

开关电源保护电路

程伟, 李定宣

(合肥三宇电器技术研究所, 安徽 合肥 230088)

摘要：为使开关电源在恶劣环境及突发故障状况下安全可靠，提出了几种实用的保护电路，并对电路的工作原理进行了详尽分析。

关键词：开关电源；保护电路；可靠性

1 引言

评价开关电源的质量指标应该是以安全性、可靠性为第一原则。在电气技术指标满足正常使用要求的条件下，为使电源在恶劣环境及突发故障情况下安全可靠地工作，必须设计多种保护电路，比如防浪涌的软启动，防过压、欠压、过热、过流、短路、缺相等保护电路。

2 开关电源常用的几种保护电路

2.1 防浪涌软启动电路

开关电源的输入电路大都采用电容滤波型整流电路，在进线电源合闸瞬间，由于电容器上的初始电压为零，电容器充电瞬间会形成很大的浪涌电流，特别是大功率开关电源，采用容量较大的滤波电容器，使浪涌电流达100A以上。在电源接通瞬间如此大的浪涌电流，重者往往会导致输入熔断器烧断或合闸开关的触点烧坏，整流桥过流损坏；轻者也会使空气开关合不上闸。上述现象均会造成开关电源无法正常工作，为此几乎所有的开关电源都设置了防止浪涌电流的软启动电路，以保证电源正常而可靠运行。

图1是采用晶闸管V和限流电阻 R_1 组成的防浪涌电流电路。在电源接通瞬间，输入电压经整流桥（ $D_1 \sim D_4$ ）和限流电阻 R_1 对电容器C充电，限制浪涌电流。当电容器C充电到约80%额定电压时，逆变器正常工作。经主变压器辅助绕组产生晶闸管的触发信号，使晶闸管导通并短路限流电阻 R_1 ，开关电源处于正常运行状态。

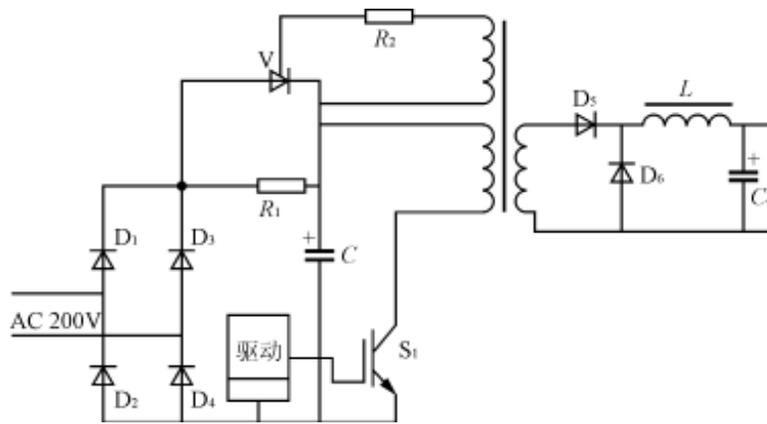


图1 采用晶闸管和限流电阻组成的软启动电路

图2是采用继电器 K_1 和限流电阻 R_1 构成的防浪涌电流电路。电源接通瞬间，输入电压经整流（ $D_1 \sim D_4$ ）和限流电阻 R_1 对滤波电容器 C_1 充电，防止接通瞬间的浪涌电流，同时辅助电源 V_{cc} 经电阻 R_2 对并接于继电器 K_1 线包的电容器 C_2 充电，当 C_2 上的电压达到继电器 K_1 的动作电压时， K_1 动作，其触点 $K_{1,1}$ 闭合而旁路限流电阻 R_1 ，电源进入正常运行状态。限流的延迟时间取决于时间常数（ $R_2 C_2$ ），通常选取为0.3~0.5s。为了提高延迟时间的准确性及防止继电器动作抖动振荡，延迟电路可采用图3所示电路替代RC延迟电路。

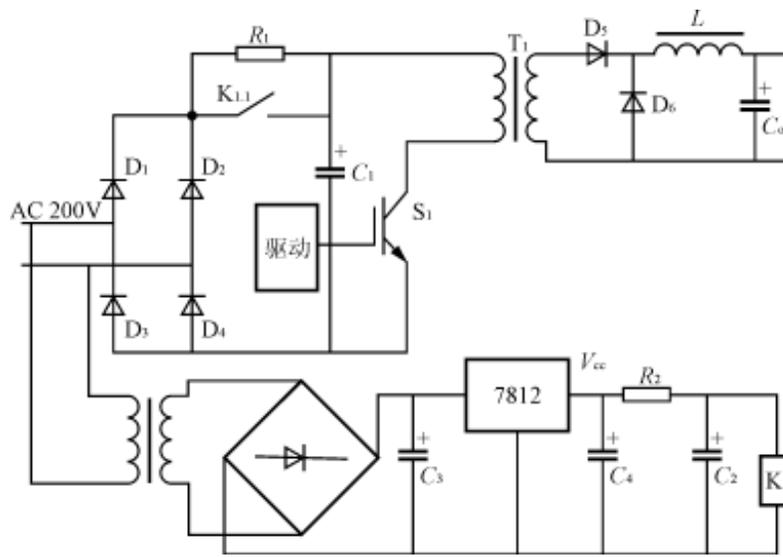


图2 采用继电器 K_1 和限流电阻构成的软启动电路

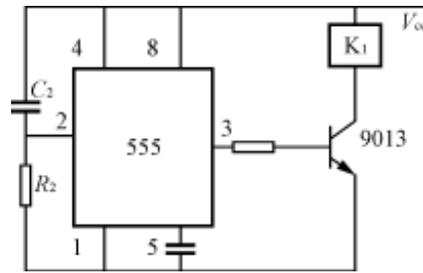


图3 替代RC的延迟电路

2.2 过压、欠压及过热保护电路

进线电源过压及欠压对开关电源造成的危害，主要表现在器件因承受的电压及电流应力超出正常使用的范围而损坏，同时因电气性能指标被破坏而不能满足要求。因此对输入电源的上限和下限要有所限制，为此采用过压、欠压保护以提高电源的可靠性和安全性。

温度是影响电源设备可靠性的最重要因素。根据有关资料分析表明，电子元器件温度每升高 2°C ，可靠性下降10%，温升 50°C 时的工作寿命只有温升 25°C 时的 $1/6$ ，为了避免功率器件过热造成损坏，在开关电源中亦需要设置过热保护电路。

图4是仅用一个4比较器LM339及几个分立元器件构成的过压、欠压、过热保护电路。取样电压可以直接从辅助控制电源整流滤波后取得，它反映输入电源电压的变化，比较器共用一个基准电压， $N_{1.1}$ 为欠压比较器， $N_{1.2}$ 为过压比较器，调整 R_1 可以调节过、欠压的动作阈值。 $N_{1.3}$ 为过热比较器， R_T 为负温度系数的热敏电阻，它与 R_7 构成分压器，紧贴于功率开关器件IGBT的表面，温度升高时， R_T 阻值下降，适当选取 R_7 的阻值，使 $N_{1.3}$ 在设定的温度阈值动作。 $N_{1.4}$ 用于外部故障应急关机，当其正向端输入低电平时，比较器输出低电平封锁PWM驱动信号。由于4个比较器的输出端是并联的，无论是过压、欠压、过热任何一种故障发生，比较器输出低电平，封锁驱动信号使电源停止工作，实现保护。如将电路稍加变动，亦可使比较器输出高电平封锁驱动信号。

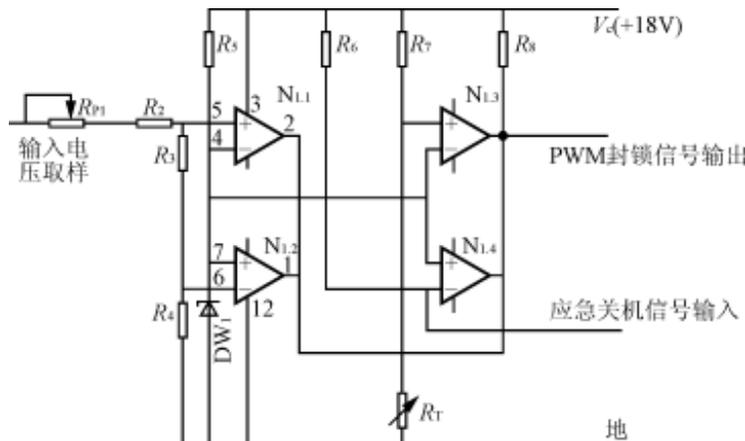


图4 过压、欠压、过热保护电路

2.3 缺相保护电路

由于电网自身原因或电源输入接线不可靠,开关电源有时会出现缺相运行的情况,且掉相运行不易被及时发现。当电源处于缺相运行时,整流桥某一臂无电流,而其它臂会严重过流造成损坏,同时使逆变器工作出现异常,因此必须对缺相进行保护。检测电网缺相通常采用电流互感器或电子缺相检测电路。由于电流互感器检测成本高、体积大,故开关电源中一般采用电子缺相保护电路。图5是一个简单的电子缺相保护电路。三相平衡时, $R_1 \sim R_3$ 结点H电位很低,光耦输出近似为零电平。当缺相时,H点电位抬高,光耦输出高电平,经比较器进行比较,输出低电平,封锁驱动信号。比较器的基准可调,以便调节缺相动作阈值。该缺相保护适用于三相四线制,而不适用于三相三线制。电路稍加变动,亦可用高电平封锁PWM信号。

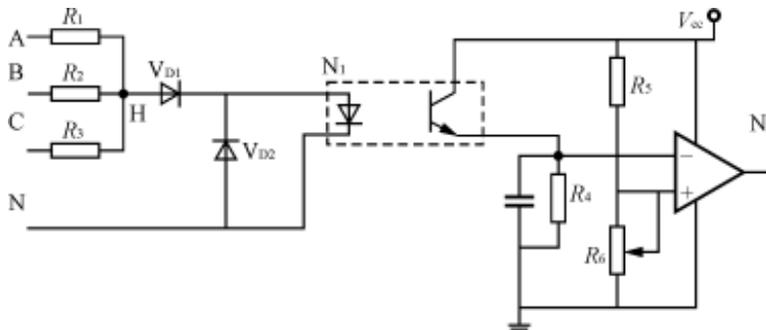


图5 三相四线制的缺相保护电路

图6是一种用于三相三线制电源缺相保护电路,A、B、C缺任何一相,光耦器输出电平低于比较器的反相输入端的基准电压,比较器输出低电平,封锁PWM驱动信号,关闭电源。比较器输入极性稍加变动,亦可用高电平封锁PWM信号。这种缺相保护电路采用光耦隔离强电,安全可靠, R_{P1} 、 R_{P2} 用于调节缺相保护动作阈值。

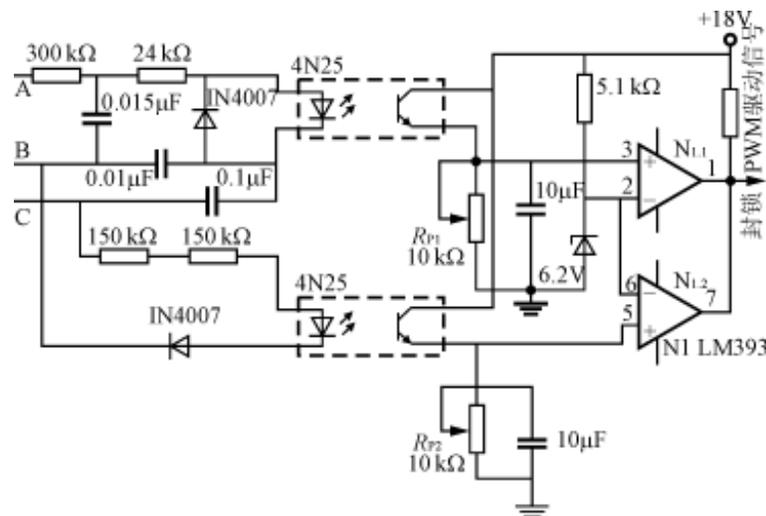


图6 三相三线制的缺相保护电路

2.4 短路保护

开关电源同其它电子装置一样,短路是最严重的故障,短路保护是否可靠,是影响开关电源可靠性的重要因素。IGBT(绝缘栅双极型晶体管)兼有场效应晶体管输入阻抗高、驱动功率小和双极型晶体管电压、电流容量大及管压降低的特点,是目前中、大功率开关电源最普遍使用的电力电子开关器件。IGBT能够承受的短路时间取决于它的饱和压降和短路电流的大小,一般仅为几 μ s至几十 μ s。短路电流过大不仅使短路承受时间缩短,而且使关断时电流下降率 di/dt 过大,由于漏感及引线电感的存在,导致IGBT集电极过电压,该过电压可在器件内部产生擎住效应使IGBT锁定失效,同时高的过电压会使IGBT击穿。因此,当出现过流时,必须采取有效的保护措施。

为了实现IGBT的短路保护,则必须进行过流检测。适用IGBT过流检测的方法,通常是采用霍尔电流传感器直接检测IGBT的电流 I_c ,然后与设定的阈值比较,用比较器的输出去控制驱动信号的关断;或者采用间接电压法,检测过流时IGBT的电压降 V_{ce} ,因为管压降含有短路电流信息,过流时 V_{ce} 增大,且基本上为线性关系,检测过流时的 V_{ce} 并与设定的阈值进行比较,比较器的输出控制驱动电路的关断。

在短路电流出现时,为了避免关断电流的 di/dt 过大形成过电压,导致IGBT锁定无效和损坏,以及为了降低电磁干扰,通常采用软降栅压和软关断综合保护技术。在检测到过流信号后首先是进入降栅保护程序,以降低故障电流的幅值,延长IGBT的短路承受时间。在降栅动作后,设定一个固定延迟时间用以判断故障电流的真实性,如在延迟时间内故障消失则栅压自动恢复,如故障仍然存在则进行软关断程序,使栅压降至0V以下,关断IGBT的驱动信号。由于在降栅

压程序阶段集电极电流已减小，故软关断时不会出现过大的短路电流下降率和过高的过电压。采用软降栅压及软关断栅极驱动保护，使故障电流的幅值和下降率都能受到限制，过电压降低，IGBT的电流、电压运行轨迹能保证在安全区内。

在设计降栅压保护电路时，要正确选择降栅压幅度和速度，如果降栅压幅度大（比如7.5V），降栅压速度不要太快，一般可采用 $2\mu\text{s}$ 下降时间的软降栅压，由于降栅压幅度大，集电极电流已经较小，在故障状态封锁栅极可快些，不必采用软关断；如果降栅压幅度较小（比如5V以下），降栅压速度可快些，而封锁栅压的速度必须慢，即采用软关断，以避免过电压发生。

为了使电源在短路故障状态不中断工作，又能避免在原工作频率下连续进行短路保护产生热积累而造成IGBT损坏，采用降栅压保护即可不必在一次短路保护立即封锁电路，而使工作频率降低（比如1Hz左右），形成间歇“打嗝”的保护方法，故障消除后即恢复正常工作。

下面介绍几种IGBT短路保护的实用电路及工作原理。

图7是利用IGBT过流时 V_{ce} 增大的原理进行保护的电路，用于专用驱动器EXB841。EXB841内部电路能很好地完成降栅及软关断，并具有内部延迟功能，以消除干扰产生的误动作。含有IGBT过流信息的 V_{ce} 不直接送至EXB841的集电极电压监视脚6，而是经快速恢复二极管 V_{D1} ，通过比较器 IC_1 输出接至EXB841的脚6，其目的是为了消除 V_{D1} 正向压降随电流不同而异，采用阈值比较器，提高电流检测的准确性。如果发生过流，驱动器EXB841的低速切断电路慢速关断IGBT，以避免集电极电流尖峰脉冲损坏IGBT器件。

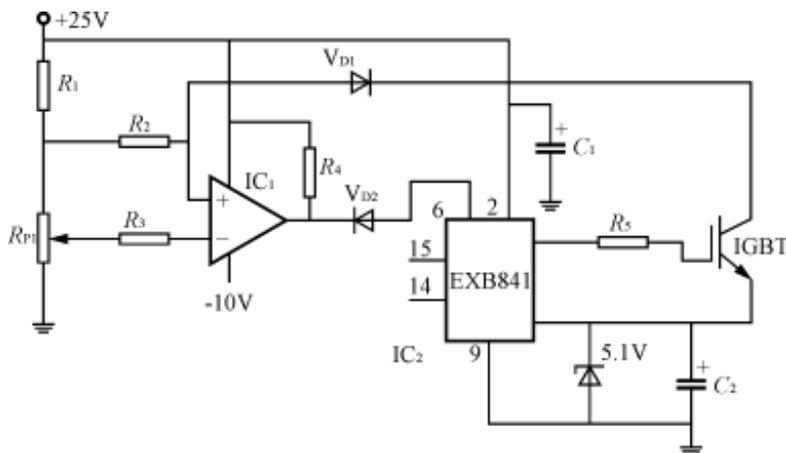
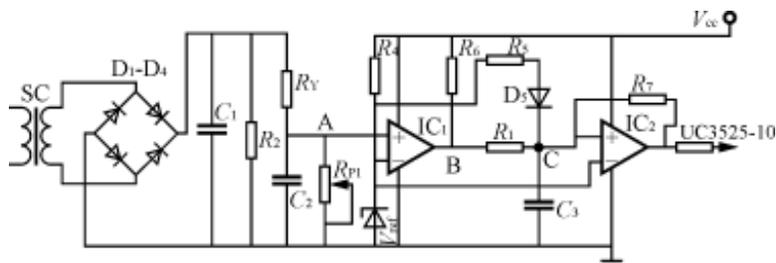
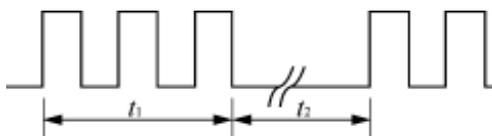


图7 采用IGBT过流时 V_{ce} 增大的原理进行保护

图8是利用电流传感器进行过流检测的IGBT保护电路，电流传感器（SC）初级（1匝）串接在IGBT的集电极电路中，次级感应的过流信号经整流后送至比较器 IC_1 的同相输入端，与反相端的基准电压进行比较， IC_1 的输出送至具有正反馈的比较器 IC_2 ，其输出接至PWM控制器UC3525的输出控制脚10。不过流时， $V_A < V_{ref}$ ， $V_B = 0.2V$ ， $V_C < V_{ref}$ ， IC_2 输出低电平，PWM控制器正常工作。当出现过流时，电流传感器检测的整流电压升高， $V_A > V_{ref}$ ， V_B 为高电平， C_3 充电使 $V_C > V_{ref}$ ， IC_2 输出高电平（大于1.4V），关闭PWM控制电路。因无驱动信号，IGBT关闭，而电源停止工作，电流传感器无电流流过，使 $V_A < V_{ref}$ ， $V_B = 0.2V$ ， C_3 经 R_1 放电，当 C_3 放电到使 $V_C < V_{ref}$ 时， IC_2 又输出低电平，电源重新进入工作状态，如果过流继续存在，保护电路又回到原来的限流保护工作状态，反复循环使PWM控制电路的输出驱动波形处于间隔输出状态，如图8(b)所示波形。电位器 R_{P1} 调整比较器过流动作阈值。电容器 C_3 经 D_5 快速充电，经 R_1 慢速放电，只要合理地选择 R_1 ， C_3 的参数，使PWM驱动信号关闭时间 $t_2 \gg t_1$ ，可保证电源进入睡眠状态。正反馈电阻 R_7 保证 IC_2 只有高、低电平两种状态， D_5 ， R_1 ， C_3 充放电电路，保证 IC_2 输出不致在高、低电平之间频繁变化，即IGBT不致频繁开通、关断而损坏。



(a) 电路原理图



(b) PWM控制电路的输出驱动波形图

图8 利用电流传感器进行过流检测的IGBT保护电路

图9是利用IGBT (V_1) 过流集电极电压检测和电流传感器检测的综合保护电路, 电路工作原理是: 负载短路 (或IGBT因其它故障过流) 时, V_1 的 V_{ce} 增大, V_3 门极驱动电流经 R_2, R_3 分压器使 V_3 导通, IGBT 栅极电压由 V_{D3} 所限制而降压, 限制 IGBT 峰值电流幅度, 同时经 $R_5 C_3$ 延迟使 V_2 导通, 送去软关断信号。另一方面, 在短路时经电流传感器检测短路电流, 经比较器 IC_1 输出的高电平使 V_3 导通进行降压栅, V_2 导通进行软关断。

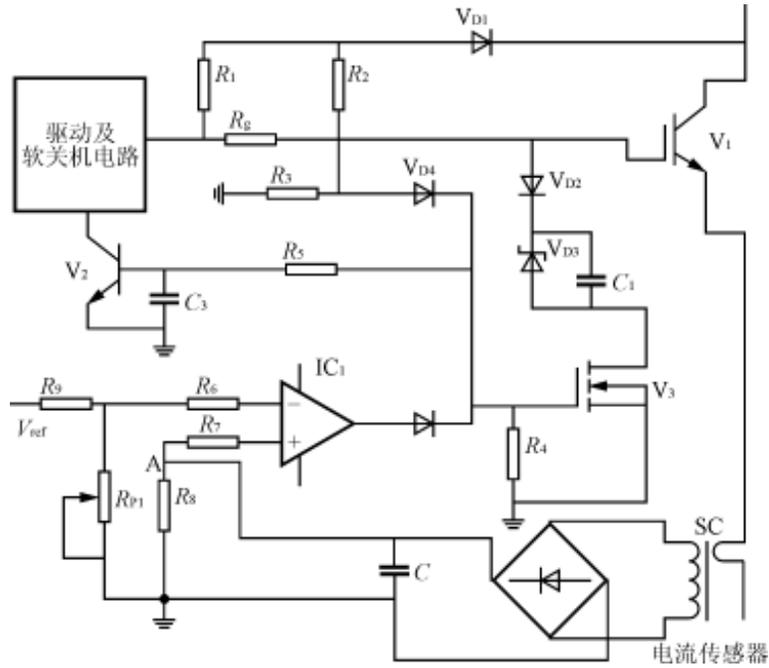


图9 综合过流保护电路

图10是应用检测IGBT集电极电压的过流保护原理, 采用软降栅压、软关断及降低工作频率保护技术的短路保护电路。

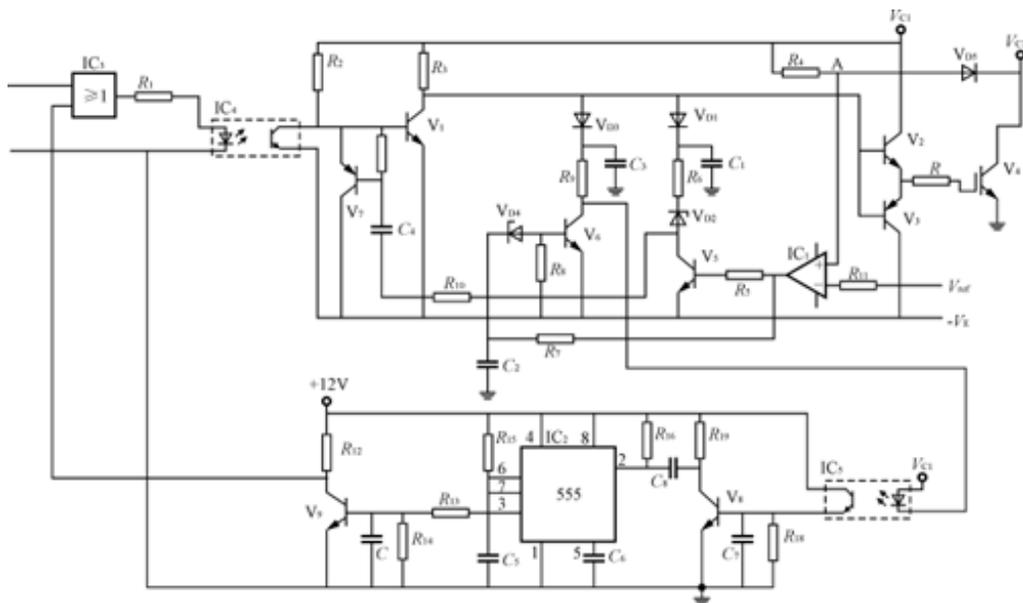


图10

正常工作状态, 驱动输入信号为低电平时, 光耦 IC_4 不导通, V_1, V_3 导通, 输出负驱动电压。驱动输入信号为高电平时, 光耦 IC_4 导通, V_1 截止而 V_2 导通, 输出正驱动电压, 功率开关管 V_4 工作在正常开关状态。发生短路故障时, IGBT 集电极电压增大, 由于 V_{ce} 增大, 比较器 IC_1 输出高电平, V_5 导通, IGBT 实现软降栅压, 降栅压幅度由稳压管 VD_2 决定, 软降栅压时间由 $R_6 C_1$ 形成 $2 \mu s$ 。同时 IC_1 输出的高电平经 R_7 对 C_2 进行充电, 当 C_2 上电压达到稳压管 VD_4 的击穿电压时, V_6 导通并由 $R_9 C_3$ 形成约 $3 \mu s$ 的软关断栅压, 软降栅压至软关断栅压的延迟时间由时间常数 $R_7 C_2$ 决定, 通常选取在 $5 \sim 15 \mu s$ 。

V_5 导通时, V_7 经 C_4R_{10} 电路流过基极电流而导通约 $20\mu\text{s}$, 在降栅压保护后将输入驱动信号闭锁一段时间, 不再响应输入端的关断信号, 以避免在故障状态下形成硬关断过电压, 使驱动电路在故障存在的情况下能执行一个完整的降栅压和软关断保护过程。

V_7 导通时, 光耦 IC_5 导通, 时基电路 IC_2 的触发脚2获得负触发信号, 555输出脚3输出高电平, V_9 导通, IC_3 被封锁, 封锁时间由定时元件 $R_{15}C_5$ 决定(约 1.2s), 使工作频率降至 1Hz 以下, 驱动器的输出信号将工作在所谓的“打嗝”状态, 避免了发生短路故障后仍工作在原来的频率下, 连续进行短路保护导致热积累而造成IGBT损坏。只要故障消失, 电路又能恢复到正常工作状态。

3 结语

开关电源保护功能虽属电源装置电气性能要求的附加功能, 但在恶劣环境及意外事故条件下, 保护电路是否完善并按预定设置工作, 对电源装置的安全性和可靠性至关重要。验收技术指标时, 应对保护功能进行验证。

开关电源的保护方案和电路结构具有多样性, 但对具体电源装置而言, 应选择合理的保护方案和电路结构, 以使得在故障条件下真正有效地实现保护。

文中所述的保护电路可以灵活组合使用, 以简化电路结构和降低成本。

作者简介

程伟(1963 -), 工程师, 主要从事电子技术在工程设备中的应用。

李定宣(1940 -), 高级工程师, 主要从事电力电子技术的研究与应用。