

功率电子学——一门新兴学科*

程仁杰 梁 雯 钟洪声

(成都电讯工程学院)

提 要

本文就功率电子学学科的分类、特点和任务等进行了论述,并在参考国内外的研究成果以及我们单位近几年的研究工作的基础上,提出了一些自己的见解和观点,供同行讨论,以图推动这一学科在我国的发展。本文最后综述了功率电子学的研究和发展动态。

功率电子学(power electronics)作为一门独立学科而受到各方面的重视是本世纪70年代的事。功率电子学的起源有二:其一起源于大功率低频率领域,固体器件(主要是晶闸管)广泛用于电机控制是其基础;另一起源于相对小的功率和相对高的频率领域,宇航事业的发展是其主要推动力。

一、什么叫功率电子学

从现有文献看,功率电子学主要有两种含义:一种含义对应于信息电子学^[1],信号处理是一般电子学研究的课题。它涉及到对来自输入端的信号进行某种加工,如模拟放大、数/模或模/数转换等。为进行这一处理,显然电功率是必要的,但通常都比较小。因此我们可以说,在信号处理中,加工信号是目的,而所需功率仅是达到目的所必须采用的手段。功率处理是按照由插入信号所规定的某种功能对输入功率进行处理,这便是功率电子学研究的领域。例如,用插入信号作手段将输入功率的电压(电流)、频率、相位等变换为另一电压(电流)、频率、相位的输出功率。典型例子如直流或交流到直流或交流的各种变换。显然,在这里信号是手段,而功率处理是目的。另一种含义是在电气工程分类为电子学、电力学和控制学的基础上,认为功率电子学是界于三者之间的边缘学科^[2]。电子学主要研究信号处理中的器件和电路理论。电力学主要涉及大功率发电、送电、配电和用电的静止或旋转设备。控制学主要是研究在连续或离散抽样情况下反馈形成闭环系统的稳定性和响应特性。在这三者之间的就是功率电子学。它是一门应用电子学技术去控制或变换电功率的科学。

功率电子学的上述两种含义各有其侧重点,但有几个共同点是很明确的。首先,它是一门边缘学科,它涉及到电子学、电力学和控制学等;其次,功率电子学发展到今天,它所包括的范畴不是工业电子学所能包括的,特别是象功率电子学领域中的器件学科;另外,

* 1986年3月18日收到,1986年6月23日修改定稿。

本学科既是一门具有许多理论课题的学科, 又是一门实践性很强、应用范围很广的学科, 有许多技术问题有待开发和研究. 例如, 它在电力学中电机调速驱动、静止无功功率补偿、高压直流输电等方面的应用; 在各种家用电器节能方面的应用; 在电子学中功率放大、开关电源等方面的应用; 特别是在宇航方面的应用, 因为在那里对轻量化、小型化和高效率的要求突出. 总之, 功率电子学也可以说是一门应用科学, 对它进行研究和开发可以较快地收到经济效益.

二、功率电子学的特点

(1) 在功率电子学学科里, 功率的变换效率是极重要的一项指标. 它不同于信息电子学, 在那里主要性能要求是信号处理的有效性、高指标. 例如, 在信号处理时常常要求负载匹配, 以达到失真最小和功率输出最大, 而对效率则无严格要求. 因此, 在器件和电路的研究上, 总是设法用较少的装置去达到预期的信号处理目标. 但在功率电子学领域, 功率处理是目的, 效率是至关重要的问题. 例如, 处理 10W 的输入功率, 若只有 5W 的功率输出, 损耗的绝对值虽不很大, 但效率太低, 是不可取的. 因此, 在研究设计器件和电路时, 主要要在满足输出功率的基础上, 尽可能提高效率.

(2) 在无源元件 R、L、C 的选择上, 对于功率电子学, 尽量不选用耗能元件 R, 而优先选用储能元件 L 和 C, 这都是为了提高功率处理的效率, 而在信号处理中则是尽量不选用难于集成的电感元件 L.

(3) 在有源元件的选择上, 对于功率电子学, 优先选用工作于开关状态的半导体器件. 而信号处理中, 为了提高性能指标, 既可以选用线性工作状态的半导体器件, 也可以选用开关工作状态的半导体器件. 但线性有源器件效率低, 如 A 类放大器理论上的最高效率为 50%, B 类放大器为 78.5%, C 类放大器也只有 90%, 而理想的开关是无耗的, 理论效率为 100%. 在功率处理系统中多采用开关器件, 其主回路设备一般都称为开关功率变换器或开关固态功率变换器.

(4) 在功率电子学的主回路中, 工作频率一般较高, 而且发展趋势是越来越高. 例如, 十年前比较标准的工作频率是 20kHz, 现在工作频率已增高到 100kHz, 甚至 1MHz. 这一点是很不同于电力学的, 电力系统通常工作于工频范围. 推动功率电子学工作频率越来越高的主要原因是力图减小功率处理器的重量和体积.

三、功率电子学的主要任务

这里主要说的是功率电子学系统的主回路——功率变换器的主要任务.

长期实践证明, 电能是最方便和最优越的一种能源形式. 但对于消费者来讲, 很少数是直接利用电能的, 而多数是把电能转换成其他形式的能(光、机械、热等)来利用的. 就是少数直接利用电能的消费者, 也很少直接利用统一的公共电源形式. 另外, 为了某种目的, 往往需要将一种形式的电能转换为另一种形式的电能. 为此, 必须对电源进行变换(处理)以满足不同消费者的需要, 或者满足某种转换的需要. 所以说总是需要在公共电

源与用户之间或者在两种电能形式之间插入一个功率变换器,这种变换器必须完成如下任务之一。

(1) 满足用户要求,对公共电源的某些电参数进行变换。例如,直接使用公共电源(50Hz,220V/380V)时,有可能使某些用户在效率极低情况下工作,如感应加热炉等;而有些用户则可能完全不能工作,如直流电动机等。所以这些用户要求将电参数改变到对他们来讲是最佳参数。

(2) 许多用户要求能控制由电源到用户的能量流速。如果接到公共电源上而不经任何变换处理,则照明灯光固定,热阻器件产生固定热能流速,电动机近乎恒速工作等等。但是这样就不能满足某些用户对亮度、温度和速度可调的要求。

(3) 为了满足某种要求必须变换电参数时,则要求变换器进行高效功率转换。例如,无功功率补偿则要求变换电压电流之间的相位差;高压直流输电则要求由低压直流变为高压直流或反之;功率放大器则要求变换电压和电流等。

总之,功率变换器有这样三种功能:(a)把电源改变到一个更适合于用户的形式;(b)控制能量流速;(c)功率传输的高效率转换。这就是说,功率变换器的主要任务是对输入电源(包括公共电源)进行处理,使它满足人们所规定的功能。由于功率变换器是插入在输入与输出之间的设备,为了提高变换效率,就必须尽力降低功率变换器本身的损耗。

四、功率电子学研究领域的分类

功率电子学是一门边缘学科,研究范畴极其广阔。我们认为可初步归纳为以下几类,并分别介绍它们的近期发展趋势。

1. 功率电子学系统和控制

功率电子学系统一般采用开关器件作为主回路,所以它是一个非线性时变系统,因此,对它的分析不能用现有的一般方法。造型技术是分析研究这种系统的有力工具。开关功率变换器的造型技术一般可以分为两类^[3,4],即数值法和解析法。数值法还可进一步分为直接模拟法和间接模拟法。数值法的特点是准确、通用和使用方便。缺点是由于系统是非线性和时变的,现有分析程序很烦琐、费时。解析法又分为离散法(差分方程和Z变换)和连续法(线性微分方程和拉氏变换)。离散法没有对变换器作任何变换,适用范围较广^[5]。这种方法虽然精度高,但复杂烦琐,并且难以表明系统工作的物理概念,所以实际应用受到了限制。连续法简化了开关变换器的固有特性,造型过程和数学结果都较简单,但精度不如离散法高。同时该法假定的近似条件要求系统响应时间比开关周期长得多。一个很重要的连续法是韦斯特(G. W. Wester)等在1973年提出的平均法^[6],其后又由米德尔布鲁克(R. D. Middlebrook)等加以发展^[7,8]。这种方法运用方便,还能清楚表明开关变换器工作的物理概念,并且最终还得到一个归一化模型,使用更加方便。但当系统响应频率达到开关工作频率一半时,其精度将迅速下降。以上讨论的均属小信号模型。当变换器处于阶跃式较大幅度地改变负载和电源时,该方法就不适用。1982年由埃里克森(R. Erickson)等人提出了一种大信号模型^[9]。在比较实用的解析法造型技术中,离散法和连续法各有其优缺点。目前有人正在研究将这两方法结合起来,取长补短,形成

所谓离散-平均法^[9]。关于控制,在很长一个时期内,大多数变换器均用简单的单环控制系统。为了提高功率变换器的性能以及解决应用中的许多实际问题,有趋势使用多环反馈或前馈技术。应用控制理论主要是为了分析系统的稳定性,以及优化控制。至于测量问题则是解决象如何在内部开关作用下引起的高电平噪声中测量小信号等等。

2. 功率电子器件

在今天很难想象不用硅功率器件能够实现功率变换和功率控制。功率电子器件包括的范围很广,功率半导体器件是其中一部分,自 50 年代以来,特别是近十年来得到了快速发展。发展的目标主要是提高器件的额定值、开关速度、可靠性以及简化驱动。功率半导体器件主要分为两大类:双极型器件和功率集成器件。

双极型功率器件包括晶闸管(thyristors)、可关断晶闸管(GTO)和晶体管。对晶闸管的主要要求是高的电压闭锁能力,较大的电流传输能力,较高的电压(电流)变化率,较短的关断时间,较小的门极驱动要求以及较高的工作频率。但一种产品不可能满足所有要求,往往是设计一种产品,使其某一项性能较高,而以牺牲另一些性能为代价。为此发展了适用于各种用途的晶闸管。相控晶闸管(phase control thyristor)的电压、电流额定值可以很高,但工作频率很低,一般用于工频情况。逆变晶闸管(inverter thyristor)与前者相比,电压、电流额定值较低,但其关断时间短(15—75 μ s)。不对称晶闸管(ASCR)是不闭锁反向电压,与对称的相比,其主要特点是接通和断开的时间均短,而其正向传输压降只有对称的 50%,等等。GTO 象一个上了插锁的晶闸管,在门极加上负脉冲,可使其关断。它可控制直流电路中的功率,并且不象前面介绍的晶闸管那样需要复杂的换向电路。GTO 的主要工艺代表了晶体管和晶闸管的结合。它的关断时间已与其它晶闸管相比拟(2μ s < t_f < 15 μ s, 5μ s < t_r < 30 μ s)。已有报道 GTO 的最高电压定额已达 3000V,最大电流关断能力已达 100A^[10]。功率晶体管与晶闸管相比,晶体管的开关速度高(可工作于 100kHz),不需要换相电路。功率晶体管的射极结构对其关断性能影响很大,而集电极结构对减小开关损耗和提高基极反向偏置安全工作区(RBSOA)起关键作用。高压晶体管主要是靠牺牲正向电流增益来达到快速开关和大的反偏工作区的。所以高压功率晶体管的主要问题是电流增益低(一般只有 10),有反偏二次击穿问题。为此,设计了一种达林顿结构晶体管,以提高增益和增大电流密度。

另一类功率半导体器件是功率集成器件。由于晶体管有开关速度还不够高、有反偏二次击穿问题和驱动功率大等缺点,进而发展了功率 MOSFET 器件。功率 MOSFET 的优点是无反偏二次击穿问题,脉冲上升和下降边沿陡峭,驱动简单。它的缺点主要是栅源极间电容大,正向导通压降大等。因此,它主要用于高频(>50kHz)和低压情况(<100V)。MOS 功率器件在工艺结构上可分为 VMOS(V 型沟道 MOS)和 DMOS(双扩散 MOS)功率器件。由于功率 MOSFET 的导通电阻随击穿电压额定值的 2.5 次幂增大,所以在击穿电压相同的情况下,VMOS 结构的导通电阻比 DMOS 结构的大^[11]。由于双极性晶体管和功率 MOSFET 各有其优缺点,有人发明了一种具有两者优点的 MOS-双极型混合器件^[12]。利用双极型晶体管的传输电流密度大和正向压降小的优点,用它来传输电流;利用 MOSFET 驱动简单和开关速度快的特点,用它作为驱动或(和)用作双极型管子的射极断开。这种结合共有四种接法。还有一类功率集成器件——绝缘栅晶体管(IGT)。它是由

MOSFET 和场控晶闸管集成而成的。在相同电压闭锁能力和相同增益下, IGT 的电流密度比功率 MOSFET 的大 20 倍, 比双极型晶体管的大 5 倍。但是由于在 IGT 中少子参予导电, 故它的开关速度较低。为此采取了一些特殊的工艺处理, 使得 IGT 的关断时间在 $0.2\mu\text{s}$ 到 $20\mu\text{s}$ 之间可控。对 IGT 可以根据工作频率进行优化, 使它的导通损耗与开关损耗之和最小。还有一类性能更好的器件称做高压集成 (HVIC) 器件。HVIC 最早出现于 1980 年, 经过工艺结构的改进, 现在已有用于电源和电机驱动的 HVIC^[13]。

对其他元件器件的研究也有很大进展, 如正向压降低的整流二极管、高频大容量电解电容器和高导磁率、高饱和磁通密度的磁芯等。

3. 功率电子电路

为了高效率地实现各种变换 (AC-AC, AC-DC, DC-DC, DC-AC), 在所用功率处理器中包含许多电子电路。如主电路、防护电路(保护器件本身)、保护电路(防止功率处理器对外部的损坏)、滤波电路和控制电路等。

功率变换的主电路的拓扑结构已有大家熟知的 Buck、Boost、Buck-Boost 以及带变压器的单端正激、单端反激、桥式、半桥式和推挽式等。近年来, 利用网络的相互连接等, 提出了一些新的拓扑结构。最有成效的是什克 (S. Ćuk) 提出的优化拓扑结构^[14]。他经过分析观察, 根据等效电路变换原理, 提出了一种以电容器作为传输能量的所谓零纹波变换器和集成磁路结构的概念^[15,16]。1983 年埃里克森综合归纳出了七种双电感输入输出均非脉动的基本变换器^[17]。廖幼林在这方面也做了工作^[18]。

用于开关功率变换器的吸收电路 (Snubber) 技术主要有以下几个功能: 开关器件中的开关损耗的转移, 避免器件二次击穿, 抑制过电压和控制电压和电流的上升率。虽然由于引入吸收回路而降低了器件在开关期的损耗, 但是吸收回路本身也有损耗。梅默里 (W. Memurray) 提出一种优化设计, 使得吸收回路的本身损耗小于器件被降低的损耗^[19]。还有人提出把吸收网络的储能用变压器耦合送回到电源去。为了减少开关损耗, 还有一些电路技术, 如发射极开路法、驱动控制压力消除法和混合开关法。还提出了一些不用耗能元件的所谓无损耗吸收电路技术^[20]。还有一类电路技术不使用吸收回路, 而利用谐振原理, 以降低开关损耗。这种电路技术有多种名称, 如 E 类放大器, 调谐式变换器等^[21]。现在都将控制电路集成化, 以缩小体积, 增加可靠性。控制电路中的主振荡器有自激式和他激式两种。自激式简单, 不需要单独辅助电源, 但调试麻烦些。他激式工作稳定, 调试方便, 但需要辅助电源。调制方式有脉宽调制、脉频调制和混合调制等。此外, 还有过压过流保护电路、驱动电路、滤波电路以及含这些电路的分析方法。

4. 计算机辅助分析和设计

1980 年以来, 有许多文献讨论了开关功率调节器的计算机辅助分析和设计问题。尤其是 SPICE 通用电路模拟程序用于开关调节器的分析有了很大进展^[22]。皮尔斯 (Pierce) 的文章^[23], 用 SPICE-II 模拟程序去确定开关功率源的小信号和开关频率响应, 并且不要有特殊拓扑结构。也就是说可用它分析调谐式开关调节器。罗纳德 (Ronald) 介绍了一种新的算法^[24], 它可用于任何分段线性开关系统 DC-DC 变换器的模拟。还有一些文章讨论磁设计和电感线圈优化问题。在功率电子学中大量使用含磁芯的变压器和电感线圈, 它们往往是处于饱和状态, 设计时需要避免处于饱和状态。另外含磁芯的变压器和线

圈均有磁滞现象,有一篇文章^[25]专门讨论了用 SPICE-II 通用程序对磁饱和和磁滞现象进行造型,这是很有价值的。

5. 应用功率电子学

功率电子技术的应用范围很广,从国防到民用,从宇航学到家用电器等包罗万象。用得最多的有以下几个方面:(1)用于旋转机械,如电机调速等^[26];(2)用于开关稳压电源;(3)用于高压直流输电,这是功率电子技术应用的最典型的例子。交流电在发电、配电和用电中优点很多,但在输电中还是直流电比较方便。现在有趋势在高压大功率远距离输电中,尽量采用直流方式,这将用到 AC-DC 和 DC-AC 变换器;(4)用于静止无功功率补偿;(5)用于调压、调功率流量等;(6)用于家用电器,前途广阔,例如,日光灯电子镇流器瞬时点灯装置;等等。

五、功率电子学的发展趋势

开关功率变换器最早出现于 20 世纪 20 年代,早期用的开关变换器有汞弧整流器,旋转变换器和磁放大器,它们都有一些固有缺点。直到本世纪 60 年代,半导体器件的出现才为功率电子学的迅速发展提供了有力的物质基础。近十年来,功率电子学得到迅速发展的主要原因有:(1)石油危机的冲击,促使人们去寻找新的能源。新能源多为直流电,为了与交流电网并网,必须进行 DC-AC 或 AC-DC 变换;(2)环境污染日益严重,促使人们去开发使用最洁净的电能源;(3)能源价格的上涨,促使人们在功率变换和控制中优先考虑效率问题;随着电能应用范围的扩展,人们对功率控制的速度、精度和可靠性等方向的要求增高了,应用现成技术已不能满足这些要求;(4)宇航业的发展也起了很大作用,因为在那里,效率、重量和体积是至关重要的。

功率电子学的进一步发展总是朝向功率电子设备的小型化、轻量化、低成本、高可靠、高效率和高指标(如低噪声、高稳定度、快速响应)等方面。这些发展目标之间的关系是既密切又互相制约,有的甚至是相互冲突的。研究功率电子学的任务就是要在这些目标之间寻求折衷,或者是提高某一指标来满足特殊需要,而牺牲其它指标。当前功率集成电子学最有发展前途,它可以使得上述种种要求得到最优化折衷。新一代功率集成电子器件将掀起第二次电子革命,它将冲击整个消费电子学和工业电子学领域^[27]。

本文初稿经顾德仁教授仔细审阅、修改,提出不少宝贵意见,特此致谢。

参 考 文 献

- [1] 顾德仁,功率电子学进展——从 DC-DC 变换器到功率处理器,中国电子学会线路与系统学会一般电路理论专题讨论会论文,无锡,1983.7.
- [2] J. W. Motto, Introduction to Solid State Power Electronics, New Delhi, Galgotia Publication, 1981.
- [3] R. D. Middlebrook and S. Čuk, IEEE International Semiconductor Power Converter Conference, New York, 1977, pp. 90—111.
- [4] H. A. Ower, A. Copel and J. G. Ferraute, IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1976 Record, Massachusetts, 1976, pp. 45—55.
- [5] F. C. Lee, et al., *ibid.*, 1976, pp. 62—72.
- [6] G. W. Wester, *IEEE Trans. on AES*, **AES-9**(1973), 376—385.

- [7] R. D. Middlebrook et al., IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1976 Record, Massachusetts, 1976, pp. 18—34.
- [8] R. D. Middlebrook, et al., IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1982 Record, Massachusetts, 1982, pp. 240—250.
- [9] D. J. Shortt, IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1983 Record, New Mexico, 1983, pp. 23—37.
- [10] T. Nagano, et al., IEEE Industry Application Society Conference, New York, 1981, pp. 750—753.
- [11] S. C. Sun, et al., *IEEE Trans. on ED*, **ED-27**(1980), 356—367.
- [12] D. Y. Chen and S. A. Chin, *IEEE Trans. on AES*, **AES-20**(1984), 659—664.
- [13] T. E. Ruggles, *Electronic Design*, **30**(1982), 69—73.
- [14] S. Čuk et al., IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1977 Record, California, 1977, pp. 160—179.
- [15] S. Čuk, IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1978 Record, Atlanta, 1978, pp. 1131—1146.
- [16] S. Čuk, IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1980 Record, Atlanta, 1980, pp. 12—32.
- [17] R. W. Erickso, IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1983 Record, New Mexico, 1983, pp. 9—22.
- [18] 廖幼林, 顾德仁, 一种新型的开关式直流变换器——电路模型、分析和设计, 成都电讯工程学院硕士研究生论文, 成都, 1981.
- [19] W. McMurray, *IEEE Trans. on IA*, **IA-16**(1980), 512—523.
- [20] P. O. Lauritzen, IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1983 Record, New Mexico, 1983, pp. 345—354.
- [21] N. O. Sokai, et al., *IEEE J. of SC*, **SC-10**(1975), 168—176.
- [22] G. Bello, Proc. Eighth National Solid-State Power Conversion Conference, 1981 Record, Washington, 1981, pp. Ha. 1—14.
- [23] G. F. Pierce, et al., IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1984 Record, Maryland, 1984, pp. 297—303.
- [24] C. W. Ronald, et al., *ibid.*, pp. 281—296.
- [25] D. Pei, et al., *ibid.*, pp. 247—256.
- [26] E. L. Owen, *ibid.*, pp. 3—11.
- [27] M. S. Adler, et al., *IEEE Trans. on ED*, **ED-31**(1984), 1570—1591.

POWER ELECTRONICS—A NEW EMERGING DISCIPLINE

Cheng Renjie, Liang Ting, Zhong Hongsheng

(Chengdu Institute of Radio Engineering)

The contents, classifications, features and tasks of the power electronics are expounded, and some our own ideas based on foreign research results and our institute work in recent years are proposed. These ideas presented here are for discussion in order to push the discipline forward. Finally, the trends of research and development in the power electronics are summarized.