

研
究
开
发HX_D 型电力机车牵引整流器的分析

吴晓燕

(昆明铁路机械学校 机车车辆教研室, 云南 昆明 650208)



作者简介: 吴晓燕(1976-), 女, 高级讲师, 从事电力机车和城轨车辆教学工作。

摘 要: 简述了 HX_D 型电力机车牵引整流器的拓扑结构, 得出 PWM 整流器的等效模型, 给出了仿真结构和参数, 分析了整流器在牵引工况和再生制动工况下的输入端电压电流关系, 验证了理论分析的正确性。

关键词: 电力机车; 牵引整流器; PWM 整流器; 功率因数校正; 等效模型

中图分类号: U264.3+7

文献标识码: A

文章编号: 1000-128X(2011)06-0035-03

Research on Traction Rectifier of HXD Electric Locomotive

WUXiao-yan

(Department of Locomotive Vehicle, The Railway Mechanical School of Kunming, Kunming, Yunnan 650208, China)

Abstract: In this paper, HXD electric locomotive traction rectifier topology was reviewed, PWM rectifier equivalent model and simulation structure & parameter of which were provided. In addition, the relationship of input voltage and current under traction and regenerative braking conditions was analyzed, which validated the theoretical analysis.

Key words: electric locomotive; traction rectifier; PWM rectifier; power factor correction; equivalent model

0 引言

随着电力电子技术的发展, 功率半导体开关器件性能不断提高, 促使了整流技术的快速发展。将 PWM 技术引入整流器的控制之中, 不仅可以得到较好的整流效果, 而且可以使电网侧电流正弦化, 使之运行在单位功率因数下。HX_D 型电力机车采用的是 PWM 整流技术, 使得能量可以双向流动, 其结构为单相全桥式结构。本文详细分析了电路的工作过程, 建立了等效电路, 通过仿真实现了能量的双向流动。

1 HX_D 型电力机车的整流电路结构

目前, 我国 HX_D 型电力机车采用的是单相 PWM 整流 (VSR) 方式, 其主电路形式如图 1, 该结构可实现四象限运行。四象限变流器由 2 个相模块 (半桥) 组成。

四象限变流器来自牵引变压器的单相交流输入电压转换为直流电压供给中间直流环节。图 1 中, L 为交流侧滤波电感, C 为直流侧储能电容, R 为直流侧负载。

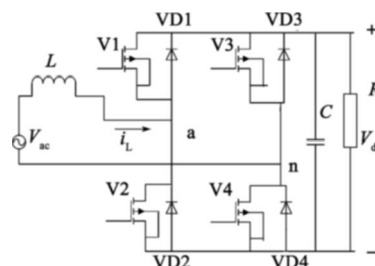


图 1 单相电压型 PWM 整流器 (VSR) 结构

对于 HX_D1 和 HX_D2 型电力机车, 整流器的输入电压范围在 950 V 左右, 输出直流侧为 1 800 V 左右。HX_D3 型电力机车输入电压有所升高, 中间直流侧额定电压为 2 800 V。

2 PWM 整流器 VSR 原理与模型

2.1 PWM 整流器 VSR 原理

整流电路的输入端为正弦波电网电压。每个桥臂都由一个全控器件和一个反并联的二极管组成, 实现了能量不仅可以由交流侧流入直流侧, 而且可从直流侧逆变为交流反馈给电网。

整流模式的各状态如图 2 所示。

收稿日期: 2011-08-08

状态1：牵引变压器二次侧电压为正半周期，此时，VD1（或V1）和V3导通，用以给电感充电。

状态2：牵引变压器二次侧电压为正半周期，此时，VD1（或V1）和VD4（或V4）导通，输入端电压和电感同时向负载充电。

状态3：牵引变压器二次侧电压为负半周期，此时，VD3（或V3）和V1开始导通，用以给电感充电。

状态4：牵引变压器二次侧电压为负半周期，此时，VD3（或V3）和VD2（或V2）导通，输入端电压和电感同时给负载充电。

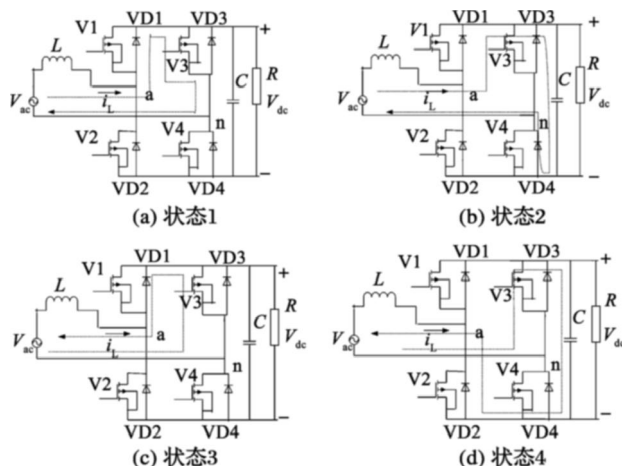


图2 整流工作状态

有源逆变模式的各状态如图3所示。

状态1：牵引变压器二次侧电压为正半周期，此时V1和V4导通，给电感充电。

状态2：牵引变压器二次侧电压为正半周期，此时V1和V3（或VD3）导通，电感放电。

状态3：牵引变压器二次侧电压为负半周期，此时V3和V2参与导通，给电感充电。

状态4：牵引变压器二次侧电压为负半周期，此时V3和V1（或VD1）导通，电感开始放电。

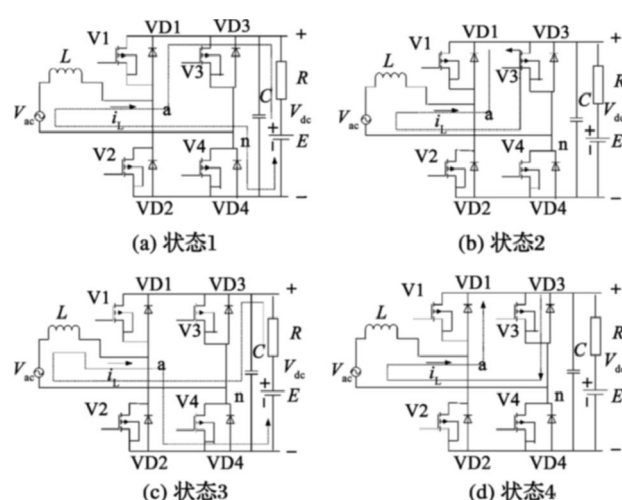


图3 有源逆变状态工作状态

2.2 电路的数学模型

通过整流和逆变原理可知，电路在整流模式时工

作在升压状态，有源逆变是工作在降压模式。忽略开关状态，可以得到图4所示的等效电路模型。模型中，在负载电流一定的情况下， i_L 为正弦且跟随输入电压的相位，所以 V_{an} 为控制电路的实际输入电压。

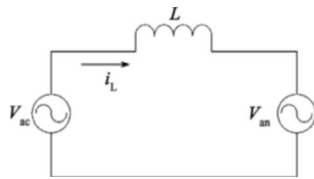


图4 等效电路模型

假设电路工作在整流模式，根据周期平均的思想，可以得到该模式下的受控源等效电路模型，用以分析电路的小信号动态响应，如图5所示。

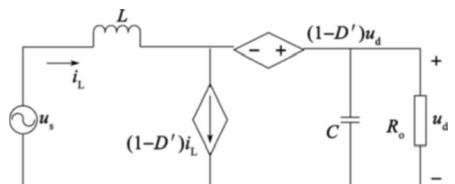


图5 交流小信号等效电路模型

3 电路控制策略和仿真

3.1 控制策略

变流器传统的控制方法，根据控制环路中是否直接控制电感电流一般可分为间接电流控制和直接电流控制。

间接电流控制有着自身明显的缺陷，如动态响应速度慢，因为不具有电流内环，因而其自身没有有限流功能，需要外加过流保护电路。另外，网侧存在直流偏移量，在瞬态时，输入滤波器会出现振荡和负载电流发生畸变。直接电路控制包括峰值电流控制、平均电流控制、预测电流控制和滞环电流控制等。其中，平均电流控制的开关频率固定，谐波含量（THD）低，电感电流峰值与平均值间误差小；跟踪误差小、瞬态特性较好；对噪声感应不敏感；主要适合于大功率场合。

本文采用的控制方式为平均电流控制方式。双控的系统控制结构如图6所示。

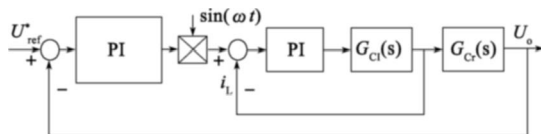


图6 电路控制结构

实际上，对于电力机车而言，为了成倍地提高接触网上的等效斩波频率，改善接触网的电源品质和性能，HXD2机车的4组四象限整流器在斩波控制上错开了相位，如图7所示。牵引变压器一次侧合成电流如图8所示。

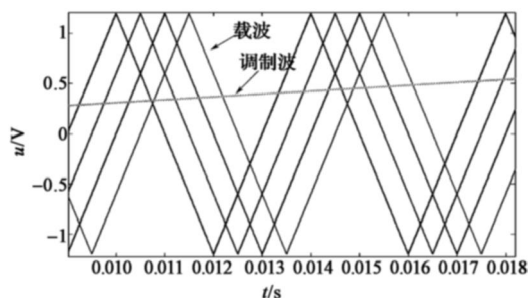


图7 错开相位的载波

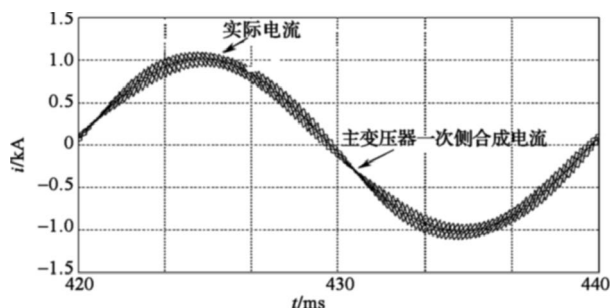


图8 牵引变压器一次侧合成电流

3.2 仿真与实测波形

根据以上原理分析,得到图9的仿真模型。图9中输入电压为1 200 V,输入端电感为2 mH,主变流环节为反并联二极管形式的IGBT单相桥。负载为消除二次谐波(100 Hz)的干扰,串接低通滤波器,谐振电感参数值为1.5 mH,谐振电容为1.8 mF,负载为15 Ω 。控制电路的给定电压为1 800 V,电压环的比例系数 K_p 为0.33,积分系数 k_i 为18;电流内环的比例系数 k_p 为14,积分系数 k_i 为47,以保证较快的跟踪速度。

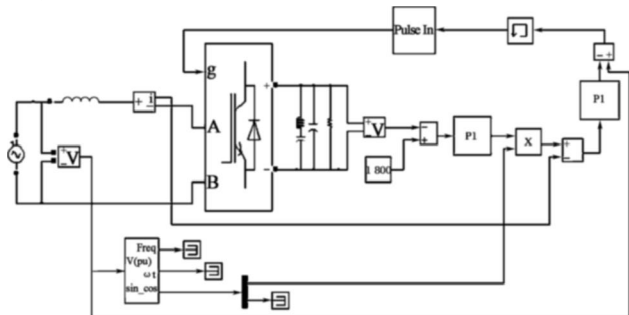


图9 主电路结构

电流环的给定为电压环的输出乘以输入电压的相位系数,以保证输出电流跟踪输入电压。脉冲形成电路如图10所示,三角载波频率为1 800 Hz,幅值为2 000。

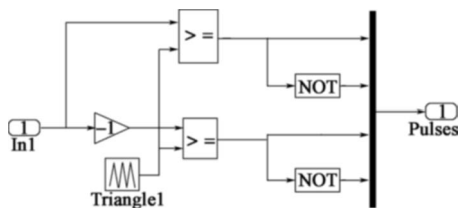


图10 脉冲形成电路

图11和图12为大负载牵引工况下的对比波形。图11中输出端电压 V_{in} 和图12中的电压有所不同,原因在于仿真时采用的输入电源为给定的交流电流源,而实测波形为接触网实测电压,所以会有抖动。为方便与实测波形对比,本文将电流的仿真波形扩大了5倍。从图可看出,电压 V_{in} 为1 200 V左右,电流 I_{in} 为160 A左右,二者比较吻合。

再生制动状态为机车处在刹车制动工况时的运行状态。仿真时,在负载侧接入直流电压源并串接电阻来模拟该状态。

图13和图14为再生制动状态下仿真波形与实测波形的对比图。从图中可以看出,除电压由于仿真条件所造成的不同外,其他基本吻合。为方便与实测波形

对比,图中将电流的仿真波形扩大了5倍。从图中可看出,电压 V_{in} 保持在1 200 V左右,电流 I_{in} 为230 A左右,二者波形接近。

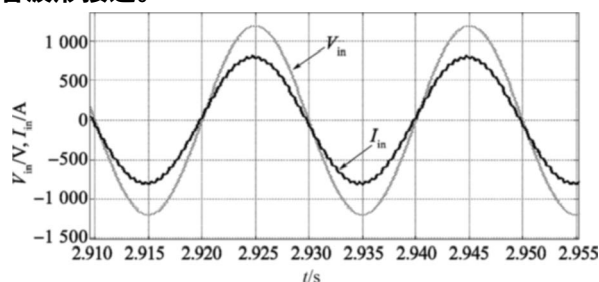


图11 牵引工况仿真波形

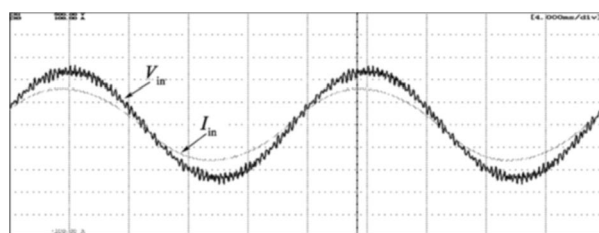


图12 HXD3 牵引工况实测波形

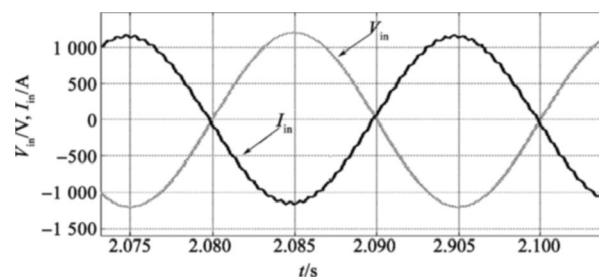


图13 再生制动工况仿真波形

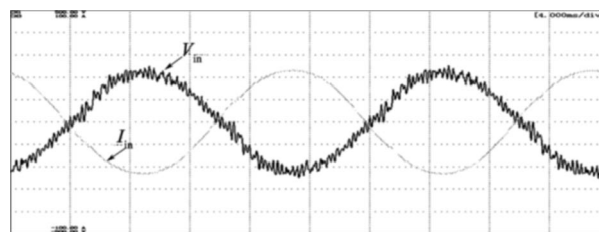


图14 HXD3 再生制动工况实测波形

4 结语

本文详细分析了PWM整流器在整流和逆变时的原理,给出了电路的控制策略,并结合HXD型电力机车实际的工作状态,做了电路仿真并提供了仿真参数,结合HXD3系列电力机车做了对比。通过仿真和对比分析,验证了理论分析的正确性。

参考文献:

- [1] 林渭勳. 现代电力电子电路[M]. 杭州:浙江大学出版社, 2002.
- [2] 郑颖楠,王炎,等. 可逆变流技术回顾与发展现状[J]. 燕山大学学报, 1999, 23(2): 111.
- [3] 郑颖楠,傅诚. 电压型可逆变流器的控制策略与发展[J]. 电气传动, 2001(6): 4.
- [4] 魏克新,王莉. 可逆变流器控制策略的研究[J]. 低压电器, 2005(1): 51-53.