

一九九二年
国际电力电子学术会议

译文集

中国电器工业协会电力电子分会
《电力电子技术》编辑部

一九九三年十一月

编译说明

当前,世界各国电力电子技术工作者之间的学术交流活动日趋频繁,与此相关的国际会议论文集集中反映了各国在电力电子技术方面的新动向、新技术、新工艺、新产品。而这些会议录的原本价格昂贵,影印本又要晚3~4年才能得到。为了使我国广大从事电力电子技术的学者、专家和工程技术人员尽快了解这些资料,尽快借鉴国际科技成果,我们对《第四次功率半导体器件和集成电路研讨会》(ISPSD '92) 和《应用电力电子学会议》(APEC '92) 两次会议论文集中,有关电力电子技术方面的论文,本着实用性、先进性、科学性的原则,精选出 118 篇,共约一百余万字,由中国电器工业协会电力电子分会、《电力电子技术》编辑部联合编辑出版了本译文集,以饕读者。

本译文集所选论文的主要内容包括: IGBT 器件、功率 IC、高压器件、二极管、MOS 门晶闸管、功率 MOSFET、器件的模拟和模型化、高频 DC-DC 变流器、线路滤波器的设计、谐振变流器、磁性元件、控制技术、大功率变流器、功率因数校正升压变流器、软开关变流器、不停电电源、航空和军事用变流器、功率电路的封装、电力电子线路的模型化和模拟、有源滤波器和谐波的消除等。

本译文集主要供电力电子学专业的科研人员和工程技术人员及大专院校有关专业师生阅读。

由于时间仓促,在译、编、校、审中,错误难免,望广大读者予以指正。

编者

参加本译文集翻译、校对的人员(按姓氏笔划排列):

译者

王黛琳	白长生	白继彬	付浦生	李佑持	李卓智
许文侠	许长安	陈力才	陈守良	陈军安	陈晓炜
沈大伟	罗兴宪	周友昆	钟桂清	俞 苹	赵西安
郭彩霞	张英泽	温绍森	黄 洁		

校者

吴济钧 俞 苹 郭彩霞 温绍森

定价: 55.00 元 总编 郭彩霞 总审 张志刚 李佑持

目 次

电力电子学的最新进展	(1)
------------------	-----

第一部分 第四次功率半导体器件和集成电路研讨会 (ISPSD '92) 论文译文选

磁悬浮运输中的电力电子学	(17)
功率半导体器件的非破坏性测量分析	(21)
功率半导体器件和集成电路的计算机辅助工程问题	(27)

IGBT 器件

高压 (3.5kV) IGBT 和 MCT 器件的静态和动态特性	(33)
具有 IGBT 和 MCT 特性的双门极 MOS 器件	(39)
采用最新模拟技术研究 IGBT 的稳态安全工作区	(45)
新一代快速低损耗 IGBT 模块	(49)
感性负载情况下 IGBT 关断特性的数字分析	(53)
非对称 n 沟道 IGBT 的低温运行	(57)
在边缘结构上具有新的半绝缘膜的高压 IGBT 器件	(62)

功率 IC

介质隔离 (DI) 和结隔离 (JI) 横向 IGBT 的比较	(66)
制作在硅-绝缘子衬底上的快速开关横向绝缘栅双极晶体管 (LIGBT)	(70)
SOI 片子的低温粘结	(73)
以源极输出电路方式工作的结隔离器件和 SOI 高压器件的比较	(75)
500V P 沟道 VDMOS-LIGBT 晶体管的最佳化	(77)
“片上片”模块的热耗散	(79)
制作在薄的 SOI 上的 700V 高压器件结构的模拟	(81)
高压 SOI 器件新的设计原理	(85)
基于新介质隔离技术的 500V 三相逆变器集成电路	(89)

高压器件

电流增益高的常关型双极静电感应晶体管 (BSIT)	(94)
---------------------------------	------

改善GTO用的高质量外延层的形成	(99)
一种新概念——过压自保护晶闸管	(104)
紧凑型GTO——一种安全工作区改善的新型门极可关断晶闸管的设计	(108)
4.5kV 3000A逆导GTO晶闸管	(112)
一种用于制造GaAs静电感应晶闸管的LPE新技术	(116)
新的GTO晶闸管结构	(120)
功率器件新的结终端技术	(122)
采用隔离栅极结构改善SIT的通态电阻	(126)
用作结终端工艺的偏压环和浮置环的比较	(130)
GTO电路中由于吸收二极管恢复特性的变化引起的失效	(134)

二 极 管

高压(4kV)发射极短路型二极管(ESD)	(136)
功率耗散低的肖特基势垒二极管	(141)
沟道二极管——一种新的快速开关功率二极管	(147)
低漏电流的肖特基势垒二极管	(153)
采用提高表面掺杂的高压终端技术	(158)

MOS门晶闸管

MOS栅器件用的带电源栅极驱动电路	(162)
基于MCT的高频电容电源的发展	(165)
MCT的正向I-V特性表达式	(169)
快速开关电力MOS门控(EST和BRT)晶闸管	(172)
一种新的高压BiMOS开关器件(FiBS)	(177)
作为晶闸管关断机制的MOS可控电流中断	(182)

功率MOSFET

一种新型的肖特基结反门极VDMOSFET	(186)
采用薄膜双极晶体管且具有负载短路保护的智能分立功率MOSFET	(191)
采用漏极槽型技术的新型功率MOSFET	(196)
采用双栅极结构的高阻断电压UMOS-FET的研究	(200)

模拟和模型化

4.5kV GTO在感性负载情况下关断失效的分析	(203)
反向浪涌电流条件下功率器件的故障预测	(210)
电力器件自身发热的模拟	(215)
电路模拟用的包含热特性的全动态功率二极管模型	(220)
IGBT的电热模拟	(226)
半绝缘体钝化的高压场板器件的模型化和最佳化	(228)

第2部分 1992年应用电力电子学会(APEC)论文译文选

智能功率技术的发展与现状	(230)
欧洲电力电子技术发展状况	(233)

高频DC-DC变流器

单端正激型变流器的占空比扩展技术	(243)
使用饱和铁芯的零电压开关谐振变换的新型自激PWM变流器	(250)
一种新型隔离式半桥软开关PWM DC/DC变流器	(260)
输出电压低的脱线零电压开关PWM变流器的最佳化和设计要点	(266)
采用零电压谐振转换开关和浸入冷却的全桥式DC-DC变流器	(275)
一种相移调制双调谐谐振DC/DC变流器:分析和实验结果	(283)
一种产生次级基准控制功率的方法	(294)

线路滤波器的设计

开关调节器用线路滤波器的系统设计方法	(302)
高功率因数升压变流器输入滤波器的设计依据	(309)
并联连接变流器系统用的线路滤波器的设计	(315)

谐振变流器

单端并联多谐振变流器和正向多谐振变流器的比较	(321)
具有容性输出滤波器的电流驱动零电压开关谐振变流器:分析和实验结果 ..	(329)

谐振交流器的AC分析: 用于最佳设计的包含寄生效应和无损耗吸收电路的串并联谐振交流器的分析	(336)
串并联谐振交流器的稳态瞬态分析	(347)
采用三级换相网路的两种零电压开关DC/DC谐振交流器特性的改进	(355)
串-并联谐振交流器在电容器充电上的应用	(364)
固定频率LCL型串联谐振交流器的分析和设计	(372)

磁性元件

高频磁性元件中非理想磁场分布引起的附加损耗	(379)
检测PWM DC-DC交流器的电抗器电流和DC输出电流的新技术	(385)

控制技术

使电流可控单相高压整流器输入电流畸变减小到最小的技术	(393)
AC/DC开关式电源用的一种新的反馈控制技术	(403)
超前功率因数电压型PWM整流器的一种新的负载电流控制法	(410)
用滑模控制优化Cuk交流器性能	(416)
应用滑模控制的DC-DC交流器的开关频率降低法的分析	(423)

分立功率器件: 应用、保护和模拟

以零电压和零电流开关的IGBT关断特性和开关损耗的研究	(432)
含集成保护芯片的密封式MOS功率器件	(440)
电路模拟器中使用的具有正、反向恢复的功率二极管混合模型	(445)
用于低损耗开关的III-V族半导体肖特基整流管的通态特性和开关特性	(451)
大功率GTO晶闸管的最佳门极驱动电路	(455)
UIS测试期间功率MOSFET的温升估算	(461)

大功率交流器

DC母线零电压换相的高频大功率PWM三相电压源逆变器	(465)
谐振直流环节交流器的母线交流箝位	(473)
全范围PWM的高效准谐振DC环节交流器	(481)
用于快扫磁共振显象的GTO高速逆变器	(488)

带输入不平衡补偿的强迫换相三相PWM交流控制器的分析和设计	(496)
逆变器的非线性特性及分离时间矢量电流控制	(504)

功率因数校正升压变流器

带有电容能量存贮的高频功率因数补偿器的有效值、直流、峰值和谐波等电流	(513)
功率因数等于1的变压器隔离和故障保护型1kW整流器	(523)
单相倍压升压整流器的电路拓扑	(530)
采用高钳技术的高效功率因数校正	(539)

不停电电源系统

针对用途AC-AC变流器拓扑的选择指南	(552)
改变增益电压调幅消除电源信号谐波法在AC-AC调节器中的应用	(562)
基于电压空间矢量的稀少噪音PWM技术的分析和实施	(569)
用于UPS系统的高功率因数谐振整流器	(576)
改进输入-输出特性的在线UPS	(580)
计算三相PWM逆变器电流平均值和有效值的一种简单而准确的方法	(588)
一种用于(美)国家航空和宇航局电-光学系统卫星的零电压开关双向电池 充/放电器	(597)

功率电路的封装

全部采用表面安装元件和采用绝缘金属基板的直流-直流变流器	(605)
用于航空电子分布式电源系统的制作在绝缘金属基板上的高频准谐振降压变 流器	(613)

航空和军事上的应用

一种高频零电压开关PWM变换器	(620)
航空与航天用大功率谐振环节变流器的系统设计	(627)

软开关变流器

具有瞬间升压功能的高密度1kW谐振功率变流器	(638)
------------------------------	-------

减小DC-DC升压变流器开关损耗的技术	(647)
有集成磁性元件的恒频率零电压开关变流器	(653)
采用LC-PWM-RDC单元的谐振周波不间断的DC-DC变流器系列: 分析模拟和实验结果	(661)
以100%占空比工作的高效1.5kW 390V/50V半波桥变流器	(666)
一种谐振DC/DC变换器	(674)
高频应用的谐振脉冲门极驱动	(681)

电力电子线路的模型化和模拟

带输入滤波器的PWM DC/DC变流器的动态响应	(686)
电力电子学中的热模拟	(694)
串联及并联谐振变流器的小信号模型	(699)

有源滤波器和谐波的消除

单相升-降压AC-DC变流器采用的一种新的有源功率因数校正法	(708)
单相交流电源用的串联PWM电压调节器的分析和设计	(715)
三相有源功率滤波器采用的一种新的技术	(723)

电力电子学的最新发展

Bimal K. Bose

摘要: 电力电子学是一门多学科技术, 它融电力半导体器件、交流电路、电机学、信息电子学、控制理论、微计算机、超大规模集成电路 (VLSI) 以及计算机辅助设计为一体。真正的电力电子技术专家不应该只专注于某一个方面, 而应该在上述各个方面都有经验, 这是电力电子学迅速发展提出的要求。本文回顾了电力半导体器件、交流电路和电力电子的控制技术等几个主要领域的发展, 并重点讨论了这些领域的发展趋势。

1. 引言

电能经过电力电子装置的“处理”以适应各种应用场合, 诸如交直流稳压电源、电化学过程、加热和照明控制、电机调速、感应加热、电子熔炼、电网有源滤波器、静止无功补偿器等。这里的“处理”是指应用电力半导体器件对电能进行变换 ($dc-ac$, $ac-dc$, $dc-dc$, $ac-ac$) 和控制。同使用电力半导体器件的线性功率放大器相比较, 工作于开关模式的电能处理方式具有更高的效率, 但其代价是在负载端以及电源端产生大量的谐波。在现代化电力电子装置中主要有两类半导体器件, 一类是电力半导体器件, 被认为是装置的肌肉; 另一类是微电子控制芯片, 被称作装置的大脑。两类器件本质上都是数字式的, 只是前者处理的功率水平是千瓦级而后者只有毫瓦级。这些器件的密切配合使得当今电力电子装置的体积小、成本低, 而且性能优良。

在工业生产中应用电力电子可以获得高产量和高质量。目前, 在所有发达国家中电力电子技术都是工业经济中不可缺少的工具, 它主要被用来对电能进行变换, 从而获得电能的高效率使用。例如在调速热泵中, 如果对压缩机采用同负载成比例的速度调节可以节能 30%, 用于电力电子装置的费用可以在

较短的时间内收回, 尤其是在电费高的地方。电动轿车、客车、机车的使用能够明显减少环境污染, 电能可以通过不污染环境的太阳电池、燃料电池、风力发电获得。现在全世界都在关注着酸雨和绿屋 (全球性变暖引起的二氧化碳和其它气体的积聚效应)。广泛地应用电力电子技术, 尤其是着重于能量变换和不污染环境发电, 可以帮助解决这些问题。

电力半导体器件的问世开辟了电力电子技术的新纪元。Bell 电话公司于 1956 年发明了 $pnpn$ 可触发电晶闸管, 后来被定义为晶闸管或可控硅 (SCR), 并马上被通用电气公司商业化。当然, 在此之前已经有了用硅或锗制做的二极管。从此后的三十年里, 电力电子学到迅猛发展。主要的研究方向是这样的: 电力半导体器件、变流器拓扑、分析和仿真、控制和估计技术以及控制硬件和软件。

本文简略回顾了近代电力电子技术在电力半导体器件、交流电路和控制技术等几方面的进展, 重点讨论这些领域的研究和发展趋势。

II. 电力半导体器件

近年来电力半导体器件发展迅速。在电力电子学历史上, 我们从来没有在如此短的时间内看到这么多新器件的出现。这些器件是电力电子装置的核心, 是变流器中最复杂、最娇嫩易坏的元件。电力电子工程师必须对这些器件非常通晓, 以便设计出高效、可靠、费用合理的变流器。电力电子学的一个重要发展趋势是以硅为原料的功率和控制器件的价格不断下降, 但性能逐渐提高, 然而体积庞大的无源功率器件却一直没有发展。因此, 工程师们正在为这些无源功率元件寻找“半导体硅解决方法”。一个例子就是新型开关电源中谐振和准谐振技术的应用。

正如前面所述,晶闸管的发明标志着现代电力电子时代的开始。从那时起,陆续有许多器件出现,例如双向晶闸管、门极可关断晶闸管(GTO)、双极功率晶体管(BJT)、功率MOSFET、绝缘栅极双极晶体管(IGBT)、静电感应晶体管(SIT)、静电感应晶闸管(SITH)和MOS门控晶闸管(MCT)。最后四种器件发明于八十年代,将在本节中予以介绍。

电力半导体器件的革新引起电力电子技术的发展,而微电子技术的发展促进了电力半导体技术的进步。固态电子学的研究人员长期致力于改进半导体加工、器件制作和封装工艺,因而现在能够以较经济的价格买到高密度、高性能、高可靠度的微电子芯片。这些研究成果对于电力电子器件发展起到极其重要的作用。如果不是受益于固态电子学的超大规模集成电路(VLSI)上的研究,那么电力电子器件仍将停滞在原始阶段。

晶闸管是一种三结 pnpn 器件，可以等效为一只 pnp 和一只 npn 晶体管以再生反馈方式联接。在门极施加一个短的电脉冲可使其导通，但一旦器件触发开通，门极就不具有关断能力。现代的光触发相控晶闸管的容量可达 6000V, 3500A。双向晶闸管是将两只反并联晶闸管集成在同一块芯片上，通过施加正负门极脉冲可使器件分别在电源的正半周和负半周导通。这种器件的研制水平可达 800V、40A。GTO 是一种晶闸管类型的器件，门极正脉冲电流可使其导通，门极负电流可使其关断，但关断增益很低（通常是 4~5）。因为开关损耗很大，GTO 变流器通常工作在 1kHz 开关频率以下。目前 GTO 的容量可达 4500V、3000A。BJT 是一种电流控制双结器件，它的开关速度比晶闸管型器件快得多，但存在二次击穿问题。BJT 模块的容量可达 1200V、800A。功率 MOSFET 是单极少子电压控制的无结器件，是所有器件中最快的一种，可以工作在几百千赫的开关频率，通常被用于高频开关电源中。但由于导通损耗大，功率 MOSFET 不适用于大功率变流器。该器件

的研制水平是 600 V, 50 A。

A. 现代电力电子器件

IGBT: 是一种 MOS 栅控双极晶体管, 包融了 MOSFET、BJT 和晶闸管的特性。图 1 示出了 IGBT 的基本结构和等效电路。这种器件于 1983 年商品化, 其结构类似于 MOSFET, 只是漏极的 n^+ 层被集电极的 P^+ 层代替, 它兼备 MOSFET 的高输入阻抗和 BJT 的导通特性。当栅极比射极电位高时, 在 P 区产生一个 n 型沟道, 这使 pnp 晶体管的基-射结正偏而导通, 引起 n 区内产生电导调制, 使得导通压降大大低于 MOSFET。去掉栅极正向偏置, P 区内导电沟道消失, 器件被关断。通过在寄生晶体管 npn 的基区 p^+ 层适当掺杂可以消除类似晶闸管的擎住效应。利用中子辐照少子寿命控制以及在射极区增加 n^+ 型缓冲层使得拖尾电流减小。IGBT 的电流密度比 BJT 和 MOSFET 大, 但它的管芯尺寸只有 MOSFET 的 30%。它的输入电容 (C_{iss}) 比 MOSFET 小得多。而且由于栅极-集电极结电容和栅极-射极结电容的比值比较小, 在高 dv/dt 的开通关断过程中增强了米勒反馈效应。IGBT 的 FBSOA 和 RBSOA 受结温 T_j 的限制, 没有二次击穿现象, 它的工作频率高于 BJT, 在中等功率水平下可运行于 20kHz 开关频率。目前 IGBT 的容量可达 1200V、400A, 被越来越广泛地采用, 可望很快成为 BJT 的替代品。

集电极

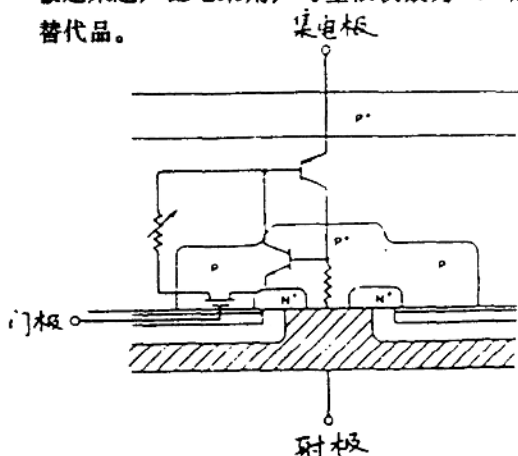


图 1 IGBT 的基本结构

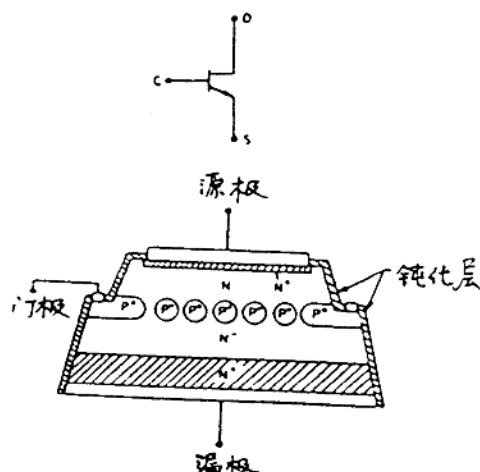


图2 SIT的基本结构

SIT: 是一种大功率高频器件, 而且显然是真空三极管的固态形式。它于1987年由Tokin公司商品化, 图2示出其基本结构。SIT是短的n型垂直沟道器件, 栅极掩埋于漏极和源极的n型外延层中间。它是常通器件, 但如果 V_g 是负的, 反偏 p^+n 结的耗尽层将阻止漏极电流通过。它与JFET很相似, 只是采用了垂直沟道和栅极掩埋结构从而使导通压降低。另外, 低的栅-源极沟道阻抗降低了栅极和源极间的负反馈效应。SIT已经以线性模式被应用于音频、VHF/VHF和微波放大器中。它具有比MOSFET更优越的可靠性、噪音和辐射硬度。尽管SIT的导通压降低于等效

MOSFET串并联之值, 但它的过大的导通压降使之不适合于通常的电力电子应用场合, 除非有FET那样高的开关频率要求。实际上, 由于栅-源极间等效电容和电阻较小, SIT可以工作在比MOSFET更高的开关频率。SIT是多子器件, 因而SOA只受结温 T_j 的限制。沟道阻抗的正温度系数特性使得SIT易于并联。

日本的大学和企业已经将SIT成功地运用于许多方面, 如AM/FM发射机, 感应加热, 高压小电流电源, 超声波发生器和线性功率放大器等。图3示出用于感应加热和熔断的12kW/100kHz谐振逆变器。

SITH: 也称作SI晶闸管, 是一种类似GTO的具有自关断能力的器件, 于1988年由TOYO公司商品化。图4示出SITH的基本结构和符号。它基本上就是具有 p^+nn^+ 型掩埋栅门极结构的 p^+nn^+ 二极管。和SIT相比较, SITH只是在阳极多了一个 p^+ 层。SITH也是常通器件, 在n区充满少数载流子。如果门极相对阴极被反向偏置, 将产生一反向型层阻止阳极电流流通。SITH不具备反向阻断能力, 这是为了适应高速要求而使发射极短路所致。其关断特性类似于GTO, 需要大的反向门极电流, 阳极有拖尾电流。GTO的比较可综合如下:

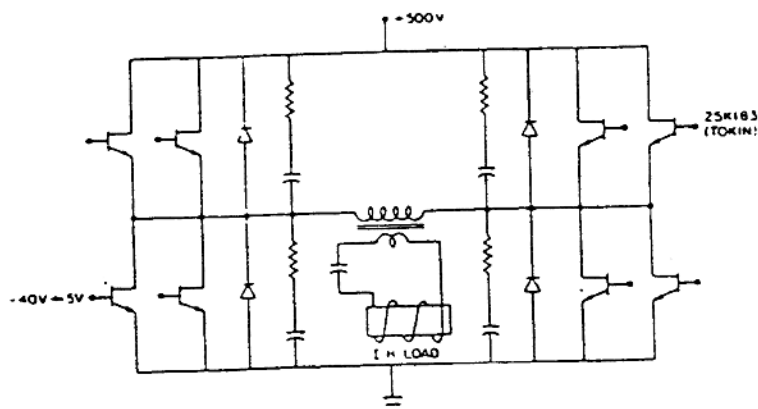


图3 感应加热用SIT谐振逆变器

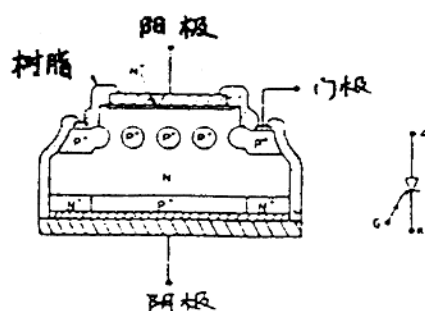


图4 SITH的基本结构

- 1) 不同于GTO, SITH是常通器件。
- 2) SITH的导通压降较高。
- 3) 关断电流增益小, 一般为1~3, 而GTO通常为4~5。
- 4) 两者都有长的拖尾电流。
- 5) SITH的开关频率比GTO高。
- 6) SITH的 dv/dt 和 di/dt 耐量比GTO高。
- 7) SITH的SOA有所改善。

MCT: 是类似于晶闸管的可以通过MOS门控制开断的器件, 其特性更象GTO, 但关断增益比GTO高得多, 它还具有IGBT级的开关速度但导通压降较低。通用电器公司1988年推出了500V/50A和1000V/100A的MCT样品。如今, Harris半导体公司制造出了900V/15A、1000V/30A、600V/60A的MCT, 其中600V/60A MCT的典型参数为: $T_j = -55^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$; 导通压降 $V_{ce} = 1.1\text{V}$; 可重复 $dv/dt = 5000\text{V}/\mu\text{s}$; 导通 $di/dt = 1000\text{A}/\mu\text{s}$; 开通时间 $t_{on} = 1.0\mu\text{s}$; 关断时间 $t_{off} = 2.1\mu\text{s}$ 。目前MCT尚未商业化。

一只MCT是由数千只MCT元胞并联集成于同一芯片上而成。例如, 一只500V/50A的MCT由10万只元胞并联而成。每只元胞的结构示于图5, 图6是其等效电路。导通时在门极施加负电压脉冲, 而关断时施加正门极脉冲。MCT具有类似晶闸管的pnnp四层结构, 通过pnp和npn晶体管的再生反馈效应开通。如果门极电位低于阳极电位, P-FET导通使npn晶体管正向偏置从而使

器件开通。如果门极电位高于阳极, n-FET导通使pnp晶体管的射-基结短路, 阻止再生反馈效应使器件关断。关断实际上是通过n层和p层中少子复合完成的。利用质子辐照技术可以控制拖尾效应, 维持低的导通压降。

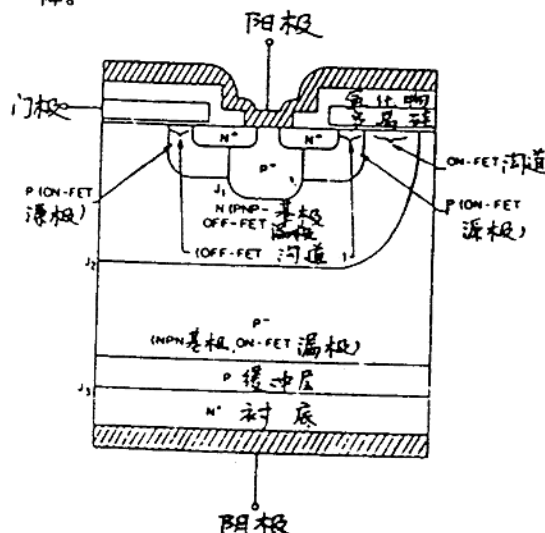


图5 MCT的基本结构

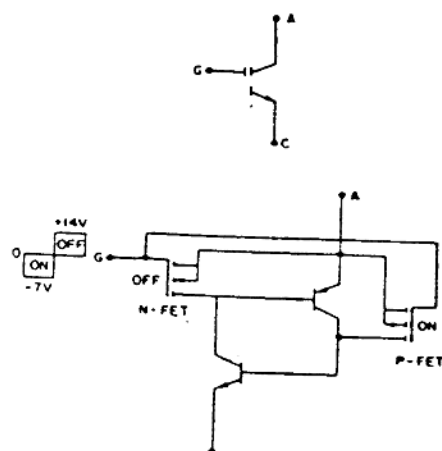


图6 MCT的等效电路和符号

MCT具有不对称的电压阻断能力, SOA受结温的限制。和MOSFET不同, 由于不存在米勒效应, 它的输入电容是固定的。使n-FET常通, 则器件受 dv/dt 和 T_j 影响很小。尽管MCT的标称结温是 $-55^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$, 但它已经被成功地运行于更大的温度范围

内。在高温状态下,由于漏电流会非常大而使电流关断能力减小(归因于 off-FET 的沟道电阻增大)。MCT 可以方便地串联运行以适应大功率要求。预计在今后电力电子学的发展中, MCT 将向其它大功率器件提出严重挑战。

目前的电力电子器件无一例外地使用硅作为基本材料,这种状况可能还将持续一段时间。然而新型材料,如砷化镓、碳化硅和金刚石很可能成为将来新一代器件的基础材料。碳化硅和金刚石具有高的能级,高的载流子迁移率以及高的电导率和好的导热性。这样可以制造出 MOSFET 类的器件,使其具有大的功率容量、高频低导通压降、好的辐射硬度和高结温特性。而金刚石(以合成薄膜形式)最具吸引力。例如一只金刚石功率 MOSFET 可以具有兆瓦级功率,比现有 MOSFET 频率高出 50 倍的高频特性,低一个数量级的导通压降和 600℃ 的结温耐量。另外,基于 Josephson 效应的超导功率控制器件也显示出广阔前景。

III. 功率变流器

功率变流器由一系列功率开关器件组成,根据控制电路的指令用来变换和控制电能。根据基本功能,变流器可分成:交流-直流变流器(整流器);直流-直流变流器(斩波器);直流-交流变流器(逆变器);交流-交流变流器,其中频率保持不变的称交流控制器,频率变化的称周波变流器。实际的电力电子系统往往同时包含几个变换环节。近代电力半导体器件和控制电子学的发展给功率变流器带来巨大影响,尤其是在体积、成本、可靠性和功能上。

A. AC-DC 变流器

为了给直流电动机和电化学处理提供电源,传统的 AC-DC 变流器是利用晶闸管相控技术和电网电压换流实现的。至今工业中应用的多数是这类变流器,电路拓扑结构也是承袭气体闸流管时代的。相控晶闸管具有对称的电压阻断特性和较低的响应速度。但

是这类变流器的优点是控制简单、效率高。现代的用于直流输电的高压直流(HVDC)变流器可能是这类变流器中功率最大的,它的一只桥臂需用大量的光触发晶闸管(6kV、5000A)串联在一起构成。

相控变流器的问题是它产生低次谐波,对于交流电网它还是滞后功率因数的负载。目前,这种非线性负载的迅速增多已对电网质量产生了影响。传统的消除谐波装置是笨重的无源滤波器,使用开关电容或可变电抗器并联电容器进行无功补偿。直到现在才开始使用 PWM 变流器来抑制谐波和进行无功补偿。图 7 示出了用 SITH 构成的有源电网调节器(APLC),它兼具滤波和无功补偿的功能。APLC 本质上是一只高频 PWM 变流器,用来吸收相控变流器负载产生的谐波和无功功率。实际上,如果在电容两端并联一只电池,它便可以在停电时提供电能(UPS 功能)。随后将介绍这种具有双重功能的电流型 APLC 的原理。目前 APLC 由于价格昂贵而没有被广泛使用。

APLC 主要用于设备的改进。在新制造的变流器系统中用它来滤除谐波和补偿无功功率是比较经济的。图 8 示出直流侧带有 PWM 升压斩波器的三相交流拖动系统,它可以调节电网线电流成为和电网电压同相的正弦波电流。而且,斩波器还能够调节电容电压来抵消网压的波动。图 9 是图 8 电路的三相形式。可以发现,直流侧的电抗器变成交流侧三相独立的电感。斩波器开通后将在电网侧产生三相对称的短路电流,而使交流侧产生大的电流纹波。但可以用一只小电容滤波使线电流成为正弦波。图 10 是用于直流电机调速的三相 PWM 整流器电路图。由 GTO 构成的电流型整流器不仅控制直流电流,而且使交流侧线电流成为正弦波,并保持功率因数为 1。交流侧的电容器用来抑制 GTO 的 $L di/dt$ 和消除 PWM 形成的谐波。

B. AC-AC 变流器

采用相控方式由晶闸管或双向晶闸管构

成的交流电压控制器（保持同频）被广泛地应用在照明和加热控制以及单相交流驱动中。相控周波变流器被用于 VSCF（调速恒频）飞机发电和大容量交流拖动系统中。由相控引起的谐波和无功功率问题在这里仍然存在，如前所述，APLC 是解决这些问题的有力工具。周波变流器可运行于

有环流模式，通过对此电流的大小进行控制，可以使输入端的无功功率不随负载的变化而变化。这样用固定大小的电容便可使输入端功率因数恢复到1。然而电容可能会和线路上的电感发生有害的谐振。目前，有源滤波器被推荐用于这种装置中来吸收有害的谐波。

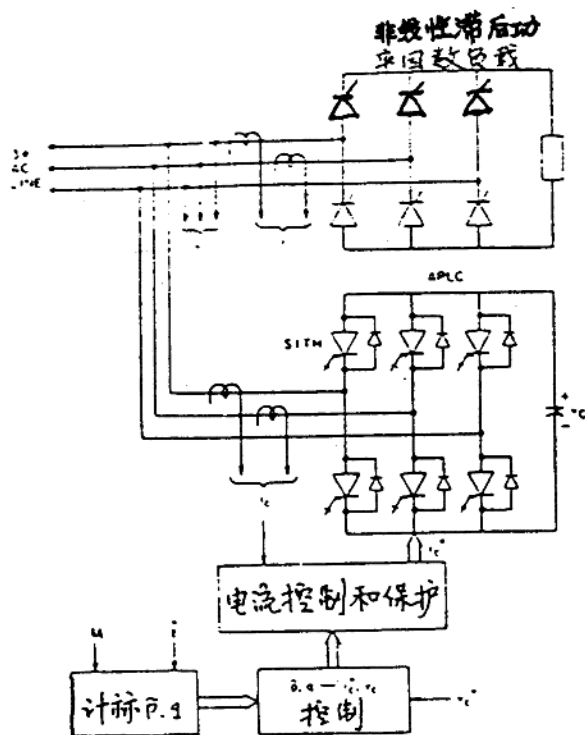


图7 由SITH构成的APLC

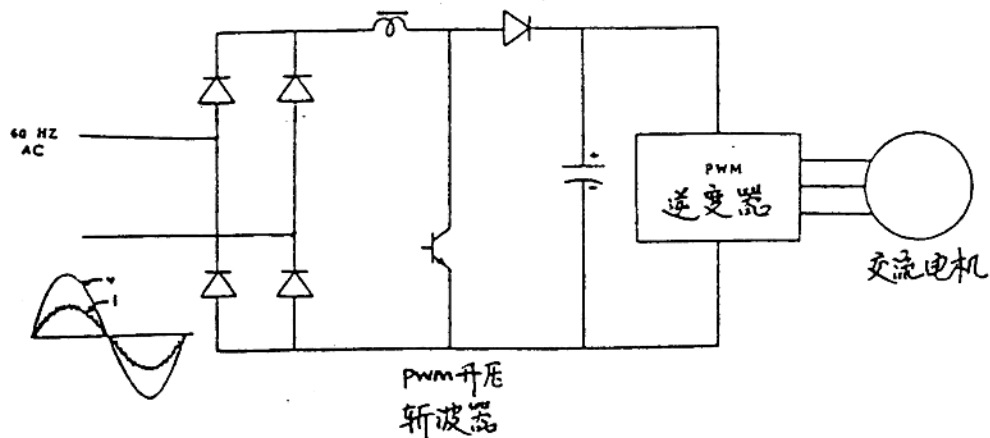


图8 单相整流加斩波器电机调速系统

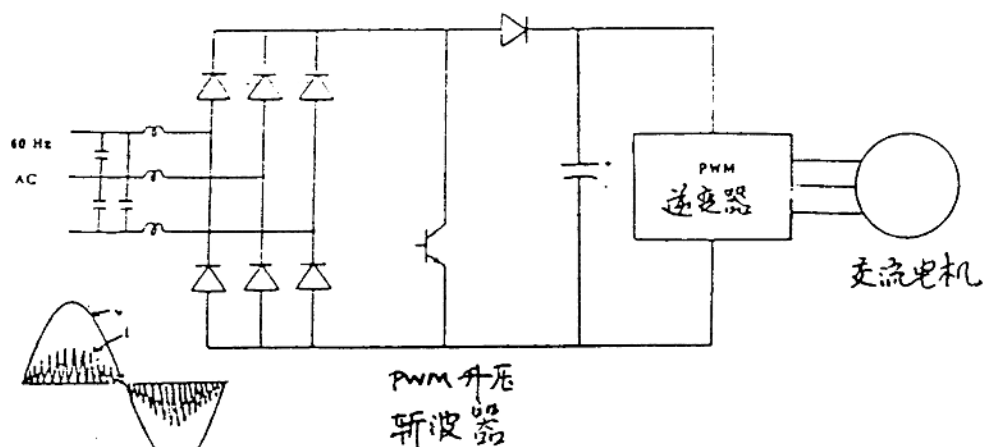


图 9 三相整流加斩波器电机调速系统图

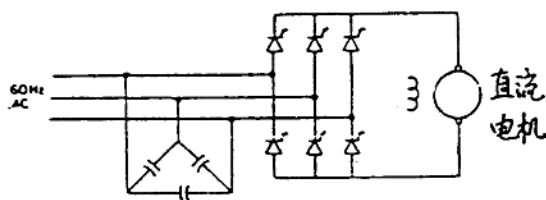


图 10 直流驱动用三相 PWM 整流器

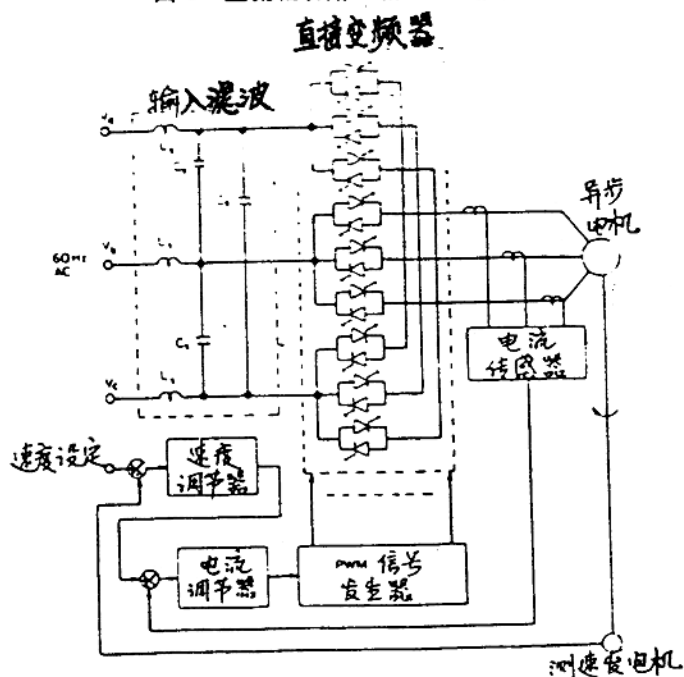


图 11 三相 PWM 直接变频整流器

图 11 示出另一类基于 PWM 理论的变流器，被称为矩阵变流器或 Venturini 变流器。电路中九只交流开关（由具有反向阻断能力

的自控器件反并联构成）组成一个阵列，直接将电网电压转变成宽频率范围的电能（甚至可以变成直流）。这个线路的优点是在所有操

作方式下总可以保持功率因数为 1, 困难之处在于高频 PWM 开关的阻断能力往往不对称。

C. DC - DC 变流器

DC - DC 变流器将不可调的直流电压变化成幅值可调的直流电压, 经常用于直流电机驱动和开关电源 (SMPS) 中。通常的 PWM 变流器 (也称作斩波器) 可分为降压型、升压型和升降压型。电机单象限运行时使用降压型变流器, 双象限运行时使用降压和升压混合变流器, 而四象限运行则需要能为两个旋转方向提供升压和降压功能的全桥式电路。大功率变流器一般采用 BJT、IGBT 或 GTO, 运行于几千赫开关频率内; 而低压小功率变流器采用功率 MOSFET, 运行在更高的频率上。小功率 SMPS 一般不具有再生发电功能, 采用功率 MOSFET 单象限运行, 开关频率可达 100kHz。采用高频化是为了减小无源元件, 如隔离变压器、滤波电感电容等的体积。

为计算机、通讯、仪器设备等设计电源的设计师们将大部分研究和设计的努力用于减小 DC - DC 变流器的体积。这是因为在微电子领域, 用于控制和信息处理的电子元件体积越来越小, 但是电源仍然体积庞大, 使其和微电子芯片不相匹配。采用 PWM 技术, 开关损耗和器件应力比较大, 任何想通过提高工作频率来减小体积的努力都将影响到开关损耗 (要求更大的散热片) 和可靠性。谐振和准谐振变流器有效地解决了开关损耗和器件应力的问题, 因此可以将开关频率提高到几兆从而设计出结构紧凑的电源。体积的压缩可使电源分布在电路板上。在带有谐振环节的变流器中, 直流电首先由谐振逆变电路变成高频交流, 然后再经高频整流和滤波得到直流电。逆变电路中开关工作于零电压或零电流模式, 消除了开关损耗。但是导通损耗或许会由于电流尖峰而增大。而且如果谐振频率很高, 电感电容上的损耗增加, 散热片增大, 反过来影响了变流器的体积。准谐振变流器可看作是 PWM 和谐振变流器的混合体, 它的

电路拓扑类似于 PWM 变流器的, 但是 LC 谐振电路将产生准正弦波形以实现零电流或零电压开关。在数兆赫的开关频率下, 电路中的寄生元件 (变压器的漏感以及开关的寄生电容) 便可被成功地用做谐振元件。

D. DC - AC 变流器

逆变器通常可分为电压型和电流型, 主要用在电机调速、UPS 系统、APLC 系统和感应加热系统中。工业应用中最广泛的是电压逆变器。用于电机调速的电压型 PWM 逆变器经常用二极管构成整流桥, 因而系统不具备能量再生反馈能力。PWM 可以调节输出电压和输出端谐波含量。正弦电压 PWM 和滞环电流控制 PWM 是两种常用的控制方法。图 12 示出用于异步电动机调速的电压型双 PWM 变流器系统。PWM 整流器和 PWM 逆变器的功能是一样的, 允许能量双向流动。当整流器和逆变器的功能互换后系统处于能量再生反馈状态。该线路的另一个优点是可以使网侧电流呈正弦波形, 从而保持功率因数为 1。UPS 中, 逆变器产生恒频恒压的交流输出, 它的电池并联在直流侧。如果输出端只需要无功功率, 那么输入侧整流器可以去掉。这样的系统接到电网中, 经过适当控制可以成为有源滤波器和超前/滞后无功功率发生器 (APLC)。图 13 示出电流型 PWM 调速系统, 它是图 12 (原文为图 11——译者注) 的对偶电路, 其中电容器用来辅助开关的换流, 并作为 PWM 电流的滤波器。网侧功率因数可控制为 1, 负载侧没有谐波, 提高了效率, 降低了噪音。用相控变流器代替输入侧的 PWM 整流器的大功率 GTO 逆变器系统被广泛应用于感应电机调速, 同时正如前述, 将图 13 电路的直流输入侧短路便成为 APC。

经常用在开关电源中的具有谐振环节的变流器现在已被应用于更大功率的调压调频电机调速电源中。这类变流器的特点, 如开关频率高、没有开关损耗、散热片小、可无缓冲运行、无机械噪声、EMI 干扰小、电机绝缘体寿命长 (因为 dv/dt 低) 等给应用带来许多益

处。这些特点使得大功率变流器有实现集成化的趋势。这类变流器也被应用于 UPS 和 APLC 系统中。图 14 是用于感应电机的谐振直流环节 PWM 逆变器。输出直流电压 V_s 经过谐振电路变换成振荡电压 V_d (频率为数千赫), 在 V_d 的过零处实现逆变器开关的零电压开通和关断。电机起动时, 在每个谐振周期内将逆变器所有开关同时闭合以建立起动电流。电路中的电压钳位电路将直流电压限幅在 $1.3V_d$ 。图 15 示出另外一种带有直流谐振环节的逆变器, 图 16 是该电路各种运行模式下的电压电流波形。谐振环节电压振荡, 一

般为 50kHz, 产生过零点使逆变器在零电压处开关。电流双向流通的起动电路在谐振电感中建立可调节的起动电流, 使得 V_d 不受负载电流的影响总保持恒定幅值 ($2V_s$), 产生所需的电压过零点。尽管 V_d 较高, 但是由于允许谐振频率很高, 使输出电流的谐波含量降低。理想的谐振环节逆变器能够按照 PWM 控制器的要求, 在逆变器开关动作的瞬间产生一个电压楔口。这种方案由于 PWM 精度的提高而进一步减少了输出电流的谐波含量。图 17 是实现这种方案的准谐振直流环节逆变器, 开关 S_c 将电容电压锁至 $2V_s$, 直到并

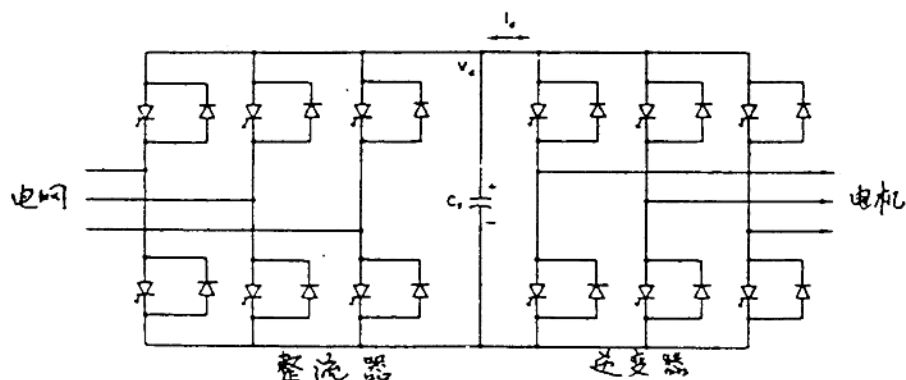


图 12 异步机调速用电压型双 PWM 变流器

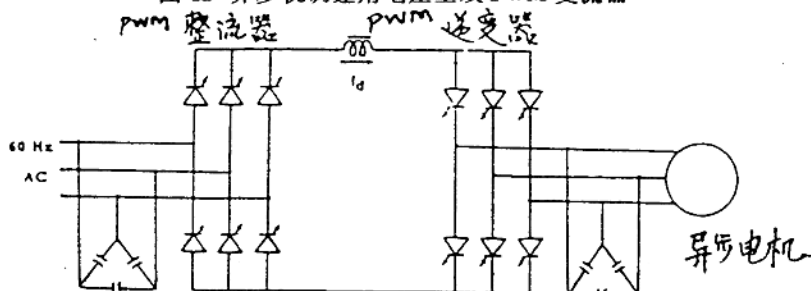


图 13 异步机调速用电流型双 PWM 变流器

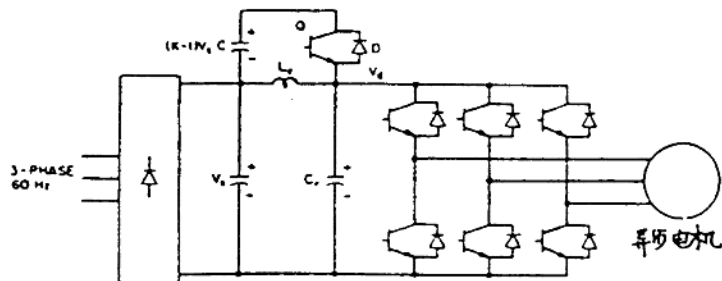


图 14 带有电压钳位的谐振直流环节逆变器