

【编者按】为了增加本刊的技术含量,从本期起有计划地刊登一些有关电源技术方面的“技术讲座”。拟从“逆变器的工作原理及应用”开始,特邀华中科技大学的杨荫福和段善旭两位教授与本刊张乃国主编合作编写此稿,还要邀请企业的研发人员撰写应用实例。欢迎诸位编委、专家及企业的电源技术工作者支持这一栏目。

逆变器的工作原理及应用(一)

华中科技大学 杨荫福 段善旭
清华大学 张乃国

摘要 这里首先介绍恒频恒压逆变器,分析其电路结构和工作原理,讨论逆变器中的变压器的直流不平衡及其控制方法等实用问题,还介绍几个SPWM逆变器产品的原理电路。

1 恒频恒压正弦波逆变器

恒频恒压(CFCV)交流逆变电源一般用在对电源质量要求很高的场合,如通信系统、金融部门、医疗中心、军用设备和UPS电源设备等。

1.1 逆变器概述

逆变电源除了满足体积、重量、电磁兼容等基本要外,对本身的电气性能也要求达到较高的指标,比如要求输出电压稳态精度高,电压波形失真度小,有比较强的过载能力及抗负载冲击能力,动态响应快等。

要达到以上这些要求,应该合理设计主电路和控制系统。逆变电源的大部分性能指标的实现都

依赖于控制系统。

(1) 逆变器主电路结构

逆变器按照输出的相数分,有单相、三相两种,三相逆变器可由三相半桥结构组成,也可以由3个相位互差 120° 的单相逆变器组成。因此,单相逆变器的技术也可以应用到三相逆变器中。

单相逆变器主电路拓扑结构如图1所示,主要有半桥式、全桥式和推挽式3种。

半桥电路输出端的电压波形幅值仅为直流母线电压值的一半,因此,电压利用率低,但在半桥电路中,可以利用两个大电容 C_1 、 C_2 自动补偿不对称波形,这是半桥电路的一大优点。

全桥电路和推挽电路的电压利用率是一样的,

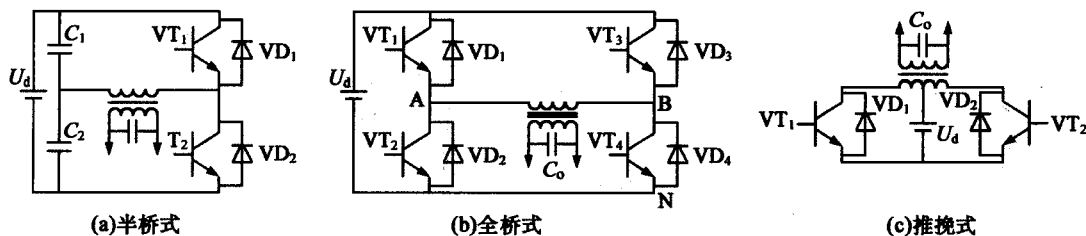


图1 主电路拓扑结构

均比半桥电路大1倍。但全桥式、推挽式电路都存在变压器直流不平衡的问题,需要采取措施解决。

推挽电路主要优点是电压损失小,直流母线电压只有一个开关管的管压降损失,此外,两个开关管的驱动电路电源可以共用,驱动电路简单。推挽式比较适合低压输入的场所。低压输入的推挽式变压器原边绕组匝数较少,一般采用并绕方式,以增加两绕组的对称性,工艺上难度较大。

中、大容量逆变器多采用全桥结构,它的控制方法比较灵活,主要有双极性和单极性倍频两种。

对于开关器件的选择,小容量逆变器多用功率MOSFET,大容量正弦波输出的逆变器多用IGBT,特大容量逆变器则选择GTO。

(2)驱动电路

驱动电路是主电路与控制电路之间的接口电路。合理的驱动电路可以使开关管工作在较理想的状态,缩短开关时间,减小开关损耗,提高系统的运行效率。另外,有些保护措施往往设在驱动电路中,或通过驱动电路来实现。驱动电路的基本任务是将信息电子电路传来的信号转换为加在器件控制回路中的电压或者电流,应该具有一定的功率,使器件能够可靠地开通或关断。驱动电路往往还需要提供电气隔离环节。

目前,广泛使用的电力电子器件是MOSFET和

IGBT,在常用的驱动电路中,变压器隔离驱动的驱动脉冲的占空比必须小于50%,否则变压器的磁通不能复位。而采用SPWM调制方式时,开关管的驱动脉冲不可避免的有超过50%的情况,因此,小容量逆变器中,功率MOSFET多采用高压隔离驱动的集成芯片,而在中大容量逆变器中,IGBT则采用厚膜集成驱动电路模块。

(3)逆变器控制方法

由于逆变器容量不同,结构形式和控制策略必然会有所差异,表1比较了不同的脉宽调制方法下逆变器的输出特性。

目前,逆变器广泛采用PWM脉宽调制技术实现对输出电压的控制。PWM技术主要体现在两个方面,一是控制策略,二是实现的手段。调制方式主要有直流脉宽调制和正弦波脉宽调制两种方式。

①直流脉宽调制

直流脉宽调制是利用直流调制信号和三角载波比较,可以得到单脉波控制信号,只要改变直流调制信号,就可改变单脉波的脉冲宽度,调节输出电压基波分量的有效值,实现电压控制的目的。图2所示为实现直流脉宽调制的一种简单方法,给定电压 U_g 和反馈电压 U_f 通过电压调节器得到一个控制电压 U_2 , U_2 和锯齿波电压 U_1 比较得到脉冲波形

表1 各类逆变器特性比较

逆变器类型	优缺点
方波逆变型	线路简单,但谐波含量高
稳压变压器型	采用铁磁谐振电路,线路简单,波形接近正弦波,可靠性较高,价格低,但动态特性差,装置笨重,输出电压不可调
准方波型(QSW型)	采用两方波逆变桥叠加,线路简单,可靠性高,价格低,但谐波含量高,需大容量滤波器、动态性能差、效率不高
阶梯波型(SW型)	采用若干方波叠加而成,滤波后波形好,效率高,但线路复杂,多用于较大功率(如30kVA以上)的UPS中
脉宽调制型(PWM型)	用高频方波,利用微机或数控合成,谐波含量低,动态性能好,效率高,可靠性高,但在载波频率低时有音频噪声
脉宽阶梯混合波型(PWSW型)	具有脉宽调制型和阶梯波型的优点,效率更高,动态性能更好,但线路复杂,可靠性稍差

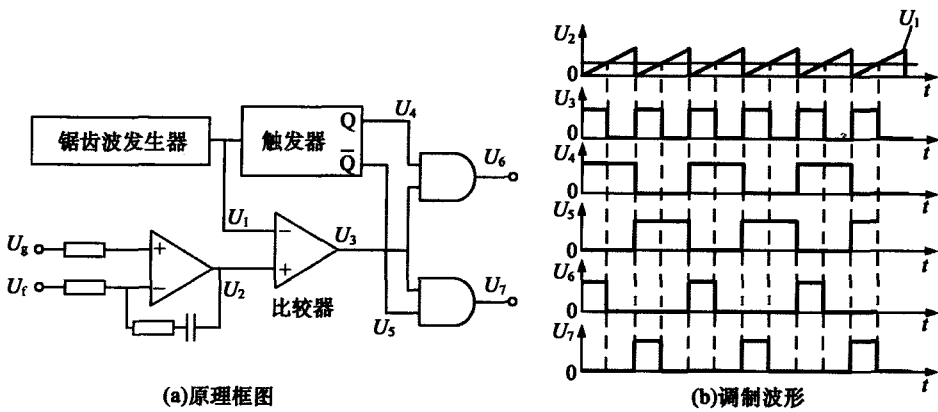


图2 直流脉宽调制原理

U_3 , 触发器的输出是互补的 180° 方波 U_4 、 U_5 , 通过两个非门电路, 获得互差 180° 的脉冲方波 U_6 、 U_7 , 它们可分别作为图1(a)半桥逆变电路、图1(c)的推挽电路的开关管 VT_1 、 VT_2 的控制信号, 也可以作图1(b)全桥式 VT_1 和 VT_4 、 VT_2 和 VT_3 的控制信号。值得注意的是控制信号在给驱动电路送出信号的同时, 驱动电路还要考虑功率和电气隔离问题。从图2不难分析, 反馈电压的变化会引起脉冲宽度变化, 通过逆变电路, 最终可以使得反馈电压和给定电压相等, 即逆变器的输出电压基本稳定。此外, 如果要求得到50Hz的输出频率, 锯齿波的频率应该是100Hz。

方波输出电路简单, 易于闭环控制, 电压输出稳定度也比较高。特别是它可以直接借用直流电源控制技术, 很多直流控制芯片都可以应用, 因此方波输出具有成本低的优点。但是, 方波输出含有大量的低次谐波, 波形畸变严重, 主要应用在要求不高的场合, 为了改善上述缺点, 逆变器中广泛采用正弦波脉宽调制技术。

② 正弦波脉宽调制

正弦波脉宽调制技术即SPWM技术, 它利用面积冲量等效原理获得谐波含量很小的正弦电压输出。正弦脉宽调制波中谐波分量主要分布在载波频率以及载波频率整数倍附近。在目前使用的中小容量逆变器中, 三角波的工作频率在 $8 \sim 40\text{kHz}$

之间。因此, 采用SPWM的逆变器输出电压波形中, 基本不包含低次谐波, 几乎所有谐波的频率都在几千赫以上。这样, 逆变器所需的滤波器尺寸就可以大大减小。

对于单相全桥逆变电路, 目前装置中常用SPWM硬开关, SPWM控制策略有双极性SPWM和单极性SPWM

两种。

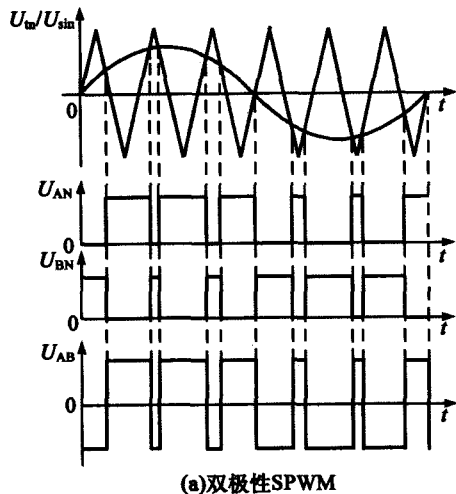
无论是双极性SPWM还是单极性SPWM, 都可以采用正弦调制波 U_{\sin} 和三角载波 U_{tri} 比较进行调制, 且逆变桥中同一桥臂的上、下两个开关管(即 VT_1 和 VT_2 , VT_3 和 VT_4)的驱动信号总是互补的(忽略死区)。其区别在于两个桥臂调制规律之间的关系不同。现对应图1(b)单相全桥逆变电路, 说明两种控制规律, 波形如图3所示。

——双极性SPWM

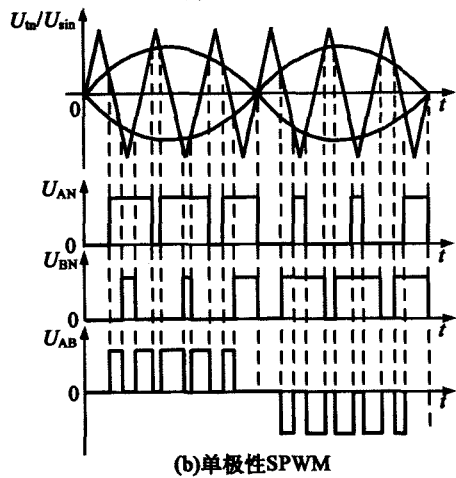
采用同一个正弦调制波 U_{\sin} 和三角载波 U_{tri} 比较, 控制两个桥臂。 $U_{\sin} > U_{\text{tri}}$ 时, VT_1 、 VT_4 导通, $U_{AN} = U_d$, $U_{BN} = 0$, $U_{AB} = U_d$; $U_{\sin} < U_{\text{tri}}$ 时 VT_2 、 VT_3 导通, $U_{AN} = 0$, $U_{BN} = U_d$, $U_{AB} = -U_d$ 。调制过程 U_{AN} 、 U_{BN} 、 U_{AB} 的波形如图3(a)所示。

——单极性倍频SPWM

采用两个反相的正弦调制波 U_{\sin} 和 $-U_{\sin}$ 分别和三角载波 U_{tri} 比较, 控制两个桥臂。 $U_{\sin} > U_{\text{tri}}$ 时, VT_1 导通, $U_{AN} = U_d$; $U_{\sin} < U_{\text{tri}}$ 时, VT_2 导通, $U_{AN} = 0$; $-U_{\sin} > U_{\text{tri}}$ 时, VT_3 导通, $U_{BN} = U_d$; $-U_{\sin} < U_{\text{tri}}$ 时, VT_4 导通, $U_{BN} = 0$ 。 $U_{AB} = U_{AN} - U_{BN}$ 。其调制过程及 U_{AN} 、 U_{BN} 、 U_{AB} 的波形如图3(b)所示。由图3可知, 在双极性SPWM下, 输出SPWM波 U_{AB} 中只存在两种电平: U_d 和 $-U_d$ 。而在单极性SPWM下, U_{AB} 中存在3种



(a)双极性SPWM



(b)单极性SPWM

图3 两种SPWM调制模式

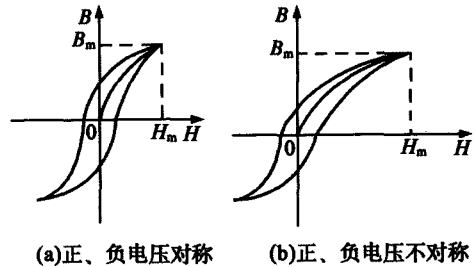
电平： U_d 、 $-U_d$ 和0。在相同直流电压下，双极性SPWM波比单极性SPWM波的电压脉动幅度高一倍。此外，在相同开关频率下，单极倍频SPWM波的脉动频率较双极性SPWM波高一倍。这些特点都有利于后级的滤波。

(4)逆变器的直流不平衡问题

通常讲的逆变器直流不平衡，是指变压器“直流不平衡”，它对系统危害性很大，必须探讨解决的措施。

①直流不平衡产生的原因

如果主开关器件及其驱动电路特性不一致，一个正弦周波中，正、负半波控制波形不对称，都会使得逆变桥输出电压波形正、负不对称，这样，加



(a)正、负电压对称

(b)正、负电压不对称

图4 变压器的磁滞回线

在主变压器上的电压波形正、负不对称，使得主变压器发生偏磁现象。图4是变压器的磁滞回线，图4(a)为正、负电压波形对称时对应的正常轨迹，图4(b)为正、负电压波形不对称时对应的偏磁轨迹，从图形看出，变压器磁芯因“偏磁”单方向饱和。如果变压器存在上述现象，则称为变压器“直流不平衡”。

②直流不平衡的危害

变压器磁芯因“偏磁”单方向饱和，它会使输出电压波形畸变率增加，同时在变压器原边绕组出现极大的励磁电流(电流尖峰可能有近十倍正常电流值)，可能使功率开关管因过流而损坏，对系统危害性很大，必须采取措施解决。

③抗不平衡常用措施

引起不平衡的原因，也可以分为静态和动态两类。静态是指控制电路和主电路参数不一致等系统固有的原因引起的不平衡，应严格挑选电路中的相关元件和功率开关管，注意驱动电路的一致性，尽量减少这些不平衡因素。动态是指参数的温度漂移和负载的变化等随机原因引起的，不太好防止。但是它们都可以采用控制电路进行补偿。图5(a)是一个单相逆变器的主电路，下面结合该逆变电路说明两类补偿方法。

——模拟补偿方法

图5(b)是一种静态补偿电路，在SPWM形成电路的正弦调制波输入端增设一个可调的电平偏置电路，以抵消原系统固有的“静态”直流分量。运行时调整该偏置电平，直到变压器原边电流对称。

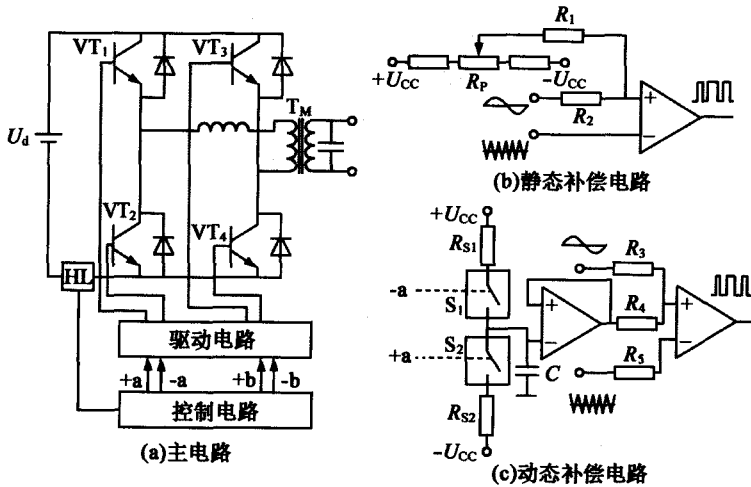


图5 直流不平衡的模拟补偿方法

以防止直流不平衡引起电路发生故障；观察电流检测HL的输出，它是脉冲波形，它的包络线是类似整流的正弦波形，相邻的包络线分别反映了送至变压器的正、负电流；调整静态补偿电路中的 R_p ，使得HL(霍尔)输出的每个包络线幅值相等。在调整的过程中，逐步增加输出电压，并且使得负载逐步增加到额定值。使得 R_p 在一个合适的位置，系统在各种工况下，正、负电流包络线幅值基本相等。该方法简单，可以抵消因为参数不一致等固有原因引起的不平衡现象，但有的不平衡现象是随机的动态原因，这种调节方式就不能满足要求。

(未完待续)

调整方法如下：开始时调整逆变器的输出为低压，



(上接p.55)

6.2 监控软件及接口

(1)大部分的电脑系统都有UPS保障，以避免因停电而造成系统故障及资料损毁，使用通讯界面可与电脑连线，监控用电情形。

(2)通过UPS后面板上DB9通讯界面与电脑连线，可以得知UPS的状况，使用者依所用的操作系统DOS、WINDOWS3.1、WINDOWS95、WINDOWS3/NT、NOVELL等等，另外购买电脑界面与软件，才能使电脑与UPS连接，将UPS运转状况随时显示在电脑屏幕上。当市电断电时，系统得知停电了，会发出警告讯息。当预设时间一到，会自动依正常关机程序，将资料存档后关闭系统，然后自动切断UPS。当市电恢复时，UPS会自动开始运作，系统也自动恢复运作。

(3)UPS电脑界面(见图14)，提供详细数据，适合网络服务器、工作站、监控系统、个人电脑等使用。

(4)在无人值守的情况下，使用UPS智能监控软件可实现电源事件记录、通知关机、控制、自动启动功能。软件适用于大多数操作系统，随软件附带一根连接UPS的信号线。详见《UPS智能监控软件用户手册》。

(5)对于有内置UPS监控特性的计算机系统，接口器件能将UPS接到系统里。每个器件包括相应的接口线，以将

UPS状态信号转换成系统能识别的信号(仅用于工厂提供的UPS监控线)。DB9接口见图15。

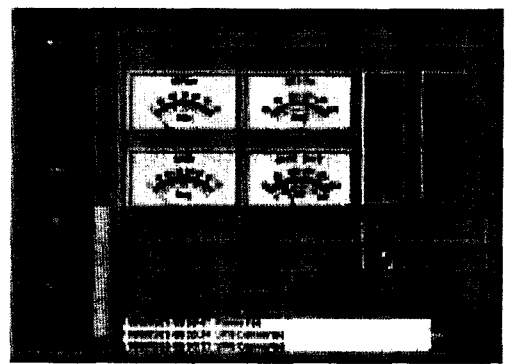
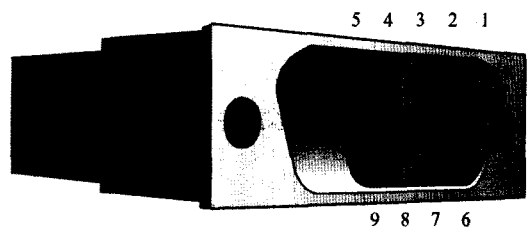


图14 UPS电脑界面



PIN2: RS232 TXD线; PIN3: RS232 TXD线; PIN5: 接地(GND)线。

图15 DB9接口示意图