

高速列车牵引供电系统建模及 短时断电工况仿真*

谢 舸, 卢琴芬*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:为研究不同工况下高速列车牵引供电系统的工作状态和性能,根据 CRH2 型高速列车牵引供电系统的实际结构与参数,采用 Matlab/Simulink 软件建立了整个系统的仿真模型,模型中牵引变流器采用正弦脉宽调制(SPWM)和空间矢量脉宽调制(SVPWM)两种方式,牵引电机采用适用于高速列车的瞬态电流控制和转子磁场定向矢量控制策略。基于此模型,仿真并分析了列车在不同运行速度下,受电弓短时断电时牵引变流器的性能。分析结果为列车牵引变流器的实际设计和性能分析提供了参考。

关键词:牵引变流器;瞬态电流控制;矢量控制;短时断电;CRH2 动车组

中图分类号:U264;TM46

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)05-0605-05

Modeling and simulation at temporary power-off state of EMU traction driver system

XIE Ge, LU Qin-fen

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

Abstract: In order to research the performance of electric multiple unit(EMU) traction driver system at different states, according to the actual structure and parameter of CRH2 EMU, the simulation model of its traction driver system was established by Matlab/Simulink software. In this model, the transient current control and indirect rotor magnetic field orientation vector control strategy were adopted by traction motor, and the sine pulse width modulation(SPWM) and space vector pulse width modulation(SVPWM) modulate method were used by traction converter. On this basis, operation performance of traction converter was simulated and analyzed under different train speed when the pantograph temporarily disconnect to grid. The simulation results provide a reference for the actual design and performance analysis of traction converter.

Key words: traction converter; transient current control; vector control; temporary power-off; CRH2 electric multiple unit(EMU)

0 引 言

近几十年来随着电力电子器件尤其是大功率变流技术的发展,控制技术的完善和变频器技术的成熟,高速列车的牵引传动系统开始由交-直的直流传动方式发展为交-直-交的交流传动方式。车辆的牵引传动系统主要由受电弓、牵引变压器、牵引变流器、牵引电机和齿轮传动系统等组成,其功能一方面将电能转换成机械能牵引列车运行,另一方面在列车制动时将机械能转变成电能回馈电网^[1-2]。

高速列车通过受电弓与接触网接触获得电能,在运行过程中可能会产生短暂断电的工况:一方面是由于分段供电使得受电弓与接触网在接头处临时断开;另一方面列车在高速运行时也会由于一些原因使得受电弓与接触网偶尔断开。因此,研究短时断电时牵引供电系统的特性有重要的理论意义和使用价值。

本研究在介绍 CRH2 型动车组牵引传动系统结构的基础上,用 Matlab/Simulink 构建 CRH2 型动车组牵引传动系统模型,并对其短时断电工况进行研究和仿真。

收稿日期:2010-09-03

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2009BAG12A01-A04-2)

作者简介:谢 舸(1984-),男,广西壮族自治区柳州人,主要从事电机本体设计及控制方面的研究. E-mail: xiege527@yahoo.com.cn

通信联系人:卢琴芬,女,副教授,硕士生导师. E-mail: luqinfen@yahoo.com.cn

1 CRH2 型动车组牵引传动系统结构

CRH2 型动车组采用动力分散交流传动模式,动力配置为 4 动 4 拖,其中相邻的两辆动车为 1 个基本动力单元。每个动力单元都具有独立的牵引传动系统,牵引传动系统基本原理图如图 1 所示^[3]。

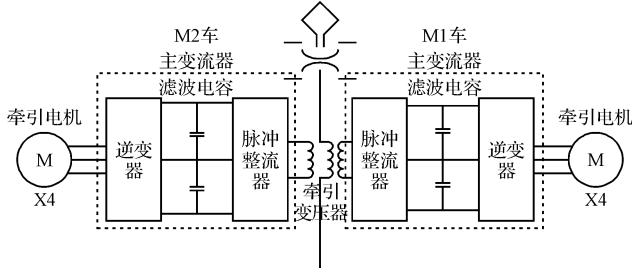


图 1 牵引传动系统简图

2 牵引变流器主电路

CRH2 型动车组牵引变流器包括脉冲整流器、中间直流环节与牵引逆变器,整流器和逆变器都采用三电平结构,其拓扑结构如图 2 所示。

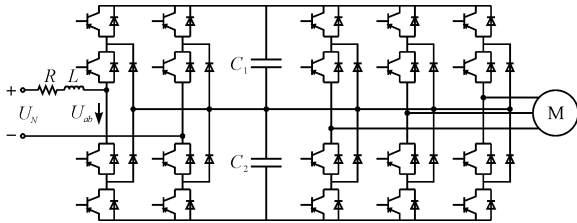
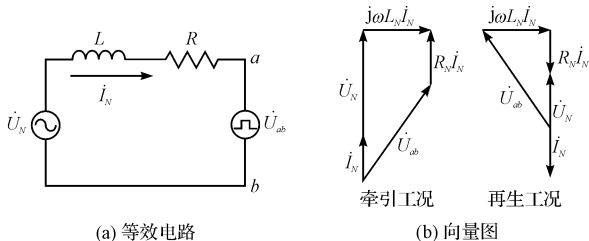


图 2 CRH2 型动车组牵引变流器拓扑结构图

图 2 中左边为脉冲整流器,假设直流环节中两个电容 $C_1 = C_2$,且两个电容上的电压 $U_1 = U_2$,那么整流器输入端电压 U_{ab} 可表示为 $0, \pm U_{dc}$ 和 $\pm U_{dc}/2$,其等效电路图如图 3(a) 所示,此时电压矢量平衡方程为:

$$\dot{U}_N = j\omega L_N \dot{I}_N + R \dot{I}_N + \dot{U}_{ab} \quad (1)$$



(a) 等效电路

(b) 向量图

图 3 脉冲整流器等效电路及基波向量图

在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}_{ab} 的幅值及其与 \dot{U}_N 的相位差来决定。改变基波的幅值和相位,就可以使 \dot{U}_N 与 \dot{I}_N 同相

位或者反相位。牵引工况下, \dot{U}_N 与 \dot{I}_N 的相位差为 0° ,而制动工况下, \dot{U}_N 与 \dot{I}_N 的相位差为 180° 。两种工况下的矢量图如图 3(b) 所示。这也就说明脉冲整流器可以实现能量正反两个方向的流动。

图 2 中右边为三电平逆变器,与三电平整流器一样,逆变器的每一相桥臂在开关元件工作于不同的开关状态下能输出 $+U_{dc}/2, 0$ 和 $-U_{dc}/2$ 这 3 种电平,因此三相桥臂一共能产生 $27(3^3)$ 种组合状态,并输出 19 种空间电压矢量,构成逆变器的矢量空间,并由 SVPWM 调制方法生成开关信号,控制逆变器的输出电压。三电平逆变器不但能使输出的电压更接近正弦交流电,而且能使逆变器每个桥臂上的单个开关管承受的电压减为两电平的一半,因此适用于高速列车上的大功率变流器^[4-5]。

3 牵引变流器控制策略

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,其控制框图如图 4 所示。控制系统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。其数学表达式为:

$$\begin{cases} I_{N1}^* = K_p(U_d^* - U_d) + 1/T_i \int (U_d^* - U_d) dt \\ I_{N2}^* = I_d U_d / U_N \\ I_N^* = I_{N1}^* + I_{N2}^* \\ U_{ab}(t) = U_N(t) - \omega L_N^* \cos \omega t - K[I_N^* \sin \omega t - I_N(t)] \end{cases} \quad (2)$$

式中: K_p, T_i —PI 调节器的参数; U_d^* —中间直流侧电压给定值; I_d, U_d —中间直流环节电流和中间直流环节电压; K —比例放大系数; ω —网测电压的角频率。

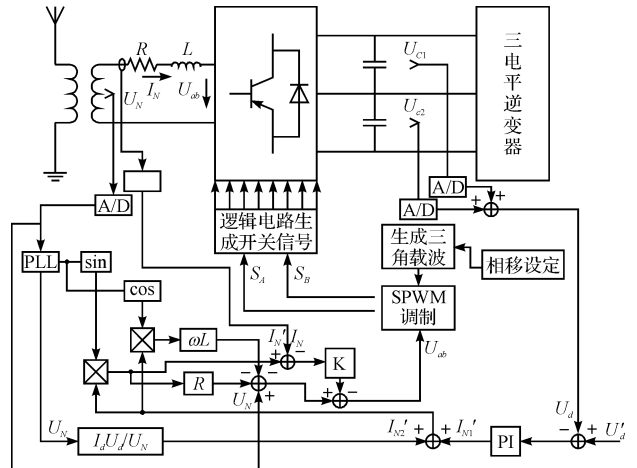


图 4 瞬态电流控制原理图

瞬态电流控制为电压电流双闭环控制系统,本研究将采样到的直流侧电压与给定电压作比较,通过PI控制器调节,得到给定电流 I_{N1}^* ,再与功率平衡控制器输出的给定电流 I_{N2}^* 相加,得到总的给定电流 I_N^* ,并配合交流侧电压和电流的反馈调节调制波的幅值和频率,把调制波信号输入到SPWM控制器单元,通过脉宽调制使直流侧电压的稳态和动态响应达到良好的性能^[6-7]。

由于CRH2型动车组所采用的牵引电机为鼠笼式异步电机,而异步电机作为多变量、强耦合的时变系统,利用传统的电机控制算法控制转速及电磁转矩将会非常困难,因此本研究采用间接转子磁场定向矢量控制策略来控制牵引电机^[8-9]。间接转子磁场定向控制又称为转差频率控制,其控制原理框图如图5所示。

间接矢量控制不需要直接检测或者计算转子磁通的位置,而是通过计算转差频率来间接得到转子磁通的位置角。如图5所示,先由采样的定子电流,通过3/2变换,得到旋转坐标系下的定子电流 I_d' 、 I_q' 。力矩分量给定 I_{sq}' 和转子磁通给定 ψ_r' ,经过转差频率计算得到转差频率,再加上采样的转子频率后,积分得到转子磁链的位置角,作为下一次定子电流旋转变换的变换角。采样获得的电机实际转速与给定转速进行速度调节,得到定子电流的力矩分量给定 I_{sq}' 。由转子磁通/速度曲线得到转子磁通给定值,并由此计算出定子电流的励磁分量给定 I_{sd}' 。计算出来的力矩分量给定与励磁分量给定分别与采样的实际电流分量作比较,

经过PI调节后再加上前馈电压得到 $d-q$ 坐标系下的给定电压 U_{sd}' 、 U_{sq}' ,再经过反旋转变换得到 $\alpha-\beta$ 坐标系下的电压给定 $U_{s\alpha}'$ 、 $U_{s\beta}'$,并将其输入到SVPWM单元,进行脉宽调制^[10-11]。

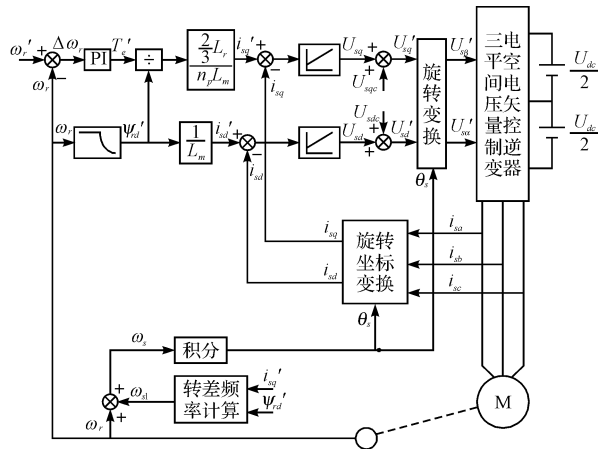


图5 间接转子磁场定向矢量控制框图

4 仿真模型与分析结果

4.1 仿真模型的建立

该系统仿真模型的建立完全基于CRH2型动车组变流器的结构和参数,硬件模块如牵引变压器、三电平整流器、三电平逆变器、牵引电机均采用Simulink模型库中的模块,为节省仿真时间,仿真系统仅对单个变流器和单个牵引电机进行仿真,仿真模型如图6所示。

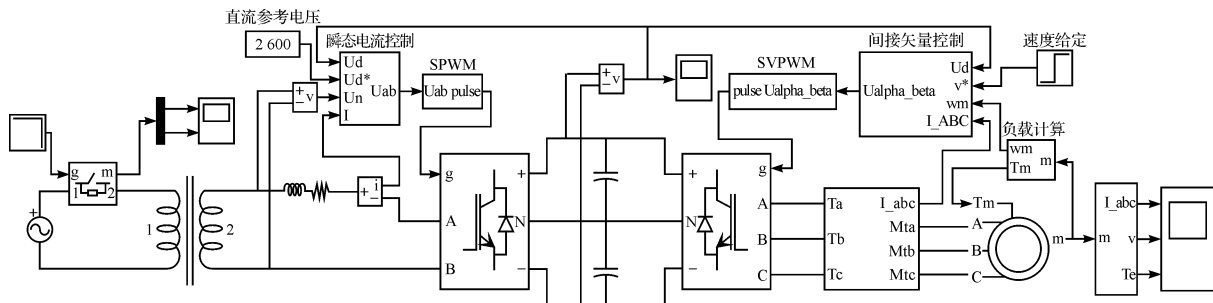


图6 系统仿真模型

仿真参数如下:

弓网电压有效值 $U = 25 \text{ kV}$,牵引变压器变比为 $25\ 000 : 1\ 500$;

整流器:变压器二次侧电压 $U_n = 1\ 500 \text{ V}$,载波频率 $f_c = 1\ 250 \text{ Hz}$;

直流环节:直流电压 $U_{dc} = 2\ 600 \text{ V}$ (牵引)/ $3\ 000 \text{ V}$ (逆变),电容 $C_1 = C_2 = 16 \text{ mF}$;

逆变器:SVPWM调制频率为 10 kHz ;

牵引电机:额定功率 $P_n = 300 \text{ kW}$,额定线电压 $U_n = 2\ 000 \text{ V}$,额定频率 $f_n = 140 \text{ Hz}$,极对数 $n = 2$ 。

模型中牵引电机的转矩为实际应用值,而转动惯量非实际值,比实际系统小很多,因此仿真的加减速比实际情况大。

4.2 牵引工况分析

为验证仿真模型的正确性,以下为系统模型在牵引工况下的模拟仿真。如图7所示,列车由静止开始启动, 0.5 s 之前直流环节充电, $t = 0.5 \text{ s}$ 时列车启动,并依照由牵引特性曲线计算出的转矩加速至 200 km/h 。

仿真结果如图8、图9、图10所示,系统模型在不

同的速度范围内都能正常运行,列车行驶速度稳定,电机输出转矩能很好的跟踪牵引特性曲线,电机定子电流与理论分析相一致,直流侧电压波动很小,能够满足实际设计要求。

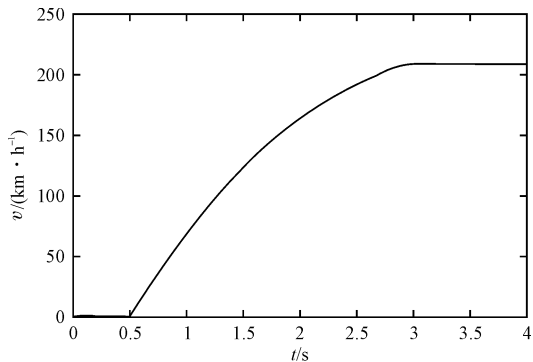


图 7 列车运行速度

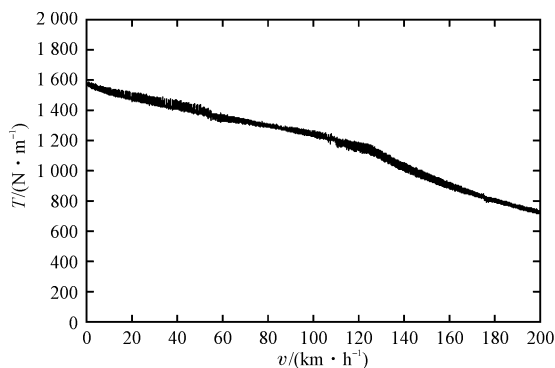


图 8 实际输出牵引特性曲线

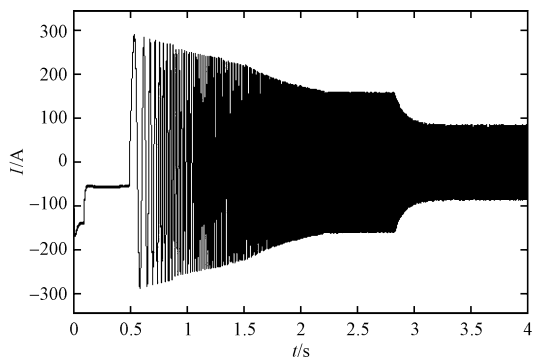


图 9 定子单相电流

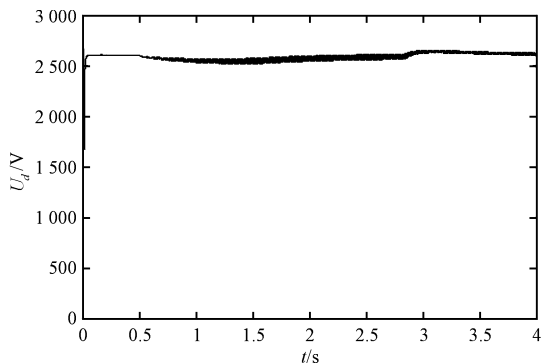


图 10 直流环节电压

4.3 受电弓短时断电仿真分析

在对动车组受电弓短时断电进行仿真时,首先将整流器接通变压器,使直流环节电容充电,并使直流侧电压达到 2 600 V,再接通逆变器驱动牵引电机。对动车组分别运行在不同时速下,受电弓断电的过程进行仿真(受电弓断电时刻均在 $t=6$ s)。由于仿真模型中有些参数与实际值有差别,以下分析结果仅用于比较,而非实际值。

列车运行速度如图 11 所示,当列车分别行驶在 50 km/h、100 km/h、150 km/h 时,在受电弓断电后,由于变流器直流环节电容放电,维持逆变器继续正常工作,列车仍匀速行驶一段时间,速度才开始下降,并且由于列车运行在不同速度下,断电后逆变器维持正常工作的时间也不同。相关仿真结果如表 1 所示,列车运行速度越快,变流器断电后正常工作的时间越短,持续正常工作时间分别为 1.2 s、0.5 s、0.13 s。

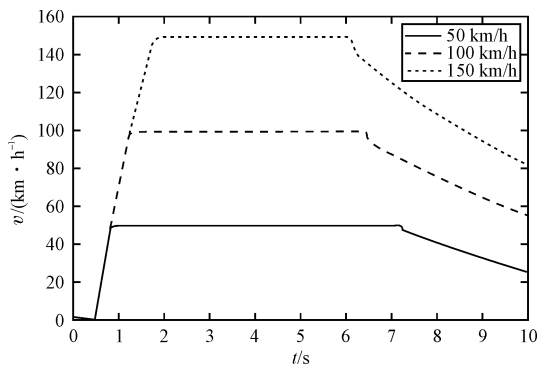


图 11 列车运行速度

当电容放电维持逆变器正常工作一段时间后,由于直流侧电压下降到维持牵引电机正常工作的水平,牵引电机不能继续匀速工作,转速下降,即列车开始减速。如图 12 所示,列车减速初始阶段,由于直流侧电压下降到维持牵引电机匀速运行的临界值,电机励磁电流跟不上给定,实际电流与参考电流经 PI 调节器调节,输出的空间电压矢量使电机输出负向转矩,此时电机向直流侧短暂馈电,使直流侧电压上升,随后继续下降,如表 1 所示,列车速度越高,动能越大,直流侧电压上升的幅度越大,上升值分别为 220 V、500 V 和 780 V。

若受电弓在直流侧电容放电维持逆变器正常工作时间范围内恢复供电,以列车行驶在 50 km/h 为例,在断电后 1.2 s 之内恢复供电,列车运行速度将不会受到受电弓断电的影响,直流侧电压在断电时下降,并在受电弓恢复供电时上升并重新稳定在电压参考值 2 600 V,期间牵引电机定子电流和转矩不产生变化。列车在 50 km/h 时速下,断电后 1.2 s 之内恢复供电

与未恢复供电工况对比仿真结果如图 13 所示。从图中可看出直流侧电压在 6.5 s 恢复供电时立刻上升并逐渐稳定到原参考电压 2 600 V。在 50 km/h 时速下,不同的断电间隔对直流侧电压产生的影响如图 14 所示,如表 2 所示,断电间隔时间越短,逆变器对直流侧电压产生的冲击越小。

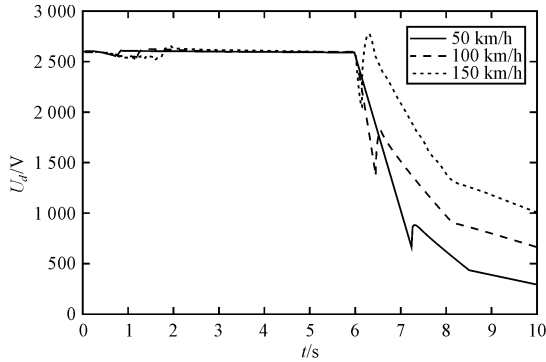


图 12 直流侧电压值

表 1 不同时速下受电弓断电仿真结果

| 列车速度 /(km · h ⁻¹) | 断电后正常工作时间 /s | 列车减速时电压上升幅度 /V |
|----------------------------------|-----------------|-------------------|
| 50 | 1.2 | 220 |
| 100 | 0.5 | 500 |
| 150 | 0.13 | 780 |

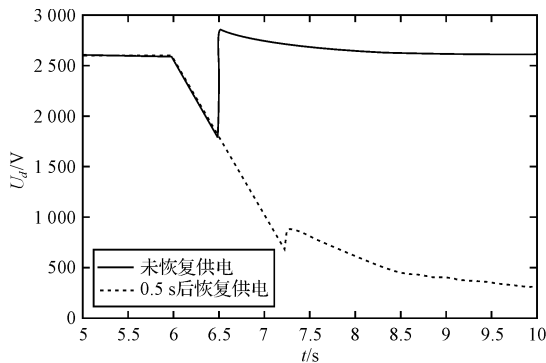


图 13 恢复供电与未恢复供电工况直流侧电压

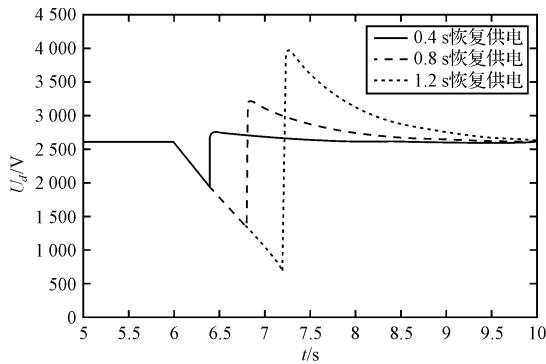


图 14 不同断电时间直流侧电压

表 2 不同断电时间对直流侧电压的冲击

| 断电时间/s | 0.4 | 0.8 | 1.2 |
|--------|-----|-----|------|
| 冲击电压/V | 160 | 600 | 1400 |

5 结束语

本研究利用 Matlab/Simulink 能够方便地对动车组牵引变流器和牵引电机等部件在各种运行工况下的运作情况进行模拟仿真,并通过示波器观测各个环节参数的实时变化。通过仿真结果可以看出,动车组在低速匀速运行的工况下受电弓断电后,直流环节电容仍能维持逆变器和牵引电机工作较长时间,由于低速下列车动能相对较小,在减速时对直流侧充电,电压上升幅度小。而列车在高速下行驶时,直流侧电容维持系统工作时间很短,且由于列车的大动能,减速时对直流侧充电造成电压大幅度上升,甚至大幅度超过参考电压。受电弓短时断电后恢复供电对直流侧电压造成的冲击会随着断电时间的加长而增大。实际运行时,高速列车牵引变流器直流环节中的稳压装置,可以保证列车在高速行驶时受电弓断电对直流侧电压的冲击不会损坏变流器。

参考文献 (References):

- [1] 韩宝明,李学伟. 高速铁路概论[M]. 北京:北京交通大学出版社,2008.
- [2] 宋雷鸣. 动车组传动与控制[M]. 北京:中国铁道出版社,2007.
- [3] 邓学寿. CRH2 型 200 km/h 动车组牵引传动系统[J]. 机车电传动,2008(4):1-7,38.
- [4] 胡慧慧,马文忠,董 磊. 基于 SVPWM 的三电平逆变器仿真研究[J]. 变流技术与电力牵引,2008(1):41-44.
- [5] CHEOK A D, KAWAMOTO S, MATSUMOTO T, et al. High power AC/DC converter and DC/AC inverter for high speed train applications[C]//TENCON 2000. Proceedings, 2000:423-428.
- [6] 宋文胜,张 雷,冯晓云. 基于 SPWM 调制的 2 种电压型四象限变流器的比较与仿真[J]. 电气技术,2007(5):14-18.
- [7] 许 赞,邹云屏,刘 雄,等. 单相三电平 PWM 整流器双环控制系统的研究[J]. 电力电子技术,2008(9):1-3.
- [8] ZHANG Yu, JIANG Zhen-hua, YU Xun-wei. Indirect field-oriented control of induction machines based on synergetic control theory[C]//Power and Energy Society General Meeting, 2008:1-7.
- [9] VENKATARAMAN R, RAMASWAMI B, HOLTZ J. Electronic analog slip calculator for induction motor driver[J]. Industrial Electronics and Control Instrumentation, 1980,7(2):110-116.
- [10] 李官军. 高速动车组牵引工况变流器控制算法研究与实现[D]. 成都:西南交通大学电气工程学院,2008.
- [11] JIANG Wei, FENG Xiao-yun, WANG Qing-yuan. Research and simulation on ANN speed-sensorless three-level inverter vector control system for induction motor[C]//Electrical Machines and Systems, 2008:1577-1581.