

# 标准动车组四象限整流器 及控制系统实时仿真

吴生举<sup>1</sup>, 应 婷<sup>2</sup>, 荆延杰<sup>3</sup>

(1. 中国铁路国际有限公司, 北京 100054; 2. 中车株洲所电气技术与材料工程研究院, 湖南 株洲 412001; 3. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

**摘 要:** 通过分析标准动车组四象限整流器电路拓扑结构和四象限控制器, 建立了整车四象限整流器及控制系统数学模型。对由其形成的闭环系统进行了实时仿真试验研究, 结果验证了所建四象限整流器及控制系统的正确性, 可用于标准动车组交流传动系统的研究和测试。

**关键词:** 标准动车组; 四象限整流器; 控制系统; 实时仿真

**中图分类号:** U266.2; U264.3<sup>+</sup>71 **文献标识码:** A

**doi:** 10.13890/j.issn.1000-128x.2016.04.007

## Real-time Simulation on 4-quadrant Converter and Control System of China Standard EMUs

WU Shengju<sup>1</sup>, YING Ting<sup>2</sup>, JING Yanjie<sup>3</sup>

(1. China Railway International Group, Beijing 100054, China; 2. CRRC ZIC Research Institute of Electrical Technology & Material Engineering, Zhuzhou, Hunan 412001 China; 3. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

**Abstract:** Circuit topologies of 4-quadrant converter and controller of China standard EMUs were analyzed, and mathematic model of the whole EMUs 4-quadrant converter and control system was built. The closed-loop system was studied with real-time simulations. The results indicated that the built model was correct, and it could be used for the researches and tests of China standard EMUs AC-driving systems.

**Keywords:** China standard EMUs; 4-quadrant converter; control system; real-time simulation

### 0 引言

中国标准动车组<sup>[1]</sup>是由中国铁路总公司提出的动车标准化战略的核心内容, 对我国高速铁路客运发展有着重要的意义。从2014年起我国开始全面研发拥有自主知识产权的“中国标准化动车组”以及高铁运营的完整标准体系, 以尽可能地统一、互联互通和部件互换为总体目标, 全面提升中国高铁的发展质量<sup>[2]</sup>。

牵引传动系统是整个动车组的核心, 其中, 四象

限整流器的主要作用是保证中间直流环节直流电压保持恒定, 交流电网侧功率因数接近1, 同时要求消除谐波, 是交流传动动车组上的重要部件<sup>[3]</sup>。采用2个四象限整流器并联的方式, 控制载波信号错开一定的角度, 使整流器输入电流的谐波互相错开<sup>[4]</sup>, 能有效地减小变压器一次侧电流的等效干扰电流, 是标准动车组中使用的整流电路。

在交流传动系统的研发过程中, 为了研究可行性、缩短周期、降低风险, 通常先进行仿真验证。在传统的开发流程中, 一般先采用纯数字离线仿真的方法。纯数字离线仿真系统由于受到处理器的运算能力等因

素的影响,无法进行大量的运算,且离线仿真模型与实际控制器存在数据范围及精度的差异,因此这种仿真结果具有一定的局限性。

实时仿真则弥补了纯数字仿真的缺陷<sup>[5]</sup>,通过计算机仿真和实时仿真有机结合起来,能够有效地提高仿真结果的真实性<sup>[6-7]</sup>。对四象限整流器及控制系统进行实时仿真,设计者在设计阶段就可以观察系统的动静特性<sup>[8]</sup>,不仅只需修改接口便可以实现半实物仿真,同时为基于模型的设计奠定了基础<sup>[9]</sup>,缩短了研发周期,提高了效率,在开发和研究中起到了重要

的作用<sup>[10]</sup>。

为了实现标准动车组整车四象限整流器及控制系统实时仿真,本文详细描述了标准动车组整车级四象限整流器及控制器仿真模型结构,在此基础上建立了整车的四象限整流器及其控制模型,并使用 dSPACE 软硬件平台进行了仿真验证。

## 1 仿真系统设计

### 1.1 标准动车组整车四象限整流器介绍

标准动车组动力配置如图 1 所示。

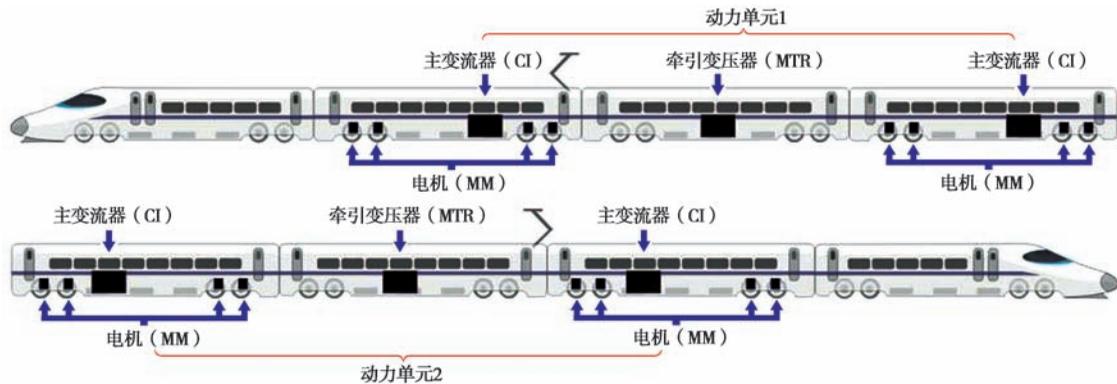


图 1 标准动车组动力配置图

整列动车为 4 动 4 拖配置,含 2 个动力单元。其中,每 2 节动车为 1 个动力单元,共用 1 台牵引变压器。每节动车含 1 台主变流器,其中包括 1 台双重四象限整流器。通过四象限控制程序,将 4 个动车主变流器的双重四象限相互错相,整车的整流  $U_{s1}$  单元共组成 8 重四象限。

由于双重四象限整流器为整个标准动车组四象限整流器中最小单元,将其通过变压器模型简单连接起来,即可构成整车的四象限整流器模型。因此,对整车四象限整流器开展仿真,首先需要建立双重四象限整流器仿真模型。

### 1.2 双重四象限整流器仿真模型

四象限整流器系统主要由变压器二次侧、整流器和中间电路组成。标准动车组单个变流器系统由 2 个四象限整流器并联而成。

为了建立系统级仿真数学模型,把整流元件看成理想开关,分别用 1 个电感和 1 个电阻元件代替变压器的二次侧漏感和电阻。简化后的主电路拓扑结构如图 1 所示。

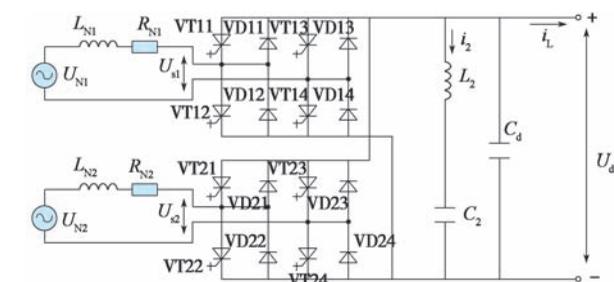


图 2 双重四象限整流器系统主电路拓扑结构

在 PWM 脉冲控制下,整流器中各开关器件具有

的不同导通和关断状态,使得本系统主电路拓扑结构也将发生相应的变化。因此,在建立双重四象限整流器系统的数学模型时,首先应确定开关器件的通断状态与主电路拓扑结构的对应关系,然后建立主电路各拓扑结构下的数学模型,从而确定 PWM 控制信号相应的数学模型,即状态空间方程描述。

根据  $U_d$  分别接入两重整流器 (如图 2 中  $U_{s1}$  和  $U_{s2}$ , 整流器输入电压),  $U_{s1}$  和  $U_{s2}$  可以分别取  $U_d, 0, -U_d$  这 3 种电压,因此得到  $3^2=9$  种情况,在此需要分别列出这 9 种情况下的不同状态方程。

根据 9 种不同的电路拓扑,得出系统状态方程描述为

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{N1} \\ \dot{i}_{N2} \\ \dot{U}_d \\ \dot{i}_2 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_{N1}/L_{N1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{N2}/L_{N2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/C_d & 0 \\ 0 & 0 & -1/L_2 & 0 & -1/L_2 \\ 0 & 0 & 0 & -1/C_2 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{N1} \\ i_{N2} \\ U_d \\ i_2 \\ U_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & L_N(1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_N(2) & 0 & 0 \\ C_d(1) & C_d(2) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{N1} \\ i_{N2} \\ U_d \\ i_2 \\ U_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L_{N1} & 0 & 0 \\ 0 & 1/L_{N1} & 0 \\ 0 & 0 & 1/C_d \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{N1} \\ U_{N2} \\ i_L \end{bmatrix} \quad (1)$$