

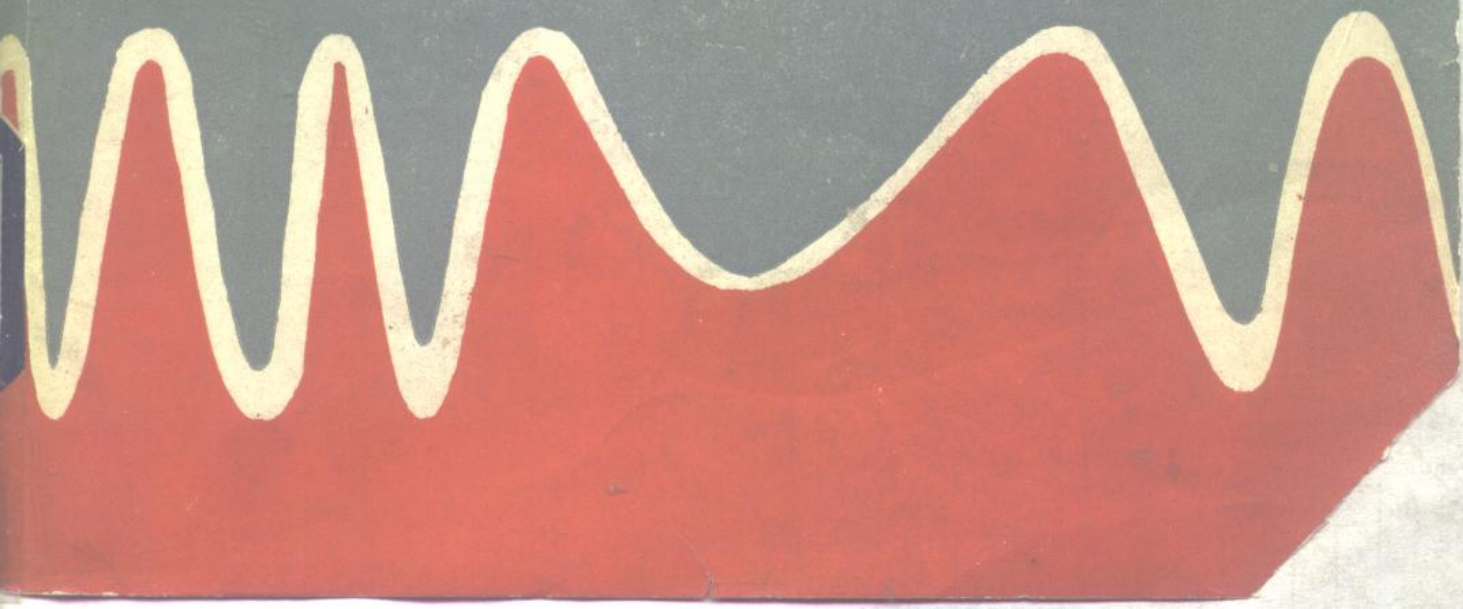
下 册

中国铁道出版社

交流传动 调速系统

〔美〕比曼尔 K·鲍斯 编

肖幼萍 张榴晨 周毅 冯之钺 译
杜庆萱 邵丙衡 校



交流传动调速系统

下 册

【美】比曼尔 K·鲍斯 编
肖幼萍 张榴晨 周毅 冯之钺 译
杜庆萱 邵丙衡 校

中 国 铁 道 出 版 社

1989年·北京

内 容 提 要

本书共分七章,下册包括后四章。第四章讨论电流源逆变器感应电动机传动系统;第五章介绍控制转差功率的感应电动机传动系统;第六章论述电流源逆变器同步电动机传动系统;第七章讨论控制循环逆变器的同步电动机传动系统。全书内容围绕由电力电子器件构成的变流装置与自动控制技术相结合的交流传动调速系统,对有关的研究人员、工程技术人员和大专院校师生均有较高的参考价值。

Adjustable Speed AC Drive Systems

Edited by Bimal K. Bose

IEEE PRESS 1981

交流传动调速系统

(下册)

〔美〕比曼尔 K·鲍斯 编

肖幼萍 张榴晨 周毅 冯之铨 译 杜庆莹 邵丙衡 校

美国电气与电子工程师协会出版社出版1981年

中国铁道出版社出版、发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 20 字数: 183 千

1989年5月第1版 第1次印刷

印数: 1—1500册 定价: 7.35元



目 录

第四章 电流源逆变器感应电动机传动系统	1
一、用于交流电动机传动的电流源逆变器	1
二、向单相交流机车异步牵引电动机供电的功率变流器	8
三、向感应电动机供电的两种可调电流源逆变器换流电路的分析比较	18
四、采用状态变量法对可控电流型感应电动机传动的稳态分析	34
五、采用 $D-Q$ 模型对感应电动机传动系统控制回路的研究	47
六、可控电流型感应电动机传动系统的模型建立和设计	57
七、电流源供电的感应电动机传动转矩脉动分析与控制	69
八、交流感应电动机传动系统的同步控制	77
九、一种高性能可控电流源逆变器传动系统	87
十、一种新型多重电流源逆变器	99
第五章 控制转差功率的感应电动机传动系统	105
一、转子有静止逆变器的感应电动机速度控制	105
二、用晶闸管逆变器反馈感应电动机的转差功率	117
三、驱动水泵的大容量感应电动机的无整流子克莱默尔 (Kraemer) 控制系统	127
四、感应电动机传动的转子斩波器控制——导通比控制方案	135
五、应用于水泵和压缩机的交流调速传动系统	144
六、大型绕线式感应电动机调速传动系统的定子有功和无功功率快速控制	151
第六章 电流源逆变器同步电动机传动系统	160
一、应用电流源逆变器的同步电动机传动系统	160
二、无换向器直流电动机的简化模型和闭环控制	166
三、电流源逆变器供电的自控制同步电动机的动态性能	176
四、电流源逆变器供电的同步磁阻电动机稳定性	190
五、电流源线性感应子式电机的控制和模拟	204
六、用于轧钢机的无换向器直流传动系统	216
七、负载换相同步电动机传动系统的新型强迫换相起动方案分析	228
八、大型同步电动机的静止变频起动和传动系统	242
九、电机换流逆变器—同步电动机传动系统的利用率和额定值	254
第七章 控制循环逆变器的同步电动机传动系统	268
一、无换向器和无电刷交流电动机	268
二、铁路车辆的同步电动机牵引	281
三、圣·劳伦斯 (St. Lawrence) 水泥公司 8750 马力无齿轮球磨机传动的电气特性	293
四、无齿轮管式磨机的传动系统和电子控制设备	300
本册各章节参考文献	310

第四章 电流源逆变器感应 电动机传动系统

一、用于交流电动机传动的电流源逆变器*

肯尼思 P·菲利普斯(Kenneth P·Phillips)

摘要——本文介绍了晶闸管变流器系统中使用的电流源概念,该系统可获得变频和变流的输出。文中还阐述了由滤波电抗器和电流反馈环构成的再生电流源,并讨论了采用电流源技术得到的逆变器简化电路。最后简要评述了工作可靠的电流源变流器为交流感应电动机提供较宽范围的调速性能。

(一) 引言

本文所述的静止变流器交流电动机传动系统,系利用动力装置和控制技术相结合的方法,从而使交流传动系统获得了前所未有的优越性能。鼠笼感应电动机固有的优良特性(坚固、简单、转子惯量小、价格低、体积小等),使它成为一种理想的机械动力源。然而,这种动力源在调速应用方面尚未得到充分利用。

迄今为止,绝大多数的静止交流传动装置是电压源变流器(VSC),其设计必须涉及广泛的应用知识,以便考虑所有负载的要求。电压源变流器只改变加于电动机上的电压和频率,使其电动机在固有的机械特性上工作。异常的负载变化常常可以使电动机发生堵转,或者由于电动机超速,使变流器发生能量反流现象。在上述的任一种情况下,都会导致电动机或变流器受到冲击或损坏。

本文所述的电流源变流器采用了速度和转矩控制的转差率调节。这种电流源—转差率调节变流器(CS/SR)能控制交流电动机运行在最佳转矩/电流状态下,使系统的转矩限制、快速响应、再生能力和宽调速范围等性能变得简单而可靠。

(二) 电流源变流器的主电路

1. 概述

采用电流源变流器的交流传动系统如图4-1-1所示。它基本上由可控整流器、直流环节滤波电抗器(没有电容器组)和一台电流型逆变器组成。可控整流器和滤波电抗器一起

* 本文选自IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 1A-8, pp.679-683, Nov./Dec. 1972.

构成的直流电流调节器（见图4-1-2）向电流型逆变器提供可调节的直流电流。图4-1-3所示是一个六阶梯波电流型逆变器的简化主电路。晶闸管（SCR）1~6以逆变器控制电路决定的速率切换负载电流，从而建立了输出频率。电容器1C~6C提供换流所必需的贮能，串联二极管1RT~6RT把电容器和负载隔离。在任何时候，仅有两个晶闸管导通，每个管子流过 120° 间隔的直流电流 I_d 。通过触发相邻的晶闸管来实现晶闸管的换流（关断）。

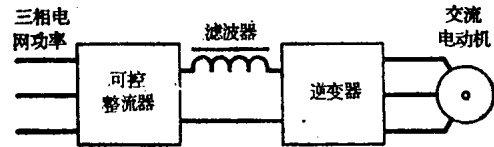


图4-1-1 简化的电流源—转差率调节变频器

2. 电流型逆变器的触发顺序

图4-1-4（a）所示为晶闸管3触发前的逆变器状态，电流从可控整流器（直流电源）流出，经晶闸管1、1RT、电动机A相、电动机C相和晶闸管2、2RT、流回直流电源。晶闸管1和3之间的换流电容器1C已充完电，具有如图所示的极性。当触发晶闸管3时，全部电容器电压加在晶闸管1上，于是晶闸管1换流。负载电流通路如图4-1-4（b）所示，电流通过电容器1C，使之线性反向充电直到足以使3RT导通为止。在图4-1-4（c）所示的时刻，电流开始从1RT和A相转移到3RT和B相，直到1RT中电流为零，至此B相流过了全部直流电流 I_d ，如图4-1-4（d）所示。表4-1-1所列为依次发生的换流情况。

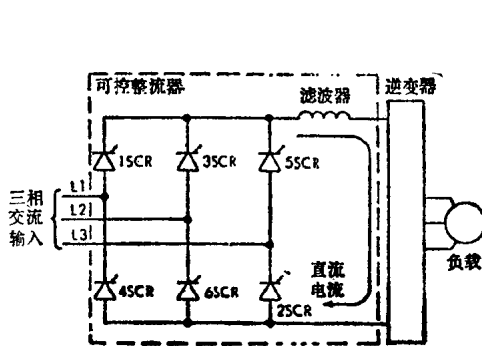


图4-1-2 可控整流器和滤波器简图

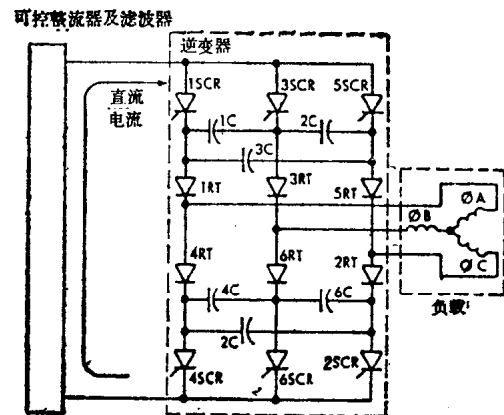


图4-1-3 逆变器主电路

3. 电流源变频器的输出波形和功率流动

供给电动机每相绕组的典型电流波形如图4-1-5所示。电动机端电压由电动机和负载对所加电流的响应来决定。

在电流型逆变器中，任何时刻的电流幅值总是由可调电流源（可控整流器和滤波器）来控制。即使存在两条电流并联通路时，两个电流之和决不会大于 I_d ，逆变器仅仅控制流过电动机某一相绕组电流的时间。在逆变器的直流端，平均直流电压按照电动机的要求而变化。如果电动机处于空载状态，直流电压接近零。如果电动机带动额定负载，直流电压就会达到某个正值。如果电动机带负载超速（功率需要），直流电压即改变极性，并通过可控整流器把功率送回交流电网（再生）（见图4-1-6）。注意调节后的可控整流器和逆变器之间的直流环节电流总是沿同一方向。在再生期间，可控整流器的晶闸管借助电网的交流电交替变化，实现换相。

由于电流源变流器的电流波形和经典的六阶梯电压波形相同，所以，对于电流源变流器，负载电压由负载对所加电流的响应来决定。电流波形中的谐波含量是明确和熟知的，从电机发热的观点来看，这样的谐波分布是有利的。

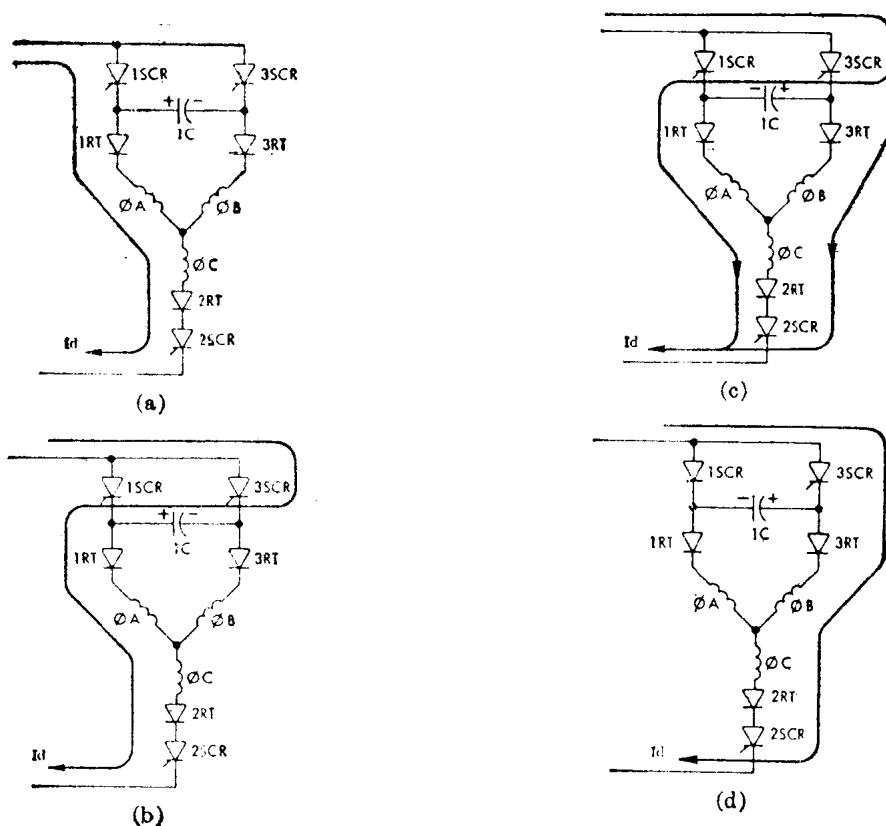


图 4-1-4 流经逆变器 and 电动机的电流

换 流 顺 序

表 4-1-1

开通SCR号码	换流SCR号码	电 流 通 路
4	2	3SCR—3RT— ϕB — ϕA —4RT—4SCR
5	3	5SCR—5RT— ϕC — ϕA —4RT—4SCR
6	4	5SCR—5RT— ϕC — ϕB —6RT—6SCR
1	5	1SCR—1RT— ϕA — ϕB —6RT—6SCR
2	6	1SCR—1RT— ϕA — ϕC —2RT—2SCR
3	1	3SCR—3RT— ϕB — ϕC —2RT—2SCR

4. 换 流

应用电流源逆变器，其结果是简化了晶闸管换流的主电路。从图 4-1-3 可知，换流电路仅包括电容器和二极，除了需要与每个晶闸管串联的小电感外，不需要别的换流变压器或换流电抗器。这个小电感用于限制晶闸管 di/dt 在安全限度之内。省去换流电抗器不仅可以增加运行频率，而且大大降低了运行设备的机械噪音。换流电容器应根据限制逆变装置的峰值电压来设计，而不是根据晶闸管的关断时间来设计。这样设计的结果是电流源变流器可采

用标准晶闸管，而不必采用“快速关断”晶闸管。由于电流型逆变器不需要专门的换流变压器和高级的晶闸管，所以在所有功率等级中，其经济性最好。

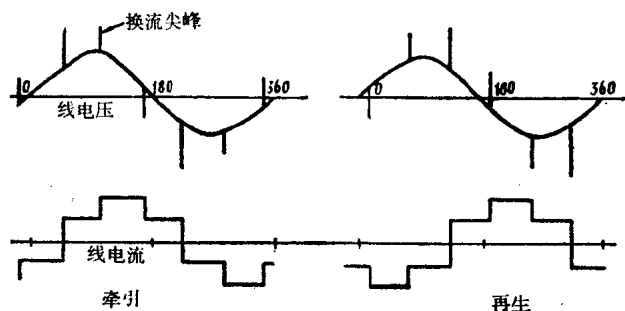


图 4-1-5 电流源—转差率调节变流器
电流和电压波形

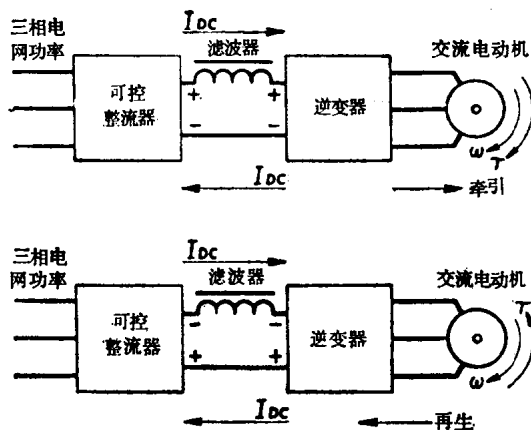


图 4-1-6 牵引和再生工况的功率流动

(三) 电流源变流器的控制电路

1. 概 述

图 4-1-7 所示为固定电压下感应电动机的转矩、电流和转差率之间的关系，只要气隙中电势与频率之比不变，那么这些关系就适用于任何同步速度的情况。电动机需要一个最小电流值 $I_{\min}$ 来维持空载转矩下的同步速度。当负载（转矩要求）增加时，电动机电流也一定增加，这个过程由图 4-1-8 所示的速度调节器完成。速度调节器由一个“电流环”和一个“速度环”组成，电流环包括电流反馈、电流误差放大器、可控整流器和滤波器；速度环包括速度反馈、速度误差放大器、振荡器、逆变器和电动机。不管负载电流的方向如何，绝对值电路保证了两个环之间正确的相互作用。

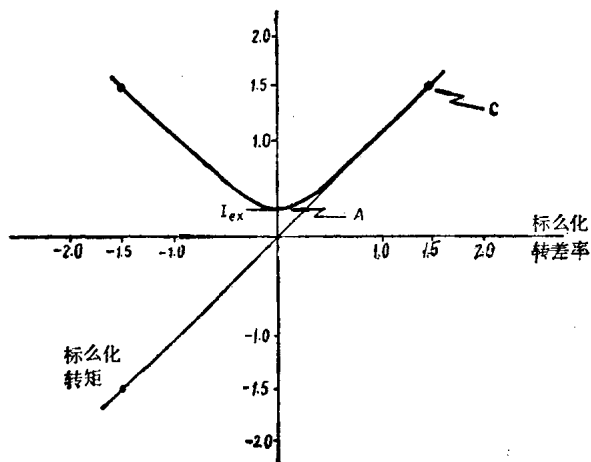


图 4-1-7 感应电动机特性曲线

在电动机运行于图 4-1-7 特性曲线所示的 A 点时，负载为零，电流为最小值 $I_{\min}$ （由励磁电流基准量决定）。速度同样由速度基准量决定，速度误差为零，从而速度误差放大器的输出近似为零。假如把 100% 额定转矩的负载加到电动机上，电动机速度降低，产生一个速度误差信号，该信号由速度误差放大器检测和放大，速度误差放大器相应的输出信号，一方面引起振荡器的振荡频率增加，另一方面通过绝对值电路增加可控整流器和滤波器的电流误差输出。

速度误差放大器输出持续增加，直到电动机运行于额定电流、额定转差率和额定转矩时

为止, 图 4—1—7 中 C 点所示为此种工况。这时, 电动机满载转矩得到满足, 电动机速度维持在速度调节器的调节极限之内。

当不存在速度误差信号时, 振荡器仅仅直接从测速发电机接受信号。因此, 只要转速和速度基准信号一致, 振荡器就以相应于电动机轴速度的某一频率驱动逆变器。

如果负载力矩是负的(超速负载), 则速度误差放大器即输出信号改变极性, 从而降低了振荡频率。但是, 从绝对值电路到电流误差放大器的信号极性依然使电流增加, 使逆变器直流输入端的直流电压改变极性, 传动系统即处于再生状态。

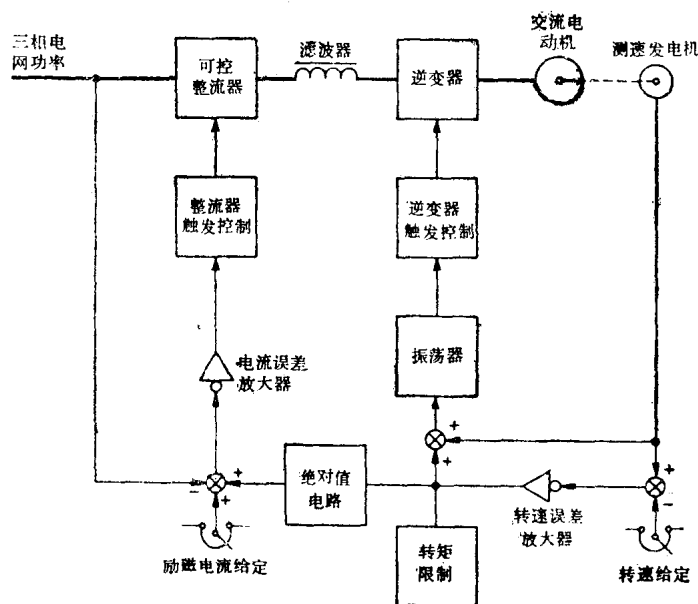


图 4—1—8 基本系统

2. 电流和转矩限制 (图 4—1—8)

与转矩极限基准量调整相同, 限制速度误差放大器的输出具有两个非常有用的功能。首先, 它限制电流基准量的幅值, 因此不管负载是否变化或逆变器瞬态条件怎样, 都把送入电流型逆变器的电流限制在一个安全值之内。其次, 它限制了电动机的转差率, 从而把电动机转矩限制到一个预期值。假设这个极限值相应于 150% 的额定转差率值和 150% 额定电流值。当电动机负载增加时, 电流和转差率都增加, 直到速度误差放大器输出值被箝位于相应图 4—1—7 中 C 点的值。当负载增加超过 150% 的额定转矩时, 既不会增加电流, 也不会增加转差率。当电动机连续减速时, 测速发电机的信号使振荡器降低逆变器的频率, 频率的降低正比于电动机速度的降低。转差率和电流被限制在相应转矩极限值的数值上, 防止了电动机的损坏或运行在转矩/电流非常低的高转差率范围。如果过载保持不变, 电动机的转速可能减小到零, 但此时电动机仍将向负载输出 150% 额定转矩。如果电动机负载减小到低于 150% 额定转矩的某个值, 电动机将以正比于负载力矩要求值与整定的转矩极限之差的速率加速到预期的速度值。

由于采用这种转矩限制控制, 感应电动机可以安全地以最大速率加速到任何预期速度, 而不用担心电动机失步或吸收过大的电流。此外, 任何超过传动装置能力的过载转矩都不会使传动系统工作中断, 而仅仅在过载消失前引起速度降低。

(四) 电流源—转差率调节变流器的运行特性

1. 再生、动态响应和速度范围

如前所述, 直流端的平均电压是加到负载上的功率的函数, 传送到电动机上的功率等于直流电压和直流电流的乘积, 这对于任何功率流动方向都是正确的。如果负载拖动电动机, 感应电动机成为感应发电机, 把功率送回到电流源变流器。因为逆变器和整流器的设计允许在第一象限和第四象限的功率流动方向相反, 同时维持单一方向的直流电流 I_d , 这个再生能力是固有的, 并且不需要诸如反并联整流器这样的辅助装置。当电动机功率因数成为负值时, 逆变器直流电压改变极性, 但是直流环节内的电流 I_d 的方向维持不变。直流环节中功率流动的方向如图4-1-6所示, 牵引运行和再生运行的波形如图4-1-5所示。因为可控整流器和滤波电抗器力图维持电流恒定, 所以直流电压自动改变极性, 而将功率返回交流电网。直流部分在第一和第四象限运行的能力使整个传动系统能运行在第一和第二象限, 即能产生正转矩和负转矩。颠倒逆变器相序可以使电动机运行在第三和第四象限, 如图4-1-9所示。因此, 只用12个功率器件即可实现全部四个象限的电动机运行。

因为在逆变器控制中通过改变供电相序可以容易地达到反转, 所以交流传动具有极其迅速的速度反向能力。电流源变流器产生正或负转矩的能力仅受到增加直流电流所需时间的限制, 因此, 这类传动系统可以在几个毫秒内响应正或负的满载转矩指令, 从而对速度基准量变化以及对瞬态负载变化能快速响应。因为交流电动机的转矩与转动惯量的比率通常为功率相同的直流电动机的三倍或三倍以上, 所以静止交流传动比相应的静止直流传动具有更快的响应。交流电动机易于铸造出高速运转的转子, 并且用在需要高速的场合。

逆变器有向电动机提供特定转差率和电流值的能力, 并能保证传动系统在静止到额定转速范围内任一转速下产生预期的转矩。在所有运行工况下, 不管起动、停转或反转, 电动机电流的大小仅取决于转矩限制基准量的数值。转矩限制基准量可以设置到接近电动机最大转矩点的任何量。因为在交流电动机运行范围中的电流与转矩的比率关系为非线性的, 所以某一百分率的电动机转矩可由比该百分率低的相应电流产生。例如, 转矩限制基准量设置在200%转矩处, 电动机将在所有运行工况下承受低于200%的电流, 传动系统不能向负载提供高于200%的转矩。

2. 可靠性

电流限制特性使这个传动系统具有一定的可靠性。这是通过把直流电流限制在一个安全值上, 使逆变器部件不可能流经过高的电流而实现的。在传动系统发生干扰触发、不触发和主电路暂时断电等事故时, 常引起交流传动系统保险丝熔断、烧毁设备, 或至少是停转, 而在此系统中如发生这些事故仅引起瞬时的转矩下降。即使逆变器输出端发生短路, 轻微损伤电动机时, 也无损于电流源变流器。在上述情况下传动系统仍有继续运行的能力, 不仅能在装置运行时检查故障, 而且在许多场合下, 以

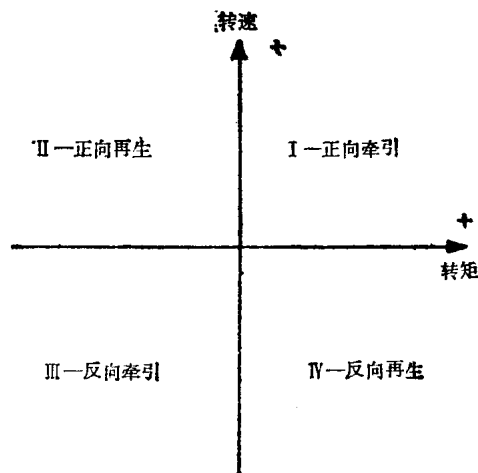


图4-1-9 运行的四个象限

及某个更合适的时间里，由操作者来修理装置中损坏的部件。

(五) 结 论

展望历史，交流电动机传动仍未充分发挥其潜在能力。交流电动机具有的一切优点由于功率变换装置的限制而长期被忽视。大多数交流功率变换装置只是调频电源，而不是真正满足通用要求的传动装置。电动机装上这些功率变换装置时，只要把逆变器设计、应用知识和运行安全因数协调好，就可以获得成功。在工业负载条件下，做到这点很困难，因此不能在广泛的应用范围中满足运行的需要。

电流源—转差率调节变流器给交流电动机供电的应用，第一次产生了能充分发挥交流电动机良好特性的交流电动机传动系统，同时保持了系统的可靠性和简单性。这种传动系统可以作为工业通用交流电动机传动系统。

二、向单相交流机车异步牵引电动机 供电的功率变流器*

沃尔夫冈·利诺(Wolfgang Lienau)

阿道夫·米勒-海尔曼(Adolf Müller-Hellmann)

汉斯-克里斯托弗·斯克狄尼(Hans-Christoph Skudelny)

摘要——异步感应电动机非常适用于大功率牵引传动系统,但用于单相交流供电的电力机车和电动车组还必须加装功率变流器。本文讨论了适合该用途的三种不同类型的功率变流器。过去已经成功地研制了具有直流环节的间接交流变流器,本文对此将作些讨论,最后介绍无明显直流环节的自换流直接交流变流器。

(一) 引言

目前,单相交流电力机车和电动车组常采用带有抽头切换开关控制的单相串联线绕式电动机,或采用由整流器供电的直流电动机做牵引传动装置。两类电动机都具有机械整流子,因此在设计和运行中受到一些限制。异步鼠笼式感应电动机更适用于牵引场合^[1]。它具有可靠性高、不需维修的优点,其重量为同等容量直流电动机的2/3左右。对牵引来说,异步电动机最重要的特性是运行范围宽和过载能力高。可以预计,将来高速电力机车的设计均采用异步电动机牵引。它的另一个优点是能使同种机车既适用于重载列车、也适用于快速列车。

本文介绍用于控制异步电动机的变流器结构,有以下两方面的研究课题:同电源侧的相互作用和同电机侧的相互作用。众所周知,静止变流器可以在电源和电机侧都产生无功功率和谐波功率。

在电机侧,异步电动机的正常运行将吸收基波无功功率。谐波功率又将引起转矩振荡和附加损耗,所以,这是它的一个缺点。

因为无功功率和谐波功率会引起附加损耗和电压畸变,所以电源侧的功率因数应尽量地接近1。

(二) 变流器的基本结构

为了向异步电动机供电,需要自换流型变流器。两种自换流变流器的基本原理如下:

1. 把直流电压源接到交流负载上去的直流电压源变流器,在交流侧产生矩形波电

* 本文选自 IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 1A-16, p.103-110, Jan./Feb. 1980.

压^[2]，为了改变电压平均值，可以对电压进行脉宽调制（PWM），脉宽调制也可减少低次电压谐波分量^[3]。

2. 把直流电流源接到交流负载上去的直流电流源变流器在交流侧产生矩形波电流。脉宽调制也可用来减少低次电流谐波分量^[4]，但至今还未用电流调制来改变电流平均值。

这两种变流器的应用，形成了两种不同的交—直—交变流器系统，如图4—2—1(a)和(b)所示。第三种系统是由第二种产生出来的。

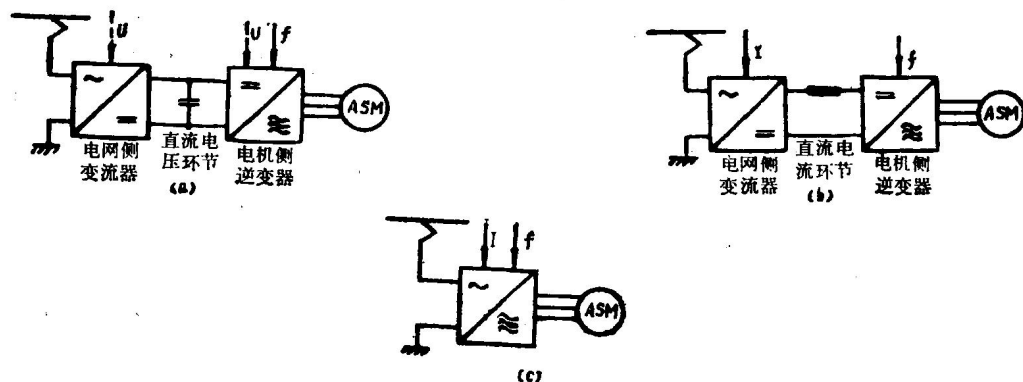


图4—2—1 变流器基本结构

(a) 带有直流电压环节的间接变流器；(b) 带有直流电流环节的间接变流器；
(c) 无明显直流环节的直接变流器。

(三) 带有直流电压环节的间接交流变流器

原理图如图4—2—1(a)所示，电源侧变流器供电给恒压直流电压环节。直流电压环节中的电容器可吸收电源侧变流器电流的谐波分量。中间环节还需要附加的储能元件。电机侧变流器必须能改变电机电压和电机频率，该功能通常由变流器的脉宽调制来实现。

由于采用了脉宽调制技术，电机电流可以调制成近似的正弦波形（见图4—2—2）。

用于牵引的上述传动系统的研究已经完成^[5]，其结果是在电源侧采用自换流式的变流器，它的运行和电机侧变流器的运行很相似，称之为“四象限控制器”^[6]。使用这类变流器可控制电源侧电流近似为正弦，并使功率因数大于0.99^[7]。这种传动系统已经首先在电力机车上使用^[8]，对于这种系统已有专著论述^[9]，这里不再进行讨论。

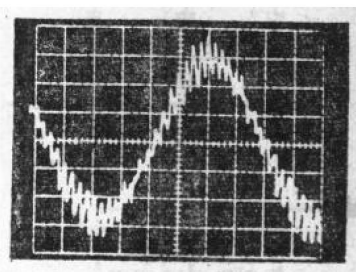


图4—2—2 脉宽调制变流器的电流波形

(四) 带有直流电流环节的间接交流变流器

这种变流器系统包括一个电源侧变流器和一个电机侧逆变器。电源侧变流器把可调直流电流供给直流环节，电机侧变流器把直流电流变换成频率可调的三相电流〔见图4—2—1(b)〕。两个变流器直流侧电压差可磁化直流环节中串联的电感。

还有许多具有不同换流方法的电机侧自换流变流器结构，例如相换流、相邻相依次换流和共同换流方法。一种大家熟知的自换流六脉冲桥式电路如图 4—2—3 所示。这种电路采用相邻相依次换流方式工作，因此不需要单独的换流晶闸管。图 4—2—4 所述的是从晶闸管 T_4 到晶闸管 T_6 的电流换流过程。这个换流组下一步换流是 $T_6 \rightarrow T_2$ ，从 T_6 到 T_4 再回到 T_4 的换流也能进行。通过两相之间的切换，经脉宽调制的电机电流波形如图 4—2—5 所示。调制规律是，在任一时刻上换流组中的一相和下换流组中的一相导通电流，在一个换流组换流期间另一个换流组不换流，从而产生了变流器的对称控制。当然，并不需要每半个周期一定产生九个脉冲，从理论上说，脉冲的数目可以是 1 到无穷大之间的任意奇数。

必须指出的是，电动机的漏感对换流过程影响很大。实际上换流需要一定的时间，随着变流器频率的增加，换流时间对周期的比例也随之增加，当换流时间达到周期的 $1/3$ 时，运行频率为最大值。虽然运行频率仍可提高，但是在这个运行范围会发生多路换流和谐波振荡。

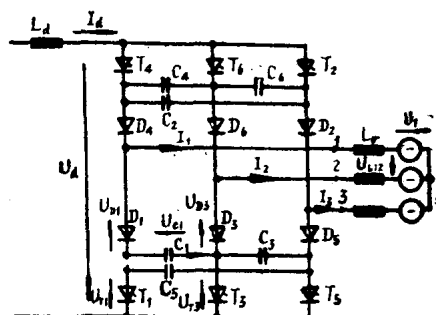


图 4—2—3 自换流六脉冲桥式变流器

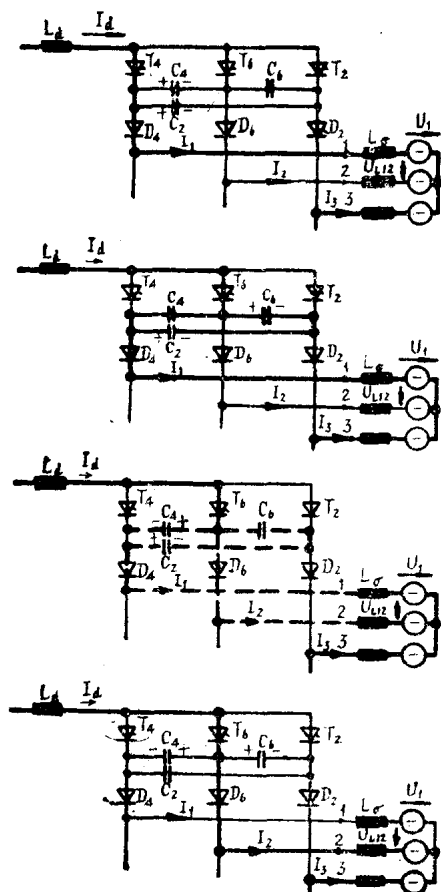


图 4—2—4 换流的各个阶段

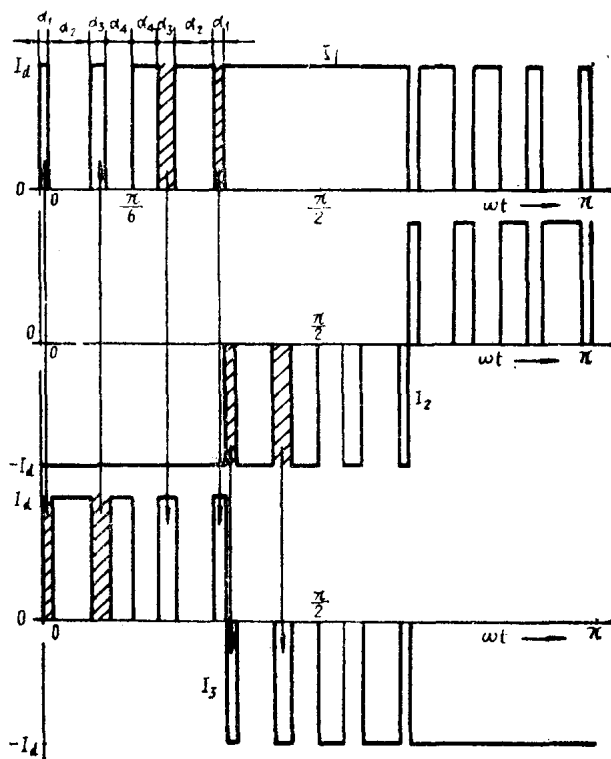


图 4—2—5 电动机电流的脉宽调制

通常,可以通过合理地设计换流电容来避免变流器工作在多路换流区域。最大换流时间决定了运行频率的上限,也限制了电流脉冲的最小时间间隔。

电流脉宽调制对减小谐波转矩是十分有效的。电流谐波和基波磁通相作用产生一系列的谐波转矩^[10],它们的次数与电流谐波次数相差为1,所以在矩形波电流的情况下,存在6、12、18、24次等转矩谐波。

谐波转矩会产生振荡,这对车辆传动系统将构成危害。当电动机电流的基波频率变化时,转矩振荡的频率也随之变化,那么在低频供电时,就会发生谐波转矩与机械传动装置共振。

采用电流脉宽调制可以抑制低次谐波电流和相应的谐波转矩。根据计算,图4-2-6给出了在五脉冲调制运行中如何选择控制角的曲线(控制角由图4-2-5定义),以消去某些特定的电流谐波。

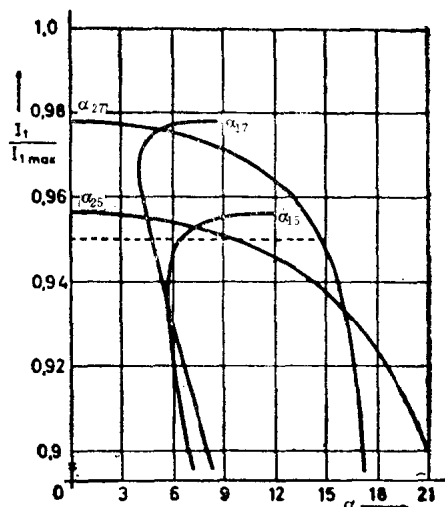


图4-2-6 在脉冲运行下可消除某些电流谐波的控制角曲线

例如,任意选定基波电流比 $I_1/I_{1max}=0.95$,曲线表明为了消去7次谐波, α_1 必须为 4.8° , α_2 必须为 14.8° 。当 $\alpha_1=6.5^\circ$ 和 $\alpha_2=9.5^\circ$ 时,可以消去5次谐波。还有一组可同时消去5次和7次谐波电流的控制角,即 $\alpha_1=5.82^\circ$, $\alpha_2=16.25^\circ$,并且选定 $I_1/I_{1max}=0.933$ 。

对于变流器的七脉冲或更高脉冲数的调制运行,同样可以得出类似的曲线。表4-2-1给出了一到九脉冲运行对25次以下的各次谐波的影响。由此可以看出,基波电流减小如低于8%,从一个脉冲数目到下一个脉冲数目的转换,将引起基波电流产生阶跃式增加。在转换期间,如果谐波存在时间短,则可减小或避免这种阶跃式变化。

25次以下的电流谐波的降低值

表4-2-1

m	k		5	7	11	13	17	19	23	25
9	I_k/I_1	0.923	0	0	0	0.05	0.007	0.136	0.259	0.188
7		0.925	0	0	0	0.097	0.27	0.231	0.029	0.001
5		0.934	0	0	0.186	0.248	0.152	0.033	0.121	0.099
1		1	0.2	0.143	0.091	0.077	0.059	0.053	0.044	0.04

如前所述,电动机电流的频率是由变流器控制的,而电动机电流的幅值则由可控的电源侧变流器调节。为了在电源侧得到较高的功率因数,这个变流器也应是自换流变流器,图4-2-7给出了它的电路图。这时没有必要对每个桥臂都提供自换流手段。在整流工况时,下部晶闸管接通电源侧电流,上部自换流的晶闸管关断电源侧电流,并进入 I_d 的续流过程。在逆变工况下,两个换流组的功能颠倒过来。

电源侧电流由1/2周期的矩形波组成,矩形波的始端和终端由各自换流组的控制角决定。通过选择控制角可阻止基波无功功率送到电源侧,但不影响谐波功率,故功率因数 λ 小于1。功率因数对控制比的依赖关系如图4-2-8所示。这些曲线是在忽略换流现象和假定

直流电流无纹波的基础上计算得出的，有关换流现象和有纹波直流电流的详细分析将在以后发表。如果选择适当的控制使得基波无功功率为零，即可证明图 4—2—8 的曲线误差并不大。

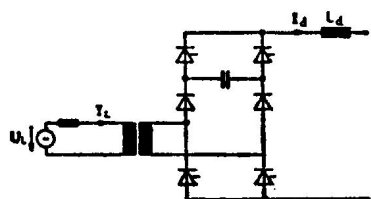


图 4—2—7 自换流式单相电源侧变流器

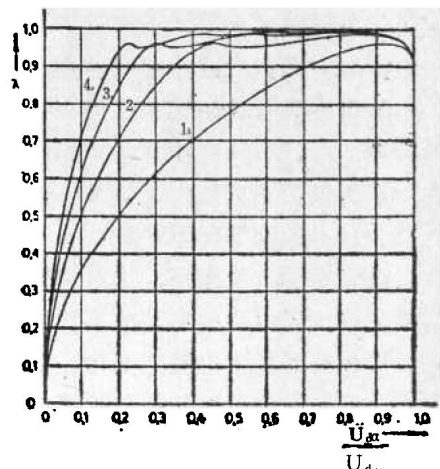


图 4—2—8 多段控制下功率因数与控制比的关系

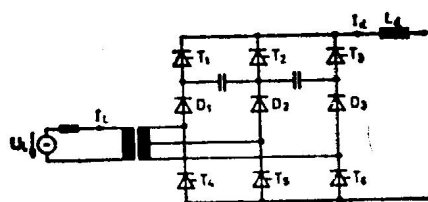


图 4—2—9 带有二段控制的自换流单相电源侧变流器

为了改善功率因数，可把连接到变压器抽头上的附加支路加到电源侧变流器上，图 4—2—9 示出了电源侧电流二段控制变流器的主电路。由图 4—2—8 的曲线 2 可查出改善的功率因数值，图 4—2—8 还表明通过三段和四段控制可进一步改善功率因数，曲线 3 和曲线 4 为其相应的曲线。带有二段控制的整个变流系统如图 4—2—10 所示^[11]。它由带有二段控制的自换流电源侧变流器和带有公共直流环节的电机侧变流器组成。图 4—2—11 和图 4—2—12 给出了电源侧和电机侧的电流和电压的示波器波形。

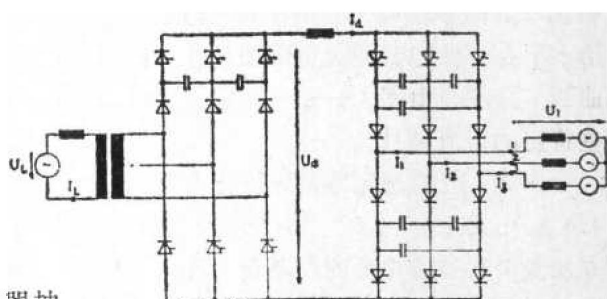


图 4—2—10 带有直流环节的交流变流器

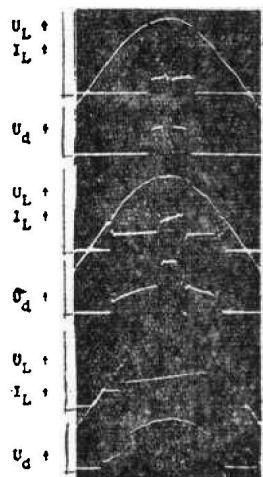


图 4—2—11 二段控制在不同控制比下的电源侧电压电流波形

(五) 无明显直流环节的 直接交流变流器

图 4—2—1 (c) 所示的直接交流变流器对于应用来说，似乎显得简单了一些，其实不然，按照在第一部分提出的要求，变流器的输入和输出应具有接近正弦波形的电流和电压，这就意味着在输入和输出之间存在不等的瞬时功率，且变流器必须具有内部贮能装置。为了提供一个足够的工作范围，电动机频率必须从零变化到高于电网频率，所以变流器

必须具备这种变频能力。

图 4—2—13 所示的变流器基本上是两个六脉冲桥式变流器同一个单相电源和一个三相电源相联，如图 4—2—13 所示^[13]。图中的电抗器是磁耦合的，所以它起互链平波电抗器的作用。电抗器可由电动机侧电抗所代替。

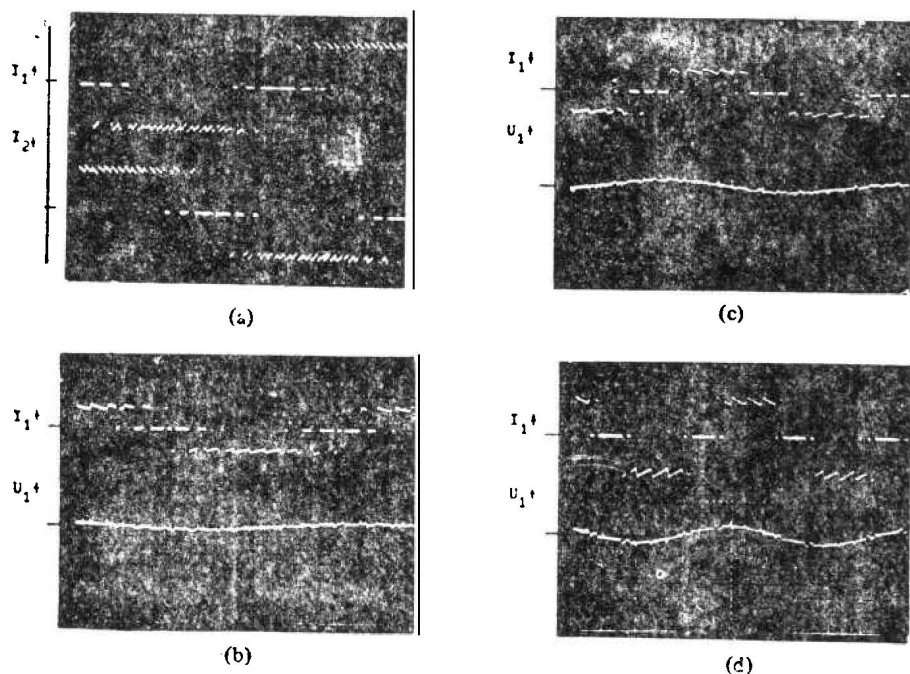


图 4—2—12 在不同负载和频率条件下的电机侧电压和脉冲电流波形

- (a) $m = 9$, $t = 50 \text{ ms/cm}$, $\bar{I}_1, \bar{I}_2 = 19 \text{ A}$, $\cos \varphi = 0$;
 (b) $m = 7$, $t = 20 \text{ ms/cm}$, $U_1 = 10 \text{ V}$, $\bar{I}_1 = 19 \text{ A}$, $\cos \varphi = 0$;
 (c) $m = 5$, $t = 20 \text{ ms/cm}$, $U_1 = 15 \text{ V}$, $\bar{I}_1 = 19 \text{ A}$, $\cos \varphi = 0$;
 (d) $m = 3$, $t = 20 \text{ ms/cm}$, $U_1 = 20 \text{ V}$, $\bar{I}_1 = 28 \text{ A}$, $\cos \varphi = 0.5$ 。

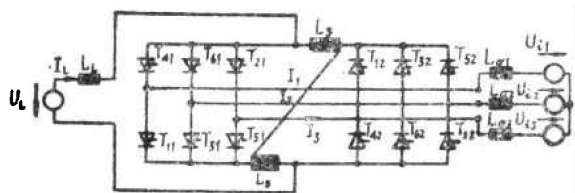


图 4—2—13 无明显直流电流环节的电动机换流直接变流器

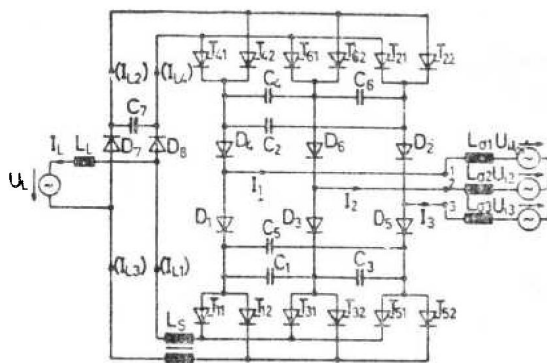


图 4—2—14 无明显直流电流环节的自换流直接变流器

当这个变流器由任一侧电源进行换流时，电源电压必须供给无功功率。三相电源可采用一台同步电机。

下面我们讨论这种自换流型的变流器，它能够为感应电动机供电并改善电源的功率因数。图 4—2—14 给出的变流器，其换流电路类型和前述相同。为了使电机侧和电源侧都具有自换