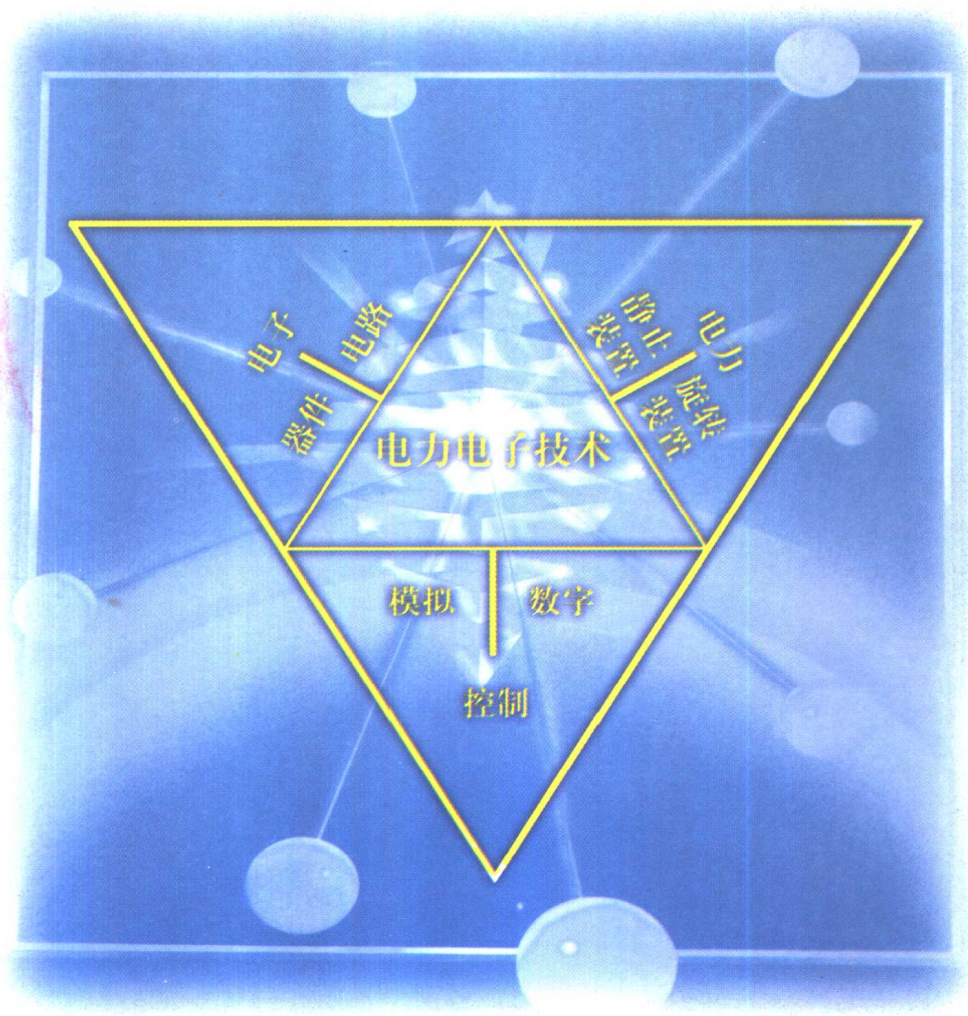


高等学校教材

现代电力电子技术基础

张立 主编



高等教育出版社

内容简介

本书是讲述现代电力电子技术基础的一本教材。作者总结了多年教学和科研的经验,跟踪国内外电力电子技术的最新发展,全面地介绍了各种电力电子器件的原理、特性和应用技术;阐述了相位控制、直流斩波、交流逆变和软开关谐振等电路的原理及设计方法。此外,对电力电子技术应用中遇到的功率因数补偿、谐波抑制和电磁兼容等问题也作了基础性说明。本书具有立足基础、浓缩精华、跟踪时代和全面系统的特点。

本书是教育部九五规划教材,可供自动化专业和电气工程及其自动化专业以及相关专业的本科生使用,也可作为社会各界科技工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代电力电子技术基础/张立主编. —北京:高等教育出版社, 1999.10 (2001 重印)

ISBN 7-04-007470-2

I. 现… II. 张… III. 电力系统-电子技术 IV. TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 30406 号

现代电力电子技术基础

张立 主编

出版发行 高等教育出版社

社址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮政编码 100009

电话 010-64054588

传真 010-64014048

网址 <http://www.hep.edu.cn>

经销 新华书店北京发行所

印刷 北京地质印刷厂

开本 787 × 1092 1/16

版次 1999 年 10 月第 1 版

印张 14.25

印次 2001 年 6 月第 2 次印刷

字数 340 000

定价 11.80 元

凡购买高等教育出版社图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请在所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

前 言

电力电子技术是以电力为处理对象的电子技术，它能够对电网的功率、电流、电压、频率和相位等参数进行精确的控制和有效的处理。目前，在一些先进国家 60% 的电能要经过电力电子技术的转换和处理。随着电力电子技术的不断发展，可以预测，未来绝大部分的电能要用电力电子技术处理。由此可见，电力电子技术是一门应用极为广泛的高新技术。目前，电力电子技术已日益引起国内外学术界和产业部门的极大重视。

为适应科学技术发展和高等学校有关专业教学的需要，特编写此书。本书主要包括以下内容：

1. 从应用角度出发，系统介绍了各种常用电力电子器件的原理和特性。这些器件有：各种整流二极管、电力晶体管、功率场效应晶体管、普通晶闸管、可关断晶闸管、绝缘栅极晶体管、静电感应晶体管、静电感应晶闸管、MOS 晶闸管以及功率集成电路等。各种电力电子器件是电力电子技术的基础和龙头，不同的器件能引发出不同的电力电子变换电路和方式各异的控制技术以及种类繁多的应用装置。为此，用相当的篇幅阐明各种电力电子器件的基本原理、基本特性及其共性应用技术是非常必要的。

2. 以各种器件为龙头，介绍了各种电力电子变换电路的原理和分析计算的方法。这些变换电路有：相控整流电路、相控逆变电路、直流斩波电路、交流逆变电路以及谐振软开关电路等。为适应各种变换电路的需要，本书还比较详细地论述了控制技术的基本原理及方法。

3. 随着电力电子技术的广泛应用，此技术对电磁环境的污染也越来越引起社会的关注，净化电磁环境污染已成为电力电子技术的一项重要内容。为此，本书专门论述了电力电子技术对电磁环境污染的机理及其各种对策。

本书可供高等院校自动化专业和电气工程及其自动化专业以及其他相关专业作为本科生教材。此外，本书可供从事电气工程的科技工作者作为参考书。基于上述编写宗旨，书中内容具有立足基础、浓缩精华、跟踪时代和全面系统的特点。

本书由天津大学张立教授主编。各章执笔者：第一、第二、第三、第六、第七章为张立执笔，第四、第五章为聂建军执笔，第八至第十一章为郑同江执笔，第十二至第十三章为李山执笔。本书由天津大学吕家元教授和黄两一教授审稿。

由于作者水平所限，书中错误和不妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

张 立

1999 年 2 月于天津大学

目 录

第一章 绪论	(1)	3.3 动态特性与参数	(24)
1.1 电力电子技术回顾	(1)	3.3.1 开关时间	(24)
1.1.1 何谓电力电子技术	(1)	3.3.2 电压上升率 du/dt	(25)
1.1.2 传统电力电子技术	(1)	3.3.3 开关损耗	(25)
1.1.3 现代电力电子技术	(2)	3.4 二次击穿与安全工作区	(27)
1.2 电力电子器件	(3)	3.4.1 二次击穿特性	(27)
1.2.1 电力电子器件的分类	(3)	3.4.2 安全工作区	(28)
1.2.2 电力电子器件的比较	(6)	3.5 基极驱动电路	(29)
1.3 电力电子电路	(7)	3.5.1 驱动电路的设计原则	(29)
1.3.1 电力电子电路的分类	(7)	3.5.2 驱动电路举例	(29)
1.3.2 电力电子电路的应用	(9)	3.6 达林顿 GTR 与 GTR 模块	(30)
1.4 电力电子技术展望	(9)	3.6.1 达林顿 GTR	(30)
1.4.1 电力电子器件	(9)	3.6.2 GTR 模块	(31)
1.4.2 变流电路及控制技术	(10)	习题及思考题	(31)
第二章 整流二极管	(11)	第四章 可关断晶闸管	(32)
2.1 普通硅整流管	(11)	4.1 SCR 的原理及特性	(32)
2.1.1 基本原理	(11)	4.1.1 基本工作原理	(32)
2.1.2 动态特性	(13)	4.1.2 静态伏安特性与参数	(35)
2.2 快速恢复二极管	(13)	4.2 GTO 的工作原理	(35)
2.2.1 开通特性	(13)	4.2.1 GTO 的特点	(35)
2.2.2 关断特性	(14)	4.2.2 开通与关断原理	(36)
2.3 功率肖特基二极管	(16)	4.2.3 失效机理	(38)
2.3.1 基本原理	(16)	4.3 GTO 的特性与参数	(38)
2.3.2 参数特点	(17)	4.3.1 基本特性	(38)
习题及思考题	(17)	4.3.2 主要参数	(41)
第三章 电力晶体管	(18)	4.4 GTO 的门极驱动	(44)
3.1 工作原理	(18)	4.4.1 门极电路的设计原则	(44)
3.1.1 基本结构	(18)	4.4.2 门极电路举例	(46)
3.1.2 工作特点	(19)	习题及思考题	(46)
3.2 静态特性与参数	(19)	第五章 功率场效应晶体管	(48)
3.2.1 静态特性	(19)	5.1 基本工作原理	(48)
3.2.2 静态极限参数	(22)	5.1.1 基本结构	(48)

5.1.2 工作原理	(48)	7.1.1 基本工作原理	(73)
5.2 基本特性	(49)	7.1.2 特性与参数	(74)
5.2.1 静态特性	(49)	7.1.3 双极模式静电感应晶体管	(75)
5.2.2 动态特性	(50)	7.2 静电感应晶闸管	(76)
5.3 安全工作区	(54)	7.2.1 基本工作原理	(76)
5.3.1 正向偏置安全工作区	(54)	7.2.2 特性与参数	(77)
5.3.2 开关安全工作区	(55)	7.3 MOS 控制晶闸管	(79)
5.3.3 换向安全工作区	(55)	7.3.1 基本工作原理	(79)
5.4 主要参数	(56)	7.3.2 特性与参数	(80)
5.4.1 静态参数	(56)	7.4 功率集成电路	(81)
5.4.2 动态参数	(56)	7.4.1 功率集成电路概述	(81)
5.5 应用技术	(57)	7.4.2 功率集成电路举例	(82)
5.5.1 栅极驱动电路	(57)	习题及思考题	(82)
5.5.2 静电防护	(58)	第八章 各类器件共性应用技术	(83)
习题及思考题	(59)	8.1 散热技术	(83)
第六章 绝缘栅极晶体管	(60)	8.1.1 散热原理	(83)
6.1 工作原理	(60)	8.1.2 散热措施	(86)
6.1.1 基本结构	(60)	8.2 缓冲电路	(89)
6.1.2 工作原理	(60)	8.2.1 缓冲电路的作用与分类	(89)
6.2 静态特性与参数	(61)	8.2.2 关断缓冲电路	(90)
6.2.1 转移特性	(61)	8.2.3 开通缓冲电路	(91)
6.2.2 输出特性	(61)	8.3 串联运行	(92)
6.3 动态特性与参数	(63)	8.3.1 影响串联运行的因素	(92)
6.3.1 开关特性	(63)	8.3.2 静态均压	(92)
6.3.2 开关损耗	(64)	8.3.3 动态均压	(94)
6.4 擎住效应与安全工作区	(65)	8.4 并联运行	(96)
6.4.1 擎住效应	(65)	8.4.1 影响并联运行的因素	(96)
6.4.2 安全工作区	(66)	8.4.2 静态均流	(97)
6.5 栅极驱动电路	(67)	8.4.3 动态均流	(98)
6.5.1 栅极驱动电路设计原则	(67)	习题及思考题	(98)
6.5.2 栅极驱动电路实例	(69)	第九章 相位控制变换电路	(100)
6.6 IGBT 的保护措施	(69)	9.1 相控电路的整流运行	(100)
6.6.1 降低栅压保护法	(70)	9.1.1 相控整流的基本原理	(100)
6.6.2 识别集电极电压保护法	(71)	9.1.2 相控整流参数的谐波分析	(101)
习题及思考题	(72)	9.2 单相全波可控整流电路	(103)
第七章 静电感应晶体管及其他新型器件	(73)	9.2.1 单相半控桥整流电路	(104)
7.1 静电感应晶体管	(73)	9.2.2 单相全控桥整流电路	(105)

9.3 三相可控整流电路	(107)	11.2 单相逆变电路	(147)
9.3.1 三相半波可控整流电路	(107)	11.2.1 半桥逆变电路	(147)
9.3.2 三相桥式可控整流电路	(109)	11.2.2 全桥逆变电路	(149)
9.4 相控电路的逆变运行	(112)	11.3 三相逆变电路	(151)
9.4.1 相控电路逆变运行的基本 原理	(112)	11.3.1 电压型三相桥式逆变电路	(152)
9.4.2 三相半波逆变电路	(113)	11.3.2 电流型三相桥式逆变电路	(155)
9.4.3 三相桥式逆变电路	(115)	11.4 脉宽调制 (PWM) 逆变 电路	(155)
9.5 相控电路的换相重叠角	(117)	11.4.1 PWM 逆变电路的基本原理	(156)
习题及思考题	(120)	11.4.2 PWM 逆变电路的控制方式	(159)
第十章 直流斩波变换电路	(122)	11.4.3 PWM 产生的方法	(161)
10.1 斩波电路的基本原理	(122)	11.4.4 PWM 逆变电路输出谐波的 抑制	(166)
10.2 降压斩波变换电路	(123)	习题及思考题	(168)
10.2.1 连续导电模式	(124)	第十二章 谐振软开关变换电路	(170)
10.2.2 断续导电模式	(126)	12.1 零电流和零电压开关	(170)
10.2.3 输出电压纹波	(128)	12.1.1 PWM 硬性开关的局限性	(170)
10.3 升压斩波变换电路	(129)	12.1.2 谐振软性开关的特点	(171)
10.3.1 连续导电模式	(129)	12.1.3 谐振变换电路的分类	(172)
10.3.2 断续导电模式	(131)	12.2 负载谐振变换电路	(173)
10.3.3 输出电压纹波	(132)	12.2.1 电压型串联谐振变换电路	(174)
10.4 降压 - 升压斩波变换电路	(133)	12.2.2 电流型并联谐振变换电路	(177)
10.4.1 连续导电模式	(133)	12.3 软开关 DC - DC 变换电路	(180)
10.4.2 断续导电模式	(135)	12.3.1 零电流谐振开关变换电路	(180)
10.4.3 输出电压纹波	(136)	12.3.2 零电压谐振开关变换电路	(182)
10.5 库克变换电路	(136)	12.3.3 ZCS 和 ZVS 拓扑结构的比较	(184)
10.6 全桥 DC - DC 变换电路	(139)	12.4 谐振直流环 DC - AC 变换电路	(185)
10.6.1 双极性电压开关 PWM 控 制法	(140)		
10.6.2 单极性电压开关 PWM 控 制法	(142)		
10.7 各种 DC - DC 变换电路的 比较	(144)		
习题及思考题	(145)		
第十一章 交流逆变变换电路	(146)		
11.1 基本原理及其应用	(146)		
11.1.1 基本原理	(146)		
11.1.2 逆变电路的应用	(147)		

12.4.1 基本工作原理	(185)	13.3.2 电压型和电流型有源滤波器	(201)
12.4.2 控制规律	(187)	13.4 提高功率因数对策	(202)	
习题及思考题	(189)	13.4.1 功率因数	(202)	
第十三章 电力公害及其抑制对策 ...	(191)	13.4.2 提高功率因数的原理及方法	(204)
13.1 电力公害及其分类	(191)	13.5 电磁干扰及其抑制措施 ...	(208)	
13.1.1 何谓电力公害	(191)	13.5.1 电磁干扰的产生	(208)	
13.1.2 电力公害的分类	(191)	13.5.2 电磁干扰的分类及其抑制措施	(211)
13.2 谐波的产生及其抑制	(193)	习题及思考题	(215)	
13.2.1 谐波产生机理	(193)	主要参考文献	(216)	
13.2.2 谐波抑制对策	(195)			
13.3 电力有源滤波器	(199)			
13.3.1 基本原理	(199)			

第一章 绪 论

1.1 电力电子技术回顾

1.1.1 何谓电力电子技术

以电力为处理对象的电子技术称作电力电子技术(Power Electronics),它是一门利用电力电子器件对电能进行控制和转换的学科。如果说微电子技术是信息处理技术,那么电力电子技术就是电力处理技术。

电力电子技术包括电力电子器件、变流电路和控制技术三个部分,其中以电力电子器件的制造和应用技术为核心技术。电力电子技术与其他学科的关系如图 1.1 所示。从图中可以看出,电力电子技术是电力、电子和控制三大电气工程技术领域之间的交叉学科。随着科学技术的发展,电力电子技术又与现代控制理论、材料科学、电机工程、微电子技术等许多领域密切相关。目前,电力电子技术已逐步发展成为一门多学科互相渗透的综合性技术学科。

当代许多高新技术均与电网的功率、电流、电压、频率和相位等基本参数的转换与控制有关。电力电子技术能够实现对这些参数的精确控制和高效率的处理,特别是能够实现大功率电能的频率转换,为多项高新技术的发展提供了有力的支持。因此,不但现代电力电子技术本身是一项高新技术,而且还是其他多项高新技术发展的基础。电力电子技术及其产业的进一步发展必将为大幅度节约电能、降低材料消耗以及提高生产效率提供重要的手段,并为现代生产和现代生活带来深远的影响。

通常认为,1956 年第一个晶闸管(SCR)发明之日即为电力电子技术诞生之时。在这 40 多年里,电力电子技术的发展大体可划分为两个阶段:1957 年至 1980 年称为传统电力电子技术阶段;1980 年至今称为现代电力电子技术阶段。

1.1.2 传统电力电子技术

1947 年第一只晶体管诞生之后,半导体固态电子学这一新兴学科便随之应运而生,1956 年晶闸管的问世标志了半导体电力电子技术的开端。从此,电子技术向两个分支发展。一支是以晶体管集成电路为核心形成对信息处理的微电子技术,发展特点是集成度越来越高,集成规模越来越大,各种功能越来越全。1971 年第一台微处理器的问世使电子技术发生了第一次革命。目

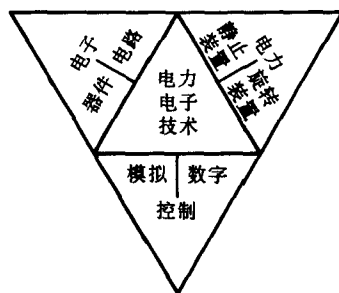


图 1.1 电力电子技术与其他学科的关系

前,微电子技术几乎遍及各种技术领域。另一支是以晶闸管为核心形成对电力处理的半导体电力电子技术,发展特点是晶闸管的派生器件越来越多,功率越来越大,性能越来越好。截至1980年,传统的电力电子器件已由普通晶闸管衍生出了快速晶闸管、逆导晶闸管(RCT)、双向晶闸管(TRIAC)、不对称晶闸管(ASCR)等等,从而形成了一个SCR大家族。与此同时,各类SCR的电压、电流、 du/dt 、 di/dt 等参数定额均有很大提高,开关特性也有很大改善,传统的电力电子器件已发展到相当成熟的地步。从理论上讲,这类器件在电压、电流两个方面仍有很大的发展自由度。但是实际上却存在着两个制约继续发展的重要因素。一是控制功能有缺欠,因为通过门极只能控制开通而不能控制关断,所以称之为半控型器件。要想关断这种器件必须加用电感、电容和辅助开关器件组成的强迫换流电路。这样将使整机体积增大、重量增加、效率降低。二是它立足于分立元件结构,工作频率一般情况下难以高于400 Hz,因而大大地限制了它的应用范围。由于上述两个原因,以半控型器件SCR为代表的传统电力电子器件的发展已处于停滞阶段。图1.2所示为各种电力电子器件在寿命周期曲线上的位置。图中示出的SCR、TRIAC、ASCR等器件已处于成熟期、饱和期或接近衰减期的位置,然而一代新型电力电子器件正在迅速发展中。

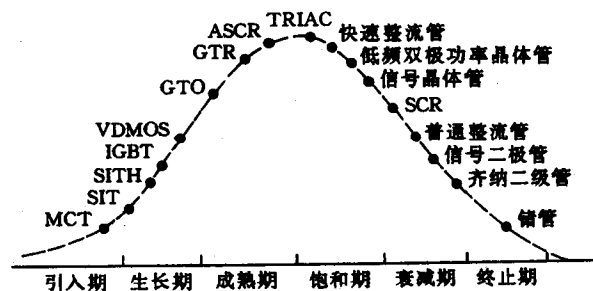


图 1.2 各种器件寿命的周期曲线

以SCR为核心的变流电路沿用了过去水银整流器所用的相控整流电路及周波变换电路,在中大功率范围内的各种静止变流器和电动机的传动系统一直在使用这些电路。相控电路的主要功能是使交流变成直流,为此当年有整流或顺变时代之称。直流传动、机车牵引和电化电源即为当时应用方面的三大支柱。这些电路几乎使用了半个世纪,至今没有多大改进。由于这些电路的工作频率低、整机体积大、功率因数低、网侧及负载上的谐波严重,因此阻碍了它们的继续发展。

综上所述,由SCR及其变流电路组成的传统电力电子技术经过几十年的发展已处于停滞阶段,这就要求新一代电力电子器件及其变换电路尽快取代旧的传统电力电子技术。

1.1.3 现代电力电子技术

80年代以来,微电子技术与电力电子技术各自发展的基础上相结合而产生了一代高频化、全控型的功率集成器件,从而使电力电子技术由传统的电力电子技术跨入现代电力电子技术的新时代。

70年代后期,可关断晶闸管(GTO)、电力晶体管(GTR)及其模块相继实用化。在中大容量的变流装置中,传统的SCR逐渐被这些新型器件取代。此后,各种高频化全控型器件如雨后春笋般不断问世并得以迅速发展。这些器件有功率场效应晶体管(功率MOSFET)、绝缘栅极晶体管

(IGT 或 IGBT)、静电感应晶体管(SIT)、静电感应晶闸管(SITH)以及 MOS 控制晶闸管(MCT)等。这些器件的产生和发展已形成一个新型的全控型电力电子器件的大家族。由图 1.2 可看出,在寿命周期曲线上这些器件正处于引入期或生长期,发展前景十分乐观。

新一代器件的问世,使得电力电子变换电路及其控制系统不断革新。例如,各种各样的脉宽调制(PWM)电路、零电流、零电压开关谐振电路以及高频斩波电路等已成为现代电力电子技术的重要组成部分。这些新型电路的主要作用是使零频率的直流逆变成各种工作频率的交流,因此电力电子技术已由当年的顺变(整流)时代进入今天的逆变(变频)时代。与新型电路相适应的新一代交流电机调速装置、不间断电源以及其他电力电子装置随之相继出现。这些运行可靠的电力电子装置在机电一体化的载体上开始进入各个应用领域。电力电子技术已成为世界范围内的一项重要产业。

现代电力电子技术在器件、电路及其控制技术方面与传统电力电子技术相比有如下特点:

1) 集成化 几乎所有全控型器件都由许多单元胞管子并联而成,即一个器件是由许多子器件所集成。例如一个 1000 A 的 GTO 含有近千个单元 GTO;一个 40 A 的功率 MOSFET 由上万个单元并联而成;一个 300 A 的 SITH 含有 5 万个子器件。

2) 高频化 从高电压大电流的 GTO 到高频率多功能的 SIT,工作频率已从数千赫到兆赫,标志着电力电子技术已进入高频化时代。目前 GTO 的工作频率可达 1~2 kHz,电力晶体管可达 2~5 kHz,功率 MOSFET 可达数百千赫,SIT 则可达 10 MHz 以上。

3) 全控化 电力电子器件实现全控化,即自关断化是现代电力电子器件在功能上的重大突破,无论是双极型器件的 GTO、GTR、SITH 或单极型器件的功率 MOSFET、SIT 以及混合型器件的 IGBT、MCT 等都实现了全控化,从而避免了传统电力电子器件关断时所需要的强迫换流电路。

4) 电路形式弱电化和控制技术数字化 全控型器件的高频化促进了电力电子电路形式的弱电化。PWM 电路、谐振变换电路以及高频斩波电路这些本来用于弱电领域的电路而今又成为电力电子电路的主要形式。控制这些电路的技术也逐步数字化。

1.2 电力电子器件

1.2.1 电力电子器件的分类

电力电子器件就是通常所说的电力半导体器件。在电路中,电力电子器件处于受控的通、断状态,具有理想的开关特性。根据不同的开关特性,电力电子器件可分为如下三大类型。

1) 不控器件 这种器件通常为两端器件,它具有整流的作用而无可控的功能,如 PN 结整流管和肖特基势垒二极管等。

2) 半控型器件 这种器件通常为三端器件。通过控制信号只能控制其开通而不能控制关断,半控型的称呼即由此而得。普通晶闸管(SCR)及其大部分派生器件属这一类。

3) 全控型器件 这种器件也为三端器件。通过控制信号,既可以控制其开通,又可以控制其关断,故称之为全控型器件。目前,主要有可关断晶闸管(GTO)、电力晶体管(GTR)和各种三端场控器件。

根据器件体内电子和空穴两种载流子参与导电的情况,众多电力电子器件又可分为双极型、

单极型和混合型三种类型。凡由一种载流子参与导电的称为单极型器件,如功率MOSFET、静电感应晶体管(SIT)等。凡由电子和空穴两种载流子参与导电的称为双极型器件,如PN结整流管、普通晶闸管(SCR)、电力晶体管(GTR)等。由单极型和双极型两种器件组成的复合型器件称为复合型器件,如绝缘栅双极晶体管(IGBT)和MOS控制晶闸管(MCT)等。图1.3所示为电力电子器件“树”。图中除了普通晶闸管(SCR)、逆导晶闸管(RCT)、不对称晶闸管(ASCR)和双向晶闸管(TRIAC)等为半控型器件外,其余三端器件均为全控型器件。各种电力半导体器件的代表符号及等效电路见表1.1。

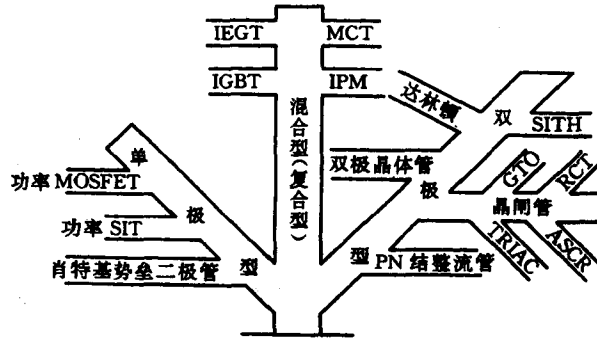


图 1.3 电力电子器件“树”

表 1.1 各种电力电子器件的符号及等效电路

类型	双极型器件					
名称	二极管	电力晶体管	达林顿管	晶闸管	可关断晶闸管	静电感应晶闸管
代号	Diode	GTR	Darlington	SCR	GTO	SITH
等效电路						
类型	单极型器件			复合器件		
名称	场控晶体管	静电感应晶体管	绝缘栅双极晶体管	MOS控制晶闸管		
代号	功率 MOSFET	SIT	IGBT	MCT		
等效电路						

除了上述分类法以外,根据控制信号的不同,电力电子器件还可以分为如下两种。

1. 电流控制型电力电子器件

功率硅整流二极管是最简单的电力电子器件,它只包含一个 PN 结,是一种两端器件。电力晶体管和各类晶闸管则是两个、三个或更多 PN 结组成的电力电子器件。在这些器件体内,电子和空穴都参与导电,故有双极之称,以区别于只有一种载流子导电的场效应晶体管。为了控制这类器件的开通与关断,必须给器件体内注入电流或从体内抽出电流才能实现,为此又有电流控制型器件的称谓。

应用比较广泛的电流控制型器件可分为两大类:一类是晶体管类,如电力晶体管及其模块等,这类器件适应于 500 kW 以下、380 V 交流供电的领域;另一类是晶闸管类,如普通晶闸管、可关断晶闸管等,这类器件适用于电压更高、电流更大的应用领域。

电流控制型器件的共同特点是:① 在器件体内有电子和空穴两种载流子导电,由导通转向阻断时,两种载流子在复合过程中产生热量,使器件结温升高。过高的结温限制了工作频率的提高,因此电流控制型器件比电压控制型器件的工作频率要低。② 电流控制型器件具有电导调制效应,使其导通压降很低,导通损耗较小,这一点优于只有一种载流子导电的电压控制型器件。③ 电流控制型器件的控制极输入阻抗低,控制电流和控制功率较大,电路也比较复杂。

2. 电压控制型电力电子器件

电压控制型器件泛指一切用场控原理进行控制的电力电子器件,因此,电压控制型器件也称为场效应电力电子器件。

所谓场控的含义是这样的:器件内主电极(漏极、源极或阳极、阴极)传导的工作电流是通过加在第三极(栅极或门极)上的电压在主电极间产生可控电场来改变其大小和通断状态的。因为加在第三极上是电压信号,所以称为电压控制型器件;又因为主电极间产生的电场控制工作电流,所以也称为场控器件或场效应器件。

根据可控电场存在的环境,可将场控电力电子器件分成两大类:一类是结型场效应器件,如静电感应晶体管(SIT)、静电感应晶闸管(SITH)等,这类器件多为常开型器件,目前多用于高频感应加热系统;另一类是绝缘栅场效应器件,如绝缘栅双极晶体管(IGBT)、功率 MOSFET 以及 MOS 控制晶闸管等,其中功率 MOS FET 多用在小于 10 kW 的高频设备中,IGBT 有取代 GTR 之势,用于 GTR 所用的一切领域。MOS 控制晶闸管则是集高电压、大电流和高频化于一体的电压控制型器件,是未来与 SCR、GTO 相竞争的新型器件。

应该指出,所有电压控制型器件都是用场控原理对其通断状态进行控制的,但是它们不一定是单极型器件,其中静电感应晶体管(SIT)和功率 MOSFET 只有一种载流子导电,属单极型器件;静电感应晶闸管(SITH)具有电导调制效应,属双极型器件;IGBT 和 MOS 控制晶闸管则属于混合型器件。

电压控制型器件的共同特点是:① 作为电压控制型器件,因为输入信号是加在门极的反偏结或是绝缘介质上的电压,输入阻抗很高,所以控制功率小,控制电路比较简单。② 对于单极型器件来说,因为只有一种载流子导电,没有少数载流子的注入和存储,开关过程中不存在像双极型器件中的两种载流子的复合问题,因而工作频率很高,可达几百千赫,甚至更高。对于混合型器件来说,工作频率也远高于双极型器件,比如 IGBT 的工作频率可达 20 kHz 以上。由此可知,工作频率高是电压控制型器件的另一共同特点。③ 电压控制型器件的工作温度高,抗辐射能力

也强。因此,这类器件的发展前景十分诱人。

1.2.2 电力电子器件的比较

电力电子器件品种很多,本节着重对几种常用器件的参数和特性进行比较。

电力电子器件的主要性能指标为电压、电流和工作频率三个参数,通过对这三项参数的比较即可明白每种器件的应用范围。实践证明各种器件以自己的某种优势占领一定范围的应用领域,但与其他器件会有竞争,因此用户可有更多的选择。不过每种器件都有自己的局限性,所以应用范围受到限制,最终各种器件在竞争的基础上形成互相补充的局面。

1. 单管的输出功率

图 1.4 所示为逆变器每臂用一个器件时的输出功率与工作频率的关系曲线。由图可知,传统的 SCR 输出功率最大,但工作频率最低。GTO 目前输出功率稍低于 SCR,可是工作频率远高于 SCR,在大容量高电压领域 GTO 是 SCR 的有力对手,其他自关断器件也难与 GTO 匹敌。在目前开发的高电压大容量新产品中,几乎没有使用 SCR 逆变器的。

GTR 的容量范围介于 GTO 和功率 MOSFET 之间,控制 GTR 比 GTO 更方便,加之 GTR 的工作频率较高,因而凡是能用 GTR 解决问题的领域尽量避免使用 GTO。GTR 适应于 380V 电网和 500 kW 的容量范围内。如果电网电压达 600 V 以上,则由于 GTR 耐压所限而难以发挥作用。但是对 GTO 来说,电压和容量在上述使用范围内有很大余地。

由于功率 MOSFET 可工作在甚高频下,用于高频化的逆变器、斩波器时,其体积重量大大减少,变流性能大大提高。目前在 10 kW 以下的逆变器中功率 MOSFET 受到青睐。IGBT 的容量目前已大于 GTR 和功率 MOSFET,它的应用范围正在逐步扩展。至于 MCT、SITH 以及 SIT 等器件虽已有一定应用,但尚未进入工业化广泛应用阶段,在这里不做详细比较。

2. 电流与电压的等级

几种全控型器件的电压与电流等级的比较曲线如图 1.5 所示。由图可知,四层结构的 GTO、SITH 属于高电压大电流器件,三层结构的 GTR、IGBT 和功率 MOSFET 的电压、电流容量不及四层结构。GTO、SITH 在电压和电流两个方面仍有发展余地,至少在理论上是有发展自由度的。GTR 的电流仍可增大,但电压难以高出 1500 V。由于功率 MOSFET 的导通电阻随着电压的升高而增大,因此,耐压的提高也是有困难的。从发展前途来看,IGBT 的电压电流容量可更高于 GTR 的容

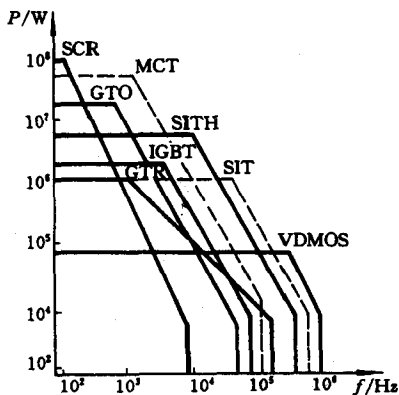


图 1.4 单个器件输出功率与工作频率的关系

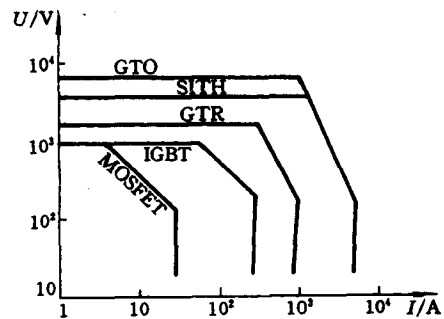


图 1.5 各种器件电压和电流的比较

量,因此,它是很有前途的一种新型器件。

3. 功率损耗

图 1.6 给出 1000V 级器件功率损耗与工作频率的关系曲线。由图可知,功率 MOSFET 的功率损耗最大。这是由于导通电阻大的缘故,但是它的功耗随着频率的增加幅度变化很小,说明功率 MOSFET 的开关损耗很小,可见功率 MOSFET 最适用于高频率下工作。GTO、GTR 和 IGBT 虽然低频时管压降低、功耗小,但是随着工作频率的增加,开关损耗急剧上升,于是,由于功耗的局限,GTO、GTR 和 IGBT 的工作频率不可能超过功率 MOSFET。

根据上述各特性的比较,有人对几种器件的未来发展给以预测。图 1.7 为千伏级器件的预测结果。图中显示了随着年代的推移,各器件电流容量增加的速度。由图可知这几种器件今后都会有所发展,但增长速度不同,近期内达到的电流容量也不同。图中 IGBT 是未来发展最快的一种混合型自关断器件。

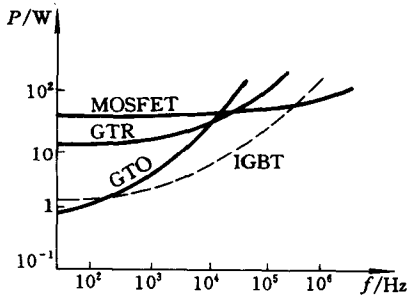


图 1.6 器件功率损耗与工作频率的关系

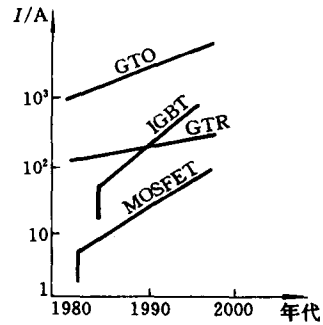


图 1.7 千伏级器件预测曲线

1.3 电力电子电路

1.3.1 电力电子电路的分类

电力电子电路即通常所说的变流电路。它的基本功能是使交流电能(AC)与直流电能(DC)互相转换,基本转换形式有四种,如图 1.8 所示。

1)整流电路 由交流到直流电能的变换称为整流(或称为 AC-DC 变换)。实现这种变换的电路称为整流电路。用整流二极管可组成不可控整流电路,用晶闸管或其他全控器件可组成可控整流电路。以往使用最普遍的可控整流电路即为普通晶闸管相控整流电路。整流电路应用极为普遍,大到直流输电,小到家用电器,都有 AC-DC 变换的功能。以往的相控整流电路存在着网侧功率因数低、谐波严重等缺点。为改进这些缺点,目前正推广用全控型器件组成的脉宽调制

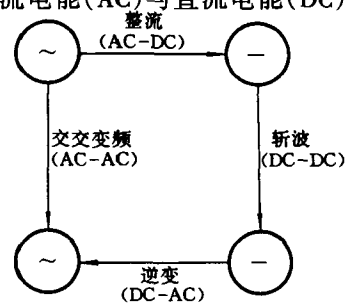


图 1.8 电力电子电路的基本功能

(PWM) 整流电路。

2) 逆变电路 由直流到交流电能的变换称为逆变(或称为 DC-AC 变换)。实现这一变换的电路称为逆变电路。逆变电路不但能使直流变成可调电压的交流,而且可输出连续可调的工作频率。以逆变电路为基础的交-直-交变频电路是当今应用最广泛的中小型交流电动机调速系统的主体。变频电路的种类很多,目前常用的是脉宽调制(PWM)电路。此外,正在研制无开关损耗的软开关逆变电路。

逆变器有三种基本类型:一是电压源型逆变器;二是电流源型逆变器;三是谐振型逆变器。这三种逆变器根据容量大小、工作频率高低可分别选用 GTO、GTR、IGBT 和功率 MOSFET 等全控型器件,为各种应用提供正弦波形的电流或电压。逆变器的体积和性能与电力电子器件的特性密切相关。比如,用 GTR 代替原来的 SCR,通用逆变器的体积就减至原来的三分之一,最高输出频率由原来的 50 Hz 提高到 360 Hz。若采用 IGBT 或功率 MOSFET,逆变器的输出频率可达到 1 kHz 以上,体积将更小。

3) 直流变换电路 使一种直流电压变成另一种幅值或极性不同的直流电压的变换称为直流变换(或称 DC-DC 变换)。实现这种变换的电路通常用斩波方式,所以也称为斩波电路。斩波电路有调脉宽、调频率或既调脉宽又调频率的三种基本形式。随着全控型器件工作频率的提高,斩波电路的应用越来越广泛。

通常 DC-DC 变换电路可分为以下五种:① 降压斩波电路;② 升压斩波电路;③ 升降压斩波电路;④ 库克斩波电路;⑤ 半桥或全桥变换电路。上述五种电路中,升压和降压斩波电路为基本电路,其余电路均由这两种电路演变而成。

DC-DC 变换电路大都采用 PWM 控制方式。在 PWM 电路中,电力电子器件工作在开关状态,每次均在高电压下开通,在大电流下关断。器件承受的 du/dt 及 di/dt 较高并产生相当可观的开关损耗。这种开关损耗随着开关频率的提高而增大。为了减小整机体积,一切电力电子装置均希望在高频下运行,但频率的增加又使开关损耗大大增加。此外,开关运行中较高的 du/dt 及 di/dt 又会产生严重的电磁干扰,不但影响自身系统的可靠性,而且影响同一电网中其他设备的运行。这些都是 PWM 电路存在的缺点。

为了克服上述缺点,在 DC-DC 和 DC-AC 变换电路中,若在电压过零或电流过零时进行开关切换,既可产生开关损耗,器件承受的 du/dt 及 di/dt 不会过高,也不会产生严重的电磁干扰。采用零电压、零电流开关的电磁谐振电路的变换器即可实现上述目的。因为这种电路大多数采用电感、电容拓扑结构,所以又称之为谐振变换电路。

目前,零电压零电流软开关电路已逐步应用于 DC-DC 变换电路中,使直流电源的体积大为缩小。

4) 交流变换电路 能使交流电压或频率改变的变换称为交流变换(或称为 AC-AC 变换),实现这种变换的电路通常用交流调压或周波变换电路。前者主要用于功率较小的交流调压设备;而后者则用于兆瓦级大型电动机的调速系统。

AC-AC 变换传动是一种在大功率(500 kW 或 1 000 kW 以上)、低速(600 r/min)范围内采用的交流调速方案,此技术正在轧机、矿山卷扬、船舶推进、水泥、风洞等传动中逐步取代传统的大功率直流调速系统,已经取得了良好的技术经济效益。

1.3.2 电力电子电路的应用

电力电子电路应用于从发电厂设备至家用电器的所有电气工程领域,例如发电厂的储能发电设备以及直流输电系统、动态无功补偿、机车牵引、各类电机传动、不停电电源、汽车电子化、开关电源、中高频感应加热设备和电视、通信、办公自动化设备等等。在这些应用中,容量最大者可达 1 GW,而最小者只有数瓦,工作频率最低者为 50 Hz,最高者可达 100 MHz。电力电子电路在各个应用领域中功率和频率的覆盖曲线如图 1.9 所示。由图可知,应用领域不同,所需的功率容量和工作频率也不同,与此相应,所需的电力电子器件和电路也不同。除了直流输电、特大容量电机的传动装置外,其他各个应用领域都被全控型器件所占领,而各种全控型器件又有自己的不同适应范围。

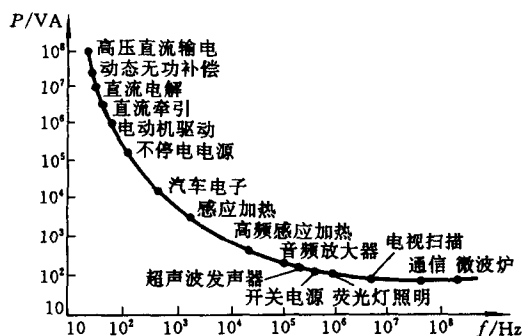


图 1.9 电力电子电路在不同频率下的应用领域

全控型器件的应用领域大体可以划分为两种类型:一是用量很大的各类电动机的传动装置,采用的是调压调频电路(即 VVVF);二是种类很多的各类静止电源(如 UPS 电源),多数采用的是恒压恒频电路(即 CVCF)。

1.4 电力电子技术展望

80 年代一批全控型器件的大容量化和实用化使电力电子技术完成了从传统电力电子技术向现代电力电子技术的过渡。可以预料,下一个世纪电力电子技术将会有更加飞跃的发展。

1.4.1 电力电子器件

电力电子器件在今后将有如下三个方面的进展:

① 已实用化的全控型器件在大功率、易驱动和高频率这三个方面继续发展。图 1.10 给出了三个年代中各种全控型器件的控制功率与工作频率的适用范围。由图可知,1980 年末 GTO、GTR 和功率 MOSFET 的控制功率较小,工作频率也较低。经过 80 年代和 90 年代的发展,在本世纪末(2000 年)各种全控型器件将会有很大发展。

② 由于 MCT、SITH 和 SIT 等器件的大容量化和实用化、IGBT 电流和电压容量的进一步提高和 GTO 快速性能的改进等原因,将迫使 SCR 和 GTR 的应用范围变得更窄。这两种器件最终会

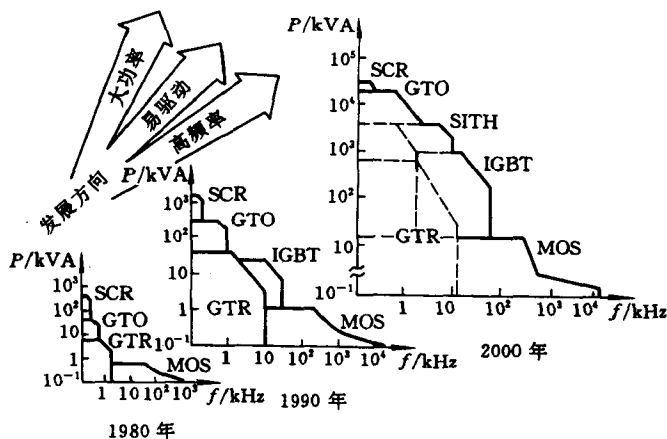


图 1.10 大功率全控型器件区域图

被淘汰。

③ 功率集成电路不同于上述全控型器件,它是在芯片上集成了一个系统,其中包括电力电子器件、驱动电路、传感器和诊断、保护、控制等电路。这种集成电路的进一步发展,可能使电力电子技术跃入功率集成电力电子技术的新时代,预计在 90 年代之后功率集成电路会有很大的发展。

1.4.2 变流电路及控制技术

变流电路是随着电力电子器件的更新而发展的。传统电力电子技术所用的相控电路适用于 SCR, PWM 电路和谐振电路适用于各种全控型器件。在 90 年代,上述电路会逐步完善、改进,预计不会有更多更新的变流电路诞生,但是变流电路在减小体积和重量、改进效率、提高精度、增加快速性以及增大电压、电流、频率的控制范围等方面将会有较大进展,无论是电机驱动用 VVVF 逆变器或电源类应用的 CVCF 逆变器以及应用广泛的高频斩波器都会变得小巧玲珑、可靠便宜,备受用户欢迎。

值得指出的是,由于 SCR 应用的衰退,也由于网侧谐波严重,至今仍用于特大容量电机驱动电路的 SCR 交-交变频电路也将被逆变电路所取代。

先进的控制技术对改进变流电路的效率和性能是必不可少的关键技术之一,以往主要应用模拟控制技术,但这种技术有较大的缺点,因为参数随温度变化而产生较大的漂移,致使不断地需要人工调节以控制参数精度。采用数字控制即可避免这种缺点,因此,变流电路控制技术的方向是数字化。由于微型计算机运算速度的提高以及现代控制理论的应用,控制技术数字化的目标完全可以实现。