

# 电子系统调查报告

## 以 CRH5 型高速动车组牵引变流器主电路为例

自 91 刘祖炎 2019010485

2021 年 3 月 8 日

### 1 引言

近年来，随着科技的进步与人民出行需求的增大，我国高速铁路网实现了跨越式的发展。在“引进、消化、吸收、创新”思想的指导下，我国研发出一系列具有完全自主知识产权的高速动车组列车，动车组技术超越日、法、德等强国，在全球处于领先地位。

高速动车组由轨道上方的电力系统为列车供电并提供动力，因此，高速动车组的电力系统对列车稳定工作起到至关重要的作用。其中，高速动车组的牵引变流器将来自接触网和受电弓的交流电压变换为可调频率和幅值的交流信号，供给牵引电机。在动车组减速时，牵引变流器回收能量，将其通过受电弓传递回接触网。简而言之，牵引变流器可视为电力电网与动车组系统的桥梁，是实现能量交换的核心部件，直接关系到动车组牵引系统的运行状态。<sup>[1]</sup>

本文通过查阅现有资料，简要概述动车组牵引变流器的技术路线与发展现状，此后着重对我国自主设计的 CRH5A 型动车组牵引变流器主电路进行说明，在介绍其基本工作原理的基础上，具体分析各个模块的具体功能与工作流程，重点关注模拟电路在该电力系统中起到的整流、逆变、斩波等作用。

### 2 基本情况

动车组的牵引传动系统一般由数个基本动力单元组成，单个动力单元可分为牵引变压器、牵引变流器、牵引电机等部分。我国动车组接触网采用交流方式供电，牵引变流器主电路对来自接触网的交流电信号进行交—直—交处理，输入牵引电机。该系统的基本结构包括四象限脉冲整流器、中间直流环节、PWM 牵引逆变器、异步电动机四部分，如图 1 所示。<sup>[1]</sup>

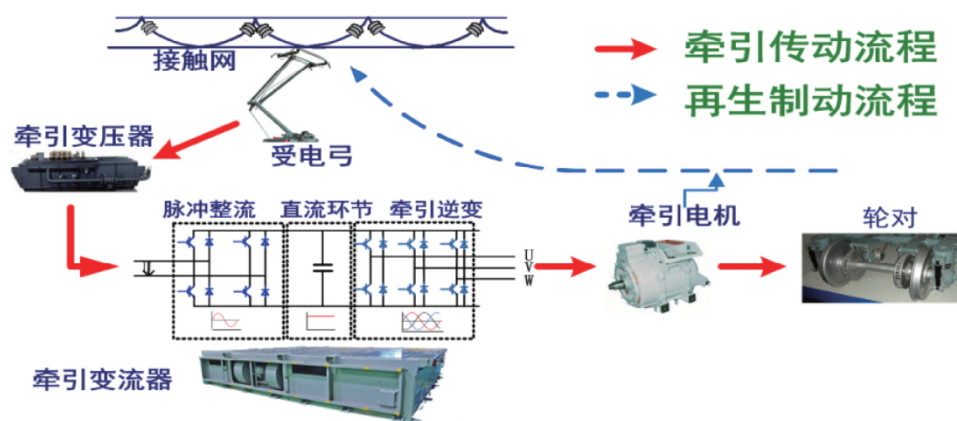


图 1: 牵引传动系统原理图<sup>[1]</sup>

由于实际情况与牵引变流器各环节配置的差异，不同动车组列车采用不同结构的主电路形式。例如，变流器联接方式可采用三点式或两点式，交—直—交变流处理可有不同的实现方式等，如图 2、3 分别展示了我国 CRH380A、CRH380B 型动车组牵引变流器主电路图。本文着重选取 CRH5 型动车组列车进行具体分析。[1]

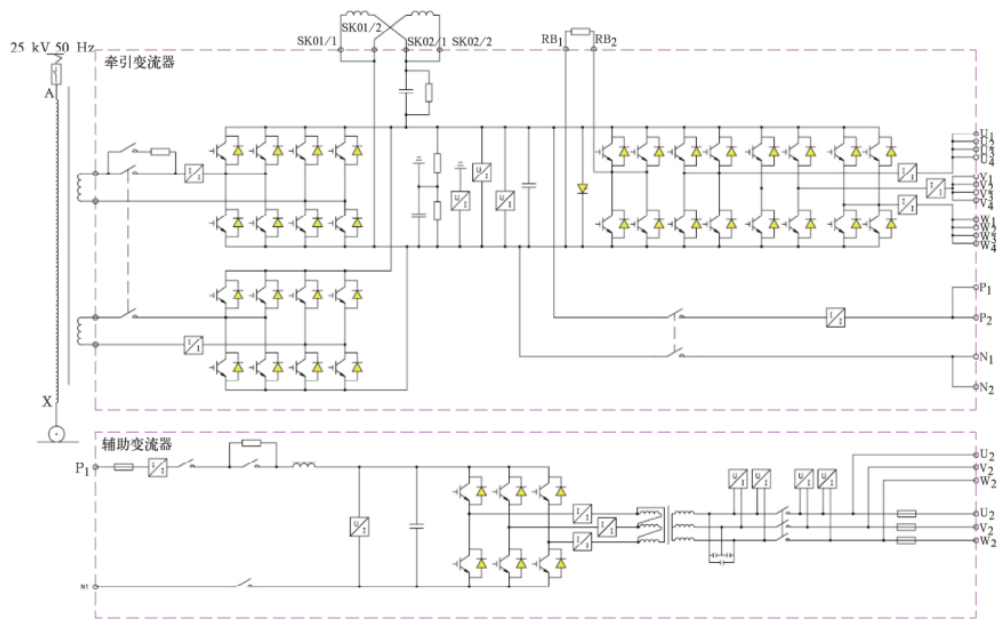


图 2: CRH380A 牵引变流器电路图 [1]

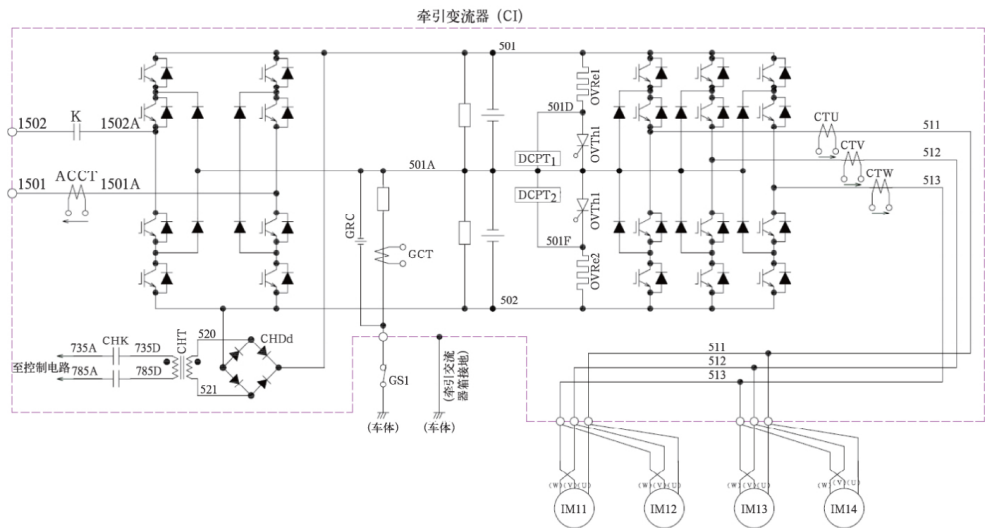


图 3: CRH380B 牵引变流器电路图 [1]

CRH5 型动车组列车设计时速 250km，主要运营于京哈高铁等北方铁路干线。其牵引电传动系统是原铁道部“动车组关键技术自主创新深化研究项目”重大课题的组成部分，因此，分析其牵引变流系统对了解我国高速动车组核心技术的突破历程，并实现进一步发展有重要作用。[2]

### 3 电路结构与工作原理

一组 8 节编组的 CRH5 动车组共设有 5 台牵引变流器，分别安排在 5 节动车底架中部，其电路原理图如图 4 所示。<sup>[3]</sup>

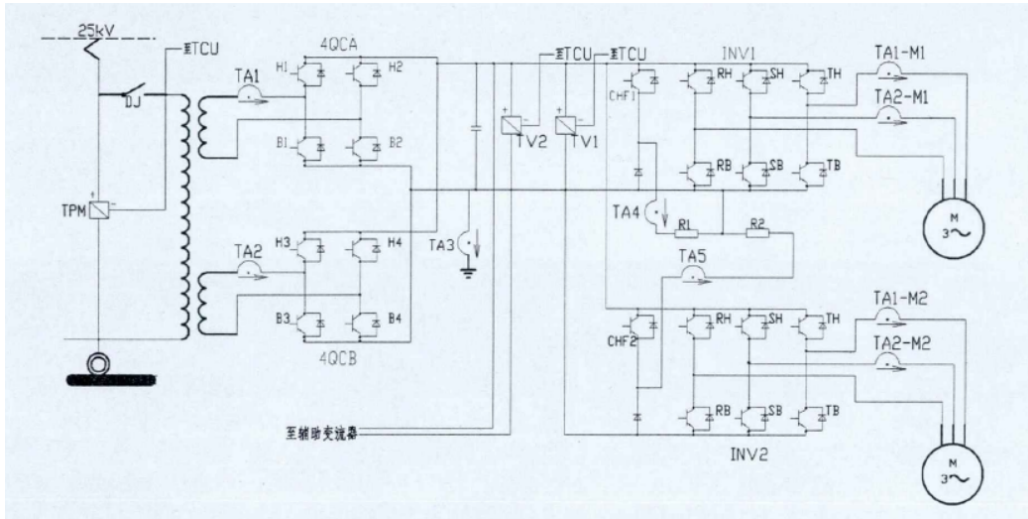


图 4: CRH5 动车组牵引变流器主电路原理图<sup>[3]</sup>

CRH5 采用两电平主电路结构，通过计算可知，脉冲整流器输出的直流电流将以 2 倍网频脉动，故要得到恒定的输出电压，则应当在脉冲整流器与负载之间接入一个二次谐波  $LC$  滤波器支路，该电路通过合理设计支撑电容的值以取消该装置。<sup>[4]</sup>

在列车处于牵引工况时，从接触网得到的交流电首先通过变压器降压为 1770V 单向交流电，输出至牵引变流器，经牵引变流器整流后转换为 3200 ~ 3600V 的直流电，逆变器环节再将直流电逆变成电压可变（电压 0 ~ 2080V，频率 0 ~ 180Hz）的三相交流电，实现动车组的牵引。<sup>[3]</sup>

在列车处于制动工况下时，牵引电机处于发电状态，将发出的三相交流电传至牵引逆变器，经直流部分稳压后，再由脉冲整流器处理为单相交流电，实现能量再生。

### 4 模块分析

CRH5 牵引变流器采用模块化设计，共有两个四象限功率模块、两个逆变斩波模块，可抽象为如图 5 所示的原理框图。下面分模块分析其工作原理。

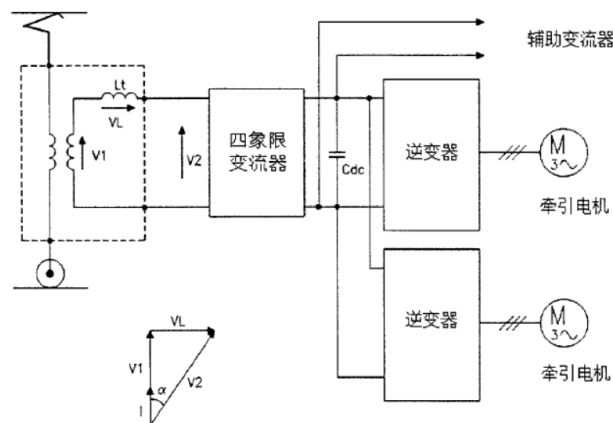


图 5: CRH5 动车组牵引变流器主电路原理图<sup>[3]</sup>

## 4.1 脉冲整流器 [5]

对整流器的电路结构进行简化, 可得如图 6 所示的电路表示整流器的拓扑结构。由于每相桥臂上下开关信号相反, 故可将  $T1 \sim T4$  的导通状态定义理想开关函数, 表示为如图 7 所示的开关等效图。

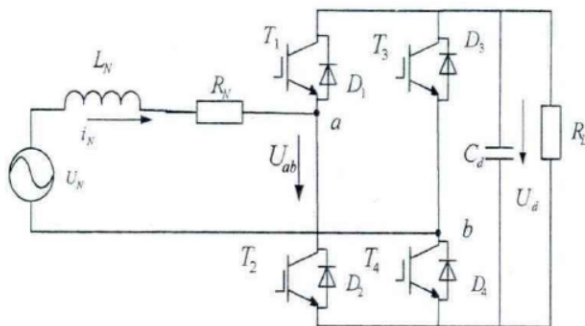


图 6: 脉冲整流器拓扑结构

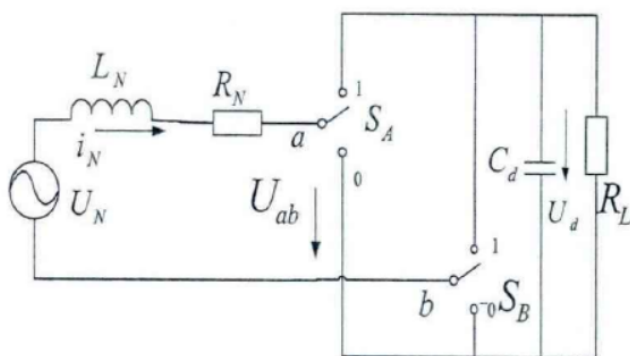


图 7: 脉冲整流器开关等效图

其中, 有效的开关信号组合分别为:  $S_A S_B = 00\ 01\ 10\ 11$  四种。根据开关状态的不同, 可将整流器的工作状态分为四种模式, 下面假设接触网的波形处于正半周的情况下, 分别进行分析。

### 4.1.1 模式一

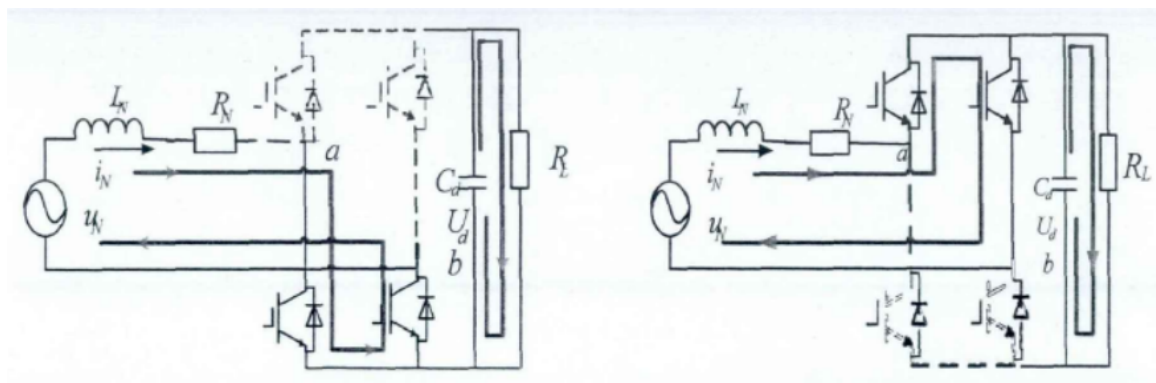


图 8:  $S_A S_B = 00$  或  $11$

$S_A S_B = 00$  或  $11$  表示上桥臂或下桥臂同时导通，此时变压器侧被短路， $U_{ab} = 0$ ，电容向负载  $R_L$  供电， $u_N$  向电感  $L_N$  充放电。 $u_N > 0$ ， $i_N > 0$  时， $D_1$  与  $T_3$  导通或  $D_4$  与  $T_2$  导通，电感  $L_N$  充电，储存能量，电流  $i_N$  增大，此时表示牵引工况； $u_N < 0$ ， $i_N < 0$  时， $D_3$  与  $T_1$  导通或  $D_2$  与  $T_4$  导通，电感向绕组侧充电，电流  $i_N$  减小，此时表示制动工况。

#### 4.1.2 模式二

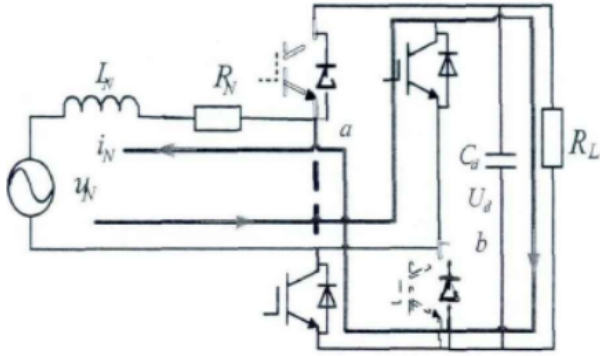


图 9:  $S_A S_B = 01, u_N > 0, i_N > 0$

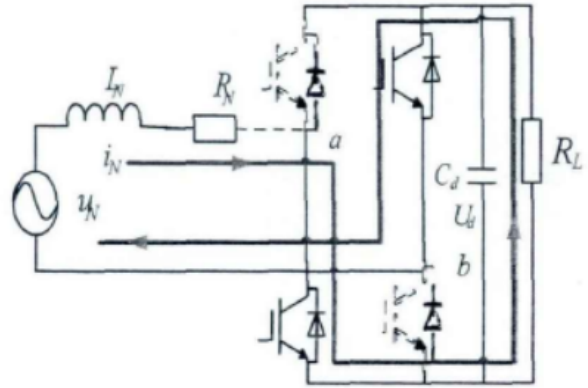


图 10:  $S_A S_B = 01, u_N > 0, i_N < 0$

$S_A S_B = 01$  时，如图 9、10 所示，当  $u_N > 0$ ， $i_N > 0$  时， $T_2$ 、 $T_3$  导通，绕组与电容向  $L_N$  充电，电感储存能量；当  $u_N > 0$ ， $i_N < 0$  时， $D_2$ 、 $D_3$  导通， $L_N$  向网侧绕组与电容充电，电感释放能量。

#### 4.1.3 模式三

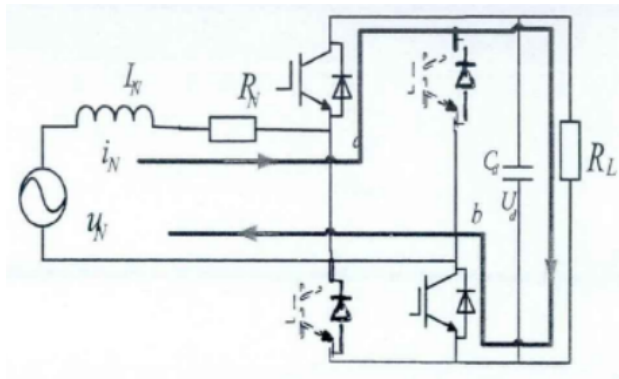


图 11:  $S_A S_B = 10, u_N > 0, i_N > 0$

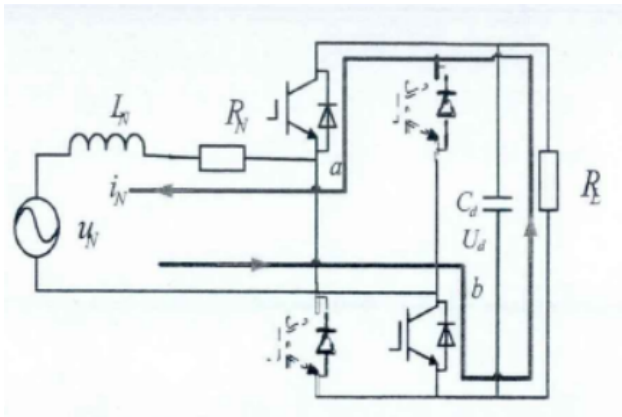


图 12:  $S_A S_B = 10, u_N > 0, i_N < 0$

$S_A S_B = 10$  时，若  $u_N > 0$ ， $i_N > 0$ ， $D_1 D_4$  导通，电感的能量向直流电容  $C_d$  以及此后的负载释放；若  $u_N > 0$ ， $i_N < 0$ ， $T_1 T_4$  导通， $L_N$  充电，储存能量。

#### 4.1.4 整理与总结

分别就  $u_N$ 、 $i_N$ 、导通器件的不同状态进行分析，可得出如表 1 所示的整流器工作状态图。

表 1: 脉冲整流器工作状态

$u_N$	$i_N$	$u_{ab}$	导通器件	$i_N$	工作状态	能量传递
$>0$	$>0$	0	$D_1T_3/T_2D_4$	增大	电源短接	$u_N \rightarrow L_N$
$>0$	$>0$	$U_d$	$D_1T_4$	减小	整流	$u_N + L_N \rightarrow C_d$
$>0$	$>0$	$-U_d$	$T_3T_2$	增大	反馈	$u_N + C_d \rightarrow L_N$
$>0$	$<0$	0	$T_1D_3/D_2T_4$	减小	电源短接	$L_N \rightarrow u_N$
$>0$	$<0$	$U_d$	$T_1T_4$	增大	反馈	$C_d \rightarrow L_N - u_N$
$>0$	$<0$	$-U_d$	$D_3D_2$	减小	整流	$L_N \rightarrow C_d + U_N$
$<0$	$>0$	0	$D_1T_3/T_2D_4$	减小	电源短接	$L_N \rightarrow u_N$
$<0$	$>0$	$U_d$	$D_1T_4$	减小	整流	$u_N \rightarrow L_N + C_d$
$<0$	$>0$	$-U_d$	$T_3T_2$	增大	反馈	$C_d \rightarrow L_N - u_N$
$<0$	$<0$	0	$T_1D_3/D_2T_4$	增大	电源短接	$u_N \rightarrow L_N$
$<0$	$<0$	$U_d$	$T_1T_4$	增大	反馈	$C_d + u_N \rightarrow L_N$
$<0$	$<0$	$-U_d$	$D_3D_2$	减小	整流	$L_N + u_N \rightarrow C_d$

#### 4.1.5 四象限变流器 PWM 波产生原理 [3]

脉冲整流器通过 PWM 波对 IGBT 的导通与关断进行控制。CRH5 动车组的脉冲整流器采用由正弦波（调制波）分割具有固定频率和振幅（ $f = 1350Hz$ ）的三角波（载波）的方式形成 PWM 波。通过改变调制波的振幅和相位即可调节 PWM 波。

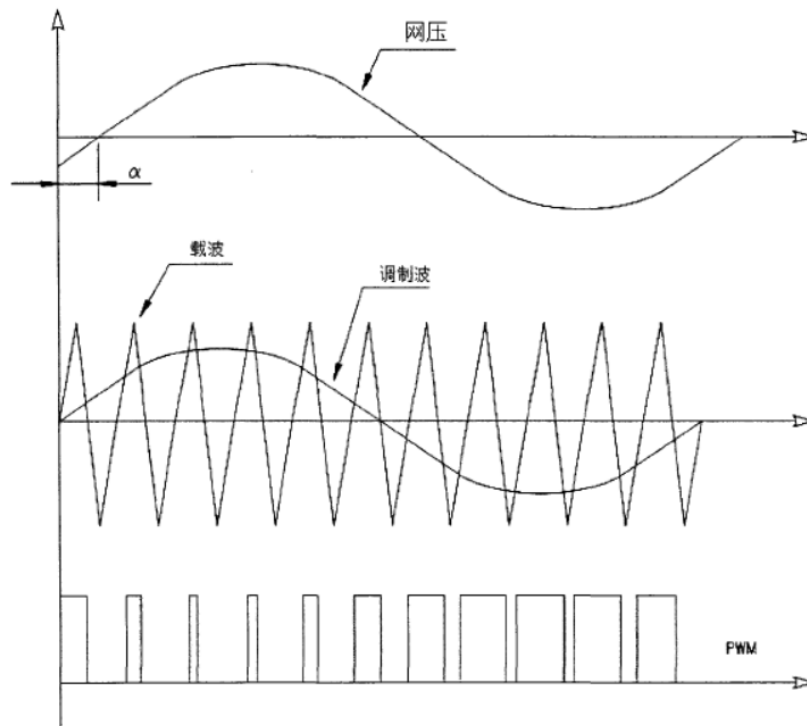


图 13: PWM 波调制原理



CRH5 型动车组利用载波移相技术将两重化脉冲整流器进行进一步调制，即将各单元整流器的三角波相位依次错开相位角  $\phi = \frac{\pi}{N}$ 。再将不同单元的波叠加，即可使脉冲整流器的输入电流与高次谐波相错开。相比于三电平脉冲整流器，CRH5 所采用的脉冲整流器具有功率器件少、装置容量大等特点。

## 4.2 牵引逆变器 [5]

牵引逆变器由 6 个与整流器相似的 IGBT 单元组成。将电机视为星型连接的对称感性负载，则 CRH5 的逆变器电路结构如图 14 所示。

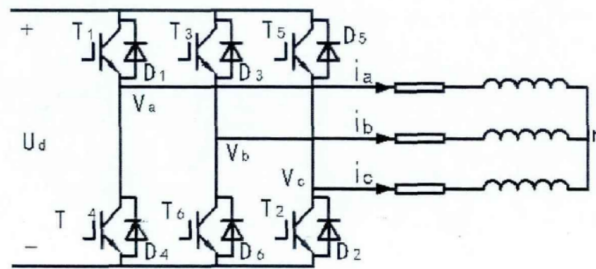


图 14: 牵引逆变器拓扑结构

同理，可定义理想的开关函数，将上述电路等效为如图 15 所示的开关电路。

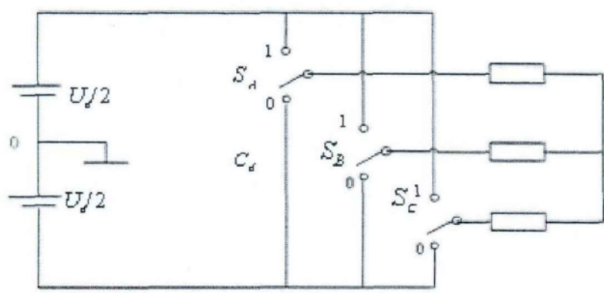


图 15: 牵引逆变器开关等效图

当列车处于牵引工况时，如图 5 所示，两个三桥逆变器分别向对应的异步电机提供频率和幅值可调的三相电压，完成  $DC/AC$  变换；当列车处于回馈制动工况时，牵引逆变器处于整流状态，利用电机的漏感构成电压型 PWM 整流器，当电机运行速度较高时，利用反并二极管的续流作用实现再生运行，当电机运行速度较低时，利用升压斩波实现再生运行。

### 4.2.1 方波运行 [3]

方波运行状态下，同相位 IGBT 之间相移  $180^\circ$ ，相邻桥臂之间相移为  $120^\circ$ ，其控制逻辑与输出电压分别如图 16、17 所示。

根据三相交流电的性质，利用相电压  $U_R$ 、 $U_S$ 、 $U_T$  即可求得线电压的值。

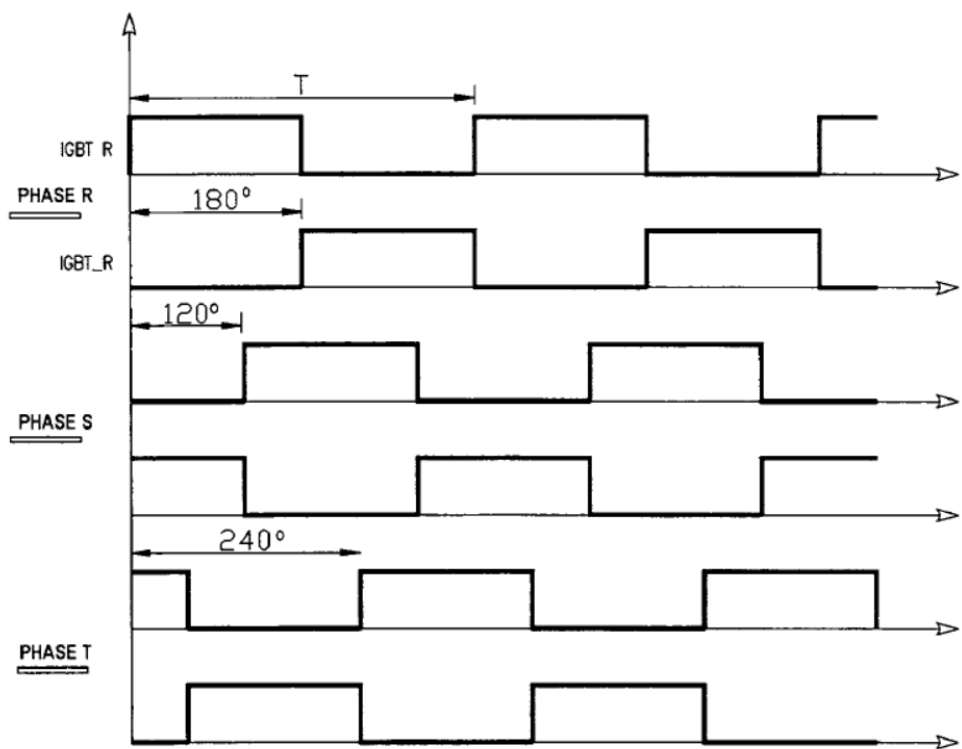


图 16: IGBT 控制逻辑

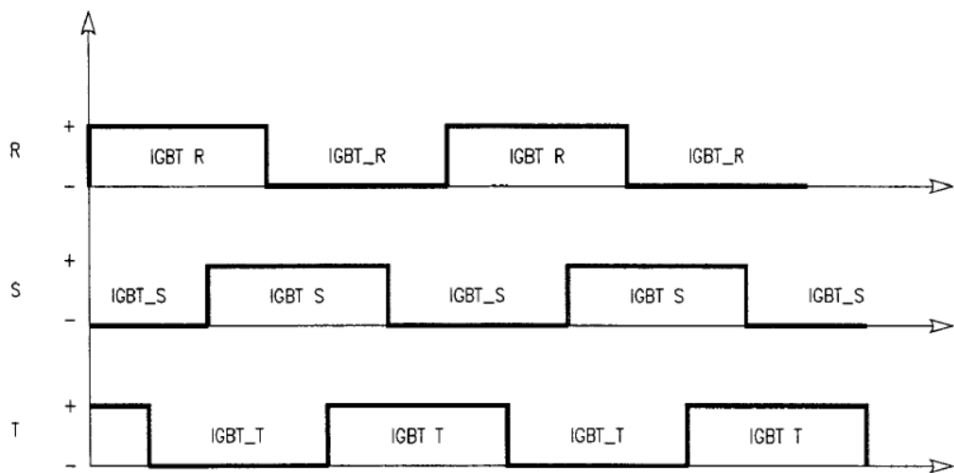


图 17: 逆变器输出端相电压

#### 4.2.2 PWM 运行 <sup>[3]</sup>

在 PWM 运行状态下，可通过适当打开 3 个 IGBT 实现电机的“短路”，如图 18 所示。通过与先前所述状态交替运行，可调制施加于牵引电机的电压，以控制产生的力矩和电流。



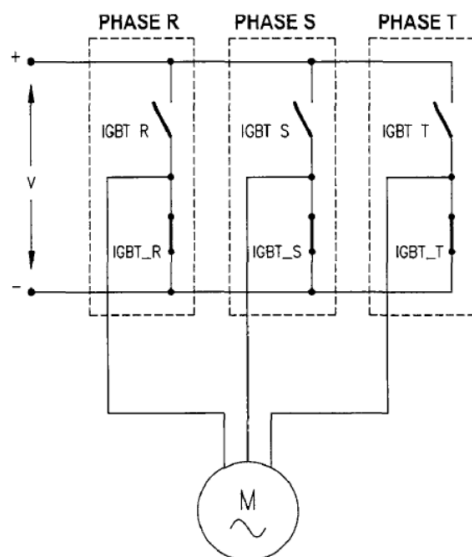


图 18: PWM 状态电路示意图

### 4.3 制动斩波器 [3]

每个牵引变流器有两个制动占波器并联在逆变器的输入端，分别由两个串联的 IGBT 组成，并将其中一个 IGBT 的栅极和发射极短路，每个斩波器的工作频率是  $250Hz$ ，相互交错，则两个制动斩波器的等效频率是  $500Hz$ ，通过改变功率器件的流量时间来调整消耗在相应制动电阻器上的能量。

当 CRH5 动车组的列车运行速度低于  $10km/h$  时，可运用制动斩波器将制动能量以电阻发热的形式消耗掉。此外，在分相区（在电气化铁路中，将不同变电所供出的不同相位的电，通过两个分相开关进行隔离，以防止异相电短路并造成熔断接触网），列车再生制动暂时无效时，可运用能耗制动，将能量消耗在制动电阻器上。

## 5 结语

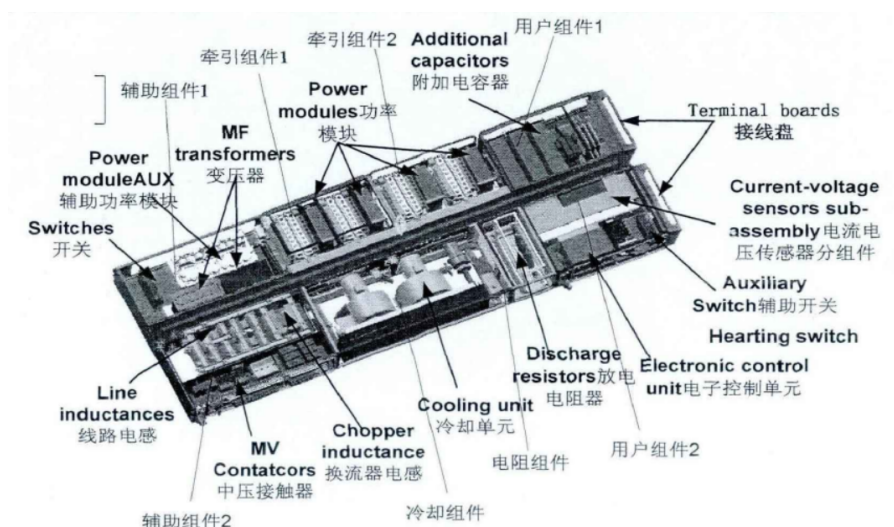


图 19: CRH5 牵引变流器结构图

通过查阅并分析 CRH5 型动车组牵引变流器的主电路，笔者对模拟电路在实际生产生活中的应用有了进一步的认识，对电力系统中直流信号与交流信号的相互转换、电网能量相互传递的过程有了更多的认

识。然而，如图 19 所示，仅仅理解其工作原理还远远不够，实际应用不能仅停留在定性分析上，更要涉及到复杂的定量计算以及与其他系统的相互配合上，这也是我国相关动车组技术迟迟未能突破的重要原因。

笔者希望在这个学期的模拟电子技术基础课程学习过程中，能够在这基本认识的基础上，提高专业水准与分析电路、计算电路的能力，以希冀在未来能对牵引变流器系统的功能有更进一步的认识。

## 6 参考文献

- [1] 邹档兵. CRH 系列动车组牵引变流器主电路分析 [J]. 铁道机车车辆, 2017, 37(02): 42-46.
- [2] 和谐号 CRH5 型电力动车组 百度百科, <https://baike.baidu.com/item/%E5%92%8C%E8%B0%90%E5%8F%B7CRH5%E5%9E%8B%E7%94%B5%E5%8A%9B%E5%8A%A8%E8%BD%A6%E7%BB%84/8549116?fr=aladdin#9>
- [3] 裴建红. 高速动车组牵引变流器主电路设计 [D]. 西南交通大学, 2012.
- [4] 脉冲整流器 - 百度文库, <https://wenku.baidu.com/view/eba5b71ee45c3b3566ec8b1b.html>
- [5] 熊盛艳. CRH5 型动车组牵引变流器的研究 [D]. 西南交通大学, 2013.