

第3章 高频开关型整流器

3.1 基础知识

3.1.1 高频开关型整流器概述

1. 高频开关型整流器的分类

一般所说的高频开关电源，是指由交流配电模块、直流配电模块、监控模块和整流模块等组成的直流供电电源系统，它名称的由来就是因为其具有高频开关型整流器，由于高频开关型整流器目前大都是模块化结构，所以有时也称高频开关型整流器为高频开关整流模块。

高频开关型整流器的分类如下。

① 按开关电源控制方式及开关线路技术，可分为脉冲宽度调制（Pulse Width Modulation, PWM）型和谐振型。PWM 型高频开关整流器具有控制简单，稳态直流增益与负载无关等优点，但整流器中的功率开关器件工作在强迫关断和强迫导通方式下，在开关截止和导通期间有一定的开关损耗，而且开关损耗随开关频率的提高而增加，故限制了整流器开关工作频率的进一步提高。谐振型高频开关整流器则可以使其在更高的频率下工作且开关损耗很小。它又分为串联谐振型、并联谐振型和准谐振型三种，目前应用较为普遍的是准谐振型高频开关整流器。

② 按开关电源功率变换电路的结构，可分为不隔离式变换和隔离式变换。在不隔离式变换电路中，根据输出电压与输入电压的关系，又可分为升压型变换电路、降压型变换电路和反相型变换电路。在隔离式变换电路中，根据变换器电路的结构，又可分为单端反激变换器、单端正激变换器、推挽式变换器、半桥式变换器和全桥式变换器。

③ 按开关电源所用的开关器件，分为双极型晶体管开关电源、功率金属氧化物半导体场效应晶体管（Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET）开关电源、绝缘栅门极晶体管（Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT）开关电源和晶闸管开关电源等。一般功率 MOSFET 用于开关频率在 100kHz 以上的开关电源中，晶闸管用于大功率开关电源中。

④ 按功率变换电路的激励方式，可分为自激式和他激式。自激式开关电源在接通电源后功率变换电路自行产生振荡，即对该电路是靠电路本身的正反馈过程来实现功率变换的。自激式电路简单、响应速度快，但开关频率变化大、输出纹波值较大，通常只在小功

率的情况下使用。他激式开关电源的特点是开关频率恒定、输出纹波小，但电路较复杂、响应速度慢。

2. 高频开关型整流器的基本原理

高频开关型整流器通常由高频输入滤波电路、工频整流电路、功率因数校正电路、DC/DC 变换器、输出滤波器等部分组成。开关电源的基本电路包括两部分：一是主电路，指从交流电源输入到直流电源输出的全过程，主要完成功率转换任务；二是控制与辅助电路，为主电路变换器提供激励信号，以控制主电路的工作，实现输出稳定或调整的目的，包括控制电路、检测电路、保护动作电路以及辅助电源等。

(1) 主电路。

主电路是高频开关整流器的主要部分，它完成交流电输入到直流电输出的全过程，现将主电路工作过程介绍如下。

① 交流输入滤波：处于整流模块的输入端，包括低通滤波器、浪涌抑制等电路。其作用是将电网存在的尖峰等杂波进行过滤，给本机提供良好的交流电，同时也防止本机产生的杂音反馈到公共电网中。

② 整流滤波：将电网交流电源直接整流为较平滑的直流电，并向功率因数校正电路提供稳定的直流电源。

③ 功率因数校正：位于整流滤波和逆变之间，为了消除由整流电路引起的谐波电流污染电网和减小无功损耗来提升功率因数。

④ 逆变：将直流电变为高频交流电，这是高频开关的核心部分，在一定范围内，频率越高，体积重量与输出功率之比越小。但频率最终将受到元器件、干扰、功耗以及成本的限制。

⑤ 输出整流滤波：由高频整流滤波及抗电磁干扰等电路组成，提供稳定可靠的直流电源。输出高频滤波器的主要作用是衰减直流变换器输出电压中的高频分量，降低输出纹波电压，从而满足通信和其他电子设备的要求。

(2) 控制电路。

一方面从输出端取样，经与设定标准进行比较，然后去控制逆变电路，改变其频率或脉宽，达到稳定输出的目的；另一方面，根据取样电路检测到的取样信号，通过相关保护电路鉴别，实现对整机进行各种保护的，如稳压限流、过压保护等。

(3) 检测电路。

除了提供保护电路所需的各种检测取样信号外，还提供各种用于仪表显示的数据，供值班人员观察、记录。

(4) 辅助电源。

提供开关整流器本身所有电路工作所需的各种不同要求的电源。

3. 高频开关型整流器的技术特点

(1) 通信用高频开关电源的技术发展。

对于高频开关电源在通信电源中形成主导地位的主要关键技术有：

① 开关电路的发展使开关电源的频率不断提高的同时效率也得到了很大的提高,并且使每个开关模块的变换功率也不断增大,满足通信电源大功率使用的需要。

② 均流技术使开关电源可以通过多模块并联组成更大的直流供电系统和提高系统的冗余可靠性。

③ 功率因数校正技术有效地提高了开关电源的功率因数,使开关电源在大功率供电系统的应用更加实用。

④ 现代高频开关电源所具有的智能化给维护工作带来了极大的方便,提高了维护质量。

目前,高频开关电源还将进一步向高频化、电路集成化、体积小化等方面发展。高频开关电源的进一步发展将依赖于高频元器件和磁性材料的发展,在硬开关电路中,开关器件在高压下导通,大电流下关断,整个开关过程都处于强迫开关状态下,使高频开关电路的运行受到限制,因此,谐振软性开关变换电路将成为新一代变换电路的发展主流。另外,在高频开关电源高频化的发展过程中,还存在着热学限制、电磁干扰等问题。

(2) 高频变换减小变压器体积的原理。

高频开关整流器将 50Hz 工频交流首先转换成直流,再将直流转换为高频交流。这样,降压用的变压器就可以工作在很高的频率下,从而缩小了变压器的体积。采用高频变换技术减小变压器体积可以认为是高频开关整流器的核心技术。

在变压器电压和磁通(与电流有关)一定的情况下,即变压器功率一定的情况下,工作频率越高,变压器的铁芯截面积就可以做得越小,绕组匝数也可以越少。

(3) 开关型稳压电源与其他稳压电源相比的技术特点。

目前,通信和其他电子设备采用的稳压电源主要有线性稳压电源、相控型稳压电源和开关型稳压电源。

线性稳压电源中,调整元件串联在负载回路中,其作用就像一只可变电阻,输入电压或负载变化时,串联调整元件的压降改变,从而使输出电压稳定不变。当输入电压过高时,串联调整管的功耗很大,因此效率很低。线性稳压器的主要优点是电路比较简单、干扰小,对输入电压和负载变化的响应非常快,稳压精度较高,输出纹波电压也较低。因此,线性稳压电源主要用在小功率、对稳压精度要求很高的场合,如一些为通信设备内部集成电路供电的辅助电源。

相控型稳压电源采用晶闸管代替二极管来组成整流电路,可以方便、迅速地调整整流输出电压,因此这种整流电路也被称为可控整流电路。相控型稳压电源的稳压原理是:通过改变晶闸管的导通相位(θ)来控制整流器的输出电压,所以由这种电路构成的电源通常称为相位控制型电源,简称相控型电源。与线性稳压电源相比,由于调整元件(晶闸管)工作于开关状态,所以功耗较小,效率也较高。但由于相控型稳压电源的工频变压器工作在低频(工频 50Hz),对电网干扰和负载变动的响应慢,所需的滤波电容、电感、工频变压器的体积庞大,噪声也很大。另外,晶闸管整流电路的功率因数较低,污染电网。因此

相控电源在通信行业已逐步淘汰。

在高频开关型稳压电源中，调整管工作于开关状态。当输入电压或负载变化时，一般可改变控制信号的脉冲宽度（改变调整管的导通时间，即脉冲宽度调制），从而使输出电压稳定不变。调整管导通时，两端的压降接近于零，导通功耗很小，调整管关断时，流过的电流基本上为零，关断功耗非常小，因此开关型电源的效率很高。目前通信用开关稳压电源的效率已达到 90% 以上。与相控电源相比，高频开关电源不需要工频变压器，工作频率高，所需的滤波电容、电感大，因而体积小、重量轻、动态响应速度也快。

3.1.2 高频开关型整流器主要电路

1. 功率变换电路

功率变换电路是整个高频开关电源的核心部分。功率变换电路将大功率的高压直流转换成低压直流，这个过程显而易见是整流器最根本的任务。衡量功率变换电路的好坏，主要有两点：一是功率转换过程中效率是否高；二是功率变换电路的体积是否小，特别是大功率电路。

功率变换电路：高压直流→高压交流→降压变压器→低压交流→低压直流。由于变压器体积与工作频率成反比，提高变压器的工作频率就能有效地减小变压器体积。所以功率变换电路又可以描述成：高压直流→高压高频交流→高频降压变压器→低压高频交流→低压直流的过程。

根据功率变换电路输出功率的大小，开关频率的工作范围，以及开关管上所承受的电压、电流的不同，功率变换电路有多种拓扑结构。隔离式 DC/DC 功率变换器是高频开关整流器的重要部分，常用的有推挽式功率变换电路、全桥式功率变换电路和半桥式功率变换电路。

(1) 推挽式功率变换电路。

推挽式功率变换电路工作原理分析。两只功率开关管 VT_1 、 VT_2 由栅极驱动电路以 PWM 工作方式驱动而交替导通和截止。在各自导通的半个周期内，输入直流电压 E 被变换为高频方波交流电压相互交替地施加在高频变压器的两个原边绕组上。当 VT_1 被驱动导通时，输入电源电压 E 通过 VT_1 加到高频变压器的原边绕组 N_1 上，由于变压器原边绕组电磁感应的作用，截止的功率开关管 VT_2 要承受两倍的电源电压，即 $2E$ 。当 VT_1 及 VT_2 的栅极无驱动时，两只功率开关管均截止，此时它们各自承受的电压均为电源电压 E 。 VT_2 被驱动导通时，截止的 VT_1 上承受 $2E$ 的电压。

在 VT_1 或 VT_2 关断瞬间，由于高频变压器漏感的存在，在漏极会形成电源尖峰，在实际电路中 VT_1 、 VT_2 的工作波形很难达到理想的状况。尖峰电压的大小与电路的布局、PCB 板的布线技巧及高频变压器的绕制工艺有较大的关系。如果上述问题处理不当，有可能使 VT_1 及 VT_2 承受两倍以上电源电压，一般耐压较高的开关三极管或 MOSFET 都存在着较高的饱和压降或导通电阻，这就增大了功率变换的直流损耗。

为了有效防止 VT_1 及 VT_2 存在瞬时共同导通现象, 在栅极驱动波形的每个周期里设置了“死区”时间, 即在“死区”时间内 VT_1 及 VT_2 均处于截止状态。但“死区”时间不能设置过长, 否则会导致输入电压范围变窄和输出电流变小。 VT_1 驱动波形的关断沿至 VT_2 驱动波形的开通沿之间的时间, 即 $(T_{\text{off}}-T_{\text{on}})/2$ 为“死区”时间。一般在设计和计算时用占空比来衡量“死区”的大小, 驱动波形的一个周期 $T=T_{\text{off}}+T_{\text{on}}$, 占空比 $\delta=T_{\text{on}}/(T_{\text{off}}+T_{\text{on}})=T_{\text{on}}/T$, 若 $\delta=0.5$, 即 $T_{\text{on}}=T/2$, 此时“死区”时间为零, VT_1 和 VT_2 有共同导通的可能, δ 值一般取 $0.4\sim 0.45$ 较为合理。

功率变换电路的集电极电流 I_c 由变压器激磁电流 i_o 和负载电流构成, 由于 $U_{N1}=Ldi_o/dt\approx E$, 所以 i_o 以线性规律变化。另外, 在开关的暂态过程中, 由于变压器副边整流二极管的反向恢复特性和整流电容而引起尖峰冲击电流。

推挽式功率变换电路的存在使高频开关变压器容易出现磁饱和现象, 也就是说会产生磁通不平衡导致变压器磁材的单向偏磁。由于偏磁进入饱和区后高频变压器绕组的电感量急剧下降, 功率开关管因电流过大而损坏。在推挽式功率变换电路中, 如果 VT_1 和 VT_2 的导通电阻 $r_{\text{DS(ON)}}$ 相等, 导通时间 T_{on} 也相等, 且施加在变压器原边中心抽头上的电压 E 在一定时间内是稳定的, 这时我们就称推挽式功率变换电路工作在平衡状态, 即有 $T_{\text{on1}}=T_{\text{on2}}$, $r_{\text{DS(1ON)}}=r_{\text{DS(2ON)}}$, 及流过 VT_1 和 VT_2 的导通电流也相等 $I_2=I_1$, 同时可以证明高频变压器的两个原边绕组在 VT_1 和 VT_2 各自导通时所施加的电压 V_1 和 V_2 相等, 因 $V_1=E-r_{\text{DS(1ON)}} I_1$, $V_2=E-r_{\text{DS(2ON)}} I_2$, 所以 $V_1=V_2$ 。

电路在平衡状态下, 高频变压器原边绕组上在两个导通的半个周期内所施加的电压 V 相同, 导通时间 T 也相同, 即伏·秒数值相同, 所以伏·秒数相等是高频变压器工作磁通对称不进入单向偏磁的关键条件。

造成电路在不平衡状态下工作的原因有两种。一种为 VT_1 和 VT_2 在各自导通时由于开关管导通电阻 $r_{\text{DS(ON)}}$ 值不同或变压器的两个原边绕组阻值不对称, 造成两个原边绕组施加的电压不同, 即 $V_1\neq V_2$ 。另一种原因是两只开关管导通时间不同, 即 $T_{\text{on1}}\neq T_{\text{on2}}$ 。这两种原因都会使推挽式功率变换电路失去平衡, 引起高频变压器磁心单向偏磁、饱和, 导致功率开关管的损坏。

(2) 全桥式功率变换电路。

功率开关管 VT_1 、 VT_2 、 VT_3 和 VT_4 构成全桥的两臂, 高频变压器 B 的原边绕组连接在桥的输出端。斜对角桥臂上的两只开关管 VT_1 、 VT_3 和 VT_2 及 VT_4 以 PWM 方式驱动交替导通和截止, 将高频变压器原边直流输入电压变换成高频方波交流电压, 全桥式功率变换电路的工作过程和推挽式功率变换电路相同。

当一组开关管 (如 VT_1 、 VT_3) 导通时, 另一组截止的开关管 (VT_2 、 VT_4) 上所加的电压等于输入电源电压 E 。当 4 个开关管都截止关断时, 每个管子只承受输入电路电压的一半即 $E/2$ 。电路中 $D_1\sim D_4$ 为电压箝位保护二极管, 由于高频变压器存在着漏感, 当开关管关断的瞬间引起的电压尖峰超过输入电源电压时, 反向并联在功率开关管漏和源极之间

的箝位二极管便快速导通，使漏极电压被箝位在输入电源电压上。

由全桥式电路的工作方式可以看出：高压开关管在稳态时，其最高施加电压即为输入电压 E ，高压开关管在暂态时，当一组功率开关管导通时，变压器漏感引起的尖峰电压也被箝位于 E ，比推挽式电路所承受的电压低一半还多。这就为高压开关管的选择带来了方便，而箝位二极管将过电压能量送回输入电源，也有利于转换效率的提高。由于功率开关管的耐压值要求较低，可以给出较大的电流，所以桥式变换电路可以得到较大的输出功率。

由于桥式电路需要 4 个功率开关管，所以也需要与之相对应的 4 组相互隔离的驱动电路。所用元器件数量多，电路较为复杂。另外，全桥式电路如果不采取抗不平衡措施，也同样会出现推挽式电路中高频变压器单向偏磁的现象。

（3）半桥式功率变换电路。

和桥式功率变换电路相似，半桥式功率变换电路由功率开关管 VT_1 和 VT_2 ，电容器 C_1 、 C_2 及高频变压器 B 组成，其整流滤波电路为常用的全波中心抽头式整流滤波电路。

VT_1 和 VT_2 由控制驱动电路以 PWM 方式使两只开关管轮流导通和截止。电容器 C_1 、 C_2 串联在输入电源正负极之间，由于 $C_1=C_2$ ，所以 A 点电压 $V_A=E/2$ 。半桥式电路在正常工作期间 A 点的电压在 $E/2\pm\Delta E$ 范围内移动，这是半桥式电路工作原理的特点。由于 VT_1 和 VT_2 相互导通时流过变压器原边绕组电流的方向相反，所以在高频变压器副边输出方波交流电。

① 当驱动信号使 VT_1 导通时，电源 E 通过 VT_1 ，变压器原边绕组为电容 C_2 充电，同时电容 C_1 通过 VT_1 、变压器原边绕组放电， C_2 的充电电流与 C_1 的放电电流在变压器原边绕组里的流向是一致的。当 VT_1 导通将要结束时， A 点的电位由于电容 C_2 的充电和 C_1 的放电而抬高到 ΔE 。

② 当 VT_2 导通时，电源 E 通过变压器原边绕组和 VT_2 为电容 C_1 充电，同时电容 C_2 通过变压器原边绕组和 VT_2 放电，当 VT_2 导通将要结束时， A 点的电位由于电容 C_1 的充电和 C_2 的放电而下降了 ΔE 。

半桥式功率变换电路与全桥式电路、推挽式电路的区别如下：

① 与全桥式电路相同， VT_1 导通时，截止的 VT_2 上施加的电压大致等于输入电源电压，在开关管截止关断时，变压器漏感引起的尖峰电压被二极管 D_1 与 D_2 箝位于电源电压。所以，功率开关管上的最高电压也不会超过电源电压，而且比全桥式电路少用两只功率开关管，驱动电流也比较简单。

② 由于变压器原边的输入电压只是输入电源电压的一半，与全桥式、推挽式电路相比，要输出相同的功率，开关管必须流过两倍的电流，所以对功率开关管的导通电流及导通电阻有一定的要求，半桥式功率变换器只适用于中等的输出功率。

③ 半桥式电路的最大特点是具有抗不平衡能力。其主要原因是输入电容 C_1 和 C_2 在充放电时能自动调整 C_1 和 C_2 分压点 A 的电压，使高频变压器在前半周期和后半周期工作的伏·秒数相等。

下面分两种情况简要说明半桥式电路的抗不平衡原理。

① 加在高频变压器原边的电压值相同时，也就是说 VT_1 和 VT_2 导通电阻和通过的电流相同，但两个开关管的导通时间不同，假设 VT_1 的导通时间 T_{on1} 大于 VT_2 的导通时间 T_{on2} 。由上述电路工作原理可知，在 VT_1 导通的前半个周期内，电源 E 通过 VT_1 和变压器原边为 C_2 充电；在 VT_2 导通的后半个周期内，电源 E 通过 VT_2 和变压器原边为 C_1 充电。由于 $T_{on1} > T_{on2}$ ，所以前半个周期充电时间长，A 点电位 V_A 大于 C_1 两端的电压 U_{C1} ，当后半周期 VT_2 导通时，虽然导通时间短，但由于 A 点电位 $V_A > E/2$ ，所以加在变压器原边电压 V_{C2} 的大小与前半个周期恰好相反，但时间与电压的乘积即伏·秒数相等，所以避免了单向偏磁现象。

② 开关管导通时间相同时，由于 VT_1 和 VT_2 导通电阻不同所以管压降也不同，根据半桥式电路的工作原理分析可知，管压降大的开关管所对着的电容上的充电电压高，管压降小的对着的电容上的充电电压低，其结果是实际加在变压器原边绕组上的电压值在前、后半周期保持相等，所以也就使得变压器磁心在一个周期内具有相等的伏·秒数。

由于半桥式电路的工作原理决定了其具有抗不平衡能力的特点，所以半桥式功率变换电路得到了较为广泛的应用。

(4) 时间比例控制稳压原理。

因为整流器（亦称稳压整流器）的一个重要性能是输出电压要稳定，因此引入时间比例控制概念，也就是整流器被称为稳压整流器的原因。

① 时间比例控制原理。

开关型稳压电源的功率开关以一定的时间间隔重复地接通和断开，输入电流断续地向负载提供能量。经过储能元件（电感 L 和电容 C ）的平滑作用，使负载得到连续而稳定的能量。实际上其原理仍然是将直流（ E ）变成交流（ U' ）再变成直流（ U_0 ）的过程。

改变开关接通时间 t_{on} 和工作周期 T 的比例，即可改变输出直流电压 U_0 。这种通过改变开关接通时间 t_{on} 和工作周期 T 的比例，亦即改变脉冲的占空比来调整输出电压的方法，称为“时间比例控制”（Time Ratio Control, TRC）。

② TRC 控制方式。

TRC 有三种实现方式，即脉冲宽度调制方式、脉冲频率调制方式和混合调制方式。

脉冲宽度调制（Pulse Width Modulation, PWM）：PWM 方式指开关工作周期恒定，通过改变脉冲宽度来改变占空比的方式。以上提到的 PWM 型功率变换电路就是指其稳压方式是让开关管工作频率固定（即周期不变），通过改变开关管在一个固定周期内导通时间（即宽度）来改变直流输出电压，最终达到输出电压稳定的目的。

脉冲频率调制（Pulse Frequency Modulation, PFM）：PFM 是指导通脉冲宽度恒定，通过改变开关工作频率（即工作周期）来改变占空比的方式。

混合调制：是指导通脉冲宽度和开关工作频率均不固定，彼此都能改变的方式，它是以上两种方式的组合。

③ PWM 控制原理简介。

一个简单的 PWM 控制电路的主控制部分由基准电压源 V_{ref} 、电压误差放大器、比较器（PWM 调制器）、振荡器（锯齿波发生器）和相应的驱动电路组成。

基准电压源 V_{ref} 为电压误差放大器的同相输入端提供一个较稳定的参考电压 V_{ref} ，一般 V_{ref} 值为 2.5V 左右。电压误差放大器接成反相输入放大方式，其反相输入端电压来自高频开关电源输出端的分压取样网络，其输出端与反相输入端之间的 R_3C_1 反馈网络是为了降低放大器的增益，有效地防止系统自激振荡而引入的负反馈。锯齿波发生电路由施密特触发振荡器、积分电容 C_2 及充放电电阻 R_2 和 R_4 组成。施密特触发振荡器的输出为方波，当输出端为方波的高电位时，二极管 D 反向截止，电源 V_C 经电阻 R_2 给电容 C_2 充电，充电时间常数取决于 R_2C_2 ，当 C_2 电压接近 V_C 时，施密特触发振荡器的输出由方波的高电位下降为低电位，此时二极管 D 正向导通，电容 C_2 经过电阻 R_4 及二极管 D 放电，放电时间取决于时间常数 R_4C_2 ，放电终止时电容 C_2 的电压值取决于放电电阻 R_4 和充电电阻 R_2 的比值，为了保证较大的动态调节范围，一般使 $R_4 \ll R_2$ 。施密特触发振荡器的输出频率即锯齿波频率，而锯齿波的上升斜率和下降斜率取决于充电电阻 R_2 和放电电阻 R_4 的阻值。为了得到线性度较好的锯齿波，一般电容 C_2 的取值较小。

PWM 调制器反相输入端的锯齿波电压与电压误差放大器输出的直流误差电压进行叠加比较，随着电压误差放大器输出的直流误差电压值的上下移动，PWM 调制器便输出不同宽度的驱动脉冲来实现调节电源的输出电压，使输出电压稳定在与基准电压 V_{ref} 相对应的电压值上。

（5）高频软开关功率变换技术。

开关电源的主要组成部分是 DC/DC 变换器，DC/DC 功率变换技术一直是全世界电力电子学科和行业研究的焦点。近年来，DC/DC 变换技术经过了一个由硬到软的过程。开关电源的开关管在工作状态下，电能损耗主要包括开关管开关过程的损耗和电路其他部分的静态损耗。电路的静态损耗基本上与整流器处理的功率成正比，相对比较固定。而开关损耗则是每开一次，就产生一份能量损耗。因此，开关频率越高，开关损耗就越大，开关管发热就越厉害，系统效率就越低。

为了使开关电源能够在高频下高效率地运行，20 世纪 80 年代提出了软开关的概念。所谓“软开关”的实质就是在硬开关上增加 LC 谐振电路，利用谐振技术，使开关电压在开通前就减小为零或在关断前使开关电流减小为零，限制开关电流上升的速度，以便使电流与电压的波形尽可能减小重叠，从而使开关变成零电压开关（Zero-Voltage Switching, ZVS）或零电流开关（Zero Current Switching, ZCS）。软开关的开通、关断损耗理想值为零。开关频率可提高到兆赫兹级，使开关电源体积和重量进一步显著减小。

软开关技术的应用到目前为止已经经历了谐振应用方式、准谐振应用方式等几个阶段。

谐振应用方式就是利用谐振原理使开关器件中的电流或电压按正弦规律变化，从而当

电流或电压自然过零时使开关器件关断或开通。准谐振方式也称边缘谐振技术,是在 PWM 开关上附加谐振网络,利用局部谐振实现 ZVS 或 ZCS 的。谐振和准谐振方式的特点都是将开关软化,减小器件电和热的应力,使高频化成为可能。但存在需要采用变频控制的缺点,因此控制方式不如 PWM 控制方便;而且变压器电感等磁性元件按最低频率设计,很难实现小型化。此外,由于频率变化,变压器、电感难以进行优化设计,工作状态不理想。

从 20 世纪 80 年代后期开始,软开关技术进入第三个阶段,就是将 PWM 技术和准谐振技术相结合,使变换器在一周期内,一部分时间按 ZCS 或 ZVS 准谐振变换器工作,另一部分时间按 PWM 变换器工作,这样,变换器既有电压过零或电流过零控制的软开关特点,又有 PWM 恒频调宽的特点。目前这种软开关方式主要有两种:零开关-PWM 变换和零转换-PWM 变换,这两种技术都是研究的热点,在一定程度上代表了电源功率变换的最高技术之一。零转换-PWM 变换器目前较多地停留在实验室阶段,零开关-PWM 变换则已经在全世界许多电源生产厂家中被广泛应用。

在脉冲宽度调制的 DC/DC 功率变换电路中,功率开关管是在有电压和电流时开通或关断的,这种开关方式称做硬开关。功率开关管若在其漏极、源极电压为零时导通,而导通电流降至零时才关断,这种开关方式就称做软开关,软开关工作过程中的开关损耗是很小的。软开关可分为零电压开关(ZVS)和零电流开关(ZCS)。

开关电路中电容和电感产生谐振是实现零电压开通和零电流关断的必要条件。当谐振电容两端电压为零时功率开关管开通、谐振电感中的电流为零时功率开关管关断则是完成软开关的最佳时机。

2. 高频开关元器件

在高频开关型整流器中,功率变换电路是其主要组成部分。高频开关整流器的工作频率实际上就是功率变换电路的工作频率,而它取决于开关管的工作频率。所以功率变换电路中高频开关管性能在整流器中起着至关重要的作用。目前高频开关整流器采用的高功率开关器件通常有功率 MOSFET、IGBT 管以及两者混合管、功率集成器件等。下面介绍常见的功率 MOSFET 与 IGBT 两种开关管。

(1) 功率场控晶体管(功率 MOSFET)。

金属氧化物半导体场效应晶体管(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET)即以金属层(M)的栅极隔着氧化层(O)利用电场的效应来控制半导体(S)的场效应晶体管。

MOSFET 按导电沟道可分为 P 沟道和 N 沟道,按栅极电压幅值可分为耗尽型和增强型。功率 MOSFET 是一种单极型电压控制器件,具有驱动功率小,工作速度快、无二次击穿和安全区宽等优点。功率 MOSFET 大都采用垂直导电结构(Vertical MOSFET, VMOSFET),按垂直导电结构的差异,又分为利用 V 型槽实现垂直导电的 VVMOSFET 和具有垂直导电双扩散 MOS 结构的 VDMOSFET(Vertical Double-diffused MOSFET)。

功率 MOSFET 的特性如下。

① 关于电流与电压。功率 MOSFET 电流以最大漏极电流为指标 (ID_{max})，它表示功率 MOSFET 工作在饱和状态的漏极电流量或某 V_{GS} 输出特性曲线平坦区域的电流值，决定 ID_{max} 的主要因素为单位管芯面积的沟道宽度，沟道宽度大则 ID_{max} 值大。功率 MOSFET 电压以漏极击穿电压 (BV_{DS}) 为指标，它表示漏区沟道体区 PN 结所允许的最高反偏电压，影响 BV_{DS} 的因素是漏极 PN 结的雪崩击穿机构和表面电场效应。

② 关于工作频率。功率开关器件最理想的控制电压波形是前后沿陡直的矩形波，而实际上在开通时，从截止状态到线性工作区再过渡到饱和区需要一段时间，反之亦然。显然所需延时越小，开关时间越短，开关速度越快。由于功率 MOSFET 为少子导电器件，在开关过程中载流子的存储时间不需要考虑，因而开关时间很短，故功率 MOSFET 的工作频率通常为 30~100kHz。由于功率 MOSFET 开关速度受输入电容及输入内阻影响较大，从而限制了工作频率的提高。

功率 MOSFET 的特点如下。

① 驱动功率小，驱动电路简单，功率增益高，开关速度快，不需要加反向偏置。

② 多个管子可并联工作，导通电阻具有正温度系数，具有自动均流能力。例如，并联组合管中某管芯电流增加时，其温度上升使其电阻增大，从而限制了电流的增长。

③ 开关速度受温度影响非常小，在高温运行时，不存在温度失控现象，其允许的工作温度可达 200℃。

④ 功率 MOSFET 无二次击穿问题。普通功率晶体管在高压大电流条件下进行切换时，易发生二次击穿。二次击穿指器件在一次击穿后电流进一步增加，并高速向低阻区移动。

(2) 绝缘门极晶体管 (IGBT 或 IGT)。

绝缘门极晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) 是由功率晶体管和绝缘栅型场效应管组成的复合全控型电压驱动式电力电子器件。

IGBT 的驱动由栅极电压来控制开通与关断。当栅极的正向电压驱动时，MOSFET 内形成沟道，且为 PNP 晶体管提供基极电流，使 IGBT 导通。此时基区扩展电阻减小，具有低通态压降。当栅极以负压驱动时，MOSFET 内沟道消失，PNP 晶体管基极电流被切断，IGBT 即被关断。

IGBT 管的主要特点如下。

① IGBT 管为混合器件，驱动功率容量小，也是一种电压型器件。

② 导通过程压降小，元件电流密度大，其电流等级为 10~400A，最高研究水平为 1000A，电压等级为 500~1400V。

③ 不足之处是 IGBT 关断时会出现约 1μs 的电流拖尾现象，所以关断时间长，使工作频率受到限制。克服拖尾现象的措施有研制高速 IGBT 管、应用软开关技术等。

3. 功率因数校正电路

(1) 无功功率因数校正电路的开关电源存在的主要问题。

开关整流器内部一般采用两级变换形式：首先通过整流、滤波电路将交流输入变为直

流,再通过 DC/DC 环节变为相应的直流电。由于前级的整流、滤波电路是一种线性元件和储能元件的组合,因此,从电网侧看来,开关整流器相当于一个容性负载,它使得电网供电发生严重畸变,不再是单一基波频率的正弦波,从而,造成谐波污染,导致噪声、误动作、振动、过热甚至烧毁等事故的发生,同时增加了配电系统和变压器的损耗、增大了中线电流(谐波),还能够严重干扰各种无线电通信的正常工作。

在无功率因数校正的开关电源中,交流输入电压经整流后,直接加到滤波电容器两端。只有交流输入电压高于滤波电容两端的电压时,滤波电容才开始充电,因此输入电流波形为宽度很窄的脉冲,这种电流的谐波分量很大。因为只有基波电流与输入电压同相位,基波电流有效值/与电网电流有效值之比较小,功率因数才会较低。

① 谐波电流污染电网,干扰其他用电设备,造成测量仪表产生较大的误差,还会使电动机产生较大的噪声。

② 在输出功率一定的条件下,输入电流有效值较大,因此必须增大输入熔断器、断路器和电源线的规格。

③ 特别应当指出,通信用开关型电源通常都采用三相五线制供电,三相电流的三次谐波分量是同相位的,同理,三相电流的六次、九次等谐波分量也是同相位的。由于三相电流都流过中线,当功率因数为1时,流过中线的电流为零;当功率因数很低时,中线内的电流很大。由于中线无过流保护装置,所以,中线有可能因过热而着火。

因此没有功率因数和谐波校正电路的开关型电源将逐渐被限制应用,设计制造功率因数接近1的开关电源已成为开关型电源发展的必然趋势。

(2) 有源功率因数校正电路的基本原理。

在开关型电源中,功率因数校正的基本方法有两种:无源功率因数校正和有源功率因数校正(Active Power Factor Corrector, APFC)。采用无源功率因数校正法时,应在开关电源输入端加入电感量很大的低频电感,以便减小滤波电容充电电流的尖峰。这种校正方法比较简单,但是校正效果不很理想。此外,采用无源功率因素校正法时,功率因数校正电感的体积很大,增加了开关电源的体积。

有源功率因数校正器是近一二十年来发展的一项新技术,它在整流电路和负载之间接入了一个 DC/DC 闭环开关变换器,其主要优点是可得到较高的功率因数。有源功率因数校正电路主要由桥式整流器、高频电感 L 、功率开关管 V_T 、二极管 V_D 、滤波电容 C 和控制器等部分组成。控制器主要由基准电源、低通滤波器、误差电压放大器、乘法器、电流检测与变换电路、电流放大器、锯齿波发生器、比较器和功率开关管驱动电路等部分组成。功率因数校正电路的输出电压经低通滤波器滤波后,加入误差放大器,与直流基准电压比较,两者之差经放大后,送入乘法器。为了使功率因数校正电路的输入电流为正弦波并且与电网电压同相位,市电电压经全波整流后,也加到乘法器。乘法器将输入电压信号与输出电压误差信号相乘后形成的基准电流信号,送入电流放大器。

电流取样电阻 R_s 两端的电压正比于功率因数校正电路的输入电流。 R_s 两端的电压(输

入电流)反馈信号加到电流放大器,与乘法器输出的基准电流信号相减,形成的误差信号经电流放大器放大后,与锯齿波发生器产生的锯齿波电压一起加入比较器C,经比较后,形成PWM信号。该信号经驱动电路放大后,控制功率开关管 V_T 导通或关断,使输入电流跟踪基准电流信号变化。 V_T 导通后,高频电感 L 中的电流化(也即功率因数校正电路输入电流)线性上升。当 i_L 波形与整流后的市电电压波形相交时,通过控制器使 V_T 关断。此时,电感两端的自感电势使二极管 V_D 导通,电感 L 通过 V_D 对电容放电,电感中的电流化线性下降。当 i_L 下降到零后,控制电路使 V_T 再次导通,上述过程重复。在该电路中,由于基准电流信号同时受输入交流电压和输出直流电压控制,因此当实际电流与基准电流一致时,该电路既可实现输出电压恒定,又能保证输入电流为正弦波并且与输入电网电压同相位,从而使功率因数接近于1。

从有源功率因数校正电路输入电压和电流波形可以看出,输入电流平均值 I_{ave} 的波形始终跟随输入电压的波形,因此功率因数接近于1。

对于三相有源功率因数校正电路有单相综合式和三相一体化等形式。单相综合式有源功率因数校正就是整流器输入为三个单相输入组成的三相,其有源校正可用三个单相有源校正电路组合。单相综合校正的缺点是元件较多,可靠性较差,现在已逐渐不予采用。三相一体化有源功率因数校正就是整流器输入为三相带零线或不带零线,其有源校正可用三相一体化的校正电路。

4. 负载电流的均分电路

目前单个开关整流模块的额定输出电流可以达到100~200A,而很多大型通信局(站)的最大负载电流可达1000~2000A,如满足这样的负载要求,就需要多台开关整流模块并联工作,才能实现大功率电流系统供电;另外,通过多台整流模块的并联冗余,还可提高通信电源系统的可靠性。因此,通信局(站)所用的高频开关电源系统都是由若干个高频开关整流器模块安装在一个或几个整流机架上,以并联方式向负载供电的。同时,要求每台整流器模块能够平均分担电源系统输出的总功率。

由于所有整流器的输出端都是相互并联的,输出电压相同,要达到功率均分实际上就是要求每个整流器输出的电流相同或按比例均分电流。负载均分电路有简单负载均分电路、主从负载均分电路和自动平均均流电路等。

关于简单负载均分电路方式。当负载所需的电流不大,且并联的整流器数量较少时,可采取简单的限流并联方式来达到一定的均流效果。这种并联均流方式首先要把并联的各台整流器在同样的输出电流下,将输出电压尽可能调节到相互接近的电压值上,而且各台整流器输出端与负载之间的连线电阻应尽可能对称。因为这种简单的并联均流的效果主要取决于上述条件。当电源合闸开机时,先启动的和输出电压稍高一些的整流器会出现短暂的限流现象,当第一台整流器进入限流时,其输出电压稍有下降,下降到和第二台整流器输出电压相同时,第二台整流器便开始向负载供电,当负载电流大于两台整流器输出电流之和时,第二台整流器也进入限流,输出电压再下降到和第三台整流器输出电压相等,第

三台整流器开始向负载供电，以此类推。当电源系统输出电流达到负载要求时，启动过程便结束，并联的各台整流器将按照初始时调节的状态均流工作。由此可以看出，参与并联供电的整流器必须具有限流保护功能。这种均流方法简单易行，但并联的整流器数量不宜过多，否则调节输出电压时较麻烦，而且要求并联整流器为相同型号，各台整流器的电压-电流外特性基本一致。同时对各台整流器的动态特性要求也基本一致，避免负载电流突然增加时，造成瞬时均流失调，使电源系统的输出电压大幅度下降。而且当电源系统的输出电流有较大变化时，原先所调节好的均流度可能会变差，而且在初始调节后经过一段时间的运行，由于各台整流器的参数略有变化，或由于温度的变化等，都会引起均流度的变化。所以还需要对各整流器的均流在原有的基础上再进行一次细调。用于这种并联均流方式工作的整流器单机输出电流不宜过大，否则由于某种原因引起系统均流失调时，单个整流器的输出负载将过大。

关于主从负载均分电路方式。整流器 P_1 为主电源， P_2 、 P_3 等整流器的输出电流都以主电源 P_1 的输出电流在取样电阻 R_M 上的压降为电流基准，对各自的输出电流跟踪主电源 P_1 的输出电流进行调节，当负载电流增大时，主电源 P_1 的输出电流在取样电阻 R_M 上的压降也增大，使从电源 P_2 和 P_3 等的电流误差放大器的输出去改变 PWM 控制器的驱动脉冲宽度，以达到输出电压的微小调节，直到其输出电流在取样电阻 R_s 上的压降与主电源 P_1 的取样电阻上的压降相同，此时各台整流器的输出电流与主电源 P_1 相同。这种均流方式只要各台电源的电流取样电阻的阻值相同，并且每台电源输出端接到汇流排上的导线长度相等，汇流排的直流电阻足够小时，无论电源系统的输出电压或负载电流怎样变化，各台并联的整流器电源输出的电流都基本相同。这种并联主从均流方式的缺点是当主电源 P_1 发生故障时，电源系统也会出现故障。

自动平均均流电路方式应用较为普遍，其工作原理是把参与并联工作的整流器内部的电流取样电压 V_s ，通过各自的均流电阻 R_a 全部连到电源系统的均流总线上，由于各台整流器内部的取样电阻 R_s 和均流电阻 R_a 的阻值都相等，所以在均流总线上得到的电压值是各台整流器电流取样电压的平均值， P_1 、 P_2 、 P_3 为参与并联的各台整流器，电源系统输出电压为各台整流模块输出电压的并联值， V_a 为均流总线上的平均电流取样电压，此电压与各台整流模块内电流取样电阻 R_s 的比值，即为每台整流模块输出的电流值。

5. 滤波电路

(1) 高频开关整流器滤波电路。

高频开关整流器的工作过程与线性稳压电源完全不同，对滤波也有特殊的要求。一般由输入滤波、工频滤波、输出滤波以及防辐射干扰等几个基本电路组成。

① **输入滤波电路。**输入滤波是接在交流电网和开关整流器输入之间的滤波装置，其作用是抑制交流电网中的高频干扰串入整流器，同时也抑制整流器本身对交流电网的反干扰。

② **工频滤波电路。**工频滤波器（又称平滑滤波器）是接在工频整流器与逆变电路之

间的。工频滤波除了将工频整流后的脉动电流变为平滑直流外，同时还能抑制一些高频干扰。与输入滤波类似，其滤波电路也主要由电容和电感组合构成，但因为是工频滤波，频率较低，所以滤波元件的取值和体积都比较大。

③ **输出滤波电路**。输出滤波电路接在整流器与负载之间，但由于输出端是一种低电压大电流的工作状态，故对输出滤波元件的选用需要考虑多方影响因素。例如，在高频开关电源中，因电流尖峰的存在，使实际加在电容两端的频率远高于其工作频率；而在电感绕组中则存在串联电阻和绕组间的分布电容等。

(2) 高频开关整流器的电磁兼容性。

当今各种电子设备的射频干扰功率越来越大，同时电子设备本身的灵敏度也越来越高，所以相互之间的影响也越来越大。因此，需要考虑电子设备的电磁兼容问题。电磁兼容性（Electro Magnetic Compatibility, EMC）是指设备或系统在其运行电磁环境中符合要求运行并且不对其环境中的任何其他设备产生无法忍受的电磁干扰的能力。因此，EMC包括两个方面的要求：一方面是指设备在正常运行过程中对所在环境产生的电磁干扰（Electro Magnetic Interference, EMI）不能超过一定的限值；另一方面是指设备对所在环境中存在的电磁干扰具有一定程度的抗扰度，即电磁敏感性（Electro Magnetic Susceptibility, EMS）。

在高频开关电源中，高频开关管、功率变换变压器等器件中的电流、电压值的高速变，构成了电磁干扰。与其他干扰一样，开关电源的噪声是以静电和磁场的形式向外传播的，静电干扰来自电源中的高压切换，磁的或电磁的噪声则起源于大的脉冲电流。

高频开关整流器处于市电网和通信设备之间，它与市电网和通信设备都有着双向的电磁干扰，归纳起来有以下一些影响：

- ① 通信设备由于开关整流器产生的噪声而受到影响；
- ② 开关整流器对市电网的反灌污染；
- ③ 开关整流器向空间传播噪声，以及开关整流器产生的噪声对自身的影响；
- ④ 外来噪声（包括空间和输入市电线路）使开关整流器的控制电路产生误动作。

对于高频开关整流器内部电路而言，为了抑制噪声影响自身和外界，一般采用滤波、屏蔽、接地、布局、电磁兼容性能更好的元件和电路等。另外，在安装开关电源时，需要注意输入线路和输出线路的隔离、机架地线和信号地线分开、配置必要的输入浪涌抑制等，以改善电磁干扰的影响程度。

由于大功率开关管一般工作在高压大电流的情况下，需要借助体积较大的散热器来降低管温，以提高管子的工作效率。为了安全和维修的方便，在开关管和散热器间加绝缘导热材料，但绝缘导热层并不能消除由于开关管引起的噪声干扰通过分布电容耦合到散热器而发射出去，如果在开关管与大散热器之间插入静电隔离层，并将隔离层正确接地，就可以很好地抑制开关电源的噪声通过散热器及机壳向外传递。

6. 保护电路

高频开关整流器的输入、输出保护功能是必不可少的，其输入端保护主要是针对输入

电源电压过高和瞬时尖峰电压对高频开关整流器输入回路及功率开关管的损坏。输出端保护主要是输出电流限制保护，整流器输出端负载的短路或严重过载都会造成整流器输出端和变换器的损坏。

(1) 输入瞬态过压保护。

高频开关整流器的输入端产生瞬态过电压的主要原因是电网上的电感性用电设备的开关雷雨天气时的雷电感应等都会在电网电压上叠加尖峰电压。这种尖峰电压的幅度可达数千伏，其能量有强有弱，一般雷电引起的尖峰电压的能量较强，可对整流器造成严重的损坏。为了防止瞬间过电压对电源造成的损坏，通常在整流器的输入电路并联金属氧化锌压敏电阻，其前面的电路为共模、差模滤波器，当尖峰电压由交流输入口窜入电源经过滤波器后有了一定的衰减，如果衰减后的电压尖峰值仍然大于压敏电阻的压敏电压值，则压敏电阻的阻值急剧下降，把尖峰电压的能量吸收掉，从而使电源输入端得到保护。选择压敏电阻一定要合理选择其连续工作电压值，由于压敏电阻击穿电压值的离散性较大，所以选择其连续工作电压值时一般要高于整流器输入电压上限值的 20% 左右，而且要按估算最大吸收能量来选择压敏电阻的允许吸收能量。

(2) 启动冲击电流限制。

高频开关整流器的输入电路实际上就是一个高压整流滤波器。交流输入端的开关合闸供电的瞬间，由于滤波电容器的零电压初始状态，将导致合闸瞬间产生很大的电容充电浪涌电流，此电流峰值的大小与合闸瞬间交流电压的相位及输入滤波回路的内阻有关，如输入滤波电感及回路导线的直流电阻值。当处于正弦波电压峰值时合闸，将会产生数百安培的浪涌电流。滤波电容的容量大小决定了浪涌电流持续时间的长短。由于高频开关整流器输出时间保持能力的需要，一般输入滤波电容的容量在 $1000\mu\text{F}$ 以上，所以合闸浪涌电流持续时间也较长。这样大的浪涌电流对电源的开关触点会造成瞬时拉弧熔化，甚至被焊接使开关操作失效，尤其现在以采用多台整流器模块并联方式工作的电源系统如不采取启动限流措施，将会对市电电网造成很大的冲击，短时间机房电压严重下跌，使其他用电设备无法正常工作，甚至造成机房交流配电屏跳闸。所以对组成电源系统的每台整流器模块必须采取有效措施，限制其产生合闸浪涌电流。

最常用的限制合闸浪涌电流的方法就是在滤波电容充电回路中短时间串联限流电阻，即在合闸时先接入限流电阻，将合闸浪涌电流限制在设定范围内，待电容充满电后，再将该电阻短接。

(3) 输出电压软启动。

输出电压软启动主要是指高频开关整流器在启动时，其输出电压在一定时间内应有一个缓慢上升的过程，直到稳定输出电压建立。高频开关整流器之所以要求具有这样的启动过程，主要是因为其输出滤波电容较大，一般为几千微法。而且整流器的负载输入端也有较大的输入滤波电容，如果整流器输出电压突然建立到额定值，将会在短时间内形成很大的电容充电电流。这样大的充电电流无论对整流二极管或 DC/DC 变换器的功率开关管都

会造成严重的过流冲击，这样的过流冲击往往会产生过流保护及短路保护电路动作，影响电源的正常启动。

高频开关电源输出电压软启动的控制过程与上述的启动冲击电流限制控制的原理不同，其基本原理是通过控制功率变换电路的输出来实现输出电压的软启动。就是在电源启动时，使功率开关管的驱动脉冲宽度从零开始缓慢地展宽到额定输出电压所对应的宽度来实现。通常使用的软启动功能是利用控制电路中的电容器充电特性（电容充电电压逐渐上升特性）来实现的。

另外，还有输入端合闸浪涌电流抑制电路，这两部分电路对高频开关整流器整机软启动来说是缺一不可的。这两部分软启动电路的工作顺序应考虑到合理的配合，也就是当输入滤波电容充电结束、限流电阻被旁路后，上述的输出电压软启动电路才开始工作，输出电压由零开始逐渐达到额定值，这样才能实现电源整机的软启动。

（4）输出过流保护。

稳压电源正常工作时，其供给负载的输出电流在额定值之内时应确保电源正常工作。当负载功率过大或由于故障发生严重过流甚至短路时，将会造成电源输出电流无法控制地增大，使电源过载损坏。所以电源必须具有限流保护功能，以保护电源输出过流时不会损坏。电源的限流保护形式一般分为切断式过流保护和限流式过流保护，针对不同工作方式的电源采取不同的保护方式。

关于切断式过流保护。对于串联线性稳压电源，由于电压调整管串联在电源输入与输出之间，当输出电流超出额定值时，电压调整管的功耗也将超过额定功耗呈线性增长，尤其是输出端短路时，电压调整管所承受的功耗是输入电压与短路电流的乘积，此时电压调整管的功耗是额定功耗的几倍或十几倍，对这种串联线性稳压电源必须采取切断式保护，即过流检测电路将检测到的过流信号电压经过比较放大后关闭电压调整管控制电路，关断电源输出一般不能自动恢复工作，必须改变状态保持元件或电路的状态，即必须重新启动电源才能恢复正常输出，或使控制电路手动复位。

关于限流式过流保护。与切断式过流保护不同，限流式过流保护不是使整个控制电路失效，而是通过控制输出电压随负载变化，使输出电流不超过限定值。对于通信应用中的高频开关整流器来说，其输出端的负载大多数是蓄电池和交换设备，蓄电池要求在恒流限压方式下进行充电，而交换设备基本上是恒功率输入方式（即输入电流与输入电压成反比）。由于这种负载的特殊性，所以要求高频开关整流器在输出过流时，必须能以限流方式工作，即输出电流超过额定值时，限流保护电路的输出电压将 PWM 控制器的输出脉冲宽度限制在一定宽度之间，以保证整流器的输出电压与负载电阻之比等于输出额定电流值。

能实现上述限流保护功能的电路形式很多，但其限流保护原理基本相同，即都是通过电流取样转换为对应的电压值，与额定电流流过取样电阻所产生的电压值相比较，当电流取样电压大于额定电流所产生的电压值时，限流保护电路的输出电压将限制 DC/DC 变换器功率开关管的 PWM 驱动脉冲宽度，使输出电压随着负载电阻的减小而降低，从而使输

出电流被限制在预先设定的限流值上。对一些可靠性要求较高的大功率高频开关整流器一般都需设置双重限流保护功能。

限流式保护还可以用来抑制稳压电源启动时的输出浪涌电流，同时，也是开关电源实现并联运行，组成 $N+1$ 直流供电系统的条件要求之一。

关于限流-切断式保护。限流-切断式保护电路分两阶段进行，当负载电流达到某设定值时，保护电路动作，输出电压下降，负载电流被限制；如果负载电流继续增大至第一个设定值或输出电压下降到某设定值时，保护电路进一步动作，将电源切断。这是上述两种保护方式的结合。

(5) 输出过压保护。

输出过电压保护对开关型稳压电源是至关重要的，这完全是由于负载的需要。

对于常规稳压电源。特别是串联开关稳压电源，一旦串联功率开关管穿透，全部输入电压立即施加到输出，引起输出过电压。因此过电压保护电路必须在其达到输出电压的危险值以前，迅速将电源切断。显然，对于上述的过电保护方式不能采取截止功率开关管的方法，而必须切断输入电压。为了获得快的保护速度。通常采用晶闸管等构成无触点继电器保护电路，一旦过压，触发晶闸管导通，将输入电压短路。同时，浪涌电流也会将串在输入回路内的保险丝熔断。

对于 PWM 型开关稳压电源，在高压开关管损坏时，不论是穿透还是断开，输出电压都将下降到零，且不会有过电压输出。只有在控制电路发生故障时，才有可能产生输出过电压，但可以采用截止高压开关管的办法来切断电源输出，这样的保护电路实现也比较容易。

3.1.3 开关电源的使用与维护

1. 开关电源系统简述

目前通信用高频开关型整流器一般做成模块的形式，由交流配电单元、直流配电单元、整流模块单元和监控模块单元组成开关电源系统。

(1) 交流配电单元。

交流配电单元将三相五线制市电接入，经过切换送入系统，交流电经分配单元分配后，分别可供开关整流器设备和其他交流用电设备使用。系统可以由两路市电（或一路市电一路油机）供电，两路市电主备工作方式，平时由市电 1 供电，当市电 1 发生故障时，切换到市电 2（或者油机），在切换过程中，通信设备的供电由蓄电池来供给。两路市电输入切换要求有机械或者电器互锁，防止两路交流输入短接。两者的切换在小系统中一般用电气自动切换，大系统中一般用手动切换。

开关电源系统的防雷电路在交流配电单元中，其中，交流防雷关系到整个电源系统的安全。交流配电单元内应有监控的取样、检测、显示、告警及通信的功能。另外，在交流断电的情况下，交流配电单元提供一路直流应急照明输出。

归纳起来，交流配电单元（屏）通常由以下几个部分组成。

① 交流接入电路。交流接入一般通过空气开关或刀闸开关，交流接入开关的容量即为交流配电单元的容量。

② 整流器交流输入开关。交流配电单元分别为系统的每一个整流器提供一路交流输入，开关容量根据整流器容量确定。

③ 交流辅助输出开关。电源系统的交流配电除了给整流器提供交流电外，还配置了多种容量的交流输出接口，供机房内其他交流用电设备使用。

④ 交流自动切换机构。由机械电子双重互锁的接触器组成。

⑤ 交流采样电路。由变压器和整流器件组成的电路板，将交流电压、电流和频率等转换成监控电路可以处理的电信号。

⑥ 交流切换控制电路。完成两路交流自动切换、过欠压保护、告警等功能。

⑦ 交流监控电路。集散式监控中专门处理交流配电各种信息的微处理器电路，可以完成信号检测、处理、告警、显示以及与监控模块通信等功能。

⑧ 防雷与浪涌抑制电路。

（2）直流配电单元。

直流配电单元完成直流的分配和备用电池组的接入。开关整流模块的输出经汇流母排接入直流配电单元，配电单元为负载分配不同容量的输出，可满足不同的需要：后备电池组的输入与开关整流模块输出汇流母排并联，以保证开关整流器无输出时，后备电池组能向负载供电。

一个开关电源系统根据情况配有一组或两组蓄电池。除了串有相应的保护熔丝以外，直流配电单元对蓄电池组还具有低压脱离（Low Voltage Disconnected, LVD）的保护装置。当整流模块停机，由蓄电池组单独对外界负载放电时，随着放电时间的延长，电池的输出电压会越来越低，当电池电压达到一个事先设定的保护电压值时，为了保护电池组不至于过放电而损坏，低压脱离装置动作，从而断开了电池组与系统的连线，此时系统供电将会中断。这种情况将造成重大的通信事故，所以应加强系统的日常维护工作，避免蓄电池组长时间放电。

直流配电单元的技术关键在于保证屏内压降的较小值，测量数据的准确显示和监控的可靠实现。内部的布局能根据用户的需求不同灵活改变，方便工程开局，上下出线均可。

（3）整流模块单元。

整流模块单元部分的功能是将由交流配电单元提供的交流电转换成48V或者24V直流电输出到直流配电单元。整流模块单元部分包括整流模块和模块机架。

高频开关型整流模块或整流器采用MOSFET和IGBT等新一代开关器件，工作频率大多高于20kHz，体积和重量大幅度下降，消除了噪声；在采用功率因数校正技术后，提高了功率因数，使之接近1。由于电力电子技术的长足发展，不断有新技术应用在高频开关整流器上。

整流模块机架一方面给了整流模块一个安装结构上的支撑,另一方面,整流模块机架有汇流母排,将各个整流模块的直流输出汇接至直流配电单元。

由于一个开关电源系统具有多个整流模块,所以多个整流模块工作时有一个相互协调的问题,包括多个整流模块工作时合理分配负载电流,即均流功能。其中某个整流模块出现输出高压时,该模块能正常退出而不影响其他模块的工作,即选择性过电压停机功能等。当系统的整流器模块不是满配置时,应将单相供电的整流器模块尽量平均分配在输入二相上,使每相上挂接的整流器个数基本相同,从而基本上保证三相输入的平衡。

(4) 监控模块单元。

监控模块单元是整个开关电源系统的“总指挥”,它监控各个模块的工作情况,协调各模块正常工作。监控单元主要实现对开关电源系统的信息查询、参数设置、系统控制、告警处理、电池管理和后台通信等功能。

监控模块单元内部与各模块之间通信一般采用 RS485 接口方式,RS485 支持点对多点通信,因此,一般需要给各被监控模块设置通信“地址”。监控单元对外可提供 RS232/RS422/RS485 等多种通信接口,可通过 Modem 或其他方式实现集中监控。监控单元向后台 PC 上报现场数据和状态,同时也接收来自后台 PC 的控制指令并加以执行。

从监控对象的角度,监控模块分为交流配电单元监控单元、整流模块监控单元、蓄电池组监控单元、直流配电单元监控单元等功能单元。

① **交流配电单元监控单元。**监测三相交流输入电压值是否过高或过低、有无缺相、有无停电以及频率值、电流值等情况。另外,还可以监控交流接触器的工作状态、主交流输入空开状态和交流防雷器工作状态等。

② **整流模块监控单元。**监测整流模块的输出直流电压、各模块电流及总输出电流,各模块开关机控制、整流器稳压限流控制、整流器的均浮充状态控制和整流器散热风扇控制等。整流模块一般有两种设定的电压:浮充电压和均充电压。日常以输出浮充电压为主,在浮充了一段时间或因蓄电池组放出一定电量后,就需要自动转入输出更高电压的均充电压,当然浮充与均充状态的切换也可以手动进行。另外,整流模块一般工作在稳压状态,当负载电流太大时,整流模块将自动进入“限流状态”,直到负载电流减小到正常范围以内后重新进入正常的稳压状态。整流模块限流值可事先在允许限流范围内设定具体的值。

③ **蓄电池组监控单元。**监测蓄电池组总电压、充电电流或放电电流,记录放电时间以及放电容量、电池温度,蓄电池组均充周期的控制、均充时间的控制和蓄电池温度补偿的控制等。根据事先设定的脱离保护电压和恢复电压控制蓄电池组 LVD 脱离保护和复位恢复。监控单元按照周期性均充和停电后来电均充两种方式对蓄电池充电的过程进行管理。周期性均充方式是指系统根据用户的设定周期和均充的时间自动对蓄电池均充充电,停电后来电均充方式是指停电后电池放电,放电达到一定程度(由用户设定)又来电,自动对蓄电池组进行充电管理控制。蓄电池温度补偿是指蓄电池充电的最佳电压会随着温度的变化而改变,监控单元能根据温度的变化控制整流模块动态地调整输出电压以满足电池最佳

充电电压的要求。有些高频开关电源系统还具有“二次下电”功能。当市电断电时，负载由蓄电池供电，当电池电压下降到一定程度时（可由用户自行设定）发出报警；当蓄电池进一步放电，电池电压低于用户设定值时，可按用户设定先切断一组次要负载，电池进一步放电达到最终的保护电压时，再切断另一组负载，保护蓄电池不致过放损坏。这样一方面可在停电后维持主要负载有较长的备用时间，另一方面可以保护蓄电池不至于过放损坏。

④ 直流配电单元监控单元。直流配电单元监控单元监测系统总输出电压、总输出电流、各负载分路电流以及各负载分路熔丝和开关情况。

2. 高频开关型整流器的主要技术指标

(1) 效率。

开关整流器效率是指整流模块输出有功功率与输入有功功率之比。

效率的提高不仅意味着节约能源，也意味着减少损耗（即发热量的降低），从而促使整流器可靠性或功率密度的提高。一般整流器模块的效率在 50%~100% 负载下测量。当模块的输出最大功率 $\geq 1500\text{W}$ 时，效率应 $\geq 90\%$ ；当模块的输出最大功率 $< 1500\text{W}$ 时，效率应 $\geq 85\%$ 。

(2) 直流输出电压及其调节范围。

高频开关型整流器能自动稳压并具有浮充和均充的自动转换功能。

整流器的作用是将交流转换成直流对电池充电，并对并联在一起的通信负载供电。其直流输出电压主要应符合电池浮充、均充、初充和放电后再充电的需要。

(3) 稳压精度。

开关整流模块的稳压精度要求 $\leq \pm 0.6\%$ 。

高频开关型整流器的稳压精度要求也是针对电池的要求来的，因为稳压精度低，无异于浮充电压设置值的不准确。浮充电压的设置不当或温度补偿作用的削弱，都会对阀控式电池的漏电流有影响，甚至在极端情况下也可能造成电池的热失控，故稳压精度宜优于 1%。

(4) 浮充工作时的温度补偿。

由于阀控式电池漏电流对温度的敏感性，因此常用温度补偿的办法来抑制漏电流的恶性增长，即当温度升高时，采用降低浮充电压的办法来平衡漏电流的增加。温度补偿的电压值通常为温度每升高/降低 1°C ，电压降低/升高 3mV （每只电池），即在一定温度区间内电压-温度关系是按一定比例关系补偿的。

(5) 输出端杂音电压。

杂音电压是周期性函数，如果用快速傅里叶变换来分析，或用频谱仪来测量，可以得到一系列离散频率的功率频谱或电压频谱。但衡量这些杂音电压的影响，通常采用衡重杂音、峰峰杂音、宽频杂音、窄频杂音和离散杂音等来表示，其中衡重杂音要求 $\leq 2\text{mV}$ （符合 ITU-T 建议）。

(6) 其他技术指标。

① 并机均流性能。同型号的整流模块应能多模块并联工作，并具有按比例均分负载

性能,其不平衡度应 $\leq\pm 5\%$ 输出额定电流值。

② 限流性能。整流模块在30%~110%额定输出电流的范围内,可连续调整限流值。

③ 具有电压或电流软启动性能。整流器启动时输入电流的超调不应超过额定电流的10%,对于超调电流大的设备应逐台启动控制。

④ 具有系统监控单元,能提供满足三遥要求的本地和远端用户通信接口。

⑤ 有过压、过流、欠压、欠流、防雷等保护及本地和远端告警。

⑥ 工作稳定性。市电或油机发电机机组供电并带有电池工作时应均能稳定工作、不振荡。

⑦ 整流模块的功率因数应 ≥ 0.90 。

3. 开关电源系统的操作

(1) 监控单元日常操作。

监控单元在开关电源系统中负责协调系统其他模块单元的正常工作,日常对开关电源系统的操作一般也集中在对监控单元的操作上。

对监控单元的日常操作也就是对其菜单的操作。下面对48V直流监控单元的典型菜单和操作加以介绍。在本节中出现的有关整流模块等参数均以某型号开关电源系统监控单元的参数为例,示例参数仅供参考,请根据实际通信局(站)维护规定要求设置参数。

① 系统状态及实时数据查询。一般在监控单元的首页会显示:系统输出电压、系统输出电流和系统状态等常规内容。同时,首页一般还会提示有无告警信息以及进入详细菜单的途径。

② 参数设置及系统管理。监控单元操作中,参数子菜单的设定内容是最多的,而且要求有足够的开关电源系统专业知识才能够准确地操作设定相关参数,有些开关电源系统要进入参数的设定必须要具有一定权限的密码以保证系统的安全性。

(2) 开关电源系统的扩容与增载。

① 开关电源系统的模块扩容。当开关电源系统模块配置小于额定容量时,模块机架或机柜上的模块安装槽位是空闲的,为了不影响整机的美观,模块空闲槽位一般用假面板装饰。当用户对系统进行扩容时,就需要拆除相应的假面板,以便插装新的整流模块。

加装新模块时,将整流模块插入空槽位并固定。安装过程中严格按照“先安装后通电,先断电后拆卸”的顺序进行。安装好新模块后,通常需要在监控模块中设置相应的模块参数。

② 开关电源系统的负载增加。电源设备在安装运行初期,往往负载没有全部投入运行,而通信负载运行后一般不容许断电,因此新增负载设备接入时必须带点操作。

增加直流负载首先应做好施工设计,选定将使用的负载熔丝(熔断器)或空气开关。电缆连接操作先从负载端开始,连接次序为先接地线,后接-48V输出熔丝或空气开关。连接前,需用熔丝手柄拔下直流输出支路的熔丝,或将空气开关打到断开的位置,使用的操作工具必须经过绝缘处理,并且要制定可能发生事故的处理对策。

应根据具体的走线路径和负载容量，选择电缆的长度和线径。负载电缆正、负极应有明显的颜色区分，一般正极为黑色，负极为蓝色。若电缆只有一种颜色，应有线号标记或在电缆线两端用不同颜色的绝缘胶布进行标识。电源线缆应该整段裁剪，不得在中间接头，负载电缆、信号电缆及用户电缆应尽可能分开，以免相互影响。

一定容量的负载线应接在相应容量的熔丝或空开上，以防止熔丝或空气开关保险过大，负载短路时保险起不到作用。一般熔丝容量或空气开关容量选择为负载峰值的两倍左右。

4. 开关电源系统的维护与检修

(1) 开关电源系统的日常维护。

高频开关电源各整流模块不宜工作在 20% 负载以下，如系统配置冗余较大可轮流关掉部分整流器以调整负荷比例，作为冷备份的模块宜放置在机架下方。高频开关型变流电源设备宜放置在有空调的机房，机房温度不宜超过 28℃。

对高频开关电源设备及其他变流设备的一般性维护要求如下。

① 输入电压的变化范围应在允许工作电压变动的范围之内。工作电流不应超过额定值，各种自动、告警和保护功能均应正常。

② 宜在稳压并机均分负荷的方式下运行。

③ 要保持布线整齐，各种开关、熔断器、插接件、接线端子等部位应接触良好、无电蚀。

④ 机壳应有良好的接地。

备用电路板、备用模块应每年定期实验一次，保持性能良好。

开关电源维护周期可分为月、季、半年和年，相应的维护项目内容如下。

开关电源的月维护项目有：

- ① 检查浮充电压、电流是否正常；
- ② 检查模块液晶屏显示功能是否正常、翻看告警记录；
- ③ 测量直流熔断器压降或温升、汇流排的温升有无异常；
- ④ 检查各模块负载均分性能；
- ⑤ 检查各整流模块风扇运转是否正常；
- ⑥ 清洁设备，特别注意风扇、滤网的清洁，保证无积尘。

开关电源的季维护项目有：

- ① 检查系统直流输出限流保护功能；
- ② 检查整流器各告警点设置，测试必要的告警功能；
- ③ 测试系统自动均浮充转换功能；
- ④ 检查各项电池管理功能，并调整均浮充电压、充电限流、均充周期及持续时间等各项参数，校对均浮充电压设定值；
- ⑤ 检查各开关、继电器、熔断器以及各接触元器件是否正常工作，容量是否匹配（包

括交直流配电屏)：

⑥ 测量中性线电流以及对地电压；

⑦ 检查防雷设备是否正常。

开关电源的半年维护项目有：测试系统自启动功能。

开关电源的年维护项目有：

① 测量衡重杂音电压；

② 校准系统电压、电流值；

③ 检查各机架接地保护是否紧固牢靠；

④ 测试备用模块。

(2) 高频开关型整流器的检修。

高频开关型整流器在其运行过程中，由于各种原因（如使用方法、使用环境、负载情况及整流器本身的设计或制造等问题）都会使整流器出现故障或损坏。整流器的轻微故障或一般故障经专业维修人员修理后均可再投入运行，对于遭受严重破坏的整流器来说，如遭受强雷击等，其维修的工作量及成本都是较高的，必要时应更换新整流器。

① 基本检修。

模块更换。一般情况下，禁止将模块随意拔出，只有在模块发生故障必须更换或对模块检修改造和软件升级时，才进行检修模块的插拔动作。在装入和取出模块时需注意小心轻放，特别是在模块体积和重量较大时。

风扇检修。由于模块长期连续地运行工作，会有灰尘等在风扇上积累。为了保证模块长期可靠稳定地运行，必须定期对风扇进行清洗和除尘。风扇是损耗件，运行到一定时间，可能需要进行清洗和更换。日常维护中需经常检查开关模块的表面温度，如温度较高，需检查是否是由模块的风扇冷却系统引起的。

② 应急处理。

一般到现场排除紧急故障时，对于由个别整流模块故障引起的故障，通常采取整流模块整机更换方式来排除直流供电系统的故障，在更换整流器时，直流供电系统不得停止对通信设备的供电。

整流模块故障应急处理。当整流模块内部短路时，模块应该能自动退出供电系统：当个别模块损坏后，如果剩余的完好模块能满足负载供电要求，则只需关掉损坏模块的交流输入开关即可。当负载电流低于单个模块容量时，某一个模块输出过压将会造成整个系统过压和所有模块过压保护，并且不能自动恢复，这时可关掉所有模块的交流输入开关，然后逐一打开模块，当出现打开某一模块，系统再次出现过压保护时，即可关掉该模块，然后再打开其他模块。

监控模块（系统）故障应急处理。当监控模块故障影响直流供电安全时，只需关掉监控模块即可。

交直流配电故障应急处理。当交流配电故障，引起模块交流供电中断时，可将交流电

直接引入整流模块的输入开关。当直流配电部分短路时，可切断交流供电，将电池强制从直流系统中分离，而将电池或整流模块直接给负载供电。由于负载局部短路引起故障时，一般将损坏负载对应的支路熔断器分离即可。

③ 模块检修。

当拿到一台发生故障的整流器时，首先要准确地判断出故障部位，才能对其进一步维修处理。开关整流器的组成部分，包括输入整流、功率因数补偿、DC/DC 变换、输出整流滤波，PWM 控制电路及辅助电源等，都有可能发生故障，但不同部位的故障现象各有差异，所以维修人员一定要了解整流器各部分电路的工作原理及它们之间的相互关系。

对输入整流部分的检查。输入整流部分的主要元器件是工频整流桥及防浪涌电压的压敏电阻。特别是当发现整流器输入端电源保险管烧断时，不得更换保险管重新通电开机，因为这样做不但检查不出故障所在，还会在开机瞬间导致故障范围更加扩大。应首先观察压敏电阻是否损坏，压敏电阻损坏的现象一般是击穿短路，严重时可见其外表保护层被炸开，此时用万用表测量其两端的电阻值接近于零，这种故障原因是输入端过电压时间较长，而且过电压值超过了压敏电阻的击穿电压。其次，可进一步检查整流桥对应的二极管是否有击穿损坏，只要有一只整流二极管击穿损坏，则交流输入的某个半周期内将出现短路现象，一旦发生短路，输入端的保险管就立刻烧断。产生整流二极管击穿损坏的故障原因一般是由于整流桥的电流过大而散热不良造成热击穿，不过这种情况在设计和器件选择时是可以避免的。另一种原因就是较弱的感应雷击所造成的，这种故障一般对后级电路造成的影响不大，更换整流桥后一般可正常工作。如果是较强的感应雷击则所造成的故障范围会加大，可能会使 PWM 控制电路损坏。类似于这种故障的整流器一般都是选用最简单配置的供电系统，而且使用环境较为恶劣，如机房无交流配电，只是架空明线直接供电，又没采取有效的防雷措施，将会造成这种故障的发生。

对功率因数补偿电路的检查。一般三相输入无源功率因数补偿电路不会出现故障，只是有源功率因数补偿电路可能发生故障。此时只需用万用表测量功率因数补偿电路的输入电阻就可判断出故障部位，如果电阻接近于零，一般是升压开关管击穿造成短路使输入保险管熔断的。造成这种故障的原因有：一是升压开关管参数选择不合理或是其本身质量存在问题；二是由于温升或环境温度过高，而又无过温保护功能而造成升压开关管的损坏。当升压开关管的源漏极短路损坏时，如果栅极并未击穿，功率因数补偿控制器一般不会损坏。发生这种故障首先要验证所选的开关管的主要参数是否合理并保证有一定的余量。如果不存在电路设计上的问题，那么更换一只质量较好的功率开关管电源就可恢复正常使用。

如果功率因数补偿电路经检查没有发生短路现象，那么就可断定故障部分应出在 DC/DC 变换器的原边，因为开关整流器的交流输入端至 DC/DC 变换器的高频变压器的原边为输入主回路。如果输入主回路的某部分发生短路或严重过流，必然使输入保险管烧断。一般通信用开关整流器的 DC/DC 变换部分采用全桥式电路较多，全桥式电路出现短路故障一般都是同一侧上下的两只功率开关管因某种原因造成短路，使输入电源电压通过两只

短路的开关管直接对地短路。造成这种故障的原因是多方面的，首先要对发生故障的工作环境进行分析，如环境温度、输入电压、输出负载等情况。如果外界工作环境无大问题，则应着手从整流器的工作状态进行分析，可先更换损坏的功率开关管，确认其他电路正常的情况下，可在低于额定输入电压和输出空载或轻载情况下开机，此时应首先测量功率因数补偿输出电压是否正常，此输出电压正常时应为 390~400V，如果是三相有源功率因数补偿其输出电压应为 700~720V。如果此电压过高，则可能是后级功率开关管损坏的主要原因，此时应着重检查功率因数补偿电路的控制部分和升压电路输出端的取样分压电阻的阻值，以及分压点的电压值是否正常。如果以上都正常，应检查 DC/DC 变换器功率开关管的驱动波形是否正常，此时可将整流器输出电流逐渐加大，同时用示波器观察驱动波形的幅度和前沿上升时间，并注意是否有振荡现象，还要用示波器观察功率开关管漏极波形是否有较高的尖峰电压，如果尖峰电压过高，可能是高频变压器的漏感较大或是因为 RC 吸收回路的阻容元件发生故障。若是全桥式电路发生故障，一般都是两只功率开关管同时损坏，很少发生四只功率开关管同时损坏的现象。

控制电路，辅助电源及显示电路的检查。一般对于一台具有输入过压保护和输出限流保护及过温保护的开关整流器来说，其输入和输出主回路发生故障的可能性较小，而其控制电路，辅助电源及显示电路发生的故障相对较多。因这些电路的元器件数量较多，且又属于弱电控制电路，所以在可靠性方面的考虑不及在强电工作中的主回路。这些电路中只要有一个元器件发生故障就有可能导致整机停止工作。所以对开关整流器的故障判断除上述的主回路外，对其控制电路及辅助电源部分故障的判断则是较复杂的。

一般控制电路或辅助电源发生故障的整流器对外表现的故障现象为：输入保险管完好，输入输出主回路经测量没有短路、断路及功率元器件损坏现象发生。这种故障现象的开关整流器在其通电开机后，一般表现为无任何显示，无输出，如果是强迫风冷的整流器，其冷却风扇可能也不转。遇到这种情况，首先要检查的是机内的辅助电源，因为辅助电源是为控制电路、保护电路及显示电路供电的。有时虽然主电路未出现故障，但整流器却无输出，而其显示电路和告警电路仍能正常工作，这种情况一般是主电路的控制电路或保护电路出现故障所造成的，这时只需要更换有故障的电路板便可排除故障。

对故障整流器进行维修之前，最好能有此整流器的电路原理图，这样可为维修人员提供较多较详细的电路测量点及参考电压和波形，以便更快地查找故障部位。如果一时很难得到此整流器的电路原理图，可以根据整流器整机的具体布局及各主要部位的明显特征，并配合电路的在线测量，也同样可以判断故障部位。

3.2 考试要求

掌握高频开关型整流器的分类；熟悉高频开关型整流器的基本原理；了解高频开关型整流器的技术特点；掌握高频功率变换电路；了解常见高频开关元器件；掌握功率因数校

正电路；掌握负载电流的均分电路；掌握滤波电路；掌握瞬态保护电路；掌握开关电源系统；了解高频开关型整流器的主要技术指标；掌握开关电源系统的操作；掌握开关电源系统的维护与检修。

3.3 考试要点

1. 高频开关型整流器的分类

高频开关电源的组成；PWM 型高频开关整流器的特点；谐振型高频开关整流器的分类；按照其他方式分类的结果。

2. 高频开关型整流器的基本原理

高频开关整流器方框图；高频开关整流器主电路的组成及各组成部分的作用；控制电路、检测电路、辅助电源的作用。

3. 开关型整流器的技术特点

高频开关电源的主要关键技术；高频变换减小变压器体积的原理；开关型稳压电源与其他稳压电源相比的技术特点。

4. 功率变换电路

功率变换电路的作用；功率变换电路的组成；推挽式功率变换电路、全桥式功率变换电路、半桥式功率变换电路的特点和电路结构；时间比例控制原理、TRC 的三种控制方式、PWM 控制原理；零电压、零电流开关的实现原理。

5. 高频开关器件

功率 MOSFET 的特性和特点；绝缘门极晶体管的组成、符号和主要特点。

6. 功率因数校正电路

功率因数较低的开关电源存在的问题；功率因数校正的基本方法；有源功率因数校正电路的基本原理。

7. 负载电流的均分电路

简单负载均分电路、主从负载均分电路和自动均流方式的特点。

8. 滤波电路

输入滤波器的作用及电路结构、滤波原理；工频滤波电路和输出滤波电路的特点和组成；高频开关整流器的电磁兼容性。

9. 保护电路

输入瞬态过压保护原理；常用限制合闸浪涌电流的方法；输出电压软启动的实现方法；输出过流保护的形式；输出过电压保护的方法。

10. 开关电源系统

开关电源系统的组成；交流配电单元的作用及组成；直流电源系统的作用、组成及技术关键；整流模块的功能；监控模块单元的作用、监控模块各监控单元的作用。

11. 高频开关型整流器的主要技术指标

效率、直流输出电压及其调节范围、稳压精度、输出杂音电压等技术指标的要求。

12. 开关电源系统的操作

系统状态机实时数据查询内容；常用参数设置要求；开关电源系统的扩容与增载要求。

13. 开关电源系统的维护与检修

高频开关整流器工作条件的要求；对高频开关整流器及其他交流设备一般性维护要求；开关电源的月、季、半年和年维护项目；高频开关型整流器基本检修、应急检修、模块检修的内容和方法。

3.4 习题集精粹及答案**一、填空题**

1. PWM 表示的内容是 ()。

正确答案：脉冲宽度调制

2. 在谐振变换器中 SRC 表示 () 谐振变换器。

正确答案：串联

3. 在谐振变换器中 QRC 表示 ()。

正确答案：准谐振变换器

4. 在准谐振变换器中零电流开关的符号为 ()。

正确答案：ZCS

5. 功率因数 $\lambda = \rho/s = r \cos\varphi$ ，其中 $\cos\varphi$ 表示基波电流与基波电压的 ()。

正确答案：位移因数

二、单项选择题（每题的备选项中，仅有一项最符合题意）

1. 全桥式功率交换电路中，当一组高压开关管导通时，截止晶体管上施加的电压为 ()。

- A. 输入电压 B. 1/2 输入电压 C. 2 倍的输入电压 D. 1/3 输入电压

正确答案：A

2. 全桥式功率变换电路中相同集电极电流时的输出功率 ()。

- A. 与半桥式功率变换电路的输出功率相同
B. 是半桥式功率变换电路输出功率的 2 倍
C. 是半桥式功率变换电路输出功率的 1/2 倍
D. 是半桥式功率变换电路输出功率的 1/3 倍

正确答案：B

3. 按照国家信息产业部的入网检测要求，对开关电源的稳压精度要求较高，一般国家标准要求为 ()。

- A. $\pm 0.1\%$ B. $\pm 2\%$ C. $\pm 1\%$ D. $\pm 0.5\%$

正确答案：C

4. 具有强的抗不平衡能力的功率变换电路为（ ）。

- A. 推挽式 B. 全桥式 C. 半桥式 D. 单端反激

正确答案：C

5. 自动平均均流方式的负荷均分电路要求各台整流器内部的电流取样电阻 R_s 和均流电阻 R_a 的阻值（ ）。

- A. 都不同 B. 都相同 C. 差值相同

正确答案：B

6. 功率因数 $\lambda = \rho/s = r \cos\varphi$ ，其中 r 表示（ ）。

- A. 电网电流有效值
B. 基波电流有效值
C. 基波电流有效值与电网电流有效值之比
D. 电网电压有效值

正确答案：C

7. 在线性电路中无谐波电流基波因数 r （ ）。

- A. 大于 1 B. 小于 1 C. 等于 1 D. 等于 2

正确答案：C

8. 具有强的抗不平衡能力的功率转换电路为（ ）。

- A. 推挽式 B. 全桥式 C. 半桥式 D. 单端反激

正确答案：C

9. 电流型谐振开关是由（ ）组成的。

- A. 电感和开关串联 B. 电容和开关并联
C. 电感和开关并联 D. 电容和开关串联

正确答案：A

10. 电压型谐振开关是由（ ）组成的。

- A. 电感和开关串联 B. 电容和开关并联
C. 电感和开关并联 D. 电容和开关串联

正确答案：B

11. 在（ ）电路中无谐波电流基波因数等于 1。

- A. 容性电路 B. 线性电路 C. 感性电路 D. 滤波电路

正确答案：B

三、多项选择题（每题的备选项中，有两项或两项以上符合题意）

1. 通信局（站）所用高频开关电源系统要实现负荷均分可采取的方式有（ ）。

- A. 限流并联 B. 主从均流方式

- C. 自动平均均流方式 D. 限流串联

正确答案: ABC

2. 准谐振变换器是一种新型的谐振变换器,它是在 PWM 型开关变换器基础上适当地加上谐振()而形成的。

- A. 晶体管 B. 电感 C. 电容 D. 电阻

正确答案: BC

3. 时间比率控制 (TRC) 根据控制情况,可分为()。

- A. PWM B. PFM C. PTM D. 混合调制

正确答案: ABD

4. 易于获得大输出容量的功率转换电路为()。

- A. 推挽式 B. 全桥式 C. 半桥式 D. 整流式

正确答案: AB

5. 当变换器处于谐振状态时,谐振角频率与下列参数有关()。

- A. 电感 B. 电容 C. 电阻 D. 开关频率

正确答案: AB

6. 在全桥式、半桥式、推挽式三种功率转换电路中,高压开关管集射间施加的电压较小的为()。

- A. 推挽式 B. 全桥式 C. 半桥式 D. 整流式

正确答案: BC

7. 高频开关电源的监控模块应具有交流输入()等保护功能,故障恢复后,应能自动恢复正常工作状态。

- A. 过压 B. 欠压 C. 缺相 D. 过流

正确答案: ABC

8. 高频开关电源的主要电气技术指标有()。

- A. 机架高度 B. 输入电压范围
C. 输出电压精度 D. 输出衡重杂音

正确答案: BCD

9. 高频开关电源有()的特点,并且可靠性高,因此已经完全替代相位控制型整流器。

- A. 体积小 B. 重量轻 C. 功率因数高 D. 效率高

正确答案: ABCD

10. 高频开关电源四大单元有()。

- A. 整流模块 B. 交流配电 C. 直流配电
D. 连接电缆 E. 监控模块

正确答案: ABCE

11. 高频开关电源系统的模块地址设定，通常有（ ）方式。

- A. 机架地址 B. 整流模块硬地址 C. 软地址 D. 无地址

正确答案：ABC

四、判断题

1. PWM 型变换器的开关损失是由导通损失和关断损失组成的。（ ）

- A. 正确 B. 错误

正确答案：A

2. 开关型稳压电源根据 DC/DC 变换器的工作原理一般可分 PWM 型稳压电源和谐振型稳压电源。（ ）

- A. 正确 B. 错误

正确答案：A

3. 推挽式功率变换电路中 VT1 管导通时，在截止晶体管 VT2 上将施加两倍电源电压 ($2E$)。一对开关管均截止时，它们的集电极施加电压均为 $E/2$ 。（ ）

- A. 正确 B. 错误

正确答案：B

说明：推挽式功率变换电路中 VT1 管导通时，在截止晶体管 VT2 上将施加两倍电源电压 ($2E$)。一对开关管均截止时，它们的集电极施加电压均为 $2E$ 。

4. 全桥式功率变换电路中当一组高压开关管 (VT1, VT4) 导通时，截止晶体管 (VT2, VT3) 上施加的电压即为输入电压 E ，当所有晶体管均截止时，同臂上的两个高压开关管将共同承受输入电压 (即 $E/2$)。（ ）

- A. 正确 B. 错误

正确答案：A

5. 相控电源工作在 50Hz 工频下，由相位控制调整输出电压，一般需要 1+1 备份；开关电源的功率调整管工作在高频开关状态，可以模块设计，通常按 $N+1$ 备份，组成的系统可靠性高。（ ）

- A. 正确 B. 错误

正确答案：A

6. 全桥式、半桥式、推挽式功率转换电路中易于获得大的输出容量的电路有推挽式和全桥式。（ ）

- A. 正确 B. 错误

正确答案：A

7. 半桥式功率转换电路抗不平衡能力强。（ ）

- A. 正确 B. 错误

正确答案：A

8. 在功率转换电路中，稳压时高压开关管集射间施加的电压推挽式为 2 倍的输入电

压。()

A. 正确 B. 错误

正确答案: A

9. 在功率转换电路中, 稳压时高压开关管集射间施加的电压半桥式为 2 倍的输入电压。()

A. 正确 B. 错误

正确答案: A

10. 在三相输入的高频开关电源中功率因数校正大多采用无源功率因数校正。()

A. 正确 B. 错误

正确答案: A

11. 负荷均分电路实质是使每台整流器能够平均分担电源系统输出的总功率。()

A. 正确 B. 错误

正确答案: A

12. 负荷均分电路实质是使每台整流器输出的电流相同。()

A. 正确 B. 错误

正确答案: A

13. 有源功率因数校正电路实质上是一种升压变换器。()

A. 正确 B. 错误

正确答案: A

14. 有源功率因数校正电路实质上是一种降压变换器。()

A. 正确 B. 错误

正确答案: A

15. 在线性电路中功率只与基波电流与电压的相位移有关。()

A. 正确 B. 错误

正确答案: A

16. 在谐振回路中谐振频率与回路中电感和电容的容量有关。()

A. 正确 B. 错误

正确答案: A

五、简答题

1. 简述功率因数对开关电源的影响及功率因数校正的方法和原理。

答: 功率因数较低的开关电源存在许多问题。①谐波电流污染电网, 干扰其他用电设备, 造成测量仪表产生较大的误差, 还会使电动机产生较大的噪声。②在输出功率一定的条件下, 输入电流有效值较大, 因此必须增大输入熔断器、断路器和电源线的规格。③中线内的电流很大, 由于中线无过流保护装置, 所以, 中线有可能因过热而着火。

功率校正的基本方法有两种: 无源功率因数校正和有源功率因数校正。

2. 简述常见的高频开关管及其功能特点。

答：常见的高频开关管有

(1) 功率场控晶体管（功率 MOSFET），其特点如下。

驱动功率小，驱动电路简单，功率增益高，开关速度快，不需要加反向偏置。

多个管子可并联工作，导通电阻具有正温度系数，具有自动均流能力。

开关速度受温度影响非常小，在高温运行时，不存在温度失控现象，其允许的工作温度可达 200℃。

功率 MOSFET 无二次击穿问题。

(2) 绝缘门极晶体管（IGBT 或 IGT），其特点如下。

IGBT 管为混合器件，驱动功率容量小，也是一种电压型器件。

导通过程压降小，元件电流密度大，其电流等级为 10~400A，最高研究水平为 1000A，电压等级为 500~1400V。

3. 高频开关整流设备实现负载电流均分的方法有哪些？

答：高频开关整流设备实现负载电流均分通过负载均分电路来实现，通常有三种方法：

(1) 简单负载均分电路方式：当负载所需的电流不大，且并联的整流器数量较少时，可采取简单的限流并联方式来达到一定的均流效果。

(2) 主从负载均分电路方式：只要各台电源的电流取样电阻值相同，且输出端接到汇流排上的导线长度相等，汇流排的直流电阻足够小，无论电源系统的输出电压或负载电流怎样变化，各台并联的整流器电源输出的电流都相同。

(3) 自动平均均流电路方式：这种均流方式应用较为普遍。其原理是把参与并联工作的整流器内部的电流取样电压通过各自的均流电阻全部连到电源系统的均流总线上，由于各台整流器内部的电流取样电阻和均流电阻都相等，所以在均流总线上得到的电压值是各台整流器电流取样电压的平均值，此电压与各台整流模块内电流取样电阻的比值，即为每台整流模块应输出的电流值。

4. 简述高频开关电源功率变换电路的工作原理。

答：功率变换电路是整个高频开关电源的核心部分，实现将大功率的高压直流转换成低压直流，即高压直流→高压交流→降压变压器→低压交流→低压直流。由于变压器体积与工作频率成反比，提高变压器的工作频率就能有效减少变压器的体积，所以功率变换电路又可以描述成：高压直流→高压高频交流→高频降压变压器→低压高频交流→低压直流的过程。

5. 高频开关整流设备的保护电路有哪些？作用是什么？

答：(1) 输入瞬态过压保护：防止瞬间过电压对电源造成的损坏。

(2) 启动冲击电流限制：防止合闸浪涌电流对电源的开关触点会造成瞬时拉弧熔化，甚至被焊接使开关操作失效。

(3) 输出电压软启动：防止整流器输出电压突然建立到额定值时在短时间内形成很大

的电容充电电流,影响过流保护及短路保护电路动作,导致电源的无法正常启动。

6. 简述 PWM 型开关电源稳定输出电压的原理。

答: PWM (脉冲宽度调制) 型控制电路的主控部分由基准电压源、电压误差放大器、比较器、振荡器和相应的驱动电路组成。基准电压源为电压误差放大器的同相输入端提供一个稳定的参考电压,电压误差放大器接成反相输入放大方式,其反相输入端电压来自高频开关电源输出端的分压取样网络,其输出端与反相输入端之间的反馈网络降低了放大器的增益,有效地防止系统自激振荡而引入的负反馈。PWM 调制器反相输入端的锯齿波电压与电压误差放大器输出的直流电压进行叠加比较,随着电源误差放大器输出的直流误差电压值的上下移动,PWM 调制器便输出不同宽度的驱动脉冲来实现调节电源的输出电压,使输出电压稳定在与基准电压相对应的电压值上。

六、综述题

1. 阐述 PWM 型开关推挽式功率转换电路的工作原理。

答: 推挽式功率转换电路中高压开关管 BG1、BG2 由驱动电路控制基极,以 PWM 方式激励而交替通断,输入直流电压被转换成高频方波交流电压。当 BG1 导通时,输入电源电压 E 通过 BG1 施加到高频变压器 B1 的原边绕组 N1,由于变压器具有两个匝数相等的主绕组 N1,故在 BG1 导通时,在截止晶体管 BG2 上将施加两倍电源电压(即 $2E$)。当基极激励消失时,一对高压开关管均截止,它们的集电极施加电压均为 E 。当下半个周期,BG2 被激励导通,截止晶体管 BG1 上施加 $2E$ 的电压,接着又是两晶体管都截止的时期,VCE1 和 VCE2 均为 E 。

在晶体管导通过程中,集电极电流除负载电流成分外,还包含输出电容器的充电电流和高频变压器的励磁电流,它们均随导通脉冲宽度的增加而线性地上升。

在开关的暂态过程中,由于高频变压器副边开关整流二极管反向恢复时间内所造成的短路以及为了抑制集电极电压尖峰而设置的 RC 吸收网络的作用,当高压开关管开通时,将会有尖峰冲击电流;在关断瞬间,由于高频变压器漏感储能的作用,在集电极间会产生电压尖峰。尖峰电压的大小随集电极电路的配置,高频变压器的漏感以及电路的关断条件的不同而异,该尖峰电压有可能使高压开关管承受两倍以上输入电压。

电路只用两个高压开关管便能获得较大的功率输出,而且,一对晶体管的发射极相连,两组基极驱动电路彼此间就无需隔离,这样不仅驱动电路和过流保护电路可以简化,而且可供选择的余地也增大了,这是该电路的优点。

2. 阐述 PWM 型开关全桥式功率转换电路工作原理。

答: 全桥式功率转换电路由高压开关管 BG1、BG2、BG3 和 BG4 组成桥的两臂,高频变压器 B1 连接在它们中间,相对的两对晶体管 BG1, BG4 和 BG2, BG3 由驱动电路以 PWM 方式激励而交替通断,将直流输入电压转换成高频方波脉冲电压。其工作过程和推挽式功率转换电路一样。

当一组高压开关管(例如 BG1, BG4)导通时,截止晶体管(BG2, BG3)上施加的

电压即为输入电压 E ，当所有晶体管均截止时，同臂上的两个高压开关管将共同承受输入电压（即 $E/2$ ）。由高频变压器漏感引起的电压尖峰，当其超过输入电压时，反向并接在高压开关管集射之间的高速续流二极管便导通，集电极电压被箝位在输入电压上。集电极电流同样也有尖峰。

全桥式电路高压开关管稳态时其最高施加电压即为输入电压，暂态过程中的尖峰电压被箝位于 E ，比起推挽式电路来要低一半还多。因为输入电压直接施加在高频变压器上，高压开关管的耐压要求低，宜获得大功率输出，其缺点是：电路复杂，元器件多。

3.5 练习题

一、填空题

1. 滤波电路中电容的作用是（ ）。
2. PWM 表示的内容是（ ）。
3. 在谐振变换器中 PRC 表示（ ）谐振变换器。
4. 在准谐振变换器中零电压开关的符号为（ ）。
5. 功率因数 $\lambda = \rho/s = r \cos\varphi$ ，其中 $\cos\varphi$ 表示基波电流与基波电压的（ ）。

二、单项选择题（每题的备选项中，仅有一项最符合题意）

1. 全桥式功率变换电路中相同集电极电流时的输出功率（ ）。
 - A. 与半桥式功率变换电路输出功率相同
 - B. 是半桥式功率变换电路输出功率的 2 倍
 - C. 是半桥式功率变换电路输出功率的 1/2 倍
 - D. 是半桥式功率变换电路输出功率的 1/3 倍
2. 具有强的抗不平衡能力的功率变换电路为（ ）。
 - A. 推挽式
 - B. 全桥式
 - C. 半桥式
 - D. 单端反激
3. 功率因数 $\lambda = \rho/s = r \cos\varphi$ ，其中 r 表示（ ）。
 - A. 电网电流有效值
 - B. 基波电流有效值
 - C. 基波电流有效值与电网电流有效值之比
 - D. 电网电压有效值
4. 电压型谐振开关是由（ ）组成的。
 - A. 电感和开关串联
 - B. 电容和开关并联
 - C. 电感和开关并联
 - D. 电容和开关串联

三、多项选择题（每题的备选项中，有两项或两项以上符合题意）

1. 高频开关电源中，常用的电力电子器件为（ ）。
 - A. GTR
 - B. MOSFET
 - C. IGBT
 - D. GTO

2. 高频开关型整流器主要由（ ）部分组成。
 - A. 工频整流电路
 - B. 直流-直流变换器
 - C. 功率因数校正电路
 - D. 滤波器
3. 有源功率因数校正电路主要由桥式整流器（ ）和控制器等部分组成。
 - A. 高频电感 L
 - B. 功率开关管 VT
 - C. 二极管 VD
 - D. 滤波电容 C
4. 谐振式开关是由下列器件组成的（ ）。
 - A. 开关
 - B. 电感
 - C. 电容
 - D. 电阻
5. 在下面功率转换电路中高压开关管数量较小的是（ ）。
 - A. 推挽式
 - B. 全桥式
 - C. 半桥式
 - D. 整流式

四、判断题

1. 全桥式功率转换电路使用高压开关管的数量与推挽式相同。（ ）
2. 推挽式、全桥式、半桥式功率转换电路的输出功率相同时，集电极电流也相同。（ ）
3. 在谐振回路中谐振频率与回路中电感和电容的容量无关。（ ）
4. 负荷均分电路的作用是要求每个整流器输出的电压相同。（ ）
5. 在三相输入的高频开关电源中不需要功率因数校正电路。（ ）

五、简答题

1. 简述高频开关型稳压电源的组成及重量轻、体积小的原因。
2. 简述高频开关型稳压电源的分类。
3. 简述高频开关整流设备的电路组成。
4. 高频开关电源和相控电源相比，有什么优点？出现这些差别的根本原因是什么？
5. 简述谐振开关实现零电压开通和零电流关断的原理。

六、论述题

1. 阐述高频开关电源引入谐振型开关的目的。
2. 阐述谐振变换器有几种类型及造成 PWM 型变换器开关损失的原因。
3. 阐述减小 PWM 型变换器开通损耗和关断损失的方法。