

电力电子器件的模块化与集成化

清华大学 蔡宣三

摘 要: 概要介绍电力电子器件的模块化与集成化发展进程以及功率模块、单片集成模块和智能功率模块等三种常用的电力电子器件模块。

关键词: 电力电子; 器件; 集成; 模块; 单片; 智能

早期的电力电子产品用分立元器件(discrete devices)组成, 功率器件安装在散热器上, 附近安装驱动、检测、保护等印刷电路板(PCB), 还有分立的无源元件。用分立元器件制造电力电子产品, 设计周期长、加工劳动强度大、可靠性差、成本也高。

因此电力电子产品逐步向模块化、集成化方向发展, 其目的是使尺寸紧凑、实现电力电子系统的小型化, 缩短设计周期, 并减小互连导线的寄生参数等。电力电子器件的模块化和集成化, 先后经历了功率模块、单片集成式模块、智能功率模块(IPM)等发展阶段。其中功率模块与驱动、保护、控制电路是分立的, 而单片集成和IPM中的功率器件与驱动、保护、控制等功能集成为一体。

1 功率模块

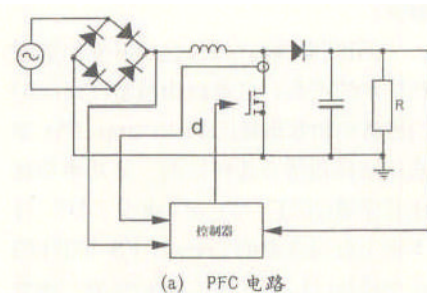
电力电子变换器常常需要多个功率器件组成, 例如一个双向开关至少需要两个功率器件和两个二极管; 考虑串并联, 单相、三相半桥或全桥开关电路要用几个、甚至几十个功率器件和一些辅助器件(如快速二极管FD)组成。电力电子变换器的功率器件间的互连引线多, 寄生电感大。为了使其结构紧凑、体积小、加工方便, 更为了缩短开关器件间的互连导线、减小电感, 功率器件必须实现模块化、集成化, 称为功率模块。图1给出一个三相全桥整流模块的外形图,

模块有3个输入接线端, 接三相电源; 有2个输出接线端, 接负载。

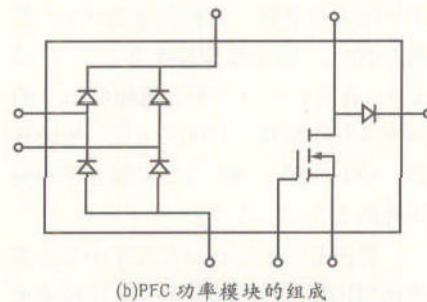


图1 三相全桥整流模块的外形图

将若干功率开关器件和快速二极管组合成标准的功率模块(Power module), 是集成电力电子技术发展进程



(a) PFC 电路



(b) PFC 功率模块的组成

图2 单相 Boost PFC 变换器

中最初步的集成化、模块化。因为这种功率模块没有与驱动、控制、保护、检测、通信等功能集成。现在国内外已经开发出功率MOS管、可控整流元件或晶闸管(SCR)、双极型功率晶体管以及IGBT等功率模块。

最简单的功率模块是单相功率因数校正用的Boost PFC功率模块, 它包含一个IGBT(或功率MOS管)与一个Boost二极管以及4个整流管组成的单相桥。图2(a)、(b)分别给出单相Boost PFC变换器系统及PFC功率模块组成图, 有8个接线端, 配以电感、电容元件, 就可以组装成单相Boost PFC主电路, 十分简便。

变频器主电路也有专用的功率器件标准模块, 可以灵活地组装成各种单相、三相半桥或全桥逆变器[1]。在双向开关的基础上, 德国EUPEC公司研制成功矩阵变换器专用的开关矩阵模块, 日本富士电机开发了矩阵变换器专用的逆阻型IGBT模块。所谓逆阻型IGBT是指可以承受较高反向电压的IGBT, 反向时这种IGBT可处于阻断状态。不像普通IGBT承受反向电压的能力较弱, 很可能被反向电压击穿, 所以普通IGBT要提高承受反向电压的能力, 必须串联一个二极管。一个 3×3 矩阵变换器中需要9个双向开关模块, 用普通IGBT, 每个模块需要2个IGBT和2个二极管相连接; 而用逆阻型IGBT, 每个双向开关模块直接由2个IGBT并联组成, 3×3 矩阵变换器用逆

阻型IGBT构成双向开关模块,可省去18个二极管,减少了器件功耗。

图3为IGBT模块的几种组合方式[1]。

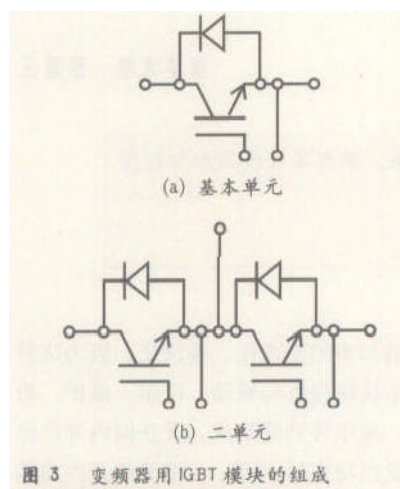


图3 变频器用IGBT模块的组成

IGBT基本单元模块,见图3(a)。由一个IGBT和一个FD反并联组成(称为1 in 1),有4个接线端。在需要更大电流的场合,可以用几个基本单元并联。

二单元(2 in 1)IGBT模块,见图3(b),由两个基本单元组成,有7个接线端,可看作是逆变器桥式开关电路的一个桥臂,可以构成单相半桥PWM逆变

器。3个二单元IGBT模块,就可以构成三相PWM变频器,当需要更大电流定额时,可以几个模块并联使用。

除了基本单元和二单元外,典型组合方式还有六单元(6 in 1)IGBT模块和七单元(7 in 1)IGBT模块。六单元IGBT模块由6个IGBT和6个FD组成,有13个接线端,形成一台三相变频器。同样可以几个模块并联,以便用于更大电流应用。七单元(7 in 1)IGBT模块,由7个IGBT和7个FD组成,可构成变频器和制动电路。还可以内置其他器件,如桥式整流电路的二极管、电容的充电器用的SCR,以及检测温度用的热敏电阻等。

图4给出两种有代表性的IGBT模块结构。图4(a)是通过外壳与接线端子一体化成型结构,减少了连接件的数量,使内部连线电感减小。通过在基片上直接敷铜(DCB)的方法,使IGBT模块热阻小、抗断强度高。

图4(b)所示为IGBT模块通过引线连接的结构,封装简单,可实现轻、小、超薄型功率模块,减少组装工序。合理配置IGBT和FD的芯片,可使热量有效散发。

IGBT发展到今天,已经开发出第五代技术的产品,它是以沟槽型(Trench)门极结构和电场截止(Fieldstop-FS)型基区结构相结合为特征的。其功率损耗比非穿通(NPT)型IGBT减少了25%。日本富士公司开发的Trench FS IGBT的新型模块[2],IGBT芯片和续流二极管(FWD)芯片并联,面积为普通IGBT模块的50%。富士新型模块有1 in 1、2 in 1、直到6 in 1几种。例如6 in 1的新型IGBT模块,1700V电压,电流有25, 300, 450 三种,125℃温度下正向压降约2.3~2.45 V。

德国EUPEC公司开发了中等功率传动用IGBT模块,模块的基板上内置电流取样电阻[3],可测量35kW等级逆变器的电流。

德国Semikron电子公司1996年开发了MiniSKIIP型CIB(整流、逆变、制动斩波)模块,并推向市场[4]。图5给出MiniSKIIP的典型组成:其中包括:三相桥式整流电路(六个整流管);制动斩波电路(IGBT和整流管各一个);三相PWM逆变电路(IGBT和续流二极管各六个)。动态制动时,斩波电路用做降压变换器,功率因数校正电路中,斩波电路则按升压变换器工作。将所有芯片(整流管、IGBT、续流二极管)封装在一个CIB模块内。

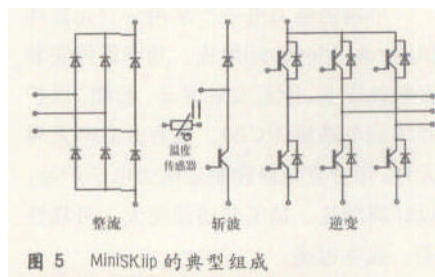


图5 MiniSKIIP的典型组成

2002年Semikron又推出新一代MiniSKIIP-II型CIB模块,使用当今前沿的芯片封装,改善热阻、减小尺寸,为0.37~30 kW变频器提供低成本、紧凑型1200V及600V功率模块。模块内还集成一个温度传感器,以检测模块内温度。

2 单片集成式模块

随着半导体集成电路技术的进步和发展,使有可能将功率器件、驱动、控制、保护等电路,集成在一个硅片上,形成所谓单片集成(System on chip)模块。典型的例子是美国功率集成(Power Integration)公司推出的三端离线式PWM开关TOPSwitch (Three Terminal Off-line PWM Switch) [5],它是一种高频开关电源专用的模块。2002年开发了第四代产品TOPSwitch-GX,具有软启动、线性限压检测、远程通/断控制、在线热关闭选通,并可调至零负载和由用户设置精确的限流值等功能。TOPSwitch-GX有33种型号,如

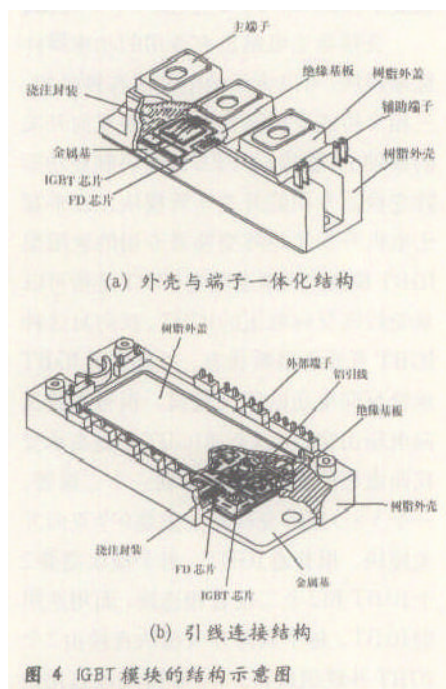


图4 IGBT模块的结构示意图

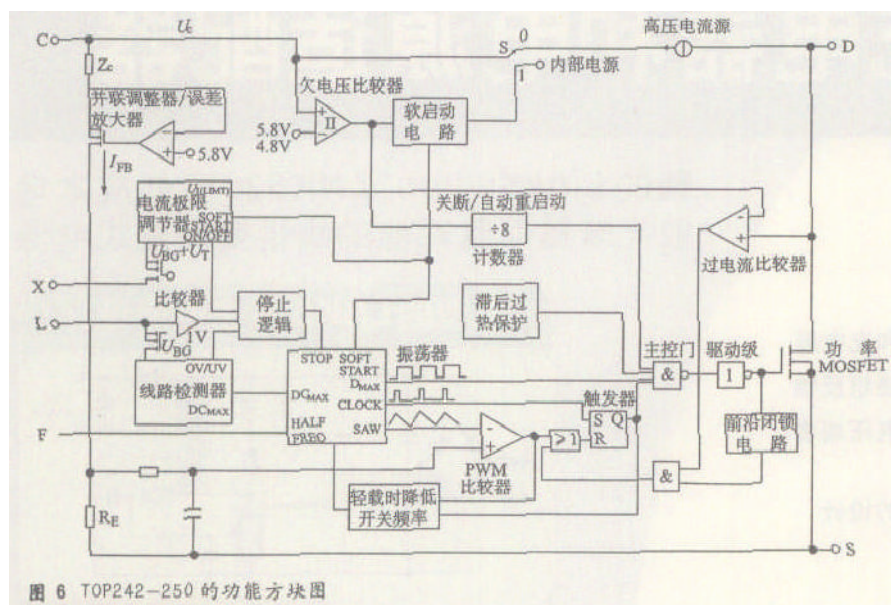


图6 TOP242-250的功能方块图

TOP242、TOP250等，这种模块将功率MOS管和PWM电路集成在同一芯片上。图6给出TOP242-250的功能方块图。可另外配接桥式整流电路、电感、电容、二极管及变压器，用以组装成130kHz、250W以下的Buck、Boost、Forward、Flyback等DC-DC或AC-DC开关变换器。其特点是外围电路简单、成本低廉。

图6中单片集成模块的接线端(引

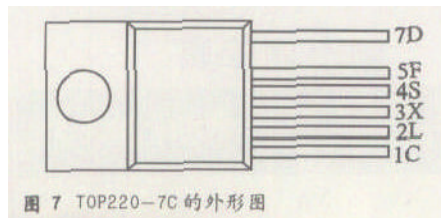


图7 TOP220-7C的外形图

脚)有六个：右边D和S分别为MOSFET的漏极和源极；左边自上而下，C为控制端，X为极限电流设置端，L为检测端，F为开关频率选择端。图7为TOP220-7C的外形图。

单片集成模块简单，应用方便，但由于传热、隔离等问题还没有有效解决，而且用单片集成技术将高电压、大电流功率器件和控制电路集成在一起的难度较大，目前这种集成方法只适用于小功率电力电子电路中。

3 智能功率模块IPM

智能功率模块IPM(Intelligent Power Module)是一种混合集成方法，20世纪80年代即已开发。日本东芝、富

士电机、Eupec /Infineon, Semikron, Powerex 等公司都生产IPM。将具有驱动、控制、自保护、自诊断功能的IC与电力电子器件集成，封装在一个绝缘外壳中，形成相对独立、有一定功能的模块。功率半导体器件和IC安装在同一基片(Common substrate)上，用引线键合(Wire bonding)互连，并应用了表面贴装(Surface mounted)技术。

智能功率模块是一种单层单片集成、一维封装；其主要问题是：互连线不可靠、寄生元件(电阻、电感)太多、一维散热，在kW级小功率电力电子系统中应用。进一步的发展方向是多芯片模块封装以及集成电力电子封装技术[6]。

参考文献

- 1 富士IGBT模块手册. 富士电机电子设备技术株式会社, 2004.5
- 2 Seiki Igarashi, et al. Integration Technologies for high power IGBT Module. Proceedings of the 3rd International PCIM China Conference for Power Electronics, 2004
- 3 M. Homkamp et al. Current Shunt Resistors Integrated in IGBT Power Modules for Medium Power Drive Application. Proceedings of the 3rd I PCIM China, 2004
- 4 J Li, et al. A New 600V CIB Module with IGBT, FWD and rectifier Operating up to 175°C. Proceedings of the 3rd I PCIM China, 2004
- 5 张勇. TOPSwitch-GX系列单片开关电源的应用. 通信电源技术, 21卷, No.3, 2004
- 6 蔡宣三. 集成电力电子技术. 第三届国际电源技术论坛论文集(北京), 2004.5

EPC

(上接第49页)

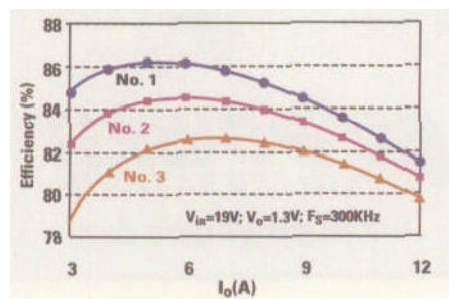


图5 三种器件所测得的效率比较

设计的稳压器中的同步FET。转换器输入

电压为19V，输出电压为1.3V。图5对采用这三种器件所测得的效率进行了比较。

CR=1的1号器件优于CR=1.4的器件。4A电流条件下(在典型的笔记本电脑应用中，这是Q2在大部分时间里处于工作状态的区域)的效率提升幅度为5%。对于这三个被评估的器件，Qgs1的变化幅度仅为5%，而Qgd的变化幅度则超过了45%。Qgd是实现优化器件设计的一个重要参数。尽管2号器件和3号

器件具有较低的导通电阻Rds-on，但是与1号器件相比，其传导损耗的减少并不能抵消因较高的充电比所造成的Cdv/dt损耗的增加。

需要注意的是，本例只关乎旨在阻止Cdv/dt导通的元件选择。栅极驱动电路的设计对Cdv/dt性能的优劣也有着决定性的作用。在研究前文所述的Cdv/dt损耗量化方法的过程中，栅极驱动电路的影响是很重要的，不过，栅极驱动器设计并不在本文的讨论范围之内。

EPC