

## 单相逆变器智能功率模块应用电路设计

### 引言

智能功率模块(Intelligent Power Module, IPM)以开关速度快、损耗小、功耗低、有多种保护功能、抗干扰能力强、无须采取防静电措施、体积小等优点在电力电子领域得到越来越广泛的应用。以 PM200DSA060 型 IPM 为例。介绍 IPM 应用电路设计和在单相逆变器中的应用。

### IPM 的结构

IPM 由高速、低功率 IGWT、优选的门级驱动器及保护电路构成。其中, IGBT 是 GTR 和 MOSFET 的复合, 由 MOSFET 驱动 GTR, 因而 IPM 具有 GTR 高电流密度、低饱和电压、高耐压、MOSFET 高输入阻抗、高开关频率和低驱动功率的优点。

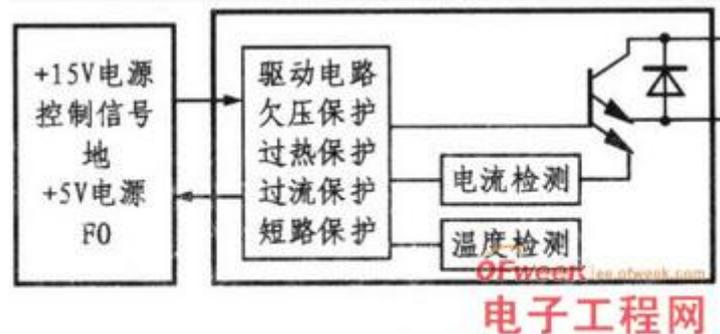


图 1 IPM 的内部功能框图

根据内部功率电路配置情况, IPM 有多种类型, 如 PM200DSA060 型: IPM 为 D 型(内部集成 2 个 IGBT), 其内部功能框图如图 1 所示, 内部结构如图 2 所示。内有驱动和保护电路, 保护功能有控制电源欠压锁定保护、过热保护、过流保护和短路保护, 当其中任一种保护功能动作时。IPM 将输出故障信号 FO。

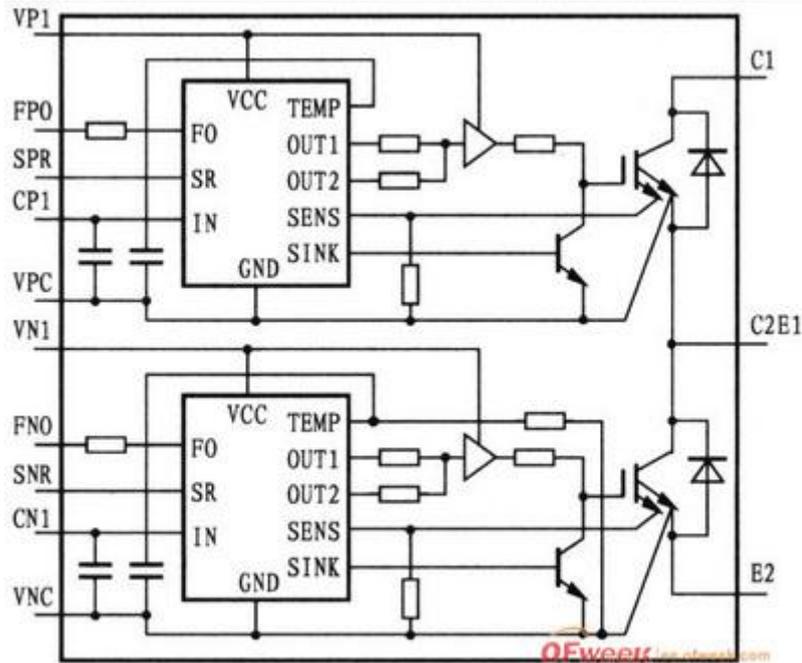


图 2 IPM 的内部结构

IPM 内部电路不含防止干扰的信号隔离电路、自保护功能和浪涌吸收电路。为了保证 IPM 安全可靠。需要自己设计部分外围电路。

### IPM 的外部驱动电路设计

IPM 的外部驱动电路是 IPM 内部电路和控制电路之间的接口，良好的外部驱动电路对以 IPM 构成的系统的运行效率、可靠性和安全性都有重要意义。

由 IPM 内部结构图可见，器件本身含有驱动电路。所以只要提供满足驱动功率要求的 PWM 信号、驱动电路电源和防止干扰的电气隔离装置即可。但是，IPM 对驱动电路输出电压的要求很严格：驱动电压范围为 13.5V~16.5V。电压低于 13.5V 将发生欠压保护。电压高于 16.5V 可能损坏内部部件；驱动信号频率为 5Hz~20kHz，且需采用电气隔离装置。防止干扰：驱动电源绝缘电压至少是 IPM 极间反向耐压值的 2 倍 (2Vces)；驱动电流达 19mA — 26mA；驱动电路输出端的滤波电容不能太大。这是因为当寄生电容超过 100pF 时。噪声干扰将可能误触发内部驱动电路。

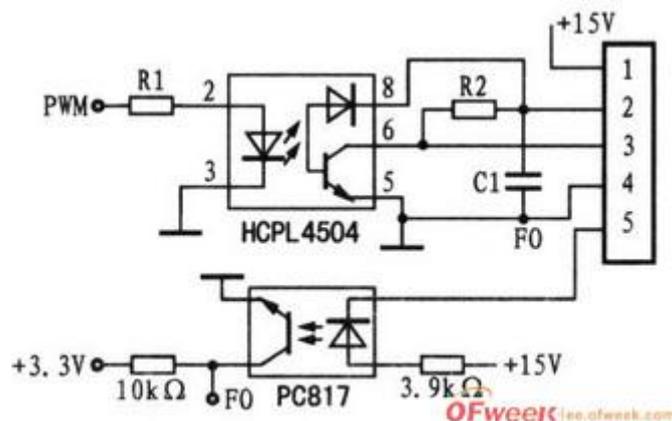


图3 IPM 的外部驱动电路和引脚

表1 IPM 的引脚功能

引脚	功能	IPM 内部引脚
1	+15V	VN1/VP1
2	+5V(来自 IPM)	SNR/SPR
3	PWM 信号	CN1/CP1
4	地	VNC/VPC
5	FO 输出	FNO/FP

图3所示是一种典型的高可靠性IPM外部驱动电路方案。来自控制电路的PWM信号经R1限流,再经高速光耦隔离并放大后接IPM内部驱动电路并控制开关管工作,FO信号也经过光耦隔离输出。其中每个开关管的控制电源端采用独立隔离的稳压。15V电源,且接1只 $10\mu\text{F}$ 的退耦电容器(图中未画出)以滤去共模噪声。R1根据控制电路的输出电流选取,如用DSP产生PWM,则R1的阻值可为 $330\Omega$ 。R2根据IPM驱动电流选值,一方面应尽可能小以避免高阻抗IPM拾取噪声。另一方面又要足够可靠地控制IPM。可在 $2\text{k}\Omega\sim 6.8\text{k}\Omega$ 内选取。C1为2端与地间的 $0.1\mu\text{F}$ 滤波电容器,PWM隔离光耦的要求是 $t_{\text{PLH}}10\text{kV}/\mu\text{s}$ ,可选用HCPIA503型、HCPIA504型、PS2041型(NEC)等高速光耦,且在光耦输入端接1只 $0.1\mu\text{F}$ 的退耦电容器(图中未画出)。FO输出光耦可用低速光耦(如PC817)。IPM的内部引脚功能如表1所示。

图3的外部接口电路直接固定在PCB上且靠近模块输入脚,以减少噪声和干扰,PCB上布线的距离应适当,避免开关时干扰引起的电位变化。

另外,考虑到强电可能造成外部驱动电路到IPM引线的干扰,可以在引脚1~4间,3~4间,4~5间根据干扰大小加滤波电容器。

### IPM 的保护电路设计

由于 IPM 本身提供的保护电路不具备自保护功能, 所以要通过外围硬件或软件的辅助电路将内部提供的: FO 信号转换为封锁 IPM 的控制信号, 关断 IPM, 实现保护。

## 1 硬件

IPM 有故障时, FO 输出低电平, 通过高速光耦到达硬件电路, 关断 PWM 输出, 从而达到保护 IPM 的目的。具体硬件连接方式如下: 在 PWM 接口电路前置带控制端的 3 态收发器(如 74HC245)。PWM 信号经过 3 态收发器后送至 IPM 接口电路, IPM 的故障输出信号 FO 经光耦隔离输出送入与非门。再送到 3 态收发器使能端 OE。IPM 正常工作时与非门输出为低电平。3 态收发器选通, IPM 有故障时与非门输出为高电平。3 态收发器所有输出置为高阻态。封锁各个 IPM 的控制信号, 关断 IPM, 实现保护。

## 2 软件

IPM 有故障时 FO 输出低电平, FO 信号通过高速光耦送到控制器进行处理。处理器确认后。利用中断或软件关断 IPM 的 PWM 控制信号, 从而达到保护目的。如在基于 DSP 控制的系统中, 利用事件管理器中功率驱动保护引脚(PDPINT)中断实现对 IPM 的保护。通常 1 个事件管理器产生的多路 PWM 可控制多个 IPM 工作。其中每个开关管均可输出 FO 信号, 每个开关管的 FO 信号通过与门。当任一开关管有故障时输出低电平, 与门输出低电平。将该引脚连至 PDPINT, 由于 PDPINT 为低电平时 DSP 中断, 所有的事件管理器输出引脚均被硬件设置为高阻态, 从而达到保护目的。

以上 2 种方案均利用 IPM 故障输出信号封锁 IPM 的控制信号通道, 因而弥补了 IPM 自身保护的不足, 有效地保护了器件。

## IPM 的缓冲电路设计

在 IPM 应用中, 由于高频开关过程和功率回路寄生电感等叠加产生的  $di/dt$ 、 $dv/dt$  和瞬时功耗会对器件产生较大的冲击, 易损坏器件, 因此需设置缓冲电路(即吸收电路), 目的是改变器件的开关轨迹, 控制各种瞬态过压, 降低器件开关损耗. 保护器件安全运行。

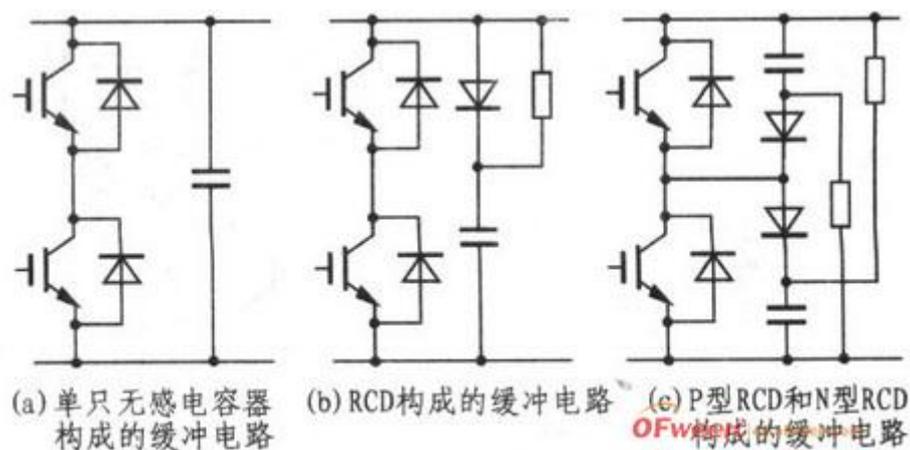


图4 常用的IMP缓冲电路

图4为常用的3种IPM缓冲电路。图4(a)为单只无感电容器构成的缓冲电路，对瞬变电压有效且成本低，适用于小功率IPM。图4(b)为RCD构成的缓冲电路，适用于较大功率IPM。缓冲二极管D可箝住瞬变电压，从而抑制由于母线寄生电感可能引起的寄生振荡。其RC时间常数应设计为开关周期的1/3，即 $r=T/3=1/3f$ 。图4(c)为P型RCD和N型RCD构成的缓冲电路，适用于大功率IPM。功能类似于图4(b)所示的缓冲电路，其回路电感更小。若同时配合使用图4(a)所示的缓冲电路。还能减小缓冲二极管的应力，缓冲效果更好。

在图4(c)中，当IGBT关断时，负载电流经缓冲二极管向缓冲电容器充电，同时集电极电流逐渐减少，由于电容器二端的电压不能突变，所以有效地限制了IGBT集电极电压上升率 $dv/dt$ 。也避免了集电极电压和集电极电流同时达到最大值。IGBT集电极母线电感、电路及其元件内部的杂散电感在IGBT开通时储存的能量，这时储存在缓冲电容器中。当IGBT开通时，集电极母线电感以及其他杂散电感又有效地限制了IGBT集电极电流上升率 $di/dt$ 。同样也避免了集电极电压和集电极电流同时达到最大值。此时，缓冲电容器通过外接电阻器和IGBT开关放电，其储存的开关能量也随之在外接电阻器和电路、元件内部的电阻器上耗散。如此，便将IGBT运行时产生的开关损耗转移到缓冲电路，最后在相关电阻器上以热的形式耗散，从而保护IGBT安全运行。

图4(c)中的电阻值和电容值按经验数据选取：如PM200DSA060的电容值为 $0.221\mu\text{F}\sim 0.47\mu\text{F}$ ，耐压值是IGBT的1.1倍~1.5倍，电阻值为 $10\Omega\sim 20\Omega$ ，电阻功率按 $P=fCU^2\times 10^{-6}$ 计算，其中 $f$ 为IGBT工作频率， $u$ 为IGBT的工作峰值电压。 $C$ 为缓冲电路与电阻器串联电容。二极管选用快恢复二极管。为了保证缓冲电路的可靠性，可以根据功率大小选择封装好的图4所示的缓冲电路。

另外，由于母线电感、缓冲电路及其元件内部的杂散电感对IPM尤其是大功率IPM有极大的影响，因此愈小愈好。要减小这些电感需从多方面人手：直流母线要尽量地短，缓冲电路要尽可能地靠近模块，选用低电感的聚丙烯无极电容器、与IPM相匹配的快速缓冲二极管及无感泄放电阻器。

### IPM在单相全桥逆变器中的应用

图 5 所示的单相全桥逆变电路主要由逆变电路和控制电路组成。逆变电路包括逆变全桥和滤波电路，其中逆变全桥完成直流到交流的变换，滤波电路滤除谐波成分以获得需要的交流电，控制电路完成对逆变桥中开关管的控制并实现部分保护功能。

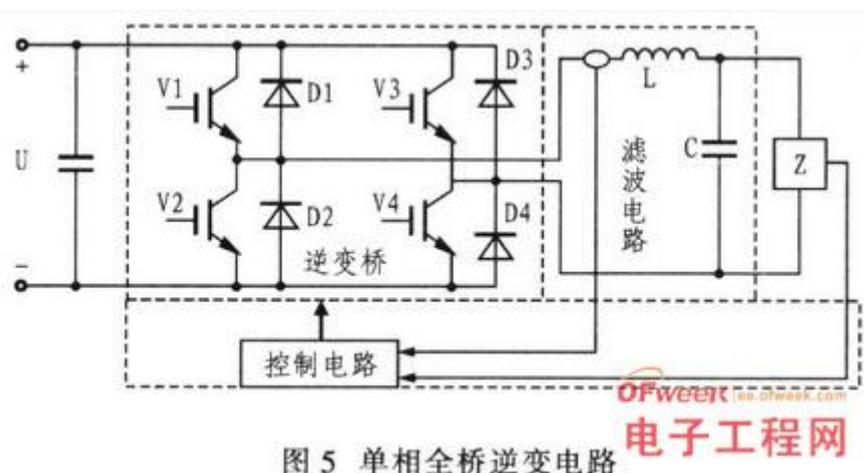


图 5 单相全桥逆变电路

图中的逆变全桥由 4 个开关管和 4 个续流二极管组成，工作时开关管在高频条件下通断，开关瞬间开关管电压和电流变大，损耗大，结温升高，加上功率回路寄生电感、振荡及噪声等，极易导致开关管瞬间损坏，以往常用分立元件设计开关管的保护电路和驱动电路，导致电路庞大且不可靠。

本文采用一对 PM200DSA060 双单元 IPM 模块分别代替图中 V1、D1、V2、D2 组合和 V3、D3、V4、D4 组合构成全桥逆变电路，利用 DSP 对 IPM 的控制，完成了中频率 20kW、230V 逆变器的设计和调试，采用了如上所述的驱动电路、图 4(c) 中的缓冲电路和基于 DSP 控制的软件 IPM 保护电路。设计实践表明：使用 IPM 可简化系统硬件电路、缩短系统开发时间、提高可靠性、缩小体积，提高保护能力。