

高等学校教学参考书

現代 交流調速系統

主编	宮入庄太	
著者	柴田孝則	他
翻译	徐崇庶	胡玉雁



中国矿业学院出版社

高等学校教学参考书

现代交流调速系统

主编 宫入庄太

著者 柴田孝则 他

翻译 徐崇庶 胡玉雁

中国矿业学院出版社

内 容 简 介

本书是一本关于交流可控硅电动机和变频调速方面的著作。全书共分八章，主要内容为可控硅电动机，交流电动机的逆变器拖动；交流电动机的交—交变频器驱动，可控硅控制交流电动机的用途、试验，系统的运行，管理以及对可控硅控制交流电动机的展望。

本书可以作为大专院校自动化专业的专业课教材或教学参考书，还可供各工业部门从事有关工作的电工技术人员使用。

责任编辑 胡玉雁

パワーエレクトロニクスによる

交流電動機の可変速駆動

監修 宮入庄太

著者 柴田孝則

他

電機大学出版局1983年

高等学校教学参考书

现代交流调速系统

主编 宫入庄太

著者 柴田孝則

他

翻译 徐崇庶 胡玉雁

中国矿业学院出版社出版

江苏省新华书店发行 中国矿业学院印刷厂印刷

开本787×1092毫米1/16 印张9.75 字数234千字

1987年4月第1版 1987年4月第1次印刷

印份1—2300册

ISBN 7-81021-001-7/TD·2

统一书号：15443·012 定价：1.70元

前 言

《现代交流调速系统》（原书名“可控硅电动机的调速拖动”，由审校者建议改为现名）是由日本东京工业大学名誉教授，东京电机大学教授宫入庄太主编，柴田孝则等执笔的，关于交流可控硅电动机和变频调速方面的著作。该书特点是选材紧凑、合适，原理阐述清晰，结合实际应用较为紧密，是一本较好的大学教材和参考书，对于现场工作的电工技术人员也很有参考价值。关于全书较详细的介绍见原序。

本书由北京联合大学自动化工程学院信息系徐崇庠同志和煤炭部教育司教材编辑室胡玉雁同志合译，由中国矿业学院自动化系系主任谢挂怀教授审校。谢先生在审校过程中提出不少宝贵意见，在此特别致以衷心地感谢。

译 者

一九八五年六月

原 序

电动机的应用技术是从发明电之后不久开始的，到今天已有很长的历史了。这期间它的进展是惊人的，几乎应用于所有的工业部门。现在，电力仍然是工业的主要动力，在这些工业领域中，需要控制电动机速度的场合是很多的，也是很重要的。

近几年以半导体为中心发展起来的电子学技术，在大功率领域也得到了发展，其中应用可控硅的逆变器和交-交变频器的能量变换技术和电力应用相结合，在交流电动机的速度控制方面开创了新的方向。交流电动机历来作为可调速电动机代表的直流电动机相比，具有坚固性、体积小、重量轻以及维护容易等优点，所以在调速这个新的领域中，将引起人们的极大兴趣。

本书是在交流电动机的调速控制技术方面，以最一般的可控硅电动机、逆变器和交-交变频器等驱动方式为代表归纳整理而成。

本书的内容对在电力应用领域中，各种工业部门的电工技术人员的工作，将有很大的帮助，另外也可作为大学电机系学生的参考书。因此，在理论方面为了前后衔接，首先在最基本的原理、特性和结构等方面作最简单的叙述，在这基础上做进一步的理论分析。在应用例子、试验、运用和管理等方面的共同性课题，则在另外章节加以说明。但是由于篇幅关系，在很多方面也不得不删减，像电动机及可控硅本身的构造，已有许多专门书籍加以论述，所以本书只在开头作简单说明，如想深入研究请参考其他专门著作。

作者们虽然是从制造厂的角度讨论这方面的技术，但是由于学识浅薄，在很多方面没能达到最初的意图。今后如有机会将按着广大读者的意见，加以修改补充。另外，本领域的技术目前正在发展，虽然作者是尽量选择了最新的内容，但可能有些内容已经过时。本书的最后部分提出了在本领域中将来的发展方向，随着技术的飞跃发展希望有比本书更丰富的内容出现。

本书的作者参考了许多文献资料，向这些文献资料的作者表示感谢，向对本技术的发展作出贡献的各位先辈表示敬意。

本书的编写还得到日立公司有关各位的大力协助，最后也向提出编写本书的东京电机大学出版社的有关各位表示感谢！

作 者

一九八一年三月

目 录

第一章 可控硅控制交流电动机系统的概况.....	(1)
1.1 调速电动机的变迁	(1)
1.2 可控硅控制交流电动机系统的分类	(1)
1.3 可控硅电动机的概要和分类	(4)
1.4 逆变器和交-交变频器驱动的电动机的概要和分类.....	(8)
第二章 可控硅电动机.....	(9)
2.1 工作原理	(9)
[1] 旋转原理	(9)
[2] 转矩和转速	(11)
2.2 系统和特性	(13)
[1] 直流方式可控硅电动机.....	(13)
[2] 交流方式可控硅电动机.....	(22)
2.3 组成和结构	(26)
[1] 电动机.....	(26)
[2] 无电刷励磁机.....	(28)
[3] 位置检测器.....	(30)
[4] 可控硅变流装置.....	(33)
[5] 控制装置.....	(37)
2.4 理论和分析	(48)
[1] 基本特性方程式	(48)
[2] 电动机的传递特性和控制特性.....	(49)
第三章 交流电动机的逆变器驱动.....	(53)
3.1 工作原理	(53)
3.2 系统和特性	(53)
[1] 电流型逆变器系统和驱动特性.....	(53)
[2] 电压型逆变器系统和驱动特性.....	(59)
[3] 多重逆变器系统.....	(64)
[4] PWM逆变器系统和驱动特性.....	(69)
3.3 构造和组成	(74)
[1] 电动机.....	(74)
[2] 可控硅变流装置.....	(76)
[3] 控制装置.....	(80)
3.4 理论和分析	(82)
[1] 感应电动机的基本特性方程式和传递特性.....	(82)
[2] 同步电动机的基本特性方程式和传递特性.....	(85)

[3] 换流原理.....	(87)
[4] 感应电动机驱动特性的分析.....	(93)
第四章 交流电动机的交-变频器驱动	(99)
4.1 工作原理	(99)
[1] 主回路的构成.....	(99)
[2] 控制方法.....	(100)
[3] 电源功率因数和高次谐波.....	(101)
[4] 上限频率和转矩脉动.....	(102)
4.2 电压型可控硅电动机.....	(102)
[1] 系统和特性.....	(102)
[2] 理论和分析.....	(107)
4.3 感应电动机的矢量控制.....	(109)
[1] 系统和特性.....	(109)
[2] 理论和分析.....	(111)
第五章 可控硅控制交流电动机的用途和应用.....	(116)
5.1 可控硅控制交流电动机的应用领域	(116)
5.2 系统的特性及选择标准	(116)
[1] 选择方式时应注意的方面.....	(116)
[2] 特点和选择标准.....	(118)
5.3 各种工业部门中的应用	(119)
[1] 钢铁工业中的应用.....	(119)
[2] 在一般各种工业设备中的应用.....	(123)
[3] 在电力设备中的应用.....	(124)
[4] 在车辆方面的应用.....	(125)
[5] 在公共设施方面的应用.....	(125)
第六章 试验.....	(127)
6.1 单机试验	(127)
[1] 电动机的本体试验.....	(127)
[2] 位置检测器的试验.....	(127)
[3] 无电刷励磁装置的试验.....	(127)
[4] 可控硅变流器及控制回路的试验.....	(127)
6.2 组合试验	(127)
第七章 系统的运行和管理.....	(132)
7.1 机器的运行和管理	(132)
[1] 运行.....	(132)
[2] 管理.....	(135)
7.2 维护	(135)
[1] 检查项目和方法.....	(136)

〔2〕 安装和操作上应注意之点.....	(137)
7.3 异常情况的检查和解决办法	(140)
第八章 可控硅控制交流电动机的将来动向	(142)
8.1 今后的课题及开发.....	(142)
8.2 将来展望.....	(143)
参考文献.....	(145)

第一章 可控硅控制交流电动机系统的概况

1.1 调速电动机的变迁

在法拉弟 (Michael Faraday) 发现电磁感应现象 (1831年) 之后, 从雅可比 (Jacobi) 发明直流电动机 (1834年) 至今, 直流电动机一直是调速电动机的代表。调速电机的用途非常广泛, 工作母机、钢铁厂的各种传动电机、造纸机、卷扬机、装卸机械和电气铁道等各种工业方面, 多数都使用调速电动机。

直流电动机只要控制电源电压就能简单地改变转速, 而且利用控制定子电压 (或电流) 或励磁电流就可以得到任意的转矩特性的优点。这种直流电动机由于有电刷和换向器等滑动接触机构的存在, 也有不易维护和寿命短等不利的一面。

另一方面, 以阿拉哥 (Arago) 的圆盘 (1820年) 为开端, 经特斯拉 (Tesla), 费拉也斯 (Ferraris) 等人的努力发明了 (1885年) 交流电动机 (感应电动机), 这种电动机没有整流子, 结构简单而坚固; 但是不适合调速。在恒速领域中, 作为代表性的电动机至今还在发展着。

为了进行交流电动机的无级调速, 一般是在输入电压和频率关系一定的条件下进行控制。同直流电动机的情况相比, 需要有另外的装置, 过去用这种方法的实例还不多。尽管如此, 因为交流电动机有坚固, 小形和寿命长等特点, 所以在有级变速能够解决的用途中, 有采用改变极数的方式; 在不太考虑效率和要求不高的控制中, 也有采用控制输入电压方式的例子。另外, 在线绕式感应电动机中, 有控制转子电阻和转子电压的克雷默方式及西皮方式等各种调速方式, 并使用在一些场合中。

在30年代后半期, 开始使用交流电动机之一的同步电动机, 检测转子磁极位置, 以适当的顺序控制与电枢线圈相连的闸流管的导通, 代替直流电动机的换向器和电刷的功能。这种电动机被称为无整流子电动机或闸流管电动机, 成为交流调速电动机的一种形式。

随着时间的流逝, 电动机的控制手段也有很大的变化。从发电机——电动机开始, 经过水银整流器、闸流管, 到今天的硅整流器和可控硅等, 以半导体为中心的功率电子技术继承了这种应用方式。随着控制手段的进展, 也实现了复杂的、高难度的控制。小型、高性能变频技术的开发, 使交流电动机的调速正好满足了工业方面对维护容易和节能的要求, 得到了高速的发展, 而且不论大容量或小容量都适用。最近, 应用功率电子学的交流电动机的调速技术, 在不失去交流电动机本来特征的前提下, 可以实现无级调速, 已经代替了一部分传统的直流电动机的应用领域。

本书是在这种新的交流调速电动机的基础上, 对交流电动机的可控硅驱动和控制加以叙述。

1.2 可控硅控制交流电动机系统的分类

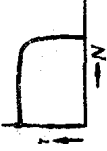
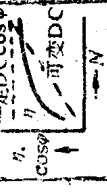
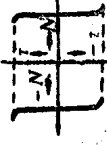
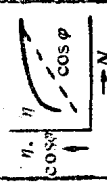
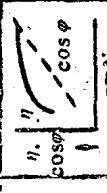
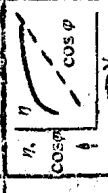
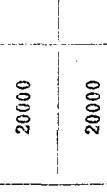
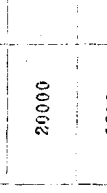
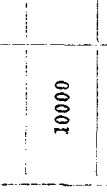
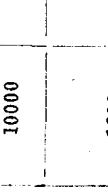
应用可控硅的交流电动机的控制, 从用交流开关控制感应电动机一次电压的简单方式到用逆变器控制频率的高级方式为止, 有多种方式, 可根据用途和目的选择适当的方式。交流电动机有感应电动机和同步电动机两大类, 前者又可分为鼠笼式电动机和线绕式电动机, 后者包括作为无整流子电动机的可控硅电动机。另外根据对交流电动机电压和频率的控制方式, 以及为了控制这些量所采用的与交流电动机相配合的变流器的结构和种类, 又

表1.1

可控硅控制交流电动机的分类(一)

电动机	驱动方式		主要特性		适用范围		备注
	变频器	控制	速度-转矩	效率、功率因数	输出 (kW)	最高速度 (r/min)	
感应电动机	相位控制整流器	一次电压			$10^{-2} \sim 10^3 \cdot 10^4$	3000	1:10 小容量直接启动
	交流开关	一次电压				3000	1:10 小容量反相启动
	电压可逆变流器	一次频率及电压				23000	1:10 适合多台运行
	变压器固定直流感流型逆变器	一次频率及电压				23000	1:10 同上 (GWM)
	电流型逆变器	一次频率及电压				2000	1:10 可以外加减速
绕线式电动机	交-交变频器	一次电压				1500	1:10 同上, 受电网功率因数限制
	相位控制整流器	一次电压	与鼠笼式相同	与鼠笼式相同		1500	1:10
	交流开关	一次电压				1500	1:2
	斩波器	二次电压 (电阻)				3600	1:2
	西皮克雷默	二次电压 (二次励磁)				1800	1:2

表1.1 可控硅控制交流电动机的分类(二)

电动机	驱动方式			主要特性		调速范围	备注
	变频器	控制	电 流 型	速度-转矩	速度-功率因数	最高速度 [r/min]	
同步电动机	电压逆变器	一次频率及电压	可交直流			20000	多台运行
			固定直流			20000	
	电流型逆变器	一次频率及电压	可交直流			20000	多台运行
			固定直流			1200	
可控硅电动机	直流方式	输入电压及磁场电流	可交直流			10000	对急加减速有利
			固定直流			10000	
	交流方式	输入电压及磁场电流	可交直流			10000	同上启动性好
			固定直流			1200	

有各种不同的分类。

表1·1是可控硅控制交流电动机各种分类方式的比较,并绘出了其主要特性和适用范围的示例。本书的内容是以逆变器和交-交变频器驱动的交流电动机和可控硅电动机为中心编写的,这些内容是表内的各种方式中速度控制特性最好的频率控制方式。在本书所讨论的交流调速电机中,作为调频变换装置的可控硅变流器也有各种方式,根据不同的组合,可以构成各种特性的系统。

图1·1是应用频率变换装置的交流电动机调速系统的基本构成。频率变换装置是将任意的直流电源或交流电源变换成适合电动机传动的频率和电压的交流电源。电源为交流时,有从一定频率的交流直接换成任意频率的交流和先变成直流、再变成任意可调频率的交流等两种方式。前者如交-交变频器是直接频率变换装置,后者叫作间接式频率变换装置,其中将直流变成变频交流的部分叫逆变器。

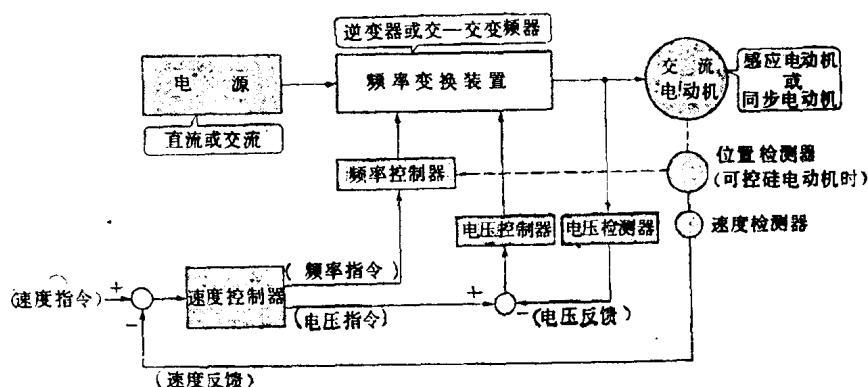


图1·1 逆变器、交-交变频器驱动的交流电动机调速系统

〔注〕 也有省略速度反馈和电压反馈的

包括逆变器和交-交变频器,可控硅变流器按动作形式和特性又有各种分类,归纳起来如表1·2所示。对于使用可控硅电动机的场合,因为变频装置的各个可控硅是根据电动机转子位置检测器的信号进行控制的,所以频率也由它决定,这是可控硅电动机的特点。可控硅电动机使用的是同步电动机,频率和转子转数是同步的,不产生失步等不稳定现象。

下面对可控硅电动机及用逆变器和交-交变频器驱动的电动机的概要和分类加以叙述。

1.3 可控硅电动机的概要和分类

可控硅电动机是由电动机本体(同步电动机)和为了检测转子(磁极)位置,在机械上与转子直接相连的转子位置检测器以及根据位置检测器的信号选择最合适的相,使变流器的可控硅导通的控制装置等构成。如图1·2所示,可控硅电动机是用位置检测器代替原来直流电动机的电刷和换向器。因为电动机本身没有功能,所以多数情况下,可控硅电动机是包括控制装置的总称。

可控硅电动机按所用的变流器种类可分为直流方式(有时也称为逆变器方式)和交流方式(有时也称为交-交变频器方式)两大类。按着变流器的性质又可分为电流型和电压

表1·2

可控硅变换器的各种分类方式

分 类 项 目	分 类 名 称	说 明
电 源 特 性	电 压 型	电压源，内阻低，电压波形是方形波或正弦波。
	电 流 型	电流源，内阻高，电流波形是方形波。
换 流 电 压	自 励 式	由变流器本身提供可控硅的换流电压。
	他 励 式	由交流电源或负荷（电动机）的反电势提供可控硅换流电压。
换 流 手 段	强制换流式	用专用电源强制进行可控硅的换流。
	自然换流式 (电源换流) (负载换流)	依靠电源或负载的反电势进行可控硅的换流。
频 率 的 决 定	自 主 式	变流器的频率由驱动系统的内部决定（闭环方式）
	外 控 式	变流器的频率由外部回路决定（开环方式）
输 出 电 压 的 决 定	逆 变 器 直 流 式 (间 接 式)	变流器的电压经过中间直流决定。
	交—交 变 频 器 交 流 式 (直 接 式)	变流器的电压不经直流直接决定。

型。直流方式只用电流型。在直流方式中，换流是主要问题，按换流方式又可分为自然换流和强制换流。在前者的场合中，因为可控硅的换流是靠电动机的反电势进行的，所以在启动和低速时，多数是采取使电源电流断续的方法。

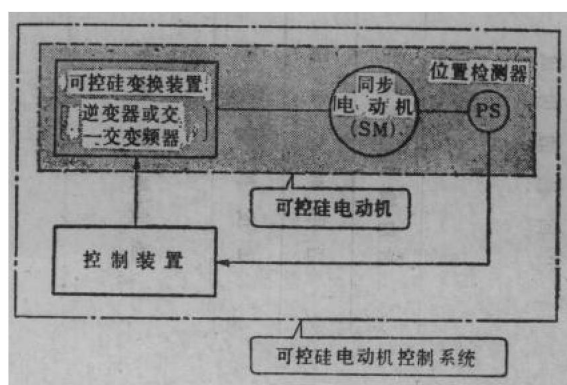


图1·2 可控硅电动机的基本构成（定义）

表1.3 可控硅电动机的方式比较

直流方式(电 流 型)		交流方式	
自然换流式	强制换流式	电 流 型	电 压 型
主回路的构成			
适用输出功率范围	几十~几百 kW	几十~几千 kW	几百~几千 kW
适用转数范围	几百~几千 r/min	几百~几千 r/min (10万 r/min)	几百 r/min 以下
速度控制范围	1:10	1:10	1:10
速度-转矩特性			
特 点	- 主回路构造简单 - 极低速时, 由于直流电流通断, 转矩脉动大。	- 起动转矩大 - 电动机电流和直流方式相同是方波 - 在电源频率和电动频率一致时, 电流在特定可控硅中集中流通	- 适用于大容量低速机 - 电动机电流大致是正弦波 - 转矩脉动小
应 用	鼓风机、泵 扬水发电电动机的起动	车辆及其他 鼓风机、泵 轧钢的主、辅电机	轧钢机、混炼土箱, 其它

表1.4

电压型逆变器和电流型逆变器方式的比较

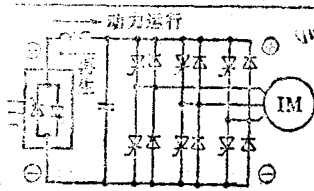
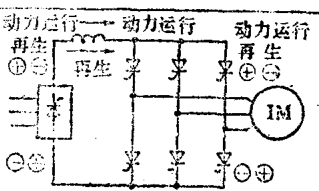
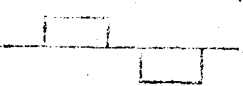
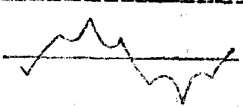
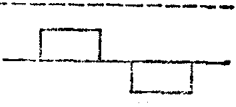
项 目		电压型逆变器方式	电流型逆变器方式
基本构成			
输出波形	电 压		
	电 流		
特 点	无功功率	用反馈二极管处理	用换流回路处理
	电源内阻	小 (电压源)	大 (电流源)
	导通期间	多数桥合180°	120°
	功率再生	对再生制动需要另外的电源变流器 (反并联)	容易进行电动运行-再生制动的控制 (不需要切换主回路接线)
	装置构成	需用大的平滑滤波器	简单 (对小型轻量化有利)
	控制特性和转矩	因为有平滑滤波器对整流器的电流限制缺乏快速反应性。 转矩脉动比较小。	用控制局部电流容易限制输出电流, 具有快速反应性。 转矩脉动比较大。
	用 途	多台同步运行, 用于功率再生。 用于不需要控制快速反应性的场合。	随着功率再生, 进行加速运行。 用于在4象限运行中需要控制快速反应的场合。

表1.3是可控硅电动机分类方式的比较。一般可控硅电动机多数是电流型, 供给泵和鼓风机的驱动用。可控硅电动机的速度控制和直流电动机相同, 是用调节输入电压 (电枢电压) 和励磁电流进行。电枢电压可以由改变可控硅变流器 (整流器) 的控制角来改变; 另外, 可控硅电动机也可以根据可控硅变流器 (有源逆变器) 的超前角进行控制。

在电压型可控硅电动机中, 对应转子的位置, 为了控制正弦波形的电枢电流, 用正弦波位置信号发生装置控制可控硅的导通相位。这种方式的电动机可作为要求转矩波动低、大功率输出的轧钢机等的驱动电动机。

1.4 逆变器和交-交变频器驱动的电动机的概要和分类

最一般的交流电动机的速度控制法是控制电源频率的方式。通常用变频电源驱动交流电动机时,为了避免电动机铁心的饱和,在保持频率和电压之比为定值的条件下,同时控制频率和电压。是用逆变器和交-交变频器控制这个频率和电压的。逆变器可分为本身具有控制电压能力的和依靠外部电路控制输入电压的两种。作为前者的代表例是脉宽调制形(PWM)的逆变器。在这种逆变器中,依靠调节脉冲宽度控制电压,为了减少高次谐波,要将一个周期内的脉冲宽度分别变成等值的正弦波,再加至电动机的端子上。

普通的逆变器一般分为电压型逆变器和电流型逆变器两种,两者的比较如表1.4所示。表内的基本构成图中,为了简单,省略了换流回路。电压型和电流型各有优缺点,应根据用途分别运用。电流型逆变器一般也有因换流动作引起的不稳定现象,在大容量机组、大范围调速和要控制输出功率的场合下,一般不大使用。但是,最近由于稳定控制方式的开发,用途正在扩大。电流型变流器的主回路构成简单,容易进行电动运行-再生制动之间的切换,这是它的最大特点。相反,电压型变流器的稳定性高,适用于多台电动机的并联运行。

作为逆变器的变形的例子,是多台逆变器的多重化,使电动机的输入电压、电流接近正弦波,因而降低转矩的脉动,提高效率。

逆变器是中间经过直流再变成交流,与此相反,交-交变频器是直接从交流变成频率不同的另一种交流,如图1.3所示。以三相半波方式(18臂可控硅方式)和三相全波方式(36臂可控硅方式)为代表,前者用电流型交-交变频器,后者用电压型交-交变频器。电流型和电压型的特性和逆变器相同。对于交-交变频器的方式,原则上不仅不能得到高于电源频率的频率,就是在电源频率的 $1/2$ 附近的特定频率处,也会由于与电源频率的差拍而引起工作的不稳定,所以一般多用在电源频率的 $1/3 \sim 1/2$ 以下的频率范围内。

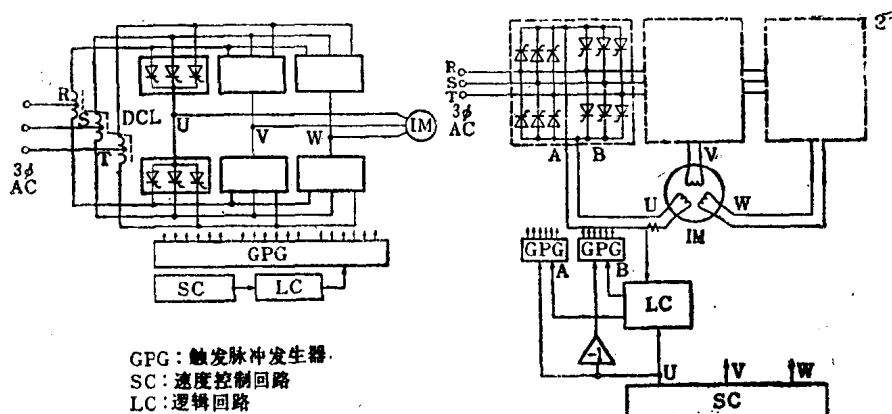


图1.3 交-交变频器的回路构成

(a) 三相半波方式(18臂电流型); (b) 三相全波方式(36臂电压型)

第二章 可控硅电动机

2.1 工作原理

[1] 旋转原理

图2.1表示了可控硅电动机的基本构造,图2.2表示了可控硅电动机的旋转原理。在图2.2中,从 $t=t_1$ 时刻到 t_2 时刻电角度是 60° ,在这个期间可控硅UP和VN导通,电枢绕组U和V中流过电流。其结果,各绕组产生的合成磁动势为如图2.2(a)所示的 F_a 方向,而且由于磁极和磁动势 F_a 的相互作用产生转矩,磁极如图示由A向B旋转。在 $t=t_2$ 时刻磁极到达B,导通的可控硅由VN更换移到WN,电枢绕组U和W中流过电流,磁动势 F_a 的方向转过 60° ,和在 $t=t_1$ 时刻一样,连续不断地旋转。

这个旋转原理可以比作直流电动机的原理。也就是说,如图2.1所示逆变器的可控硅同在直流电动机中的电刷及整流子有同样的作用。图2.3就是说明这些作用的直流电动机模型。这个模型是由三个整流子和两个电刷组成的,正电刷与U相整流子接触的期间同可控硅UP的导通期间相对应,而负电刷与V相整流子接触期间同可控硅VN的导通期间相对应。这时,电枢绕组V~W中流过的电流与图2.2是一样的。电刷确定了感应电动势和电流的相位关系,流过的是与电刷间的电动势方向相反的电流,把电能转换成机械能。

根据位置传感器的信号控制可控硅的导通期间,又按照此导通期间和感应电动势的相角(称控制超前角 β),磁极和磁动势 F_a 的平均相角发生变化。电动机产生的转矩 τ_e 与气隙磁通 Φ 和磁动势 F_a 的向量积成比例,用下式表示。

$$\tau_e = k\Phi \cdot F_a \cdot \cos\beta$$

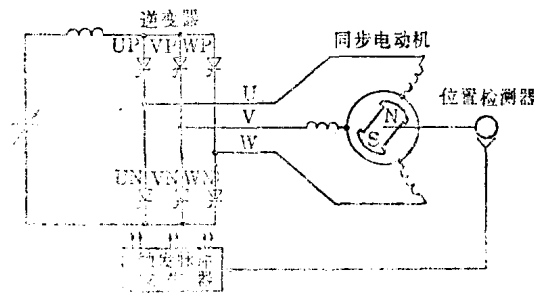


图2.1 可控硅电动机的基本组成图

式中, k 为比例常数。由于转矩的方向随着 $\cos\beta$ 符号的改变而改变,因此通过对超前角 β 的控制,可以使转矩向正或反方向改换,就是后面所讲的正向/反向运转以及电动/再生运转的转换。再者,在前述的等效直流电动机中, β 只不过相当于向前进方向把电刷移动 β 角度,而电刷的厚度(角度)与以后叙述的重叠角 α 相对应。

位置传感器的任务是检测磁极和电枢的相对位置,并如图2.4所示给逆变器的可控硅输入触发脉冲信号。关于其结构将在后面说明。在转子旋转的同时,应该导通的可控硅按顺序变换,这个作用是通过位置传感器的信号控制的,称其为换流。图2.4示出从可控硅UP到可控硅VP换流的情况。在换流前UP与WN导通,直流电流 i_D 流过U相和W相,而此