

第 1 章 电力电子技术基础知识

1.1 常用电力电子器件

电力电子器件通常是一些大功率晶体管。它们与我们学过的二极管或三极管类似,只不过功率要大得多,承受电压可达几千伏以上,电流可达几千安以上。这些器件一般都工作在开关状态,开关频率可达几十千赫以上。另外,电力电子器件也可做成集成电路模块,其中不仅有主电路,也包括了控制电路和保护电路。下面介绍一些常用的电力电子器件,其外形如图 1-1 所示。

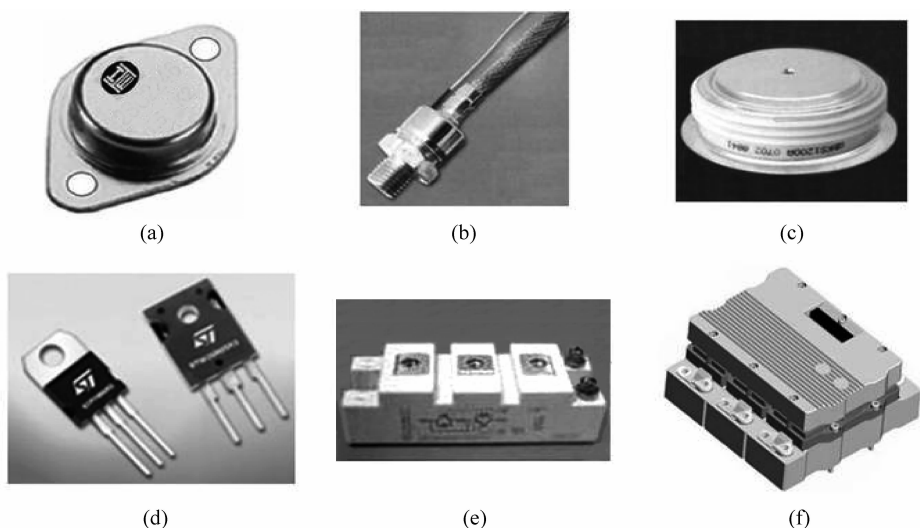


图 1-1 常用电力晶体管的外形

(a) 大功率晶体管; (b) 晶闸管(螺栓式); (c) 晶闸管(圆盘式); (d) MOSFET; (e) IGBT; (f) IGBT

1. 整流二极管

整流二极管(power diode)或称电力二极管,与普通二极管一样,也具有单向导电性,表示符号也相同,不过电力二极管的正向电流和反向电压要大得多。目前这种整流二极管通过电流可达 6kA,承受电压高达 3kV 以上。

2. 晶闸管

晶闸管(thyristor)与二极管类似,不过是一种可控导通的二极管。它有三个极:阳极 A、阴极 K 和门极(或控制极)G,在电路中的图形符号如图 1-2(a)所示。当 A、K 之间加正向电压时,晶闸管并不能导通,只有 G 与 K 之间再加一个正向控制电压(触发脉冲)后,晶闸管才能够导通。一旦导通后,即使取消正向控制电压,晶闸管仍然处于导通状态。当 A、K 之间加反向电压时,无论有没有控制电压,晶闸管都处于关断状态。由于晶闸管可以控制导通但不能控制关断,所以也称为“半控型”器件。

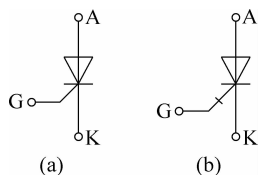


图 1-2 晶闸管的图形符号
(a) 晶闸管; (b) 可关断晶闸管(GTO)

3. 可关断晶闸管

可关断晶闸管(gate turn-off thyristor, GTO)与晶闸管类似,可利用门极正脉冲使其触发导通,导通后门极就失去控制作用。欲关断已导通的 GTO,只需在门极上施加一个反向电压和反向脉冲电流。GTO 属于“全控型”器件,见图 1-2(b)。

4. 电力晶体管

电力晶体管(giant transistor, GTR)就是大功率晶体管,其工作原理和符号与普通小功率晶体三极管相同,也有 PNP 和 NPN 两种类型,特性也类似,也有截止、放大、饱和三种工作状态。GTR 也属于“全控型”器件。

5. 功率场效应管

功率场效应管也称电力场效应管,通常指大功率的金属半导体场效应管(metal oxide semiconductor field effect transistor, MOSFET)。我们知道,普通晶体管是由基极电流控制集电极电流以及晶体管的工作状态,属于电流控制元件。场效应管与普通晶体管的主要区别是由电压(电场)控制而不是由电流控制晶体管的工作状态,这样就可以用更小的功率控制晶体管的工作。

场效应管也有三个极,分别称为栅极 G、源极 S 和漏极 D。其中栅极为控制极,相当于普通三极管的基极。通过调节栅极电压,就可以控制源极和漏极之间的电流大小和通断。MOSFET 也属于“全控型”器件。

场效应管因内部导电情况的不同,分为“N 沟道”和“P 沟道”两种类型,两种场效应管源极和漏极所接电压极性相反,其图形符号如图 1-3 所示。

6. 绝缘栅双极型晶体管

绝缘栅双极型晶体管(insulated-gate bipolar transistor, IGBT)简称绝缘栅晶体管,它是综合了绝缘栅型场效应管(MOSFET)和电力晶体管(GTR)的结构特点而制成的“复合型”器件。其控制方式与 MOSFET 类似,也是栅极电压控制,导通后的性能则类似于 GTR,因而具备了两种晶体管的优点,例如开关速度快、功率损耗小、导通时压降低、电流大等,在电力电子控制系统中得到了广泛的应用。

IGBT 也有三个极,可按照场效应管的命名分别称为栅极 G、源极 S 和漏极 D,图形符号如图 1-4(a)所示。也可以兼顾三极管的命名习惯,分别称为栅极 G、发射极 E 和集电极 C,如图 1-4(b)所示。

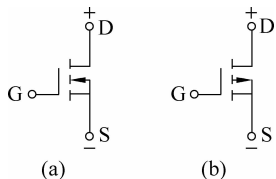


图 1-3 场效应管的图形符号

(a) N 沟道; (b) P 沟道

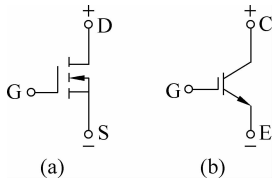


图 1-4 绝缘栅双极型晶体管的图形符号

1.2 电力电子技术基本电路

电动汽车的驱动电机需要经常工作在起动、加速、减速和制动等变化状况,可以归结为对电动机的调速控制。前面介绍的驱动电机中既有直流电机,又有交流电机。对于不同类型的驱动电机,有不同的调速和控制方法,所涉及的基本电路可以分成电源变换电路(或称为功率变换电路,或简称主电路)和控制电路两大类。图 1-5 为电动汽车驱动电机相关的电路框图。

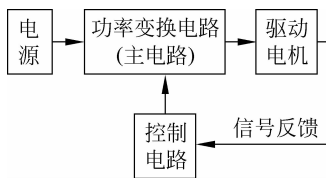


图 1-5 驱动电机的电路框图

以下重点介绍常用的电源变换电路。这种变换电路按照电源的类型基本上可以分为四种:交流-直流变换、直流-交流变换、直流-直流变换以及交流-交流变换。按照功能划分,可将这些电路分别称为整流、逆变、斩波、变频等电路。

1. 可控整流电路

我们知道,整流就是将交流电转变为直流电,也就是交流-直流变换。整流电路有很多种类,既有单相、三相之分,又有半波、全波、桥式整流等不同类型。在电力电子技术中,仍有这些基本类型,不过整流电路多为可以控制的,常采用晶闸管类元件组成可控整流电路。控制的目的是,不仅要把交流电变换成直流电,而且直流电的电压大小可以调节。

可控整流电路的原理可以用图 1-6(a)所示电路说明。在交流电源和负载之间串联一个晶闸管,在门极 G 与阴极 K 之间接入一个可控的触发电路,能根据需要产生触发电压脉冲 u_G (图中未画出)。设电源电压为 u ,负载上的电压为 u_d ,各电压波形如图 1-6(b)所示。若无触发脉冲,由于晶闸管完全不通,负载上没有电流。若在交流电正半周内的某个时刻发出触发脉冲,使得晶闸管导通,在正半周剩余时间内负载上就有电压 u_d ,是不完整的部分正弦波形。负半周晶闸管不通,负载仍无电压。图中发出触发脉冲时刻对应的角度 α 称为控制角,导通时间对应的角度 θ 称为导通角。可见,调节晶闸管导通的时间,就可以调节负载上得到的电压平均值。

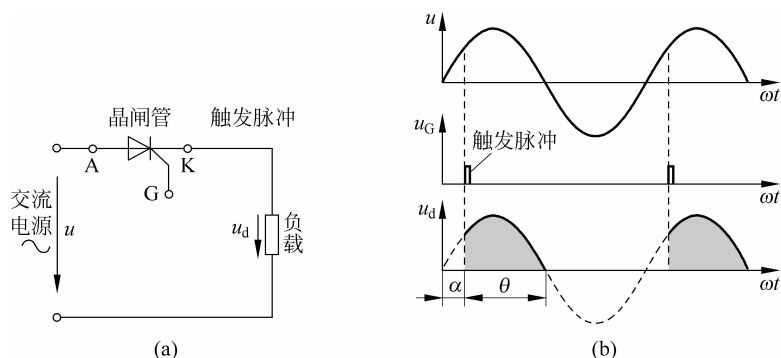


图 1-6 单相半波可控整流电路及波形

(a) 单相半波可控整流电路；(b) 可控整流的波形

2. 逆变电路

“逆变”与整流相反,就是把直流电变换为交流电,属于直流-交流变换。电动汽车中多采用交流驱动电机,而电源系统主要是直流供电,所以逆变电路是必不可少的。带逆变功能的电路装置称为逆变器。

逆变电路需要可控电子器件,通过分别控制各元件的导通时间来实现直流电到交流电的转换。我们以三相桥式整流与逆变电路的对比来分析逆变电路的原理。可以参考汽车发电机的相关电路。汽车发电机发出的是三相交流电,通过三相桥式整流电路转换成直流电,如图 1-7(a)所示。图中给出某个瞬间,A 相电势最高,B、C 两相电势最低,此时二极管 D_1 、 D_5 、 D_6 导通,形成上正下负的直流电提供给负载。实际上三相电压是交变的,各整流二极管将根据各相电压瞬间的高低按一定顺序轮流导通。图 1-7(b)的逆变电路情况正相反,由 6 个可关断晶闸管 GTO 取代了 6 个整流二极管,由交流电动机取代了交流发电机,由直流电源给 GTO 主电路供电,图中略去了 GTO 的门极控制电路。6 个 GTO 的门极是分别可控的,我们可以按照与图 1-7(a)同样的规律主动地控制各晶闸管的导通,例如某瞬间我们让 T_1 、 T_5 和 T_6 同时导通,那么就可以有电流从 A 相流入电动机,并从 B、C 相流出电动机,如图 1-7(b)所示。由此依次给 A、B、C 各相轮流通电,逆变电路就可以提供三相交变的电压和电流。不过因晶闸管是分时段导通的,输出的三相电压虽然交变但还不是“正弦”交流电。

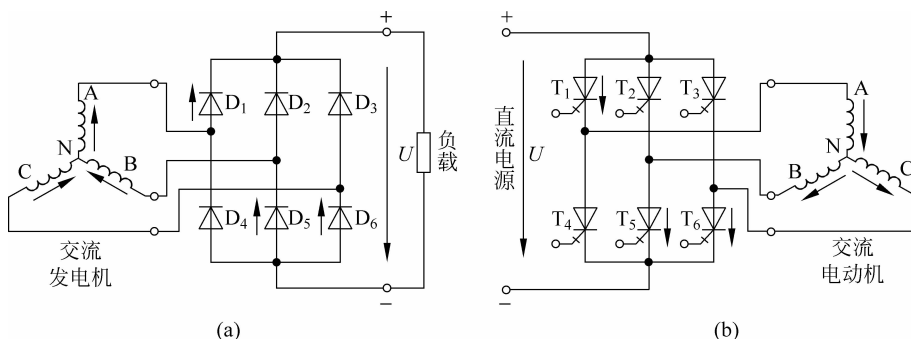


图 1-7 整流电路与逆变电路

(a) 整流电路；(b) 逆变电路

为了改善逆变电路的性能,实际逆变器电路中还需要增加一些电感、电容等元件,使得电压或电流波形更加接近正弦形。

常用的逆变器主要有三种类型:第一种是电压型逆变器,电路结构的特点是在直流电路中有一个并联的大电容,使逆变前的电压基本不变,性能特点是电压稳定,但动态性能较差;第二种是电流型逆变器,电路结构的特点是在直流电路中串联一个大电感,使逆变前的电流相对稳定,性能特点是动态性能比较好,电路结构也比较简单;还有一种称为“脉宽调制”型逆变器,电路结构与前两者都不同,特点是输出电压、频率都可调的脉冲。

按具体电路的性能需要,也可采用晶闸管、GTO、MOSFET 或 IGBT 等器件作开关元件。另外,逆变电路还需要触发控制电路控制其导通状态,因而实际电路要复杂得多。

实际上“逆变”功能常常是与“变频”功能相联系的。为了控制交流电动机的转速,常需在逆变的基础上控制交流电的频率。所以一般逆变器也带有变频功能。电动汽车的交流电机就是由逆变器驱动控制的。

另外,有些电动汽车(主要是混合动力汽车)上有交流发电机,可以提供交流电源,为了控制驱动电动机的运行,需要先将交流变为直流(整流),再由直流变为交流(逆变),这套设备称为交-直-交逆变器。

3. 直流斩波电路

直流斩波电路属于直流-直流转换,也叫 DC-DC 变换器。这种电路通过电子器件的开关作用将恒定的直流电压变换为一系列脉冲,改变脉冲宽度,就可以改变平均电压和电流,成为可调的直流电源。若输出电压比输入电压低,称为降压斩波电路;反之称为升压斩波电路。带直流斩波电路的装置称为斩波器,图 1-8 给出日本五十铃汽车直流斩波器的外形。斩波器常用于直流电机的调速控制、给蓄电池充电,或车内不同等级电压的电源间能量转换。

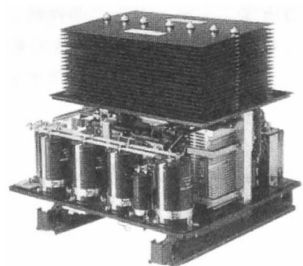


图 1-8 直流斩波器的外形

1) 降压斩波电路

图 1-9 为降压直流斩波电路示意图。图中开关元件 VT 采用绝缘栅晶体管 IGBT,用电动机作负载,二极管 D 用作续流(释能)二极管。

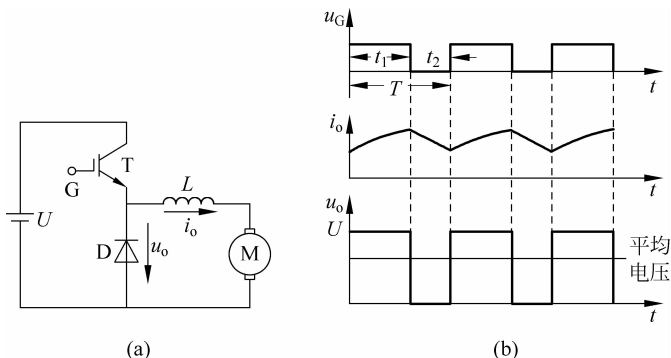


图 1-9 降压直流斩波电路示意图

(a) 斩波电路原理图; (b) 电压电流波形

当 IGBT 有正的控制电压 u_G (栅极 G 对发射极 E) 时, IGBT 导通, 电动机 M 上有电压 u_o , 约等于电源电压 U (见图 1-9(b))。当控制电压 u_G 为零时, 电动机上也没有电压。因此, 若控制电压 u_G 为一系列脉冲, 则输出电压 u_o 将是与控制电压 u_G 相似的一系列的脉冲。由于输出电路中存在电感 L , 当 VT 导通时, 电流 i_o 逐渐增加, 而当 VT 关断时电流 i_o 逐渐减小。电感 L 越大, 电流起伏波动就越小。若 VT 导通与关断时间分别是 t_1 与 t_2 , 脉冲周期 $T = t_1 + t_2$, 通常将 t_1/T 称为脉冲占空比, 用 α 表示, 即 $\alpha = t_1/(t_1 + t_2) = t_1/T$ 。占空比 α 可在 $0 \sim 1$ (即 100%) 之间变化。改变占空比 α , 则输出电压 u_o 的平均值可在 $0 \sim U$ 之间变化。这种电路常用于直流电动机的降压调速。

2) 升压斩波电路

升压斩波电路与降压斩波电路类似, 只不过元件的位置有些变动。图 1-10 为电动汽车中常用的升压斩波电路示意图, 用于直流发电机给蓄电池充电。图 1-10(a) 中发电机 G 为电源, 其电动势为 E , 被充电的蓄电池作负载, 电压为 U 。与降压斩波器类似, 在绝缘栅晶体管 VT 的栅极 G 对地之间施加一系列脉冲 u_G , 则 VT 一直处于反复开关状态。

当 VT 导通时, 电感 L 上的电流 i_o 逐渐增加, 并经 VT 形成回路。当 VT 关断时, 电感 L 上的电流 i_o 不能立即减到 0, 而是逐渐减小, 并经二极管给蓄电池充电。此时 i_o 在电感 L 上产生自感电动势 e , 如图 1-10(a) 中的虚线所示, 方向与电流 i_o 相同。可见输出电压 u_o 等于发电机电动势 E 与电感 L 上的电动势 e 之和, 所以此电路起到升高电压的作用。图 1-10(b) 为控制电压 u_G 、输出电流 i_o 和输出电压 u_o 的波形。电感 L 越大, 电流 i_o 的波动就越小。

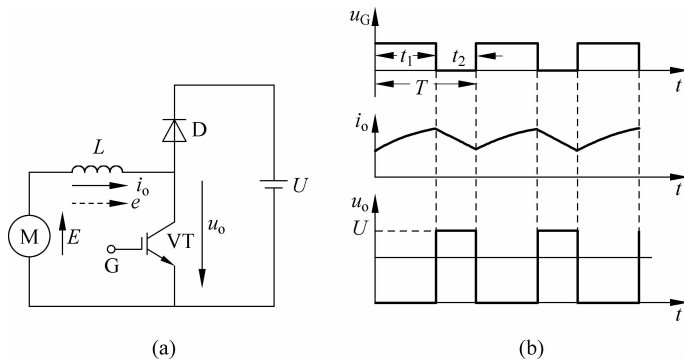


图 1-10 升压直流斩波电路示意图

(a) 斩波电路原理图; (b) 电压电流波形

4. 交流-交流变换电路

交流-交流变换 (AC-AC 变换) 电路将一种交流电变为另一种频率可调的交流电, 中间没有直流电环节。这种电路装置称为交-交变频器。

交-交变频器的基本电路框图如图 1-11(a) 所示。电路中有两组相同的全控整流电路, 分别称为正组 (F) 和反组 (R), 两组反向并联, 轮流给负载供电, 使负载上得到交变电流。

交-交变换电路如图 1-11(b) 所示。F 组与 R 组都采用全波可控整流电路, 并接到同一个三相交流电源上。在一段时间内 (对应于交流电源的若干周期), 由 F 组 6 个整流管工作, 给负载提供由上向下的电流, 如图 1-11(b) 中实线箭头所示; 在下一段相同时间内, 由 R 组 6 个整流管工作, 给负载提供由下向上的电流, 如图 1-11(b) 中虚线箭头所示。这样, 负

载就可以获得方向交变的电流。为了能够给负载提供类似正弦形的交流电,需要交流电源的频率比给负载供电的频率高。这样,在F组工作期间,通过调节整流管的控制角使之按从小到大、再从大到小的规律变化,就可以使负载得到由低变高、再由高变低的电压,这就构成正半周交流电。同样,在R组工作期间调节各整流管的控制角,给负载提供负半周交流电。从而负载得到的是频率比较低的、接近正弦形的交流电压。

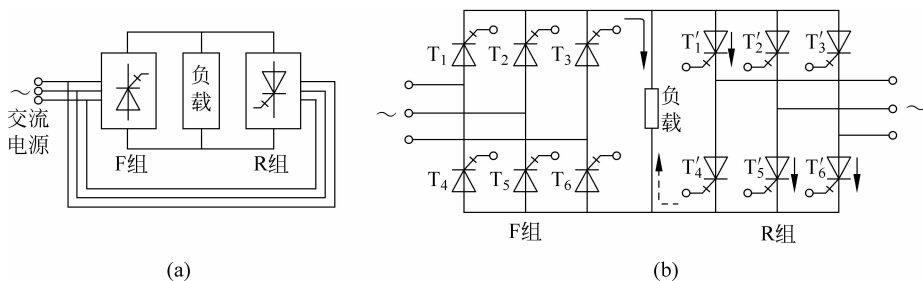


图 1-11 交-交变频器基本电路

(a) 交-交变换系统框图; (b) 交-交变换电路

交-交变换电路既可以改变输出的交流电压,又可以根据负载需要改变输出的交流电频率,所以也称为交-交变频器。在有交流发电机的电动汽车上,有时就采用这种交-交变频器驱动电动机,它省去了交-直-交变频器中间的直流环节。

5. 脉宽调制技术简介

脉宽调制(pulse width modulation, PWM)是指通过对脉冲系列宽度的调节来产生可控的等效直流电或交流电的技术。

前述直流斩波电路中,如果不改变脉冲周期 T ,只改变通电与断电时间的比例以产生等效的可调直流电压,就属于脉宽调制方法。

直流脉宽调制方法的原理如图 1-12 所示。用一个直流参考电压信号 U_r 与一个三角波信号进行比较,凡是参考电压大于三角波电压时就输出正脉冲触发信号电压 u_G ,反之则不输出触发信号。而正的触发信号 u_G 将触发大功率晶体管导通,输出电压 u_o 将形成与触发信号形状相同的脉冲系列。如果改变参考电压 U_r 的大小,就可以改变输出脉冲的宽度。图 1-12(b)、

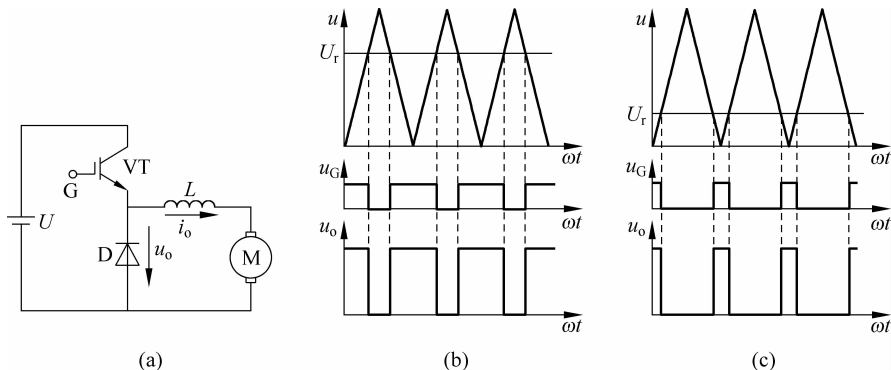


图 1-12 直流电压脉宽调制(PWM)方法

(a) 基本电路; (b) 参考电压 U_r 较高; (c) 参考电压 U_r 较低

(c)分别画出了当参考电压 U_r 大小不同时,触发电压以及主电路输出电压脉冲宽度的变化。

这种脉宽调制方法并不改变脉冲系列的周期或频率,只改变脉冲占空比。改变了占空比,输出电压的平均值也随之改变。

脉宽调制技术更多地用于交-直-交逆变电路,称为脉宽调制型逆变器。脉宽调制型逆变器基本电路图和常用的调制方法如图 1-13(a)、(b)所示。逆变器主电路中,整流器采用不可控整流器,电容器 C 起稳定直流电压的作用。 $T_1 \sim T_6$ 为 6 个 MOSFET 管,作功率开关元件, $D_1 \sim D_6$ 为反馈二极管。各功率开关管的控制原理如图 1-13(b)所示,图中以正弦波信号作参考信号,用一个三角波信号与正弦波信号电压进行比较,凡是正弦波瞬时值大于三角波时则向 MOSFET 管的栅极输出触发电压 u_G ,反之则不输出电压,在负半周也同样处理。于是触发电压 u_G 就形成了宽度按正弦规律变化的脉冲系列,这样 MOSFET 开关管就可以按相似的正弦规律导通。这种方法称为正弦波脉宽调制(SPWM)。若改变正弦波的幅值,也可以改变脉冲系列的所有脉冲的宽度,相当于改变输出电压的大小;若改变参考正弦波的频率,就可以改变输出脉冲系列正负交变的频率。因此,这种脉冲系列就相当于电压和频率都可调节的交流电。用这样的脉冲系列去驱动电动机,效果与正弦交流电相同。

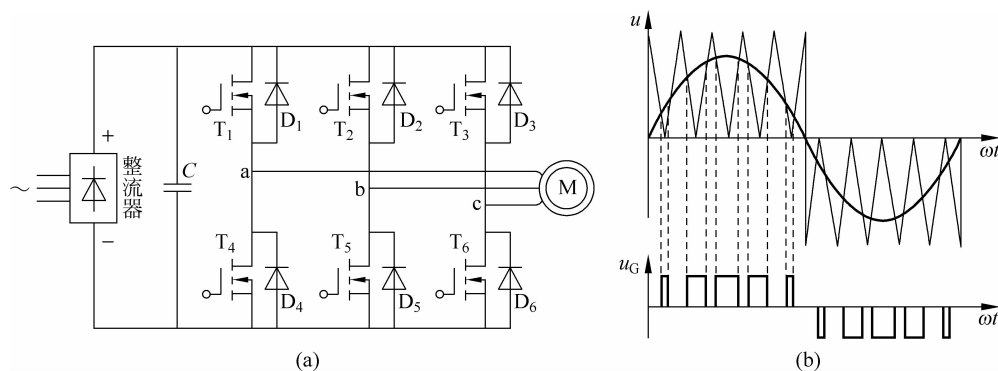


图 1-13 正弦波脉宽调制方法示意图

(a) 逆变器电路图; (b) SPWM 方法原理

这种脉宽调制型逆变器与上述一般的交-直-交逆变器类似,但由于脉宽调制型逆变器本身即可调节输出电压,所以整流环节就不必用可控整流器而是采用不可控整流器(即普通二极管作整流元件),从而简化了控制电路。

目前已有专用于产生 SPWM 控制信号的大规模集成电路芯片,从而使控制电路得以简化,而且既能控制交流电压,也能控制交流电的频率。

6. 控制电路

实际电动机驱动控制系统不仅包括上述各类功率转换主电路,还包括大功率开关元件的控制电路。控制电路也称控制器或控制单元,通常采用以基于数字信号处理功能的 DSP 集成器件为核心的计算机控制系统,通过采集踏板位置传感器、转子位置传感器和定子电流传感器等信号,经过分析、比较、变换、运算、脉宽调制等处理后形成对主电路功率开关管的控制信号。此外,控制电路还包括驱动和保护电路以及串行通信 CAN 总线接口电路等。控制电路内部结构相当复杂,这里不再详述。

第2章 安全用电

2.1 常用电工安全用具

2.1.1 电工安全用具的分类

安全用具包括绝缘安全用具和一般防护用具。绝缘安全用具主要有两种：基本绝缘安全用具和辅助绝缘安全用具。

1. 基本绝缘安全用具

基本绝缘安全用具指其绝缘强度足以抵抗电气设备运行电压的安全用具。

高压基本绝缘安全用具有高压验电器、绝缘夹钳、绝缘杆及绝缘棒等。

低压基本绝缘安全用具有低压试电笔、绝缘手套及装有绝缘柄的工具。

基本绝缘安全用具可直接与带电导体接触,对于直接接触带电导体的操作应使用基本绝缘安全用具。

2. 辅助绝缘安全用具

辅助绝缘安全用具指其绝缘强度不足以抵抗电气设备运行电压的安全用具。

高压辅助绝缘安全用具有高压绝缘手套、绝缘靴、绝缘垫及绝缘台等。

低压辅助绝缘安全用具有绝缘鞋、绝缘垫及绝缘台等。

辅助绝缘安全用具只能强化基本绝缘安全用具的保护作用,即防止接触电压、跨步电压以及电弧灼伤对操作人员的危害。

3. 一般的防护用具

(1) 临时接地线。将已停电设备临时短路接地,防止因误送电而造成工作人员触电。

(2) 临时安全遮拦。防止工作人员误入带电间隔和误碰带电设备。

(3) 标识牌。防止工作人员误上带电设备和误将停电设备及线路送电的措施。

(4) 安全帽。适用于高空作业,以防碰、砸伤人员头部。

(5) 安全带。适用于高空作业,防止工作人员坠落。

(6) 防护眼镜。适用于更换熔丝,操作室外设备,浇灌电缆绝缘胶和更换蓄电池液等工作。

(7) 布手套。适用于操作可熔金属方面的工作及浇灌电缆绝缘胶等。

4. 安全用具的使用及保管

安全用具在使用前应进行外观检查,检查其表面有无裂纹、铅印、划痕、毛刺、孔洞、断裂等外伤及是否清洁。使用完毕后,应存放在干燥、通风的处所,并应符合下列要求:

(1) 绝缘杆应悬挂在支架上,不应与墙接触;

(2) 绝缘手套、绝缘靴应存放在密闭的橱内,并与其他工具仪表分别存放,绝缘靴不准代替一般的雨鞋使用;

(3) 绝缘垫和绝缘台应该常保持清洁、无损伤;

(4) 高压验电器应存放在防潮的匣内,并将匣放在干燥的地方;

(5) 安全用具和防护用具不允许当作其他工具使用;

(6) 安全用具应定期进行试验,定期试验合格后应加装标志。

2.1.2 绝缘杆及绝缘手套使用前的检查及使用注意事项

1. 绝缘杆使用前的检查

(1) 检查其是否在试验合格有效期内。

(2) 检查绝缘杆有无受潮、断裂钩环有无变形,表面应清洁,连接部位应牢固。

2. 绝缘杆使用注意事项

(1) 使用绝缘杆应戴绝缘手套、穿绝缘靴;手握部分不得超出防护环或防护罩。

(2) 雨雪天气时,室外使用绝缘杆应装有防雨的伞形罩。

(3) 使用时应防止碰撞、划伤,绝缘杆不应挪做他用。

(4) 绝缘杆应存放在干燥通风处,并悬挂在支架上,避免与墙或地面接触。

3. 绝缘手套使用前的检查

(1) 检查其是否在试验合格有效期内。

(2) 检查有无划痕、开裂,表面清洁,应做充气试验检查,并无泄漏。

4. 绝缘手套使用注意事项

(1) 低压绝缘手套作为基本安全用具,可直接接触低压带电体,而高压绝缘手套只能作为辅助安全用具,不能直接接触高压带电体。

(2) 绝缘手套应存放在密闭的橱内,并与其他工具分别存放。

2.1.3 电工安全用具试验周期

绝缘安全用具的试验周期及试验标准如表 2-1 所示。