

文章编号: 1006-4710(2012)04-0484-04

CRH2 型动车组谐波电流仿真分析

吕大霖, 余健明

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 对 CRH2 型动车组整流器的工作原理和控制方法进行了研究。为了研究动车组网侧电流的谐波特性, 以 MATLAB/SIMULINK 软件为平台, 以 CRH2 型动车组为原型, 搭建动车组 PWM 整流器模型, 对动车组在不同牵引工况和不同网压下整流器网侧电流的变化规律进行了分析与总结。

关键词: 动车组; 谐波; 预测电流控制

中图分类号: TM461 **文献标志码:** A

The Simulation Analysis of Harmonic Currents on CRH2 Electric Multiple Units

LU Dalin, YU Jianming

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The working principle and controlling method of the rectifier of CRH2 EMU in China are studied in this paper. In order to study the current harmonic behaviors of CRH2 EMU grid voltage, Electric Multiple Units PWM rectifier model is set up with MATLAB/SIMULINK software as the platform and CRH2 Electric Multiple Units as the prototype, whereby the current changing laws of the rectifier grid voltage of Electric Multiple Units under the different traction power industrial conditions and the different grid voltages are analyzed and summarized in this paper.

Key words: electric multiple units; harmonics; predictive current control

高速动车组变流器通常采用三电平拓扑结构, 自从 2007 年 4 月电气化铁路的第六次大提速以来, 已经在我国的铁路运输中发挥出了重要作用。大量动车组的投入使用, 给现有电网带来了新的问题, 实测显示, 动车组网侧电流中 3、5、7 次等低次谐波含量比传统直流电力机车谐波含量明显减小, 但其网侧电流存在 20 次以上的高次谐波^[1-4], 运行以来已多次引发谐振, 谐振事故造成了谐波电流放大甚至导致谐振过电压, 因而对系统的正常运行造成严重影响。所以, 对新型高速动车组展开电能质量问题的研究工作是非常必要的。

针对动车组 PWM 变流器的谐波问题, 国内外已经进行了大量的研究。文献[1]建立了 CRH2 型动车组的仿真模型, 并对其额定牵引工况的谐波特性进行了分析; 文献[4]对几种常见的 PWM 变流器的谐波产生原理进行了分析, 得到了变流器网侧电

流的傅立叶展开式; 文献[5-8]对 CRH2、CRH5 型动车组牵引功率变化时各主要次数的谐波变化情况进行了分析总结, 但并未考虑电压变化时的情况。

本研究探讨了 CRH2 型动车组整流器的工作原理及控制方法, 利用 MATLAB/SIMULINK 软件, 搭建了 CRH2 型动车组模型, 分析了动车组在不同功率和网压下的网侧电流谐波含量的变化情况。

1 CRH2 型动车组整流电路

以日本的 E2-1000 型动车组为原型的 CRH2 型动车组是由四方股份有限公司生产制造的, 主要运行于京广线、京沪线等电气化铁路客运专线^[5-6]。CRH2 型动车组的主电路采用三电平二极管箝位型 PWM 整流器, 其拓扑结构如图 1 所示。

图 1 中 u_N 、 i_N 分别为交流侧电压和电流, u_{ab} 为整流器交流侧的输入电压, L_N 、 R_N 分别为网侧等效

收稿日期: 2011-11-20

作者简介: 吕大霖(1987-), 男, 陕西大荔人, 硕士生, 研究方向为电力系统分析与优化运行。E-mail: ldl3298818@163.com。

余健明(1956-), 男, 广东台山人, 硕导, 教授, 研究方向为电力系统优化与运行。E-mail: jianmingyu@xaut.edu.cn。

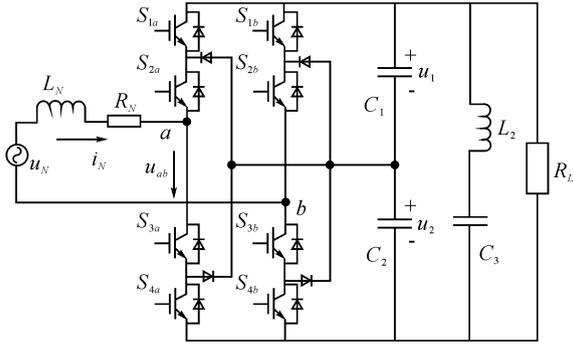


图1 CRH2 动车组整流器原理图

Fig.1 The schematic of CRH2 EMU rectifier

电感和电阻, \$C_1, C_2\$ 是直流侧两个支撑电容, \$L, C\$ 是组成直流侧二次滤波环节的电感和电容, \$R_L\$ 为等效负载。对图1所示的整流器电路进行等效得到整流器网侧等效电路图, 见图2。

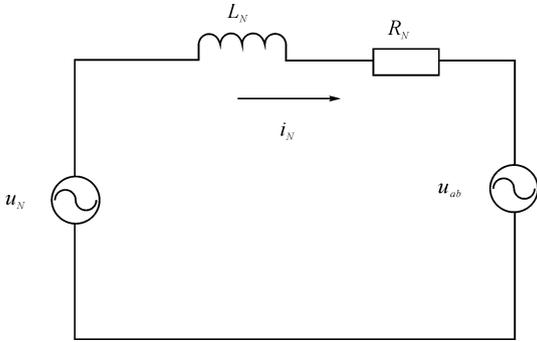


图2 四象限整流器瞬时等效图

Fig.2 The instantaneous equivalent of four-quadrant rectifier

由图2可得:

$$u_N = L_N \frac{di_N}{dt} + R_N i_N + u_{ab} \quad (1)$$

为了便于分析定义理想开关函数为:

$$S_A = \begin{cases} 1 & S_{1a} \text{ 和 } S_{2a} \text{ 导通} \\ 0 & S_{2a} \text{ 和 } S_{3a} \text{ 导通} \\ -1 & S_{3a} \text{ 和 } S_{4a} \text{ 导通} \end{cases}$$

$$S_B = \begin{cases} 1 & S_{1b} \text{ 和 } S_{2b} \text{ 导通} \\ 0 & S_{2b} \text{ 和 } S_{3b} \text{ 导通} \\ -1 & S_{3b} \text{ 和 } S_{4b} \text{ 导通} \end{cases} \quad (2)$$

根据图2将整流器输入端电压表示为:

$$u_{ab} = \frac{S_A - S_B}{2} u_d \quad (3)$$

控制 \$S_A, S_B\$ 的开通与关断以改变输入电压 \$u_{ab}\$ 的大小和相位, 控制输入电流的相位以控制系统功率因数。同时通过控制输入电流的大小来控制输入功率的大小, 以控制直流侧电压。

2 三电平整流器 SPWM 调制原理

三电平四象限整流器通常采用正负反相层叠法进行 PWM 调制^[9], 其调制原理见图3。\$a, b\$ 两相调制波分别与各自的正、负侧载波进行比较, 生成各自开关信号 \$S_A, S_B\$。

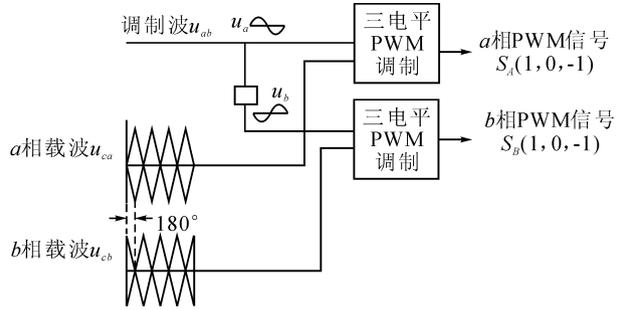


图3 三电平整流器调制原理

Fig.3 The chart of modulation principle of three-level rectifier

以 \$a\$ 相为例进行说明。通过比较 \$a\$ 相调制波 \$u_a\$ 与其正、负两侧载波 \$u_{ca}\$ (上) 和 \$u_{ca}\$ (下) 的大小关系, 可以得到 \$a\$ 相 PWM 开关信号 \$S_A(1, 0, -1)\$ (见表1)。\$b\$ 相与 \$a\$ 相的调制波相位互差 \$180^\circ\$, 为了减少高次谐波, \$b\$ 相载波需偏离 \$a\$ 相 \$180^\circ\$。

表1 \$a\$ 相 PWM 开关信号产生方法

Tab.1 The switching signal generate principle of a phase

大小关系	PWM 信号
\$u_a > u_{ca}(\text{上}) > u_{ca}(\text{下})\$	\$S_A = 1\$
\$u_{ca}(\text{上}) > u_a > u_{ca}(\text{下})\$	\$S_A = 0\$
\$u_{ca}(\text{上}) > u_{ca}(\text{下}) > u_a\$	\$S_A = -1\$

3 CRH2 型动车组整流器控制方法

为了实现较高的控制性能, 目前高速动车组的变流器通常会采用双闭环控制。其中包含电压外环和电流内环。本研究采用的预测电流控制法的原理框图见图4。该方法的控制思想是经一个开关周期, 强迫实际电流值与给定指令电流值相等。即在每一个 PWM 开关周期 \$(t_m, t_m + T_s)\$ 中, 电流须满足等式, 即:

$$i_N(t_m + T_s) = i_N^*(t_m) \quad (4)$$

由于整流器网侧的等效电阻值相对很小, 所以在控制过程中可将其忽略, 预测电流控制的数学表达式见式(5), 其中 \$k_p, k_i\$ 为 PI 调节参数, \$u_{dc}^*\$ 为直流侧给定参考电压, \$I_N^*\$ 为网侧电流给定值。

$$\begin{cases} I_N^* = k_p(u_{dc}^* - u_{dc}) + k_i \int (u_{dc}^* - u_{dc}) dt \\ u_a b(t) = u_N(t) - \frac{L_N}{T_s} [I_N^* \sin \omega t - i_N(t)] \end{cases} \quad (5)$$

预测电流控制法的特点是电流响应速度非常快,且控制精度较高,在 PWM 开关频率够高的情况下,能够实现电流无差跟踪控制。

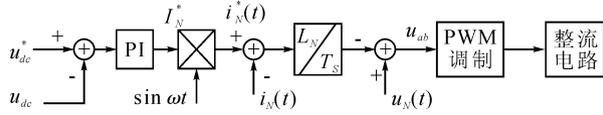


图4 预测电流控制法原理图

Fig. 4 The chart of schematic of forecast current control

4 仿真结果分析

CRH2 型动车组的仿真参数设置为,变压器的二次侧有效值 $u_N = 1\ 500\text{ V}$,变压器二次侧漏感 $L_N = 2\text{ mH}$,漏电阻 $R_N = 0.2\ \Omega$,直流侧两电容 $C_1 = C_2 = 2\ 200\ \mu\text{F}$ 。二次滤波参数为 $L = 0.84\text{ mH}$, $C = 3\text{ mF}$,载波频率 $f_c = 1\ 250\text{ Hz}$,直流侧等效负载电阻可根据输出功率计算得到。

4.1 动车组典型牵引工况的谐波分析

动车组工作在额定输出功率时,整流器网侧电压电流波形如图5所示。电流的频谱图见图6。从图6可以看出,动车组工作在牵引工况时整流器网侧电压电流相位基本一致,实现功率因数基本为1。图7为不同负载下主要谐波含有率图,由图7可知,动车组整流器网侧电流主要含有开关频率偶数倍(即50次)附近的谐波。

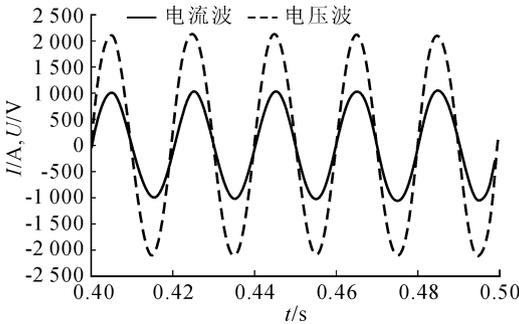


图5 动车组整流器网侧电压电流

Fig. 5 The voltage and current of the EMU's grid side

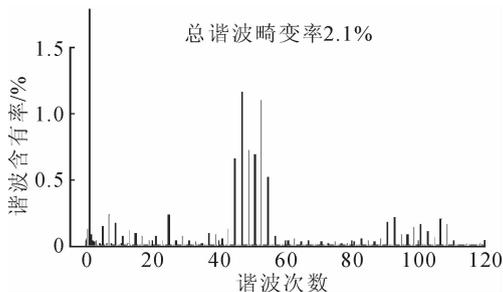


图6 动车组整流器网侧电流谐波分析

Fig. 6 The harmonic analysis of the EMU grid current

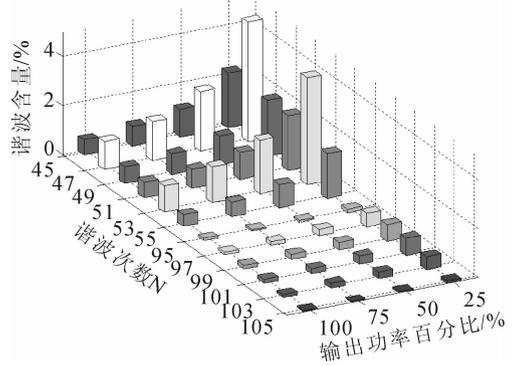


图7 不同负载下主要谐波含有率

Fig. 7 The main harmonic content under different loads

4.2 机车功率变化时的谐波情况分析

通过改变整流器直流侧等效电阻的值模拟动车组的不同牵引工况,本研究仿真得到机车在额定功率为 100%、75%、50%、25% 下的整流器网侧谐波含量,见表2。

表2 CRH2 动车组在不同负载下网侧电流基波峰值和 THD 值

Tab. 2 The fundamental peak and THD values of the CRH2 EMU's grid current under different loads

输出功率百分比/%	25	50	75	100
基波电流峰值/A	284	568	852	1 138
THD/%	8.3	4.2	2.8	2.1

对比表2和图7中的数据可以发现,随着动车组输出功率的升高,网侧基波电流峰值不断增大,但网侧电流总谐波畸变率(THD₁)随着基波电流的增大而减小,其中45、47、49、51、53、55次谐波含量明显减小,95、97、99、101、103次等高次谐波亦略微有所减小。

4.3 网压变化时的谐波分析

动车组的额定工作电压为 25 kV,正常工作电压范围规定为 20 ~ 29 kV。通过改变网侧电压有效值来模拟动车组在不同网压的工作情况,分别仿真得到动车组在网压有效值为 20 kV、22 kV、25 kV、27 kV、29 kV 时整流器网侧的电流基波峰值和电流谐波总畸变率,见表3。图8是在各种网压下网侧电流各次谐波的频谱分布图。

表3 CRH2 动车组在不同网压下网侧电流基波峰值和 THD 值

Tab. 3 The fundamental peak and THD values of the CRH2 EMU's grid current under different voltages

牵引网电压/kV	20	22	25	27	29
基波电流峰值/A	1425	1294	1138	1053	980
THD/%	1.56	1.71	2.10	2.40	2.61

由表3和图8可见,随着电源侧电压的升高,网侧电流基波峰值不断减小,但电流谐波总畸变率

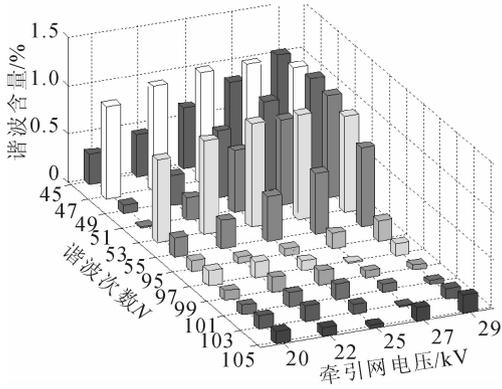


图8 不同网压时主要高次谐波含有率

Fig.8 The main harmonic content under different voltages

(THD_1)随基波电流的减小而增大,其中45、49、51、55次谐波含量有明显的增大趋势,但是100次左右的谐波含量无明显变化规律。

5 结论

本研究针对CRH2动车组中应用的单相三电平PWM整流器,采用预测电流控制法,搭建动车组仿真模型,对其网侧电流谐波情况进行了仿真分析,得出结论为:

1) 高速动车组主要包含一些开关频率偶数倍附近的高次谐波,主要谐波次数为45、47、49、51、53、55次等;

2) 随着动车组整流器输出功率的增大或工作电压的降低,网侧电流谐波畸变率呈现减小的趋势;

3) 动车组在不同输出功率或不同工作网压下网侧电流谐波分布规律基本保持不变,仍主要含两倍开关频率附近次数谐波,即50次谐波左右。

参考文献:

- [1] 刘玉洁,林飞,游小杰,等. CRH2型动车组谐波电流分析及仿真[J]. 电力电子,2009,(4):38-41.
Liu Yujie, Lin Fei, You Xiaojie, et al. Harmonic currents analysis of CRH2 electric multiple units[J]. Power Electronics, 2009, (4): 38-41.
- [2] Shen J, Taufiq J A, Mansell A D. Analytical solution to harmonic characteristics of traction PWM converters[J]. IEEE

Procelectr Power Application, 1997, 144(2): 158-168.

- [3] 何国军,王旭峰. CRH2动车组三电平PWM整流器仿真及谐波分析[J]. 电力学报, 2010, 25(6): 455-457.
He Guojun, Wang Xufeng. Three-level PWM rectifier simulation and harmonic analysis of CRH2 electric multiple units[J]. Journal of Electric Power, 2010, 25(6): 455-457.
- [4] Chang G W, Lin Hsinwei, Chen Shinkuan. Modeling characteristics of harmonic currents generated by high-speed railway traction drive converters[J]. IEEE Transacation Power Delivery, 2004, 19(2): 766-773.
- [5] 盛彩飞. 电力机车和动车组谐波电流的仿真研究[D]. 北京:北京交通大学, 2009.
Sheng Caifei. Research on harmonic current simulation of electrical locomotives and EMUs[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [6] 刘玉洁,盛彩飞,林飞,等. 高速动车组网侧电流谐波特性的研究[J]. 电气传动, 2010, 40(2): 33-37.
Liu Yujie, Sheng Caifei, Lin Fei, et al. Harmonic analysis of power grid side for high speed train[J]. Electric Drive, 2010, 40(2): 33-37.
- [7] 宋文胜,刘志敏,冯晓云. 四象限变流器控制策略研究与仿真[J]. 电力机车与城轨车辆, 2007, 30(2): 34-37.
Song Wensheng, Liu Zhimin, Feng Xiaoyun. Research and simulation on the control strategy of 4 quadrant converter[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2007, 30(2): 34-37.
- [8] 郭蕾,李群湛,刘炜,等. 高速机车功率变化时的谐波特性分析[C]//2008年全国博士生学术论坛电气工程论文集, 重庆, 2008: 663-667.
Guo Lei, Li Qunzhan, Liu Wei, et al. Analysis of harmonics characteristic for high-speed locomotive at varying power [C]//2008 Doctoral Forum of China, Chongqing, 2008: 663-667.
- [9] 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比较与仿真[J]. 电气技术, 2007, (5): 14-18.
Song Wensheng, Zhang Lei, Feng Xiaoyun. Comparison two voltage-source 4 quadrant converter and their simulation based on SPWM modulation[J]. Electrical Engineering, 2007, (5): 14-18.

(责任编辑 李虹燕)