

$\alpha=\beta$ 配合控制的有环流可逆直流调速系统

本章主要讨论 $\alpha=\beta$ 配合控制的有环流可逆直流调速系统,也叫自然环流系统。由此展开,研究几个可逆调速系统的有关问题,如可逆线路、两组晶闸管变流装置中的环流等。最后简要介绍其他可逆直流调速系统。

3.1 晶闸管-电动机系统的可逆线路

生产实践中许多生产机械要求电动机能够可逆运行,如可逆轧机的来回轧制,龙门刨床工作台往返运动,矿井卷扬机和电梯的提升和下降,电气机车的前进和后退等。有些生产机械虽不要求可逆运行,但却要求快速电气制动。因此,这些生产机械都要求电动机的电磁转矩能够自由地改变方向,统称此类系统为可逆调速系统。

对于晶闸管供电的直流调速系统,由于晶闸管的单向导电性,电流不能反向,要实现可逆,只能采用两组变流装置,各负责一个方向的电流。直流电动机的电磁转矩方向可由磁场和电枢电流的方向来决定。与此对应,晶闸管-电动机系统的可逆线路也有两种方式,即电枢反接可逆线路和励磁反接可逆线路。

3.1.1 电枢反接可逆线路

在要求频繁正反转的生产机械上,经常采用的是两组晶闸管装置反并联的可逆线路,如图 3-1(a)所示。电动机正转时,由正组晶闸管装置 VF 供电;反转时,由反组晶闸管装置 VR 供电。正、反向运行时拖动系统工作在第一、三两个象限中,如图 3-1(b)所示。两组晶闸管分别由两套触发装置控制,能灵活地控制电动机的起、制动和升、降速。但在一般情况下,不允许两组晶闸管同时处于整流状态,否则将会造成电源短路。因此,这种线路对控制电路提出了严格的要求,这是反并联可逆线路的一个特别要注意的问题。

反并联的两组晶闸管装置之间,还有两种基本的连接方式,第一种是反并联线路,如图 3-2(a)所示。它的特点是由一个交流电源同时向两组晶闸管供电。第二种是交叉连接线路,如图 3-2(b)所示。它的特点是两组晶闸管分别由两个独立的交流电源供电。也就是由两台整流变压器或一台整流变压器的两个副边绕组供电。

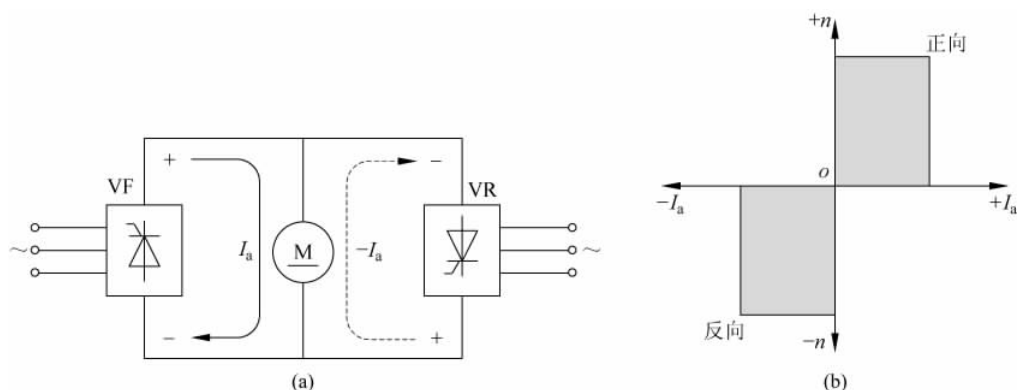


图 3-1 两组晶闸管装置反并联的可逆线路

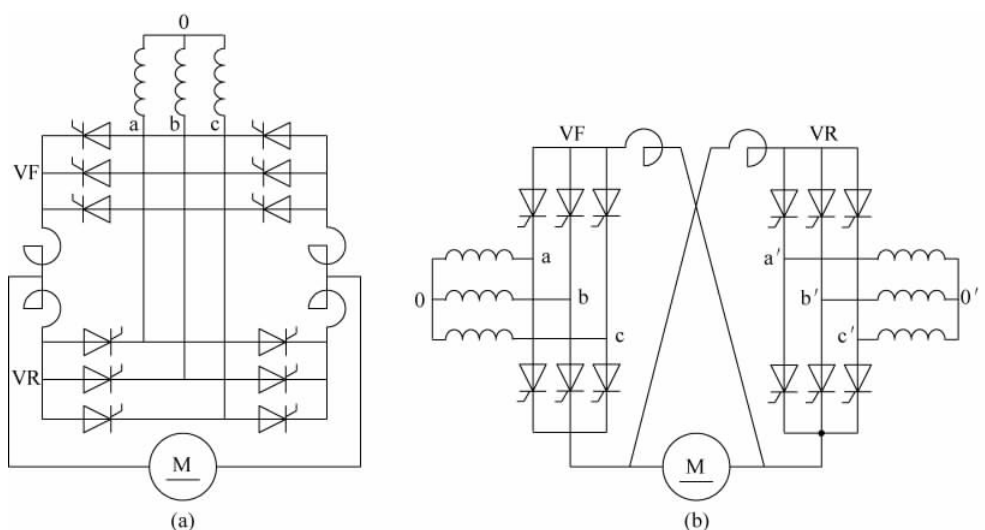


图 3-2 两种三相桥式可逆线路

(a) 反并联线路; (b) 交叉连接线路

3.1.2 励磁反接可逆线路

要使直流电动机反转,除了改变电枢电压的极性之外,改变励磁磁通的方向也能得到同样的效果,因此又有励磁反接的可逆线路。图 3-3 所示仅是励磁反接可逆线路的一种方案。这时,电动机电枢只要用一组晶闸管装置供电并调速,而励磁绕组则由另外的晶闸管装置供电,像电枢反接可逆线路一样,可以采用反并联或交叉连接方案,实现改变其励磁电流的方向与大小。改变励磁电流大小的目的,是考虑了系统有“强迫励磁”或弱磁调速的情况。所谓“强迫励磁”,是指在反向时,给励磁绕组施加 2~5 倍的反向励磁电压,迫使励磁电流迅速改变,以利于加快电流的反向。由于励磁功率只占电动机额定功率的 1%~5%,在系统容量很大时,这种方案投资较少。

然而励磁绕组的电感较大,时间常数可达数秒,因而励磁反向过程要比电枢反向慢得

多。即使再加上很大强迫电压的条件下,系统的快速性仍然很差。此外,在反向过程中,励磁电流从正向额定值下降到零的这段时间里,应保证电枢电流为零,以免出现瞬时弱磁升速现象,妨碍电机反向。这必然要增大控制系统的复杂程度。因此,只有当系统的容量很大,而且对快速性要求不高时,才考虑采用磁场可逆方案,例如卷扬机、电力机车等。

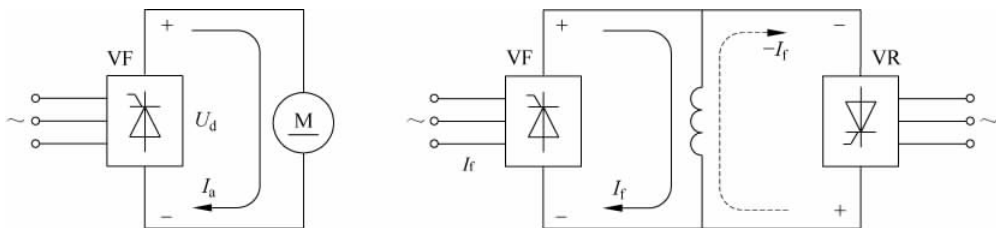


图 3-3 晶闸管装置反并联励磁反接可逆线路

3.2 两组晶闸管可逆线路中的环流

3.2.1 环流及其种类

1. 关于环流

由两组晶闸管装置所组成的可逆线路,除了经过电动机的负载电流之外,还可能产生不经过负载而直接在两组晶闸管装置之间流过的电流。这种电流称为环流,或称为均衡电流。

在可逆调速系统中,环流具有两重性。既有它有利的一面,又有不利的一面。有利的一面是,适当的环流可以作为流过晶闸管装置的基本负载电流,即使在电动机空载或轻载时也可使晶闸管装置工作在电流连续区,避免电流断续引起的非线性现象对系统静、动态性能的影响。在可逆系统中保留少量环流,可以保证电流的无间断反向,加快反向时的过渡过程。不利的一面是,环流消耗无用的功率,加重晶闸管和变压器的负担,环流太大时甚至会导致晶闸管损坏。在实际系统中,要充分利用环流的有利方面而避免它的不利方面。

2. 环流的种类

环流可以分为静态环流和动态环流两大类。

(1) 静态环流

所谓静态环流,是指晶闸管整流装置在某一触发角下稳定工作时,系统中所出现的环流。静态环流又可分为:

① 交流环流,即环流电压没有正向直流分量。由环流电压的交流分量产生环流。交流环流也叫瞬时脉动环流。

② 直流环流,即环流电压具有正向直流成分。直流环流也叫直流平均环流。

(2) 动态环流

所谓动态环流,是指当系统工作状态发生变化,出现瞬态过程,由晶闸管触发相位突变引起的环流,也就是在系统的过渡过程中出现的环流。

下面分别对有关环流的若干主要问题作必要的分析。

3.2.2 直流环流与配合控制

1. 反并联和交叉连接线路中的环流回路

(1) 反并联线路中的环流回路

如图 3-4 所示,在三相桥式反并联线路中,有两个大的环流回路。第一个回路是 I_h 回路,经过 VF 的共阴组 1、3、5 三只晶闸管和 VR 的共阳组 4'、6'、2' 三只晶闸管。第二个回路是 I'_h 回路,经过 VF 的共阳组 4、6、2 三只晶闸管和 VR 的共阴组 1'、3'、5' 三只晶闸管。这两个回路是相同的,下面讨论其中一个。

以 I_h 回路为例,反并联的两组晶闸管,各有自己的相位触发角,假设在某时刻,晶闸管 5 和 4' 同时导通,则环流回路为,由电源 c 出发,经晶闸管 5、电抗器 L_1 、 L_3 、晶闸管 4',回到电源 a,构成通路,环流电压为 u_{ca} ,若 $u_{ca} > 0$,环流产生;再假设晶闸管 1 和 6' 同时导通,环流回路由电源 a 出发,经晶闸管 1、电抗器 L_1 、 L_3 、晶闸管 6',回到电源 b,构成通路,环流电压为 u_{ab} ;其他对应晶闸管导通的情况类似。只有同相电源对应的晶闸管同时导通,如晶闸管 1 和晶闸管 4',环流电压为零,才不产生环流电流。至于什么时刻哪两只晶闸管同时导通,要取决于两组桥的各自触发角大小。

设 VF 的共阴组(三相零式电路)整流电压的瞬时值为 $u_{\varphi d}$,VR 的共阳组(三相零式电路)整流电压的瞬时值为 $u'_{\varphi d}$,则由图 3-4 可以看出,环流电压 $u_h = u_{\varphi d} + u'_{\varphi d}$ 。

(2) 交叉连接线路中的环流回路

如图 3-5 所示,两组晶闸管装置分别接在两个独立的交流电源上。由图可以看出,只有一条大的环流通路。瞬时情况是,两组桥中各有两只晶闸管参与回路。设 u_d 和 u'_d 分别表示两组晶闸管整流电压的瞬时值,则有环流电压 $u_h = u_d + u'_d$,同样,在不同的时刻,环流有大有小。

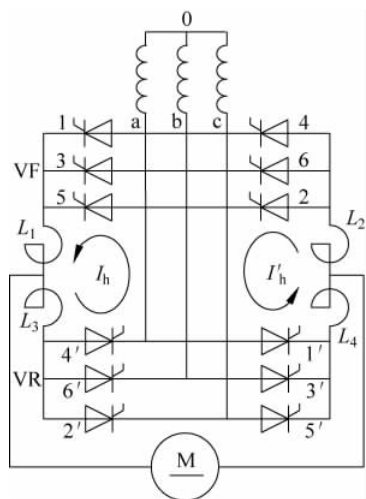


图 3-4 三相桥式反并联线路中的环流路径

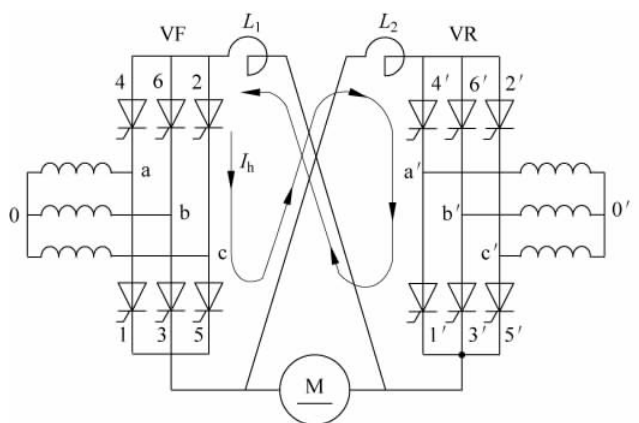


图 3-5 三相桥式交叉线路中的环流路径

2. 消除直流环流的方法

由上面的分析可知,正向的环流电压,是产生各种环流的根本原因。这里先讨论静态环流中直流环流的问题。

不管是反并联线路还是交叉连接线路,只要环流电压的平均值大于零,必产生直流平均环流。但无论如何不希望两组晶闸管装置都工作在整流状态,造成电源短路。为防止产生直流平均环流,唯一条件是使环流电压的平均值 $U_h=0$,即在反并联线路中,根据

$$U_h = U_{\varphi d} + U'_{\varphi d} = 0$$

有

$$U_{\varphi d} = -U'_{\varphi d}$$

式中: $U_{\varphi d}$ 为 $u_{\varphi d}$ 的平均值; $U'_{\varphi d}$ 为 $u'_{\varphi d}$ 的平均值。将上式等式两边同乘以 2,得

$$2U_{\varphi d} = -2U'_{\varphi d}$$

由图 3-4 中看出, $2U_{\varphi d}$ 恰好是 VF 组的平均输出电压 U_{df} , 而 $2U'_{\varphi d}$ 是 VR 组的平均输出电压 U_{dr} 。于是,没有直流平均环流的条件变为

$$U_{df} = -U_{dr}$$

在交叉线路中,同样有

$$U_h = U_{df} + U_{dr} = 0$$

$$U_{df} = -U_{dr} \quad (3-1)$$

式(3-1)说明,当正组晶闸管 VF 处于整流状态时,反组晶闸管 VR 处于逆变状态,输出的逆变电压与整流电压大小相等,方向相反。若系统反向运行, VF 组处于逆变状态时,反组晶闸管 VR 处于整流状态。根据电力电子技术的理论,有

$$U_{df} = U_{d0} \cos \alpha_f$$

$$U_{dr} = U_{d0} \cos \alpha_r$$

代入式(3-1),有

$$\cos \alpha_f = -\cos \alpha_r$$

再根据逆变角的定义,可得

$$\alpha_f = \beta_r \quad (3-2)$$

按照这样的条件来控制两组晶闸管,就可以消除直流平均环流,这叫做 $\alpha=\beta$ 工作制配合控制。当然,如果使 $\alpha_f > \beta_r$, 则 $\cos \alpha_f < \cos \beta_r$, 这时整流组输出电压小于逆变组输出电压,这样对抑制环流电流更为有利。因此,消除直流平均环流的条件可以写成

$$\alpha_f \geq \beta_r \quad (3-3)$$

3.2.3 交流环流及其抑制措施

1. 交流环流的形成

在 $\alpha=\beta$ 工作制配合控制的条件下,整流电压与逆变电压始终相等,因而没有直流环流。然而晶闸管装置输出的电压是脉动的, VF 组整流电压 U_{df} 和 VR 组逆变电压 U_{dr} 的瞬时值并不相同,当整流电压瞬时值大于逆变电压瞬时值时,便产生正向瞬时电压差 Δu_d , 从而产生瞬时环流。控制角不同时,瞬时电压差和瞬时环流也不同。图 3-6 画出了三相零式反并联可逆线路当 $\alpha_f = \beta_r = 60^\circ$ 时产生交流环流的情况。图 3-6(a) 中绘出了 a 相

整流和 b 相逆变时的交流环流回路。图 3-6(b)是 VF 组瞬时整流电压 u_{df} 的波形。图 3-6(c)是 VR 组瞬时整流电压 u_{dr} 的波形。图中阴影部分是 a 相整流和 b 相逆变时的电压,显然其瞬时值不相等,而其平均值却相同。瞬时电压差 $\Delta u_d = u_{df} - u_{dr}$,其波形绘于图 3-6(d)。由于这个瞬时电压差的存在,便在两组晶闸管之间产生了交流环流 i_{cp} 。由于晶闸管装置的内阻 R_{rec} 很小,环流回路的阻抗主要是电感,所以 i_{cp} 不能突变,且滞后于 Δu_d ; 又由于晶闸管的单向导电性, i_{cp} 只能在一个方向脉动,这个瞬时脉动环流存在着直流分量 I_{cp} 。

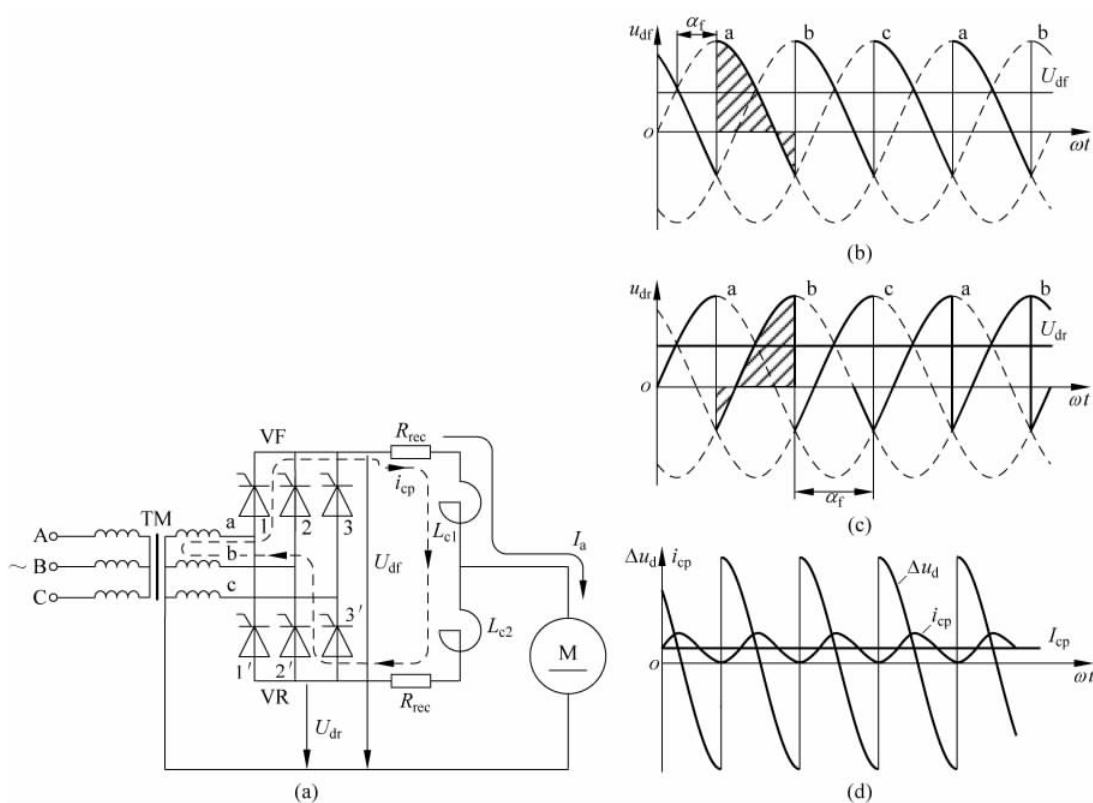


图 3-6 配合控制的三相零式反并联可逆线路当 $\alpha_f = \beta_r = 60^\circ$ 时交流环流的形成

显然, I_{cp} 和平均电压差所产生的直流环流是有根本区别的。

2. 交流环流的抑制

直流环流可以用 $\alpha \geq \beta$ 配合控制消除,而交流环流仍然存在,必须设法加以抑制,不使它过大。抑制交流环流的办法是在环流回路中串入电抗器,叫做环流电抗器或称均衡电抗器。一般要求把交流环流中的直流分量 I_{cp} 限制在负载额定电流的 5%~10% 之间。

通常采用的抑制交流脉动环流的办法是在环流回路中串入环流电抗器,环流电抗器的电感量及其接法因整流电路而异。在三相零式可逆线路中,见图 3-6(a),有一个环流回路,但要设两个环流电抗器,它们在环流回路中是串联的。系统运行时,总有一个电抗器因流过直流负载电流而饱和。例如图 3-6(a)中正组整流时, L_{c1} 流过负载电流 I_d , 铁芯饱和,因而电感值大为降低,失去限制环流的作用。只有在逆变回路中的电抗器 L_{c2} 由于没

有负载电流通过才真正起限制交流环流的作用。

三相零式反并联可逆线路在运行时总有一组晶闸管装置处于整流状态,因此必须设置两个环流电抗器。同理,在三相桥式反并联可逆线路中,由于每一组桥有两条并联的环流通路,总共需要设置四个环流电抗器,其中两个流过负载电流,另外两个分别限制两个环流通路的交流瞬时脉动环流,见图 3-4。若采用三相桥式交叉连接的可逆线路,只有一个环流通路,故而设置两个环流电抗器就可以了,见图 3-5。

以上讨论的是有环流时的情况,当采用其他特殊措施,也可实现无环流。如逻辑无环流的基本思想是,在任何时刻不允许两组桥同时导通,一组导通,另一组桥必须严格被封锁,彻底切断环流通路。再如,对触发信号仔细研究后会发现,通过相位错位,也可以找到两组桥不能同时导通的办法,即错位控制无环流系统。

3.2.4 动态环流

动态环流是由于系统的动态过程引起的。现以三相桥式反并联可逆线路为例,来阐明动态环流的概念。

假定系统原来处于 $\alpha_i = \beta_r = 30^\circ$ 角度的情况下稳定运行。这时,只有静态环流,而且环流电压 u_h 没有直流成分,环流电流 I_h 是断续的。瞬时的输出电压波形,正组均为正,而反组均为负。现在由于系统工作状态变化,需要电动机由驱动状态过渡到回馈制动状态下工作,控制信号发生变化,正组由整流转为逆变,反组由逆变转为整流。如系统由原来的稳定状态转变为 $\alpha_i = \beta_r = 150^\circ$ (即 $\alpha_r = \beta_i = 30^\circ$)。由于触发脉冲相位的移动,逆变组先发出触发脉冲,整流组触发脉冲尚未到达,两组桥瞬时都输出正向波形,使 u_h 突然增大,暂时出现了直流环流,环流电流明显上升。由于环流回路的时间常数较大,需要经历很长时间,动态环流才会消失,逐步过渡到新的静态环流。这就是动态环流产生的原因。

动态环流,就是在系统动态过程中,由于触发脉冲的相位不断变化所产生的附加环流。动态环流可能是直流环流,也可能是交流环流,这要根据系统动态过程的特征来决定。在一般情况下,由于动态环流是短时的,不需要考虑。但在某些特殊情况下,动态环流可能引起严重事故,必须加以注意。

3.3 $\alpha=\beta$ 工作制调速系统及制动过程分析

3.2 节已阐明,所谓 $\alpha=\beta$ 工作制,是指在两组晶闸管整流装置中,若一组工作在整流状态,触发角为 α ,则另一组一定工作在逆变状态,逆变角为 β ,并始终保持 α 与 β 相等。可逆线路中虽然可以消除直流平均环流,但一定有瞬时脉动环流存在。这种系统实际上是对环流不加自动调节的有环流系统,又称作自然环流系统。

3.3.1 系统组成原理

$\alpha=\beta$ 配合控制的有环流可逆直流调速系统原理框图如图 3-7 所示。

1. 主电路

三相桥式反并联线路只需要一个交流电源,因而整流变压器的成本较低,这是它的优点。但是,它有 2 个环流回路,使用 4 个环流电抗器。而且当环流电压出现最大幅值

($\alpha=\beta=60^\circ$)时,环流电压的频率仅为电源电压频率的3倍。环流电抗器当然应该按照环流电压频率最低及幅值最大的条件进行设计,因为这正是环流电抗器最恶劣的工作条件。而三相桥式交叉线路需要2个独立电源,因而整流变压器的成本较高,这是它的缺点。但却只有1条环流回路,只用2个环流电抗器。而且更重要的是环流电压的频率较高。如果变压器的2个副绕组的接线方式相同,都是Y型,这时环流电压的频率等于电源频率的6倍;如果将2个交流电源的相位错开 30° ,即将变压器的一个副绕组接成Y型,另一个接成 Δ 型,环流电压的频率成为电源频率的12倍。所以,电抗器的体积和成本远比反并联线路小。然而,无论使用哪种线路,对系统的运行来说,是完全相同的。

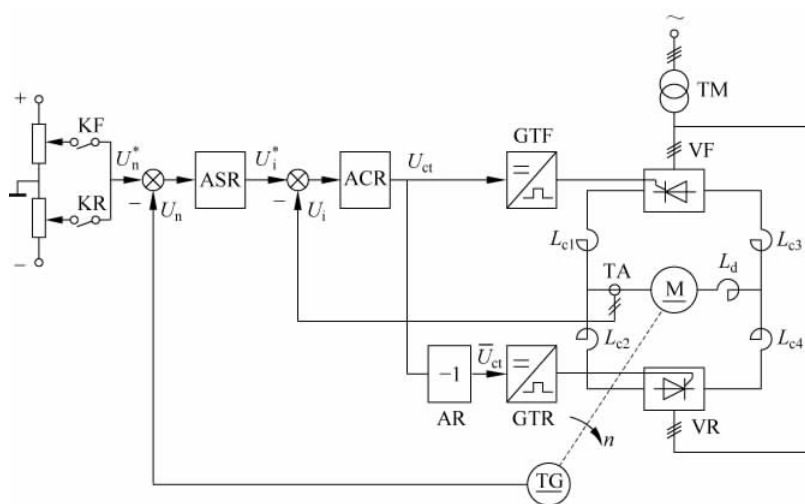


图 3-7 $\alpha=\beta$ 配合控制的有环流可逆直流调速系统原理框图

如图 3-7 所示,本系统主电路采用 2 组三相桥式晶闸管装置反并联线路,2 组晶闸管装置 VF 和 VR 对称相同。使用 4 个环流电抗器 $L_{c1} \sim L_{c4}$ 。由于环流电抗器流过较大的负载电流就要饱和,因此在电枢回路中另外设置了一个体积较大的平波电抗器 L_d 。

2. 控制回路

控制线路采用典型的转速、电流双闭环系统,转速调节器 ASR 和电流调节器 ACR 都设置了双向输出并限幅。电流调节器 ACR 的输出 U_{ct} 作为移相的控制电压,用它同时去控制 2 组触发装置,正组触发装置 GTF 由 U_{ct} 直接控制,而反组触发装置 GTR 由 $\bar{U}_{ct}$ 控制, $\bar{U}_{ct} = -U_{ct}$,是经过放大系数为 -1 的反号器 AR 后得到的。

当触发装置的同步信号为锯齿波时,2 组触发装置的移相控制特性如图 3-8 所示。其中,当控制电压 $U_{ct} = 0$ 时,2 组触发装置的控制角 α_f 和 α_r 都调整在 90° ,即 $\alpha_{f0} = \alpha_{r0} = \beta_{r0} = 90^\circ$ 。相应的 $U_{df} = U_{dr} = 0$,电动机处于停止状态。当增大 U_{ct} 时,正组控制角 α_f 减小,正组晶闸管进入整流状态,整流电压 U_{dof} 增大;反组控制角 α_r 增大,或逆变角 β_r 减小,反组进入逆变状态,逆变电压 U_{dor} 增大。因为 $\bar{U}_{ct} = -U_{ct}$,所以在 U_{ct} 增大移相过程中,始终保持了 $\alpha_f = \beta_r$, $U_{df} = -U_{dr}$ 。为了防止晶闸管在逆变状态工作时因逆变角 β 太小,发生换流失败,出现“逆变颠覆”现象,必须在控制电路中设有限制最小逆变角 β_{min} 的保护环节。

如果只限制 $\beta_{\min}$, 而对 $\alpha_{\min}$ 不加限制, 那么处于 $\beta_{\min}$ 的时候, 系统将会发生 $\alpha < \beta$ 的情况, 从而出现 $|U_{df}| > |U_{dr}|$, 又将产生直流平均环流。为了严格保持配合控制, 对 $\alpha_{\min}$ 也要加以限制, 并使 $\alpha_{\min} = \beta_{\min}$ 。根据 $U_d = f(\alpha)$ 这一函数关系, $\alpha_{\min}$ 的限制也就决定了晶闸管装置的最大输出电压 $U_{d\max}$ 。对 $\beta_{\min}$ 和 $\alpha_{\min}$ 的限制方法, 就是在 ACR 的正负输出上设置限幅值, 限幅值 U_{ctm} 可按需要选取, 通常取 $\alpha_{\min} = \beta_{\min} = 30^\circ$, 视晶闸管元件的阻断时间等因素决定。

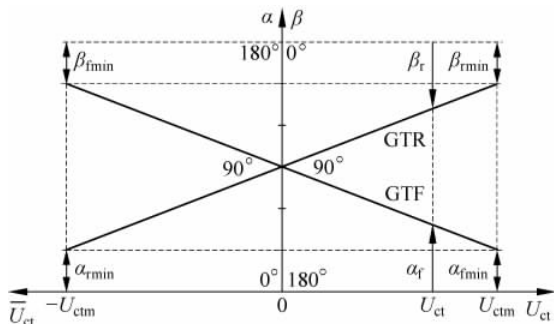


图 3-8 锯齿波触发装置的移相控制特性

为了满足可逆系统正、反运行的需要, 给定电压 U_n^* 的正、负极性由继电器 KF 和 KR 切换。与此同时, 调节器的输出和反馈信号也必须能反映出不同的极性。测速发电机输出电压随转速方向不同能够反映极性, 值得注意的是电流反馈, 必须采用能反映出电流极性的电流检测装置, 而不能使用简单的交流互感器或直流互感器。本系统采用的直流互感器 TA, 用的是检测直流电流的霍尔变换器。

3. 待整流和待逆变

根据 $\alpha=\beta$ 工作制配合控制系统的触发移相特性, 在触发移相时, 当一组晶闸管装置处于整流状态时, 另一组便处于逆变状态, 这是对控制角的工作状态而言的。实际上, 这时逆变组除环流外并不流过负载电流, 也就没有电能回馈电网。确切地说, 它是处于“待逆变状态”, 表示该组晶闸管装置是在逆变角控制下等待工作。当需要制动时, 只要改变控制角, 同时降低 U_{df} 和 U_{dr} , 一旦电动机的反电动势 $E > |U_{dr}| = |U_{df}|$ 时, 整流组电流将被截止, 逆变组才能真正投入逆变状态, 使电动机产生回馈制动, 将能量回馈电网。同样, 当逆变组回馈电能时, 整流组也是在等待整流, 可称作处于“待整流状态”。所以, 在这种 $\alpha=\beta$ 配合控制下, 负载电流可以很方便地按正反两个方向快速平滑过渡, 在任何时候, 实际上只有一组晶闸管装置在工作, 另一组则处于等待工作的状态。

3.3.2 系统制动过程分析

有环流可逆调速系统的启动、稳定运行过程与不可逆的转速、电流双闭环调速系统没有区别, 分析正向启动、正向运行的方法与分析反向启动、反向运行的方法完全相同, 只是系统中的给定信号、各反馈信号、各调节器输入输出等正负极性及各晶闸管装置组别不同而已。在不可逆系统中, 没有电气制动, 所以分析可逆系统的制动过程将成为本节的一个重点。

下面分析 $\alpha=\beta$ 工作制配合控制有环流可逆系统的正向制动过程,所讨论的问题在各种可逆系统中均有普遍意义。

制动时,必须使电动机电流反向,产生制动转矩,为了加快制动过程,应保持制动电流为负的最大允许值($-I_{\text{amax}}$)段时间后再衰减。整个正向制动过程可根据电流方向的不同而分成 2 个主要阶段:本组逆变阶段和它组制动阶段。本组逆变阶段中主要是电流降落,而在它组制动阶段中主要是转速降落。

1. 本组逆变阶段

设制动之前,系统正向稳定运行。各处的电位极性如图 3-9 所示。转速给定电压 U_n^* 为正,转速反馈电压 U_n 为负,且 $\Delta U_n = U_n^* - U_n \approx 0$ 。由于速度调节器 ASR 的倒相作用,其输出,也就是电流给定电压 U_i^* 为负,电流反馈电压 U_i 为正,且 $\Delta U_i = U_i^* - U_i \approx 0$ 。再经电流调节器 ACR 倒相,得控制电压 U_{ct} 为正,而 $\bar{U}_{ct}$ 为负。此时 $\alpha_f < 90^\circ$, 正组 VF 整流,输出正向整流电压 U_{df} , 电动机负载电流 I_a 为正; 而 $\alpha_r > 90^\circ$, 反组 VR 待逆变,只有环流在其中流过。电动机反电动势 E_a 与电流 I_a 方向相反。图中主电路画成等效电路形式, R_{rec} 为电源等效内阻, R_a 为电枢电阻,并忽略环流电抗器对负载电流变化的影响。用箭头表示能量流向关系,双箭头则表示电能主要由正组 VF 输送给电动机。

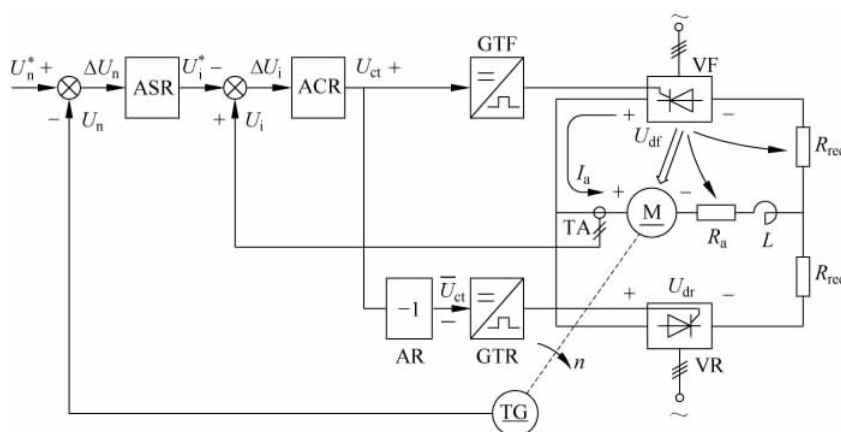


图 3-9 系统正向稳定运行时各处的电位极性和能量流向

当发出停车(或反向)指令后,转速给定电压 U_n^* 突变为零(或负)。由于转速反馈电压 U_n 极性仍为负,所以 ΔU_n 为负,使 ASR 饱和,其输出 U_i^* 跃变到正限幅值 U_{im}^* 。由于电磁惯性,电枢电流 I_a 不能突变,因而 U_i 不变,仍保持正值, ΔU_i 变为很大值 ($U_{im}^* + U_i$), 使 ACR 也饱和,其输出电压 U_{ct} 跃变为负的限幅值 $-U_{ctm}$ 。这时,原处于整流状态的正组 VF 立即变为 $\beta_r = \beta_{\min}$ 的逆变状态,原处于待逆变状态的反组 VR 变为待整流状态。图 3-10 中标出了这时调速系统各处电位的极性和主电路中能量的流向。在电枢电流 I_a 回路中,由于正组晶闸管由整流变成逆变, U_{dof} 的极性变反,而电动机反电动势 E 的极性未变,迫使 I_a 迅速下降,在主电路总电感 L 两端感应很大的电势 $L(di_a/dt)$, 电位极性如图 3-10 所示。这时有