

现代 电力电子电路

林渭勋 / 著

现代电力电子电路

林渭勋 著

浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

现代电力电子电路/林渭勋著. —杭州:浙江大学出版社, 2002. 7

ISBN 7-308-02980-8

I. 现... II. 林... III. 电力电子学 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 008412 号

出版发行 浙江大学出版社

(杭州浙大路 38 号 邮政编码 310027)

(E-mail: zupress@mail. hz. zj. cn)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

责任编辑 杜希武

排版 浙江大学出版社电脑排版中心

印刷 浙江印刷集团公司

经销 浙江省新华书店

开本 787mm×1092mm 1/16

印张 30.5

字数 787 千字

版印次 2002 年 7 月第 1 版 2002 年 7 月第 1 次印刷

印数 0001—2000

书号 ISBN 7-308-02980-8/TM·018

定价 45.00 元

绪 论

尽管电力电子技术作为一个学科仅有半个世纪的历史,但由于它对国民经济有明显作用,得到国内外的普遍重视,因而发展非常迅速,以致目前所用的技术,无论在功率器件、电路拓扑、控制方法和装置性能等方面都与初期有明显差别。具体而言有以下几个方面的特点:

一、绝缘栅晶体管(IGBT)的崛起和功率晶体管(GTR)的淡出

早期的功率器件是晶闸管(SCR),SCR 是一种半控型器件,用它组成的电路简称半控型电路,其基本特点是容量大,但电路结构复杂,开关频率低,功率密度和整机效率不高。GTR 的应用,使电力电子电路由半控型转为全控型,并在不同程度上克服了 SCR 电路存在的缺点,因而在中小功率领域中出现了 GTR 电路取代 SCR 电路的局面。和功率场效应晶体管(Power MOSFET)相比较,GTR 具有导通内阻低和阻断电压高的优点,但其输入特性却远逊于 Power MOSFET。因为 GTR 是一种电流控制型器件,其开通增益仅为(5~10),这对大功率器件控制电路的制作工艺和电能消耗都是沉重负担。此外,为了减低噪声,现代电源要求器件以超音频工作,但在硬开关环境中,GTR 的典型开关频率仅为 5kHz,这显然无法满足上述要求;与此相反,MOSFET 是一种电压控制型器件,控制功率极低,它同时又是一种高频器件,完全能在超音频硬开关环境中工作。由此看来,GTR 和 MOSFET 的优缺点具有明显的互补性,因此希望研制一种新型器件,其输入特性和开关频率与 MOSFET 相似;而输出特性和开关容量则与 GTR 相似,这种器件就是 IGBT,实际上它是一种用 MOS 门控制的晶体管。实践证明,用 MOS 门控概念来发展新型器件系列这一技术路线是行之有效的。

由于 IGBT 具有 GTR 和 Power MOSFET 都无法具备的性能,在短短几年间,IGBT 就完全占据了原来 GTR 的应用领域并使电力电子电路进入到超音频时代。

二、模块化和功率集成电路(PIC)的出现

就内部结构而言,MOSFET 和 IGBT 都是功率集成器件(PID),例如一只 IGBT 是由 10^5 个单胞集成而来的;但就这些器件的外部结构而言,早期却都是分立式的,因而在实用时必须为每个器件安置独立的散热器,这自然影响电路功率密度的提高。模块技术的应用解决了这一问题。所谓器件模块化是指将多个 PID 按电路拓扑安置在一起以构成功率模块(PM)。PM 的外壳是导热的绝缘体,因而可用一个散热器,这就明显地提高电路的功率密度和可靠性。例如,欧洲某公司生产的在线式不间断电源系统(UPS),对输出容量为 30kVA 的同一产品,其逆变电路用 SCR 时,整机功率密度为 $9.23\text{kVA}/\text{m}^3$,用分立式 GTR 时为 $20\text{kVA}/\text{m}^3$,而用 GTR 模块则为 $35.3\text{kVA}/\text{m}^3$ 。

随着集成技术的进步,功率模块逐渐向智能化方向发展,也即模块内部除主电路器件之外,还包含相应的各种接口电路、保护电路(含过流、过压和过热保护)和驱动电路,故也称智能功率模块(IPM)或功率集成电路(PIC)。这是电力电子技术的一大进步,说明集成电路已从信息电子技术领域扩展到功率电子技术领域。尽管目前已有的 IPM 和 PIC 在功率等级上还很有限,但已在各个应用领域中显示出明显的优点。

三、脉冲宽度调制(PWM)控制技术的广泛应用

PWM 是诸多斩波控制方式中的一种,它维持开关周期恒定并通过功率器件的占空比控制输出量的大小,最初应用于直流变换电路(DC-DC),尔后将这种方式与频率控制相结合,产生了应用于逆变电路(DC-AC)的 PWM 控制技术:用改变调制信号频率实现输出电压基波频率的调节;用改变调制信号幅值实现输出电压基波幅值的调节。与方波逆变电路相比较,PWM 逆变电路具有以下优点:

(1)兼具压控和频控功能:方波逆变电路的输出电压幅值调节必须借助于直流电压或桥间相控方式,逆变电路自身无调压功能。由于 PWM 逆变电路可通过改变调制信号幅值实现输出电压调节,这样既可简化直流环节,又可提高控制反应速度。

(2)减低输出电压的谐波含量:减低输出电压的谐波含量以简化输出滤波环节,提高电路的功率密度和反应速度,一直为各种变换电路所祈望。与方波逆变电路相比,PWM 逆变电路输出电压谐波含量降低,而且载波频率越高,谐波含量便越低。

必须指出,在 SCR 电路时期,PWM 技术的上述优点并没有得到充分发挥,这是由于提高载波频率就意味着提高 SCR 的开关频率,但是由于关断时间的限制,在硬开关环境中,SCR 的频率仅为 1kHz 左右;而与此相反,IGBT 在相同开关环境下,其开关频率可达 20kHz(超音频),这就为发挥 PWM 优点创造了远优于 SCR 和 GTR 的客观条件。事实证明,IGBT PWM 逆变电路输出电压的谐波含量远低于 SCR 和 GTR PWM 逆变电路,这就使得 PWM 控制方式成为当今逆变电路的主要控制方式。

由于 PWM 控制方式在 DC-DC 和 DC-AC 变换领域中所显示的优点,人们开始尝试将它推广应用到整流电路(AC-DC)和交流变换电路(AC-AC)。众所周知,以往的整流电路以 SCR 构成并采用相位控制方式,是技术最成熟、历史最悠久的一种变换电路。但它同时也存在很多问题,如由于采用相控方式,网侧功率因数较低,谐波含量很高,在电力电子装置应用日广的今天,这种情况使公共电网受到严重污染,不仅有害于网间负载,也会对各种信息设备产生干扰。人们为解决这些问题曾做过很多努力,提出很多措施,但都没有彻底解决,原因是依然采用相控方式。相反,如果在整流电路中采用 PWM 控制方式(相应地主电路改用全控型器件),上述问题便可迎刃而解。因此,PWM 整流电路尽管目前还没有普遍应用,但终将会成为整流电路的主要形式。

在以往的 AC-AC 变换中,主要是采用相控和频控相结合的相频控制方式。同样由于电网频率低,存在输出电压谐波含量高、控制时滞长、装置噪声大等弱点。在采用 PWM 控制方式后,这些弱点会在不同程度上得到克服,但这种进步是以功率器件改用 IGBT 或 MOSFET 等全控型器件为代价,所幸的是随着技术的进步和生产规模化,全控型器件的售价已逐步降低。

四、高频化的趋势和软开关技术的提出

提高器件的开关频率可以使电路获得多方面的好处。例如,超音频电路具有更高的功率密度和可靠性,低噪声和快速响应能力,因而高频化成为现代电力电子电路的特点。但由于器件的开关损耗与开关频率成正比,频率越高,器件和电路的损耗越大,电路效率也越低;除此之外,开关频率越高,电路中电量的变率也越高,电路所产生的电磁干扰(EMI)也越强,对环境的污染也越严重,所有这些都是不希望出现的。为了提高电路效率,降低 EMI 强度,必须设法降低器件的损耗,为此可采取以下两方面措施:

(1)设法缩短器件的开关时间:也即是研制频率特性更为优越的器件。众所周知,器件的开关时间越短,每次开关所花费的能耗便越小,这一措施的难点在于器件各项性能参数间的相互制约,因而开关时间的缩短要受到其他参数的制约。但必须指出,电力电子技术的发展表明,器件性能的改良乃至新器件的出现,对技术的发展起着更为深远的影响,IGBT 的表现便是很好的例证。

(2)设法改善器件在电路中的开关环境:电路中器件开关环境(也即是器件在电路中的开关运行条件)的优劣会直接影响到器件开关损耗大小。例如在感性负载下,器件将在满压下开通,又在满载下关断,这种在大电流高电压条件下的开关操作必然产生很大的能耗,现在将这种开关环境称为硬开关方式,具有硬开关环境的 PWM 控制相应简称为硬 PWM 控制。

如果能够做到开关过程中器件电流和电压相错位,就有希望将器件损耗降低。例如在零电压或零电流条件下开关,器件都不可能产生开关损耗,具有上述条件的开关环境称为软开关环境,具有软开关环境的 PWM 控制简称为软 PWM 控制。

对器件所在电路进行改造以实现软开关的技术称为软开关技术,是当今电力电子技术的发展前沿领域之一,迄今为止,用来实现软开关的主要技术措施有:

(1)藉助电路控制信号的合理安排以实现软开关,此类电路泛称为控制型软开关电路;

(2)在电路中增设缓冲电路以实现软开关,此类电路泛称为缓冲型软开关电路;

(3)在直流侧或交流侧设置谐振电路以实现软开关,此类电路泛称谐振型软开关电路。

可以看出,除了控制型电路之外,其他类型的软开关电路都是在电路中增设附加电路,这自然会增加电路的成本和复杂性。例如,缓冲型软开关电路必须在电路中附加有源或无源缓冲电路,而这些电路在形式上与 SCR 电路中的有源或无源换流电路十分相似,这就相当于使得全控型电路可省去换流电路的优点完全断送。因此,软开关技术还有许多工作要做,目前的成就还是很初步的,距离商品化还有相当长道路要走。

综上所述,以目前的电路技术尚未能妥善解决频率提高所遇到的问题;换言之,在现有电路技术和元器体性能水平下,对产品而言,存在一个合理的上限频率。

(1)器件单元:包含第一章 Power MOSFET 和第二章 IGBT 和 MCT。在选材上着重于 MOSFET 以及由 MOS 门控概念衍生出来的系列器件,内容着重于电路运行条件(含器件的开关环境)对器件性能的影响。目的在于帮助读者能正确使用器件,并使之在电路中发挥最大效能。

(2)硬 PWM 电路单元:本单元包含第三章到第六章,分别介绍硬开关条件下各种 PWM 变换电路的工作原理。它们是 PWM DC-DC 电路、PWM DC-AC 电路、PWM AC-AC 电路和 PWM AC-DC 电路。在 PWM AC-DC 电路中还阐述当前各式网侧功率因数校正电路(PFC)的工作原理。

(3)软 PWM 电路单元:本单元包含第七章到第十章,分别介绍控制型电路、缓冲型电路和谐振型电路的工作原理。由于这些电路还处在不断完善之中,尽管是本学科的前沿,但稳定性较差。然而从发展趋势看,软 PWM 电路是现代电力电子电路的重要内容,是国内外关注的前沿,并将在今后得到更好的充实和发展。

在本书编写过程中,参考了国内外有关单位和学者的著作和文章,在此谨表衷心谢意。黄敏超和蒋君健同志协助插图整理,李桂云和杜希武同志对本书初稿进行详细勘审,在此一并致谢。

本书可作为电力电子技术专业研究生教材,也可作为从事本专业科技工作人员的参考书。

由于电力电子技术发展十分迅速,而作者水平又很有限,书中疏误之处,敬请读者指正。

目 录

绪 论

第一章 电路运行条件对功率场效应晶体管性能的影响	(1)
第一节 功率场效应晶体管的主要特性	(1)
一、基本结构和分类	(1)
二、工作原理	(3)
三、正向输出特性	(3)
四、饱和区的电流转移特性	(5)
五、反向输出特性	(6)
第二节 电路运行条件对导通电阻 R_{on} 的影响	(8)
一、导通电阻 R_{on} 的构成	(8)
二、导通电阻 R_{on} 的测量条件	(9)
三、电路运行条件对导通电阻 R_{on} 的影响	(9)
第三节 电路运行条件对安全工作区的影响	(11)
一、安全工作区的分类	(11)
二、正偏安全工作区(FBSOA)	(12)
三、功率场效应晶体管和功率晶体管 DCFBSOA 的比较	(13)
四、电路运行条件对 SOA 的影响	(13)
第四节 电路运行条件对功率场效应管开关过程的影响	(15)
一、功率场效应晶体管的等效电路	(15)
二、纯阻负载下 Power MOSFET 的开关过程	(17)
三、感性负载下 Power MOSFET 的开关过程	(18)
四、考虑分布电感 L_D 时的开关过程分析	(20)
五、栅极电荷特性	(24)
*第五节 功率场效应晶体管的并联应用	(27)
一、导致功率场效应晶体管并联时电流不均的原因	(27)
二、静态电流不均分析	(27)
三、动态电流不均分析	(29)
四、并联运用中的寄生振荡及其抑制	(30)
第六节 功率场效应晶体管的栅极驱动电路	(31)
一、栅极驱动电路的基本功能	(31)
二、栅极驱动电路的分类	(31)
三、输入级的耦合方式	(33)
四、输出级的耦合方式	(34)

五、驱动电路的供电方式·····	(35)
六、集成式驱动电路芯片·····	(38)
七、过流保护·····	(39)
参考文献·····	(43)
第二章 电路运行条件对 IGBT 和 MCT 性能的影响 ·····	(44)
第一节 IGBT 的结构和主要特性·····	(45)
一、IGBT 的结构·····	(45)
二、 N^+ 缓冲层的作用·····	(46)
三、正向输出特性·····	(48)
四、通态特性·····	(49)
五、饱和区的电流转移特性·····	(49)
六、IGBT 的电流容量·····	(50)
第二节 电路运行条件对 IGBT 开关过程的影响·····	(53)
一、IGBT 的开关电路·····	(53)
二、电路运行条件对开通过程的影响·····	(53)
三、电路运行条件对关断过程的影响·····	(57)
第三节 IGBT 的缓冲电路·····	(59)
一、IGBT 开关电路的负载动态轨迹·····	(59)
二、缓冲电路·····	(59)
第四节 IGBT 的驱动电路·····	(69)
一、IGBT 短路状态下的载流能力·····	(69)
二、IGBT 短路状态的失效机理·····	(71)
三、软开关环境对 IGBT 驱动电路的影响·····	(72)
四、分立式 IGBT 驱动电路·····	(73)
五、集成式 IGBT 驱动电路·····	(74)
第五节 IGBT 功率集成电路·····	(79)
一、IGBT-IPM 的基本结构·····	(79)
二、IPM 的内藏功能·····	(80)
三、IPM 产品示例·····	(81)
*第六节 MCT 的结构和工作原理·····	(81)
*第七节 MCT 的主要特性·····	(82)
一、通态特性·····	(82)
二、阻断特性·····	(83)
三、MCT 的载流能力·····	(84)
四、MCT 的安全工作区·····	(87)
五、MCT 的开关性能·····	(87)
*第八节 MCT 的驱动电路·····	(91)
一、MCT 门极脉冲参数·····	(91)
二、MCT 门极驱动电路示例·····	(91)
三、IGBT 和 MCT 的比较·····	(92)

参考文献	(94)
第三章 直流变换电路	(95)
第一节 概 述	(95)
一、直流变换电路的分类	(95)
二、直流电压变换电路的基本用途和要求	(97)
第二节 单象限降压型电路	(98)
一、理想条件下的电路工作情况	(98)
二、考虑电路内阻时的工作情况	(100)
三、考虑输出滤波电容 C_o 为有限值时的工作情况	(101)
四、电路外特性分析	(101)
五、输出滤波器参数选择	(102)
六、PWM 控制电路	(103)
七、附加无损有源缓冲电路时的工作情况	(108)
第三节 单象限升压型电路	(111)
一、理想条件下的工作情况	(112)
二、电感电流 i_d 为断续时的工作情况	(112)
三、考虑电路内阻 r_o 时的工作情况	(114)
四、考虑输出滤波电容 C_o 为有限值时的工作情况	(115)
五、附加有源无损缓冲电路时的工作情况	(115)
第四节 单象限升/降压型电路	(119)
一、Buck-Boost 电路	(119)
二、Cuk 电路	(120)
第五节 单象限隔离型电路	(122)
一、单端反激式电路(Flyback 电路)	(122)
二、单端正激式电路(Forward 电路)	(130)
第六节 电流双象限电路	(131)
一、双象限电路的分类	(131)
二、电流双象限电路的工作原理	(131)
第七节 电压双象限电路	(140)
一、主电路结构	(140)
二、运行于第一象限时的工作情况	(140)
三、运行于第四象限时的工作情况	(141)
四、调速过程	(142)
第八节 单极性 PWM 四象限桥式直流变换电路	(143)
一、四象限桥式直流变换电路的分类	(143)
二、同频式单极性 PWM 全桥电路分析	(145)
三、倍频式单极性 PWM 全桥电路分析	(147)
第九节 双极性 PWM 四象限电路	(149)
一、控制极脉冲时序分布	(149)
二、工作过程分析	(149)

三、直流增益 A_V	(151)
四、输出电流脉动 ΔI_o 的计算	(151)
参考文献	(153)
第四章 无源逆变电路	(154)
第一节 概 述	(154)
一、工业特殊交流电源的分类	(154)
二、逆变电路的基本用途	(155)
三、逆变电路的分类	(155)
第二节 单相方波逆变电路	(157)
一、基本假定	(157)
二、方波逆变电路	(157)
三、相移式方波逆变电路	(163)
第三节 单相 SPWM 逆变电路	(165)
一、双极性 SPWM 逆变电路	(165)
二、单极性 SPWM 逆变电路	(171)
三、单相 SPWM 逆变电路用例	(175)
第四节 三相方波逆变电路	(178)
一、纯阻负载下工作情况分析	(179)
二、感性负载下工作情况分析	(182)
三、有源负载下工作情况分析	(184)
第五节 三相 SPWM 逆变电路	(189)
一、控制极脉冲时序分布	(189)
二、纯阻负载下的电路工作情况	(191)
三、感性负载下的电路工作情况	(192)
四、死区时间对三相输出电压的影响	(192)
第六节 逆变电路输出电压波形改善	(195)
一、多重化结构	(195)
二、PWM 技术的优化	(197)
三、附加输出滤波器	(199)
四、采用新型主电路结构	(202)
第七节 逆变电路的控制	(203)
一、SPWM 集成芯片原理分析	(203)
二、电压瞬时值单环反馈控制	(209)
三、电流瞬时值单环反馈控制	(211)
四、电压电流双环反馈控制	(214)
五、电压空间矢量控制	(215)
参考文献	(220)
第五章 交流变换电路	(221)
第一节 概 述	(221)
第二节 单相交流调压电路	(222)

一、理想条件下斩控式交流调压电路的工作情况	(222)
二、双向功率开关及其缓冲电路	(226)
三、载波频率 f_c 的选择	(227)
四、交流调压电路的非互补控制方式	(228)
第三节 三相交流调压电路	(229)
* 第四节 由半控型器件组成的直接变频电路	(230)
一、理想条件下三相电流源 SCR 直接变频电路分析	(231)
二、同步电动机的调速方法	(235)
三、变频电路换流过程分析	(236)
第五节 由全控型器件组成的直接变频电路	(238)
一、电压源双向型直接变频电路	(239)
二、电流源双向型直接变频电路	(244)
参考文献	(247)
第六章 整流电路	(248)
第一节 概 述	(248)
一、传统相控式低频整流电路的优缺点	(248)
二、整流电路的理想状态	(252)
三、斩控式整流电路的分类	(253)
第二节 电压型单相全桥式整流电路	(255)
一、理想模型	(255)
二、模型电路分析	(256)
三、电压型单相全桥式整流电路	(259)
* 第三节 电压型单相半桥式整流电路	(270)
一、主电路结构和工作模式	(270)
二、电路的运行状态	(274)
三、输出电压 u_o 调节	(274)
四、电路的控制	(275)
第四节 电压型单相单管电路	(277)
一、升压型电路(Boost APFC 电路)	(279)
二、单端反激式电路(Flyback APFC 电路)	(287)
第五节 电流型单相全桥电路	(290)
一、理想模型	(290)
二、模型电路分析	(291)
三、电流型单相桥式整流电路	(293)
四、由晶闸管组成的电流型整流电路	(295)
第六节 三相桥式整流电路	(298)
一、电压型三相桥式整流电路	(299)
二、电流型三相桥式整流电路	(304)
* 第七节 电压型三相单管整流电路	(307)
一、电流模式的选择	(308)

二、工作模式的分析	(308)
三、维持 DCM 模式的电路条件	(313)
参考文献	(314)
第七章 缓冲型软 PWM 电路	(316)
第一节 概 述	(316)
一、缓冲电路的作用	(316)
二、缓冲电路的分类	(316)
三、缓冲电路与晶闸管换流电路	(318)
四、缓冲电路的理想性能	(319)
第二节 分立式有损缓冲电路	(321)
一、关断缓冲电路	(321)
二、开通缓冲电路	(325)
三、完整的分立式缓冲电路	(327)
第三节 单相式有损缓冲电路	(328)
一、桥式电路的换流模式	(328)
二、带箝压式电路 1 的半桥式逆变电路	(330)
三、带箝压式电路 2 的半桥式逆变电路	(332)
四、电路参数选择和能耗分析	(333)
五、带箝压式缓冲电路的全桥式逆变电路	(334)
第四节 分立式无损缓冲电路	(342)
一、无源无损缓冲电路	(342)
二、具有 ZVS 功能的有源无损缓冲电路	(346)
三、ZVS-PWM-Boost 电路的实际应用	(353)
四、具有能量前馈的有源缓冲电路	(356)
五、ZVS-PWM-Boost 电路在三相不控整流电路中的应用	(360)
六、ZCS 有源无损缓冲电路	(363)
第五节 单相式无损缓冲电路	(367)
一、单相无源缓冲电路	(367)
二、单相有源缓冲电路	(370)
第六节 集中式无损缓冲电路	(377)
一、晶闸管集中式换流电路	(377)
二、集中式无损缓冲电路	(378)
参考文献	(385)
第八章 控制型软 PWM 电路	(387)
第一节 概 述	(387)
一、双极性控制方式	(387)
二、不斉尾双极性控制方式	(387)
三、不对称控制方式	(389)
四、移相控制方式	(389)
第二节 采用不斉尾双极性控制方式的软开关逆变电路	(389)

一、电路工作原理分析	(390)
二、电路特点	(392)
三、改进电路	(392)
四、改进电路的特点	(393)
第三节 采用不对称控制方式的软开关逆变电路	(393)
一、电路工作原理分析	(394)
二、电路特点	(396)
第四节 采用相移控制方式的软开关逆变电路	(396)
一、电路工作原理分析	(398)
二、电路的特点及存在的问题	(401)
三、在逆变桥实现 ZVS 的条件及存在的问题	(401)
第五节 带有源缓冲电路的移相式软开关逆变电路	(402)
一、电路工作原理分析	(402)
二、 $u_{ga,b}$ 脉宽 τ_A 的确定	(404)
三、电路特点	(404)
四、保证整流管有软开关环境的逆变电路	(405)
第六节 带饱和电感的移相式逆变电路	(408)
一、电路工作原理分析	(410)
二、电路特点	(412)
第七节 高频感应加热用移相式谐振逆变电路	(413)
一、电路工作模式的选择	(414)
二、脉冲宽度调制(PWM)的调功原理分析	(414)
三、电路 ZVS 环境的实现	(416)
四、控制方式的选择	(419)
五、负载侧功率因数分析	(420)
参考文献	(421)
第九章 交流谐振型软 PWM 逆变电路	(422)
第一节 概 述	(422)
第二节 带交流谐振环的电流型逆变电路	(422)
一、基本假定	(423)
二、电路工作原理分析	(424)
三、载波频率 f_c 的估算	(426)
四、电流型逆变电路的特点	(428)
第三节 带交流结实型谐振环的逆变电路	(428)
一、基本假定	(428)
二、电路工作原理分析	(429)
三、几个问题说明	(434)
四、结实型谐振环逆变电路的特点	(435)
五、改进型电路	(436)
参考文献	(442)

第十章 直流谐振型软 PWM 逆变电路	(443)
第一节 概 述.....	(443)
第二节 基本直流谐振环的工作原理.....	(443)
一、基本假定	(443)
二、理想条件下的工作情况	(444)
三、实际工作情况	(445)
四、基本直流谐振环存在的问题	(445)
第三节 有源箝位式直流谐振环.....	(446)
一、有源箝位电路的工作原理	(446)
二、输出电压重复周期的估算	(448)
三、直流谐振环谐振频率的估算	(449)
四、直流谐振环的控制	(450)
* 第四节 同步式有源箝位直流谐振环	(451)
* 第五节 有源直流准谐振环	(454)
* 第六节 并联式有源箝位直流谐振环	(456)
* 第七节 新型并联式有源箝位直流谐振环	(461)
一、新型并联式有源箝位电路	(461)
二、单相软 PWM 逆变电路	(464)
三、单开关型并联式有源箝位电路	(467)
* 第八节 结实型直流谐振环	(471)
一、带结实型直流谐振环的逆变电路	(471)
二、结实型直流谐振环作为公共直流电源	(472)
参考文献.....	(474)

注:带 * 为非必读内容。

第一章

电路运行条件对功率场效应晶体管性能的影响

功率场效应晶体管(简称 Power MOSFET)是所有全控型电力电子器件中工作频带最宽的一种,因此在高频化进程中,它受到重视是很自然的事。此外,目前最有生命力和发展前景的几种全控型器件都与它有关。例如,绝缘栅晶体管(IGBT)和 MOS 栅控晶闸管(MCT)这两种器件都是利用 MOS 栅控原理制成的(IGBT 也可称为 MOS 栅控晶体管),因此本章内容也可作为这些器件的基础。

和其他电力电子器件一样,Power MOSFET 在装置中的实际效能取决于两方面的因素:Power MOSFET 的设计和制作(参数设计、结构安排、材料性能、工艺水平和散热能力等),Power MOSFET 所在电路的运行条件(电路结构、负载性质、控制信号、开关频率和方式、环境温度和冷却条件等)。前一个因素属于器件设计制造的范围,后一个因素则与器件的选择和使用有关。

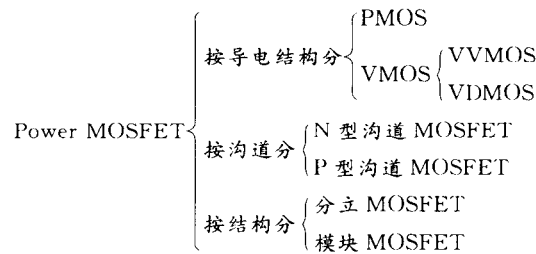
由于电路运行的条件千差万别,器件制造厂家只能根据若干典型条件对器件性能进行测试。因此使用者必须了解器件实际运行环境与测试条件之间的差别,以及这些差别对器件性能的影响,只有这样才能合理地选择和使用器件,使它们在实际装置中发挥最大效能。

Power MOSFET 在电力电子电路中起着可控功率开关的作用,因此本章将着重分析运行条件(开关环境)对器件开关性能的影响。实践证明,Power MOSFET 的开关性能和电路结构、负载性质、栅极信号、开关方式等电路条件密切相关。必须指出,这些条件对 Power MOSFET 某一参数所带来的影响可能变优,也可能变劣,对 Power MOSFET 的各项参数的影响也就有好有坏,这种情况与制作工艺对 Power MOSFET 性能的影响是类似的,因此单独追求某一项参数的优化是无实际意义的,比较有效的做法是诸性能参数间的协调折衷。

第一节 功率场效应晶体管的主要特性

一、基本结构和分类

已发展了多种结构的 Power MOSFET,可大致分类如下:



早期的 Power MOSFET 结构采用平面结构(PMOS)。器件的三个电极(即源极 S、栅极 G 和漏极 D)均置于硅片的一侧,这显然带有小功率 MOS 管的特点。从提高功率的角度出发,这种结构存在通态电阻大和硅片利用率低等弱点。20 世纪 70 年代中期,应用于 LSIC 的垂直导电结构(VMOS)被移植到 Power MOSFET 中,出现了 Power MOSFET 领域的 VMOS 结构。这种结构不仅保持原来平面结构的优点,而且由于具有短沟道、高电阻漏极漂移区和垂直导电等特点,从而大幅度提高了器件的电压阻断能力、载流能力和开关速度,使 Power MOSFET 真正进入电力电子器件的范围。

早期 VMOS 结构采用 V 形槽以实现垂直导电,故泛称 VVMOS。这种结构在精确控制沟道长度方面存在工艺上的困难,于是发展了双扩散结构(简称 VDMOS),它是利用二次扩散过程中 P 型区和 N^+ 型区在硅片表面结深之差形成极短的沟道长度($1\sim 2\mu\text{m}$),这对当今的扩散技术而言是易于做到的。目前世界各国都在这一基础上生产出各具特点的 VDMOS 结构,它们有着不同的名称,如 HEXFET(IR)、TMOS(Motorola)、SIPMOS(Siemens)和 ZMOS(Intersti)等。

目前生产的 VDMOS 器件中绝大多数是 N 沟道增强型,这是由于 P 沟道器件在相同硅片面积下,其通态电阻 R_{on} 是 N 型沟道器件的 $2\sim 3$ 倍,因此今后若无特别说明,本书均指 N 沟道增强型。

Motolora 公司所生产的 TMOS,其单胞结构如图 1-1 所示,通常一个 MOSFET 是由许多单胞并联组成的,一个高压芯片的单胞密度可达每平方英寸 140000 个。由此可见,它是一种功率集成器件(缩写 PID)。

图中在 N_2^+ 型高掺杂浓度衬底上,外延生长 N^- 型高层, N_2^+ 型区和 N^- 型区共同组成 Power MOSFET 的漏区。在 N^- 型区内,有选择地扩散 P 型沟道体区,漏区与沟道体区的交界就是漏区 PN 结。在 P 型体区内,有选择地扩散 N_1^+ 型源区,由于沟道体与源区总是短路的,所以源区 PN 结常处于零偏置状态,在 P 和 N^+ 上层与栅极 G 之间生长金属二氧化硅作为栅极和导电沟道的隔离层。当栅极加有适当电压时,由于表面电场效应会在栅极下面的体区中形成反型层,这些反型层就是沟道源区和漏源的导电沟道。

Power MOSFET 结构有以下特点:

1. 垂直安置漏极,实现垂直导电:这不仅使硅片面积得以充分利用,而且可获得大的电流容量(早期 MOS 结构是 D, G, S 三极同侧安置,不仅硅片面积利用率低,而且电流完全沿表面流动,导通电阻大,因而难于实现大电流)。

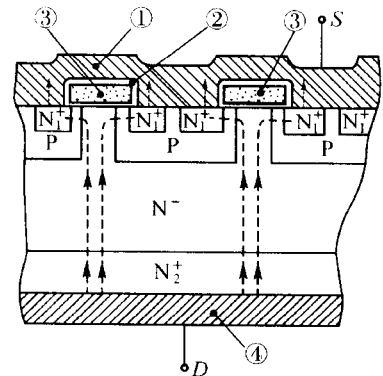


图 1-1 TMOS 单胞结构示意图

- ①—源极(S) ②—栅极隔离层(SiO_2)
 N_1^+ —源区 ③—栅极(G) ④—漏极(D)
 N_2^+ —漏区 P—沟道体区
 N^- —外延层、高阻漂移区

2. 设置高电阻率漂移区(N^- 区)以提高器件的电压容量:PN 结的击穿电压与掺杂浓度成反比,由于设置 N^- 区,降低了漏区和沟道体区之间 PN 结沿轻掺杂一侧的杂质浓度,从而提高了器件的电压耐量。

3. 短沟道提高了器件的开关性能:VDMOS 的沟道长度不由光刻工艺实现,而是由两次扩散深度差决定。根据当前的扩散技术,获得 $1\sim 2\mu\text{m}$ 的沟道长度是容易做到的,短沟道能降低栅极下端二氧化硅层的栅沟本征电容和沟道电阻,从而提高器件的工作频率和开关速度。

4. 在漏极和源极间施加负电压时,器件 PN 结为正偏置,即 Power MOSFET 无反向阻断能力,可视为一种逆导器件。

二、工作原理

Power MOSFET 中电流是 N 型中多子(电子)漂移形成的,即多子在电场作用下的漂移电流,其密度为

$$J_n = qn_i\mu E_x = qn_i v_n \quad (1-1)$$

式中: q —电子电荷量; n_i —电子浓度; μ —载流子迁移率; E_x —沿电流方向外加电场强度; v_n —电子平均漂移速度。

式(1-1)表明,电流密度 J_n 受控于电子浓度 n_i 和平均速度 v_n 。

(一)栅压 u_{gs} 对 J_n 的影响

当栅压 $u_{gs} \leq 0$ 时,由于表面电场效应,栅极下面 P 型区表面呈多子(空穴)堆积状态,源区与漏区间相当于两个反向串联的二极管,因而无导电沟道形成,器件处于阻断状态。

当 $0 < u_{gs} < U_T$ (栅阈电压),栅极下面 P 型表面呈耗尽状态,器件仍然处于阻断状态。

当 $u_{gs} > U_T$ 时,栅极下面 P 型区表面发生反型,即形成 N 型表面层,从而把漏极和源极沟通,这种反型层就称为沟道。沟道中电子浓度 n_i 受控于栅压, u_{gs} 越高, n_i 也越高。

(二)漏极电压 u_{ds} 对 J_n 的影响

当 $u_{gs} > U_T$, 而 $u_{ds} = 0$ 时,沟道中无电流,漏极电流 $i_D = 0$,因为在漏源极间无外加电场建立,载流子无法形成定向运动,即载流子平均速度 $v_n = 0$ 。

当 $u_{gs} > U_T$, $u_{ds} > 0$ 时,沟道被加上外电场,载流子在该电场的作用下形成漂移电流,外加电场强度越高,漂移速度越高,则 i_D 越大。

三、正向输出特性

当 Power MOSFET 为共源接法时, i_D 和 u_{ds} 分别代表输出电流和电压,以栅压 u_{gs} 为参变量,描述 i_D 与 u_{ds} 间的关系曲线称为输出特性,而 $i_D > 0$ 和 $u_{ds} > 0$ 的部分则称为正向输出特性,图 1-2 所示为 Siemens 公司生产的 SIPMOSFET 的正向输出特性。由图可见,该特性可划分为电阻区、饱和区、截止区和击穿区等几个区域。

(一)非饱和区 A(也称电阻区)

在这一区域中,当 $u_{gs} > U_T$ 时,在栅极下面形成沟道,一旦 $u_{ds} > 0$,便有漏极电流 i_D 流过,当 u_{ds} 数值较低,载流子漂移速度 $v_n < v_{sat}$ (载流子的散射极限速度),漏极电流可表示为

$$I_D = \frac{W}{L} C_0 \mu_n \left[(U_{gs} - U_T) U_{ds} - \frac{U_{ds}^2}{2} \right] \quad (1-2)$$

$$= B_0 \left(U_{gs} - U_T - \frac{U_{ds}}{2} \right) U_{ds} \quad (1-3)$$