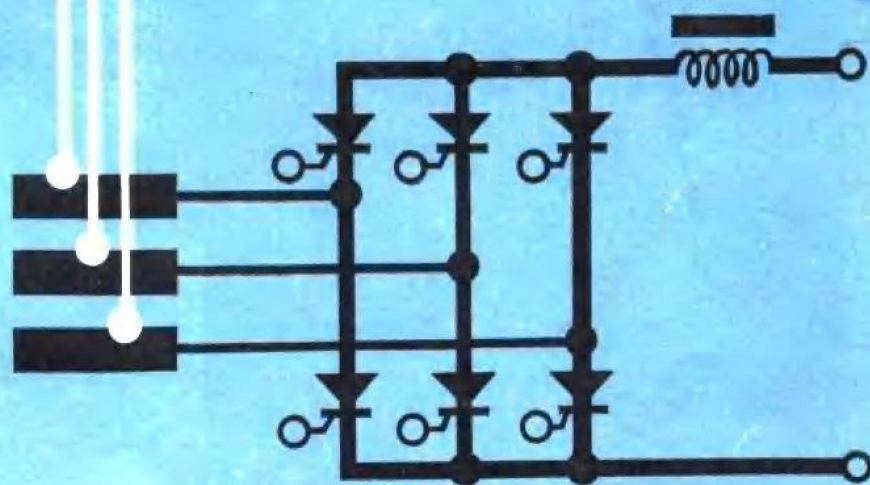


交流电动机的 可控硅控制



〔英〕约翰 M.D.墨菲著

臧英杰 陈效国 邵丙衡 郑瞳炽 译 中国铁道出版社

内 容 简 介

全书共分十章和两个附录。对交流传动的基本原理、存在问题、解决方法,技术经济效果和适应性等都作了较全面的阐述。其中着重介绍由静止变频器供电的鼠笼式感应电动机和同步磁阻式电动机的交流传动。

本书可供有关专业研究生作为功率电子学和电机课的教学参考书,也可供从事这方面工作的工程技术人员参考。

Thyristor Control of A.C. Motors by J.M.D. MURPHY

Pergamon Press Ltd., 1973

交流电动机的可控硅控制

〔英〕约翰 M.D. 墨菲著

臧英杰、陈効国、邵丙衡、郑瞳炽 译

中国铁道出版社出版

责任编辑 杨宾华 封面设计 王毓平

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本: 787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张: 8.5 字数: 210 千

1983年1月 第1版 1983年1月 第1次印刷

印数: 0001—8,000册 定价: 0.95元

译 者 序

现代应用的许多变速传动系统，在要求能精确和连续地调速的同时，还必须具有持续的稳定性和较好的瞬态性能。直流电动机是可以满足这些要求的。但是，由于直流电动机在容量、体积、重量、成本、制造和运行维护方面都较交流电动机逊色，所以长期以来人们力求用交流电动机代替直流电动机，只是因为交流电动机本身的调速性能差，在固定电源频率下，难于达到满意的调速目的，才迟迟得不到发展。近20年来，由于大功率晶体管和可控硅的发展，提供了大功率静止变频交流电源，从而使变频交流传动得到新的发展。为了使有关人员交流传动方面的问题有一个较全面的了解，我们将国际电工专题论著丛书 (International Series of Monographs in Electrical Engineering) 中的第六卷，J. M. D. 墨菲著的《Thyristor Control of A.C. Motors》一书译出，供读者学习参考。

全书共分十章和两个附录，对交流传动的基本原理、存在问题、解决方法、技术经济效益和适应性等都作了较全面的阐述。其中着重介绍由静止变频器供电的鼠笼式感应电动机和同步磁阻式电动机的交流传动。

本书可供有关专业研究生作为功率电子学和电机课的教学参考书，也可供从事这方面工作的工程技术人员参考。

参加本书翻译工作的有：臧英杰（原序、第一、五、六章和附录A）、陈効国（第二、四章和附录B）、邵丙衡（第三、十章）、郑瞳炽（第七、八、九章），并由郑瞳炽校阅全书译稿。

在翻译过程中，我们对原书文字、公式、图和图注中已发现的错误作了修改，重要的地方做了译注。由于译者水平有限，译文中难免有缺点错误，欢迎读者提出批评指正。

译 者
1979年1月

原 序

晶闸管或可控硅整流器*是一种能够控制大电流的半导体器件,自1957年问世以来,十五年间已使电力控制和变换领域发生了革命性的变化。近年来,大功率晶体管的容量也显著增大,因而,汞弧整流器、电动发电机组以及饱和电抗器都已被使用功率二极管、功率晶体管和可控硅的固态电路所取代。

在电动机控制领域中,固态功率电子学已展现出新的前景。由蓄电池供电的电动车辆样机使用了可控硅控制的电动机。可控硅传动系统已广泛地用于整个工业系统中。现在,在一般工业运用中,已普遍选用由可控硅变流器供电的直流电动机作为变速传动装置。本书所讨论的是采用交流电动机而不是直流电动机的固态变速传动系统。静止变频交流传动装置采用由静止变频器供电的鼠笼式感应电动机或同步磁阻电动机。这给出了一种多性能、可靠的变速机械,它比一般的变速传动系统具有精度高、可靠性好、维护少以及效率高等优点。对于静止交流传动装置的主要异议是在经济性方面,因为通常认为静止变频器的成本太高。但是,大功率半导体的价格随着生产量的增长和制造技术的改进在逐步下降,因此,固态交流传动装置的前途是毋庸置疑的。

交流电动机取代直流电机也有其经济意义,因为,由于需要精心制作的换向器结构而增加制造工时和材料成本,削弱了直流电动机的地位。机械换向器的缺点是众所周知的,而可控硅控制的直流电动机传动装置也比某些交流电动机固态传动装置产生更大的交流电源畸变。

由于这样一些因素,以及对固态交流传动装置性能的深入了解,它必然会获得更为广泛的应用。当要求非常精确地调速或精确速度配合时,固态交流传动装置是达到前所未有的精度和可靠性的典范。目前在几个千瓦至几千个千瓦的功率范围内是很可取的。随着固态交流传动装置经济性的改善,也意味着它将逐渐用于一般工业中。

本书打算作为掌握可控硅的大功率静止变流器的基本理论和实际应用的一个入门,详细讨论有关交流电动机调速线路的应用。本书可做为研究生和同等学历的人员在功率电子学和电机学方面的课程,也可供那些希望熟悉进展很快的可控硅控制领域近况的在职工程师和需要详细了解、购买或使用固态交流传动装置的人作为入门课本。也希望成为积极从事这方面工作的工程师的有用参考书。

第一章,叙述交流电动机工作的基本原理;第二章,进一步叙述整流器和逆变器的基本理论。另外,还有两个附录:附录A是关于感应电动机的基本理论;附录B是关于可控硅的基本理论。这样,就尽可能使此书自成系统,以期对于一个工程师或者对于一个在电机或电子方面有一定基础的大学生都同样能够明了易懂。

从目录可以看出本书的范围,它包括这样一些题目:静止逆变器和循环变频器的理论;电源谐波对交流电动机性能的影响;由变频器供电的交流电动机传动系统稳定性;感应电动

* 晶闸管原文Thyristor,常缩写为T或TH;可控硅整流器原文Silicon Controlled Rectifier,常缩写为SCR。为简单统一起见,以下均一律译为可控硅——译者。

机的可控滑差运行；变流器负载对交流电源的影响；静止逆变器的详细说明等。当允许适当地降低性能标准时，使用感应电动机的定子调压或线绕式转子感应电动机滑差能量再生的方法，可得到既满足技术上的要求，成本又较低廉的交流传动装置。这样一些技术问题，本书也将加以讨论。

本书讨论的详细内容已在各种杂志和会议上讨论过了，但本书试图对这方面的理论和实践加以综合说明。据作者所知，还没有这样的教科书出版过。

我诚恳地向那些在此书的写作过程中曾经鼓励并帮助过我的人表示感谢。

科克学院
约翰 M.D.墨菲

目 录

第一章 变频交流传动系统的原理	1
§ 1-1 引言	1
§ 1-2 变速传动装置的选择	1
§ 1-3 恒伏特/赫比运行	3
§ 1-4 变频交流电源的产生	3
§ 1-5 交流电动机的变频运行	6
第二章 静止整流和逆变引论	10
§ 2-1 可控硅	10
§ 2-2 可控硅换向	11
§ 2-3 强迫换向的单相桥式逆变器	12
§ 2-4 单相交流电路的自然换向	14
§ 2-5 多相交流电路的相控整流和逆变	17
§ 2-6 三相桥式相控整流器	24
第三章 具有直流环节的变流器	27
§ 3-1 引言	27
§ 3-2 基本的三相六阶梯波逆变器电路	27
§ 3-3 谐波的抵消	31
§ 3-4 强迫换向的方法	33
§ 3-5 频率控制	39
§ 3-6 电压控制	39
§ 3-7 控制电路	48
§ 3-8 再生制动和动力制动	49
第四章 相控循环变频器	51
§ 4-1 引言	51
§ 4-2 基本工作原理	51
§ 4-3 循环变频器电路的一些关系	55
§ 4-4 调频和调压	59
§ 4-5 循环变频器与有直流环节变流器的比较	60
第五章 交流电动机在非正弦波形电源下的运行	62
§ 5-1 引言	62
§ 5-2 气隙磁动势谐波	62
§ 5-3 交流电动机的谐波性能	65
§ 5-4 非正弦电源下电动机的损耗	70
§ 5-5 谐波转矩	72

§ 5-6	电动机的不稳定性	73
§ 5-7	六阶梯波电流源运行	75
§ 5-8	分析方法	75
第六章	感应电动机的变频运行	76
§ 6-1	引言	76
§ 6-2	恒伏特/赫比时的稳态性能	76
§ 6-3	恒磁通运行	81
§ 6-4	恒电流运行	83
§ 6-5	调频感应电动机的暂态性能	84
§ 6-6	闭环运行	85
§ 6-7	可控滑差传动	86
第七章	静止变频交流传动	90
§ 7-1	引言	90
§ 7-2	静止逆变器定额	90
§ 7-3	电动机的详细说明	94
§ 7-4	可控硅电路	96
§ 7-5	运行的连续性	100
§ 7-6	由静止变流器所产生的谐波畸变	101
§ 7-7	静止变频交流传动系统的经济性	102
第八章	无换向器直流电动机	104
§ 8-1	引言	104
§ 8-2	固态换向	104
§ 8-3	特殊的无换向器电动机	106
第九章	改变定子电压的感应电动机调速	111
§ 9-1	引言	111
§ 9-2	定子调压原理	112
§ 9-3	实际电路	113
§ 9-4	整周波控制	115
第十章	感应电动机的静止变流器串级调速	116
§ 10-1	引言	116
§ 10-2	滑差能量再生的原理	116
§ 10-3	亚同步静止变流器串级调速	117
§ 10-4	超同步静止变流器串级调速	122
§ 10-5	转子电阻的静止控制	122
附录 A	多相感应电动机的基本理论	124
附录 B	可控硅的双晶体管模拟	127

第一章 变频交流传动系统的原理

§ 1-1 引言

许多现代变速传动系统, 要求有精确而连续的速度控制以及持续稳定性和良好的瞬态性能。在许多应用中, 直流电动机已很好地满足了这些要求, 但是机械式换向器常常是不合乎希望的(需要定期维护)。当不允许工作中断或者电动机用于难以接近的场合时, 这就造成了困难。交流电动机, 象鼠笼式感应电动机和同步磁阻电动机, 有一个坚实的转子结构, 允许在高速下可靠地运转而无需维护。转子结构简单还使电机的价格较便宜、功率/重量之比较高。遗憾的是, 当由一个标准固定频率的交流电源供电时, 感应电动机和磁阻电动机两者都是硬速度特性。磁阻电动机以同步转速运行, 此同步转速决定于电源频率和定子所绕极数。感应电动机则在稍低于同步转速下运行。对于减速间歇运行、感应电动机用定子调压方法可得满意的结果(第九章)。用滑差能量再生的变流器串级方法可使线绕式转子感应电动机得到亚同步转速控制(第十章)。然而, 只是在有变频交流电源可用时, 磁阻电动机或鼠笼式感应电动机才可能有有效的宽范围调速。因此, 在本书中, 注意力主要是集中在使交流电动机得到变速运行的变频方法上。

至今, 交流电动机的各种调速方法, 常常需要辅助的旋转电机。现在, 使用可控硅作为固态开关器件的静止交流传动装置, 已在欧洲和美国发展起来并供应市场。随着可控硅的降价及其性能的了解, 对固体交流传动系统已产生越来越大的兴趣, 因而, 特别是变频传动系统正日益增多地应用于工业中。

在静止变频器中, 把固定频率的交流电源电压变为可变频率的输出电压, 用以供给普通的交流电动机。在本书中, 注意力集中在应用可控硅的静止变频器上, 但是书中的大部分内容也适用于使用晶体管的变流器。现在, 已有参数为几十安培和数百伏特的大功率晶体管供应, 而且, 对于容量小于5千伏安的逆变器, 用晶体管逆变器可以比用可控硅逆变器更便宜。所以, 对于小于5马力的交流电动机传动系统, 晶体管逆变器在经济上是有竞争力的。但是, 对于更大功率的系统还必须用可控硅。

§ 1-2 变速传动装置的选择

对于某一具体的应用, 选择变频传动装置的问题, 就是选择一个系统, 能更经济地提供需要的调速范围, 并达到所要求的精度和速度响应。已广泛地使用交流整流子电动机, 因为它可以由交流电源直接供电。但对于可在很宽范围连续调速的可逆传动装置来说, 直流电动机则是很普遍的解决方法。可以用改变电枢电压和励磁电流的方法对他励直流电动机进行迅速而有效的控制。近年来, 用静止变流器的方法已经可以从交流电网得到直流电源, 静止变流器将交流电压可控整流, 从而为电枢提供一个可变直流电压。采用闭环反馈的方法, 可达到精确的速度控制。

然而，直流电动机不是电动机变速运行的理想解决办法。换向器由大量的铜片组成，铜片之间用云母绝缘薄片隔开。这种费工时的结构增加了直流电动机的成本并降低了功率/重量比。电刷火花加重了电刷和换向器间的磨损，并且，云母绝缘限制了换向片间的电压。因此，总的电枢电压被限制在最大值为1500伏左右。由于换向困难，电枢电流的大小及其变化率受到约束，因此直流电机的转速也受限制；另一方面，鼠笼式感应电动机有一个常常由整体铸成的短路绕组所构成的转子电路。转子导条与周围的迭片之间无需绝缘。因而，鼠笼转子惯量小，能在高温和高速下延长运行周期而无需维修。此外，鼠笼式感应电动机的价格仅为同样转速和马力的直流电动机价格的1/6左右。鼠笼式电动机的功率/重量比约为直流电动机的两倍。并且，由于定子电流不受换向的限制，可以制造功率大得多的感应电动机，而定子电压可达15千伏或更高些。因此，很明显，这就是为什么人们做了许多努力以期得到经济而有效的鼠笼式感应电动机速度控制。在恒定频率电源下，用降低定子电压的方法可以达到一定的速度变化范围，但是为了得到足够宽的调速范围，则必须改变定子的频率。

用旋转机组或静止变频器的变频电源设备价钱太贵。因而，变频设备的高价格常常抵消了用较便宜的鼠笼式电动机代替直流电动机所节约下来的钱。然而，由静止变频器提供的变速传动系统，在精度和可靠性方面的性能是前所未有的。并且由于性能的改善和较低的运行费用，常常证明较大的一次投资还是可取的。在许多台小电机同时由同一频率电源供电的多电动机系统中，变频传动特别具有吸引力。在这种应用中，由于包括许多电动机，电机的费用显著减少，可以证明变频器的花费还是合理的。如果这些电动机需要在精密配合的转速下运行，则变频系统就有很大的优越性，因为现代的静止变频器能送出一个精度很高并且持续稳定的输出频率。当以此精确的频率输出向同步电动机或磁阻电动机供电时，可得到同样精度和稳定性的轴转速。各电机间使用不同的传动比或极数，可得到正确的速比；另一方面，可采用数字控制技术。永磁同步电动机或磁阻电动机用以保持无刷结构的优点。这类现代静止传动装置已能在任何整定转速上提供精度为0.001%或更高精度的转速，这是超过任何其他可用的方法的。这种多电动机传动系统广泛用于纺织工业、合成纤维工业、造纸工业和各种需要严格速度配合以保证产品质量的生产流水线中。在这些应用中，可靠地运行也是重要的，因为系统的故障可导致生产的重大损失。静止变频器和标准的无刷交流电动机保证了这种可靠性。单电机的变频传动系统已用于以其它调速方法达不到足够控制精度的地方，还用于有害的工业环境中和那些由于需要经常维护而不能使用换向器电动机的地方。

静止变频器包括许多专门的电子线路，因而维修方面可能出现一些暂时困难。但是，由于采用活动单元的组件结构技术，可很容易地判明故障的电路单元并加以更换。然后，故障组件的维修可由熟练的修理人员在更有利的条件下去完成。采用整块集成电路技术可提高电子控制电路的可靠性。如果不超出制造厂家给出的技术规格，可控硅本身的寿命是无限的。瞬态电流定额是有规定的，必须注意遵守。这就可能需要加大可控硅变流器的容量以便能够输出电动机大的起动电流。第七章更全面地讨论了这方面的问题。

在发展的初期，可控硅元件的价格过高。但现在随着产量的增长正在逐步降低。因此，使用静止变频器的交流调速系统与一些公认的调速方法相比具有日益增长的竞争力。这种竞争力表现在这种设备广泛地应用以及有很宽的功率范围，从几个千伏安至几百个千伏安的，现在各制造厂家是有供应的。在今后若干年内，随着电路的继续发展和可控硅价格的降低，无疑地，用于变速的静止变频器的应用将逐渐更加重要。

§ 1-3 恒伏特/赫比运行

给电动机或变压器提供变频电源的静止变流器，还必须同时改变其端电压，使电压作为频率的函数，以便保持铁芯中适当的磁状态。实际上磁性器件通常运行在近于饱和的状态，以充分利用铁芯材料。当工作频率降低时，外加电压必须成比例地降低，否则磁密将过饱和而导致铁耗和励磁电流过大。当工作频率增大时，外加电压必须成比例地增大，以保持磁密不变。这可以这样来理解，即当磁密保持不变时，绕组中的感应电动势与磁通变化率成比例。当工作频率增大时，磁通变化率也增加了，因而，当磁通幅值为常数时，感应电动势随频率成线性增加。当把交流电压加到忽略了电阻的电动机或者变压器绕组上时，在每一瞬间必感应出一个与电源电压大小相等而方向相反的反电势。与绕组匝链的脉动磁通自动地调节其幅值，以满足这种条件。这就是说，为了保持磁通为常数，外加电压和反电势必须随频率成线性增加，即外加的伏特/赫比必须保持常数。这种运行方式称为恒伏特/赫比运行或恒伏特/周波比运行。

许多变频传动系统需要恒转矩输出，如果由固定伏特/赫比电源供电而使电动机中的气隙磁通保持常数，这就可以办到。但是，上述分析是假定绕组的电阻可忽略不计，然而，实际上，在低频时，绕组的电阻压降变得足以和感应电势相比，这引起气隙磁通和电动机转矩的降低。为了保持低速时转矩不变，在频率低于20赫左右时，必须增大伏特/赫比。

§ 1-4 变频交流电源的产生

用变频电源去控制交流电动机的转速的想法并不是新东西，而且旋转变频机已使用了许多年。变频电源主要用于工厂的多电动机传动系统中以及那些选用高工作频率以便允许使用坚实的交流电动机的特殊应用场合。现在，用旋转电机产生变频交流电源的方法，大部分正在被静止变频的方法所取代。

一、旋转变频机

旋转变频机可包括一个被变速拖动的同步交流发电机以产生变频电源。如果励磁电流保持不变，交流发电机输出的伏特/赫比恒定，则输出电压和频率两者都与转速成比例。在低速时，增加励磁电源，可使伏特/赫比升高以适应低频运行。交流发电机由直流电动机或整流子交流电动机变速拖动，而旋转机组放在对换向器便于维修的地方，被调速的交流电动机则安置在危险并难于接近的地方。

二、静止变频器

如果用静止变频电源取代旋转变频机，则变速交流系统的性能和可靠性可得到改善。为了得到高效率，就需要用静止的开关器件。这种器件只有“通”或“断”两种状态。在通状态时，接近于一个理想的闭合开关，它的电压降为零，而电流仅决定于外电路。在断状态时，接近于一个理想的断开的开关，其阻抗无限大，而电路的电流被阻断。如果这种固态开

关能用小功率控制信号触发，由断状态转为通状态，则这种开关即可用于变流器电路以产生变频交流电压。从这种意义上讲，可以使用栅控汞弧整流器和闸流管，而现今使用的许多电路就是最初使用这些器件发展起来的。但是，这些早期的电路，无论在技术上或在经济上都不是很有吸引力的，因而没有为工业上所采用。可控硅的发展（可控硅是闸流管的半导体复制品）以及它在大功率定额时的可用性，给产生静止变频交流电源的方法一个新的推动，而且许多早期的电路已经被更新和改进。

和闸流管的情况一样，可在触发极即控制极上外加一信号使可控硅触发而导通。但是，象闸流管一样，导通后的可控硅不能藉外加的信号断开它。所说的断开或换流，只有在阻断闸流管或可控硅的阳极电流时才能办到。如果一个可控硅电路是由交流电源供电，交流电压每半周的自然反向可用以使可控硅电流减小至零，如此即产生自然换向。在由直流电源供电时，电流不能自然地降至零，因此必须使用强迫换向。这种方法通常应用辅助充电电容器，以强迫导通的可控硅中的电流降至零。

对静止变频器重新感兴趣是由于与闸流管相比，可控硅的特性改进了。可控硅是一种高效率的开关器件，因为在导通时的管压降仅1伏左右；相比之下，闸流管和汞弧管的管压降为20伏或更大一些。此外，可控硅的开关时间也比闸流管的开关时间低一个数量级。减小了的关断时间可以大大地减小达到强迫换向所需要的辅助装置。可控硅还是一种比较坚固和耐用的器件，而且，即使连同它的散热器在内仍是较紧凑的。作为一种半导体器件，可控硅无需加热时间，因而取消了闸流管的灯丝加热电源。

静止变频器有直流环节的变流器和循环变频器两种基本型式。图1—1为有直流环节变流器的方框图。三相交流电源首先由一个标准的整流器整流为直流，而所得的直流电源再供给静止逆变器。逆变器是将直流电变为交流电的设备，而静止逆变器使用按一定顺序开关的可控硅（或晶体管）以输出一个交变电压波形供给交流电动机。已发展了许多合适的逆变器电路并在文献中叙述过了。输出频率决定于逆变器可控硅的触发导通速率、而这是受基准振荡器和逻辑电路控制的，它们产生并按正确的顺序分配触发脉冲给各个可控硅。在导通期的末尾，每个可控硅必须由辅助换向电路来关断。第二章和第三章中详细地讨论了静止逆变器电路。

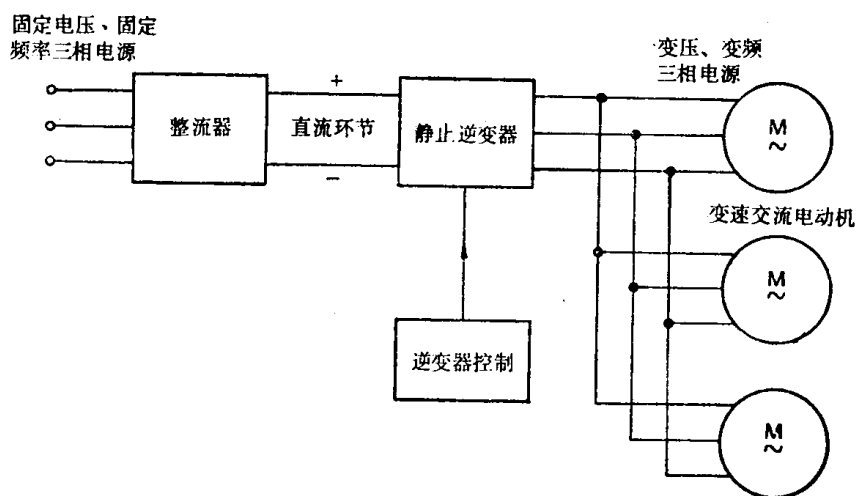


图1—1 用于多电动机交流传动的有直流环节的变流器方框图

改变基准振荡器的频率，逆变器的输出频率可由零调节至数百赫。输出电压波形通常为非正弦形的，但不使用外加的滤波电路。因为在整个频率的宽范围内，难以取得有效的运行效果。所以，逆变器的输出直接供给交流电动机，因而，在确定电动机时必须考虑谐波的影响（第七章）。正常时可以发现，波形的畸变并不引起任何严重的限制，只不过使电动机的定额和效率稍为降低而已。由逆变器供电运行的交流电动机，由于磁通波的不均匀旋转，在转速很低时，还呈现不均匀的步进运动。逆变器的伏特/赫比输出，可用改变加于逆变器输入端的直流电压来控制。或者，可保持输入电压为常数而在逆变器电路内部调节伏特/赫比。可以采用各种调压方法，并在第三章中加以讨论。

静止变频器的第二种基本型式是循环变频器，而且它也已经用于变速交流传动系统中。在循环变频器中，电网的频率直接变为较低的输出频率而无中间整流环节。可控硅用以有选择地将负载与电源接通，而低频的输出电压波形是由电源电压波形的一段段拼成的。输出频率必须小于输入频率的1/3左右。因此，如果输入的是正常的电源频率，则传动装置仅适合于低速电动机工作。然而，输出电压的波形很接近于正弦波，尤其是在低频时。和在静止逆变器一样，输出频率决定于一个独立的基准振荡器，而且输出伏特/赫比也靠控制线路来改变。在第四章中更充分地讨论了循环变频器。

改变电源电压的相序可使三相交流电动机反转。在静止变频器中，反转是靠改变静止逆变器或循环变频器电路中可控硅的触发次序来达到的，而无需切换大电流进线。循环变频器的主要优点之一是它的固有再生运行的能力。这就是说，能流的方向能够倒转，使能量从低频侧送回电源。由于将旋转部分的动能反送到交流电源中去，这可以使电动机迅速地减速。再生制动比动力制动更好，在动力制动中，动能消耗在电阻的损耗上。再生的方法更容易控制，并且使运行更经济。

有直流环节的变流器包含了两次功率转换，但实际上，其效率可达85~95%，并且其输出频率可按应用来选择，然而，简单的直流环节变流器不能再生运行，除非直流环节能将能量回送到交流电网去。这不是一个简单的整流线路可能办到的，而需要附加的线路，这就增加了系统的费用和复杂性。在许多应用中，不需要再生制动，因此，有直流环节的变流器所提供的变速传动装置，与许多常用的方法相比有更大的竞争力。

三、静止变频的优点

静止变频器比旋转变频机具有许多优点，虽然静止系统的一次投资通常较大，尤其是当需要再生制动时。然而，较少的维护量，停机时间的缩短和产品质量的改进，常常可以说明较大的一次投资仍是合理的。

在使用电动机——交流发电机组的旋转变频机中，被控电动机加载时，也使交流发电机及其拖动电动机增加负载，因而输出电压及频率减小。类似地，当若干电动机由同一变频电源供电时，另一台电动机起动，将使送至其它电动机的电压和频率瞬时降低。为了在旋转变频机电源下得到精确的速度控制，必须采用测速发电机反馈的闭环系统。高精度要求有很大的交流发电机和高的闭环增益，随着就有系统不稳定的危险。如上所述，静止变频器的输出频率只决定于独立的基准振荡器。因此，输出频率与交流电源频率和电压的波动完全无关，并且也与负载的变化无关。所以，频率调整率为零。当静止变频器向感应电动机供电时，轴转速和同步转速间有一个决定于负载转矩的转差，但是，当把同步电动机或磁阻电动机用于简单

的开环系统中时,电动机转速仅决定于基准振荡器,从而可以获得非常高的精度和稳定性,而使对负载的转速调整率为零。负载的突然变化虽然可能导致偏离同步转速,但只是瞬时的。

静止变频的其它优点有:

1. 由于不需要费工的基础或仔细地校准机器,因而静止变频器的安装费较低。静止设备占地较小,噪声也较低。
2. 由于效率较高,并且没有随时间而磨损的需要定期更换的运动部件,因此,静止变频器的运用费用也较低。
3. 由于输出电压和频率可在宽范围内单独地改变,使静止变频器更便于控制。同时也便于使用闭环反馈的方法。可以调节它输出的伏特/赫比以适应变速电动机的要求,并且必要时可以产生很大的起动转矩。

§ 1-5 交流电动机的变频运行

静止变频器通常供电给鼠笼式感应电动机或磁阻电动机。现在,对运用于固定频率下的一般交流电动机作一简短的复习,并和变频下的运行进行比较。将在本书中用到的感应电动机的基本公式,在附录A中导出,而变频运行,将在第六章中做更全面的讨论。

一、鼠笼式感应电动机

在感应电动机中,转子绕组是短路的,并且接受从定子感应过来的电源。定子上装一个三相绕组,直接接到三相电源上。这就建立起一个幅值为常数的气隙磁场,此磁场以同步转速 $n_1 = 60f_1/P$ (转/分) 旋转(P 为定子所绕极对数, f_1 为定子电源频率,单位为周/秒或赫)。因此,电动机的同步转速可用改变电源频率 f_1 的办法来控制。如在§ 1-3中说明的,气隙磁通的幅值决定于伏特/赫比。当感应电动机由固定电压和频率的电源供电时,在所有正常负载情况下,气隙磁通近似为常数。定子电源的相序决定了气隙磁场的旋转方向,因而也决定了电机的旋转方向。电机转速 n 通常比同步转速 n_1 仅低百分之几。结果,转子的电动势频率为 $f_2 = sf_1$,此处,滑差率 $s = f_2/f_1 = (n_1 - n)/n_1$ 。转子电流 I_2 滞后于电动势一个转子相角 ϕ_2 ,并且,如附录A中所示,电动机转矩和与电动势同相位的转子电流 $I_2 \cos \phi_2$ 成比例,还与气隙磁通 ϕ 成比例,因而,通常写成

$$T = K \phi I_2 \cos \phi_2 \quad (1-1)$$

式中 K 为比例系数。

图 1-2 表示在标准的固定频率电源下运行时,典型鼠笼式感应电动机的转矩——转速特性。在同步转速时,电动机的转矩为零,在小转差率时,转速随转矩增大而线性地减小。当转子滑差频率增加时,转子的漏抗变大了,因而转子阻抗增加,相角 ϕ_2 也增大。所以,随着滑差的增加,电动机转矩达到最大值而后减小。最大转矩称为颠覆力矩,因为,如果负载力矩超过此峰值,电动机就会停车。在颠覆点上的转子频率称为转子的颠覆频率。如果电动机与向前转的磁场相反是向后转,则滑差率大于1,这时就产生一个反对转子旋转的反转矩。当电机在电动机状态下正常运行时,如果将它的两个定子线端突然反接,则电动机就运行在特性的这个区域。定子线端反接,改变了定子电流的相序,从而就改变了气隙磁场的旋转方向,电机将很快地停车,而且,如果不切断电源,则转子再向相反方向加速。这种制

动或快速使电动机反转的方法叫做反接制动。

转矩——转速曲线也可能延伸到高于同步转速的发电机区域。在此区域，滑差率为负值，电机把轴上的机械能转换为电能反馈到交流电网上去。当转子被其他机械驱动至高于同步转速时，电机就运行在这种状态下。在变频系统中，当电源频率迅速降低时，也会出现发电机运行状态。这时，转子是由负载强行拖动把旋转质量的动能变为电能，

进行再生制动。如果电动机由静止变频器供电，再生功率必须经过变流器反馈到电源去。

标准鼠笼式感应电动机的起动电流为额定电流的 5 至 6 倍，但其起动转矩较小，因为在转子频率高时，转子的功率因数低。在变频系统中，起动时将电源频率降低，这样就改善了转子的功率因数，因而增大了起动时的每安培转矩。调节定子的伏特/赫比也可增大气隙磁通。如此，在启动时，可得到几倍的额定转矩，并且，用提高电源频率的方法可把感应电动机很快地加速起来。用这种起动方法，不会有低频蠕动的危险，而这种低频蠕动，在由固定频率电源启动时，有时会发生。

图 1—3 表示在几种不同定子频率下电动机的转矩特性。调节定子的伏特/赫比使气隙磁通为常数，以保持颠覆转矩为常数。电动机的这些特性适合于拖动恒转矩负载变速运行。同步转速 n_1 与轴转速 n 之差即为滑差转速（转/分），在一定的负载转矩下，在整个速度范围内，滑差转速实际上为常数。这样，如果在额定负载和 50 赫下，电动机的滑差转速为 40 转/分，则在 25 赫时，电动机的滑差转速大约也为 40 转/分。因此，轴转速与电源频率不完全成比例，但对许多实际应用来说已足够接近了。

如果当频率变化时，定子电压保持为常数，则气隙磁通和颠覆转矩随频率的增加而减小（图 1—4）。这样的特性适合于牵引运用。在牵引中，起动和低速时需要大的转矩，而在高速运转时，较小的转矩就够了。

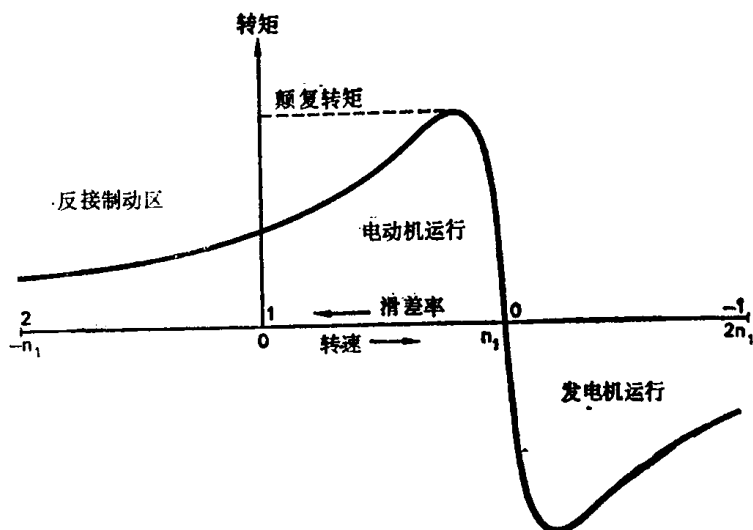


图 1—2 在恒电压和频率下多相感应电动机的转矩——转速特性

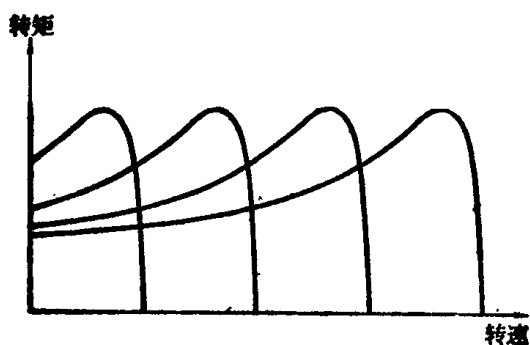


图 1—3 在不同电源频率和恒气隙磁通下感应电动机的转矩——转速特性

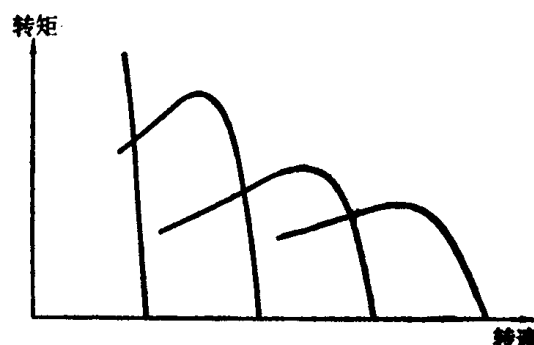


图 1—4 在不同电源频率和恒端电压下感应电动机的转矩——转速特性

感应电动机转矩——转速特性的形状主要决定于转子的电阻，而对于固定频率下的正常

运行，转子电阻的数值是一个折衷数值。转子损耗与滑差成比例，因而，在正常的负载下，转子电阻低，则滑差小，效率高，但是起动电流太大而起动转矩小；另一方面，如转子电阻大，虽改善了起动条件，但满负载时的滑差较大，运行效率降低。当感应电动机用变频电源供电时，起动时可以降低定子频率，因而固定频率下的正常起动条件已不适用。所以，选用低阻转子以改善运行效率。为了减小非正弦电源时的谐波损耗，也希望转子电阻低，因为转子铜耗是附加谐波损耗主要原因之一（第五章）。

通常，只要不超过转子的颠覆频率，感应电动机就运行在高功率因数和高效率下。超过颠覆点后，电动机电流增大，而功率因数降低，每安培转矩和电动机效率变差。感应电动机可运用于闭环反馈系统中，在此系统中，转子滑差频率是可控的，以使运行点总是低于颠覆频率。感应电动机的这种传动形式比用沃德——伦纳德（Ward——Leonard）机组即静止变流器供电的直流电动机具有更好的调速和瞬态性能。可控滑差运行方式在第六章中讨论。

二、同步磁阻电动机

基本的同步磁阻电动机有一个无励磁的凸极式铁磁转子。因此，磁阻电动机不同于一般的、在转子上有直流励磁绕组的同步电机。通常，磁阻转矩是由于铁磁材料有一个使它本身与磁场成一直线的趋势所产生的。图 1—5 表示可用于磁阻电动机的一个两极转子结构。如果定子建立起稳定的磁场，则凸极转子受到一个转矩的作用，此转矩倾向于使极轴即直轴转至与定子磁场轴相一致，这对定子磁通来说是磁阻最小的位置。实际上，定子上装有一个一般的三相绕组，由三相交流电源励磁，建立一个同步旋转的定子磁场。当凸极相对于定子磁通力图保持最小的磁阻位置时，转子即与此磁场完全同步旋转。转子上还装有鼠笼式绕组，电机靠感应电动机的作用起动起来。

当转子的转速接近于同步时，磁阻转矩就迭加在感应电动机转矩上，结果，转子转速在它的平均值附近摆动。只要负载转矩和惯量不是过大，转子的瞬时转速就能增加至同步转速，那时，转子被牵入与定子磁场同步。图 1—6 表示固定电源频率下一条典型的转矩——转速特性。在亚同步转速时，转矩是波动的，其平均值示于图 1—6。转子一旦同步，鼠笼式绕组和定子磁场就同步旋转，这样，在稳定同步运行时，转子绕组就不起作用。只要负载转矩没有超过电动机的失步转矩，电动机就继续同步运行。所谓失步转矩就是使转子失去同步转速所需要的负载转矩。在规定的负载惯量下，转子能牵入同步的最大负载转矩定义为牵入转矩。增大起动电流，可以增大牵入转矩。但是，牵入转矩总是小于失步转矩。

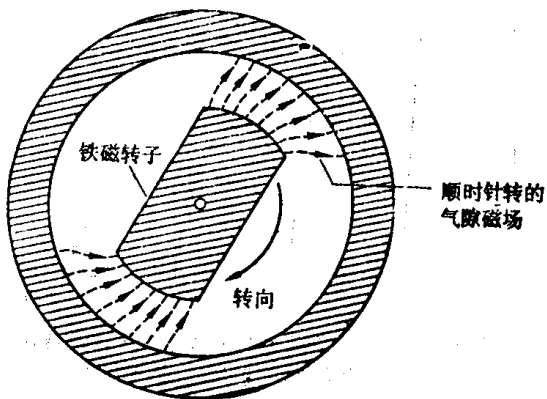


图 1—5 基本的两极磁阻电动机

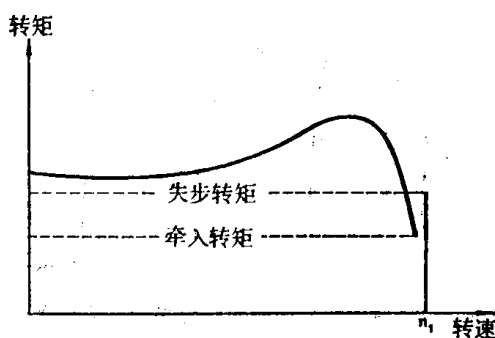


图 1—6 在恒电压和频率下磁阻电动机的转矩——转速特性

直至最近几年，磁阻的原理仅限于用在分马力电动机中，这是因为可靠和坚实的结构这些优点，似乎被低效率、低功率因数、差的转矩/重量比以及大的起动电流抵消了。然而，近来在生产更好的磁阻电动机方面的研制努力已取得成功。采用一种分层式转子结构已造出性能得到改进的容量为 150 马力的磁阻电动机。通常，增加转子磁路的不对称程度可改善同步性能。减小横轴磁通，可增大失步转矩，但电动机的牵入转矩减小，功率因数也受到影响。对于固定频率运行，最后的设计是兼顾这些因素的。现代已经造出的磁阻电动机，它的输出功率为同样尺寸的感应电动机输出功率的 75~85%。据报导，满载效率为 85% 时，功率因数为 0.65~0.75。牺牲功率因数和效率，可使牵入性能得到改进。现在，分层式转子结构的磁阻电动机可使 10 倍于转子的惯量在满负载下牵入同步，而起动电流则仅为满载电流的 4.5 倍。典型的失步转矩为满载转矩的 1.5 倍左右。

当改变电源电压和频率时，象在感应电动机情况下一样，可得到一族转矩——转速曲线。对恒转矩运行，伏特/赫比也必须保持大约为常数，而在低于 20 赫时，电压应升高。磁阻电动机已经广泛地应用于各个电动机之间需要精确速度配合的多电动机传动系统中。如果所有的电动机都是藉增大电源频率同时从静止状态加速，则电机在全部工作时间内都同步运行，它们可按最佳的同步性能设计而不必考虑牵入转矩的需要。可惜，磁阻电动机在低电源频率时，也有不稳定的趋势（第五章），但它是一种便宜、坚固而可靠的同步电机，而且由于现代静止变频器性能的改进，正刺激着磁阻电动机进一步的发展。

第二章 静止整流和逆变引论

§ 2-1 可控硅

使用可控整流器，例如闸流管，栅控汞弧整流器，或者相当于这些元件的现代半导体元件——可控硅，可以完成静止功率变换。

1957年美国通用电气公司首次介绍了可控硅，它是一种静止开关元件，在控制极上用一个小功率信号就可以触发它，使它从阻断状态变成导通状态。在阻断状态时，可控硅相当于断开的开关，通过的电流可以忽略。当可控硅完全导通时，它的作用犹如闭合的开关，电流仅受外电路的限制。可控硅性能的这种简单描绘尚不能解释辅助控制电路和辅助换向电路的作用，为了理解这些问题，我们必须研究元件的物理性能。

普通硅整流二极管是由一个 $P-n$ 结构成，它的 P 层为阳极。

可控硅是一种四层排列的 $P-n-P-n$ 硅（图 2-1）。端部 P 层为阳极，端部 n 层为阴极，而靠近阴极的 P 层为控制极，或称触发极。可控硅的反向特性与硅二极管的反向特性相似，因为当可控硅阳极——阴极间加上反向电压时，可控硅仅流过很小的漏电流，如果反向电压超过临界反向击穿电压，则发生破坏性的击穿。

当阳极——阴极间加上正向电压时，在超过临界正向转折电压 $V_{(B0)}$ 之前，可控硅也仅流过很小漏电流。然后，当超过临界正向转折电压 $V_{(B0)}$ 时，可控硅急剧地转入完全导通状态，不过，这种触发方法，除非制造厂家允许，否则不应采用。

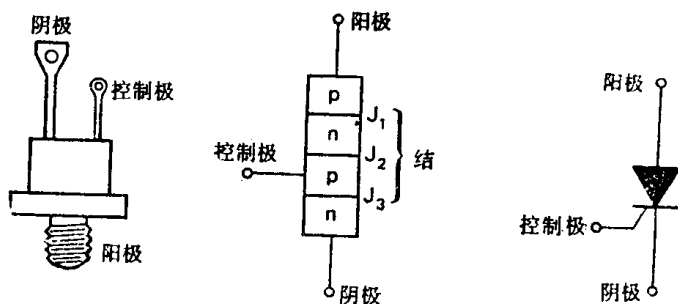


图 2-1 可控硅外形，结构及图形符号

一、控制极触发

通常用注入一个小的外电流使控制极——阴极之间的 J_3 结处于正向偏置的方法来触发可控硅，这种方法的实质是降低正向转折电压（图 2-2）。因此，可以保持外加正向电压低于转折电压值，而后，在所要求的瞬时注入足够的控制电流，使转折电压降低于外加电压而使可控硅触发。从附录 B 中可以看出，把可控硅设想为由两个内联的互补晶体管 $P-n-P$ 及 $n-P-n$ 构成。利用双晶体管模拟，可以解释由控制极触发或由正向转折的可控硅触发机理。

可控硅一旦导通，控制极即失去控制作用，除非去掉控制信号并把正向电流降低到某一个称为维持电流的低电流值以下，否则正向阻断状态就不能恢复。对于 50 安培可控硅，维持电流的典型数值大约是 20 毫安。在正向导通区，可控硅特性与额定电流大致相同的硅二极管