

# 动车组牵引传动系统瞬态电流控制策略 对电网冲击的影响研究

李 林<sup>1</sup>, 徐 海<sup>2</sup>, 耿 路<sup>3</sup>, 颜 伟<sup>3</sup>, 邱冬梅<sup>1</sup>, 高 翔<sup>3</sup>

(1.江苏省计量科学研究院, 江苏 南京 210023)

(2.江苏科能电力工程咨询有限公司, 江苏 南京 210036)

(3.南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

**[摘要]** 本文针对动车组牵引传动系统对电网冲击的影响,分析了牵引传动系统的结构,基于 SPWM 和瞬态电流控制的单相三电平脉冲整流器结构和控制策略,建立了 CRH2 牵引传动系统仿真模型,研究了牵引工况和再生制动工况. CRH2 牵引传动系统对电网冲击的影响主要有:220 kV 网侧电压电流波形和谐波,27.5 kV 网侧电压电流波形和谐波,1.5 kV 网侧电压电流波形,220 kV 网侧功率因数,以及牵引传动系统脉冲整流器不同 PI 参数. 结果表明,CRH2 运行在再生制动工况时,220 kV 网侧功率因数接近-1,网侧电流谐波较大,且牵引传动系统脉冲整流器不同 PI 参数对电网冲击的影响较大. 因此确定合适的脉冲整流器 PI 参数有助于减小系统对电网冲击的影响,实现电网高频噪声污染治理和动车组安全运行设计.

**[关键词]** 牵引传动系统,脉冲整流器,瞬态电流控制,PI 参数,电网冲击

**[中图分类号]** TM921; TM922 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2017)02-0001-12

## Research on the Grid Impact of EMU Based on the Transient Current Control Strategy of Traction Drive System

Li Lin<sup>1</sup>, Xu Hai<sup>2</sup>, Geng Lu<sup>3</sup>, Yan Wei<sup>3</sup>, Qiu Dongmei<sup>1</sup>, Gao Xiang<sup>3</sup>

(1.Jiangsu Institute of Metrology, Nanjing 210023, China)

(2.Jiangsu Keneng Electric Power Engineering Consulting Co., Ltd, Nanjing 210036, China)

(3.School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** Aiming at the grid impact of traction drive system (TDS), the structure of the TDS and the structure and control strategy of the single phase three level pulse rectifier based on the SPWM and transient current control are analyzed. The grid impact of CRH2 TDS is studied by employing the proposed the TDS simulation model of CRH2 under traction and braking operation mode, including the voltage and current waveform and harmonic waveform on the 220 kV and 27.5 kV grid side, the voltage and current waveform on the 1.5 kV grid side, the power factor on the 220 kV grid side, and the effect of 220 kV net side current harmonics based on different PI parameters. The simulation results show that the power factor is close to -1 and the current harmonic waveform is high, when the CRH2 operates under the braking operation mode. And with the different PI parameters of the TDS pulse rectifier, the impacts of the grid are very large. The impact of the grid can be reduced by optimizing the appropriate PI parameters, thus realizing the high frequency noises abatement of the grid and the safety operational design of the electric multiple units.

**Key words:** traction drive system, pulse rectifier, transient current control, PI parameter, grid impact

高速铁路作为一种新型的快速便捷、安全舒适的运输方式,反映了整个国家的科学技术发展水平,对国民经济发展以及社会进步有一定的推动作用<sup>[1-3]</sup>. 随着高速铁路不断建设、动车组速度不断提高,面对复杂电磁环境的侵扰,高速铁路动车组的运行安全以及对供电电网、牵引网的冲击影响非常严重. 我国电

收稿日期:2017-03-09.

基金项目:国家自然科学基金(51475246)、江苏省自然科学基金(BK20161019).

通讯联系人:高翔,高级实验师,研究方向:电气工程. E-mail:61188@njnu.edu.cn

力机车主要采用交直相控整流机型,谐波含量比较大,牵引负荷是一种单相电力负荷,且具有随机波动性,会在电网侧产生变化的负序电流,且电机为电感性负载,电网功率因素很低.电气化铁路产生的谐波以及注入到三相电网的负序电流将会造成旋转电机转子发热、电力变压器使用寿命缩短、输电线路送电能力降低、继电保护装置误动、安全自动装置不能正常投切等影响<sup>[4-6]</sup>.

目前,国内外学者在动车组牵引传动系统的建模与理论分析方面已经开展了较多研究,包括牵引整流器控制方法、牵引逆变器控制方法、牵引电机驱动方法、整流器谐波机理建模等.西南交大黄栋杰开展了 200 km 级 CRH2 型动车组制动控制系统研究,建立了 CRH2 型动车组制动控制模型<sup>[7]</sup>.北京交通大学郑华熙开展了 350 km/h 动车组牵引辅助系统的仿真分析与参数研究,分析了牵引辅助逆变器数学模型,提出了基于旋转坐标系电压电流双闭环控制方法的辅助逆变器稳定控制策略<sup>[8]</sup>.西南交通大学魏振兴分析了单相三电平四象限脉冲整流器的中点电位问题和三电平逆变器的中点电位问题,并按照牵引特性曲线和制动特性曲线,设计了动车组的实际控制方式,建立了控制系统的仿真模型<sup>[9]</sup>.王斌建立了牵引传动系统的仿真模型,分析了高速列车在接触网电压波动和过分区域时牵引传动系统的运行特性,并提出了基于加权法的电机并联协同控制策略均衡电机的出力<sup>[10]</sup>.华东交通大学的王莹研究了基于瞬态电流方法的三电平变流器控制策略,并提出基于直流侧上下 2 个电容差及中点电流反馈值分析的 PWM 脉冲矫正方法,以控制逆变器中点电压的平衡<sup>[11]</sup>.华南理工大学王长恺和尹华杰研究了三相电压型 PWM 整流器的系统设计方案,并通过仿真研究了整流器的比例积分(proportion integration, PI)参数对直流电压波形的影响,还提出了系统设计和 PI 参数校正方法<sup>[12]</sup>.曹晓冬和谭国俊等提出了一种三电平脉宽调制整流器的满意预测复合控制方案,实现了低开关频率下 PWM 整流器的高效运行,降低了开关损耗和传导 EMI 噪声,并通过优化开关序列减小了  $du/dt$  冲击影响<sup>[13]</sup>.Kovačević I F 等学者利用边界积分部分元等效电路方法和 GeckoEMC 仿真软件建立了单相整流器三维电磁模型,为传导 EMI 噪声机理分析和滤波器设计提供了理论依据<sup>[14]</sup>.Wang S 等研究了电机驱动的共模噪声电压和电流消除技术,提出了一种结合有源和无源滤波的混合 EMI 滤波器,在低频段的噪声抑制效果可达 50 dB,同时提高了无源滤波器的角频率、降低了 CM 电感<sup>[15]</sup>.

上述方法虽然建立了动车组牵引传统系统的系统模型,设计了各种控制方法,分析了整流器 PI 参数对直流电压波形的影响,但尚未考虑基于 SPWM 控制的牵引整流器瞬态电流控制策略对 27.5 kV 牵引网和 220 kV 母线的电压电流冲击影响.本文建立了基于 SPWM 和瞬态电流控制策略的牵引整流器电路模型,分析了瞬态电流控制策略对 27.5 kV 牵引网和 220 kV 母线的电压电流冲击影响,为电网高频噪声污染治理和动车组安全运行设计的实际应用研究奠定了重要的理论基础.

## 1 动车组牵引传动系统结构

动车组牵引传动系统(traction drive system, TDS)是实现电能与机械能转换的核心部分,我国高速铁路 CRH2 型和 CRH3 型动车组均采用带有中间直流环节的交—直—交结构的牵引传动系统.

牵引传动系统主要包括牵引变压器、主断路器、牵引整流器、中间直流环节、牵引逆变器和牵引电机.其中,牵引变压器将牵引网 27.5 kV 单相工频交流电变为 1.5 kV 单相工频交流电.牵引整流器采用基于 SPWM 调制和瞬态电流控制的单相三电平整流器,将 1.5 kV 单相工频交流电整流为 2.8 kV 直流电.中间直流环节由电容和电感组成滤波电路,以减小谐波.牵引逆变器采用基于 SPWM 调制的三相三电平逆变器,将直流电转换为三相交流电驱动牵引电机工作.牵引电机采用基于转子磁场定向的间接矢量控制三相交流异步电机,用于驱动列车运行,其额定功率为 3 kW,图 1 为 CRH2 牵引传动系统结构.

## 2 牵引整流器结构及其控制策略

牵引整流器是高速铁路动车组牵引传动系统中供电网侧变流器,理想的牵引整流器能够给中间直流环节提供平直稳定的 2.8 kV 直流电,同时能够在四个象限运行,实现电源变换和功率交换,并保证电源电流不发生畸变,同时尽量减小供电网侧谐波及其冲击性影响,图 2 为 CRH2 动车组采用基于 SPWM 和瞬态电流控制策略的单相三电平脉冲整流器.牵引整流器的电路方程为

$$u_N = R_N I_N + j\omega L_N I_N + u_{ab}. \quad (1)$$

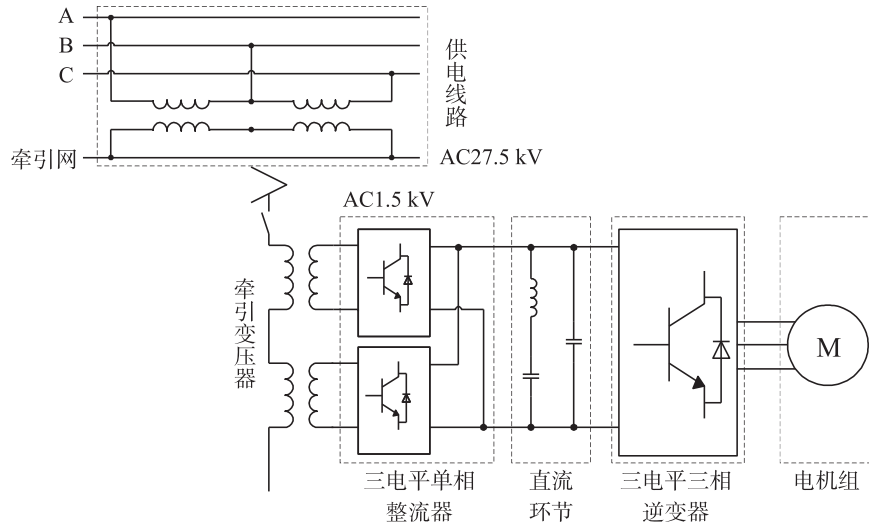


图1 CRH2 动车组牵引传动系统结构

Fig. 1 The TDS structure of CHR2

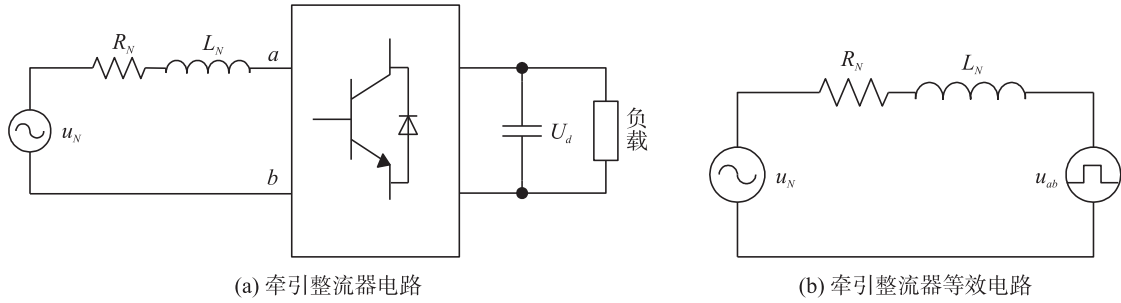


图2 牵引整流器及其等效电路

Fig. 2 The traction rectifier circuit and equivalent circuit

式中,  $u_N$  为牵引变压器二次侧电压,  $I_N$  为牵引变压器二次侧电流,  $u_{ab}$  为牵引整流器调制电压,  $R_N$  为牵引变压器二次侧等效电阻,  $L_N$  为牵引变压器二次侧等效电感。

若  $u_{ab}$  的相位滞后于  $u_N$ , 牵引传动系统从牵引网吸收电能, 实现电能—机械能转换。若  $u_{ab}$  的相位超前于  $u_N$ , 牵引传动系统向牵引网回馈电能, 实现机械能—电能转换。

另外, 一般情况下牵引变压器  $R_N \ll L_N$ , 牵引整流器运行在单位功率因数, 故可忽略式(1)中  $R_N I_N$  项。

## 2.1 基于 SPWM 调制的单相三电平脉冲整流器模型

根据拓扑结构和控制方式, 整流器可分为两电平和三电平两类, 其中两电平整流器的拓扑结构和控制方式较简单, 但每个开关管承受的电压应力较大。三电平整流器的拓扑结构和控制方式较复杂, 但每个开关管承受的电压应力较小、容量大、成本低、谐波低。

单相三电平整流器的主电路如图 3(a) 所示, 其中,  $T_{ai}$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 和  $T_{bi}$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 分别表示两组桥臂上的四个开关管,  $u_1$  和  $u_2$  分别表示直流侧支撑电容  $C_1$  和  $C_2$  上的电压。

若忽略牵引变压器二次侧电阻  $R_N$ , 同时采用理想的开关函数  $S_A$  和  $S_B$  替代开关管, 可以得到三电平整流器的等效电路, 如图 3(b) 所示, 其中

$$S_A = \begin{cases} 1, & T_{a1} \text{ 和 } T_{a2} \text{ 导通且 } u_a > u_{ca+} > u_{ca-}, \\ 0, & T_{a2} \text{ 和 } T_{a3} \text{ 导通且 } u_{ca+} > u_a > u_{ca-}, \\ -1, & T_{a3} \text{ 和 } T_{a4} \text{ 导通且 } u_{ca+} > u_{ca-} > u_a. \end{cases} \quad (2)$$

$$S_B = \begin{cases} 1, & T_{b1} \text{ 和 } T_{b2} \text{ 导通且 } u_b > u_{cb+} > u_{cb-}, \\ 0, & T_{b2} \text{ 和 } T_{b3} \text{ 导通且 } u_{cb+} > u_b > u_{cb-}, \\ -1, & T_{b3} \text{ 和 } T_{b4} \text{ 导通且 } u_{cb+} > u_{cb-} > u_b. \end{cases} \quad (3)$$

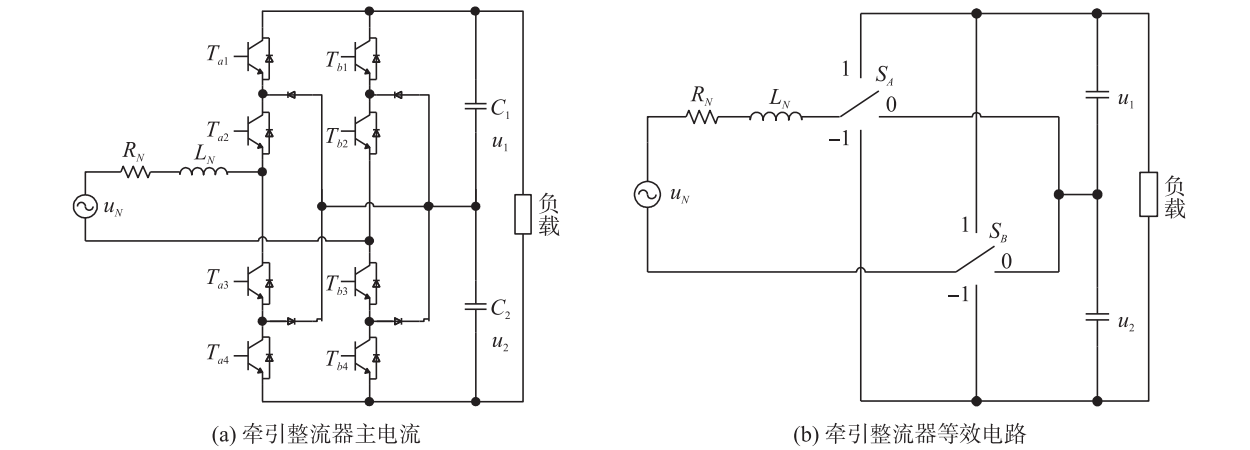


图 3 单相三电平牵引整流器电路模型

由式(2)和(3)不难发现,  $T_{a1}$  和  $T_{a3}$  互补, 即两者导通状态必须相反,  $T_{a2}$  和  $T_{a4}$  也互补. 同样地,  $T_{b1}$  和  $T_{b3}$  互补,  $T_{b2}$  和  $T_{b4}$  也互补. 此外, 根据三电平整流器主电路、等效电路以及开关函数  $S_A$  和  $S_B$ , 牵引整流器共有 9 种工作模式, 如表 1 所示.

表 1 单相三电平牵引整流器工作模式

Table 1 The operation patterns of the single phase three level traction rectifier													
模式	$S_A$	$S_B$	$T_{a1}$	$T_{a2}$	$T_{a3}$	$T_{a4}$	$T_{b1}$	$T_{b2}$	$T_{b3}$	$T_{b4}$	$u_{a0}$	$u_{b0}$	$u_{ab}$
1	1	1	导通	导通	关断	关断	导通	导通	关断	关断	$u_1$	$u_1$	0
2	1	0	导通	导通	关断	关断	关断	导通	导通	关断	$u_1$	0	$u_1$
3	1	-1	导通	导通	关断	关断	关断	关断	导通	导通	$u_1$	$-u_2$	$u_1+u_2$
4	0	1	关断	导通	导通	关断	导通	导通	关断	关断	0	$u_1$	$-u_1$
5	0	0	关断	导通	导通	关断	关断	导通	导通	关断	0	0	0
6	0	-1	关断	导通	导通	关断	关断	关断	导通	导通	0	$-u_2$	$u_2$
7	-1	1	关断	关断	导通	导通	导通	导通	关断	关断	$-u_2$	$u_1$	$-u_1-u_2$
8	-1	0	关断	关断	导通	导通	关断	导通	导通	关断	$-u_2$	0	$-u_2$
9	-1	-1	关断	关断	导通	导通	关断	关断	导通	导通	$-u_2$	$-u_2$	0

在实际过程中, 由于牵引整流器直流侧支撑电容  $C_1=C_2$ , 因此  $u_1=u_2$ , 不同工作模式中,  $u_{dc}$  的值如表 2 所示.

表 2 单相三电平牵引整流器直流侧电压

Table 2 The output direct voltage of the single phase three level traction rectifier								
$S_A$	$S_B$	$u_{dc}$	$S_A$	$S_B$	$u_{dc}$	$S_A$	$S_B$	$u_{dc}$
1	1	0	0	1	$-U_d/2$	-1	1	$-U_d$
1	0	$U_d/2$	0	0	0	-1	0	$-U_d/2$
1	-1	$U_d$	0	-1	$U_d/2$	-1	-1	0

在实际应用中, 为了产生  $S_A$  和  $S_B$ , A 相载波包括正相载波  $u_{ca+}$  和负相载波  $u_{ca-}$ , 同样地, B 相载波包括正相载波  $u_{cb+}$  和负相载波  $u_{cb-}$  (如图 4 所示). 若 A 相调制波  $u_a$  与 B 相调制波  $u_b$  相位相差  $180^\circ$ , 则 A 相载波与 B 相载波也应相差  $180^\circ$ , 以降低高次谐波.

因此, 单相三电平牵引整流器采用上述方式控制开关管, 牵引整流器输入端电压  $u_{ab}$  是以  $-U_d$ 、 $-U_d/2$ 、0、 $U_d/2$  和  $U_d$  五种电平等效电弦波.

2.2 基于 SPWM 调制的单相三电平脉冲整流器模型

为了实现快速、有效的参数自适应调节, 我国高速铁路动车组牵引整流器采用瞬态电流控制技术, 即通过牵引整流器直流侧电压闭环和前馈电流闭环的调节, 计算单相三电平牵引整流器 SPWM 调制所需要的调制波, 其原理如下:

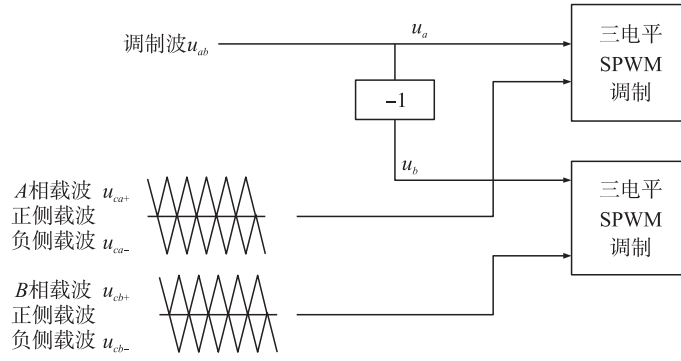


图 4 基于 SPWM 调制的单相三电平牵引整流器的开关管脉冲信号

Fig. 4 The pulse signals of the switch tubes of the single phase three level rectifier based on the SPWM modulation

$$\begin{aligned}
 I_{N1}^* &= K_p (U_d^* - U_d) + \frac{1}{T_i} \int (U_d^* - U_d) dt, \\
 I_{N2}^* &= \frac{I_d U_d}{u_N}, \\
 I_N^* &= I_{N1}^* + I_{N2}^*, \\
 u_{ab}(t) &= u_N(t) - \omega L_N I_N^* \cos(\omega t) - R_N I_N^* \sin(\omega t) - K [I_N^* \sin(\omega t) - I_N(t)].
 \end{aligned} \tag{4}$$

式中,  $K_p$  和  $T_i$  分别为瞬态电流控制策略中 PI 控制的比例因子和积分因子,  $K$  为瞬态电流控制策略中电流比例放大系数,  $U_d^*$  为牵引整流器直流侧电压设定值,  $U_d$  和  $I_d$  分别为牵引整流器直流侧电压和电流,  $u_N$  和  $I_N$  为牵引变压器二次侧电压和电流,  $\omega$  为牵引变压器二次侧电压的角频率,  $R_N$  和  $L_N$  分别为牵引变压器二次侧的电感和电阻。

根据式(4), 结合单相三电平牵引整流器拓扑结构和 SPWM 调制方式, 确立如下牵引整流器瞬态电流控制策略, 如图 5 所示。

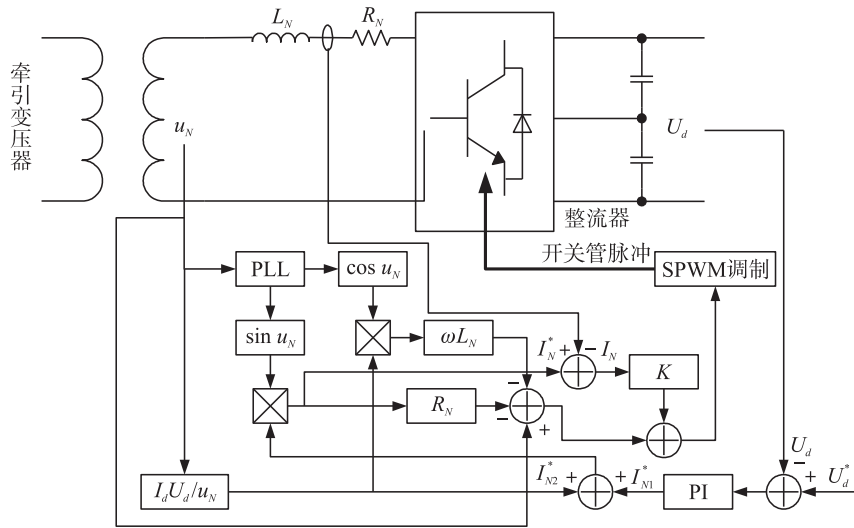


图 5 牵引整流器瞬态电流控制原理

Fig. 5 The principle of the transient current control strategy of the traction rectifier

牵引整流器直流侧电压与设定电压比较后送入 PI 控制器形成  $I_{N1}^*$ , 再加上功率平衡计算确定的  $I_{N2}^*$ , 构成  $I_N^*$ . 然后, 根据式(4)中第 4 式确定单相三电平整流器调制波  $u_{ab}$ . 然后给定的三角载波进行 SPWM 调制, 形成整流器开关管脉冲驱动信号. 当整流器直流侧电压  $U_d$  大于设定值  $U_d^*$  时, 通过 PI 控制器能够使  $I_{N1}^*$  增大, 牵引整流器电流输入增大, 直至  $U_d = U_d^*$ ; 同样地, 当整流器直流侧电压  $U_d$  小于设定值  $U_d^*$  时, 通过 PI 控制器能够使  $I_{N1}^*$  降低, 牵引整流器电流输入减小, 直至  $U_d = U_d^*$ .

此外,为了保持牵引整流器输入端和输出端的功率相等,瞬态电流控制策略引入了功率平衡电流,从而进一步提高牵引整流器的功率因数. 但  $u_N$  并非牵引变压器二次侧电压的瞬时值,而是牵引变压器二次侧电压的有效值.

另一方面,由式(4)可见,瞬态电流控制策略中 PI 控制的比例因子  $K_p$  和积分因子  $T_i$ ,对牵引整流器网侧和直流侧的冲击影响非常显著,如电压电流波形、谐波含量和功率因数等.

### 3 牵引整流器系统仿真

根据单相三电平牵引整流器电路及其控制策略建立 CRH2 牵引整流器仿真模型,包括三电平四象限整流桥模型、三电平 SPWM 调制模型和瞬态电流控制模型(如图 6 所示). 模型设定牵引变压器二次侧电压为 1.5 kV,牵引变压器二次侧电感  $L_N$  和电阻  $R_N$  分别为 4.3 mH 和 0.2  $\Omega$ . 牵引整流器直流侧支撑电容  $C_1$  和  $C_2$  均为 8.5 mF. A、B 相桥臂各包含 4 个带有阻尼二极管的 IGBT,其内阻为 0.001  $\Omega$ ,缓冲电阻为 1 M $\Omega$ . 4 个箝位二极管内阻为 0.001  $\Omega$ ,三角载波频率为 1.25 kHz.

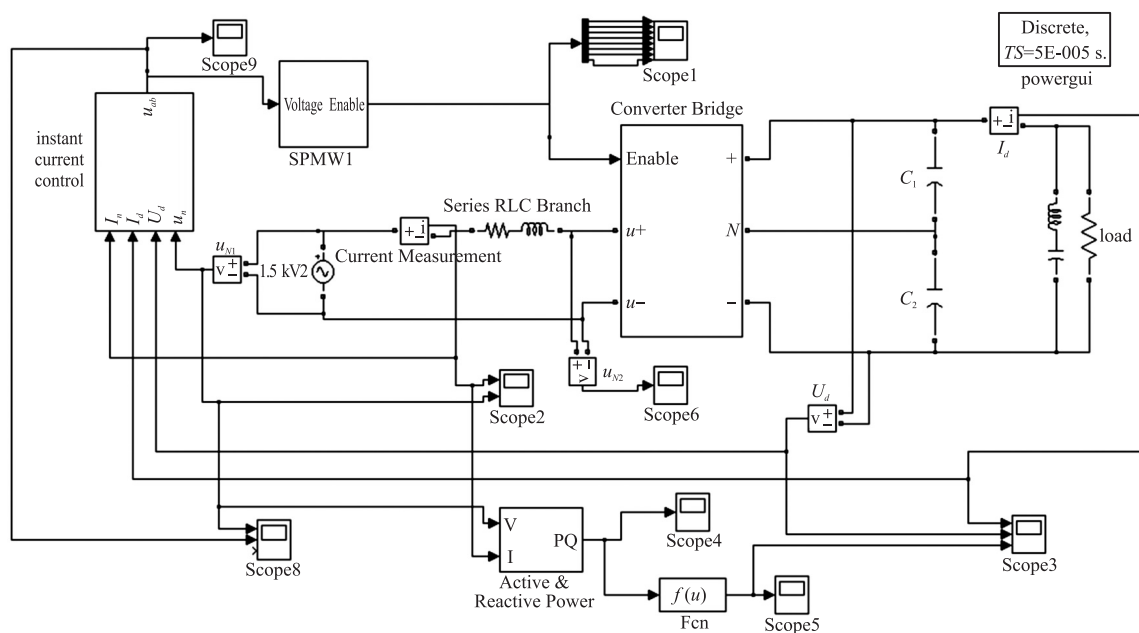


图 6 牵引整流器仿真模型

Fig. 6 The simulation model of the traction rectifier

根据 SPWM 脉冲调制策略,牵引整流器开关管的驱动脉冲波形如图 7(a) 所示.

根据式(6)和图 6,建立牵引整流器瞬态电流控制策略仿真模型,如图 7(b)所示,其中,PI 控制器的比例参数为 2,积分参数为 1.5,电流比例放大系数为 7,牵引变压器二次侧电感  $L_N$  和电阻  $R_N$  分别为 4.3 mH、0.2  $\Omega$ ,整流器直流侧电压设定为牵引工况 2.8 kV,再生制动工况 3 kV.

如图 7(c)所示,在牵引整流器稳定运行后,整流器直流侧电压稳定在 2.8 kV,网侧功率因数大于 0.97.

### 4 CRH2 牵引整流器瞬态电流控制策略对网侧冲击影响

CRH2 型高速铁路动车组为动力分散的交—直—交传动动车组,是铁道部为铁路第 6 次大提速订购的高速铁路动车组,由中国南车四方机车车辆股份有限公司(联合日本川崎重工)引进技术负责国内生产,并以引进国外技术并吸收的方式逐步国产化. 该车型是以日本新干线 E2-1000 型动车组为原型车改变设计而成的 200 km 级别高速列车,其运营速度为 200 km/h,最高速度为 250 km/h. CRH2 动车组采用 8 节编组,动力配置由 E2-1000 的 6 动 2 拖(6M2T)变为 4 动 4 拖(4M4T).

8 节编组的 CRH2 动车组包含 2 个动力单元,每个动力单元又包含 2 个动车,每个动车有 4 台并联牵引电机,全车共 4 节动车、4 节拖车,即 4M4T. CRH2 动车组的牵引整流器采用瞬态电流控制策略和基于 SPWM 的单相三电平脉冲调制技术,取消了中间直流滤波环节,牵引逆变器采用基于 SVPWM 的三相三电



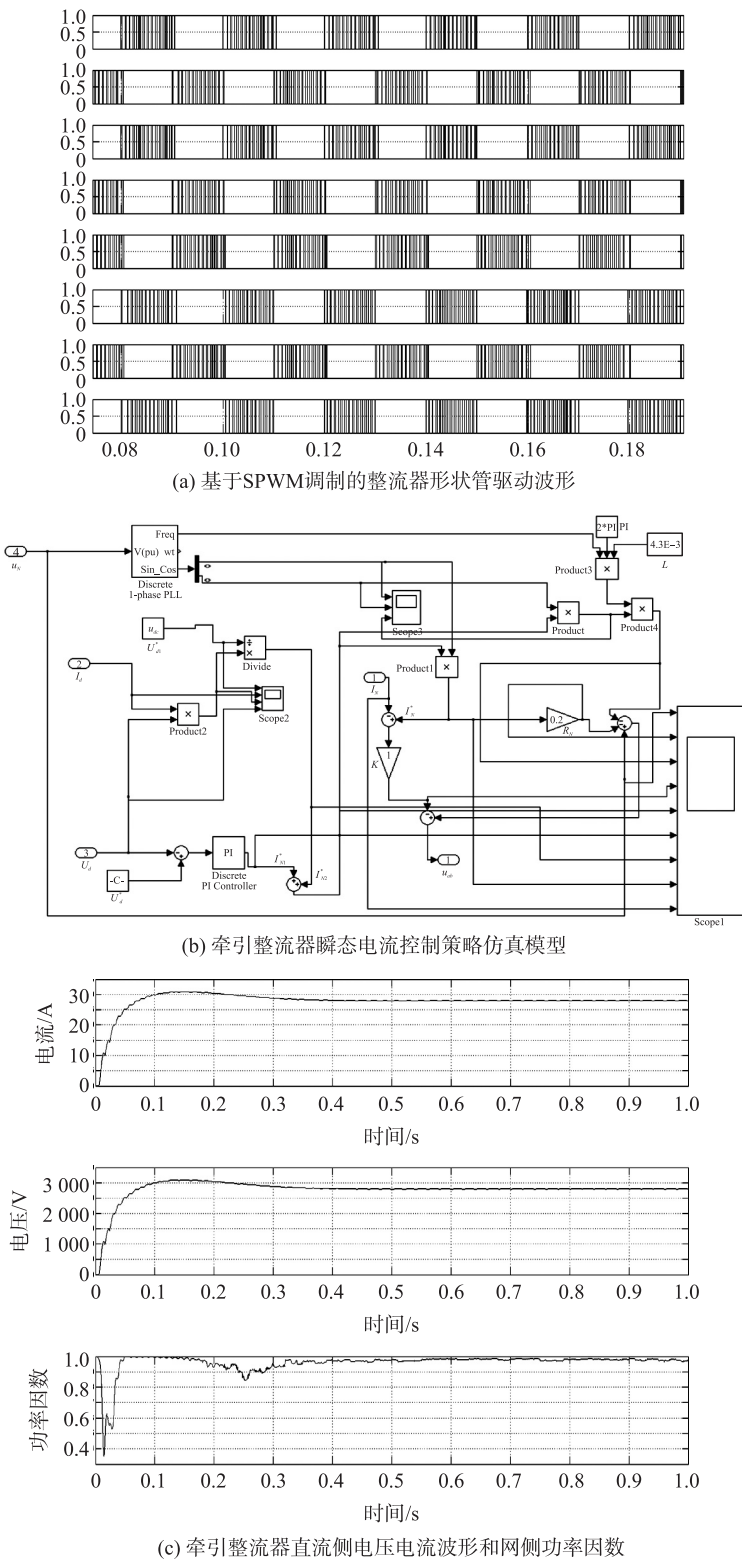


图7 牵引整流器仿真结果

Fig.7 The simulation result of the traction rectifier

平脉冲调制技术,牵引电机采用磁场定向的间接矢量控制策略,其额定功率为 300 kW,额定电压为 2 kV,额定频率为 140 Hz.

上述 8 节编组的 CRH2 动车组(4M4T,时速 200~250 km/h)牵引传动系统的具体电气参数如表 4 所示. 牵引供电网电压为单相 AC 25 kV/50 Hz,牵引变压器二次侧电压为单相 AC 1.5 kV/50 Hz,牵引整流器直流侧支撑电容为 16 mF,中间直流环节电压为 DC 2.6 kV(牵引)/DC 3.0 kV(再生制动),牵引电机额定

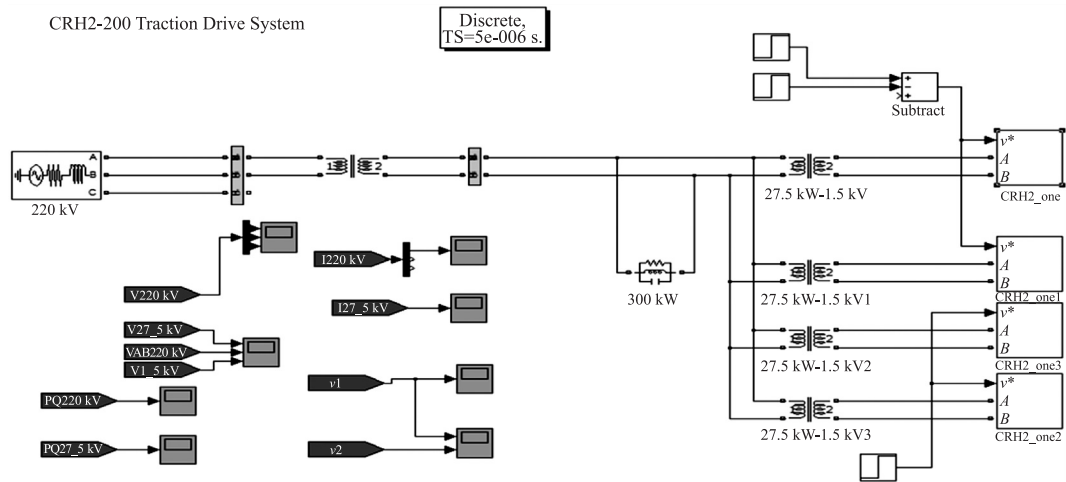
功率为 300 kW,额定电压为 2 kV(线电压),额定频率为 140 Hz.

表 3 单相三电平牵引整流器直流侧电压

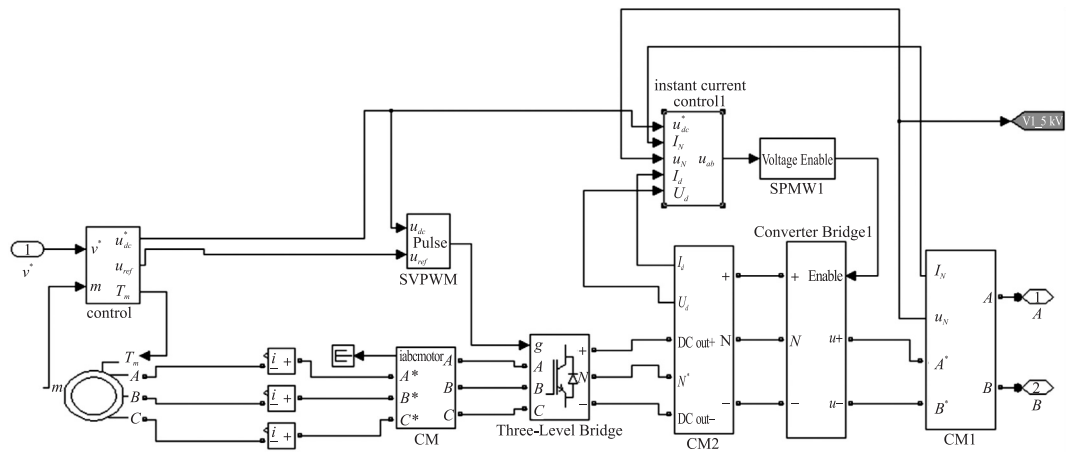
Table 3 The output direct voltage of the single phase three level traction rectifier

牵引变压器二次侧漏感 $L_N$	2 mH	牵引变压器二次侧漏电阻 $R$	0.2 $\Omega$
中间直流电压 $u_{dc}$	2 600 V(牵引)/3 000 V(再生制动)	支撑电容 $C_1 = C_2$	16 mF
动车总质量 $m$	408.5 t	机车轮径 $d$	0.82 m
牵引电机总台数 $N$	16	传动比 $a$	3.036
传动效率 $\eta_{Gear}$	0.95	牵引电机额定功率 $P_N$	300 kW
牵引电机额定电压 $u_N$	2 000 V	牵引电机额定频率 $f_N$	140 Hz
定子电阻 $R_S$	0.114 $\Omega$	定子漏感 $L_S$	0.001 417 H
转子电阻 $R_r$	0.146 $\Omega$	转子漏感 $L_r$	0.001 294 H
互感 $L_m$	0.032848H	极对数 $p$	2
转动惯量 $J$	5 kg/m <sup>2</sup>		

根据上述分析,建立 CRH2 牵引传动系统仿真模型,如图 8 所示.



(a) CRH2牵引传动系统仿真主电路



(b) CRH2牵引传动系统整流器、逆变器和电机模型

图 8 CRH2 牵引传动系统仿真模型

Fig. 8 The simulation model of the CRH2 TDS

根据上述理论分析,利用建立的 CRH2 动车组牵引传动系统模型,分析不同工况对网侧电压电流的影响研究,其中辅助牵引系统的功率设定为 300 kVA.

4.1 牵引工况:单台动车组从 0 km/h 加速到 200 km/h

利用上述 CRH2 牵引传动系统模型,可得 CRH2 列车由 0 km/h 加速至 200 km/h 的速度曲线和功率因数分别如图 9(a)、9(b)所示,表明列车运行在牵引工况下. 220 kV、27.5 kV 和 1.5 kV 网侧电压电流波形如图 9(c)-(f)所示. 列车启动瞬间,220 kV 供电电网相电压谐波为 0.00%,电流谐波为 14.58%. 27.5



kV 牵引网线电压谐波为 0.32%,电流谐波为 24.93%,如图 9(g)-(j)所示.

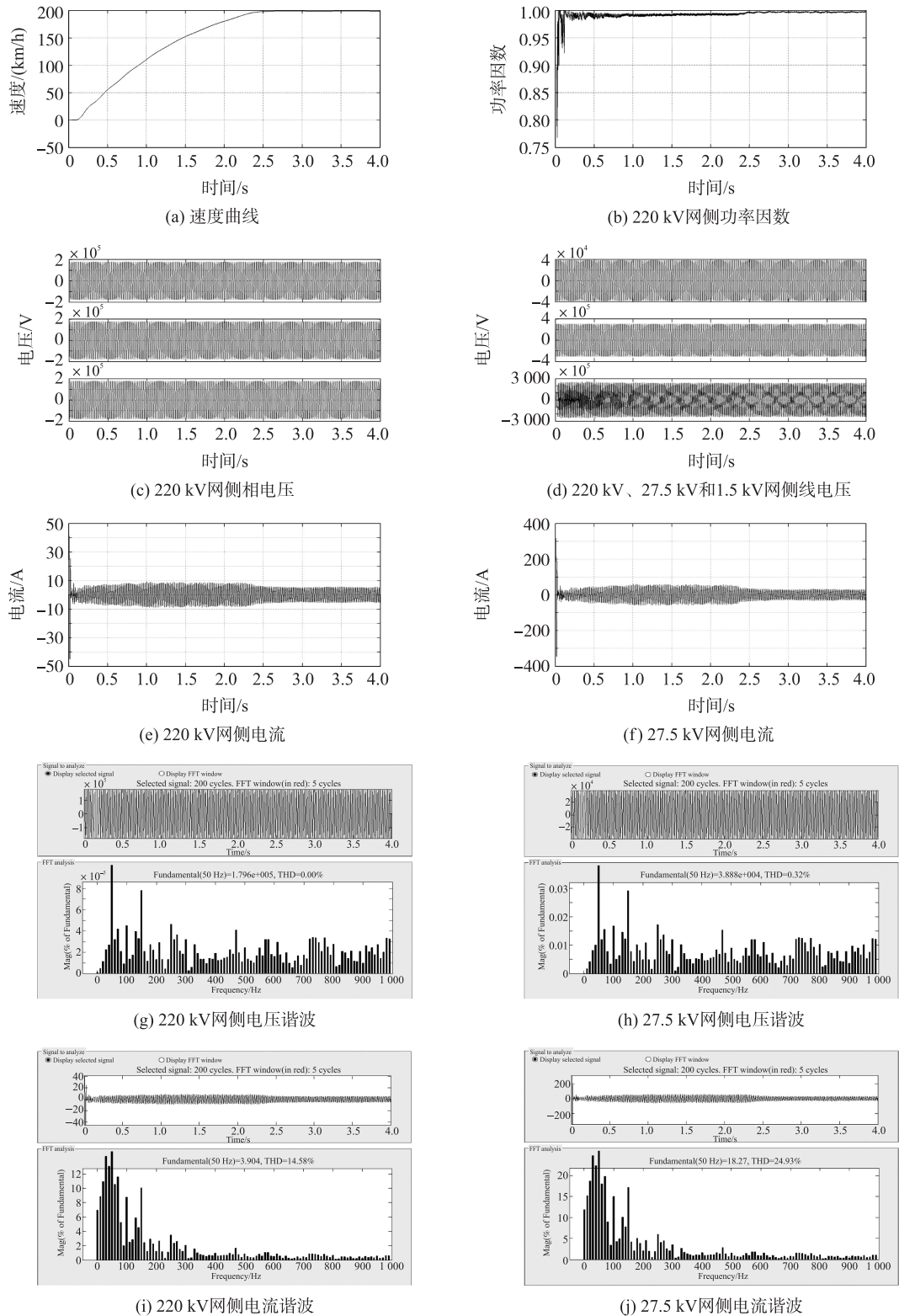


图 9 牵引工况仿真结果

Fig. 9 The simulation result of the drive operation

4.2 再生制动工况:单台从车组从 200 km/h 减速至 150 km/h

利用上述 CRH2 牵引传动系统模型,可得 CRH2 列车由 200 km/h 减速至 150 km/h 的速度曲线和功率因数分别如图 10(a)和 10(b)所示. 220 kV、27.5 kV 和 1.5 kV 网侧电压电流波形如图 10(c)-(f)所示. 列车制动瞬间,220 kV 供电电网相电压谐波为 0.00%,电流谐波为 48.33%,27.5 kV 牵引网线电压谐波

为 0.43%, 电流谐波为 132.31%, 如图 10(g)-(j) 所示.

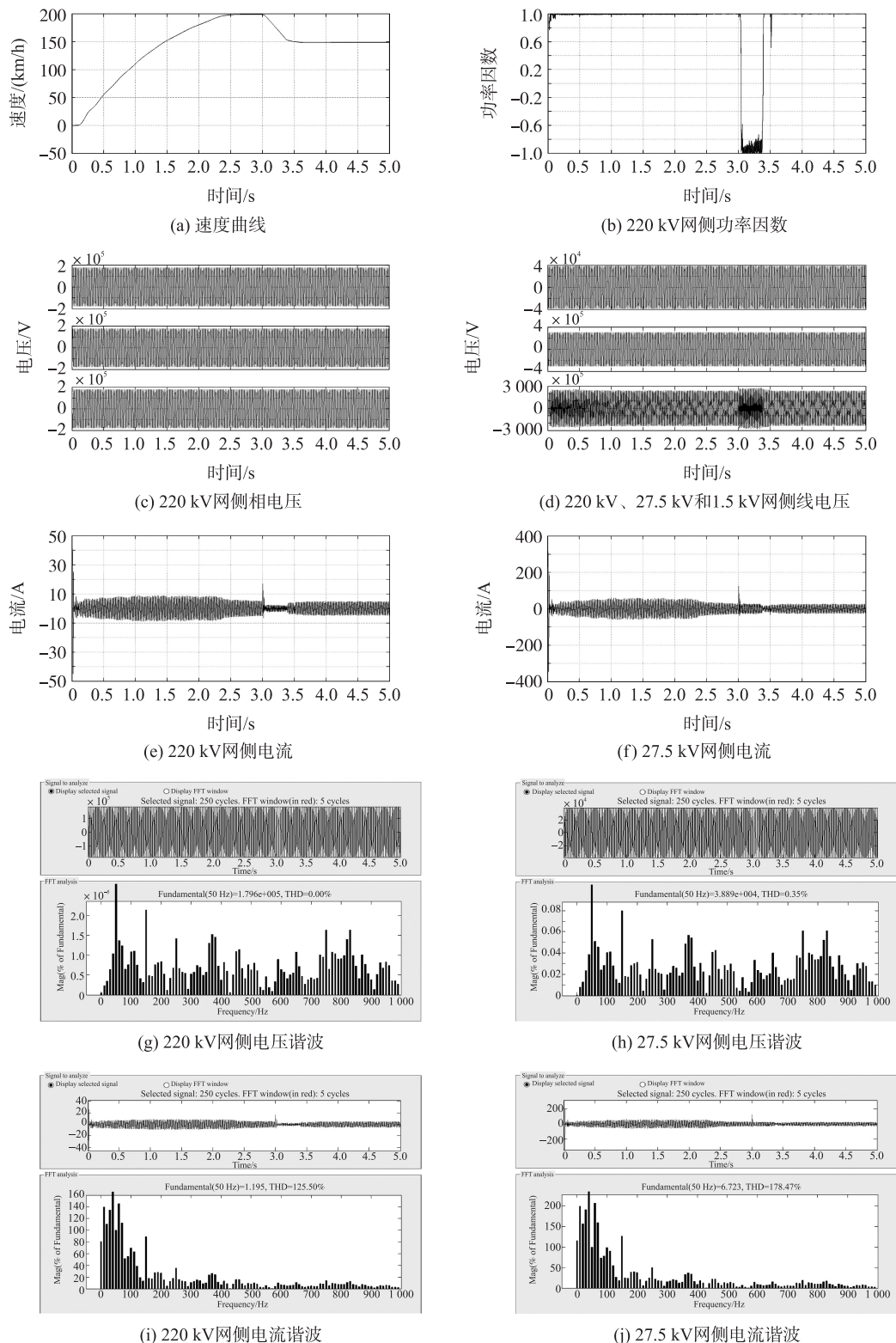


图 10 再生制动工况仿真结果

Fig. 10 The simulation result of the regenerative braking operation

综上所述, CRH2 运行在再生制动工况时, 220 kV 网侧功率因数接近 -1, 此时网侧电流谐波非常大, 远远超过牵引工况时的网侧电流谐波.

### 4.3 瞬态电流控制中不同 PI 参数对电网的冲击影响

为了进一步研究 CRH2 牵引传动系统脉冲整流器瞬态电流控制中 PI 参数对电网的冲击影响, 利用如

图 8 所示的 CRH2 仿真平台,研究再生制动工况下,不同 PI 参数对 CRH2 220 kV 电流谐波的影响,如图 11 所示。

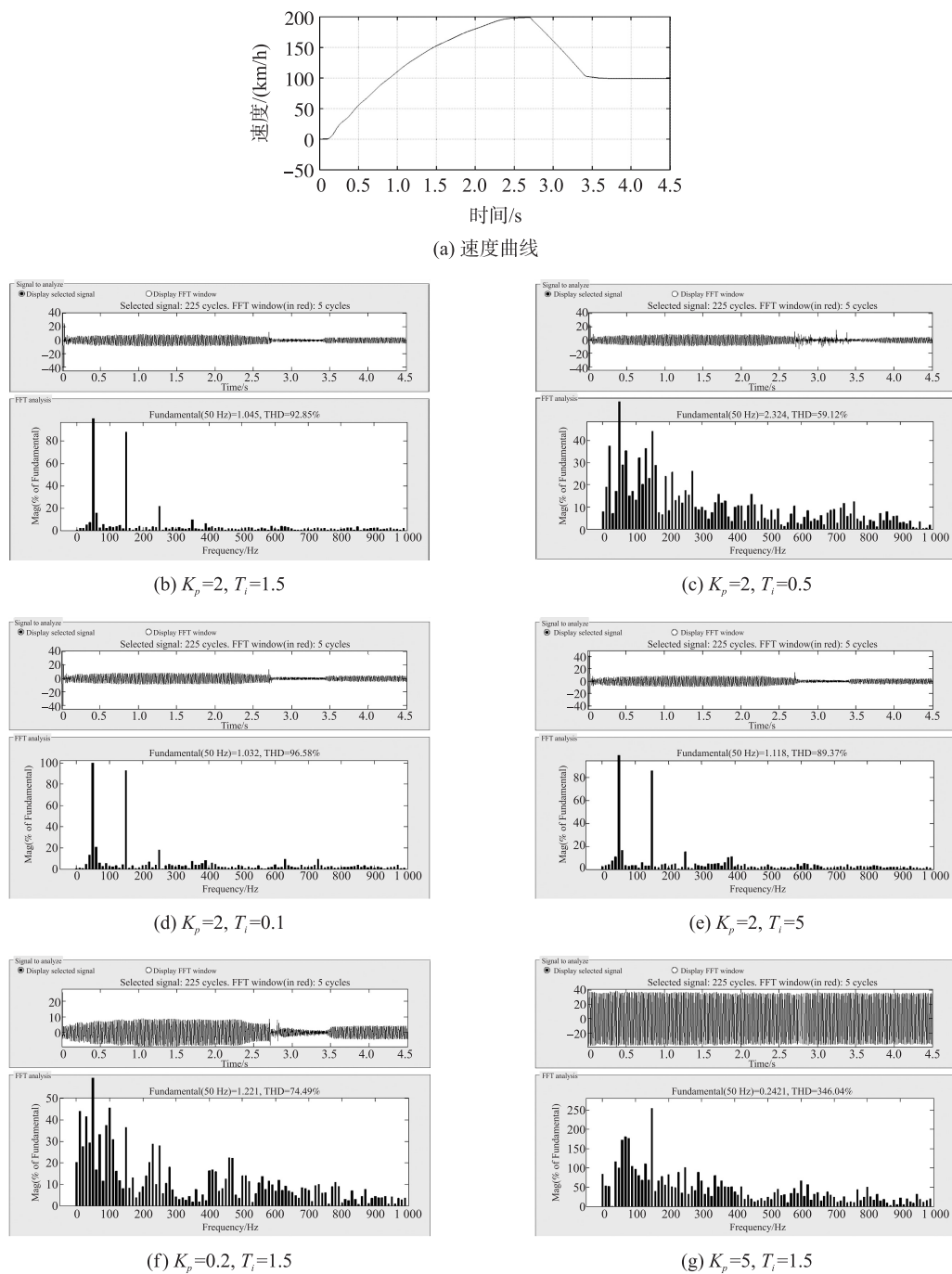


图 11 不同 PI 参数对 220kV 网侧电流谐波的影响

Fig. 11 The effect of 220kV net side current harmonics based on different PI parameters

## 5 结语

针对动车组牵引传动系统不同运行工况对网侧电压电流波形、功率因数、有功冲击、无功冲击和电压电流谐波的影响,本文通过建立动车组牵引传动系统模型,分析不同工况和脉冲整流器不同 PI 参数对电网冲击的影响。

结果表明,CRH2 运行在再生制动工况时,220 kV 网侧功率因数接近-1,网侧电流谐波较大,远远大于牵引工况时的网侧电流谐波。另外,CRH2 牵引传动系统脉冲整流器不同 PI 参数对电网冲击的影响较大,确定合适的脉冲整流器 PI 参数,有助于减小系统对电网冲击的影响,为电网高频噪声污染治理和动车

组安全运行设计的实际应用奠定了重要的理论基础。

### [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,2010:1-38.  
HAN B M, LI X W. Introduction to high speed railway[M]. Beijing: Beijing Jiaotong University Press, 2010: 1-38. (in Chinese)
- [2] 李群湛,贺建闽. 牵引供电系统分析[M]. 成都:西南交通大学出版社,2007:34-67.  
LI Q Z, HE J M. Analysis of traction power supply system[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2007: 34-67. (in Chinese)
- [3] GAO L, XU Y H, XIAO X N, et al. Analysis of adverse effects on the public power grid brought by traction power-supply system[C]//Electrical Power Conference, Canada, IEEE, 2008:1-7.
- [4] 姚金雄,张涛,林榕,等. 牵引供电系统负序电流和谐波对电力系统的影响及其补偿措施[J]. 电网技术,2008,32(9): 61-64.  
YAO J X, ZHANG T, LIN R, et al. Impacts of negative sequence current and harmonics in traction power supply system for electrified railway on power system and compensation measures[J]. Power system technology, 2008, 32(9): 61-64. (in Chinese)
- [5] 韩柳,谈顺涛. 电气化铁路对电网的影响及对策[J]. 江苏电机工程,2005,24(3):8-11.  
HAN L, TAN S T. Power system operation affected by electrification railway and its improvement[J]. Jiangsu electrical engineering, 2005, 24(3): 8-11. (in Chinese)
- [6] 宋雷鸣. 动车组传动与控制[M]. 北京:中国铁道出版社,2007:1-45.  
SONG L M. EMU drive and control[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2007: 1-45. (in Chinese)
- [7] 黄栋杰. 200公里级CRH型动车组制动控制系统研究[D]. 成都:西南交通大学,2010:15-18,64.  
HUANG D J. 200 kilometers CRH EMU braking control system[D]. Chengdu: Southeast Jiaotong University, 2010: 15-18, 64. (in Chinese)
- [8] 郑华熙. 350 km/h动车组牵引辅助系统的仿真分析与参数研究[D]. 北京:北京交通大学,2009:23-62.  
ZHENG H X. Simulation analysis and parameter research of auxiliary power supply system of 350 km/h China railway high-speed[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009: 23-62. (in Chinese)
- [9] 魏振兴. CRH2型动车组传动控制系统仿真[D]. 成都:西南交通大学,2012:8-50.  
WEI Z X. The simulation of CRH2 type EMU transmission control system[D]. Chengdu: Southeast Jiaotong University, 2012: 8-50. (in Chinese)
- [10] 王斌. 列车牵引传动系统性能分析和仿真技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2013:13-60.  
WANG B. The Research on performance analysis and simulation technology of traction drive system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013: 13-60. (in Chinese)
- [11] 王莹. 三电平四象限变流器的控制仿真研究[J]. 机车电传动,2007(3):24-26,45.  
WANG Y. Study on control simulation of three-level four-quadrant converter[J]. Electric drive for locomotives, 2007(3): 24-26, 45. (in Chinese)
- [12] 王长恺,尹华杰. 三相电压型PWM整流器的系统设计与PI参数校正[J]. 电气传动,2011,41(3):41-45.  
WANG C K, YIN H J. System design and PI parameter calibration of three phase voltage source PWM rectifier[J]. Electric drive, 2011, 41(3): 41-45. (in Chinese)
- [13] 曹晓冬,谭国俊,王从刚,等. 一种低开关频率PWM整流器的满意预测控制策略[J]. 中国电机工程学报,2013,33(27): 69-77.  
CAO X D, TAN G J, WANG C G, et al. A research on low switching frequency PWM rectifiers with satisfactory and model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(27): 69-77. (in Chinese)
- [14] KOVAČEVIĆ I F, FRIEDLI T, MUESING A M, et al. 3-D electromagnetic modeling of EMI input filters[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2014, 61(1): 231-242.
- [15] WANG S, MAILLET Y Y, WANG F, et al. Investigation of hybrid EMI filters for common-mode EMI suppression in a motor drive system[J]. IEEE transactions on power electronics, 2010, 25(4): 1 034-1 045.

[责任编辑:陈 庆]