曲线

1.2 四象限脉冲整流器

脉冲整流器由单相三点式 PWM 变流器组成。主电路和基波相量图如图 4 所示。

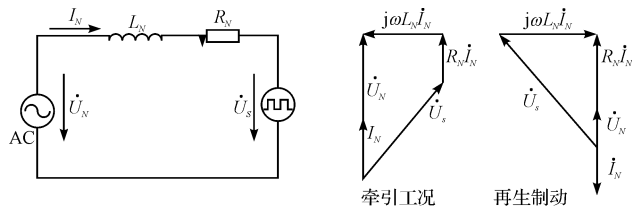


图 4 脉冲整流器主电路图和基波向量图

输入回路的电压矢量平衡方程为:

$$\dot{U}_N = j\omega L_N \dot{I}_N + R_N \dot{I}_N + \dot{U}_s \quad (3)$$

当二次侧牵引绕组电压 \dot{U}_N 一定的情况下, \dot{I}_N 的幅值和相位仅由 \dot{U}_s 的幅值及其与 \dot{U}_N 的相位差来决定。在牵引工况下, \dot{I}_N 和 \dot{U}_N 的相位差为 0° , 在再生制动工况时, \dot{I}_N 和 \dot{U}_N 的相位差为 180° 。所以脉冲整流器可以实现能量的正反两个方向的流动^[12-14]。

目前动车组牵引用脉冲整流器普遍采用瞬态直接电流控制策略^[15], 主要由电压电流传感器、电压电流调节器、比较器、函数发生器、运算器及 SPWM 控制器组成。控制框图如图 5 所示, 通过实时检测中间直流

电压 U_d 与给定值 U_d^* 进行比较,经 PI 调节器输出增大或减小的 I_N^* ,达到反馈控制 U_d 的目的。同时实时检测电网电压和电流值,经运算电路后输出参考电压信号 $U_s(t)$ 与三角载波进行 SPWM 调制,生成 PWM 信号驱动开关器件。

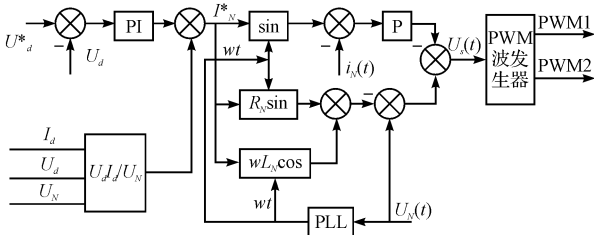


图 5 瞬态直接电流控制框图

2 牵引传动系统的直接转矩控制

笔者重点研究了 DTC 系统在列车牵引中的应用。与矢量解耦控制方法不同的是,DTC 系统直接在定子坐标系上进行转矩与磁通的计算与比较,不需要复杂的坐标变换,通过二点式调节器实现转矩的直接调节,加快了力矩的快速响应。它根据磁链、转矩的状态,选择逆变器开关状态,形成优化电压矢量,把磁链和转矩控制在一定容差范围内,从而达到对磁链与转矩的直接控制及闭环控制的目的^[16-17]。

2.1 直接转矩控制调速系统

为了确定某瞬时定子磁链的空间位置,将相平面平均分为 6 个区域,如图 6 所示。虚线表示定子磁链给定值,两实线圆表示定子磁链幅值的实际值,它们的半径之差为允许误差。在运行中要求定子磁链的瞬时值位于两环之间^[18]。

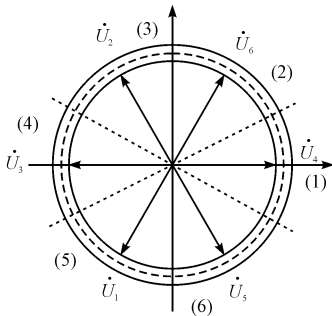


图 6 空间电压矢量及相平面的分区

为了实现定子磁链的控制,采用磁链位置检测和滞环控制技术。首先根据实测的定子磁链确定磁链所处的 $\theta(N)$ 区域,然后将定子磁链给定值与实际值进行比较,若滞环控制器输出 $d\psi$ 为“+”信号,表示要求增加定子磁链,反之则减小定子磁链。对电动机电磁转矩的控制也采用滞环控制器。当电磁转矩给定值与

反馈值进行比较时,滞环控制器输出 dT 为“+”信号,表示要求增大电磁转矩,反之则要求减小^[19]。

不管定子磁链位于哪个区域,8 种电压空间矢量(6 个非零矢量和 2 个零矢量)都可选用。每一种电压空间矢量都对定子磁链及电磁转矩产生影响。根据定子磁链位置检测信号 $\theta(N)$ 、滞环控制信号 $d\psi$ 和 dT 选择合适的电压空间矢量进行控制,便可得到圆形磁链轨迹。

直接转矩控制调速系统的控制框图如图 7 所示。在该系统工作过程中,给定速度与实际速度比较,其差值输入速度调节器,调节器输出转矩给定值信号,将它与实际的转矩比较,输出转矩调节信号 dT 。同时给定磁链与实际磁链相比较,经磁链调节器输出磁链调节信号 $d\psi$ 。通过检测定子磁链的位置,得到磁链位置信号 $\theta(N)$ 。由以上 3 个信号查表得到逆变器的开关信号,从而得到所需的 SPWM 波形,实现异步牵引电机的直接转矩控制。

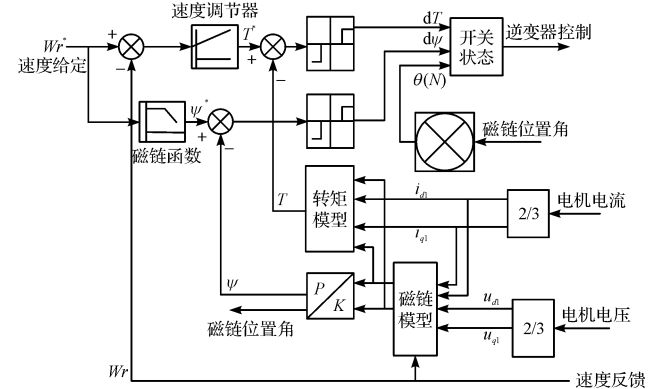


图 7 直接转矩控制系统控制框图

2.2 直接转矩控制在列车牵引中的应用

为满足机车牵引的要求,电力牵引中的转矩控制系统在低频段采用间接转矩控制,在较高频段采用直接转矩控制,在高频段采用磁场削弱的直接转矩控制。当电机运行在启动以及较低频率时,由于受变流器开关器件最小导通时间的限制,如果只通过转矩的 Band—Band 控制来变换有效电压空间和零电压矢量,将不可能实现所希望的较小的平均输出电压,并且由于定子电阻的影响,在低速时定子磁链矢量的运行轨迹产生较为严重的畸变。因此,在较低频率的运行区段,采用圆形磁链定向的方式,实现转矩的间接控制。列车在额定速度及其以下的运行范围内,通过控制电机定子磁链,以六边形轨迹运动,在 6 个有效电压矢量中均匀地加入零电压矢量,以实现转矩的控制。当列车的速度达到额定速度以上时,对电机实行恒功控制,电机激励电压保持恒定,若要提高电机的转速,必然减少定子磁链的幅值,电机弱磁运行,实现对列车速度的控制。

3 CRH3 动车组牵引传动系统仿真分析

3.1 仿真模型

根据各部分的工作原理搭建了 CRH3 型动车组牵

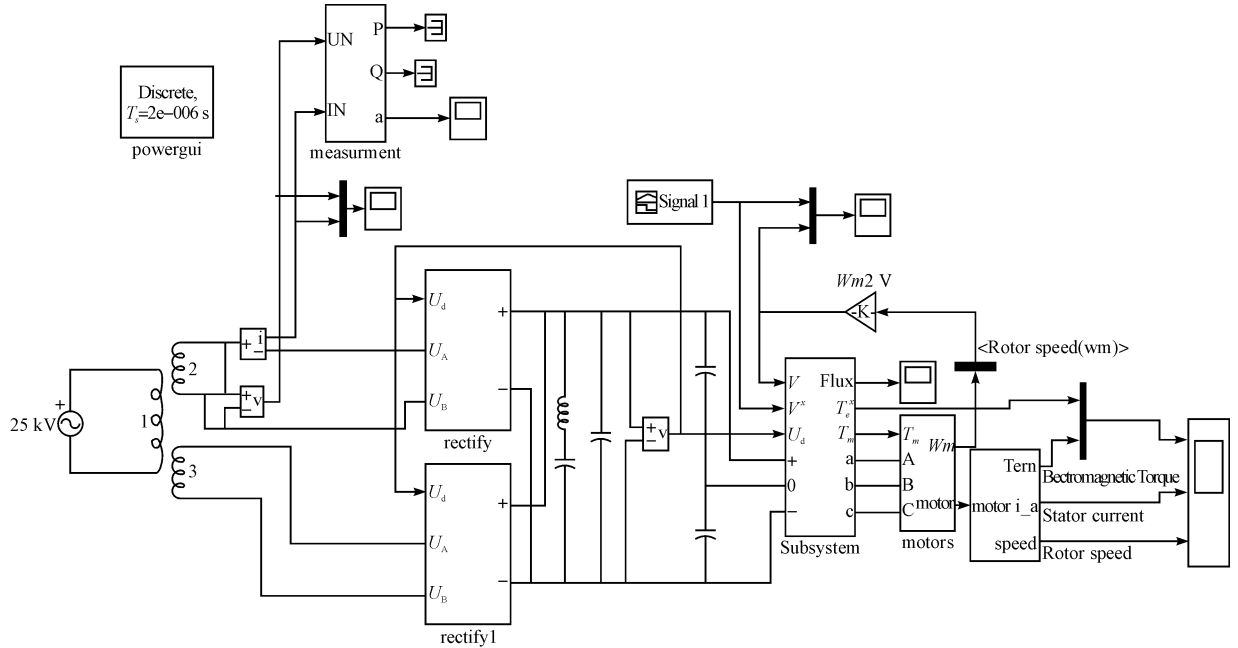


图 8 CRH3 型动车组牵引传动系统仿真图

3.2 仿真结果及分析

本研究对采用 DTC 控制方式的 CRH3 型动车组牵引传动系统进行仿真,得到了在不同运行工况下机车的电压、电流等波形,并对得到的波形进行了分析。本研究采用的 CRH3 型动车组牵引电机的具体参数如表 1 所示。

3.2.1 仿真的速度和转矩跟踪响应

给定速度由 0 km/h ~ 300 km/h ~ 50 km/h 变化模拟动车组的牵引 - 再生制动工况。速度和转矩跟踪曲线如图 9 和图 10 所示。

表 1 CRH3 动车组牵引电机参数

额定功率	562 kW	定子电阻	0.15 Ω
额定线电压	2 700 V	定子漏感	1.42 mH
额定频率	135 Hz	转子电阻	0.16 Ω
额定转矩	692 (N · m)	转子漏感	0.60 mH
额定转速	4 100 (r · min ⁻¹)	互感	25.4 mH
最大转速	5 900 (r · min ⁻¹)	转动惯量	5 (kg · m ²)
极对数 p	2	中间直流电压	3 000 V

从图中可以看出,在 DTC 控制方式下,系统表现了良好的速度和转矩跟踪响应,其中在转矩跟踪方面,因为 DTC 通过二点式调节器 (band-band 控制) 产生 PWM 信号,在加快了力矩响应的同时也必然增加了转矩的脉动。

引传动系统的 Matlab/Simulink 仿真模型,主电路如图 8 所示。变压器由 25 kV 变到两个 1 550 V,接两个 4QC 进行整流,经中间直流环节和逆变器输出三相电压驱动电机运转。

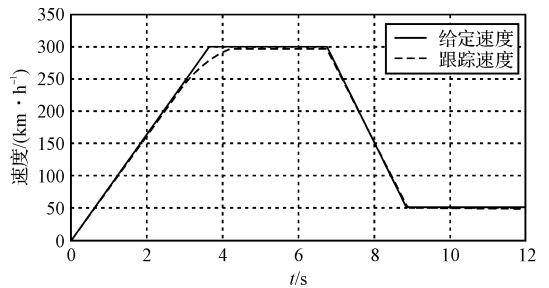


图 9 DTC 模型的速度跟踪曲线

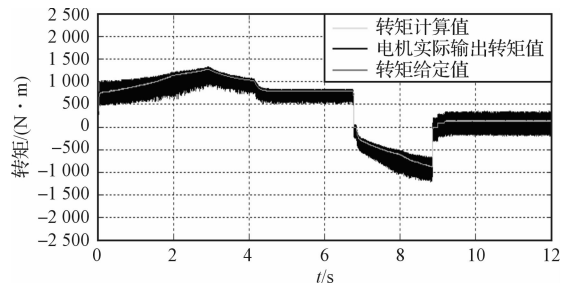


图 10 DTC 模型的转矩跟踪曲线

3.2.2 电机定子电流

系统仿真的牵引电机定子电流波形如图 11 所示,由图可以看出机车在 DTC 系统控制下运行在不同工况时,牵引电机电流没有出现大的波动,运行正常。

3.2.3 各种典型工况时的谐波分析

牵引工况和再生制动工况时,变压器一次侧电流

的谐波频谱图如图 12、图 13 所示。

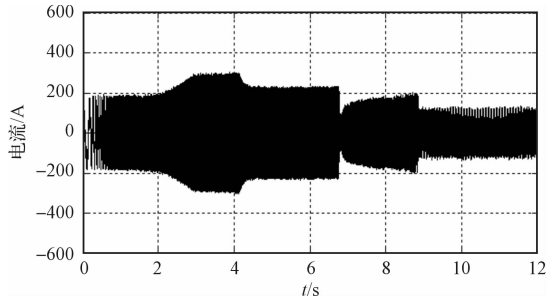


图 11 牵引电机定子电流波形

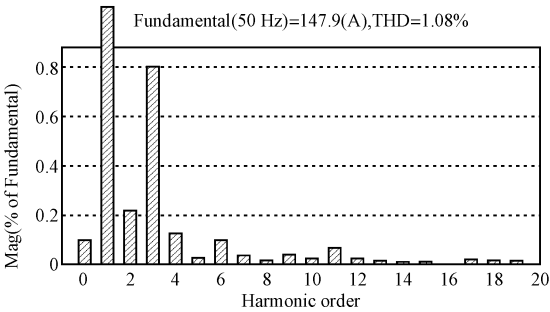


图 12 牵引工况时变压器一次侧电流谐波频谱图

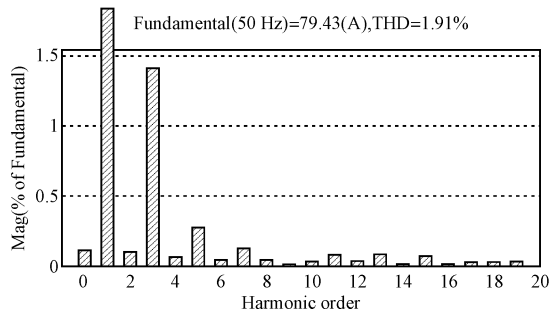


图 13 制动工况时变压器一次侧电流谐波频谱图

从牵引和制动这两种典型工况的谐波分析中可以看出,在 DTC 系统下,CRH3 型动车组运行时电流畸变率较小,奇次谐波百分比比较大,符合实际情况。

3.2.4 变压器二次侧电压、电流相位差分析

牵引工况时变压器二次侧电压、电流波形如图 14 所示,从图中可以看到两者相位差基本为 0°,保持同相,表明机车在吸收功率运行在牵引工况下。

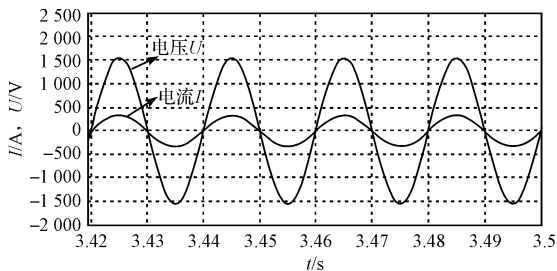


图 14 DTC 模型牵引工况电压、电流相位图

图 15 所示,可以看到两者相位差基本为 180°,保持反相,机车运行在制动工况下将能量反馈给电网,实现能量再生。

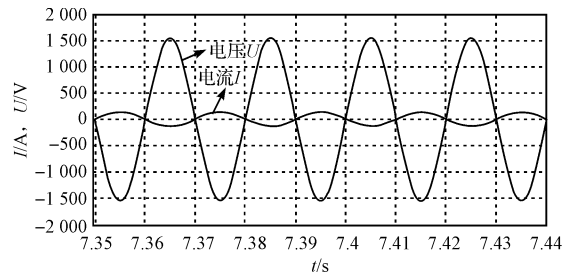


图 15 DTC 模型制动工况电压、电流相位图

3.2.5 功率因数分析

12 s 仿真时间内的功率因数曲线如图 16 所示,在 DTC 系统控制下,牵引传动系统的功率因数在牵引工况时基本接近 1,在再生制动工况时接近 -1,且曲线变化平滑,系统性能良好。

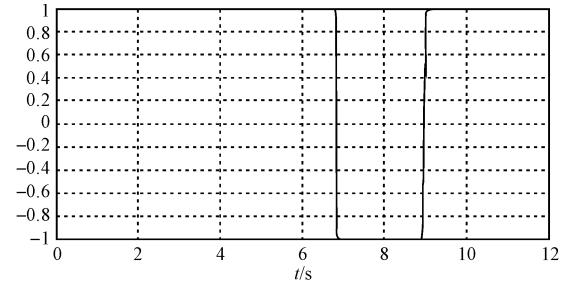


图 16 DTC 仿真系统功率因数曲线

3.2.6 网压波动时动车组恒速仿真

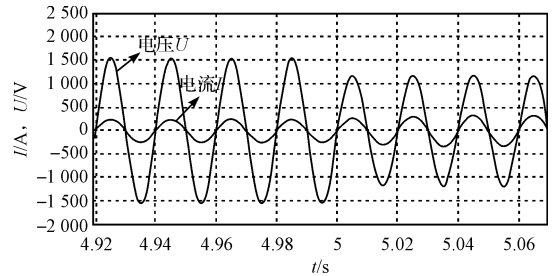


图 17 网压波动下的变压器二次侧电压、电流曲线

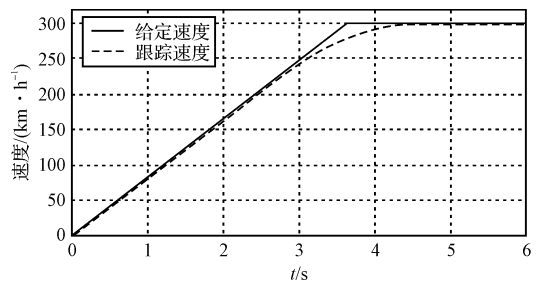


图 18 DTC 系统在网压波动下的速度曲线

在仿真时间为 5 s 时,变压器一次侧电压由 25 kV 变到 19 kV,变压器二次侧电压、电流波形如图 17 所

再生制动工况时,变压器二次侧电压、电流波形如

示。模拟动车组在网压波动下的速度变化曲线如图 18 所示,由图可以看到在网压波动时,DTC 系统控制下的 CRH3 型动车组速度能恒定在 300 km/h,没有出现大的速度波动。

3.2.7 短时断电时的系统仿真

5 s 时变压器一次侧电压由 25 kV 变化到 0,再在 5.3 s 时恢复供电 25 kV,此时变压器二次侧电压、电流波形如图 19 所示。DTC 系统在短时断电下的速度曲线如图 20 所示。

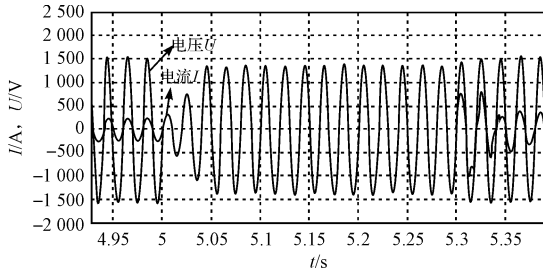


图 19 短时断电时变压器二次侧电压、电流曲线

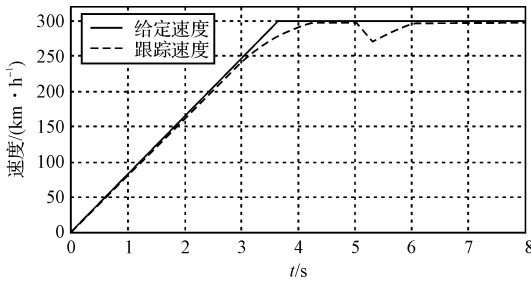


图 20 DTC 系统在短时断电下的速度曲线

图 20 表明在网压短时断电情况下,CRH3 型动车组速度短时下降,在恢复供电后仍能迅速加速到 300 km/h,表现出了系统良好的跟踪性能。

4 仿真实测对比

CRH3 型动车组已应用在京津城际高速铁路中,而即将开通的京沪高速铁路也将采用 CRH3 型动车组。本研究用部分京津高铁实测数据对建立的 CRH3 型动车组牵引传动系统的仿真模型进行了对比验证。资料给出京津高铁的最大牵引电流为 414 A,而本仿真模型在机车运行 300 km/h 时的牵引变压器一次侧电流为 419.2 A(本研究搭建了其中的一个动力单元结构,实际整列动车共有 4 个这样的单元,故这是电流乘以 4 倍后得到的最终数值),两个数据基本符合。同时对各次谐波电流也进行了对比,谐波频谱图如图 21 所示。

从图 21 可以看到,实测的各次谐波分布较多,最大电流出现在 3 次谐波,为 6.097 A,其 THD 为 1.57%。而仿真得到的最大电流也出现在 3 次谐波,为 4.401 6 A,

THD 为 1.24%。而且在较大次谐波时实测的谐波电流较大,而仿真得到的较小。这是因为仿真模型考虑的情况比较理想,使结果和实际有些差距。实际中网压可能会出现波动的情况,而仿真中固定了网压为 25 kV,所以这也在一定程度上影响了仿真结果。但是总体来说该模型仿真效果还是比较好的,进一步完善仿真模型也是下一阶段的重要工作。

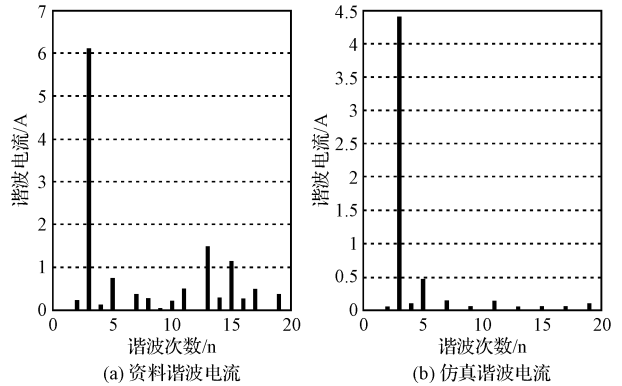


图 21 实测与仿真的谐波频谱比较

5 结束语

笔者研究了直接转矩控制在 CRH3 型动车组中的应用,分别研究了直接转矩控制下的动车组在牵引、再生制动工况及其切换时的动态过程,整个过程速度跟踪效果良好,转矩、电流等都未出现大的波动,谐波畸变率较小,功率因数也基本接近于 1。同时在网压波动和短时断电时,系统仍能保持恒速运行。目前矢量控制技术已广泛应用于现有的电力牵引交流传动系统中,而 DTC 在电力牵引领域表现出了良好的发展态势,必然会在不久的将来被广泛地应用于高速铁路机车车辆中。

本研究同时建立了 CRH3 型动车组牵引传动系统的仿真模型,得到 CRH3 型动车组不同运行工况时的电压、电流波形,特别是接入机车的变压器一次侧、二次侧的电压、电流波形,从而可以分析其功率因数、谐波特性等,这对于分析机车对牵引网供电系统的影响具有重要作用,对于分析机车的综合负荷特性以及建立综合负荷模型具有重要现实意义。

参考文献 (References):

- [1] 张曙光. 京沪高速铁路系统优化研究[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.
- [2] 陶良慧. 三点式四象限脉冲整流器控制策略研究[D]. 成都: 西南交通大学电气工程学院, 2008.
- [3] AKAGI H, FUJITA H. A new power line conditioner for harmonic compensation in power systems[J]. *IEEE Trans Power Delivery*, 1995, 10(3): 1570 - 1575.



图 3 系统主界面

检查出双眼融合功能的缺损程度,这有利于提高临床准确诊断;给出的检查阈限对进行眼科相关分析研究具有重要价值。

目前系统实现了双眼融合视觉功能的检查,今后,根据实际需求情况出发,可以考虑继续设计出有关单眼视功能方面的检查模块,扩充系统的视功能检查范围。

参考文献 (References):

[1] 甘晓玲. 弱视的定义、分类及疗效评价标准[J]. 中国斜视与小儿眼科杂志,1996,4(3):97.
 [2] RYUSUKE H, KENICHIRO M, TABATA H, et al. Eye movements in response to dichoptic motion: evidence for a parallel-hierarchical structure of visual motion processing in

primates[J]. *Journal of Neurophysiology*, 2008, 99(5): 2329 - 2346.

[3] RITWICK A, CONNER I P, ODOM J V, et al. Relating binocular and monocular vision in strabismic and anisometropic amblyopia [J]. *Archives of Ophthalmology*, 2006, 124(6):844 - 850.
 [4] SHELIGA B M, FITZGIBBON E J, MILES F A. Spatial summation properties of the human ocular following response (OFR): evidence for nonlinearities due to local and global inhibitory interactions [J]. *Vision Research*, 2008, 48(17):1758 - 1776.
 [5] HAYASHI R, NISHIDA S, TOLIAS A, et al. A method for generating a "purely first-order" dichoptic motion stimulus [J]. *Vision Research*, 2007(7):1 - 10.
 [6] MARJORIE R L. Adaptive procedures in psychophysical research [J]. *Perception & Psychophysics*, 2001, 63(8): 1279 - 1292.
 [7] MCKEE S P, LEVI D M. The pattern of visual deficits in amblyopia [J]. *Journal of Vision*, 2003(3):380 - 405.
 [8] LI Xiang-rui, LU Zhong-lin, XV Peng-jing, et al. Generating high gray-level resolution monochrome displays with conventional computer graphics cards and color monitors [J]. *Journal of Neuroscience Methods*, 2003, 130(1):9 - 18.
 [9] 张亮,王继阳. Matlab 与 C/C++ 混合编程[M]. 北京:人民邮电出版社,2008.
 [10] 孟庆茂,常建华. 实验心理学[M]. 北京:北京师范大学出版社,1999.

[编辑:李辉]

(上接第 67 页)

[4] KATAOKA T. A pulsed width controlled AC-to-DC converter to improve power factor and waveform of AC line current [J]. *IEEE Trans. Ind. AI*, 1979, IA - 15(6):670 - 675.
 [5] 冯晓云,王利军,葛兴来,等. 高速动车组牵引传动控制系统研究与仿真[J]. 电气传动,2008,38(11):25 - 28.
 [6] 韩坤,冯晓云,杨顺风,等. 接触网网压波动下动车组恒速控制策略的仿真研究[J]. 铁道机车车辆,2008, 28(B12):118 - 120.
 [7] 冯晓云,葛兴来. 异步电机牵引特性的仿真研究[J]. 电气传动,2009,39(5):24 - 26.
 [8] DEPENBROCK M. Direkte Selbstregelung (DSR) fuhrhochdy-namische Drehfeldantriebe mit Stromrichterspeisung[J]. *ETZArchiv*, 1985, 7(7):211 - 218.
 [9] TAKAHASHI I, NOGUCHI T. A new quick-response and high efficiency control strategy of an induction motor [J]. *IEEE Trans. on Industry Applications*, 1986, IA - 22(5):820 - 827.
 [10] 宋雷鸣. 动车组传动与控制[M]. 北京:中国铁道出版社,2007.
 [11] 姜东杰. CRH3 型动车组牵引传动系统[J]. 铁道机车车辆,2008,28(B12):95 - 99.

[12] 刘子建,桂武鸣. 电压型四象限变流器的计算机仿真[J]. 电力机车与城轨车辆,2003,26(1):11 - 13.
 [13] MARIAN P, KAZMIERKOWSKI I, MALESANI L. Current control techniques for three-phase voltage-source PWM converters: a survey[J]. *IEEE Trans. Ind. Electronics*, 1998, 45(5):691 - 703.
 [14] DIXON J W, KULLCAMI A B, NISHIMOTO M, et al. Characteristics of a controlled-current PWM rectifier-inverter link [J]. *IEEE Trans. Ind. Appi.*, 1987, IA - 23(6):1022 - 1028.
 [15] 邹仁. 四象限变流器瞬态电流控制的仿真研究[J]. 机车电传动,2003(6):17 - 20.
 [16] 李夙. 异步电动机直接转矩控制[M]. 北京:机械工业出版社,1994.
 [17] 杨甫,许伯强,杨桂兰. 变频器供电下异步电动机转子断条故障仿真研究[J]. 机电工程技术,2009,38(1):67 - 69.
 [18] 李群湛,连级三,高仕斌. 高速铁路电气化工程[M]. 成都:西南交通大学出版社,2006.
 [19] 王书林,赵茜. 电力牵引控制系统[M]. 北京:中国电力出版社,2005.

[编辑:张翔]