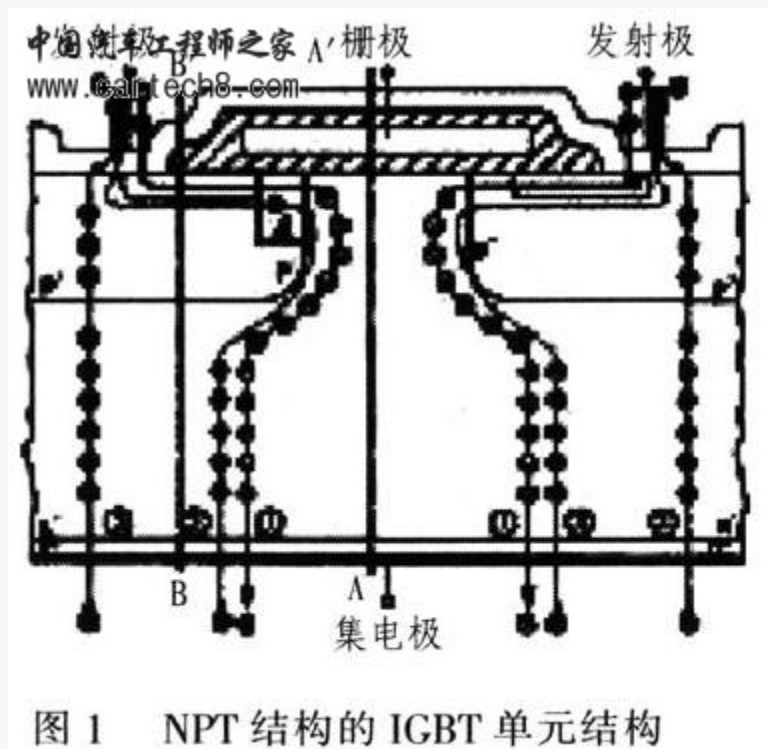


## IGBT 在客车 DC 600V 系统逆变器中的应用与保护

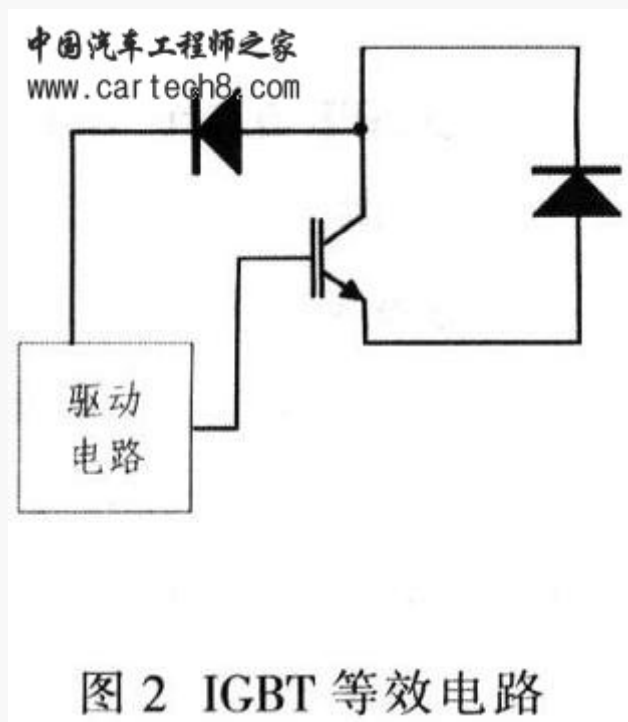
### IGBT 综述

#### 1. 1 IGBT 的结构特点

IGBT 是大功率、集成化的“绝缘栅双极晶体管”(Insulated Gate Bipolar Transistor)。它是 80 年代初集合大功率双极型晶体管 GTR 与 MOSFET 场效应管的优点而发展的一种新型复合电子器件,兼有 MOSFET 的高输入阻抗和 GTR 的低导通压降的优点。图 1 所示为 N 沟道增强型垂直式 IGBT 单元结构,IGBT 采用沟槽结构,以减少通态压降,改善其频率特性。并采用 NPT 技术实现 IGBT 的大功率。IGBT 用 MOSFET 作为输入部分,其特性与 N 沟道增强型。MOS 器件的转移特性相似,形成电压型驱动模式,用 GTR 作为输出部件,导通压降低、容量大,不同的是 IGBT 的集电极 IC 受栅一射电压  $U_{CE}$  的控制,导通、关断由栅一射电压  $U_{CE}$  决定。



目前大部分逆变器都采用 IGBT 和 IPM 作为开关器件，由 IGBT 基本组合单元与驱动、保护以及报警电路共同构成的智能功率模块(IPM)已成为 IGBT 智能化的发展方向，将 IGBT 的驱动电路、保护电路及部分接口电路和功率电路集成于一体的功率器件。35 kW 等级的 DC 600 V 逆变器一般采用 1 200 V / 300 A 模块，IGBT 和 IPM 分为单单元和双单元，3 只双单元模块可构成 i 相逆变器主电路，如图 2 所示。



### 1. 2 IGBT 轨道车辆在供电系统中的应用

轨道车辆中广泛采用 IGBT 模块构成牵引变流器以及辅助电源系统的恒压恒频(CVCF)逆变器。国外的地铁或轻轨车辆辅助系统都采用方案多样的 IGBT 器件。德国针对机车牵引需开发适用于 750 V 电网的 1. 7 kV IGBT 和用于 1 500 V 电网的 3. 3 kV IGBT 模块，简化了牵引逆变器主电路的结构。日本的 700 系电动车组的三点式主变流器，采用大功率平板型 IGBT(2 500 V /

1 800 A)，整流器和逆变器的每个桥臂可用 1 个 IGBT 元件，从而使 IGBT 组件在得到简化的同时，功率单元总体结构也变得紧凑。

我国引进法国 Alstom 公司的 200 km / h 动车组中，主变流器的开关使用耐压高达 6 500 V / 600 A 的 IGBT 器件，辅助变流器采用开关频率为 1 950 Hz 的 PWM 技术，由 3 台双 IGBT 和相关反并联二极管组成，每台双 IGBT 组成三相中的一相；上海轨道交通 3 号线车辆是其辅助系统由电压等级为 330 V 的 IGBT 构成 2 点式逆变器直接逆变；广州地铁 1 号线车辆上的辅助系统采用 IGBT 双重直-直变换器带高频变压器实现电气隔离；深圳地铁一期采用 6 个用作牵引逆变器的 IGBT 模块和 2 个用于制动斩波器的 IGBT 模块完成牵引逆变功能；天津滨海动车组主电路采用 IGBT 电压型三相直-交逆变器，辅助电源的逆变器采用 IGBT 元件的逆变器，开关容量为 3 300 V / 800 A。

## 2 IGBT 在 DC 600 V 中的应用

### 2. 1 DC 600 V 客车供电系统简介

DC 600 V 空调客车供电系统采用机车集中整流，客车分散逆变方式，构成了整个列车的交-直-交变流供电系统。工作过程为：电力机车将 25 kV 电网单相交流电降压、整流、滤波成 DC 600 V 后给客车供电，客车根据用电设备的需要，将机车提供的 DC 600 V 变换成单、三相交流电及 DC 110 V。系统采用两套独立供电。具有一定的冗余，客车供电的基本原理图如图 3 所示。

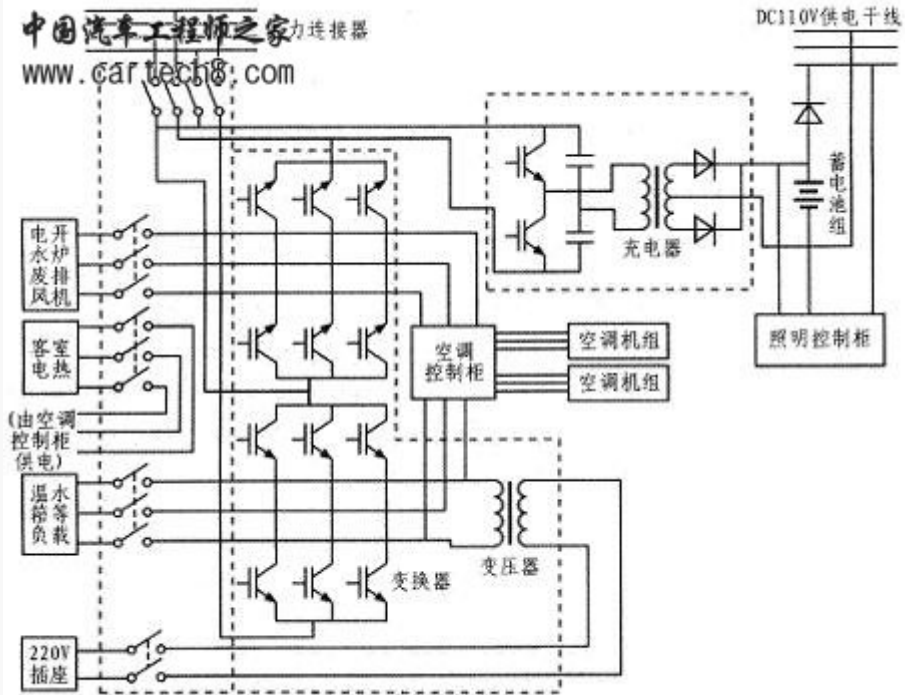


图3 客车供电系统主电路原理图

## 2. 2 IGBT 在 DC 600 V 供电系统逆变器中的应用

空调客车使用 2 个由 IGBT 模块组成的 35 kW 逆变器供电，逆变器主电路原理如图 4 所示，主要由下功能模块构成：

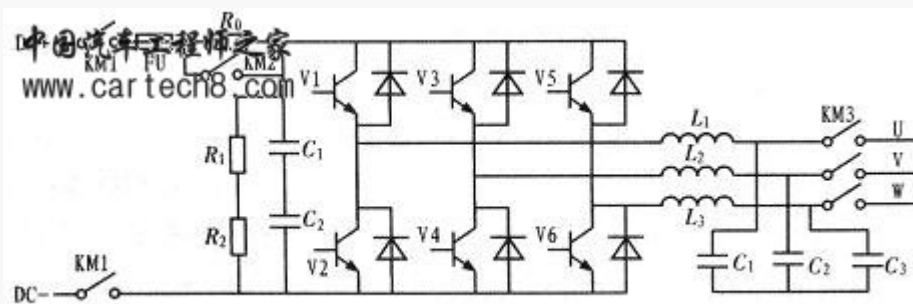


图4 DC 600 V 逆变器主电路原理图

(1)由 KMI、KM3 电磁接触器组成的输入输出隔离电路，主要功能是在逆变器、输入电路或输出负载发生故障时实施隔离，防止故障扩散。

(2)由滤波电容 C1, C2 组成的中间支撑电路，主要功能是滤平输入电路的电压纹波，当负载变化时，使直流电压平稳。由于逆变器功率较大，因此滤波电容的容量较大，一般使用电解电容。由于电容自身参数的离散，使得串联的 2 只电容电压无法完全一致。采用电容两端并联均压电阻的方法，图 4 中的 R1、R2，其另一个作用是在逆变器停止工作时，放掉电容器的电荷。

(3)由 R0 和 KM2 组成的缓冲电路，工作原理为：在输入端施加电压时，先通过缓冲电阻 R0 对电容充电。当电容电压充到一定值时(比如 540 V)，KM2 吸合，将 R0 短路。只有电阻 R0 短路，三相逆变电路才能启动工作。

(4)由 L1~L3 和 C1~C3，组成的交流滤波电路，可将逆变器输出的 PWM 波变成准正弦波。

(5)由 V1~V6 组成的桥式三相逆变主电路是逆变器的核心电路。图 4 为三相逆变器的主电路图，输入端为 A、B，输出为 U、V、W。图 5 中 V1~V6 的导通顺序，阴影部分为各个 IGBT 的导通时间。每一格的时间为  $\pi / 3$ ，三相线电压的波形如图 5 所示。

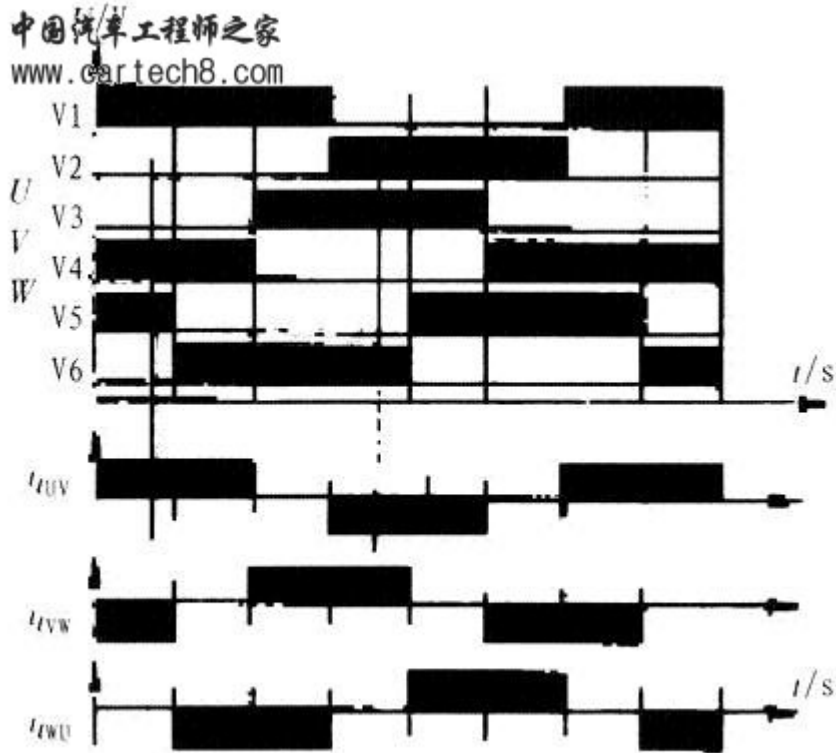


图 5 三相线电压的波形图

由图 4 看出，U、V、W 三者之间的相位差为  $2\pi / 3$ ，幅值与直流电压  $U_d$  相等。由此可见，只要按照一定的顺序控制 6 个逆变器的导通与截止，就可把直流电逆变成三相交流电。

(6)如果将方波电压按照正弦波的规律调制成一系列脉冲，即使脉冲系列的占空比按正弦规律排列，当正弦值为最大时，脉冲的宽度也最大；反之，当正弦值为最小时，脉冲的宽度也最小，把脉冲的宽度调制的越细，即一个周期内脉冲的个数越多，调制后输出的波形越好，电动机负载的电流波形越接近于正弦波，图 6 为负载波形。

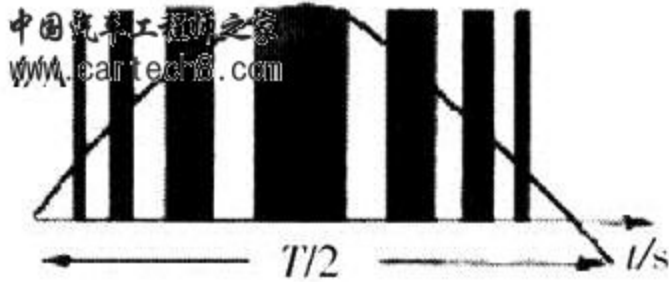


图 6 负载波形图

### 3 IGBT 在 DC 600 V 供电系统中的保护

由于 IGBT 的耐过压和耐过流能力较差，一旦出现意外就会损坏，因此必须对 IGBT 进行保护，客车 DC 600 V 供电系统逆变器的 IGBT 模块有过压、欠压保护，过流、过载、过热等保护功能。

#### 3.1 过压和欠压保护

使用 IGBT 作开关时，由于主网路的电流突变，加到 IGBT 集电-发射间容易产生高直流电压和浪涌尖峰电压。直流过电压的产生是输入交流电或 IGBT 的前一级输入发生异常所致。解决方法是在选取 IGBT 时进行降额设计；也可在检测  $m$  过压时分断 IGBT 的输入，IGBT 的安全。目前，针对浪涌尖峰电压采取的措施有：

(1) 在工作电流较大时，为减小关断过电压，应尽量使主电路的布线电感降到最小；

(2) 设置如图 7 所示的 RCD 缓冲电路吸收保护网络，增加的缓冲二极管使缓冲电阻增大，避免导通时 IGBT 功能受阻的问题。

对于由接触网电压的波动而造成的输出欠压，逆变器可以不停止工作，而是采取降频降压的方式，即当输入电压低于 540 V 时，逆变器按照  $Y / F=C$  (常数) 的规律降频降压工作。

### 3. 2 过流与过载保护

空调客车的 IGBT 模块逆变器具备承受电动机负载突加与突减的能力：当输出侧和负载发生短路时，逆变器能立即封锁脉冲输出，并停止工作，IGBT 产生过电流的原因有晶体管或二极管损坏、控制与驱动电路故障或干扰引起的误动、输出线接错或绝缘损坏等形成短路、逆变桥的桥臂短路等。IGBT 承受过电流的时间仅为几微秒。通常采取的过流保护措施有软关断和降低栅极电压两种。

软关断抗干扰能力差，一旦检测到过流和短路信号就关断，容易发生误动，往往启动保护电路，器件仍被损坏。降低栅极电压则是在检测到器件过流信号时，立即将栅极电压降到某一电平，此时器件仍维持导通，使过电流值不能达到最大短路峰值，就可避免 IGBT 出现锁定损坏。若延时后故障信号仍然存在，则关断器件；若故障信号消失，驱动电路可自动恢复正常工作状态。大大增强了抗干扰能力。

当逆变器的输出超过其自身的输出能力，称为过载，逆变器的过载检测靠输出侧的电流传感器或输入侧的直流电流传感器。一般情况下逆变器的过载保护为反时限特性。即设定过载电流为额定电流的 1.5 倍持续 1 min 后保护，而低于 1.5 倍可延长保护动作时间。而高于 1.5 倍时则保护动作的时间小于 1 min。

### 3. 3 过热保护

当逆变器的散热器温度超过允许温度时，散热器的热保护继电器给出信号让逆变器的控制电路自动封锁脉冲，停止工作。通常流过 IGBT 的电流较大，



开关频率较高，故器件的损耗较大。若热量不能及时散掉，器件的结温将会超过最大值 125℃，IGBT 就可能损坏。散热一般是采用散热器，可进行强迫冷却。实际应用中，采用普通散热器与强迫冷却相结合的措施。并在散热器上安装温度开关，可在靠近 IGBT 处加装一温度继电器，以检测 IGBT 的工作温度。同时，控制执行机构在发生异常时切断 IGBT 的输入，以保护其安全。

#### 4 结语

IGBT 模块开关具有损耗小、模块结构便于组装、开关转换均匀等优点。已越来越多地应用在铁路客车供电系统中。在应用 IGBT 时，应根据实际情况对过流、过压、过热等采取有效保护措施，以保证 IGBT 安全可靠地运行。