

第1章 绪 论

电力电子与微电子的本质区别在于所涉及的电磁功率等级不同。本书所涉及的电力电子系统意指功率等级在几十千瓦、几百千瓦乃至几十兆瓦以上,电压等级在百伏、千伏乃至几十万伏以上,电流容量在几十安、几百安乃至上万安以上,面向不同应用领域的电力电子变换装置和系统。

电力电子装置和系统相关产业是一个涉及三个层面的产业链:电力电子元器件(上游)、元器件构成的电力电子装置(中游)及以装置为基础的应用系统(下游)。该产业覆盖了几乎所有关系国民经济发展和国防安全的关键技术领域,如材料、制造业、信息和通信、航空和运输、能源和环境等。

电力电子系统即为多学科交叉系统,电气部分主要包括功率半导体器件、功率变换电路以及对器件与电路的控制,表现出弱电控制强电、软件控制硬件、部件融于系统、信息能量互动的系统特点。早在1973年,国际电力电子先驱、美国西屋公司的 William E. Newell 博士就指出电力电子的多学科性质:“电力电子技术是电气工程的三个主要学科——电子学、电力和控制的交叉”。因此,电力电子系统的本质就是器件、电路及其控制的相互交叉作用以实现对电磁能量的有效变换。

为得到所期望的变换特性,电力电子系统中一般采用类似脉宽调制的方法以得到所需的电力特性,这种以脉冲调制方法输出的电磁能量表现为能量脉冲及其序列形式。电磁能量脉冲序列是电力电子系统中的基本形式,也是电力电子系统电磁瞬态过程的特殊表现形式。该瞬态过程的时间常数通常在微秒或纳秒之间,这种短时间尺度的电磁瞬态过程对于电力电子系统的可靠有效运行起着决定性作用:一方面它是电量波形变换的基础;另一方面,若控制不好,它将直接导致器件失效和装置损坏。因此,短时间尺度的电磁瞬态过程是电力电子系统中的核心问题之一。

1.1 电力电子系统解析

电力电子系统由多方面要素构成。要分析电力电子系统的电磁瞬态过程,首先需要分别对其构成要素(如功率半导体器件、主电路及控制等)进行解析,解析的目的是了解各要素的结构、特性以及在系统中的作用和限制。

1.1.1 功率半导体器件

功率半导体器件作为电力电子系统的基础,自从 20 世纪 50 年代世界上第一只晶闸管(thyristor,也称为 silicon controlled rectifier,SCR)问世以来,到 70 年代的金属-氧化物-半导体场效应管(metal oxide semiconductor field effect transistor,MOSFET)的发展,80 年代的绝缘栅极晶体管(insulated gate bipolar transistor,IGBT)的诞生,90 年代的集成门极换流晶闸管(integrated gate commutated thyristor,IGCT)的应用,直至 21 世纪初以来碳化硅(silicon carbide, SiC)宽禁带器件的兴起,经历了不控与半控器件、电流型全控器件、电压型全控器件、混合集成功率模块和宽禁带器件等不同阶段,大功率、高电压和高频率一直是功率半导体器件发展中所追求的目标。继晶闸管(SCR)和门极可关断晶闸管(gate turn-off thyristor,GTO)之后,绝缘栅双极晶体管(IGBT)成为功率半导体器件的主要发展平台。减小通态压降,提高工作频率,实现二者的最佳折中,是 IGBT 向高频大功率化发展的基本追求。采用做在单晶片上的非穿通(non-punching through,NPT)结构取代做在外延片上的穿通(punching through,PT)结构,是 IGBT 大功率化的关键改进措施。封装在一个管壳里的“多串多并”结构是 IGBT 走向大功率化的必经之路。大功率 IGBT 已经成为在高电压和大功率应用领域中强有力的竞争者,并仍继续在高频化、大功率化和易于驱动等特性方面进一步提升。

宽禁带材料以及基于宽禁带材料的半导体开关器件已成为热点。基于碳化硅等宽禁带半导体材料的新型开关器件(如 SiC Schottky 二极管、SiC JFET 以及 SiC MOSFET 等)正在快速发展,并走上应用。相比硅基材料,宽禁带材料具有工作极限温度高、击穿场强大、导热性好等优点,理论上有着很大应用潜力,宽禁带器件有希望实现比现有硅基器件更优良的特性,在一定程度上提升电力电子变换装置和系统的能力。

单个功率半导体器件在电力电子系统中起到一个类似于电气开关的作用,俗称为“功率开关器件”,也是电磁能量脉冲的产生之源。但是其通态和阻态特性与通常导体和绝缘体有很大差别。正是这种差别,才形成了电力电子系统中独有的开关型电磁能量脉冲特性。形成该差别的主要原因是功率半导体中的 PN 结及多 PN 结特性所致。PN 结在整个功率半导体器件特性中占有重要地位。从电力电子装置研制和应用者的角度来看,掌握 PN 结特性以及多 PN 结之间的关系特性是非常重要的。下面回顾功率半导体器件的几个主要特性。

1. 单 PN 结的通态和阻态特性

众所周知,本征半导体内部在一定温度下激发出自由电子,同时在价电子原来的位置上留下相应数量的带正电的“空穴”,空穴的出现是半导体区别于常规导体

(以自由电子为载流子)的一个显著特点。本征半导体中的自由电子和空穴构成半导体内载流子总量,且这些载流子浓度随温度的变化而有明显变化,所以功率半导体器件的导电特性随温度变化而显著变化,这是功率半导体器件导电的一个重要特性。

另一方面,用适当的方法(如合金法、扩散法、外延生长法、离子注入法等)在本征半导体内掺入微量杂质,也会使半导体的导电能力发生显著变化。因掺入杂质化合价的不同,杂质半导体分为电子型(N型)半导体和空穴型(P型)半导体两类。在N型和P型半导体的交界处出现了电子和空穴的浓度差别,存在着浓度梯度,载流子在无规则的热运动中将由高浓度区向低浓度区扩散。因此,一些电子会从N区向P区扩散,也会有一些空穴从P区向N区扩散。即因载流子在半导体内分布不均匀而产生了扩散运动,由此形成的电流称为扩散电流。显然,扩散电流不满足欧姆定律。扩散运动在PN交界面两侧产生不移动的正、负空间电荷,形成了由N区指向P区的电场,称为内建电场,如图1.1所示。这个内电场的方向是阻止扩散运动的。同时又有电子逆电场方向漂移回N区,而空穴沿电场方向漂移回P区,漂移运动的方向正好与扩散运动的方向相反。载流子在电场的作用下规则的称为漂移运动,所形成的电流称为漂移电流。可认为漂移电流满足欧姆定律。

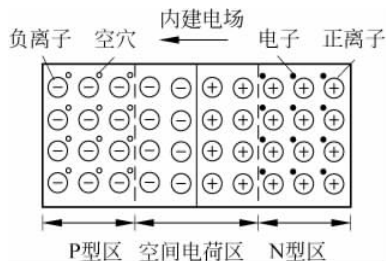


图 1.1 PN 结示意图

正是由于半导体内部PN交界面上的扩散电流和漂移电流构成了半导体器件导电的主要特征。

半导体内部的扩散运动和漂移运动相互独立又相互联系。在一定温度下,当两者达到动态平衡时,正、负空间电荷量达到稳定值,总量不再变化,形成了一个稳定的由空间电荷构成的区域,称为空间电荷区。在整个空间电荷区域内,正、负电荷数量相等,仍保持电中性,这就是PN结。

PN结的主要特征为单向导电性,这一特征在平衡状态时表现不出来,只有在外加电压时才显示出来。当PN结外加正向电压 U_D ,即 U_D 的正端接P区,负端接N区时,外加电场与PN结内电场方向相反,则称PN结为正偏置;当PN结外加反向电压 U_D ,即 U_D 的正端接N区,负端接P区时,外加电场与PN结内电场方向一致,称PN结为反偏置。正偏置与反偏置的PN结结构图如图1.2所示。

当PN结处于正偏置时,在外加电场作用下,扩散运动大于漂移运动。由于中和的结果使空间电荷量减少,PN结变窄,这种现象称为少子注入。在外电路上形成一个流入P区的电流,称为正向电流 I 。当外加电压 U_D 升高时,PN结内电场

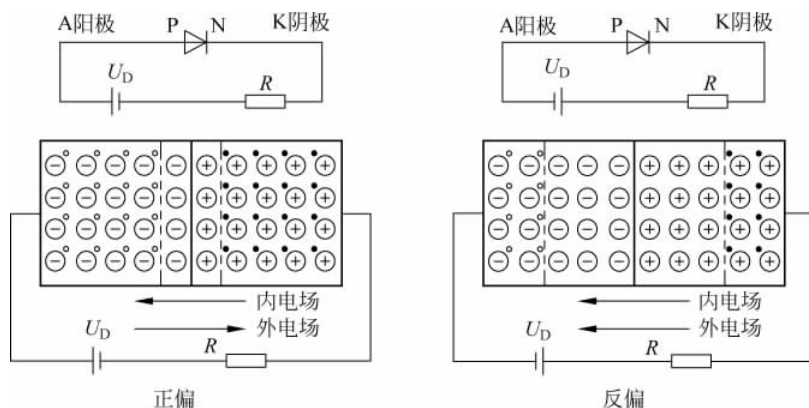


图 1.2 PN 结的正偏置和反偏置

被进一步削弱,正向电流随之增加。正向的 PN 结呈现一个很小的压降,可以流过较大的正向电流,称为正向导通。

当 PN 结处于反偏置时,外加电场阻止扩散运动的进行,少数载流子更容易产生漂移运动。载流子将进一步离开 PN 结,使 PN 结变宽,这种现象称为少子抽出。反偏的 PN 结呈现很大的耐压能力,几乎没有电流流过,称为反向截止。功率半导体器件的承压特性就是由该反向偏置特性所决定。

2. 多 PN 结的相互作用特性

大部分功率半导体器件内部往往并不只有一个 PN 结,而是由多个 PN 结构成,如双极型功率晶体管(bipolar junction transistor, BJT)内部为两个 PN 结, GTO 内部为三个 PN 结。器件内部各 PN 结相互之间的作用,以及 PN 结与器件外围电路的共同作用,决定了该功率半导体器件的特性。以 IGBT 为例,它是由 MOSFET 和 BJT 混合而成,构成电压控制型的三层半导体(PNP)和两个主 PN 结的全控型功率半导体器件,其结构示意图如图 1.3 所示。

这种三层两结的结构,并不是单纯由电路连接形成,而是通过较复杂的工艺制作过程形成。简单说来,图中下层 P 区称为 BJT 的发射区,其作用是向基区注入载流子;中间基区是一个具有掺杂浓度低的 N^- 区和掺杂浓度高的 N^+ 区的混合层,它的任务是传送和控制载流子;集电区则是收集载流子的 P 型半导体层。不同类型半导体区的交界处则形成 PN 结,发射区与基区交界处的 PN 结称为发射结(J_1),集电区与基区交界处的 PN 结称为集电结(J_2)。

当 IGBT 器件栅极与发射极间施加足够的正向电压,且集电极-发射极处于正偏状态时,IGBT 进入开通状态。此时晶体管发射结 J_1 正偏,集电结 J_2 反偏。由于栅极电压的影响,发射区 P 区靠近栅极的部分形成反型层导电沟道,电子可从发射极下的 N^+ 区经沟道流向基区,由于集电结 J_2 反偏,一部分基区电子最终扩散

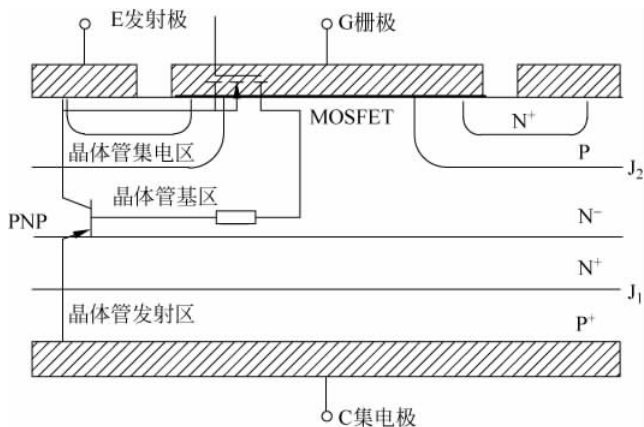


图 1.3 IGBT 多 PN 结功率半导体器件的结构示意图

至集电区。由于存在从发射区流向基区的电子,由集电区向基区扩散的空穴一部分与基区的电子复合,一部分受发射结 J_1 自建电场的作用漂移至发射区,形成从集电极到发射极的电流。这些大量通过发射结 J_1 的空穴起到了减小其空间电荷区的作用,即 IGBT 导通。而当 IGBT 器件栅极与发射极间施加的电压低于阈值电压时,反型层导电沟道不能继续维持,发射区不再向基区提供电子,集电结与发射结之间的相互影响大大减弱。由于处于反偏置的 PN 结没有外来载流子通过其空间电荷区,IGBT 则处于阻断状态。

可见,仅有单个 PN 结的功率半导体器件(如功率二极管)的开通和关断状态,完全由外加电压的正偏置或反偏置状态所决定;而具有多 PN 结的功率半导体器件(如 IGBT 等)的开通和关断状态,则是由其内部 PN 结之间状态的关系所决定。可以通过器件控制端的状态变化来改变各 PN 结之间状态的关系,也就是说,可以进行可控开通或关断。这是解析电力电子变换器的基础,即具有多 PN 结的功率开关器件是一个具有可控开关特性的器件。由于其开通和关断都需要一个针对 PN 结“空间电荷区”宽度改变的过程,所以其开关特性一般分为开通、关断、通态和阻态四个状态特性,前两个特性称为瞬态特性,后两个特性称为稳态特性。一般将不考虑开通和关断瞬态过程、不考虑通态压降和阻态漏电流的功率半导体器件,视其为理想开关器件;而为强化变换电路中功率半导体器件的开关作用,后面论述中将功率半导体器件称为功率开关器件。

1.1.2 功率变换电路

将功率开关器件及其他相关功率元件以一种适当的方式连接起来,以实现电量(包括电压、电流、频率、波形等)的有效变换,这种连接方式就称为功率变换电

路,通称为“拓扑结构”。功率变换电路是电力电子系统运行的条件。以往谈到的电力电子系统中的拓扑结构,主要指的是实施电量变换(波形变换和参数变换)电路中理想开关器件和具有集总参数的无源元件之间的连接关系。从 20 世纪 20 年代就提出了整流电路,到 60 年代出现了直流到直流(DC-DC)变换电路,70 年代的逆变电路,直至今天的各种混合式变换拓扑结构,拓扑结构一直在朝着提升输变电能力(耐压高、通流大、谐波小、效率高等)方向发展。用于高压大容量的典型主电路拓扑结构有:二极管中点箝位式多电平结构(neutral point clamped, NPC),电容跨接式多电平结构(flying-capacitor),H 桥级联式多电平结构(cascaded H-bridge),以及模块化多电平结构(module multilevel converter, MMC)等。图 1.4 所示即为这些典型拓扑结构原理电路图。

这些拓扑结构具有一些共同特点:①主电路中的每个功率开关器件承受一部分直流母线电压(阻态时),可以采用较低耐压的器件组合来承受高压大功率的输入输出,且无需动态均压电路;②由于输出电平数的增加,改善了输出电压波形;③可用较低的开关频率获得与高开关频率下两电平变换器相同的输出基波电压波形,因而开关损耗较小,效率较高;④由于电平数的增加,在相同的直流母线电压条件下,变换器输出电压突变的台阶减小,使 du/dt 应力大大减小,有效防止器件击穿,同时改善了装置的电磁兼容特性。

很显然,这样的功率变换电路特性主要基于理想开关器件特性和集总元件参数来描述,并没有反映实际功率变换电路中非理想开关器件的瞬态特性,以及由于这些瞬态特性产生的各元器件和连接线上的分布杂散参数效应。因此,在实际应用中,采用这些理想拓扑结构得到的电力电子变换系统设计、分析和控制效果都受到很大的限制,以至于电力电子装置的变换能力和可靠性都受到制约,这些问题在大容量电力电子系统中尤显突出。

1.1.3 脉冲控制

脉冲控制是电力电子系统可控运行的关键。针对电力电子装置与系统的脉冲控制主要体现在对功率开关器件的开关控制上。为有效控制输出电压、电流、频率以及波形,通常采用脉冲调制(如脉宽调制或脉幅调制等)控制技术,利用功率开关器件的可控开通和关断把连续变化的输入电量变成离散序列的输出脉冲电量,通过控制脉冲宽度、幅度或周期来达到变压、变流或变频的目的。

脉冲控制是电力电子控制系统的特点之一。实施脉冲控制包括两个方面:一是硬件部分,主要指的是信号处理芯片。从 20 世纪 50 年代的模拟电路,到 70 年代的单板机,80 年代的单片机,90 年代的数字信号处理器(digital signal processor, DSP),再到 21 世纪以来的多核高性能数字信号处理器,运算速度、计算精度、存储能力都得到了很大的提高。二是软件部分,主要指脉冲控制算法,包

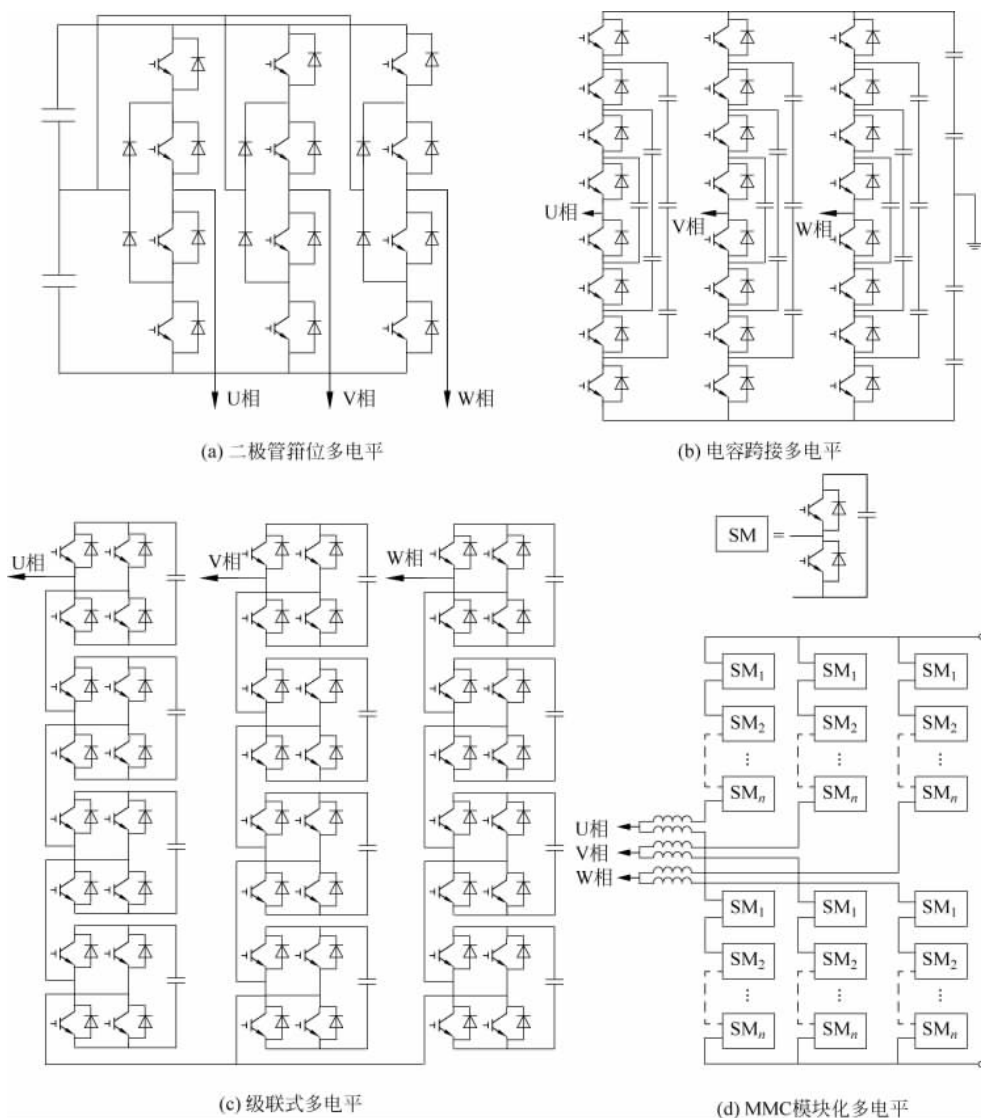


图 1.4 适用于高压大容量电力电子装置的典型拓扑结构电路图

括脉冲调制方法和系统控制方法。

脉冲调制方法很多,经历了波形比较、滞环比较、空间矢量、特定消谐、单周期控制等方法的发展,已经形成了众多的系列脉冲调制方法。针对大容量电力电子装置与系统,主要采用多电平载波脉宽调制(multi-level sinusoidal pulse width modulation, MSPWM)、空间矢量脉宽调制(space vector pulse width modulation,

SVPWM)以及它们的各种变异方法。图 1.5 为典型的五电平 SPWM 和三电平 SVPWM 示意图。再加上目标闭环控制算法,进一步修正 PWM,从而形成多种闭环 PWM 控制方法,如电力传动中的矢量闭环控制(vector control,VC)和直接转矩闭环控制(direct torque control,DTC)等。

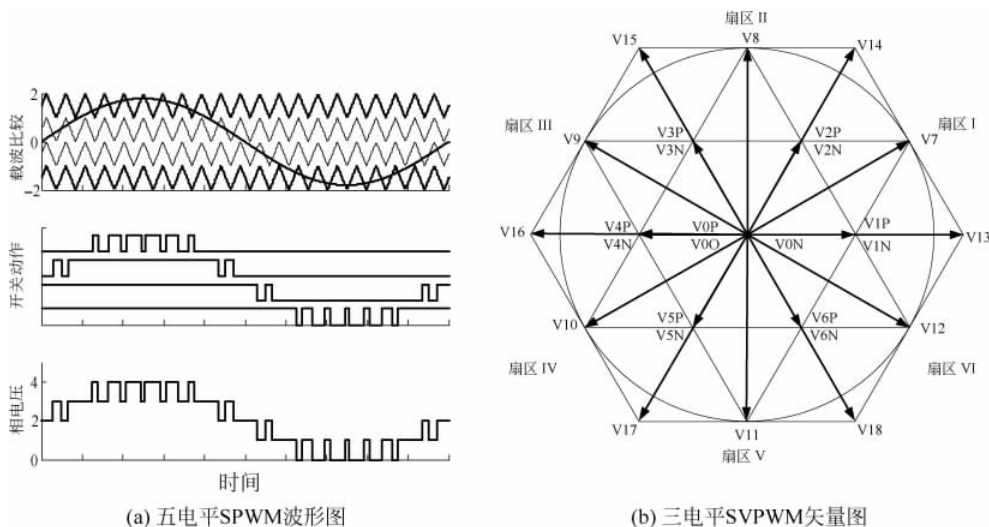


图 1.5 典型的五电平 SPWM 和三电平 SVPWM 示意图

控制软硬件的不断发展大大促进了电力电子装置与系统的发展。针对大容量电力电子装置与系统的应用,采用参数控制与目标控制相结合(内外环控制相结合)、双核芯片与现场可编程门阵列(field-programmable gate array, FPGA)相结合、信号控制与功率直接控制相结合是它的发展趋势。

然而,以往的脉冲控制主要基于理想开关和线性电路的特性。非理想开关和非线性电路给控制带来的问题是信号传输延迟和脉冲波形畸变。从控制芯片测出的信号脉冲、驱动电路测出的驱动脉冲以及开关器件上测出的电压(或电流)脉冲(也称为能量脉冲),实验测试比较图如图 1.6 所示(上为信号脉冲,中为驱动脉冲,

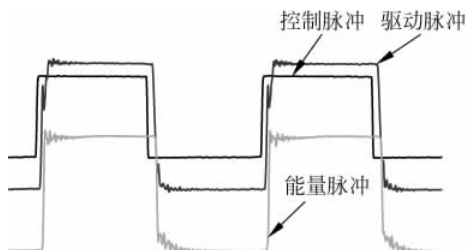


图 1.6 信号脉冲、驱动脉冲和能量脉冲的实验比较

下为能量脉冲)。由图 1.6 可见,基于信号调制理论进行的脉冲控制在实际装置控制中存在延迟和畸变,特别在实际的功率开关器件开通和关断瞬态过程中存在控制盲区(即开通和关断过程不可控),使得理想控制功能难以实现,同时可能产生一些异常脉冲,轻者影响波形,严重时可能损坏器件和装置。

1.2 电力电子系统综合

电力电子系统中的各要素特性不尽相同,但是从整个系统的角度来看,正因为它们在系统中的有机结合,从而形成了系统的有机统一,呈现出系统综合特性。系统综合的目的则是了解各要素之间的相互关系,从系统整体上把握变换系统电磁瞬态特性。概括来说,电力电子系统具有硬件与软件的统一性、能量与信息的互动性、线性与非线性的转换性、离散与连续的混杂性以及多时间尺度的协调性等综合特性。

1.2.1 硬件与软件的统一性

典型的电力电子系统结构如图 1.7 所示,其主要硬件部分包括:①由功率二极管器件(也可以是全控型功率开关器件)构成的整流环节,它将交流电整流成直流电;②由电容和连接件构成的直流母线环节,它将过滤掉直流电上的纹波,同时更好地保持直流电源的性质;③由全控型功率开关器件构成的逆变环节,它将直流电逆变成所需要的交流电;④由传感器、控制芯片、通信连线和驱动电路构成的系统控制环节,它们作为整个信息系统的物质载体和信息流的通道。

硬件系统的主要要素包括各元器件(功率开关器件、无源器件、信号处理器件等)及各元器件的连接。从理想硬件特性来看,功率开关器件相当于理想开关,即开通与关断之间没有时间间隔,当然也不考虑开关瞬态过程,仅考虑开通时的通流能力和关断时的承压能力(如额定电流和额定电压);无源器件主要指的是电感、电容等,可以看成为可变的理想电源(理想电流源和电压源),即不考虑器件损耗和分布杂散参数,只考虑其集总参数值;信号处理器件则只考虑信号处理能力,不考虑信号的延迟和畸变。元器件的连接包括连接件材料、接头以及连接方式(拓扑结构),在理想情况下,不考虑连接件的材料特性和接头上的分布杂散参数,只考虑其连接拓扑特性。这些要素构成了典型变换器理想硬件系统。

软件系统主要要素包括信号采样、I/O 通信、信号处理、系统控制、保护、系统功能管理等,它们体现在各信号处理器里面的程序代码上或者模拟信号电路中。理想条件下,不考虑软件系统的时延和畸变。

电力电子系统中的硬软件系统缺一不可:硬件系统在软件的作用下可控运行,软件系统通过硬件系统体现功能作用。在硬软件均为理想条件下,理想器件和

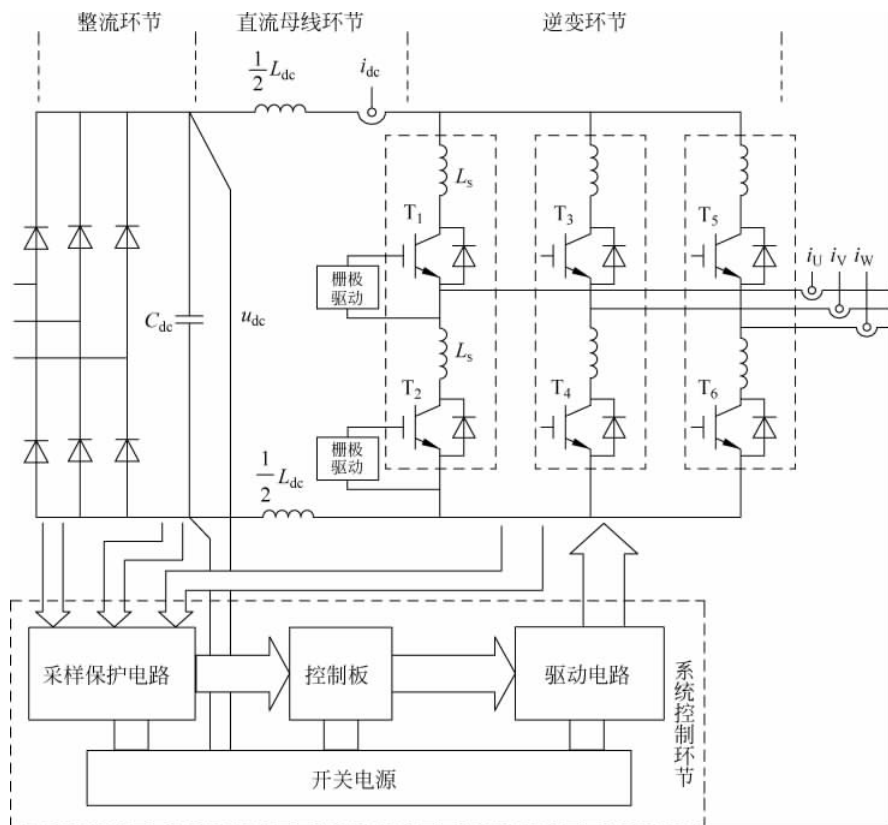


图 1.7 典型的电力电子系统硬件结构图

线性拓扑的计算机仿真可以在不用考虑实际硬软件特性情况下很好地模拟整个变换系统运行状态，一般称之为“理想运行”或为“机理仿真”。但是，实际中的硬件和软件系统都是非理想的，如功率开关器件的开通和关断过程是需要经历时间的，且存在电磁损耗；连接件存在分布杂散参数，信号处理过程中存在时延和畸变等。这些非理想因素在系统实际运行中都会表现出来，体现在硬软件的各个具体器件和算法的特性参数上。例如，同为功率开关器件，IGBT 与 IGCT 就有很大的差别，即使采用同样的连接方式（即同样的拓扑结构），用它们分别作为全控开关器件的变换系统之间也有很大的差别。所以，考虑非理想因素的存在，需要对实际的硬软件参数进行分别设计和适当匹配，才能使整个电力电子系统真正有效运行。

1.2.2 能量与信息的双向性

硬软件所运载的是变换系统中的能量与信息。本处提到的能量类别主要指的是电磁能量，由外加电源供给，经过变换系统主电路的可控变换和传输传送给外面