

专辑
ZHUANJI



可控硅变频调速

KEKONGGUI
BIANPINDIAOSU

科学技术文献出版社重庆分社

(185799002)
(200664581)

目 录

前言 (1)

$\frac{1}{3}$ 工频交交变频装置工业试验总结 重庆钢铁设计院试验室电力组 (5)

移相变频原理在交流调速中的新应用

——扩大变频范围和实现交流电机快速可逆 重庆钢铁设计院电力科 王兴亚 (12)

移相变频装置 重庆钢铁设计院试验室电力组 (23)

第一部分：电气调速传动的发展动向和趋势

交流调速传动系统的技术动向 (31)

变频调速的趋向 (33)

何时采用交流电动机变频传动 (34)

最近的大功率电子学 (38)

最近的大功率可控硅元件 (39)

由GTO和G-T_R构成的电力用变频器 (44)

第二部分：简化变频系统的研究

用微型计算机控制交交变频器 (48)

采样的不确定性在变频触发控制系统中的应用 (53)

方波电源供电的感应电动机特性和设计 (57)

第三部分：交交变频在扩大变频范围上的研究

用通讯原理改善相位控制有环流交交变频器 (65)

第四部分：对变频调速系统的分析研究

非正弦波供电的感应电动机传动的付立叶分析 (68)

由不同频率供电的感应电动机的速度调节 (75)

影响相位控制的交交变频器运行的几个因素 (81)

交交变频器的控制线路 (92)

考虑到定子电流不连续的交交变频器-感应电动机传动系统的分析	(103)
电气传动的速度-转矩传递函数	(114)
同步电动机的调速	(121)
感应电动机的调速	(125)
应用交交变频器原理的静止三相变频电源来	
控制感应电动机的转速	(131)
交交变频传动系统	(141)
应用交交变频器的大容量感应电动机调速	(148)

第五部分：交交变频器的应用

用可控硅交交变频器对三相鼠笼电动机进行精确调速	(152)
交交变频器供电的同步电动机供动装置	
欧洲及北美第一台大型无齿轮球磨机电气传动简介	(158)

第六部分：由交交变频器供电的双馈电动机

用模拟计算机对感应电动机转子回路采用交交变频调速系统的	
模拟研究	(160)
由交交变频器供电的双馈感应电动机	(167)
交流调速传动在泵和压缩机上的应用	(172)

第七部分：交直交变频

运输车辆采用逆变器-感应电动机传动	(176)
交流电动机最优脉宽调制电源	(187)
脉宽调制逆变器-感应电动机传动中磁通和转矩的直接控制	(193)
由电流型逆变器供电的感应电动机传动的稳态和稳定性分析	(200)
大容量同步电动机用可控硅起动装置	(209)
特殊用途的恒功率交流变频装置	(213)
应用“电流型变频器”的感应电动机调速	(220)
应用“电压型变频器”的感应电动机调速	(225)
变频调速装置性能表	(230)

前 言

电子技术的突飞猛进，为各种变频的理论研究和实际应用，创造了有利条件。近几年来，可控硅变频调速传动，有了一些新的进展。从国际上最近的技术发展动态可知，变频装置正在继续开辟新的应用领域。为此，我们选编了变频方面的一部分资料，作为从事此项科研工作者的参考。由于水平所限，一定有不少错误的地方，请指正。

在选编过程中，由于我们对国内变频科研成果了解甚少，因此在本专辑中，只有三篇是介绍国内的“移相变频”原理和应用。其中第一篇“ $\frac{1}{2}$ 工频交交变频装置工业试验总结”，是结合某钢管厂管加工车间辊道传动的实际需要，按移相原理研制的固定频率变频器，这台装置已在生产中正常运行。实践证明，这种变频器结构紧凑，控制系统简单可靠，具有效率高、无噪音、抗干扰能力强、维护方便等优点。

在第二篇“移相变频原理在交流调速中的新应用——扩大变频范围和实现交流电机快速可逆”介绍了从旋转磁场基本概念出发的移相变频原理，按此原理组成的主回路和控制系统，经过理论和图解分析，使输出频率扩大到与电源频率相等，甚至超过电源频率，成为可能，而且在不增加任何控制设备的条件下，仅用调节振荡器脉冲频率的简易方法，即可实现交流电机快速可逆。实验结果与理论分析完全相符。

在第三篇“移相变频器”中，侧重于从实践的方面，提供有关连续变频试验的结果，同时给出了按移相原理构成的控制框图，以及采用双向可控硅组成的主回路和控制系统等。试验结果表明，移相变频器能在平滑调频和调压同时进行的条件下，保持电动机气隙磁通接近恒定，变频范围可从零平滑调到25赫左右。

本专辑侧重于交交变频，同时也选译了少量交直交变频近期文献资料。编译中我们对“Cycloconverter”和“サイクロコンバータ”一词均统一译为交交变频器(国内有译为“直接变频器”的)，特此附作说明。

所选辑的全部译文，我们按其内容的性质，大致分成七个部分，以便于按不同专题来了解国外情况。下面我们将就其中部分内容，作一简单介绍。为方便起见，所引用的参考文献，均与本专辑目录中的编号一致，而其中未被收录的部分，按顺序编号附于文末。

1. 电气调速传动的发展趋势

电气调速传动，迄今仍以直流传动占绝大多数。交流变频传动，只是在五十年代后期可控硅问世以后，才有较快的发展。可控硅变频的研究和应用，从小到大，从繁到简，经过了二十年时间，至今已经取得了很可观的成果。

例如美国在七十年代后期，全部调速传动中，直流与交流之比，已达7:1。到八十年代初，预计这个比值将上升为5:1〔5〕，〔6〕。在日本，也是朝用交流变频传动逐步取代直流传动的方向发展〔4〕。

变频传动，成为最近的一个发展趋势，从一些文献资料中，可以看出有不少原因。这里仅粗略地提出以下几点，供参考。

1-1 可靠性高

变频装置的可靠性，已达到与直流可控硅供电装置相等的地步。无论是交交或交直交变频，现在都具有可靠性高的优点。这对于实际应用来说，是必不可少的重要条件之一。有的文献资料提出，目前交交变频比交直交还要可靠一些，因为前者是自然换流。如果从整个调速传动系统来说，交流变频传动比直流可控硅传动可靠性更高，因为结构简单坚固的交流电动机，可以实现“无维修”的调速传动系统〔4〕，〔6〕。

1-2 功率因数高

从已查到的资料来看，目前至少有三种变频传动系统，具有很高的功率因数。第一种是带斩波器/二极管的电流型交直交变频系统，它在任何频率和相应的转速下，均能保持0.92以上的恒定功率因数〔6〕。第二种变频传动系统，为向同步电动机供电的交交变频传动，功率因数可接近于1〔23〕。第三种为向绕组式感应电动机转子供电的交交变频传动，功率因数可以超前〔29〕。

1-3 可采用高电压

直流电动机因受换向条件的限制，主回路电压最高只有1000伏左右。交流电动机则不受此限制。对于

大容量的电动机来说,交流电动机可以采用6—10千伏,这样就能获得比直流电动机高得多的单位电流输出功率。目前容量达到1万千瓦的交流变频传动,均采用了10—11千伏的电压[23][34]。

1-4 过载能力强

由各类变频器供电的电气传动系统,它们的过载能力是不相同的。对于由外部任意给出频率指令的交直交变频器(他制式),它的转差频率随负载相应变化,因此过载能力强[39]。至于向感应机或同步机定子侧供电的交交变频器,可用于象球磨机、轧钢机主传动这种要求过载能力强的场合,这种变频调速传动系统,能承受高达8—10倍额定转矩的冲击负载[23]。还有一种将线绕式感应机定子和转子绕组串联,由交交变频器供电的双馈电动机,它具有与相同外形尺寸感应机的额定转矩和额定功率8倍的过载能力[28]。可是由交交变频器向线绕式感应机转子供电的双馈电机,它的过载能力只有(分别为)150、200和250%,持续1分钟[40]。至于交直交变频器,向无整流子直流电机供电,它的过载能力低达125%,1分钟[41],这种变频调速系统,适用于造纸工业和风机、泵类的调速传动。其他类型的变频调速系统的过载能力,还有待进一步查阅和收集。

2. 变频装置最近的发展概况

可控硅变频,发展到现阶段,虽然在某些技术经济指标方面,已达到或接近直传动,但还存在一些急待解决的问题,其中主要是,主回路和控制系统比较复杂,变频装置的成本较高[6],并且在交交变频方面经济的变频范围狭窄,因此应用上有一定的局限性[23]。

为了解决上述问题,近几年国外的进展情况大致如下:

2-1 在交直交方面,采用了可关断可控硅来代替一般的可控硅

由于交直交变频需要采用强迫换流,因此可关断可控硅便是一种很理想的器件,这样就省去了一整套强迫换流装置,简化了系统,装置的体积进一步小型化,而且使输出波形好,效率高。日本已制成5千伏安的脉宽调制逆变器和100千伏安,800赫的调压变频装置(VVVF)[9]。目前可关断可控硅的容量已达1300伏,600安,而且成品的合格率高,制造的成本比一般可控硅还经济[8]。

2-2 在交交变频方面,开展了采用微处理机的试验研究

即用微处理机取代了三相可调频调压的正弦波发生器、V/f变换器,模拟比较器以及电压互感器等许多控制设备,从而使变频器在改善特性,提高可靠性,简化系统,降低投资等方面,提供了新的途径[10]。但需要指出的是,这种采用微处理机的变频方案,仍然沿用了传统的“余弦波交叉”法,因此变频器的输出率很窄,这个缺点仍未解决。

在简化交交变频系统方面的另一方案是,应用通讯上“采样的不确定性原理”,获得了一种差频的变频方式。它的优点是主回路和控制系统都比较简单,因为只需要12只可控硅。变频器电源为单相[11]。

2-3 关于交交变频器扩大输出频率范围问题

交交变频器的输出频率范围窄,这是众所周知的一个主要缺点[16],[23]。在探索新的原理来解决这个问题方面,有一篇资料是“新的三相静止变频器”,(IEEE Trans, on Industrial Applications, 1973年,9/10月),由于它所提供的试验结果,在实际应用上还存在一些问题,因此未收集在本专辑内。另一篇是用通讯原理并以“余弦波交叉”法为基础,在控制电路中,增加了“规则采样”以及相应的逻辑电路,使可用的输出频率达到与电源频率相等[13]。其缺点是使控制系统更加复杂,而且是以单相电源来进行研究,可能只适用于容量较小的装置。

对于扩大输出频率的范围,除了在三相半波时的输出频率,可达电源频率的 $1/3$ — $1/2$ 以外,如果是采用三相全波输出,则输出频率可达电源频率的 $2/3$ 左右[25],而且输出波形更接近正弦,缺点是可控硅的需要数量加倍,这对于大容量的调速传动来说,虽然初期投资有所增加,但由于输出波形好、效率高、运行费低,因此从长远的观点看,采用三相全波输出,对于大功率的传动装置,是经济合理的。

3. 实际应用的变频器

从实际的应用来说,变频调速传动在简化系统,提高可靠性和降低投资等方面,交直交和交交变频都有不同程度的进展。但在如何解决交交变频输出频率狭窄的问题,似仍处在研究阶段。现将实际应用的变频器,分几个问题简要介绍如下:

3-1 简化系统

对小容量的交交变频器,采用控制系统简单的方波输出;中等容量为梯形波输出;只有大容量(1500千瓦以上),才采用“余弦波交叉”的正弦波输出[23]。至于交直交变频器,采用可关断可控硅,已开始生产定型产品用在工业上[9]。

3-2 开环与闭环系统问题

在实际应用的变频传动系统中,大多数都采用了闭环控制。在开环系统中,要获得对电动机输出电压和电流的精确控制是困难的,因为开环系统的变频器,要求高精度的电子控制设备。若用闭环,则同样的电子控制设备,可以容易得到精确的控制,而且使线路简单、设备投资降低[42]。还有的资料中指出,开环系统的相位控制,仍然使输出电压波形产生畸变,导致整个系统运行不正常。因此采用有反馈的闭环控制,具有很重要的意义,它可以及时矫正触发可控硅的时间,使输出波形规则[22]。有的资料还指出,在控制系统中,测速发电机是一个重要环节,它必须能瞬时监视转子的速度(从最高到零),结构上应为无刷、微型,并且输出量要与电机的旋转频率 f_m 成正比[25]。

3-3 调压问题

变频的同时,必须相应地调压,以保持电机气隙磁通恒定。在交直交变频器中,整流部分采用可控硅兼作整流和调压已很普遍。在交交变频器中,目前仍以移相器来改变可控硅触发的控制角,作为调压的基本方法[23], [24], [29]。但需要指出,系统输入电流所含高次谐波,在输出电压最低时为最多。为了保持电机气隙磁通恒定,对感应机可采用转差调节系统,使定子电流随转差频率成比例变化。

3-4 可逆运转

各种类型的变频器,其中大多数均具有在四象限内可逆运转的特性。例如电流型交直交变频器,可用调节振荡器频率的方法,来降低变频器的输出频率,使之小于电机转子的电气角频率,从而实现再生制动。当电机转速接近于零时,则需要增加逻辑切换装置,来改变触发可控硅导通的顺序,才能使电机反转[36]。至于采用“余弦波交叉”原理的交交变频器,除了首先调节三相基准波的频率,使输出电压的频率平滑下降以外,还必须采用附加的逻辑电路,使三相可变频的基准波的相序,与原来的相序相反。

才能实现可逆运转。

3-5 在交交变频器中采用双向可控硅的问题

前面已经介绍了在交直交变频器中,采用可关断可控硅的趋向。双向可控硅用于交交变频,国外早就有此设想,而且认为是比采用可控硅要优越[16]。但除了国内在移相变频中已有成功采用以外,至今尚未见到有应用于交交变频器的。采用双向可控硅,在简化系统,减小装置的体积,使通风机容量减半等方面的优点是明显的[1][2][3]。

3-6 对电机的要求

从收集到的不多的资料来看,一般说来,向感应机定子侧供电的变频传动系统,为了获得高的效率,要求电机为低转差[15],这样可以改善电机运行于低频时的负载特性。当采用凸极同步机的交交变频传动时,由于这种变频传动可以承担8—10倍额定转矩的冲击负载,因此要求磁极结构和磁场线圈的安装,都要十分牢固[23]。如果变频器为简单的方波输出,电机定子绕组采用全距,可以大大降低谐波含量[12]。另外也可从控制系统上保证输出的方波电压只导通 120° 电角,以降低电机电压的谐波成份[14]。

另一种调速比不大,但要求恒功率的变频传动装置,由于是恒电压供电,因此变频器的控制系统简单,成本低。但如采用一般标准型电机,在最低频率运转时,会使磁路饱和。若将电机铁心加大一级又不够经济。因此,在国外有一种标准电机(称为U型),是专为满足这种特殊用途而设计的。并推荐这种电机用于实现机床工业生产的自动化[35]。

4. 变频在钢铁工业上的应用

钢铁工业机械传动装置种类很多,凡是要求调速的电气传动,都有可能采用变频。下面介绍几个主要的生产设备的应用。

4-1 炼铁

大型高炉鼓风机,在七十年代以来,有采用电动鼓风的趋势。根据日本的介绍,大的鼓风电动机为7万瓩(同步电动机),这样巨型的电机不能直接启动,否则对电网的冲击太大。过去多采用机组变频启动,设备庞大复杂。1976年日本已报导在川崎钢铁厂大高炉电动鼓风机上,采用了交直交变频启动装置。同时在大型氧气站的同步电机上,也要用这种启动装

置。变频起动装置的容量，只有电动机容量的1/6左右。这种起动方式，对电网是没有冲击的〔34〕。

4-2 转炉

转炉的排烟抽风机，国内曾在设计中采用了液力耦合器。但根据美国1977年的资料介绍，液力耦合器比变频调速要多花投资，而且电能损耗大〔6〕。如按120吨转炉的抽风电动机为1500瓩估算，采用变频每年可节省电费12万元。若考虑转炉容量为350吨，则每一台抽风机每年可节省电费40万元以上。

4-3 轧钢

变频在这方面的用途最广，除日本已报导用于小轧机外，还提出正在准备用于大型轧机主传动〔23〕，而采用的变频方式，为交交变频器向同步电动机的定子侧供电。由此可以看出，变频正在向大功率的轧钢主传动方面发展。此外，在美、日、英均有报导用于轧钢车间的压下、推床、工作辊道等等。

(上接第11页)

表六

元件 排列 序号	元件 出厂 编号	导通 压降 (伏)	电压上升 率 dv/dt (伏/微秒)		伏安特性 (伏/毫安)		控制特性 I_g/V_g (毫安/伏)		
			正	反	正	反	I+	I-	III-
7	16	0.65/ 0.7	500	500	500/ 8	500/ 8	26/ 1.8	26/ 1.2	290/ 1.9
3	21	0.56/ 0.64	10	100	800/ 16	800/ 16	30/ 1.1	30/ 1.2	50/ 1.6

重要参数未测，因此关于机械特性、效率、功率因数、谐波等等的分析，有待于进一步研究。

五、存在的问题

固定的1/3工频变频装置经过半年多的生产运行，

4-4 其他

据最近美国报导，在泵类的传动中，色括液压泵在内，如果采用变频传动来代替节流阀控制流量，每年可节省大量的电能损耗，因此变频装置是很有发展前景的〔6〕。特别是在钢铁工业中，无论是炼铁、炼钢和轧钢，都采用了很多的液压系统，因此今后变频在钢铁工业中的应用，是很广泛的。此外，大电弧炼钢炉的电磁搅拌，大容量单相电渣炉，电焊机等等，均可用变频器来实现电网有三相平衡负荷的要求。

未编入本专辑所引用的参考文献

39. 最近的电机控制，《电气传动》，1977，第1期
40. 谢尔毕乌斯(Scherbius)系统，《东芝レビ一》，1976，30卷，7期
41. 可控硅电动机及其应用，《东芝レビ一》，1976，30卷，7期
42. 次谐波控制的静止变频器用于调速传动，《B BR》，1964年，51卷，8—9月。

只发生了一次短路，烧坏了两支双向可控硅元件。查其原因是由于厂内供电电网电压波动，直接影响控制回路触发器的触发功率，造成失控而短路。

因为我们采用的触发器是直接取于交流工频电源作为触发器的电源。电网电压波动直接影响了触发器的触发功率。又因为双向元件采用Ⅲ-触发方式灵敏度较低，电压波动就不能保证可靠触发，因而不能按顺序换向而发生短路。

另外，这种交流触发器，触发电流直接与交流电源电压的幅值有关，交流正弦波在0°和180°附近，其幅值较低，不能保证双向可控硅元件可靠触发，这也是本装置的触发器的弊病。我们拟改用脉冲列触发，借以解决上述问题，是否可行，还待进一步研究。

1/3 工频交交变频装置 工业试验总结

重庆钢铁设计院试验室电力组

提要：本文介绍了采用移相原理研制的1/3工频交-交变频装置。该装置控制系统简单、维护方便并能得到接近正弦波的输出。文中提供了工业试验数据。该装置业已应用于成都无缝钢管厂工程上。

前言

为加速实现四个现代化的步伐，根据工程上的实际需要，我们采用了我国自制的大容量低参数双向可控硅元件，制成了一台输出容量为50瓩 1/3工频的交-交变频装置，代替了原有变频机组，取得了良好的效果。

这套装置曾在重钢中板厂进行了三结合的工业试验，经受过连续240小时带满载运行，未出现故障。现已使用在成都无缝钢管厂管加工车间的车丝机辊道上。实践证明，装置运行可靠，维护简单，生产工人甚为满意。

由于此试验装置运行才一年，理论上的分析还作得十分不够。仅在试验基础上进行了一些讨论，缺点和错误在所难免，欢迎大家给予批评指正。

试验期间，我们得到了重钢中板厂、西安整流器研究所和成都无缝钢管厂等单位的大力支持与协助，在此表示感谢。

一、概述

随着生产过程自动化的高度发展，在许多工业部门中为了提高生产效率和产品质量，越来越多的生产设备需要采用运行可靠、速度可调的动力装置。直流电动机虽具有良好的调速性能，能在宽范围内精确调速，但直流电动机价格昂贵，结构复杂，有换向火花，电刷和整流片易磨损，运行可靠性差，维修麻烦。异步电动机尤其是鼠笼异步电动机价格低廉，结构简单，运行可靠，维修容易。然而由于它的固有调速性能差，在工业上的应用受到了一定的限制。为了

生产发展的需要，异步电动机的调速问题成了研究的中心课题。目前国内外研究的主要有变频和调压两种。调压法控制系统简单，成本低，但其缺点是在低速运行时电机损耗大，效率低，发热严重，不能承受较重负荷等。变频法虽有良好的调速性能，运行可靠，但变频系统很复杂，成本高，只适用于特殊场合。近年来随着半导体和可控硅技术的高速发展，变频法成为电气传动领域中的主要研究课题。我们结合生产实际需要，试制成功一台采用双向可控硅控制系统非常简单的50瓩、1/3工频交交变频装置。整套变频装置柜重150公斤(变压器除外)，为简化交交变频系统闯出一条新路。

该装置有以下特点：

1. 控制系统简单、可靠、抗干扰能力强，且能在供电电网电压波动很大时稳定工作；
 2. 电动机机械特性硬，可采用开环系统；
 3. 电动机起动电流小；
 4. 易实现无触点自动正反转；
 5. 可采用低阻断电压、低参数的双向可控硅。
- 与电动机—16.7赫交流发电机机组比较，有下述优缺点。

优点

1. 投资小。机组设备6万元，变频装置4万元；
2. 占建筑面积小。机组为180米²，变频装置6—10米²；
3. 效率高，耗电少。可节电135×10³度/年，节省电费1.1万元/年；
4. 设备轻巧，可节省大量有色金属。机组4.2吨，变频装置0.5吨；
5. 制造容易，生产周期短；

6. 无噪声;
7. 机器寿命长, 维护工作量小;
8. 可提高产品质量。例如由机组供电时, 常化炉内轨道上的钢板来回摆动一段时间后, 位移严重, 致使在高温区的钢板移位到低温区, 影响产品质量, 本装置解决了这一问题。

缺点

1. 功率因数较差(与使用的电机型号有关);
2. 输出波形中含有高次谐波;
3. 输入三相负荷不平衡。

二、连续移相变频基本原理

在三相交流电机中, 三相绕组按规定的电角关系固定在定子槽中, 当三相电源接通时即产生旋转磁场。其旋转磁场的速度为 n_0 。

$$n_0 = \frac{60f}{p}$$

式中: f ——电源频率,

p ——电机的极对数。

为了达到调节电动机的转数, 只要把旋转磁场的速度 n_0 加以改变, 就可以达到目的。我们是借助于双向可控硅元件作为无触点开关, 将工频电压作任意等速的相角连续位移, 而改变其旋转磁场的速度。

大家熟知, 工频的三相电压A, B, C是互相相差 120° 电角的正弦波。当某一瞬时, 将A相换接到B相; B相换接到C相; C相换接到A相, 每换接一次, 就相当于把磁场速度后移了 120° 电角。如果这种换接速度是等速的, 很快的, 就使得旋转磁场的速度减慢。反之即可加快旋转磁场的速度。上述原理已从试验中完全得到了证实。为交流电动机的调速开辟了一个新的途径。上述原理其实质仍然是变频。

上述变频原理的优点在于: 使用元件少, 控制系统简单, 可以得到接近正弦波输出。由于输出电压幅值不变, 在频率变化时, 需在电源侧装设调压设备, 这就给连续调频增加了困难。我们是以固定的输出频率, 在电源侧装设变压器使系统简化, 来解决工程上急需的变频机组, 为工程大干快上创造了条件。

上述移相变频原理是以不同频率的脉冲, 按顺序将A, B, C各相电源通入电机的一相绕组, 就可以得到不同的输出频率。如果电源频率为 f_G , 移相的重复频率为 f_K (即从A相换接到B相, 再从B相换接到C相, 由C相再移回到A相的整个时间为一个周期来计算。)

则输出的频率为 $f = f_G \pm f_K$ (1)

如果移相的重复频率为 f_K , 而移相脉冲的间隔以电角度来计量则:

$$W_K = \frac{f_G}{f_K} \cdot \frac{360^\circ}{3} \quad (2)$$

从式(1)中看出, 正号表示移相顺序是逆相序的(即由C→B→A方向), 输出频率永远高于电源频率 f_G , 这是增频法。而负号则表示移相顺序是顺相序的(即由A→B→C方向), 其输出频率低于电源频率 f_G , 亦即减频法。

变频后的电压波形在未经调制的情况下, 电压的基波幅值, 基本上与电源相同, 电压可以认为不变。变频后输出频率 f 低于电源频率 f_G 时, 输出波形接近于正弦波。当 $f \ll f_G$ 时, 对低于电源频率的变频输出, 可以用滤波器滤掉谐波成分, 使其更接近于正弦波。但变频后的输出频率接近于电源频率或高于电源频率, 要得到正弦波的输出更复杂些, 本文不作研究。我们只对减频法作了研究, 即移相是顺相序的移相。

上述移相原理与电源的相数紧密相关, 在三相电源时, 即是上面所分析那样。如果是六相电源时, 每相邻二相换接一次只改变 60° 电角, 需换接六次, 才能减少(或增加)一个周波, 这样就需增加控制元件, 但减少了谐波成分。

对于六相电源时, 移相的脉冲间隔以电角度计量为:

$$W_K = \frac{f_G}{f_K} \cdot \frac{360^\circ}{6} \quad (3)$$

下面就输出为 $1/3$ 工频的波形加以图解分析; 在三相电源时, 要得到 $1/3$ 工频的输出, 脉冲的重复频率为 $\frac{2}{3} \times 50$ 赫, 移相脉冲的间隔为 $W_K = \frac{50}{\frac{2}{3} \times 50} \times \frac{360^\circ}{3} =$

180° , 而对于六相电源时, $W_K = \frac{50}{\frac{2}{3} \times 50} \times \frac{360^\circ}{6} = 90^\circ$ 。

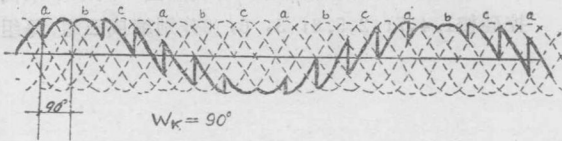
上述两种脉冲间隔对三相或六相电源都能得到 $1/3$ 工频的变频输出, 具体的波形见图1。

上述移相变频是在电源波形的基础上进行自然换流, 将输入频率一定的交流电流或电压波形转换成所需要的输出频率的电流或电压。就本质上讲, 变频器是由许多开关组成, 这些开关按一定顺序, 在指定的瞬间开断和闭合, 从而得到小段的输入频率的波形, 合成为输出频率的波形。

作为换流开关, 在国外大都是采用大容量的可控硅元件, 而我们则采用了我国自行生产的双向可控硅元件。它是一个五层三端双向开关, 正反向均可控,



(a) 三相电源时



(b) 六相电源时

图1 对于电源相数不同时输出为1/3工频的电压波形

无反向过电压击穿问题，是一种最理想的交流开关。

在变频器系统中，其负载大都是感性负载，电流的相位都滞后于电压的相位，只有对于同步电动机才有 $\cos\varphi = 1$ 或超前。因此变频系统中要求具有逆变运行的能力。双向可控硅元件本身正反向都能加以控制，本身就具有有逆变运行的能力。

为保证自然换流的正常进行，必须在系统中保证：在电流为正时，要触发的可控硅电压一定要高于已导通的可控硅电压值。而当电流为负时，要触发的可控硅电压值一定要低于已经导通的可控硅电压值，否则就不能保证系统的正常换流。因而在国内外所有的变频系统中都设有电流的极性检测装置，这是必要的。

连续的移相变频，也是靠自然换流，不设置中间换流回路，系统中的双向可控硅元件，永远是处于由整流到逆变，再由逆变到整流的重复过程，与直流可逆的可控硅传动系统中的过程是一样的，只不过变换的过程要更快些。不论处于整流或是逆变状态，都需要保证换流可靠，即要换流后的双向可控硅能可靠导通，并把前一个双向可控硅关断。也就是在任一瞬间，变频输出的一相中不允许接于电源不同相上的双向可控硅同时导通。亦即按无环流的原则加以控制。当然有环流的控制，在变频系统中也是有采用的，但在利用双向可控硅作为控制元件，流过的是交流电流。能否用限流电抗器来限制电流，我们还未进行研究。但为了提高效率，降低损耗，尤其对大功率输出来说，在双向可控硅变频系统中，以采用无环流控制系统为宜。

$\frac{1}{3}$ 工频变频装置就是根据连续移相原理研制的，从前面分析得知，要得到 $\frac{1}{3}$ 工频的变频输出，所需脉

冲的重复频率应为 $\frac{2}{3}$ 工频，即 $f = f_G - f_K$ 。

供电电源为三相， f_G 为50赫的工频， f_K 为 $\frac{2}{3} \times 50$ 赫的频率，才能得到输出为 $\frac{1}{3} \times 50$ 赫的频率。而脉冲的间隔为：

$$W_K = \frac{50}{100} \times \frac{360^\circ}{3} = 180^\circ \text{电角。}$$

为了得到180°电角的脉冲，我们利用了工频电源经过全波整流后，在电压每半波过零一次发出一个脉冲，这种振荡源与电源有同步关系，完全是以十分准确的电角度来度量脉冲间隔，这样就保证了各双向可控硅的触发位置与供电电源同步。系统的方框图见图2，输出的电压波形见图3。

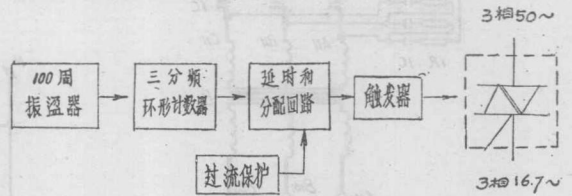


图2 1/3工频变频系统的方框图

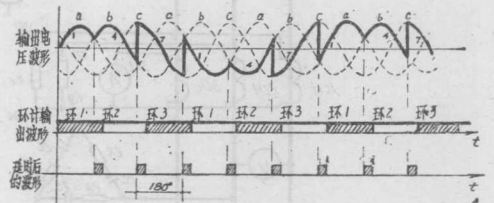


图3 1/3工频装置的输出电压波形

主回路采用双向可控硅元件九只，按1，4，7；2，5，8；3，6，9号分别编成三组，每组均为共阴极连接，组成新的输出端。当第一组双向元件(1，5，9号)导通时，电机绕组就取得电源的A，B，C。经过180°电角时第二组双向元件(4，8，3号)导通，第一组就自然换流关断，使电机定子绕组换接到B，C，A相。再经过180°电角后第三组双向元件(7，2，6号)导通，又使第二组元件自然换流到第三组，使其关断，使电机换接到C，A，B相上再经过180°电角后第四次导通，又重复到第一组元件，即三组元件，每组导通1/3时间，相邻两组每换接一次，均使电机定子绕组作120°的相位后移。在任何瞬间，各共阴极连接的三只双向元件，只允许一只导通，否则将造成短路。新的输出波形见图3中实线部份。

由图3看出，1，4，7号双向可控硅换向时间间

隔都是 180° 电角，对应于a, b, c触发位置不变，可与主电源同步加以控制。

由于预先已选择好各相的换流点，各双向可控硅的触发位置已确定，并能使双向可控硅元件可靠触发，因而不需要设置电流的极性检测装置，从而简化了系统。

如欲使电机自动实现正反转，可增加一个自动正反转信号发生环节，其输出信号送入脉冲分配环节，

使其发出正、反转指令，改变双向可控硅的导通顺序。这样，就很容易实现无触点自动正反转。

三、线路说明

1. 主回路

采用9支双向可控硅，接线如图4所示。双向可控硅按1,4,7；2,5,8；3,6,9分别编成三组，每组均

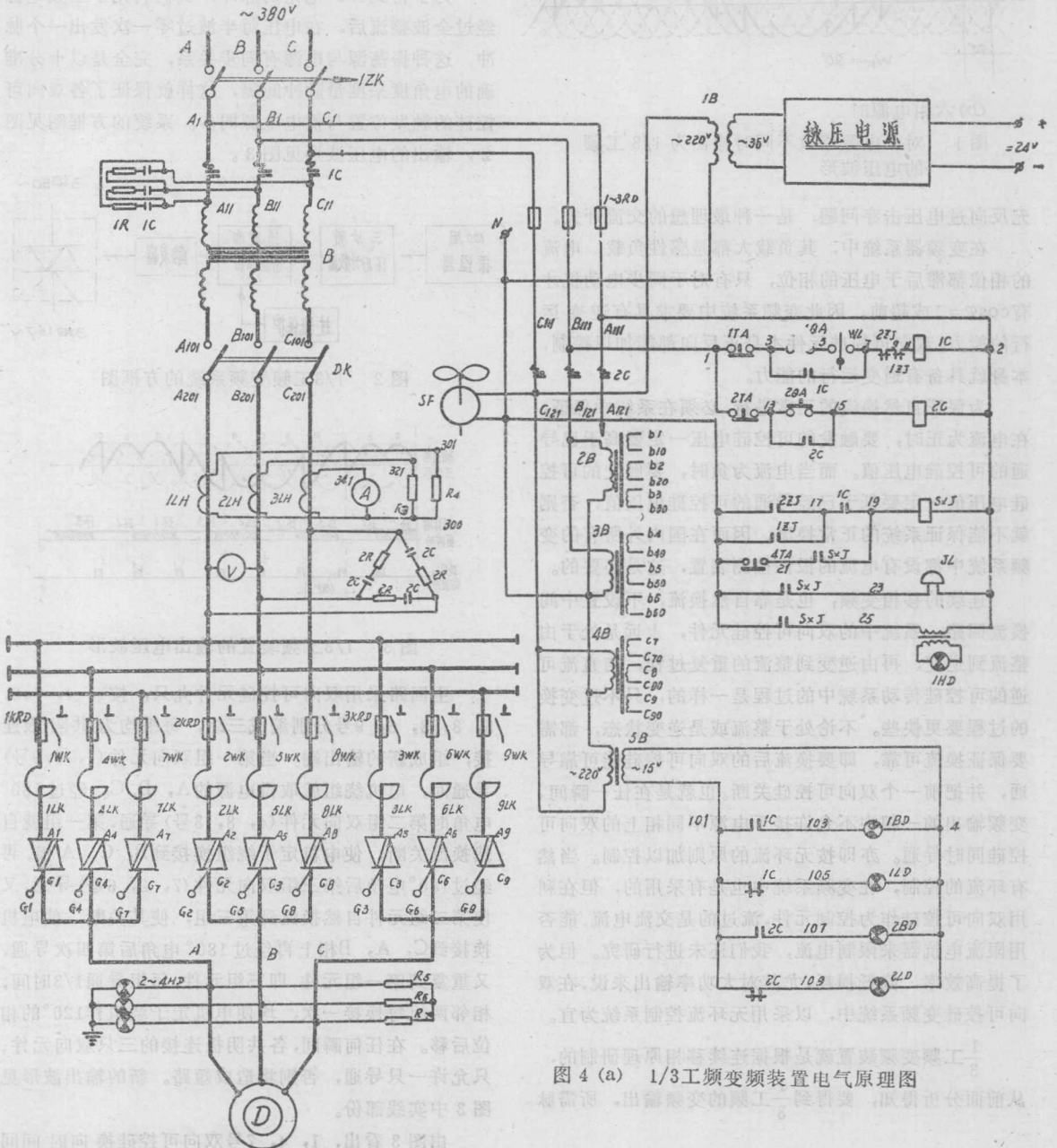


图4(a) 1/3工频变频装置电气原理图

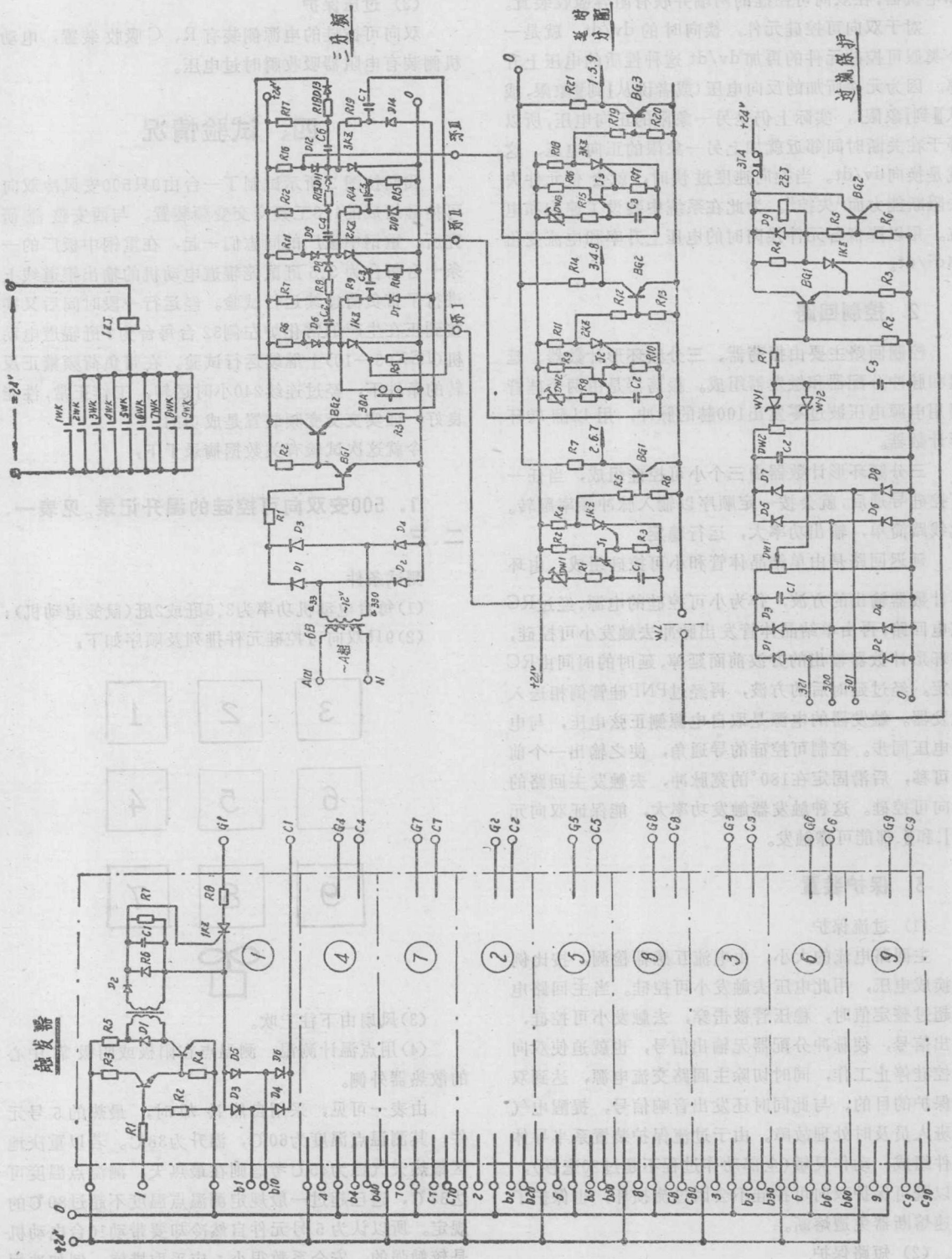


图 4 (b, c) 1/3 变频装置电气原理图

为共阴极接线，它们分别为变频装置的三相输出端。

每个双向可控硅电源侧，装有快速熔断器和速饱和电抗器，在双向可控硅的两端并联有阻容吸收装置。

对于双向可控硅元件，换向时的 dv/dt ，就是一个类似可控硅元件的再加 dv/dt 这种性质的电压上升率。因为元件所加的反向电压（或者说从Ⅰ到Ⅱ象限，或从Ⅱ到Ⅰ象限），实际上仍是另一象限的正向电压，所以等于在关断时间邻近就加上另一象限的正向电压，这就是换向 dv/dt 。当换向速度过快时，就会使元件失去阻断能力而“失控”。为此在系统中装设了速饱和电抗。用以降低各元件换向时的电压上升率和电流变化率 di/dt 。

2. 控制回路

控制回路主要由振荡器、三分频环形计数器、延迟和脉冲分配器和触发器组成。振荡器是由两个硅管利用电源电压波过零发出100赫的脉冲，用以翻转环形计数器。

三分频环形计数器由三个小可控硅组成，当任一可控硅导通后，就会按一定顺序以输入脉冲频率翻转。此线路简单，输出功率大，运行稳定。

延迟回路是由单结晶体管和小可控硅组成，由环形计数器输出的方波，作为小可控硅的电源，经过RC充电回路，再由单结晶体管发出脉冲去触发小可控硅，将环形计数器输出的方波前面延掉，延时的时间由RC决定。经过延时后的方波，再经过PNP硅管倒相送入触发器。触发器的电源是取自电源侧正弦电压，与电源电压同步。控制可控硅的导通角，使之输出一个前沿可移，后沿固定在 180° 的宽脉冲，去触发主回路的双向可控硅。这种触发器触发功率大，能保证双向元件Ⅰ和Ⅱ都能可靠触发。

3. 保护装置

(1) 过流保护

主回路电流的大小，由电流互感器检测，按比例转换成电压，用此电压去触发小可控硅。当主回路电流超过整定值时，稳压管被击穿，去触发小可控硅，发出信号，使脉冲分配器无输出信号，也就迫使双向可控硅停止工作，同时切除主回路交流电源，达到双重保护的目的。与此同时还发出音响信号，提醒电气值班人员及时处理故障。由于过流保护装置系半导体元件组成，动作灵敏（全部动作过程不超过20毫秒），所以既可保护双向可控硅不会因过流损坏，也保护了快速熔断器免遭熔断。

(2) 短路保护

短路保护采用快速熔断器。实质上快速熔断器仅当过流保护失灵时才起作用。故实为后备保护。

(3) 过压保护

双向可控硅的电源侧装有R、C吸收装置，电动机侧装有电阻器吸收瞬时过电压。

四、试验情况

我们按图2所示试制了一台由9只500安风冷双向可控硅组成的1/3工频交变频装置。与西安整流研究所、重钢中板厂的同志们一起，在重钢中板厂的一条十台每台为3.5瓩鼠笼辊道电动机的输出辊道线上进行了带负荷连续运行试验。经运行一段时间后又换接到正在生产的常化炉左侧32台每台为2瓩辊道电动机(JGX63—10)上继续运行试验。在带负荷频繁正反转的条件下，经过连续240小时运转，工作正常，性能良好，证实交变频装置是成功的。

今就这次试验有关数据摘录于下：

1. 500安双向可控硅的温升记录。见表一、二、三。

测试条件

- (1) 每台电动机功率为3.5瓩或2瓩(鼠笼电动机)；
- (2) 9只双向可控硅元件排列及顺序如下：



(3) 风扇由下往上吹。

(4) 用点温计测温，测温点在阳极或阴极靠中心的散热器外侧。

由表一可见，采用自然冷却时，最热的5号元件，其测温点温度为 60°C ，温升为 38°C 。若以重庆地区最热天气温为 45°C 考虑则在最热天，测温点温度可达 83°C ，这已超过一般规定测温点温度不超过 80°C 的规定。所以认为5号元件自然冷却却要带动10台电动机是较勉强的，安全系数很小，应采取保护措施。例如选用

表一

电机台数	功率(瓩)	电流(安)	冷却方式	室温(°C)	测温点温度(°C)								
					1	4	7	2	5	8	3	6	9
10	35	80	自冷	22	45	51	39	50	60	43	38	50	46

说明：按长期运转期间最高记录温度摘录

注：5号元件温升高的原因是导通管压降大与元件位置排列居中，散热条件最差。

表二

电机台数	功率(瓩)	电流(安)	冷却方式	室温(°C)	测温点温度(°C)								
					1	4	7	2	5	8	3	6	9
10	35	80	风冷	27	33	35	32	33	41	38	35	38	36

说明：按长期运转期间最高记录温度摘录。

表三

电机台数	功率(瓩)	电流(安)	冷却方式	室温(°C)	测温点温度(°C)								
					1	4	7	2	5	8	3	6	9
32	64	120	风冷	27					39				37

导通管压降小的元件，和将元件相互间的距离扩大。

由表二、三可见，采用风冷带动32台2瓩电动机，最热的元件5号测温点温度只有14°C左右，裕量很大，看来该装置能带动常化炉全部63台2瓩铁道电动机。

2. 铁道电动机由机组供电与变频装置供电的性能比较表，见表四。

表四

电 源	铁 道 电 动 机			
	转 速 (转/分)	温升(°C)	线电压 (伏)	定子电流 (安)
机组供电	170	30	100	2.8
变频装置供电	170	27	85	2.6

3. 变频装置 16.7 赫输出端的相电压和相电流波形示波图见图 5。图中上部为相电流波形，下部为相电压波形。

表四和图 4 表明，16.7赫低频装置输出波形中的谐波成分对电动机的特性影响不显著。

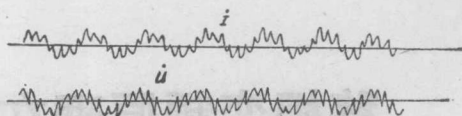


图 5 16.7 赫的相电压和相电流的示波图 (负载是铁道电动机)

4. 380伏电网供机组与变频装置的负荷电流比较表，见表五。

表五

受电设备名称	380 伏 电 网 供 给					
	铁道电机 转动时			铁道电机 停转时		
	A相	B相	C相	A相	B相	C相
供机组的原动机侧	55	55	55	48	48	48
变频装置变压器受电侧	43	61	37	电流表无读数		

由表五可以看出，变频装置消耗功率较机组供电小，可节电25%以上，据一年估算所节省的电费就可收回基建投资。

5. 我们对32台2瓩电动机同时起动时的相电压和相电流进行了实测，其结果如下：

起动时相电压为60伏，

相电流为155安；

起动完了稳定值相电压64伏，

相电流120安。

电动机的起动电流仅为稳定运行时的1.3倍。

6. 装置对元件参数的要求试验

为了验证装置对元件参数的要求，特意选用了两只低参数元件。元件参数见表六。经过连续数天运转证明，对双向可控硅的转折电压和dv/dt要求不高，对触发电流的要求也不高。

7. 电动机的重负荷试验

将10公分厚，1米多宽，约2米长的三块半成品钢板重迭在一起放在轨道上，起动变频装置后，十台铁道电动机同时频繁地自动正反转(正转6秒，停0.2秒，反转6秒)，三块钢板在轨道上一定的区间内来回摆动，无位移现象。其电动机转速，带负载和空载一样，说明机械特性硬。也证明开环系统能满足生产要求。

由于缺乏必要的测试仪器，在这次试验中有很多问题未能一一进行试验。(下转第4页)

移相变频原理在交流调速中的新应用

——扩大变频范围和实现交流电机快速可逆

重庆钢铁设计院电力科 王兴亚

提要: 变频是电气与电子技术上的一项重要科研课题。用变频传动来代替现有的直流调速传动,是目前国际上的发展趋向。由于电子技术的迅速发展,为各种变频的理论研究和应用,创造了有利条件。近十多年以来,一种按“余弦波交叉”原理组成的交交变频器,已在工业上得到广泛应用。但这种变频的半波输出电压,它的频率只能达到电源频率的1/2左右。为了扩大变频范围,最近几年有一些科研文献发表,但都是以单相电源为基础,因此对于改善输出波形和大功率输出都受到限制。本文所研究的新的“移相变频”原理,已从实验中得到证明。移相原理是从旋转磁场的概念出发,以三相电源为基础。按此原理组成的控制系统,经过理论和图解分析,使输出频率扩大到与电源频率相等,甚至超过电源频率成为可能。而且在不增加任何控制设备的条件下,仅用改变控制频率的简单方法,即可实现交流电机快速可逆。实验结果与理论分析完全相符。

1. 前言

从近期的技术情报资料来看,变频装置是目前和八十年代大量推广的一项新技术。可控硅变频是国际上的发展趋势,因此已成为一项重要科研课题[1][2][3]。

现代化的工业,交通运输和国防,需要得到频率可以任意调节的交流电源。由于电子技术的日新月异的发展,使各种变频理论,从试验研究到实际应用,进展迅速。现已应用在轧钢机主传动,和其他各种工业生产机械的调速传动上[4];应用在高温、多尘及有腐蚀性气体的环境中,如原子反应堆铀棒的升降传动,人造卫星天线的驱动等等[5]。据最近报导,已在电气牵引车上,达到正常使用或完成实验室的试验,它的性能比直流还优越[6]。近年来还在研究应用于大型线绕式电机的调速传动,并兼作补偿电力系统功率因数[7]。

从电气调速传动的动向可以看出,一种既具有直流电机优良的调速特性,又具有交流电机简单而坚固的结构,并在功率因数方面与同步机相同的传动系统,正在从试验研究进入实际应用。可以预料这种新型的变频装置不久必将会得到大量应用。因此,对可控硅变频开展理论和实验研究,是当前的重要而

迫切的课题。

本文所研究的是交交变频装置,它是将固定频率的交流电源,直接变换成频率可调的交流输出电压。因此,它具有损耗小、效率高的优点;由于是自然换流,故可靠性高,过载能力强,容量不受限制,且对大功率装置的制造也很经济;它的功率流向是可逆的,适用于四象限的可逆传动。但目前的变频装置,存在着输出频率狭窄的缺点。这正是本文研究的主要内容。

2. 移相原理

众所周知,三相交流电机定子电流,产生的旋转磁场速度 n_0 为

$$n_0 = \frac{60f_G}{p} \text{转/分, 或}$$

$$n'_0 = \frac{f_G}{p} \text{转/秒 (} 2\pi \text{电角度/秒或周波/秒)}。$$

式中 p 为极对数, f_G 为电源工频。

现取电机每对极的旋转磁场速度以周波/秒计,则上式中 $p=1$ 。

因此,旋转磁场速度 n'_0 为

$$n'_0 = f_G。$$

现假定电机定子(或定子绕组)以等速度反旋转磁

场方向旋转，其每对极每秒的旋转速度为 f_K ，如图1所示。如果电机定子绕组原来固定的位置($t=t_0$)如图1中左边的圆圈，则当时间为 t_1 时，定子绕组已

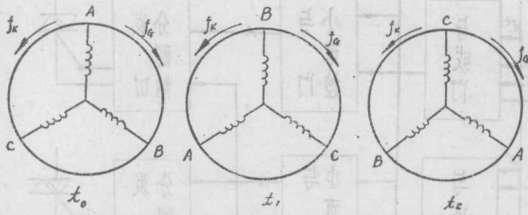


图1 电机定子绕组连续移相示意图

反旋转磁场方向旋转了 120° 电角，如图1中间的圆圈所示；当时间为 t_2 时，定子绕组继续反旋转磁场方向旋转 120° 电角，如图1右边的圆圈所示。当时间为 t_3 时，定子绕组再反旋转磁场方向旋转 120° ，于是又回到原始位置，此后定子绕组继续按同一方向，作等速旋转。从电机最初的定子位置的时间 t_0 到 t_1 ，或由 t_1 到 t_2 ， t_2 到 t_3 ，其间隔时间均相等，令为 Δt ，则 Δt 的大小，决定了电机定子绕组的旋转速度。当然，无论是定子绕组或定子本身，作机械旋转是不可能的，但电机定子三相绕组，按A-B-C顺序，作等速移相，实质上就是使位置固定在电机槽内的三相绕组，作等速旋转，从而使电机旋转磁场速度减慢。

同理，如果电机定子顺旋转磁场方向旋转，也就是说，定子三相绕组按A-C-B顺序移相，则合成的旋转磁场速度，会加快到电源频率以上。

如前所述，每次移相 120° 电角所需时间为 Δt ，则每移相 360° 电角(一个周波)所需时间为 $3\Delta t$ 秒。若移相速度为 f_K 周波/秒，则 $f_K = 1/3\Delta t$ 。

f_K 可为反旋转磁场方向，也可为顺旋转磁场方向的移相速度。因此，合成的旋转磁场速度 f 为

$$f = f_G \pm f_K \quad (1)$$

即电源频率(f_G)与移相频率(f_K)之和或差，就是变频装置的输出频率 f_0 。这一理论推导，已为实验所证明。

应当指出，当电机在同步转速以上运转时，由于可控硅必须在电流接近为零的瞬间，才能关断，因此，如果需要超同步运行，须采用有环流系统或采用可关断可控硅。

为了证明移相原理的正确性，我们曾进行过超同步试验。在采用环流系统中，按A-C-B-A-C-B顺序移相后，使一台四极笼型电机，在电源为50赫时，成功地运行于2000转/分，这相当于变频器的输出电压频率为66.7赫。

此外，由于电机的额定电压，是按电源频率为50

赫的固定电压制造的，因此若以电网标准电压供电，在电机超同步运转时，它的输出为恒功率，这同直流电机弱磁升速的情况相似。

从公式(1)以及下节的论述，可以得到推动环形计数器的振荡器频率 f_Z 为

$$f_Z = mf_K \quad (2)$$

式中 m 为一常数，在变频器为半波输出时，环形计数器为振荡器频率的三分频，因此 $m=3$ ；当采用全波输出时， $m=6$ ，即环形计数器为六分频。

与控制频率 f_K 相对应的环形计数器输出方波宽 w_K 为

$$w_K = \frac{f_G}{f_K} \frac{2\pi}{m} \quad (3)$$

在半波输出时，环形计数器为三分频，因此 $m=3$ 。式中 w_K 的单位为按工频 f_G 计算的电角度。

3. 线路简介

上述“移相原理”，实际上就是借助于大功率双向可控硅开关，直接将工频电压，作任意等速的相角位移，以改变电动机旋转磁场的速度，从而达到平滑调节交流电机转速的目的。具体的线路组成如下。

3.1 主回路

采用9个双向可控硅，其中每三个为一组。从主接线图2可知，若第一组导通时，电机定子绕组取得的电源相位为A, B, C；而当第二组导通时，相对应的定子绕组电源相位为B, C, A；第三组导通时，相对

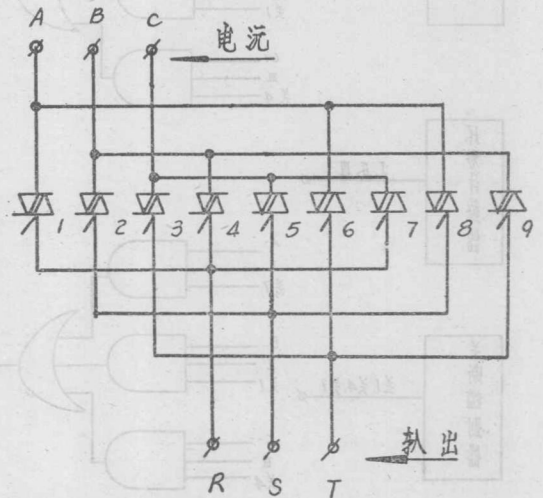


图2 交交变频主回路

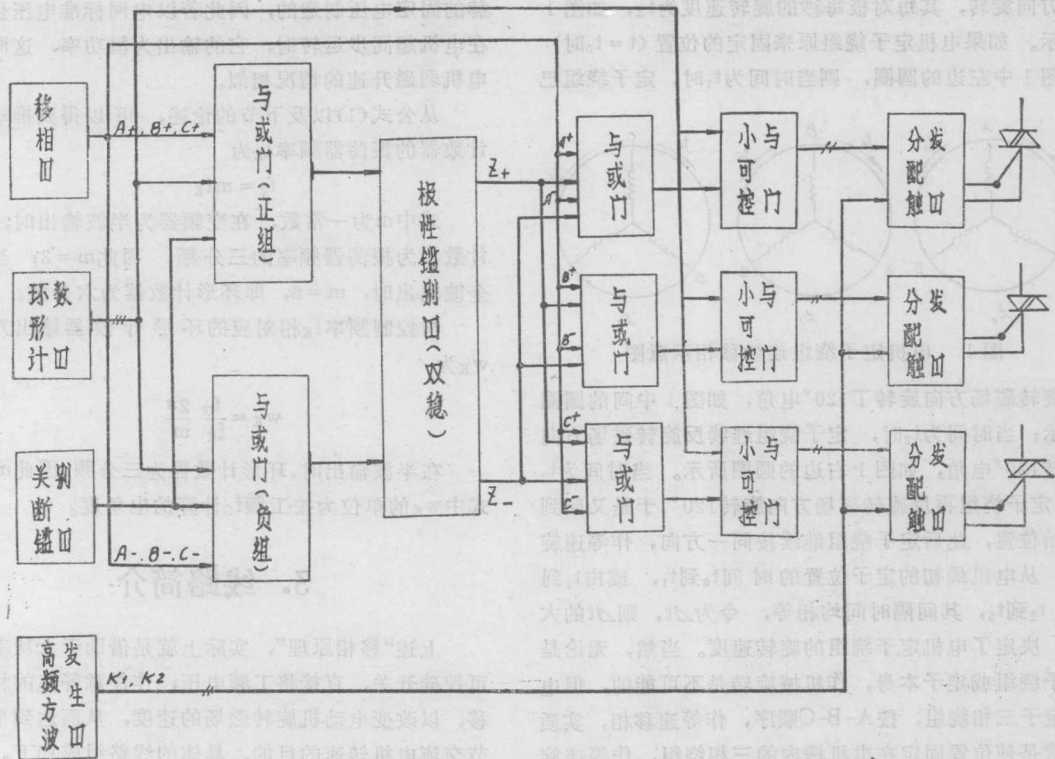
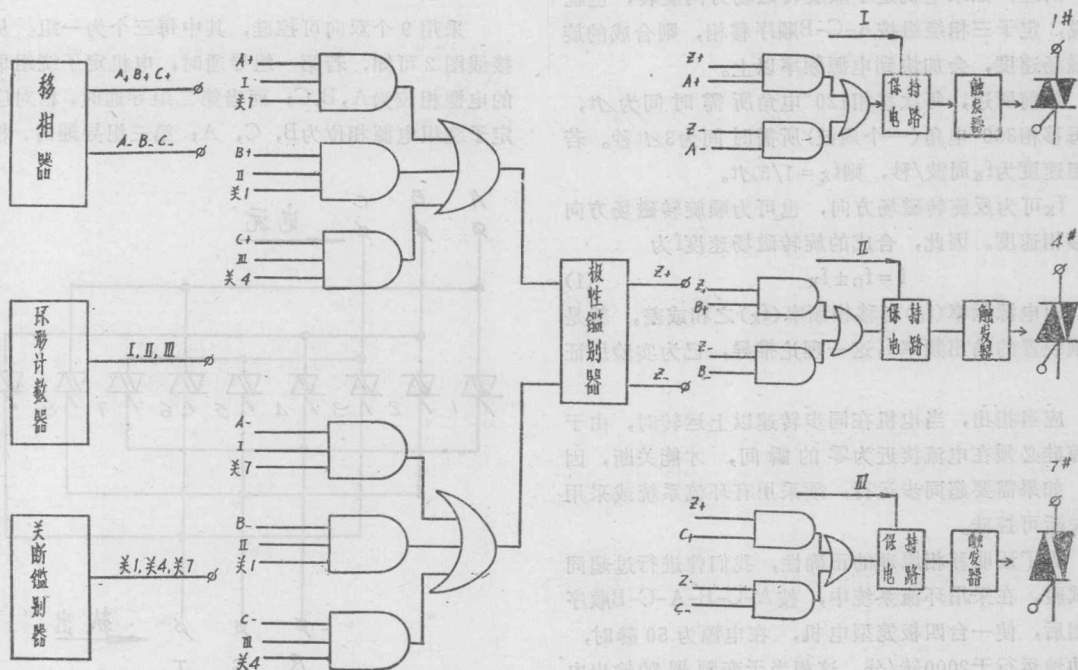


图3 连续移相交交变频控制方块图



注：与或/与或非YH₂有五个与门，只用其中两个。

图4 连续移相交交变频控制原理图