

# 0 绪 论

## 0.1 电力电子技术的概念与典型应用

### 0.1.1 电力电子技术的概念

电力电子技术是一门新兴的应用于电力领域的电子技术，是电子技术的重要组成部分。电子技术是根据电子学的原理，运用电子元器件设计和制造某种特定功能的电路以解决实际问题的科学，它是对电子信号进行处理和实现电能变换的技术。电子技术已发展成为内容十分丰富的学科，从处理电能功率等级的角度出发，电子技术可以分为信息电子技术和电力电子技术（Power Electronics Technology）两大分支。

信息电子技术包括模拟电子技术和数字电子技术，无论是模拟电子技术还是数字电子技术，对电子信号处理的方式主要有：信号的发生、放大、滤波、转换等。

电力电子技术是一种电力变换技术，它是应用大功率半导体器件，对电能进行变换——包括电压、电流、频率和波形等方面的变换，以使电能可以更好地符合各种不同用电设备的要求。可以说，电力电子技术是应用于电力技术领域中的电子技术，它是利用大功率电子器件对能量进行变换和控制为主要内容的技术。国际电气和电子工程师协会（IEEE）的电力电子学会对电力电子技术的定义为：“有效地使用电力半导体器件、应用电路和设计理论以及分析开发工具，实现对电能的高效变换和控制的一门技术，它包括电压、电流、频率和波形等方面的变换。”电力电子器件在电力电子技术发展的过程中起着非常重要的作用，电力电子技术是随着变换电路和控制技术的发展而发展的。

信息电子技术进入生产和生活领域的时间较早，因而已广为人知；电力电子技术则相对晚一些，是一门较为“年轻”的学科。信息电子技术和电力电子技术这两大分支既有联系又有区别，相同之处在于器件的材料、工艺基本相同，它们都需要微电子技术作为开发、设计器件的手段，应用的理论基础、分析方法、分析软件也基本相同。区别之处在于它们处理电能的功率等级不同，因而研究的重点不同。信息电子技术更多地关注装置或电路的功能，而电力电子技术在实现装置某一功能时，更多地关注大功率电能变换装置的效率、谐波、功率密度等性能指标。另外，信息电子电路的器件可工作在开关状态，也可工作在放大状态，电力电子电路的器件一般只工作在开关状态。

### 0.1.2 电力电子技术的典型应用

电力电子装置与设备可以用小信号输入来控制，所以说，电力电子装置与设备是强、弱电之间接口的基础。微电子和计算机技术的新成就，可以通过这一接口移植到传统工业产品，可以促使传统产品的更新换代。电力电子技术应用范围十分广泛，例如电视、通信、办公自动化设备用的开关辅助电源、不间断电源、电源电网净化技术、发电厂的储能发电设备，以及直流输电系统、各类电

机传动、机车牵引、动态无功补偿、汽车电子化、中高频感应加热设备等。

近年来,经过功率变流技术处理的电能在整个国民经济的耗电量中所占比例越来越大。在发达国家,电能的 75%左右经过电力电子技术处理后使用,预计在 21 世纪中叶将发展到 90%以上。在这些应用中,容量最大者可达 1GW,而最小者只有数瓦甚至更小,工作频率最低者为 50 Hz,最高者可达 100 MHz。下面概括举例说明其典型应用。

### (1) 电源装置

电力电子应用领域之一是电源装置。微电子制造技术的进步促进了计算机、通信设备、家用电器、仪器仪表的飞速发展,这些设备内部往往需要采用直流稳压电源供电,其用量之大是惊人的,电力电子器件的高频化可将工作频率由 20kHz 提高到 1MHz,大大促进了开关直流稳压电源的小型化。目前,新型的 PIC 器件产生了高功率密度的集成片状开关电源,可靠性大为提高。随着电子技术、计算机的发展,小型开关电源将会有更大的市场。

很多关键的设备还需要不间断电源(UPS),以确保市电停电时设备仍能工作。不间断电源被广泛地应用于计算机、通信、仪器设备、各种微电子系统及公共场所,如宾馆、办公楼等。不间断电源的需求量在迅速增加,在全世界范围内具有非常广泛的市场。

随着国民经济的高速发展,弧焊电源需求量迅速增加。近几年,国内外在高频逆变整流焊机的研制方面,取得了实质性进展,以功率 MOSFET 和 IGBT 为主开关器件的逆变焊机已占主流。由于采用高频(20kHz 以上)逆变,体积、重量有明显减小,因而便于携带,很方便地适用于各种场合,如高空作业。

通信事业的发展极大地推动了通信用电源的发展。通信用电源是一种 DC-DC 高频开关电源,包括一次电源和二次电源。一次电源是将电网市电转换成标称值为 48V 的直流电,新型的通信用一次电源,将市电直接整流,然后经过高频开关功率变换后再经过整流、滤波,最后得到 48V 的直流电源。在此类电源中,功率 MOSFET 管被大量采用,其开关工作频率广泛采用 100kHz。与传统的一次电源相比,其体积、重量大大减小,效率显著提高。二次电源是电信设备内部集成电路所需用的电源,因而要求体积小、规格齐全,有 $\pm 5V$ 、 $\pm 12V$ 等。它将一次电源(48V)经过 DC-DC 高频功率变换,获得不同规格的直流电压输出。

在军事应用中主要是雷达脉冲电源、声纳及声发射系统电源、武器系统电源、电子对抗系统电源、军用电子系统和通信系统电源、飞机变速恒频(VSCF)电源,未来的高功率激光武器中还需要提供瞬间大功率脉冲电源。

除上述外,电力电子技术在电源中的应用还包括感应加热电源,以及超声波发生器、微波炉等设备电源等。

### (2) 电源电网净化设备

电力电子装置的应用与普及,以及非线性用电设备的逐年增多,使电网波形畸变日趋严重,它的高次谐波、低功率因数等不仅影响邻近其他用电设备的工作,而且也使输电线上的损耗增加。为此,国际上已制定了与此相关的标准如 IEC555—2,它对用电装置的输入功率因数和输入电流谐波含量都作了具体限制。传统的无源滤波器由于其滤波性能较差,难以应付日益严重的电网“公害”。有源滤波器则会产生大范围动态谐波和无功功率,重新“修补”电网的波形。电力有源滤波器基本原理是产生与补偿对象相反的谐波电流及无功功率而抵消之,它本身也是一种电力电子装置。因此,有源滤波器不但可用来滤波,还可作为功率补偿器、电压稳定器及不对称负载的电压调解器。

目前,许多交流电网单相输入的中小功率电力电子设备带有功率因数校正环节,其功率因数可以达到 0.99,大功率三相交流电网输入功率因数校正技术也日趋成熟。

### (3) 电机调速系统

电力电子在交直流电机调速中的应用可归纳为两个目的:一是运动控制,为了满足自动化生产线、特殊生产工艺及因某些品质要求对电机进行调速控制;二是为节约电能对电机进

行调速控制。

运动控制的主要应用领域有：电动汽车及各种电瓶车、地铁、轻轨车，以及机车，牵引、超导磁悬浮铁道系统；石油工业中的钻井机械、管线输油、石油精炼及采油机械；轧钢工业中的可逆热轧机、热连轧机、带钢冷连轧机、可逆冷轧机、飞剪机控制、压下螺丝位置控制及活塞支持器自动控制等；港口机械中的翻车机、输送机、码头起重机、堆料机、取料机、装船机、码头管理和装卸自动化；各类起重机械及矿井提升机、机床及各种自动化生产线、高炉控制系统、调速电梯、供水系统、造纸、印染及化工工业、纺织工业、船舶推进系统等。

能量费用的增加和环保方面的原因使得节能成为需要优先考虑的问题。交流电动机的拖动负荷用电在世界各国的总用电中都占 1/2 以上，我国也不例外，交流电动机采用变频调速带来巨大的节能效益。在各行各业中，风机、水泵多用异步电动机来拖动，其用电量在我国占工业用电的 50% 以上，全部用电量的 31%。控制风量或水流量，过去是靠控制风门或节流阀的转角，而电机的转速是不变的。由于风门或节流阀转角的减小，却增大了流体的阻力，因而功率消耗变化甚小，结果造成在小风量或小水流时电能的浪费。由于全控器件的发展，采用脉宽调制技术，可以很方便地获得 VVVF（变压变频）电源，维持“ $V/F=常数$ ”供电给交流异步电动机，就可以获得与直流电机相似的良好调速特性，用电效率明显提高，使节电达到 30% 以上。我国所拥有的风机、水泵，全面采用变频调速后，每年节电将达到数百亿度电。家用空调采用变频调速技术后，可节电 30% 以上，其原理是一样的。

#### （4）电能传输和电力控制

高压直流输电（HVDC）在长距离、大容量输电时有很大的优势。需在线路两端设置整流、逆变及无功补偿装置，既可以将交流侧电能变换为直流电能输出，又可以将直流侧电能变换为交流电能输入。通过对变频器的控制实现能量的变换、传递与调度。变频器中的功率器件基本采用 SCR、GTO 和 SITH。柔性交流输电系统（Flexible AC Transmission System）的作用是利用电力电子技术和计算机技术对电力系统参数进行综合调节控制，将电力系统由机械控制转换为电子装置控制，是电力系统的一项新的技术革命。该系统可大大提高输电系统稳定性，大大提高电网输电能力，使输电功率接近电网热极限功率。

#### （5）清洁能源开发和新蓄能系统

能源危机后，各种清洁能源、可再生能源及新型发电方式越来越受到重视。其中，太阳能发电、风力发电的发展较快，燃料电池更是备受关注。太阳能发电和风力发电受环境的制约，发出的电力质量较差，常需要储能装置缓冲以改善电能质量，这就需要电力电子技术。电池蓄能和超导蓄能等新型直流蓄能系统正在迅速发展，需要采用逆变技术与电力系统联网或直接变换为负载要求的系统。潮汐、光伏发电变换都需要采用电力电子装置。

#### （6）照明及其他

全世界绝大部分国家的照明用电占据着本国总用电量 10% 以上，而目前常用的白炽灯、日光灯不是理想的光源：白炽灯发光效率低、热损耗大；日光灯必须要有扼流圈（电感）启辉，全部电流要流过扼流圈，无功电流较大，不能达到有效节能。近年来，体积小、发光效率高的“节能灯”的出现，较好地解决了这个问题，它正逐步取代传统的白炽灯和日光灯。

利用电力电子器件的开关特性，还可以构成无触点开关。电子开关具有动作响应快、损耗小、寿命长等优点。可取代继电器和接触器等有触点开关。电力电子技术的典型应用还有很多，不胜枚举。

总之，电力电子技术的应用范围十分广泛，从人类对宇宙和大自然的探索，到国民经济的各领域，再到衣食住行，到处都能感受到电力电子技术的存在和巨大魅力。随着器件与变流电路的进步，电力电子技术的应用领域也将会新的突破。

## 0.2 电力电子技术的研究内容

电力电子技术与多个学科密不可分，是一门多学科相互渗透的综合性技术学科。总体来说，电力电子技术是电力、电子、控制三大领域之间的交叉学科，随着科学技术的发展，必将与现代控制理论、材料科学、微电子技术、计算机技术、电源技术及电机工程等领域发生更加密切的关系。

作为一门学科，电力电子技术研究的内容为电力电子器件和电能变换技术，电能变换技术包含电能变换电路和控制技术两个方面，电力电子器件是电力电子技术的基础，电能变换技术是电力电子技术的核心，其中控制技术是电力电子技术发展的纽带。但在电力电子工程应用中只需了解如何合理地选择和使用电力电子器件来构成各种变流装置，而深入了解器件制造工艺及载流子运动物理过程的细节则属于另外一门课程。因此，本书要探讨的主要内容侧重于器件的基本原理、特性和参数选择，以及电力电子电路、驱动保护与控制。下面就电力电子技术的研究内容进行简单介绍。

### 0.2.1 电力电子器件

电力电子器件就是通常所说的电力半导体器件，电力电子器件是电力电子技术的基础。用作能量变换与控制的大功率半导体器件，与信息处理用的电子器件不同，一方面它必须有高电压、大电流的承受能力，另一方面它是以开关模式为运行特征的，因此通常称为电力电子开关器件。根据电力电子器件所用的半导体材料、制造工艺、工作机理及器件开通和关断的控制方式，它有许多不同的分类方式。

按照开通、关断的控制方式可分为三大类：不可控器件、半控型器件、全控型器件。根据器件体内电子和空穴两种载流子参与导电的情况，电力电子器件又可分为：双极型、单极型和混合型3种类型。按电力电子器件的驱动性质可以将器件分为：电压驱动型和电流驱动型两种器件。电流驱动型器件必须有足够大的驱动电流才能使器件导通，因而在一般情况下需要较大的驱动功率。这类全控型器件包括晶闸管 SCR、门极可关断晶闸管 GTO、电力晶体管 GTR 等。电压驱动型器件只需要有合适的电压和很小的驱动电流就能满足导通要求。因而电压驱动型器件只需很小的驱动功率。这类器件包括电力场效应晶体管 Power MOSFET、绝缘栅双极晶体管 IGBT 等。

从应用的角度选择电力电子器件一般主要考虑的是器件的额定电压、额定电流、过载能力、关断控制方式、开关速度、导通压降、驱动性能和驱动功率等因素。

### 0.2.2 电能变换技术

电能变换技术也称为变流技术，是电力电子器件应用技术，也是电力电子技术的核心，下面分别介绍电能变换技术的两个方面——电能变换电路和电能变换的控制方式。

#### 1. 电能变换电路

以电力半导体器件为核心，通过电路拓扑和控制方式来实现对电能的转换和控制，直接实现能量变换的电路称为变流电路。确定变换主电路结构的基本方法被称为电力电子电路拓扑研究和综合分析。变换器拓扑可以理解为变换器主电路所有元器件的连接关系及其性质，即主电路结构。概括地说，变换器拓扑实质上是按一定规则连接的一组半导体器件阵列，其中包括无源及有源功率器件。拓扑中器件数量可以从几个到几百个。在不同的拓扑中，不可控型、半控型及全控型功率器件可能同时存在或独立出现。为了防止开关瞬间大电流、高电压同时作用于功率器件，一般要在器件上并联吸收网络及续流二极管，以抑制尖峰电压、尖峰电流。变换器拓扑还应包括电流、电压及温度传感器。

现代电力电子工程的主要研究方向之一是寻求变换电路的拓扑优化。拓扑优化的概念可以理解为：在功率变换主回路设计中，选择网络中各器件的位置，以便互连起来尽可能经济地满足全部变换性能指标和限制条件。

由于变换器拓扑在对电压电流幅度、频率及波形转换的同时，要担负传递功率的任务，因此拓扑优化的目标可归纳为高频化、高变换效率、高功率因数及低变换损耗。高频化的主要目的，是减少滤波器尺寸、提高波形质量、减少变换器体积和重量。单纯依靠高速功率器件实现高频化，在硬性开关方式下会增加开关损耗。依靠拓扑优化研究，产生了软开关逆变技术，既达到了高频化目的，又获得了低开关损耗，提高了变换效率，降低了变换器电磁辐射。为了使变换器对电网具有较高的功率因数，传统的做法是采用无源器件滤波或功率因数补偿。但对于相控整流变换器，无功补偿设备昂贵，采用 PWM 方式的有源无功补偿或直接采用 PWM 方式的高功率因数整流则获得了非常理想的效果。上述说明：为了获得理想的功率变换装置，既要依靠半导体功率器件的发展，又要着眼于变换拓扑的优化设计，当然新拓扑设计必然伴随着新控制技术的诞生。

电能分为交流 (AC) 和直流 (DC) 两大类，应用电力电子技术构成的变流电路可分为 4 类：交流-直流变换电路 (或称 AC-DC 整流电路)、直流-交流变换电路 (或称 DC-AC 逆变电路)、交流-交流变换电路 (或称 AC-AC 交流变换电路) 和直流-直流变换电路 (或称 DC-DC 直流变换电路)。在某些变换装置中，可能同时包含以上多个或多种变换电路。

#### (1) AD-DC 整流电路

将交流电能变换成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。传统方法是采用笨重的无源滤波器，同时使用开关电容或使用可变电抗器和并联电容对其进行无功补偿。20 世纪 80 年代后期，开始采用 PWM 技术和静电感应晶闸管构成有源电网调节器 (APLC)，它同时具有滤波和无功补偿的功能。高功率因数整流器克服了相控整流的缺点，可以使电网电压和电流同相位，还能够调节电容电压以抵消电网电压波动，使输出稳定。

在直流电机调速应用中，近年来直接用自关断功率器件构成 PWM 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。

#### (2) DC-AC 逆变电路

将直流电能变换成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) 电路及无开关损耗的软开关逆变电路。

逆变器有 3 种基本类型：电压源型逆变器、电流源型逆变器、谐振型逆变器。这 3 种逆变器根据容量、工作频率可分别选用 GTO、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几十赫兹提高到几百赫兹。若采用 IGBT 或功率 MOSFET，开关频率可达几十千赫兹以上，逆变器的输出交流电压的基波频率可达到 1kHz 以上，体积将更小。

逆变装置主要被用于机车牵引、电动车辆和其他交流电机调速、不间断电源 (UPS) 系统、APLC 系统和感应加热。电压型 PWM 逆变器在工业中应用得最广泛。当电压型 PWM 逆变器用于交流电机调速时，输入侧一般用二极管阵构成整流桥获得直流电压，因而不具备再生发电能力。20 世纪 80 年代出现了电压型双 PWM 变换器，实现了能量双向流动。这种变换拓扑的优点是可使电网侧电流呈正弦波形，从而保持功率因数为 1。

作为软开关逆变器,主要有谐振直流环节(Resonate DC Link)逆变器、准谐振直流环节逆变器、谐振型逆变器、串联谐振逆变器和并联谐振逆变器。在工业上具有吸引力的是前两者。软开关逆变器的主要特点是:开关频率高,开关损耗和电磁干扰极小,开关管不需要缓冲吸收网络,低的 $du/dt$ (电压变化率)增加了电机绝缘寿命等。这些特点使大功率逆变器件有集成化的趋势,这类逆变器也已被用于UPS和APLC系统中。谐振环节的电压振荡一般可达到20kHz以上,当产生电压值为零时,开关管开通或关断。这类变换器中,由于PWM精度的进一步提高而降低了输出电流的谐波含量。

### (3) AC-AC 交流变换电路

将一种交流电压或频率变换成另一种交流电压或频率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称为交流变换电路,包括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。

交-交变频器的新发展是基于PWM变换理论的矩阵式变换器。采用9只交流开关(由具有反向阻断能力的自关断器件反向并联构成)组成一个半导体阵列。其优点是在其工作范围内总可以保持功率因数为1;困难之处是高频PWM开关的阻断能力往往不对称。矩阵式变换器构成调压器可获得幅值可调的正弦波电源,矩阵式交-交变频器可获得高达0~200Hz的调频调幅交流电源。

### (4) DC-DC 直流变换电路

将一种直流电压变换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称为直流-直流变换电路,通常用斩波方式,所以也称为斩波电路。斩波电路有调节脉冲宽度、调节频率、既调节脉冲宽度又调节频率的3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。

DC-DC直流变换电路的输入/输出电压有隔离型与非隔离型两种,通常非隔离型DC-DC斩波电路有很多种,可分为以下4类:降压斩波电路;升压斩波电路;升降压斩波电路;复合斩波电路。上述4类电路中,通常将升压斩波电路和降压斩波电路统称为基本电路,其余电路均由这两种电路演变或复合而成。从广义上说,升降压斩波电路也有不同的电路形式,比如Cuk、Sepic、Zeta斩波电路,都能够实现升降压功能。隔离型DC-DC直流变换电路按线路拓扑可分为单端电路、双端电路,通常以直流PWM方式控制。DC-DC变换器广泛地用于计算机电源、各类仪器仪表、直流电机调速及金属焊接等。

DC-DC直流变换电路大都采用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 $di/dt$ (电流变化率)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直流变换电路和DC-AC逆变电路中,若在电压过零或电流过零时进行开关切换,既可不产生开关损耗,器件承受的 $du/dt$ 及 $di/dt$ 也不会过高,还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,所以又称为谐振变换电路。谐振型开关技术是DC-DC变换的新发展。可减小变换器体积并提高可靠性,这种变换器有效地解决了开关损耗问题,也解决了电力电子器件所承受的最大电压、电流、温度等器件的应力问题。其中性能优良的是谐振直流环节交换器,在软性开关变换器中,谐振开关频率可高达10MHz级,从而可设计出结构紧凑的电源,甚至可以使电源分布在电路板上。在带有谐振环节的DC-DC变换器中,直流电流首先由谐振逆变电路变成高频交流,然后再经过高频整流和滤波得到直流。这类变换原理是DC-DC变换的主要发展方向。

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,使变换器的体积大为缩小。

## 2. 电能变换的控制方式

### (1) 电路基本控制方式

对于不同变换功能的电力变换器要采用与之相适应的控制方式。常用基本控制方式主要有以下 3 种类型。

- 相控方式：用于交流电源的电力变换器，如可控整流器、有源逆变器、交流调压器、周波变换器等。在该控制方式下，控制信号的变化结果体现为触发脉冲的移相。
- 频控方式：用于由直流电源供电的无源逆变器。在该控制方式下，控制信号的变化结果体现为控制脉冲频率的变化。
- 斩控方式：用于斩波器和采用脉宽调制 PWM 的变换器。在该控制方式下，控制信号的变化结果体现为变流器件导通时间和关断时间比值的比值。

上述均为单一控制方式，实际中也可以配合应用。例如，周波变换器为相控和频控两种控制方式的配合应用；脉宽调制逆变器为频控和斩控两种控制方式的配合应用。

### (2) 系统控制方式

为提高电力变换器的系统性能，多采用自动控制理论和技术实现有关技术要求。控制指令是通过某种调节规律（控制策略或控制算法）及调制方式而获得的。在控制电路中还应包括时序控制、各种保护电路、电气隔离、驱动功率放大，以完成输入电能对负载的接通和断开，从而实现所需的能量控制与电能形式变换。由于功率变换装置及负载通常是非线性、时变的高阶复杂系统，控制作用对变换器输出特性及运行过程起着决定性作用，因而相应的控制方式、控制策略和控制手段得到迅速发展和完善。

大部分功率变换系统对动态性能和稳态精度都有较高的要求，因而必须采用相应的控制规律或控制策略，对于线性负载通常采用比例+积分+微分的 PID 控制规律。对交流电机这样高耦合的非线性控制对象，通常首先进行解耦运算，最典型的是基于坐标变换解耦的矢量算法。然后设计一个系统控制器或多个子系统控制器。由于交流电机的参数随温度、频率等参量变化而变化，为了获得理想的系统性能，应用各种现代控制理论势在必行。目前，滑模自适应控制、变结构控制、基于神经网络和模糊数学的智能控制在功率变换技术中已获得实际应用。

无论是电路基本控制方式还是系统控制方式都需要软硬件来实现，复杂的功率变换控制系统通常采用专用大规模集成电路或微处理器。微处理器及少量外围芯片构成的控制电路，硬件成本低，可消除漂移，并具有较强抗干扰能力，其硬件可以设计成通用形式，而软件则可根据系统的要求灵活改动，具有很强的运算能力，便于运行监控及故障诊断，在复杂系统中还可方便地实现分组控制、非线性补偿及参数在线辨识。近年来，16 位、32 位微处理器及 DSP 芯片被大量地应用于电力电子的控制器中。功率变换器专用大规模集成电路的应用也很普遍，如 SPWM 信号发生器 HEF4752、SA828、SA838、SA4828 等芯片，以及大规模集成电路现场可编程器件 FPGA。这些专用大规模集成电路的应用大大地增强了控制器完成复杂控制规律的能力和系统的可靠性。

## 0.3 电力电子技术的发展及趋势

### 0.3.1 电力电子技术的发展概述

自 20 世纪 50 年代开始，电力半导体器件特性的每一个进步都引起了变换电路和控制技术的相应突破。电力电子器件的发展经历了晶闸管、双极性器件、场控器件、集成化和智能化器件等，器

件种类繁多,电压和电流定额越来越大,目前单个器件的容量为:普通整流二极管(SR)8kV/5kA、普通晶闸管(SCR)8kV/6kA、可关断晶闸管(GTO)6kV/6kA、集成门极换流晶闸管(IGCT)4.5kV/4kA、电力晶体管(GTR)1.8kV/1kA、绝缘栅极晶体管(IGBT)4.5kV/1.2kA、智能功率模块(IPM)1.8kV/1.2kA或1.2kV/2.4kA、功率场效应管(MOSFET)500V/50A以上。从目前来看,尽管某些器件被性能更好的器件代替,比如GTR几乎全部被IGBT所取代,但电力电子技术发展的初期是以电力电子器件的发展为纲的,新器件的出现导致电力电子新型电路的不断涌现,从而促进了控制技术的发展。当然,电力电子器件的发展与微电子的发展密切相关,下面给出了几种主要器件的发明时间。

电子管于1904年发明,在此之前,托马斯·爱迪生在1883年已发现“爱迪生效应”;水银(汞弧)整流器的发明时间一般认为在20世纪20—30年代,以水银(汞弧)整流器实现应用为标志,该器件是在1902年彼得库珀休伊特的发明基础上的进一步完善;晶体管于1947年发明,发明人肖克利、巴丁、布拉顿同时荣获1956年的诺贝尔物理学奖,20多年后,大功率晶体管GTR在工业上得到应用;整流二极管SR于1956年应用到电力领域;晶闸管SCR于1957年发明,并于1958年实现商业化;全控型器件中的功率场效应管MOSFET于20世纪70年代年发明;绝缘栅双极晶体管IGBT及功率集成器件PIC于20世纪80年代发明;集成门极换向晶闸管IGCT于1996年问世;宽禁带材料的新器件于20世纪80年代后期开始研究,20世纪90年代开始实验室应用,目前已在工业领域得到应用,性能优异,但价格较贵。

电力电子器件的发展促使各种优化的主电路拓扑结构相继产生,如高功率因数PWM整流器、谐振逆变器、矩阵式交-交变换器,满足了高效、高可靠变换的要求。相应地,控制方法应运而生。最初的晶闸管,其控制方法是调整器件的导通角,即控制触发信号与主电路之间的相移角,故称为相控技术。随着各种全控型电力半导体器件的问世,为减少输出波形中的谐波分量,1964年德国的A.Schonung和H.Stemmuler首次把通信工程中的脉冲宽度调制PWM理论移植应用到电力变换装置中,它具有功率因数高、可同时实现变频变压及抑制谐波等优点,使得变流电路与控制技术发生了巨大的变化,从而成为功率变换的核心技术。由于PWM技术动态响应好,可以有效地进行谐波抑制,使变流电路的性能大大提高,其应用范围涉及斩波、整流、逆变、交-交变换等各种电路,目前仍占据主导地位。另外,在功率变换的控制方式中,脉冲幅度调制PAM(Pulse Amplitude Modulation)和脉冲频率调制PFM(Pulse Frequency Modulation)也得到广泛的应用。近年来,谐振式软开关变换器控制技术的发展非常迅速,已经成为研究热点之一。

由上可知,电力电子技术在器件、电路与控制诸方面的发展并不是一蹴而就的,很难用具体的时间来严格区分其发展历程的每一个阶段,如果仅以电力电子器件的发展为主线,可以把它分为3个主要发展阶段,即晶闸管及其应用、自关断器件及其应用、功率集成电路和智能功率器件及其应用。

### 1. 晶闸管及其应用

20世纪50年代初,普通的整流器SR开始使用,实际已经开始取代汞弧整流器。但电力电子技术真正始于1957—1958年第一个反向阻断型可控硅SCR(Silicon Controlled Rectifier)的诞生,后称晶闸管(Thyristor)。一方面由于其功率变换能力的突破,另一方面实现了弱电对以晶闸管为核心的强电变换电路的控制,使电子技术步入了大功率领域,在工业上引起了一场技术革命,具有提高效率、缩小体积、减轻重量、延长寿命、消除噪声、便于维修等优点。由于器件以开关方式运行及其控制方法的特殊性,进而形成了电力电子技术学科。在随后的20年内,随着晶闸管特性的不断改进及功率等级的提高,晶闸管已经形成了从低压小电流到高压大电流的系列产品。同时还研制出一系列晶闸管的派生器件,如不对称晶闸管ASCR(Asymmetrical Thyristor)、逆导晶闸管RCT(Reverse Conducting Thyristor)、双向晶闸管TRIAC(TRI-Electrode AC Switch,也称为三极交流开

关)、门极辅助关断晶闸管 GATT ( Gate-assisted Turn off Thyristor )、光控晶闸管 LASCR ( Light-activated Silicon Controlled Rectifier ) 等器件,大大地推进了各种电力变换器在冶金、运输、化工、机车牵引、矿山、电力等行业的应用,促进了工业的技术进步,开创了传统的“晶闸管及其应用”的电力电子技术发展的第一阶段,即以低频技术处理问题为主的传统电力电子技术阶段。相应地,电力二极管、晶闸管及其派生器件也称为第一代电力电子器件。

在此阶段的典型应用之一是大功率整流器。大功率的工业用电是靠工频交流发电机提供的,但是大约 20% 的电能是以直流形式消耗的,其中最典型的是电解(铜、铝、镍等有色金属和氯碱等化工原料都离不开大功率直流电解)、牵引(电力机车、电传动的内燃机车、地铁机车、城市无轨电车等)和直传动(轧钢、造纸、铝材轧制等)三大领域。因此,高效地把工频交流电转换为直流电的大功率整流器应运而生。

## 2. 自关断器件及其应用

20 世纪 70 年代出现了世界范围内的“能源危机”,“节能”成为那个年代最流行的名词之一,各国政府也大力倡导开发节能设备,交流电机变频调速具有显著节能效果,得到了快速的发展。其中,关键的技术在于“交-直-交”变换中的“直-交”变换,即把直流电逆变为 0 ~ 100Hz 左右的交流电。于是,20 世纪 70 - 80 年代,能胜任这种情况的各种全控型的器件先后问世,比如可关断晶闸管 GTO ( Gate-turn-off Thyristor )、大功率(巨型)晶体管 GTR ( Giant Transistor )、功率场效应晶体管 Power MOSFET ( Metal-Oxide Semiconductor )、绝缘栅双极晶体管 IGBT ( Insulated Gate Bipolar Transistor ) 等。变流装置中的普通晶闸管逐渐被这些新型器件取代,新的结构紧凑的变流电路随之出现,它具有控制灵活、动态特性好、效率高等优点。这一代器件的发展不仅为交流电机调速提供了较高的频率,使其性能更加完善可靠,而且初步开辟了使功率电子技术向高频化进军的道路,也使电力电子技术的应用范围迅速扩张,如开关电源等。一般将这类具有自关断能力的器件称为第二代电力电子器件。

## 3. 功率集成电路和智能功率器件及其应用

20 世纪 80 年代,大规模、超大规模集成电路 ( VLSI ) 得到突飞猛进的发展,这对功率半导体器件提供了很好的借鉴,即把其成熟的微细加工技术和高电压大电流设计制造方法有机地结合起来,促使 20 世纪 80 年代和 20 世纪 90 年代初期诞生了功率集成电路(也称 PIC, Power IC) 和智能功率模块 IPM ( Intelligent Power Model )。这些器件实现了功率器件与控制电路的总体集成,它使微电子技术 with 电力电子技术相辅相成,把信息科学融入功率变换。某些器件实现了多功能化,不但具有开关功能,还增加了保护、检测、驱动等功能,有的器件还具有放大、调制、振荡及逻辑运算的功能,使强电与弱电达到了完美的结合,应用电路结构大为简化,电力电子的应用范围进一步拓宽。功率集成电路又分为高压集成电路 HVIC 和智能功率集成电路 SPIC ( Smart Power IC ), 而 IPM 则是 IGBT 的智能化模块。目前, PIC 和 IPM 器件的发展非常迅速,电力电子装置的集成化程度进一步加强——高效、节能、节材,随着控制理论与功能强大的微处理器的应用,为实现电力电子装置小型轻量化、智能化提供了重要的技术基础。功率集成电路和智能功率器件也称为第三代电力电子器件。

目前,电力电子器件对电力电子技术的发展还起着关键作用,但电力电子技术内涵更为丰富,其应用领域日益广泛,推动了高新技术的发展,它为机电一体化设备、清洁能源技术、节能技术、超导和激光技术、空间与海洋技术、军事技术、生物技术、材料技术、机械加工技术和交通运输技术提供了高性能、高效率、轻量小型的电控设备,成为发展高新技术的基础之一。由于性能优良的电力半导体开关器件、性能大为改善的磁性和绝缘材料、计算机、大规模集成电路技术、频率高达兆赫级的电能处理方法、新型电路拓扑结构及分析方法等领域新技术的不断突破,使得今天的电力电子技术具有全新面貌。

### 0.3.2 电力电子技术的发展趋势

随着微电子技术、计算机技术的发展。电力电子的计算机仿真及计算机辅助设计技术的发展也非常迅速，相应地，多种多样的专业软件成功地应用于电力电子系统中电路参数、结构、控制策略的优化确定。高速的微处理器在电力电子系统中的应用使复杂的控制和检测策略得以实现，使变换装置的效率和性能进一步提高。现代电力电子技术的发展方向概括为以下几个方面。

#### 1. 新器件

电力电子器件正朝着大容量、低损耗、高频、易驱动和智能化方向发展。新器件的发展包括两个方面：一方面，已有的器件性能进一步优化。例如，IGBT 电压、电流容量的进一步提高、GTO 快速性能的改进、功率集成电路集成度更高等，预示着普通晶闸管和电力晶体管的应用范围将被迫缩小，电力电子技术即将进入智能化的时代。另一方面，新器件突破了以硅作为基础材料的限制。近年来新型半导体材料的研究正在不断地取得突破，碳化硅（SiC）、砷化镓（GaAs）和金刚石（C）薄片等材料用于电力电子器件正显示出明显的优势，它预示着新一代器件即将出现。新器件类似于 MOSFET，但有高得多的功率和开关频率、低导通压降、耐高温等优良性能。其中，令人瞩目的材料是碳化硅和金刚石，有关资料表明，与硅器件相比，金刚石 Power MOSFET 器件的功率可提高到  $10^6$  数量级，频率提高 50 倍。导通压降低一个数量级，最高结温可达 600 。新材料的出现有取代传统硅材料的趋势。

#### 2. 高频化与高效率

理论分析和实践经验表明，电气产品的体积和重量随供电频率的平方根成反比地减小。所以把频率从工频 50Hz 提高到 20kHz 时，用电设备的体积大体上降至工频设计的 5% ~ 10%。这正是开关电源新技术得以实现功率变频而带来明显效益的基本原因。无论是逆变或整流焊机还是通信电源用的开关式整流器，都基于这一原理。据此，对传统“整流行业”的电镀、电解、电加工、充电、浮充电、电力合闸等各种直流电源类整机加以类似的改造，使之得以更新换代为“开关变换类”电源，其主要材料可以节约 90% 以上，还可节电 30% 以上。由于电力电子器件工作上限频率的逐步提高，促使许多原来采用电子管的传统高频设备固态化，带来显著的节能、节水、节约材料的经济效益，从而更可体现出技术含量的价值。当然，实现高频化的前提是变换器及其器件要有较高效率，或者说，变换器有了较高的变换效率，高频化才有意义，变换器才能小型化。高效率主要体现在器件和变换技术两个方面，一是要求电力电子器件的导通损耗与开关损耗低；二是要求变换器处于合理的运行状态，提高运行效率。例如，变换器中采用的软开关技术可使运行效率提高。随着器件的高频化、控制电路的高度集成化和数字化，使得滤波电路和控制器的体积大为减小，为各种领域的应用提供了方便。

#### 3. 集成化与模块化

集成化提高了器件的容量，减小了装置的体积，方便了整机设计和制造。为了进一步提高系统的可靠性，有些制造商开发了“用户专用”功率模块（ASPM）。它把一台整机的绝大多数硬件都以芯片的形式安装到一个模块中，使元器件之间不再有传统的引线连接，这样的模块经过严格、合理的热、电、机械方面的设计，达到优化完美的境地。它类似于微电子中的用户专用集成电路（ASIC）。只要把控制软件写入该模块的微处理器芯片，再把整个模块固定在相应的型材散热器上，就构成了一台新型的装置。由此可知，模块化的目的不仅在于使用方便、缩小整机体积，更重要的是取消传统连线，把寄生参数降到最小，从而把器件承受的电应力降至最低，提高了系统的可靠性。另外，大功率电源可采用并联均流技术以增加容量冗余，提高可靠性。例如，大功率电源采用多个独立的模块单元并联工作时，所有模块共同分担负载电流，一旦其中某个模块失效，其他模块再平均分担

负载电流。这样,不但提高了功率容量,在有限的器件容量的情况下满足了大电流输出的要求,而且通过增加相对整个系统来说功率很小的冗余电源模块,能够提高系统可靠性。万一出现单模块故障,也不会影响系统的正常工作,而且为修复提供了充分的时间。

#### 4. 数字化

在传统电力电子技术中,控制部分是按模拟信号来设计和工作的。在 20 世纪 60—70 年代,电力电子技术完全是建立在模拟电路基础上的。如今数字式信号、数字电路显得越来越重要,数字信号处理技术日臻完善和成熟,显示出越来越多的优点。数字信号便于计算机处理与控制,可避免模拟信号的传递畸变失真,可减小杂散信号的干扰(提高抗干扰能力),便于软件调试和遥感遥测遥控,也便于自诊断、容错等技术的植入。

#### 5. 绿色化

绿色化意为没有污染,有两层意义:首先是显著节电,这意味着发电容量的节约,而发电是造成环境污染的重要原因,所以节电就可以减少对环境的污染;其次是低谐波、高功率因数,对电网产生污染少,国际电工委员会(IEC)对此制定了一系列标准,如 IEC 555、IEC 917、IEC 1000 等。事实上,许多功率电子节电设备,往往会变成对电网的污染源,向电网注入严重的高次谐波电流,产生基波位移无功,特别是谐波的畸变无功,使总功率因数下降,使电网电压耦合许多毛刺尖峰,甚至出现缺角和畸变。现代电力电子技术中广泛采用脉宽调制 PWM(Pulse Width Modulation)技术,正弦波脉宽调制 SPWM 和消除特定次谐波技术,使得变换器的谐波大为降低。提高功率因数的变换技术和专用集成电路的产生,使得变换器的功率因数得到提高。20 世纪末,各种有源滤波器和有源补偿方案的诞生,有了多种修正功率因素的方法。这些为 21 世纪批量生产各种绿色开关电源产品奠定了基础。

电力电子技术的发展从以低频技术处理问题为主的传统电力电子技术向以高频技术处理问题为主的现代电力电子技术方向发展。利用 20 世纪 50 年代发展起来的晶闸管及其派生器件为基础所形成的电力电子技术,可称为传统电力电子技术。这一发展时期,电力电子器件以半控型晶闸管为主,变流电路一般为相控型,控制技术多采用模拟控制方式。由半控型器件组成的电力电子装置或系统,在消除电网侧的电流谐波、改善电网侧的功率因数、控制逆变器输出波形、减少环境噪声污染、进一步提高电能的利用率、降低原材料消耗以及提高系统的动态性能等方面都遇到了困难。

20 世纪 80 年代以后,以 IGBT、MOSFET 为代表的高频器件得到迅速发展与应用,改变了人们长期以来用低频技术处理电力电子技术问题的习惯,电力电子技术进入现代电力电子技术时代。这一时期,电力电子器件以全控型器件为主,变流电路采用脉宽调制型,控制技术采用 PWM 数字控制技术。目前,电力电子技术作为节能、环保、自动化、智能化、机电一体化的基础,正朝着应用技术高频化、硬件结构模块化、产品性能绿色化的方向发展。

## 0.4 本书的内容简介

本书是电气工程及其自动化等电气信息类专业的一门专业基础课程,分为电力电子器件、电能变换技术、电力电子技术应用三大部分。根据目前电力电子技术的发展情况和电气工程及其自动化专业等电气信息类专业后续课程的需要,本书将全控型器件、电能变换技术(包括电路及其控制)作为主体。

本书主要内容包括:电力电子器件、电力电子器件的驱动与保护、直流-直流变换技术、直流-交流变换技术、交流-直流变换技术、交流-交流变换技术、软开关技术、电力电子技术在清洁能源

系统中的应用等。本书注重内容的完整性和科学分类，突出重点，强调实际应用，避免各种电力电子线路的机械罗列，使各部分内容有机地结合起来。本书循序渐进、深入浅出地阐明电力电子技术的基本原理和理论，以形成适应专业特点的课程体系。

本教材的课内教学学时建议为 40 ~ 64 学时，不同高校可根据实际情况自行调整教学内容。通过本课程的学习应达到以下要求：

掌握不同器件的外部特性、极限参数及保护；

掌握常用电力电子器件的驱动电路、保护电路与串并联方法；

掌握直流-直流变换的工作原理、主要物理量的分析计算与 PWM 控制技术的基本概念；

掌握直流-交流变换的工作原理、主要物理量的分析计算与 PWM 控制技术的控制方法；

掌握交流-直流变换相控整流电路和 PWM 整流电路的工作原理与分析计算，了解相控整流晶闸管触发电路的定相；

了解交流-交流变换电路组成与工作原理；

掌握常用电力电子器件组成的电路分析方法和控制方法，初步具有对电力电子电路故障分析与处理的能力；

基本掌握软开关技术及几种软开关换流器；

了解电力电子技术在清洁能源系统中的应用。

电力电子器件、变流技术都在不断发展与不断更新，所涉及的知识面广、内容丰富多彩。本课程的学习中还应注意与电路、电子技术基础、电机及拖动基础等知识的联系，在讲授和学习中，要着眼于物理概念与对不同问题的分析方法，重视实验、识图等应用能力的培养。

## 思考题与习题

0-1. 什么是电力电子技术？

0-2. 电力电子技术的基础与核心分别是什么？

0-3. 请列举电力电子技术的 3 个主要应用领域。

0-4. 电能变换电路有哪几种形式？其常用基本控制方式有哪 3 种类型？

0-5. 从发展过程看，电力电子器件可分为哪几个阶段？简述各阶段的主要标志。

0-6. 传统电力电子技术与现代电力电子技术各自的特征是什么？

0-7. 电力电子技术的发展方向是什么？