

第 1 章 绪 论

对于初次了解电力电子技术的人,往往一开始会有诸多疑问,如什么是电力电子技术,它和电子技术有没有什么不同,它包括哪些内容,应用在哪些领域。针对这些问题的了解,非常有利于对这门课的学习。

1.1 电力电子技术与电子技术

什么是电力电子技术,它与模拟电子技术和数字电子技术有什么不同? 电力电子技术和电子技术的关系如图 1-1 所示。电力电子技术是用电力电子器件对电能进行变换和控制的技术,即应用于电力领域的电子技术。它与通常所说的信息电子技术(包括模拟电子技术和数字电子技术)同属于电子技术。信息电子技术的任务是进行信息处理,电力电子技术的任务是对电能进行变换和控制,将传统意义上电网发出的“粗电”变成“精电”。

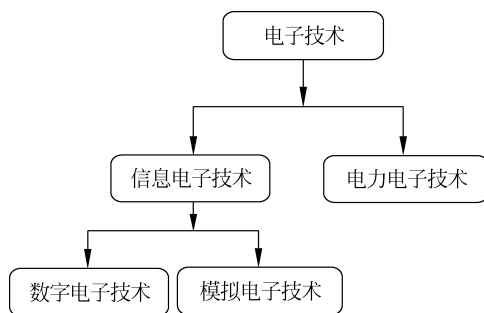


图 1-1 电力电子技术和电子技术的关系

目前所用的电力电子器件均由半导体制成,也被称作电力半导体器件。需要注意的是,电力电子技术中的“电力”和电力系统中所指“电力”有一定区别。电力电子技术变换的“电力”,可大到数百兆瓦甚至吉瓦,也可小到数瓦甚至毫瓦级。

1.2 电力电子技术的内容

通常把电力电子技术的内容分为电力电子器件和变流技术两部分。电力电子器件是电力电子技术的基础,没有晶闸管、电力晶体管、IGBT 等电力电子器件,也就没有电力电子技术。电力电子器件的理论基础是半导体物理。

变流技术是电力技术的核心,“变流”不只是交流与直流之间的变换,还包括直流与直流、交流与交流之间的变换。变流技术是用电力电子器件构成电力变换电路和对其进行控制的技术,以及构成电力电子装置和电力电子系统的技术。变流技术是电力技术的核心,它的理论基础是电路理论。

1.3 电力变换的种类和变流技术

通常电力包括交流和直流两种,从公用电网直接得到的是交流,从蓄电池和干电池得到的是直流。从这些电源得到的电力往往不能直接满足要求,需要进行电力变换。

基本的电力变换有四大类:交流变直流(AC-DC,整流)、直流变交流(DC-AC,逆变)、直流变直流(DC-DC,直流斩波)、交流变交流(AC-AC,交流电力控制)。直流变直流是指一种电压(或电流)的直流变为另一种电压(或电流)的直流,可以用直流斩波电路实现。交流变交流可以是电压或电力的变换,也可以是频率或相数的变换,称为交流电力控制。上述这四种基本电力变换还可以组合成更多形式的其他电力变换种类,如先整流后逆变就可以实现变频技术。进行上述电力变换的技术称为变流技术,见表 1-1。

表 1-1 电力变换技术的种类

输 入	输 出	
	直 流	交 流
交流	整流	交流电力控制变频、变相
直流	直流斩波	逆变

1.4 与相关学科的关系

“电力电子学”和“电力电子技术”是分别从学术和工程技术两个不同角度的称呼,其内容区别不大。

电力电子学(power electronics)的名称出现在 20 世纪 60 年代。1974 年,美国的 W. Newell 用图 1-2 所示的倒三角形对电力电子学进行了描述。

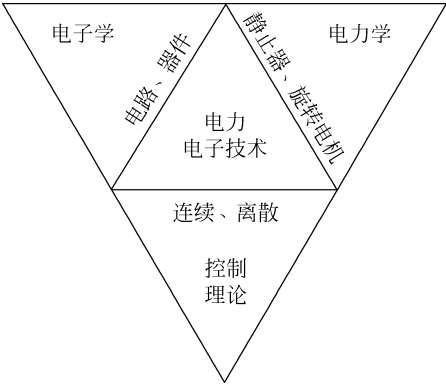


图 1-2 描述电力电子学的倒三角形

1. 与电子学(信息电子学)的关系

电力电子学和信息电子学比较如下。

- (1) 电力电子学和信息电子学的内容都可分为器件和应用两大分支。
- (2) 电力电子学和信息电子学器件的材料、工艺基本相同,都采用微电子技术。
- (3) 电力电子学和信息电子学应用的理论基础、分析方法、分析软件基本相同。
- (4) 信息电子电路的器件既可以工作在开关状态,也可以工作在放大状态;电力电子电路的器件一般只工作在开关状态。
- (5) 电力电子学和信息电子学二者同根同源。

2. 与电力学(电气工程)的关系

电力电子技术广泛用于电气工程中:如高压直流输电、静止无功补偿、电力机车牵

引、交直流电力传动、电解、电镀、电加热、高性能交直流电源等。国内外均把电力电子技术归为电气工程的一个分支,电力电子技术是电气工程学科中最为活跃的一个分支。

3. 与控制理论(自动化技术)的关系

控制理论广泛用于电力电子系统中,电力电子技术是弱电控制强电的技术,是弱电和强电的接口,控制理论是这种接口的有力纽带,电力电子装置是自动化技术的基础元件和重要支撑技术。

1.5 电力电子技术的应用

电力电子技术的应用范围十分广泛。从电子装置电源(为信息电子装置提供动力)到一般工业(如交直流电机、电化学工业、冶金工业),从电力系统(高压直流输电、柔性交流输电、无功补偿)到交通运输(电气化铁道、电动汽车、航空、航海),以及家用电器(“节能灯”、变频空调)、UPS、航天飞行器、新能源、发电装置等其他方面的应用。

1.5.1 电力电子技术在各种电源技术中的应用

1. 通信电源

在通信领域中,往往需要通过 AC-DC 变换器整流电路,将单相电压 220V 或者三相 380V 的交流电整流成一定的直流电(如 48V),再经过 DC-DC 的直流变换器变换成所需要的各种不同电压的直流电,供各种通信领域中的设备使用。

2. UPS 不间断电源

不间断电源(UPS)广泛地应用于计算机相关设备、医疗设备、工业自动化控制系统等。

UPS 的基本原理如图 1-3 所示,是将输入交流电转换成直流电,再将直流电转换成需要的交流电输出,以便为负载供电。当主电源发生异常时,逆变器将电池组的直流电转换回交流电,并提供给负载使用。当主电源恢复正常时,UPS 会将电网重新接入负载,同时通过逆变器将电池组电量补充至正常水平。通过这些步骤,UPS 可以在市电中断或不稳定时为负载提供连续的电力保障,从而避免因电力中断造成的数据丢失、设备损坏或生产中断等问题。

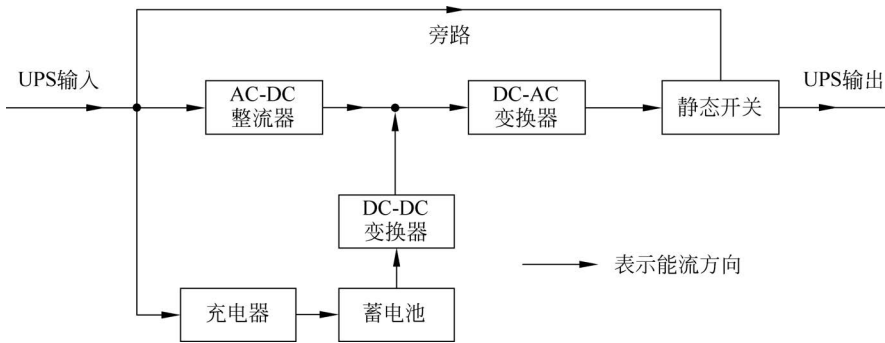


图 1-3 UPS 的基本原理

3. 直流电源

许多负载必须使用直流电源,世界上发电总量的 20%~30%需要使用直流电,如电镀、电解等需要大容量可控整流电源。有些是为了提高产品质量而用直流电源,如直流电弧炉炼钢、直流电焊机焊接。以直流焊机为例,直接电焊供电电源是电焊用直流发电机,其特殊构造可以实现电流的陡降情况,但它的效率只有 30%,重 200~300kg;由晶闸管供电的直流焊机效率可达 75%,重 100kg 左右;采用 IGBT 高频逆变的直流焊机,效率在 85%以上,重量只有 20~30kg,且其控制特征好,可以实现恒流、恒压焊接,脉冲焊接等工艺要求,保证了焊接质量。

程控交换站、计算机、电视、医疗设备、航天、航海舰艇及家电上广泛应用开关电源,这些开关电源采用高频化技术,使其体积重量大大减小,能耗和材料也大为降低。为提高电源的单位功率密度,开关电源高频化是发展的方向。为减少由于频率提高而使开关损耗增加的问题,从而发展了各种软开关技术。

4. 各种频率的全固态化交流电源

全固态化交流电源是为各种工业需要的变频电源。在 20 世纪 80 年代末,我国约有 20 万台 60~200kW 的高频设备,现在用晶闸管中频感应加热装置已完全取代了中频发电机,国内已形成 200~8000Hz,功率为 100~3000kW 的系列产品。在高频电源方面则用功率 MOSFET 制造出 1000kW/15~600kHz(比利时),用 SIT(静电感应晶闸管)制造出 1000kW/200kHz 和 400kW/400kHz(日本)的感应加热装置,效率都在 90%以上。国内已研制出 75kW/200kHz 的 SIT 感应加热装置,这样采用全固态高频感应加热装置可以大大节能。

1.5.2 电力电子技术在变频器中的应用

变频器是把工频电源(50Hz 或 60Hz)变换成各种频率的交流电源,以实现电机变速运行的设备。如图 1-4 所示,变频器电路主要包括控制电路、整流电路、逆变电路和中间电路。控制电路完成对主电路的控制,整流电路将交流电变换成直流电,直流中间电路对整流电路的输出进行平滑滤波,逆变电路将直流电再逆变成交流电。对于如矢量控制变频器这种需要大量运算的变频器来说,有时还需要一个进行转矩计算的 CPU 以及一些相应的电路。

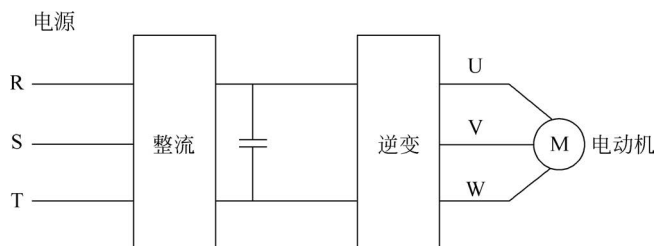


图 1-4 变频器的应用

1.5.3 电力电子技术在电力系统中的应用

目前电力电子技术的应用已涉及电力系统的各个方面,包括发电环节、输配电系统、

储能系统等。

电力系统的发电环节涉及发电机组的多种设备,电力电子技术的应用以改善这些设备的运行特性为主要目的。

1. 大型发电机的静止励磁控制

发电机的静止励磁就是采用先进的电力电子励磁系统取代原有的旋转励磁机组,例如目前大型发电机的励磁采用了晶闸管整流自并励方式,具有结构简单、可靠性高及造价低等优点,被世界各大电力系统广泛采用。由于省去了励磁机这个中间惯性环节,因而具有其特有的快速性调节,给先进的控制规律提供了充分发挥作用并产生良好控制效果的有利条件。

此外,风力发电的有效功率与风速的三次方成正比,风车捕捉最大风能的转速随风速而变化。为了获得最大有效功率,可使机组变速运行,通过调整转子励磁电流的频率,使其与转子转速叠加后保持定子频率(输出频率恒定)。

2. 发电厂风机水泵的变频调速

发电厂用电率平均为 8%,风机水泵耗电量约占火电设备总耗电量的 65%,且运行效率低。实施风机水泵的变频调速,可以达到节能的目的。目前,低压变频器技术已非常成熟,高压大容量变频器设计和生产是变频器技术的难点。

3. 太阳能光伏发电和风力发电技术

太阳能是调整未来能源结构的一项重要战略措施。如图 1-5 所示,大功率太阳能发电,无论是独立系统还是并网系统,通常需要将太阳能电池阵列发出的直流电转换为交流电,所以具有最大功率跟踪功能的逆变器成为系统的核心。日本实施的阳光计划以 3~4kW 的户用并网发电系统为主,我国实施的送电到乡工程则以 10~15kW 的独立系统居多,而大型系统有在美国加州的西门子太阳能发电厂(7.2MW)等。

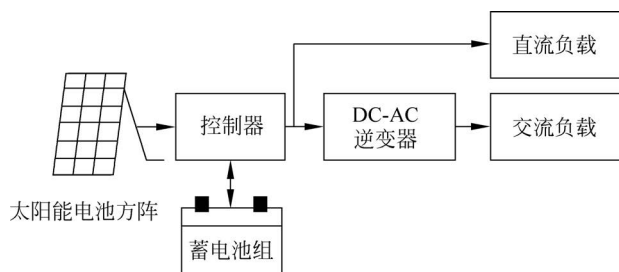


图 1-5 太阳能光伏发电系统原理图

除了太阳能光伏发电技术以外,风力发电也是目前较为成熟的可再生能源发电技术之一。并网式风力发电系统的基本原理图如图 1-6 所示,桨叶带动发电机发出的电,要经过整流电路整成直流电再逆变成交流电,以此来改善其发出的交流电的性能。

4. 柔性交流输电技术(FACTS)

柔性的交流输电技术是 20 世纪 80 年代后期出现的新技术,近年来在世界上发展迅速。柔性交流输电技术是指电力电子技术与现代控制技术结合,以实现对电力系统电压、参数(如线路阻抗)、相位角、功率潮流的连续调节控制,从而大幅度提高输电线路输送能力和提高电力系统稳定水平,降低输电损耗。传统的调节电力潮流的措施,如机械控制的

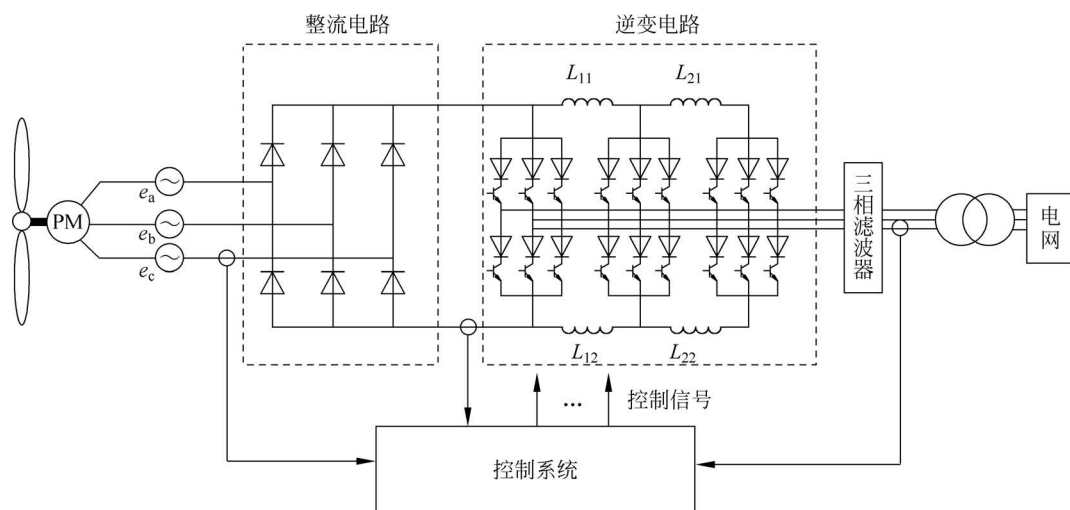


图 1-6 并网式风力发电系统的基本原理图

移相器、带负荷调变压器抽头、开关投切电容和电感、固定串联补偿装置等,只能实现部分稳态潮流的调节功能,而且由于机械开关动作时间长、响应慢,无法适应在暂态过程中快速柔性连续调节电力潮流、阻尼系统振荡的要求。因此,电网发展的需求促进了柔性交流输电这项新技术的发展和应用。到目前,FACTS 控制器已有数十种,按其安装位置可分为发电型、输电型和供电型 3 大类,但共同的功能都是通过快速、精确、有效地控制电力系统中一个或几个变量(如电压、功率、阻抗、短路电流、励磁电流等),从而增强交流输电或电网的运行性能。已应用的 FACTS 控制器有静止无功补偿器(SVC)、静止调相机(STATCOM)、静止快速励磁器(PSS)、串联补偿器(SSSC)等。近年来,柔性交流输电技术已经在美国、日本、瑞典、巴西等国重要的超高压输电工程中得到应用。国内也对 FACTS 进行了深入的研究和开发,每年都有数篇论文发表,但是具有自主知识产权的 FACTS 设备只有清华大学和河南省电力公司联合开发的 $\pm 20\text{Mvar}$ 新型静止无功发生器(ASVG)。

5. 高压直流输电技术(HVDC)

1970 年世界上第一项晶闸管换流阀试验工程在瑞典建成,取代了原有的汞弧阀换流器,标志着电力电子技术正式应用于直流输电。从此以后世界上新建的直流输电工程均采用晶闸管换流阀。新一代 HVDC 技术采用 GTO、IGBT 等可关断器件,以及脉宽调制(PWM)等技术。省去了换流变压器,整个换流站可以搬迁,可以使中型的直流输电工程在较短的输送距离也具有竞争力。此外,可关断器件组成的换流器,由于采用可关断的电力电子器件,可避免换相失败,对受端系统的容量没有要求,故可用于向孤立小系统(海上石油平台、海岛)供电,今后还可用于城市配电系统,并用于接入燃料电池、光伏发电等分布式电源。目前,全球已建成的直流输电工程超过 60 项,其中具有代表性的工程如下。

(1) 天生桥—广州直流输电工程(2001 年) $\pm 500\text{kV}$, 1800MW , 980km 。

(2) 三峡—常州直流输电工程(2003 年) $\pm 500\text{kV}$, 3000MW , 890km 。

(3) 三峡—广州直流输电工程(2004 年) $\pm 500\text{kV}$, 3000MW , 962km 。

近年来,直流输电技术又有新的发展,轻型直流输电采用 IGBT 等可关断电力电子器

件组成换流器,应用脉宽调制技术进行无源逆变,解决了用直流输电向无交流电源的负荷点送电的问题,如图 1-7 所示。同时大幅度简化设备,降低造价。世界上第一个采用 IGBT 构成电压源换流器的轻型直流输电工业性试验工程于 1997 年投入运行。

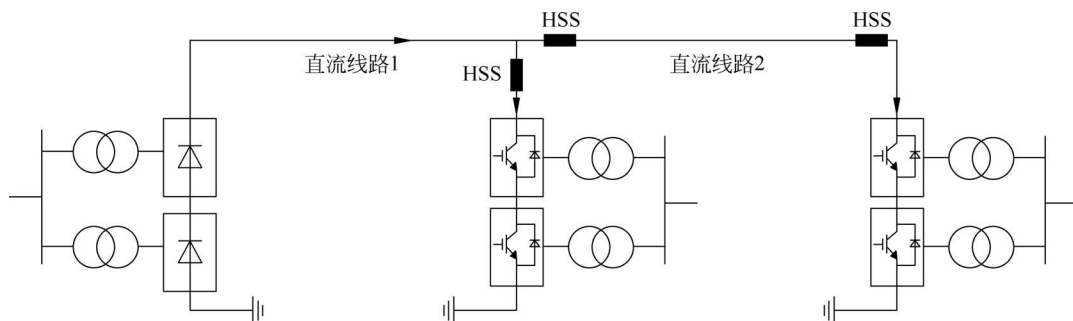


图 1-7 高压直流输电技术原理图

6. 静止无功补偿器(SVC)

SVC 是用以晶闸管为基本元件的固态开关替代了电气开关,实现快速、频繁地以控制电抗器和电容器的方式改变输电系统的导纳。SVC 可以有不同的回路结构,按控制的对象及控制的方式不同分别称为晶闸管投切电容器(TSC)、晶闸管投切电抗器(TSR)或晶闸管控制电抗器(TCR),如图 1-8 所示。我国输电系统五个 500kV 变电站用的 SVC 容量在 105~170Mvar,均为进口设备,型式为 TCR 加 TSC 或机械投切电容器组。国内工业应用的 TCR 装置大约有 20 套,容量在 10~55Mvar,其中一小半为国产设备。低压 380V 供电系统有各类 TSC 型国产无功补偿设备在运行,但至今仍没有一套国产的 SVC 在我国的输变电系统运行。

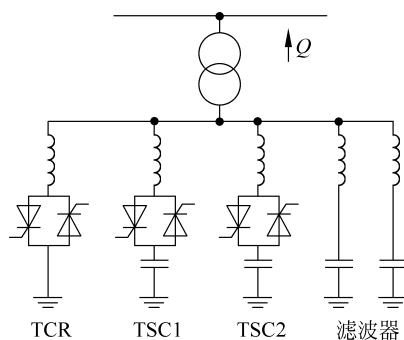


图 1-8 静止无功补偿器典型结构

7. 配电环节

配电系统迫切需要解决的问题是如何加强供电可靠性和提高电能质量。电能质量控制既要满足对电压、频率、谐波和不对称度的要求,还要抑制各种瞬态的波动和干扰。电力电子技术和现代控制技术在配电系统中的应用,即定制电力(custom power)技术。定制电力技术(CP)技术和 FACTS 技术是快速发展的姊妹型新式电力电子技术。采用 FACTS 的核心是加强交流输电系统的可控性和增大其电力传输能力;发展 CP 的目的是在配电系统中加强供电的可靠性和提高供电质量。CP 和 FACTS 的共同基础技术是电力电子技术,各自的控制器在结构和功能上也相同,其差别仅是额定电气值不同,目前二者已逐渐融合于一体,即所谓的 DFACTS 技术。具有代表性的定制电力技术产品包括动态电压恢复器(DVR)、固态断路器(SSCB)、故障电流限制器(FCL)、统一电能质量调节器(PQC)等。

8. 其他应用(同步开断技术)

实现同步开断的根本出路在于用电子开关取代机械开关。美国西屋公司已制造出 13kV、600A、由 GTO 元件组成的固态开关,安装在新泽西州的变电站中使用。GTO 开

断时间可缩短到 $1/3\text{ms}$,这是一般机械开关无法比拟的。现在,由固态开关构成的电容器组的配电系统“软开关”已问世。

1.5.4 电力电子技术在新新能源汽车中的应用

传统汽车的化石能源燃烧带来严重的空气污染,近些年新能源汽车异军突起,国内的电动汽车更是得到了快速发展。电动汽车的电驱动系统如图 1-9 所示,包含了电池、电力电子逆变器、电动机等。利用司机踩“油门”作为变频调速的指令,调节新能源汽车的行驶速度。

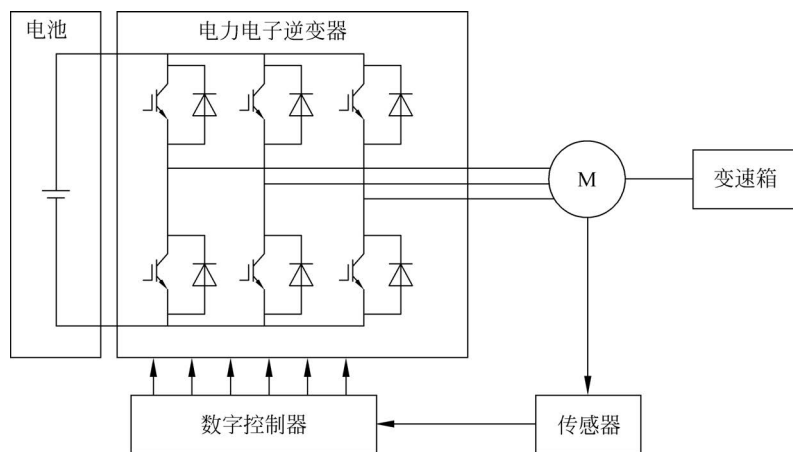


图 1-9 新能源电动汽车电驱系统原理框图

总之,电力电子技术的应用范围十分广泛,激发了一代又一代的学者和工程技术人员学习、研究电力电子技术并使其飞速发展。

电力电子装置提供给负载的是各种不同的直流电源、恒频交流电源和变频交流电源,因此也可以说,电力电子技术研究的是电源技术。

电力电子技术对节省电能有重要意义。特别在大型风机、水泵采用变频调速方面,在使用量十分庞大的照明电源等方面,电力电子技术的节能效果十分显著,因此被称为节能技术。

1.6 电力电子技术的诞生与发展

电力电子技术是 20 世纪后半叶诞生和发展的一门崭新的技术。电力电子技术的发展史是以电力电子器件的发展史为纲的,没有电力电子器件的发展,就没有电力电子技术的发展。可以预见电力电子技术将与以计算机为核心的信息科学一起成为 21 世纪主导的科学技术之一。

电力电子器件的发展史如图 1-10 所示。电力电子学发展过程中的重要事件如下。

1803 年,整流器的发明。

1876 年,硒整流器的发明。

1896 年,单相桥式整流电路的发明。

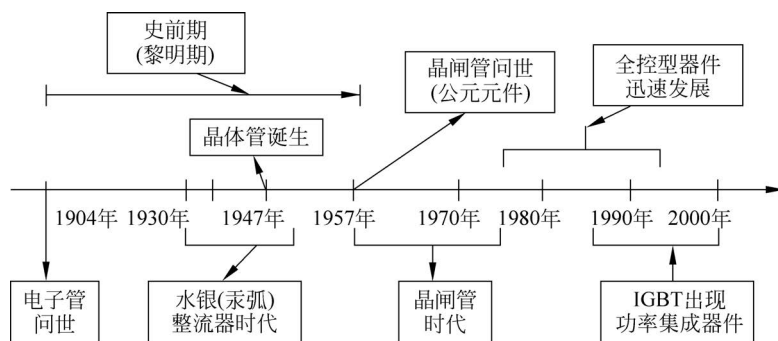


图 1-10 电力电子器件的发展史

- 1897 年,三相桥式整流电路的发明。
- 1902 年,水银整流器的发明。
- 1903 年,相控整流原理的提出。
- 1911 年,金属封装水银整流器的发明。
- 1922 年,周波变换器原理的提出。
- 1923 年,电子晶闸管的发明。
- 1924 年,斩波器原理的提出。
- 1925 年,逆变器换流原理的提出。
- 1926 年,热阴极电子晶闸管的发明。
- 1931 年,铁路牵引用周波变换器的发明。
- 1933 年,引燃管的发明。
- 1935 年,高压直流输电系统的提出。
- 1939 年,电机驱动概念的引入。
- 1942 年,20MW 25/60Hz 功率变换器的发明。
- 1953 年,100A 硅功率二极管的发明。
- 1954 年,硅功率二极管的发明。
- 1957 年,半导体晶闸管的发明。
- 1958 年,半导体晶闸管的商业化。
- 1961 年,小功率可关断晶闸管(GTO)的发明。
- 1964 年,三端双向可控开关元件用于直流电机驱动理论的提出。
- 1965 年,光激硅可控整流器的发明。
- 1967 年,用于高压直流输电系统的晶闸管的发明。
- 1970 年,500V/20A 硅双极型晶体管(BJT)的发明。
- 1971 年,磁场定向原理的提出(矢量控制)。
- 1973 年,用周波变换器实现的无齿轮传动球磨机的发明。
- 1975 年,300V/400A 巨型晶体管(GTR)的发明。
- 1978 年,100V/25A 功率场效应管(MOSFET)的发明。
- 1979 年,采用微处理器实现矢量控制的晶体管逆变器(LEONHARD)的发明。

- 1980 年,矩阵变换器的发明;4kV/1.5kA 光触发晶闸管的发明;开关磁阻电机的发明。
- 1981 年,2500V/1000A GTO 的发明;周波变换器实现的球磨机驱动的成功。
- 1982 年,CUK 变换器的发明。
- 1983 年,IGBT 变换器的发明;谐振链 DC-DC 变换器的发明。
- 1986 年,柔性输电概念的提出。
- 1987 年,双向 PWM RECTIFIER-INVERTER 系统的实现。
- 1987 年,场控晶闸管(MCT)的发明;电力系统有功功率控制器(APLC)的发明;直接转矩控制理论的提出。
- 1989 年,85MW 变速泵储能系统的完成;准谐振变换器的发明。
- 1990 年,SMART 功率驱动的实现。
- 1991 年,80Mvar(1var=1W)静止无功功率补偿器(SVC)的发明。
- 1992 年,6kV/2.5kA,300MW 直流输电的成功。
- 1993 年,模糊逻辑神经网络在电力电子学及电力传动上的应用。
- 1994 年,1MV-AIGBT 不停电电源(UPS)的发明;38MV-AGTO 牵引逆变器的发明;400MW 变速泵储能系统的完成。
- 1995 年,3 电平 GTO/IGBT 逆变器在球磨机传动中的应用(15/1.5MV·A);100Mvar 静止无功补偿装置(SVC)的发明。
- 1997 年,IGCT 概念的提出和商业化。
- 1998 年,5MW 3 电平直接转矩控制变换器的实现;1MW 50kHz 电流型感应加热逆变器的运行。
- 1998 年,300MW GTO 高压输电变换系统的完成;6.5kV 双向晶闸管(BCT)的发明。
- 1999 年,6.5kV/600A IGBT 模块在 3000V 直流系统中成功替代 GTO;双向 MOS 开关(MBS)的发明。
- 2000 年,反向阻断性 IGBT 的发明;用 3 电平 1GCT 逆变器实现的 45MV-A 动态电压补偿器(DVR)的完成;矩阵变换器模块的发明。
- 2001 年,英飞凌公司推出首个商业化的碳化硅肖特基二极管。
- 2003 年,碳化硅 GCT(SICGT)高压模块的成功研制。
- 2006 年,中国株洲中车电气成功研制出世界上第一只 6 英寸 8500V 商用 HVDC 晶闸管。
- 2009 年,中国成功投运世界首个±800kV 高压直流输电工程——云南至广东直流工程。
- 2013 年,ABB 推出 6.5kV 等级的 IGCT(集成门极换流晶闸管)。
- 2013 年,中国许继集团研制出世界首个额定电流 6250A 的特高压直流输电换流阀组件。
- 2016 年,美国 Cree 半导体器件商推出 1700V 电压等级的碳化硅肖特基二极管。
- 2017 年,ABB 宣布轻型高压直流领域的最新进展,传输能力达到 3000MW。
- 2017 年,中国研制出世界首套±1100kV/5500A 换流阀样机。
- 2018 年,ABB 推出了全球首台集成了数字化解决方案的电力变压器——ABB Ability™ 数字化电力变压器。