

混合集成技术在电源中的应用

王兆安 杨旭 西安交通大学(西安 710049)

1 概述

电能是目前人类生产和生活中最重要的一种能源形式。合理、高效、精确和方便地利用电能仍然是人类所面临的重大问题。

采用电力电子技术的电源装置给电能的利用带来了革命。在世界范围内,用电总量中经过电力电子装置交换和调节的比例已经成为衡量用电水平的重要指标,目前,全球范围内该指标的平均数为40%,而到2010年将达到80%^[1]。这就对电源技术提出了新的挑战。

总的来说,对各种各样的电源装置提出的技术要求中,除了稳定性、可靠性、精确性、高效率等方面的要求外,小型化和轻量化也是十分迫切的需求。目前解决小型化和轻量化的主要手段有:

1) 高频化

通过提高电源装置的开关频率可以减小磁性元件和滤波元件的体积和重量,但开关损耗随之增加,效率降低,发热严重,电磁干扰加剧。因此出现了软开关技术,利用谐振改善开关过程,降低开关损耗,抑制开关产生的电磁干扰。

2) 元器件、结构的小型化

采用小型化的元器件,如IR公司的FlipFET(如图1),Semik-



图1 IR公司的FlipFET器件

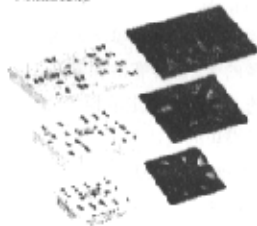


图2 Semikron公司MiniSKiP封装式的器件

ron公司的MiniSKiP(如图2)等。并且采用更为紧凑的结构设

计,以减小装置的体积。然而软开关技术的采用带来了电路结构复杂化的问题,加大了设计工作的难度。小型化对装置结构、散热等的设计也提出了更为高的要求。因此现代电源装置的设计难度不断加大、设计周期延长、设计成本提高,不利于电源装置的进一步推广应用和技术水平的进一步提高。另一个方面,电源装置中大量采用分立的、非标准的元器件,元件数量多,难以自动化生产。这些因素导致电源装置难以进一步降低成本、提高可靠性。这是包括电源装置在内的绝大多数电力电子装置所面临的共同问题。这一问题的解决将使电力电子学产生一次革命性的进步。

目前,国际电力电子学界普遍认为,电力电子集成技术是解决电力电子技术发展面临的障碍,进一步拓展电力电子技术应用领域的最有希望的出路。

电力电子集成概念的提出有10余年的历史,早期的思路是单片集成,体现了片内系统(System On Chip-SOC)的概念,即将主电路、驱动、保护和控制电路等全部制造在同一个硅片上。由于高压、大电流的主电路元件和其他低压、小电流电路元件的制造工艺差别较大,还有高压隔离和传热的问题,故单片集成难度很大,目前仅在小功率范围有所应用。而在中大功率范围内,只能采用混合集成的办法,将多个不同工艺的器件裸片封装在一个模块内,现在广泛使用的电力电子功率模块和智能功率模块(Intelligent Power Module-IPM)都体现了这种思想。1997年前后美国政府、军方及电力电子技术领域一些著名学者共同提出电力电子积木(Power Electronic Building Block-PEBB)的概念^[1-4],明确了集成化这一电力电子技术未来的发展方向,并将电力电子集成技术的研究推向高潮。

2 电力电子集成技术的基本概念

2.1 电源的集成化

常见的电源装置,包括直流电源和交流电源,通常由几部分构成:其中控制、人机界面、通信接口电路已逐步实现数字化,从而可以比较容易的实现集成化,而驱动电路和保护电路含有较多模拟电路,集成度相对较低。主电路包含开关元件、变压器、电感等磁性元件以及电容、电阻等元件,集成的难度很大。目前,电源装置中的主电路基本上以分立元件构成为主,在中小功率范围有采用单片集成元件TOPSwitch或某些混合集成模块,但离全面的集成化还有很大距离。

集成化的基本思想是通过封装的手段,将主电路的部分元件和驱动、保护、控制甚至人机界面和通信接口电路都集成到一

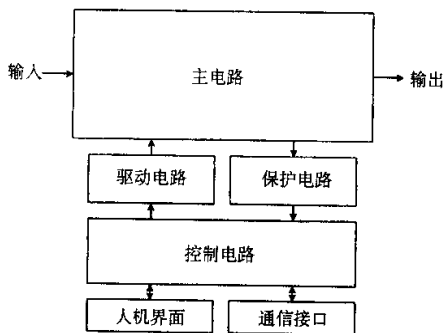


图3 电源的结构

个或几个模块内,实现电源装置的全面集成化。

2.2 为什么要集成化

采用集成技术主要可以解决以下几个方面的问题

1) 简化设计

将电力电子装置设计中需要解决的主要问题都在模块内解决,极大降低装置级和系统级的设计难度,减小设计工作量。这对于置身于各种具体应用领域,对电力电子技术掌握得并不十分熟练与深入的应用工程人员来说是非常有利的,他们可以专注于解决与具体应用有关的问题,不再需要操心电力电子电路中需要面对的那些特殊问题。通俗的讲,他们只需要将集成模块象积木一样拼接成系统即可。如果这一理想能够实现,可以预见,电力电子应用范围将进入前所未有的广度和宽度,足可以称得上是一次革命。

2) 简化制造

集成化将会大大减小装置与系统的元件数量,从而提高其制造过程的自动化程度。大部分的元器件集成在模块内部,而标准化的集成模块是以较高的自动化程度批量制造的。因此整个制造过程的自动化程度将会大大提高,制造周期缩短,成品率提高,而成本会降低。

3) 降低成本

勿庸置疑,集成模块的设计需要花费较多的人力和较长的设计周期,因此设计成本会较高,但具有通用性的集成模块一旦被设计出来,就可以千百次的被重复应用,分摊到每个装置和系统的设计成本很低。集成模块可以批量生产,因此其制造成本较低。装置和系统的制造得以简化,其制造成本也会降低。因此,总的来说,集成化将会显著的降低装置和系统的成本。

4) 提高性能

小型化是集成技术带来的最显而易见的进步,但还远不止于此。采用紧凑的互连和封装,将使电路中的寄生电感等不利于电路工作的寄生参数显著减小,从而降低电路的开关应力和噪声,使电路的可靠性大大提高。同时,开关噪声的降低和电路的紧凑布局还将大大降低电路的电磁干扰,提高电磁兼容性。

另一方面,采用标准化的集成模块,还可以是系统的设计更为规范和完整,避免人为因素造成的某些方面性能的缺陷。

2.2 集成所面临的问题

虽然集成技术可以带来诸多好处,但实现集成化所面临的困难也是很大的。最主要的技术问题有:

1) 封装与互连

在分立元件构成的电路中,互连主要采用印刷电路和导线,而在集成模块内部,则较多采用微电子技术中的互连技术,如铝丝压焊、蒸镀铝膜等。但这些工艺多用于低压、小电流的集成电路的互连和封装,用于电力电子集成就存在电流承载能力不足、分布参数偏大、可靠性不够高等问题。随之而来的还有耐高电压的绝缘材料,焊接材料等很多问题。由于集成模块的制造是集成化的关键之所在,而高性能、高可靠性的封装与互连技术又是制造集成模块的前提,因此许多学者认为封装和互连技术是集成技术要解决的核心问题,是有一定道理的。目前已有的互连和封装技术还不能令人满意,因此有关的研究进行的非常集中。

2) 电磁兼容

电力电子装置中主电路工作时会产生较强的电磁信号,可能对其驱动、控制和保护等信号处理电路产生干扰。在分立元件构成的装置中,主电路和控制电路的空间距离较大,这一问题表现得不是十分突出。在集成模块中,二者的间距小于5~10mm,因此抑制相互间的干扰变得十分重要。这在电磁场分析、电磁兼容模型、电路设计等方面提出了新的挑战。

3) 传热

与普通的集成电路相比,电力电子集成模块的发热量大2~3个数量级。与分立元件构成的装置相比,集成模块热集中的问题也要严重的多。并且在集成模块内部,发热量较大的开关元件和发热量很小的控制电路元件安装距离很小,控制电路元件会被开关元件“加热”。在狭小的空间内,有效控制热量的流动从而控制开关元件和控制电路元件合理的升温,对模块的可靠工作是非常重要的。

4) 可靠性与成品率

由于包含了控制电路,集成模块内的元件数将比现有功率模块乃至IPM都多的多,而可靠性和制造的成品率是随着元件数的增加而降低的。可靠性决定着模块的可用性。成品率则在很大程度上决定了模块的制造成本。因此能否提高可靠性和成品率,也是集成技术成败的关键之一。

2.3 集成的方法

总的来说,电源装置的集成可以分为3个不同的层次和形式:

1) 单片集成

即将电力电子电路中的功率器件、驱动、控制和保护电路都

采用半导体集成电路的加工方法,制作在同一硅片上,体现了SOC(System On Chip—单片系统)的概念。这种集成方式集成度最高,适合大批量、自动化制造,可以非常有效的降低成本、减小体积和重量,但面临高压、大电流的主电路元件和其他低压、小电流电路元件的制造工艺差别较大,还有高压隔离和传热的问题。故单片集成难度很大,目前仅在小功率范围有所应用,如TopSwitch等。该电路集成了一个典型的离线式开关电源所需的控制、驱动和保护电路,并包含一个高压大电流的MOSFET,其内部结构框图如图4所示。随着新型半导体材料和加工工艺的发

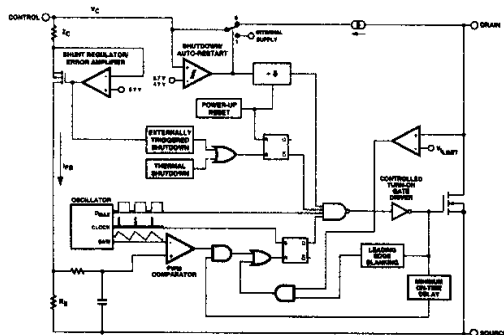


图4 TopSwitch单片开关电源集成电路

展,将来必然向较大的功率等级发展。

2) 混合集成

就是采用封装的技术手段,将分别包含功率器件、驱动、保护和控制电路的多个硅片封入同一模块中,形成具有部分或完整功能的、相对独立的单元。这种集成方法可以较好的解决不同工艺的电路间的组合与高电压隔离等问题,具有较高的集成度,也可以比较有效的减小体积和重量,但目前还存在分布参数、电磁兼容、传热等具有较高难度的技术问题,并且尚不能有效地降低成本,达到较高的可靠性,因此目前仍以中等功率应用为主,并正在向大功率发展。混合集成的典型例子是IPM。在某种意义上,混合集成是在集成度与技术难度之间,根据当前的技术水平所采取的一种折衷方案,具有较强的现实意义,是目前电力电子集成技术的主流方式。

Vicor公司采用混合集成方式构成的小功率开关电源模块如图5所示而对于中大功率电源来说,可以采用将开关元件和磁性元件分别封装在不同的模块中的方案。采用这样的方案构成的电源如图6所示^[5]。

3) 系统集成

也就是系统级的集成,这是目前在工程技术领域普遍采用的集成方案,其含义是将已有的实体经过有机的组合及拼装形成一个完整的系统,在电力电子技术领域,系统集成一般指将多个电路或装置有机的组合成具有完整功能的电力电子系统,如

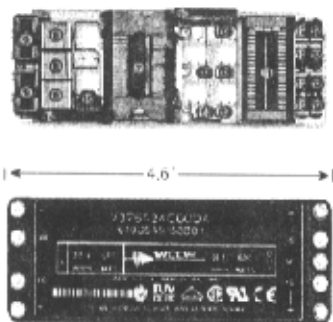
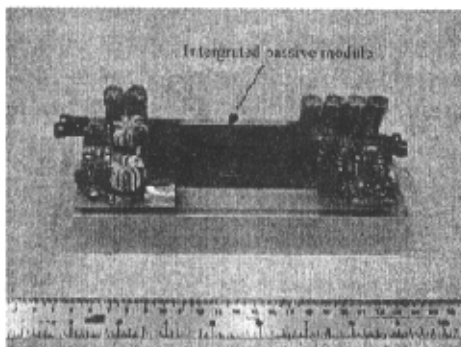


图5 采用混合集成技术的600W电源



集成模块的1kW半桥型电源实例

通信电源系统等。系统集成是功能的集成,具有低的集成度和技术难度,容易实现,但由于集成度低,与独立的装置和电路相比,体积和重量都无法显著降低,而且其构成仍以分立的元器件为主,设计、制造都较复杂,不能明显的体现集成的优势。目前,系统集成技术多用于功率很大、结构和功能复杂的系统。

目前,国际电力电子学界所谈论的集成概念一般指单片集成和混合集成,而很少包含系统集成这一层次。

3 国际电力电子集成技术的研究概况

3.1 电力电子集成模块的电路

用于集成模块内的电路应具有通用性,并应具有结构简单、效率高、易于集成的特点。在众多的电路中,图7所示的两个开关和两个续流二极管构成的半桥型电路可以用于构成半桥、全桥、三相桥等多种电路,具有很好的通用性。配合一定的外部电路和特殊的控制方式,还可以实现软开关。图8所示为一种采用不对称控制方式的软开关半桥型的电路^[5]。其他可以用于集成模块的电路还有移相全桥型电路等^[6]。

3.2 电力电子集成模块的封装技术

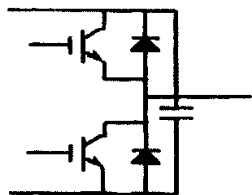


图7 硬开关半桥型电路

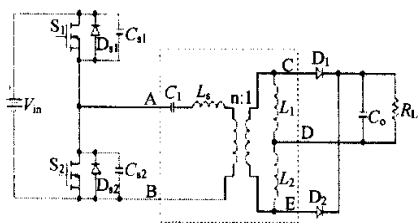


图8 软开关不对称半桥型电路

封装技术指将不同功能、不同工艺的功率器件管芯与部分或全部驱动、保护、控制电路元件采用一定的工艺手段相互连接和组装,构成集成模块。

目前比较成熟、应用最为广泛的方法是在 DBC 基板或铝基板上安装管芯和元件,用铝丝压焊互联的技术。图 9 即为采用铝丝压焊技术制作的含有 2 个 IGBT 和 2 个快恢复二极管管芯的

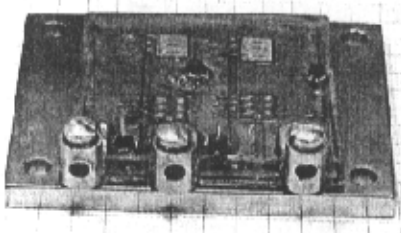


图9 采用铝丝压焊工艺的半桥型电路

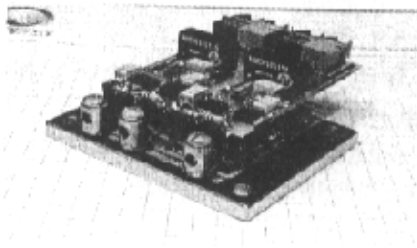


图10 安装了驱动电路的集成模块

半桥型模块的主电路,图 10 为安装了驱动电路后的集成模块。虽然铝丝压焊工艺应用广泛,但越来越多的研究表明,该工艺存在诸多问题,主要的有^[7-9]:

• 30 •

1) 互连线寄生电感较大,会给器件带来较高的开关过电压,形成开关应力。

2) 多根铝丝并联的邻近效应导致电流分布不均,造成局部电流集成,也成为加速模块失效的一个原因。

3) 高频大电流通过铝丝产生的电磁力、热应力等造成其可靠性较低,容易疲劳脱落造成模块失效。

4) 铝丝较细,传热性能不够好,不能有效的将器件表面产生的热量有效传出。

因此出现了许多不采用铝丝的互连方法^[10,11],如 MCM (Multi-Chip Module 多芯片模块,如图 11)、BGA (Ball Grid Array 焊球阵列,如图 12)等技术,但这些方法目前都还不够成熟,还不能达到足够高的可靠性,并且因为成本较高而难以商业化。

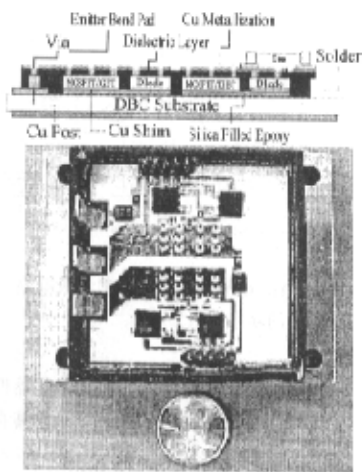


图11 采用 MCM 技术的集成模块

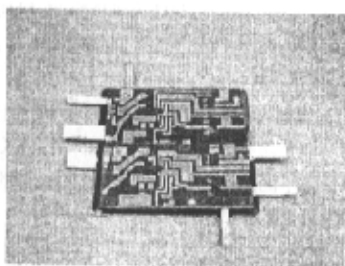
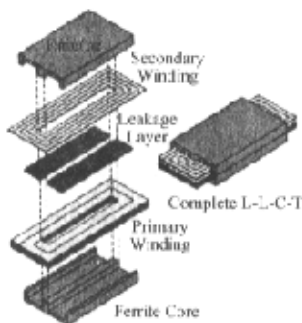


图12 采用焊球阵列技术的集成模块

3.3 磁集成和无源元件集成技术

电源装置中往往包含变压器、电感等磁性元件,不仅体积

大,而且形状不规则,给结构设计带来很多不便。采用磁集成技术可以将多个磁性元件集成为一个磁集成元件,不仅减小了体积,而且便于结构设计。进一步还可以将电路中部分电容与磁性元件集成在一起,构成无源集成模块,进一步减小体积。图 13 是一种用于开关电源的磁集成模块的组成结构,而图 14 是该模块的实例。



13 磁集成模块的结构

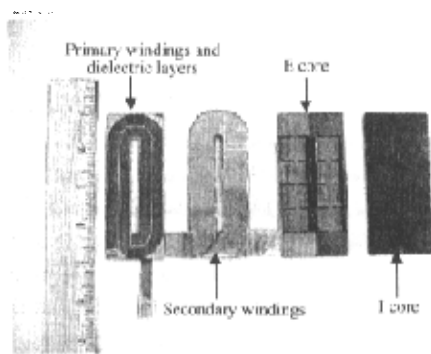


图 14 磁集成模块的实例

4 国内的研究进展

国内学术界目前已经对电力电子集成技术引起高度重视,并形成共识,认为应该在政府的推动下,尽快开展我国的电力电子集成技术的研究工作。来自清华大学、浙江大学、西安交通大学的部分学者已着手从不同的角度进行研究工作^[8],但总的来说还处于起步阶段。

中国国家自然科学基金已经批准了“电力电子系统集成的理论与关键技术研究”重点项目,由浙江大学、西安交通大学和西安电力电子技术研究所分别承担,于 2003 年 1 月起正式启动。国家自然科学基金项目的资助数额虽不大,但这一项目的立项具有深远的意义,标志着我国电力电子集成技术研究的正式启动。

经过一段时间的努力,本项目组在集成技术方面已经取得了一些初步的进展。简单介绍如下。

图 15 所示是采用 IGBT 管芯和铝丝压焊技术封装而成的全桥型集成模块的主电路,在此基板上进一步安装驱动和控制电路,就可以构成集成模块。该模块可以用于构成功率为 1.5kW

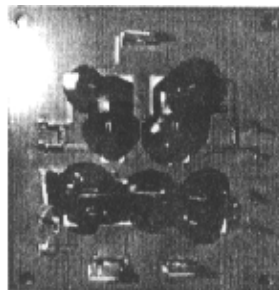


图 15 采用铝基板和铝丝压焊技术的全桥型电路模块

的开关电源。

所研制的用于集成模块的驱动电路如图 16 所示,其中给出了一个 IGBT 功率模块作为体积对比。该驱动电路含有过流保

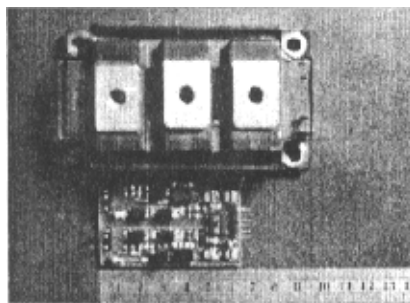


图 16 用于集成模块内的驱动电路

护和软关断功能,可以用于驱动 200A 以上的 IGBT 模块。采用 DSP 和 IPM 构成的三相变流器集成模块如图 17 所示。该模块可以用于构成逆变电源,变频器和 PWM 整流器等装置。

5 结论

本文对用于电源装置的电力电子集成技术进行了综述,阐述了相关的基本概念,详细介绍了国内外该领域的内容,作出如下结论:

1) 电力电子集成技术是目前电力电子技术领域最为重要的研究方向,必将成为未来该领域的研究热点,并在某种程度上决定电力电子技术未来的兴衰命运。集成技术必将成为电源领域技术进步的重要推动力量。

2) 单片集成、混合集成和系统集成可以看成是电力电子集成的不同层次和形式,现阶段,单片集成局限于小功率范围,中功率领域多采用混合集成或混合集成与系统集成相结合的形式。

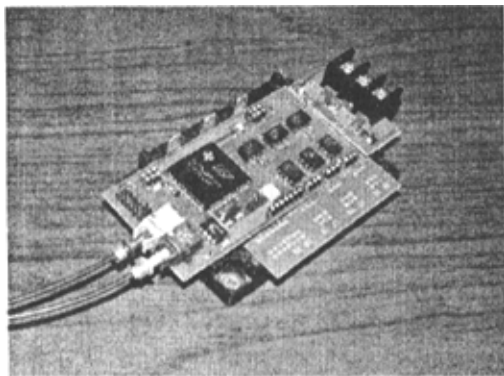


图 17 采用 DSP 和 IPM 构成的
三相交流器集成模块

式,而大功率领域仍以系统集成为主。由于具有更高的集成度和更好的性能,单片集成和混合集成是未来集成技术的主要发展方向。

3) 目前应该立足于现有技术水平,根据实际情况,采取合理的集成度和集成形式,并应尽快推进集成技术的实用化和产业化。国内学术界与企业界的合作对我国电力电子集成技术的研究和应用具有重要意义。

参考文献

- [1] Fred C. Lee, Dengming Peng. Power Electronics Building Block and System Integration. Proceedings of Power Electronics and Motion Control Conference 2000. IPEMC 2000, The Third International, Vol. 1, 2000, 1 ~ 8
- [2] J. D. Van Wyk, Fred C. Lee. Power Electronics Technology at the Dawn of the new Millennium Status and Future. Power Electronics Specialists Conference, 1999, PESC 99. 30th Annual IEEE, Vol. 1, 3 ~ 2
- [3] Kevin T. Kornegay. Design Issues in Power Electronic Building Block (PEBB) System Integration. VLSI'98, System Level Design, Proceedings, IEEE Computer Society Workshop on 1998, 48 ~ 52
- [4] Terry Ericson. Power Electronic Building Block... a Systematic Approach to Power Electronics. Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE, Vol. 2, 2000, 1216 ~ 1218
- [5] Rengang Chen, J. T. Strydom, and J. D. van Wyk. Design of Planar Integrated Passive Module for Zero-Voltage Switched Asymmetrical Half Bridge PWM Converter. Conference Record of the IEEE Industry Applications Conference, 2001, Volume 4. Page(s): 2232 ~ 2237.
- [6] Heping Dai, Kun Xing, Fred C. Lee. Investigation of Soft-switching Techniques for Power Electronics Building Blocks (PEBB). IEEE APEC Conference Proceedings, 1998, 633 ~ 639
- [7] Porter E. Ang S. Burgers K. Glover, M. Olejniczak, K. Schaper L. Miniaturizing power electronics using multi-chip module technology, International Conference on Multichip Modules, 1997. Page(s): 329 ~ 333
- [8] Collado A. Jorda X. Cabruja E. Godignon P. MCM-D package for power applications Integrated Power Packaging. IWIPP 2000, International Workshop on, 2000, 69 ~ 73
- [9] Fisher R, Fillion R; Burgess, J, Hennessy W. High frequency, low cost, power packaging using thin film power overlay technology. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1995. APEC'95. Conference Proceedings 1995, Tenth Annual Part: 1, 1995, 12 ~ 17
- [10] Xingsheng Liu, Xiukuan Jing, and Guo-Quan Lu. Chip-Scale Packaging of Power Devices and Its Application in Integrated Power Electronics Modules. IEEE TRANSACTIONS ON ADVANCED PACKAGING, 2001, 24(2)
- [11] Zhenxian Liang, Lee F. C. Lu G. Q. Borjovic D. Embedded power-a multilayer integration technology for packaging of IPEMs and PEBBs. Integrated Power Packaging, 2000. IWIPP2000. International Workshop on, 2000: 41 ~ 45