

## 4.3 直流斩波器在电力传动中的应用

直流电动机是通过调节其电枢或励磁绕组的电压来达到调速目的的，前者一般叫调压调速，后者叫调磁调速。直流电机所需的电能一般都来自交流电网，对其进行调速大致有两种方案：其一是用可控整流电路（如晶闸管整流电路）得到可以调节的直流电压供给电动机；另一种则是先用不可控整流电路对交流电进行整流，输出不可调的直流电压，然后通过直流斩波器进行直流调压。

### 4.3.1 降压型斩波器供电的直流电力拖动

降压型斩波器的电源端接不可调的直流电源，负载端接直流电动机，构成简单的直流调速系统，如图 4-23 所示。

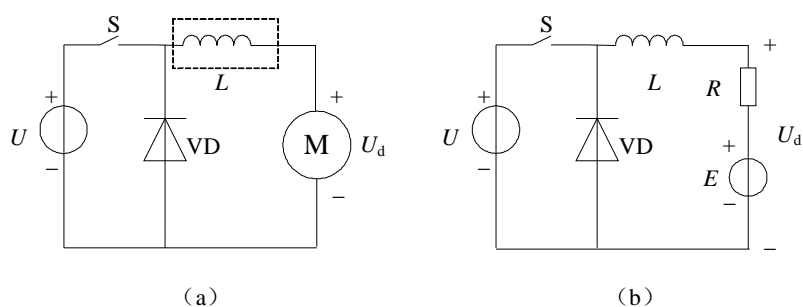


图 4-23 降压型斩波器组成的电力传动系统

在图 4-23 (a) 中电子开关  $S$ 、续流二极管  $VD$ 、电感  $L$  组成降压型 (Buck) 斩波器，与第 4.1 节中的降压型斩波器原理图相比较，图 4-23 (a) 中没有滤波电容  $C$ ，这是因为，电动机两端的电压  $U_d$  基本上等于电动机的旋转电动势  $E$ ，而旋转电动势正比于电动机的转速，电动机的转子部分有很大的惯性，机械时间常数比斩波器电子开关的工作周期要大得多，在若干个斩波周期中转速不会产生明显的变化，所以转子的惯性本身就有良好的滤波作用，不必再加滤波电容。电感周围的虚线框的意思是电动机的转子本身就有很大的电感，实际电路中是不是再外接电感要根据具体需要而定。

电动机的转子电路相当于一个电感、一个电阻和一个旋转电动势的串联，因此图 4-23 (a) 的等效电路如图 4-23 (b) 所示。如果  $D$  为占空比，斩波器的输出电压  $U_d$  应满足

$$U_d = DU$$

可以得出电动机的转子电流  $I_d$  为

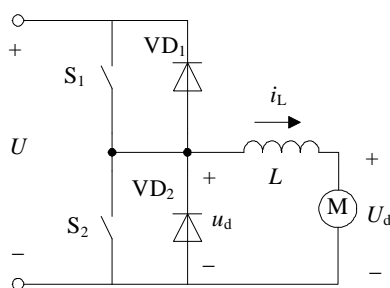
$$I_d = \frac{U_d - E}{R}$$

电动机稳定运行时，电子开关在一定的占空比下工作， $U_d$ 、 $E$  和  $I_d$  均保持不变，转子电流产生的转矩恰好抵消负载的阻力矩。在加速过程中，占空比增大，使得  $U_d$  增大，转子电流也随之增大，电动力矩大于阻力矩，电机加速运行，随着速度的上升，旋转电动势  $E$  也在增大，转子电流和电动力矩因之而减小，当电动力矩减小到又与负载的阻力矩相等时，电动机停止加速。

但是，这种电路不能控制电动机的减速。如果欲使电动机减速，只能做以下处理。减小占空比使  $U_d$  减小，转子电流  $I_d$  也随之减小，电动力矩小于负载的阻力矩产生负的加速度；或者  $U_d$  干脆小于  $E$ ，电机在负载力矩的作用下减速。由此可见，要想快速地制动只能采取能耗制动或摩擦制动等措施，使电机在较短的时间减速或停机。并且，电机的制动能量也不可能回馈到电网。

#### 4.3.2 由降压型和升压型斩波器组合供电的直流电力拖动

用一个降压型斩波器（Buck）和一个升压型斩波器（Boost）组合起来，共同驱动一台直流电动机，可以作到既能在电动状态为电动机调速又能为电动机施加制动力矩，并且可以将制动能量回馈到电源，电路的原理图如图 4-24。



4-24 二象限运行的斩波器控制电力拖动系统

电路中有两个电力电子开关  $S_1$ 、 $S_2$  和两个续流二极管  $VD_1$ 、 $VD_2$ 。其中  $S_1$ 、 $VD_2$ 、电感、直流电源和负载组成降压型斩波器； $S_2$ 、 $VD_1$ 、电感、直流电源和负载组成升压型斩波器。

在电动状态， $S_2$  保持关断状态， $S_1$  按占空比的要求周期性地通断。在  $S_1$  接通时，电源通过  $S_1$  向电机供电，并向电感补充能量，此时 2 个二极管都不导通， $u_d=U$ 。在  $S_1$  关断后，电源与负载之间的通路被断开，在电感的作用下，电流  $i_L$  经  $VD_2$  形成回路。此时  $VD_2$  两端

的电压  $u_d=0$ 。不难看出，这种状态电动机的端电压与电源电压之间的关系为

$$U_d = DU$$

再生制动状态电子开关  $S_1$  保持关断， $S_2$  周期性地通断。这是的电路为一个升压型斩波器，电动机的反电势相当于直流电源（图中的  $U_d$  近似等于旋转电动势  $E$ ），直流电源相当于升压斩波器的负载。能量由电动机供出，被直流电源吸收，所以电感电流  $i_L$  为负值。 $S_2$  导通时，电机、电感和  $S_2$  形成回路，电流逆时针方向流动，电机输出电能被电感储存。当  $S_2$  关断时，由于电感中的电流不能突变，电流只能通过二极管  $VD_2$  流向电源，此时电流的途径为（实际方向）：电动机上端→电感→ $VD_2$ →直流电源正极→直流电源负极→电动机下端。电感储存的电能被电源吸收。

无论是在降压状态还是在升压状态，电感电流  $i_L$  都是波动的。在  $i_L$  的平均值较大时，电流尽管波动但可以保证方向不变，即  $i_{Lmax}$  和  $i_{Lmin}$  同时大于 0 或小于 0。但在电流平均值较小时，如果电流波动的幅度较大，就可能出现  $i_{Lmax}$  和  $i_{Lmin}$  符号不同的现象，此时在一个工作周期中电感电流的方向改变 2 次，如图 4-25 所示。

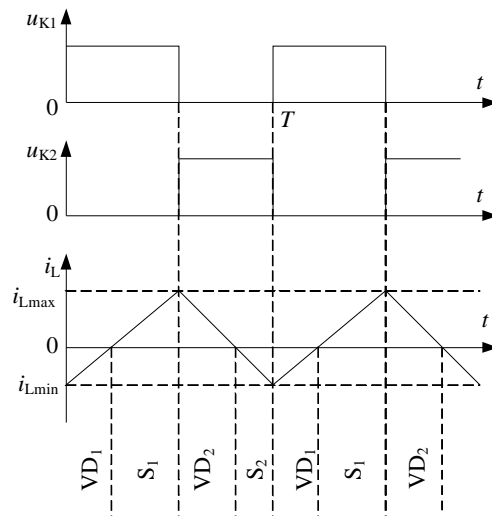


图 4-25 电感电流的波形

在这种状态下的一个周期中， $S_1$ 、 $S_2$ 、 $VD_1$ 、 $VD_2$  这 4 个开关器件是交替配合工作的，其控制规律如下：在电感电流  $i_L$  的上升阶段，为电子开关  $S_1$  加导通控制信号  $u_{K1}$ ；在电感电流  $i_L$  的下降阶段，为电子开关  $S_2$  加导通控制信号  $u_{K2}$ 。由于电子开关实际上都是单向导电的全控型电力电子器件，对其施加开通驱动信号它未必就能够导通，还必须要求电感电流的实际方向与电子开关的导通方向一致。因此可能出现两个电子开关都不导通的现象，在这种情况下电感电流就要通过两个二极管中的一个形成回路。下面分析一个开关周期中各阶段电路

的工作情况。

设两个电子开关的导通方向均是从上到下。在负载电流（也就是电感电流）为最小值即  $i_L=i_{Lmin}$  时为  $S_1$  发开通驱动信号，但此时电感电流的方向为负， $S_1$  不能导通，电感电流只能通过二极管  $VD_1$  流向电源正极。负载电流从最小值上升，电感储存的能量传送到电源。当负载电流上升到 0 后，继续向正的方向上升，此时电感电流方向与  $S_1$  的导通方向一致， $S_1$  导通，电流有电源正极流出向负载供电。

当负载电流增大到最大值后，为  $S_2$  发开通驱动信号，但此时电感电流的方向为正，与  $S_2$  的导通方向相反， $S_2$  不能导通。电流只有通过二极管  $VD_2$  形成回路，其导电路径为：电感→电动机→ $VD_2$ →电感。此阶段电源与负载没有能量交换。电感电流从最大值逐渐下降，下降到 0 后继续向负的方向增长，但此时电感电流的方向与  $S_2$  导通方向一致， $S_2$  导通，形成以下回路：电动机→电感→ $S_2$ →电动机。电动机发出的电能被电感吸收储存。当电流下降到最小值时，一个工作周期结束。

由前面的分析可以看出，图 4-24 所示的调速系统负载电流的平均值可以为正，也可以为负。但是负载端的电压平均值的方向不能变化，即只能  $U_d \geq 0$ 。因为对于直流电动机电枢电流  $I_d$  与力矩  $M$  成正比，电枢旋转电动势  $E$  与转速  $n$  成正比，而一般情况下旋转电动势近似等于电枢两端的电压  $U_d$ 。这说明，这种电力拖动系统电动机的转速不能反向，但其力矩可以反向，可以是电动力矩也可以是制动力矩。在描述机械特性的  $M-n$  平面上，本系统可以工作在第 1 和第 4 象限。在第一象限，电动机处于电动状态，电源通过由  $S_1$ 、 $VD_2$  组成的降压型斩波器向电机供给电能，转换成机械能。工作在第 4 象限时，电机处于发电状态，把由机械能转换成的电能输出给由  $S_2$ 、 $VD_1$  组成的升压型斩波器，斩波其又将其传递给直流电源，形成再生制动。在不同象限系统的等效电路如图 4-26。

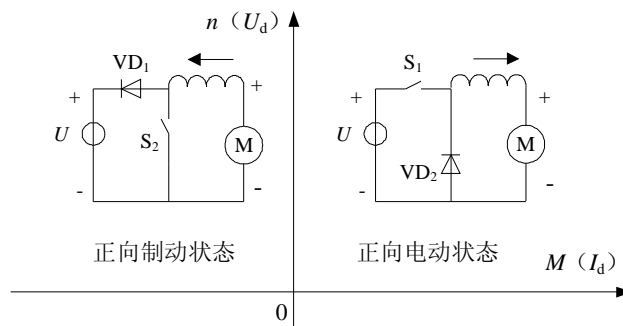


图 4-26 二象限斩波电路的机械特性

### 4.3.3 可以四象限运行的斩波器供电直流电力拖动

所谓四象限运行是指电动机既可以正转控制也可以反转控制，在正转和反转两种情况下，电动机都可以运行在电动状态也可以运行在制动状态。这种系统的主电路接线如图 4-27 所示。由 4 个控制电力电子开关和 4 个二极管组成，在不同的控制信号作用下，可以组合成 2 种降压型斩波器和 2 种升压型斩波器，共 4 种电路形式。对于正向电动、正向制动、反向电动、反向制动这四种工况，各对应 4 种电路形式中的一种。从图中可以看出，电路的拓扑结构为一“H”型，所以这种电路又叫 H 桥型电路。

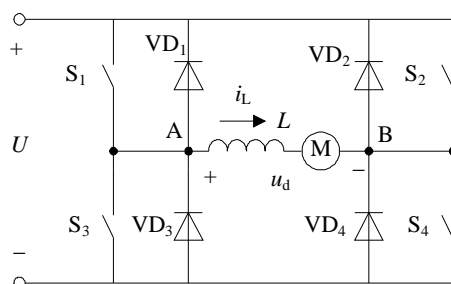


图 4-27 四象限运行的斩波器电力拖动系统原理图

从图中看，H 型结构的电路是对称的，但对于 4 个桥臂，控制信号是不对称的。通常通过  $S_2$ 、 $S_4$  所在的桥臂控制电动机的正转和反转，因此这两个桥臂又称为方向臂。设负载端电压  $u_d$  的参考方向如图，A 点为正、B 点为负。在电动机的正转状态（无论电动还是制动）， $S_4$  始终保持导通状态， $S_2$  始终保持截止状态。电路中 B 点与电源负极连接。不难看出，此时的等效电路与二象限斩波电路相同。

如果欲使电机反转，则  $S_2$  始终保持导通状态， $S_4$  始终保持截止状态，电路中 B 点与电源正极连接。此时电路也是一种二象限斩波电路只是电源的极性反接。

在电机正转时，如果  $S_3$  保持截止， $S_1$  做周期性的通断，则  $S_1$  和  $VD_3$  组成降压型斩波器，负载电压始终为正，电感电流也始终保持正值。电源向负载输送能量。系统工作在机械特性的第 1 象限。

电机正转时若  $S_1$  保持截止， $S_3$  做周期性的通断，则  $S_3$  和  $VD_1$  组成升压型斩波电路，电动机两端的电压仍为正，但电感电流方向为负，说明电动机的力矩为负。此时电动机的电枢相当于升压型斩波器的电源，向外供出能量，直流电源相当于升压型斩波器的负载，吸收能量。系统工作在第 2 象限。

反向电动状态是电机端电压和电流均为负值，属于机械特性的第 3 象限。此时  $S_2$  导通而

$S_4$  截止，电路中 B 点与电源正极连接。左侧两个桥臂的工作状态为  $S_1$  保持截止， $S_3$  做周期性的通断，这与第 2 象限相同，但由于右侧桥臂的通断发生了变化，此时  $S_3$  和  $VD_1$  组成的是降压型斩波电路。尽管电压的方向变了，但电流从直流电源的正极流出而流入负载的正极，能量传递路径仍然是由电源到负载，为反向电动状态。

第 4 象限为反向制动状态，反向必须是电机两端的电压为负，而制动则必须是电流与电压反向，电动机向外输出能量。四个电子开关的控制规则是， $S_2$  导通  $S_4$  截止，保证电路中 B 点与电源正极连接， $S_3$  保持截止， $S_1$  做周期性的通断。此时  $S_1$  和  $VD_3$  组成的是升压型斩波电路。

各工作状态对应的象限如图 4-28 所示。

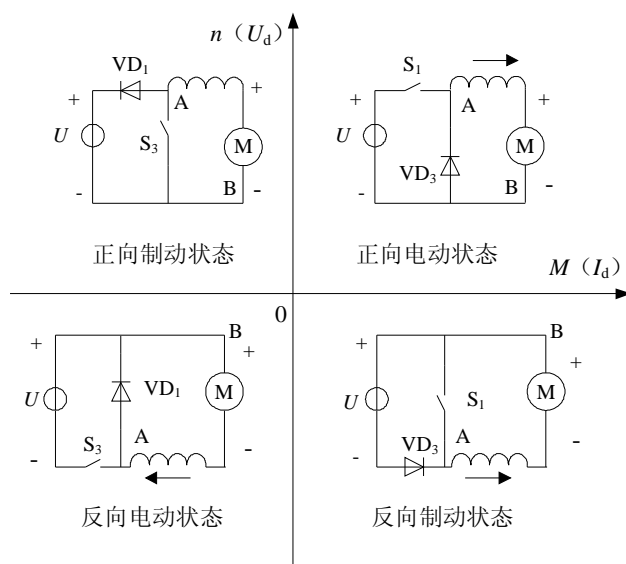


图 4-28 四象限运行的等效电路

#### 4.3.4 升压型斩波器在串级调速中的应用

串级调速是将绕线式交流异步电动机的三相转子电流通过汇流环引出，作为电源进入三相不可控整流电路进行整流，整流器的输出端与晶闸管有源逆变电路的直流侧相连接，作为有源逆变的直流电源。逆变后得到的交流电经变压器耦合又回送到电网，既达到了调速的目的，又充分利用了电能。

但是，在电动机转速较低时，由于转子电压降低，整流器输出直流电压也降低。这个电压就是逆变器的直流电源电压，因为它的降低，要想不影响逆变电路的工作，就必须增大逆变角  $\beta$ 。由第二章可知，逆变角越大，逆变电路交流侧的功率因数就越低。如果在整流器的输出和逆变器的直流输入端之间加入一个升压型斩波器，可以提高功率因数，电路如图 4-29

所示。

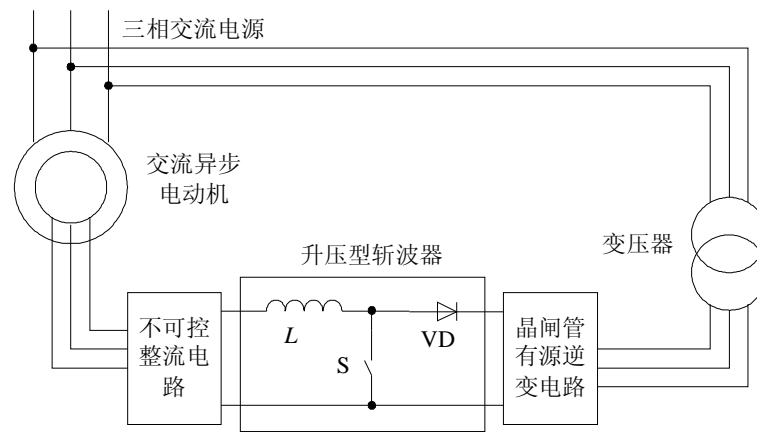


图 4-29 升压型斩波器在串级调速系统中的应用

从图中可看出，升压型斩波器由电子开关  $S$ 、二极管  $VD$  和电感  $L$  构成，将不可控整流器的输出电压进行升压，然后送至晶闸管逆变电路的直流侧。调节电子开关的占空比，可以在整流电路输出不同电压的情况下使逆变器得到相对稳定的直流电压，使逆变器的逆变角保持较小的数值，从而达到提高功率因数的目的。