

静 止 功 率 变 频 器

L. 居吉 著
B. R. 佩莱

王孝祥等 译
王兴亚等 校

冶金工业出版社



静止功率变频器

L.居吉 B.R.佩莱 著

王 孝 祥 等译

王 兴 亚 等校

冶金工业出版社

内 容 提 要

《静止功率变频器》(Static Power Frequency Changers)一书系美国L.居吉(Gyugyi)及B.R.佩莱(Pelly)两人共同编著,1976年由美国威利公司(John Wiley & Sons Inc.)出版。

本书共计九章。第一章简单介绍了静止交-交变频器的基本概念、工作原理及电路;第二至第六章,通过用数学方法描述静止交-交变频器,研究了各种交-交变频器输出电压波形的合成问题,分析了对应的输入电流波形,并提供了有关的设计数据;第七章论述了各种交-交变频器的控制方法。第八章主要讨论各种交-交变频器辅助强迫换流的基本原理。第九章介绍了各种交-交变频器的应用情况。

书中较系统地论述了五种静止交-交变频器的各种电路、运行特性及控制方法等,并对其外特性的各参数作了比较详细的定量分析,同时给出了相应的数据。

本书可供从事静止交-交变频器设计、制造及运行工作的科技工作者参考与使用,亦可供大专院校有关师生参考。

静 止 功 率 变 频 器

L.居吉 B.R.佩莱 著

王 孝 祥 等译

王 兴 亚 等校

责任编辑 阎光顺

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店北京发行所发行

轻工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张23 字数573千字
1988年9月第一版 1988年9月第一次印刷
印数00,001~2,100册
ISBN 7-5024-0311-6
TP·13 定价5.65

译者的话

随着电力电子学和电子技术的迅猛发展,实现交-交直接变频的方式越来越多。相控变频器(或称自然换流的循环变流器)只是交-交直接变频器的一种,对此在《可控硅相控变流器及变频器》(此书已由冶金工业出版社出版)一书中已有所论述。最近,陆续出现了“频率不限定的变频器”、“慢速切换的变频器”、“相移因数为1的变频器”及“相移因数可控的变频器”。这类变频器比相控变频器有更优越的特性,为得到这种优越特性,所付出的代价是各开关不再能按照简便的自然换流方式来工作了。了解并掌握这类变频器的工作原理、有关电路、运行特性及控制系统,对应用和设计此类装置的工程技术人员来说,无疑是非常必要的。本书比较全面而系统地阐释了这方面的问题,工作原理叙述得清楚,定量分析也比较详尽,同时还提供了大量性能方面的数据,并列举了不同场合的可能的用途。我们译出此书,希望能对从事交-交直接变频器方面工作的人员有所帮助。

本书由王孝祥、何耀三、施建屏、童明儒翻译,王兴亚、王孝祥审校。

由于译者水平所限,书中难免有不妥和错误之处,请读者批评指正

序

本书论述了不使用电气储能元件，而依靠单级电子开关电路来完成能量变换的一类静止交-交变频器。这类变频器可用于交流电机的变频调速，恒频电源，稳定电压和校正功率因数所用的可控无功功率发生器以及交流系统间的中转装置(a-c system interties)。相控（或称自然换流）循环变流器（亦称周波变流器）则是这类交-交直接变频器中最著名的一种。

静止的交-交直接功率变换的一些基本概念在二十世纪二十年代已经形成，到20世纪30年代初期确立了循环变流器的原理。循环变流器是这类交-交变频器中很特殊的一种，它不需要有“内部”关断能力的静止开关；而所有其它交-交变频器则需要这种有“内部”关断能力的开关，否则就必须配有辅助强迫换流线路。为此，循环变流器是当今获得广泛应用的一种变频器。早在二十世纪三十年代研制的循环变流器使用了栅控汞弧整流器，到了二十世纪五十年代末期，可控硅（即晶闸管）问世，促进了循环变流器的更广泛应用。

二十世纪六十年代中期，作者工作于威斯汀豪斯（Westinghouse）研究实验室，从事关于循环变流器在某些应用中不能工作的固有运行极限的研究。此项研究导致对循环变流器的特性作出详尽的理论分析，以及为了克服这些固有的运行极限而探索新的频率变换技术。于是，发现了各种新型变频器，它们比循环变流器有更优越的特性，获得这些更优越特性的代价是各开关不再能按照简便的自然换流方式工作。这样就形成了一整类的变频器。事实上，有些变频器在二十年代已经存在，只是还没有进入实用阶段而已。

对上述各种变频器同时进行研究的成果，已刊登于作者的两部著作，即《可控硅相控变流器及变频器》（佩莱著）及《静止功率变频器的一般理论》（L.居吉著）中。书中对这一类静止交-交变频器进行统一论述，传统的循环变流器只是其中的一种。从理论观点来看，它并不是一种优越的变频器。

要求变频器的开关强迫关断，从经济上说，目前还不容易达到。不过我们相信，未来器件和线路技术的进步，将一定会为各种变频器的更广泛应用铺平道路。

确定书中应该包括哪些资料时，是只限于那些由广泛的实践经验所形成的资料，还是除此而外，还介绍虽然理论基础不错，但尚未找到从实验室过渡到实际应用的途径的那些资料，这对作者来说，实在是一个难题。我们选择了后者，理由是：首先，正如我们已经说过的，相信书中所论述的线路技术，无疑将会得到普遍的应用；其次，我们相信，现在把这些新概念传播给学生和工程师们，将使这本书如一种“触媒剂”那样，会促使这类变频器获得更广泛的应用；第三，我们相信，在目前主要以自然换流的循环变流器为代表的交-交直接变频器的技术水平下，不了解变频器的更一般原理，就不会看到交-交直接变频器技术在未来的强大生命力，因为循环变流器只是代表一方面的成就而已；第四，我们希望书中提出的一般分析方法，能为研究电力电子学领域中各类线路的学生和工程师们提供一种有用的工具。

书中所介绍的大多数资料都是新的，在很大程度上，是我们断断续续地延续十年之久，在交-交变频器方面所做工作的成果。我们的主要目标是，组织和统一这一类交-交直接变频器的分析方法，以此来显示出这类变频器的各运行特性之间的关系，并予以物理上的解释；同时也为多数重要而实用的变频器提供性能方面的定量数据，指明这些变频器在不同的场合

的可能用途。我们的基本观点，是协调一致地描述变频器的基本原理和概念，以使人们了解它。因此，我们力图将各种变频器互相关联起来，并对得到的理论分析结果予以物理上的解释。

本书主要供工作在电力电子学领域的学生和工程师使用，他们要求对静止变频器的控制方法及其应用有更深入的了解。对于那些使用和设计变频器的工程师，以及那些需要了解静止功率变换的基本原理和分析方法的人们，这些资料可作为参考，以及设计的数据依据。

我们试图使各章自成一体。第一章简单介绍了变频器的历史背景，以此作为静止交-交变频器的引论；介绍了变频器的基本概念，并描述了它的基本工作原理及电路；第二章确立了分析静止变频器的数学结构；第三及第四章研究了不同类型的变频器输出电压波形的合成问题；第五章对相应的输入电流波形进行了分析；第六章为各种变频器（也包括自然换流的循环变流器）提供了众多的设计数据；第七章叙述了静止变频器的实用控制技术；第八章主要讨论各种静止变频器的辅助强迫换流原理，并给出了若干个基本的换流线路；第九章回顾了变频器的各种应用，描述各种实用变频器的工作情况，并给出大量表明实际系统性能的波形图，这些波形图均得自实验室的模型装置。

为简便起见，书中略去了交流电源阻抗对静止变频器工作的影响，因为这些阻抗会使分析大大复杂化，并使数学表达式杂乱无章。若对此有兴趣的读者，可参阅上面列出的两本参考书。我们认为交流电源阻抗一般不会使变频器特性有大的改变，又因为我们的主要目的是使读者对静止功率变频器的基本原理、运行特性及应用的可能性有所了解，因而这里忽略交流电源阻抗的影响是恰当的。

L. 居吉

B. R. 佩莱

1976年1月

符号说明

本书使用的主要符号及其意义如下:

$E(\rho)$, $E_s(\rho)$ —对角存在矩阵, 用来说明公式3-28及3-29定义的串行复合输出电压波形的构成;

f_E —输入电流中非倍基分量的频率;

f_I —交流电源频率(输入频率);

f_o —变频器的需用输出频率;

f_U —输出电压中不需用分量的频率;

$i_{I1(2, 3, \dots)}$ —变频器输入端1(2, 3, …)电流的瞬时值;

$[i_I]$ —由输入电流组形成的列矩阵;

i_{IF} —输入电流的基波分量;

i_{IR} —输入电流基波的有功分量;

i_{IQ} —输入电流基波的正交分量;

I_I —输入电流基波分量的幅值;

I_{IQ} —输入电流正交分量的幅值;

I_{IR} —输入电流有功分量的幅值;

$i_{O1(2, 3, \dots)}$ —变频器输出端1(2, 3, …)输出电压的瞬时值;

$[i_O]$ —由输出电流组形成的列矩阵;

I_o —变频器输出电流需用分量的幅值;

$[H]$ —表示变频器中各功率开关工作情况的存在矩阵;

h_{pq} —确定连接输出端 p 至输入端 q 的功率开关之工作情况的矩阵 $[H]$ 的一个元素;

J —贝塞尔函数;

$M(t)$ —用来产生输出波形的调制函数;

P —脉冲数;

P_o —变频器的平均输出功率;

r —输出电压比, 即: 输出电压中需用正弦分量的幅值除以由正弦平均输出电压获得的需用分量的最大幅值;

t —时间;

$v_{I1(2, 3, \dots)}$ —变频器输入端1(2, 3, …)相电压的瞬时值;

$[v_I]$ —由输入端相电压组形成的列矩阵;

V_I —变频器输入端相电压的幅值;

$v_{O1(2, 3, \dots)}$ —变频器输出端1(2, 3, …)输出相电压的瞬时值;

$[v_O]$ —由输出相电压组形成的列矩阵;

$v_{ow1(2, 3, \dots)}$ —输出端1(2, 3, …)电压需用正弦分量的瞬时值;

V_o —输出电压需用分量的幅值;

β —在输出端由需用角频率测得的角度: 当用脉宽调制法控制输出电压时, 此角度确定了需用分量的幅值;

γ_I —输入电流非倍基分量与基波的幅值之比;

- γ_0 —输出电压不用分量与需用分量的幅值之比；
- δ_I —变频器输入端的相移因数($\delta_I = \cos \phi_I$)；
- κ —希望的输出电压(或基准波)的标么值($\kappa = \tau$ 当 $\kappa \leq 1.0$ 时)；
- λ_I —变频器输入端的功率因数($\lambda_I = \mu_I \delta_I$)；
- μ_I —变频器输入电流的畸变因数；
- μ_0 —输出电压波形的总畸变的有效值；
- ν_I —输入电流的非倍基分量与基波的频率比；
- ν_0 —输出电压中非需用分量与需用分量的频率比；
- ξ —在输出端由需用角频率测得的角度；当用相移法控制输出电压时，此角度确定了需用分量的幅值；
- ρ —在输出端由需用角频率测得的角度；在串行复合输出电压波形的构成中，此角度确定了正型波与负型波之间转换的时刻；
- σ —由 $\sigma = \phi_0 - \rho - \pi$ 定义的控制角；
- ϕ_I —变频器输入电流基波的相移角；
- ϕ_0 —变频器输出负载的相移角；
- $\omega_I - \omega_1 = 2\pi f_I$ ；
- $\omega_0 - \omega_0 = 2\pi f_0$ 。

术语及词组

本书中常见的术语及词组的定义如下：

互补波形(Complementary waveforms)：一般指根据形式相同的调制函数所产生的两个相关波形，通常它们由相同分量组成，但每对相应分量可同相或反相。

复合波形(Composite waveforms)：由两个互补的波形或互补波形的片段所构成的波形。

并行复合波形(Concurrent composite wave forms)：两个互补的正型波和负型波之和(或其算术平均值)所产生的输出电压波形。

串行复合波形(Consecutive composite waveforms)：通过把互补的正型波和负型波“拼接”成连续按顺序排列的正半波和负半波而产生的输出电压波形。

控制：按狭义的说法，常用来描述构成输出电压波形的方法。“控制”确定了变频器电路中各静止开关的导通时间。

希望的输出电压波(Desired output voltage wave)：“控制”企图产生的输出电压波，通常它可有任意的形状。希望的输出电压波一般是实际产生的输出电压波形的“平均值”。

存在函数(Existence function)：函数自变量的值在某一范围内为1，而此范围之外，自变量之值为0，这样的函数称之为“存在函数”。本书中的“存在函数”用于以数学方法来描述变频器电路中各开关的状态。1表示一个开关的闭合，0表示一个开关的断开。

存在矩阵(Existence matrix)：元素为各存在函数的矩阵。

输入电流的非倍基分量(Extrabasal components)：输入电流中除基波分量之外的正弦成分，但这些分量的频率不是基波分量频率的整倍数。

强迫换流(Forced commutation): 可控整流电路中, 元件中的电流依靠辅助的强制手段关断的过程。这可以使用一外部换流线路使开关元件中的电流强迫为零, 并同时在元件两端加一反向电压, 直至它恢复阻断能力为止。

变频器: 本书所用“变频器”一词是指这样的静止系统: 利用固体开关器件将一给定频率的交流功率直接转换成某个频率的交流功率, 而无需中间的直流环节; 在实施控制的时间间隔内, 将给定的输入端与输出端接通。

全输出电压(Full output voltage): 用给定方法来构成输出电压波形时能得到的最大输出电压。

输入电流波的“基波分量”: 输入电流波中具有交流电源频率的分量。

输出电压波的“谐波分量”: 输出电压波中频率为需用输出频率整数倍的非需用分量。只有在希望的输出电压波不为正弦波时, 在输出才会出现谐波分量。

输入电流: 变频器从交流电源各相所汲取的电流。若输出电流为正弦波, 则输入电流波形通常为非正弦波。

输入电流波指标(indices): 变频器输入端的性能的量度指标。它包括输入相移因数(δ_I)、电流畸变因数(μ_I)、输入功率因数(λ_I)、非倍基电流分量的标么频率和标么值(ν_I 及 γ_I)。

输入相移因数: 有功输入功率与基波的伏-安乘积(即电源相电压与输入电流波相应的基波分量的乘积)之比。因此, 输入相移因数表示有功输入功率与无功输入功率之间的关系。

输入功率因数: 有功输入功率与伏-安乘积(即电源电压(假设为正弦)与输入电流有效值之积)的有效值之比。它可以表示有功功率与无功加上非倍基输入功率之和之间的关系。

平均交流输出电压(mean a-c output voltage): 形成输出电压波形的输入电压波形之各片段的平均值。

调制函数(modulating function): 一时间相关函数。它用来描述存在函数对于它的静态角位置(quiescent angular position)的角变化量。调制函数规定了变频器电路中功率开关的工作, 从而也就规定了构成输出电压波形的方法。

自然换流: 无需外部强制手段, 而在可控整流电路元件之间完成电流转换的过程。自然换流可通过适当选择与输入电压波形的瞬时极性相关的切换时刻来实现。

奇函数: 满足条件 $f(-x) = -f(x)$ 的函数。奇函数的图形对称于原点。当一周函数为一奇函数时, 它只含有正弦分量。

奇次谐波函数: 满足条件 $f(x+T/2) = -f(x)$ 的周期性函数(T 为周期)。一个奇次谐波函数只含有奇次谐波(一般是正弦波和余弦波)分量。

输出电流: 变频器供给负载的电流。通常假设它是正弦波。

输出电压控制方法: 改变输出电压的需用分量幅值的方法。

输出电压比: 输出电压中需用正弦分量的幅值, 除以由正弦平均输出电压获得的需用分量的最大幅值。

输出电压波指标: 输出电压波质量的量度指标。它包括不需用分量的标么频率及标么值(ν_o 与 γ_o), 以及输出电压波形的总畸变的有效值(μ_o)。

正型(positive-type)与负型(negative-type)输出电压波形: 两者以这样的方

式产生：对于前者(正型波)，“引入的”输入电压波总比“退出的”输入电压波来得正；而对于后者(负型波)，则“引入的”输入电压波总比“退出的”输入电压波来得负。

变频器电路的脉冲数：当输出频率为零时，在交流输入电压的一个周期中输出电压波形的片段数(就是切换的次数)。具有 p 个脉冲的变频器叫做 p -脉冲变频器。具有同样脉冲数及相同控制方法的变频器，不管其实际电路结构如何，输出波形总是相同的。

次频率分量：不需用的输出电压或输入电流的非倍基分量。它们的频率分别低于需用输出频率或输入基波频率。

超频率分量：不需用的输出电压或输入电流的非倍基分量。它们的频率分别高于需用输出频率或输入基波频率。

输出电压波形的不需分量：输出电压波形中除需用分量外的各个正弦成分。

输出电压波形的需用分量：输出电压波形中具有需用输出频率的正弦电压分量。

需用输出频率：输出电压波形的需用分量的频率。

目 录

符号说明

第一章 基本概念	(1)
第一节 变频器的定义	(1)
第二节 历史背景	(1)
第三节 基本工作特性	(2)
第四节 各种应用的初步探讨	(4)
一、应用UFC的交流电机调速	(5)
二、恒频电源	(7)
三、应用NCC的可控VAr电源	(13)
第五节 工作原理	(14)
一、输出电压波形的合成	(15)
二、输入相移角与输出电压波形构成方法的关系	(19)
三、对双向开关的初步了解——强迫换流与自然换流	(26)
第六节 变频器电路	(30)
第二章 静止变频器的数学描述	(41)
第一节 输出电压波形的数学描述	(41)
第二节 输入电流波形的数学描述	(50)
第三节 小结	(54)
第三章 输出电压波形的合成	(55)
第一节 输出电压波形一般表达式的推导	(55)
一、正型和负型电压波形的一般表达式	(55)
二、串行复合波形的一般表达式	(64)
三、并行复合波形的一般表达式	(68)
四、小结	(68)
第二节 正弦平均输出电压波形的合成	(69)
一、线性调制函数及对应的输出波形	(70)
二、三角波调制函数及对应的输出波形	(74)
三、复合输出波形	(80)
第三节 非正弦平均输出电压波形的合成	(88)
一、正弦调制函数及对应的输出波形	(88)
二、矩形波调制函数	(94)
第四节 正弦和非正弦合成波小结	(97)
第五节 多脉冲输出电压波形	(97)
第六节 三相输出电压波形	(106)
第四章 输出电压的控制	(108)
第一节 存在函数的脉宽调制法控制输出电压	(108)
第二节 存在函数的幅值相关频率调制法控制输出电压	(115)
第三节 移相法控制输出电压	(128)
第五章 输入电流波	(133)
第一节 互补输入电流波一般表达式的推导	(133)

第二节	UFC与SSFC的输入电流波形	(136)
第三节	正型与负型输入电流波形	(146)
第四节	UDFFC的输入电流波形	(153)
第五节	CDFFC与NCC的输入电流波形	(155)
第六节	输入电流与输出电流之间关系的物理解释	(162)
第六章	工作特性和性能数据	(168)
第一节	输出电压(概述)	(168)
第二节	输出电压的需用分量	(168)
一、	需用分量的最大值	(168)
二、	需用输出电压的幅值与控制参数之间的关系	(169)
第三节	输出电压的不需用分量	(173)
一、	UFC	(173)
二、	SSFC	(180)
三、	UDFFC	(180)
四、	平均输出电压为正弦波的NCC及CDFFC	(183)
五、	平均输出电压为梯形波的NCC	(187)
第四节	输入电流(概述)	(190)
第五节	主要输入参数的定义	(190)
一、	输入相移角	(190)
二、	输入相移因数	(190)
三、	输入畸变因数	(191)
四、	输入功率因数	(191)
第六节	输入电流的基波分量	(191)
一、	输入电流的有功分量	(191)
二、	输入电流的正交分量	(191)
三、	输入电流的总基波分量	(201)
第七节	输入电流的非倍基分量	(201)
一、	UFC	(201)
二、	SSFC	(204)
三、	UDFFC	(205)
四、	NCC	(210)
五、	CDFFC	(224)
第七章	控制电路的原理	(225)
第一节	时控电路的基本要求	(225)
第二节	产生线性调制函数的方法	(226)
一、	全电压输出	(226)
二、	脉宽调制法控制输出电压	(226)
第三节	产生周期调制函数的方法	(230)
一、	概述	(230)
二、	“理论上纯粹的”调制函数的产生	(231)
三、	电压反馈控制方案	(234)
四、	积分控制	(241)
第四节	限位控制法	(247)
一、	概述	(247)

二、典型的实用方法	(248)
第五节 UDFFC的控制	(250)
一、实用控制方案	(250)
第六节 NCC与CDFFC的控制	(251)
一、概述	(251)
二、波形切换信号的获取方法	(252)
三、NCC的实用控制方案	(254)
四、CDFFC的实用控制方案	(257)
第八章 变频器的强迫换流	(258)
第一节 基本原理 (硬换流与软换流)	(258)
第二节 换流电路的可能连接位置	(262)
一、换流电路接在输入端的连接方式	(263)
二、换流电路直接跨接在开关元件上的连接方式	(268)
三、换流电路接在输出端的连接方式	(273)
第三节 小结	(274)
第四节 基本换流电路	(275)
一、接在变频器输入端的换流电路	(275)
二、跨接在开关元件上的换流电路	(279)
三、接在变频器输出端的换流电路	(282)
四、基本的电压恢复电路	(286)
第九章 静止变频器的应用	(288)
第一节 交流电机的调速	(289)
一、感应电动机调速的基本原理	(289)
二、采用NCC的感应电动机调速系统	(291)
三、采用UFC的感应电动机调速系统	(296)
第二节 恒频电源	(306)
一、采用NCC的飞机用VSCF发电系统	(307)
二、采用UDFFC的飞机用VSCF发电系统	(312)
三、采用UFC的飞机用VSCF发电系统	(312)
四、采用NCC的地面移动式发电系统	(315)
五、采用感应发电机与CDFFC的地面移动式发电系统	(318)
第三节 静止VAr发生器	(323)
一、采用高频库之变频器的VAr发生器	(323)
二、采用变频器功率倍增连接方案的VAr发生器	(330)
第四节 交流电力系统之间的中转装置	(339)
附录	(345)
参考文献	(349)

第一章 基本概念

第一节 变频器的定义

“功率变频器”这一术语一般系指将某个频率的交流功率变换为另一频率交流功率的系统。通常，这类系统可以使用旋转电机、非线性磁性元件，或各种包含有可控功率开关的静态电路（静止功率变频器）来构成。

上述的静止变频器可进一步分为两大类。第一类具有中间直流环节，分两级完成功率的变换；第二类只用一级装置，直接完成功率的变换。

上述第二类的交-交直接变频器基本上由一组静态开关组成，这组开关直接接在输入与输出端之间。这类变频器的基本工作原理是从输入电压波形中选择一些片段来拼接成具有需用基波分量的输出电压波形。

这种型式的变频器的最著名例子，是大约早在卅年代设计出来的循环变流器(cycloconverter)。我们担心的是，第一次翻看本书的一些读者会认为循环变流器是变频器中唯一的例子。其实循环变流器只是这类变频器中的一种，而大多数变频器则是最近才设计出来的。

本书将致力于这类交-交直接功率变频器的研究。

第二节 历史背景

以频率比可变及功率可双向传送为特征的第一个静止变频器，是在1923年被哈塞汀(Hazeltine)^[6]设想出来的。哈塞汀建立了适用于所有静止变频器的基本工作原理，即用频率给定的多相交流电源的逐个电压波片段来构成选定频率的交流电压波。为达到此目的，他建议利用开关的不同布置，将联接到负载的交流电源的每个电压波，逐个按次序进行切换，以产生所需的输出波形。哈塞汀系统有几点值得注意，即：此系统允许功率自由地送进负载和从负载送出；输出频率与输入频率的比值可以选定和任意变动；另外，控制方法也很简单。然而，由于当时缺乏特性和容量适当的电气开关，从而严重地妨碍这种系统付诸实际应用。

在20世纪30年代早期，欣克尔(Schenkel)^[6]及冯-依生道夫(Von-Issendorff)^[7]应用相控汞弧变流器的原理，研制出一种与上述不同的有实用价值的变频器。这种变频器也允许功率双向传送，但是，与哈塞汀系统相比，其能得到的有用输出频率虽然可以变动，但却低于电源频率。尽管如此，由于这种系统有两个重要特点而使其在实际场合得到应用：首先，它采用汞弧管，因而就有了适当的功率容量；第二，可通过简单地控制汞弧管的点火角来改变输出波形的幅值。原先所制的这种变频器，用来将标准的三相、50赫交流功率变换成单相、频率为 15 、 $16\frac{2}{3}$ 或 25 赫的交流功率，在欧洲已用在电力牵引上。

里西克(Rissik)^[1, 2]对汞弧频率变换器作了全面的评价。他采用“循环变流”一词来表述将多相“高频”电源的电压波逐个转换成“低频”交流电压波的过程；此外，还把应用上述原理工作的静止频率变换器称为“循环变流器”。此后，这种应用可控整流器的系统，在文献中通常便叫做“相控”或“自然换流”的循环变流器。

晶体管的出现及其工业技术的迅速发展以及随后可控硅（或称晶闸管）^①的采用，再加上线路和控制方面的技术也取得了迅速的进展，导致从五十年代末开始，人们对静止变频器又重新感兴趣了。硅半导体器件体积小、结构坚固、压降低，同时具有快速的切换特性，致使在飞机上“变速恒频”（variable-speed-constant-frequency简称为VSCF）发电系统及工业上交流电动机的变频电源中应用静止变频器具有吸引力。1959年杰西（Jesse）与施沛文（Spaven）^[9]提出一种静止变频器，其所根据的原理类似于哈塞汀所建立的，利用功率晶体管由一变频电源来产生恒频输出。为了同样的应用，其它科研工作者^[8, 10, 11, 13]加速了更加实用的使用晶闸管的自然换流循环变流器的研制；而且从那时起，作了不少扎实的工作^[15, 21, 22, 24, 40, 54, 63]，以完善这种航空用发电系统。由于使用了大容量的晶闸管，使自然换流循环变流器可用于实际系统，从而促进了这种趋势的发展^[1]。

另一方面，其它类型的静止变频器需要具有内部关断能力的开关（晶体管或门控开关）或人工强迫换流。由于缺乏这种大功率器件，还有强迫换流难于处理，妨碍了静止变频器的发展。

功率变换与控制用半导体器件的出现，标志着对在交流电机的调速传动中使用自然换流循环变流器已开始了新的尝试。循环变流器的基本特性，例如，连续可控的输出频率与输出电压，以及固有的再生制动能力，表明它可为交流电机传动提供一个“理想的”变频电源。由这种电源驱动的交流电机，其转速范围、转矩及效率与电枢电压被控的直流电机类似。而从实用观点来看，循环变流器与鼠笼式感应电动机的组合系统似乎更具有吸引力。所以，最近十年来，人们^[14, 17~20, 23, 25, 27~32, 34, 36]花了很大力气致力于这种系统的研制。循环变流器这种变频电源看来特别适用于驱动大功率、低转速的交流电机^[41, 43, 44, 47, 61, 62]。

除了上述实际成就外，在二十世纪六十年代还进行了大量的理论工作，具有过去所达不到的特性的新式静止变频器被设想出来了^[48, 56, 57, 59]，并提出了新的应用^[66, 67]。在1970~1971年，作者发表了两本理论著作^[9, 48]，其中推导了输入电流波与输出电压波的精确的解析表达式，列出了有关不同变频器外部性能的全面定量数据，对自然换流循环变流器的特性进行非常深入的描述。1972年麦克墨莱（McMurray）发表了一篇专题报告^[4]，总结了自然换流循环变流器的设计与应用方面的问题。

在考虑历史背景时，必须认识到变频器的研制总是与大功率电子开关技术的进展有密切联系。栅控汞弧整流器的出现，随后的半导体晶闸管的应用，导致发明了自然换流的循环变流器，及其后来的更臻完善。毫无疑问，将来大功率电子开关器件的发展，必将进一步推动静止变频器的研制，并对其实际应用产生深远影响。

第三节 基本工作特性

事实上，变频器一词并不能完整地描述所要讨论的这种型式电路（电功率调节器）的特性；除了有连续控制输出频率与输入频率比值的能力外，还有连续控制输出电压幅值的能力；通常，这类型式电路还有这样的性质，即负载在输入电源所引起的相移角（即相角）不同于输出端负载的相角。输入电流对于输入电压的相移角，至少在某个范围内，可以是输出端运行参数的相关函数，也可以与这些参数无关，而是可以调节的；相关与否，取决于变频器的具体型式。这类型式的变频器均有功率可以双向传送的内在特性。

① 事实上，“晶闸管”一词通常指所有的四层器件，但在本书中专指可控硅。

一个虚拟的理想变频器可以这样描述：根据其定义，假设它有十分灵活的功能，端电压及电流均为正弦波，因此，它就象是一个普通的变压器，既有任意变换交流输入电压的频率和幅值的能力，还有变换输入相角，使之不同于输出负载相角的能力。从理论上说，这种理想变频器是没有损耗的，因而必要的条件是输入端的有功功率必须等于输出端的有功功率，而且如上所述，功率可以在其间双向传送。

象上述这样一个虚拟变频器的功能简化表示法，如图1-1所示。图中，将一个给定幅值 V_I 、角频率 $\omega_I (=2\pi f_I)$ 的正弦交流电压源（一般为多相）接在变频器的输入端。此外施正弦电压变换成幅值为 V_O 、角频率为 $\omega_O (=2\pi f_O)$ 的输出电压波并加在负载上。这样在输出端，变频器连同输入电源一起，可看成为一个简单的“黑盒”电压发生器。它在负载两端的输出电压为 v_O ；与此电压相对应，就有一个交流输出电流 i_O 流过负载，电流 i_O 的幅值 I_O 与相角 ϕ_O 由负载的阻抗特性决定。

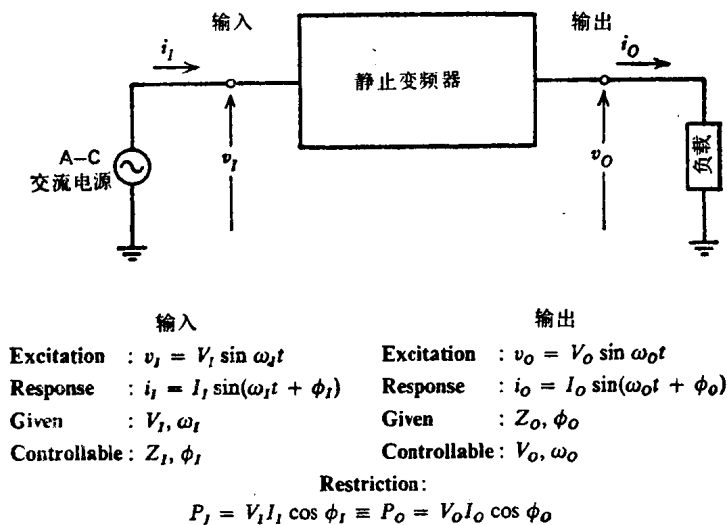
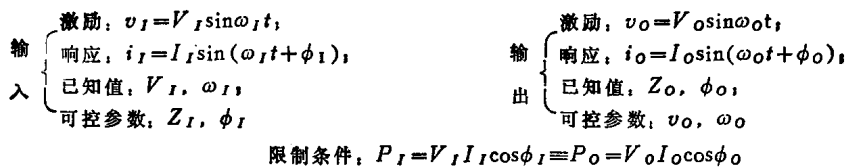


图 1-1 虚拟静止变频器功能简化示意图



考察反方向的频率变换过程，即从输入端看，变频器将频率为 f_O 的输出电流波变换为频率为 f_I 的输入电流波。

虚拟变频器的基本原理也表明必然是上述那样，而与变频器的内部工作机理无关。因为频率为 f_I 的电流，是从输入电源侧汲取了一部分净功率；而输入电源的这部分净功率，显然必须与输出端负载所汲取的净功率相平衡。然而，输入与输出功率相等并非是确定输入电流波的幅值 I_I 和相角 ϕ_I 的唯一条件。的确，这些参量是变频器的输出电流-输入电流（或者说阻抗更为恰当）变换特性的函数。所以，在输入端，这个虚拟变频器连同它的输出负载一起，可以看成是一个“黑盒”阻抗连接在一个有功功率分量等于输出负载功率的交流电源上，而其相移角则可任意调节。

总之，具有十分灵活运行特性的虚拟变频器能够完成下述基本变换，其限制条件是输入

功率必须等于输出功率：

$$\begin{array}{ccc}
 \text{输入} & & \text{输出} \\
 \omega_I & \longrightarrow & \omega_O \\
 V_I & \longrightarrow & V_O \\
 \Phi_I & \longrightarrow & \Phi_O
 \end{array}$$

实际上，所讨论的这一类变频器的任一型式，都不可能具有如这种虚拟模型那样的没有限制的灵活功能，每种变频器的工作特性不是在某方面就是在其它方面总要受到限制。对所有型式的变频器来说，输出频率以及输出电压的幅值 V_O 都能够相互独立地进行连续调节。然而，除了一种外，所有其它型式的变频器，输出频率变化范围的上限总低于输入频率。有一种变频器（如早已指出的传统的循环变流器），其输入相移角 Φ_I 为输出负载角 Φ_O 与输出电压相对电平的函数；而其它变频器，则恰恰是输出负载角的函数；这些变频器中，一种输入相移角总是零，与输出负载角无关；另一种变频器，其输入相移角在一定范围内可以调节，而与输出参数无关。

本书将要研究的各种最重要的变频器及其基本运行特性，列于表1-1中。此表未作何解释，理由是各种类型变频器的不同功能特性，读者在往后阅读本书时自然会明白。

表 1-1 本书论述的基本类型的变频器及其基本运行特性

变频器名称	略语	输出频率	输出电压	输入相移角
频率不限定的变频器 (Unrestricted frequency changer)	UFC	$0 \leq f_o \leq \infty$	$0 \leq V_o \leq V_{o_{max}}$	$\Phi_o = -\Phi_o$
慢速切换的变频器 (Slow switching frequency changer)	SSFC	$0 \leq f_o \leq f_I$	$0 \leq V_o \leq V_{o_{max}}$	$\Phi_I = \Phi_o$
相移因数为1的变频器 (Unity displacement factor frequency changer)	UDFFC	$0 \leq f_o < f_I$	$0 \leq V_o \leq V_{o_{max}}$	$\Phi_I = 0$
相移因数可控的变频器 (Control lable displacement factor frequency changer)	CDFFC	$0 \leq f_o < f_I$	$0 \leq V_o \leq V_{o_{max}}$	$-\Phi_{I_{max}} \leq \Phi_I \leq \Phi_{I_{max}}$ $\Phi_{I_{max}} = f(V_o, \Phi_o)$
自然换流的循环变流器 (Naturally commutated cycloconverter)	NCC	$0 \leq f_o \textcircled{D} < f_I$	$0 \leq V_o \leq V_{o_{max}}$	$\Phi_I = - f(V_o, \Phi_o) $

①当 $0 \leq f_o \leq \infty$ 时， $\Phi = 90^\circ$ 及 $V_o \rightarrow V_{o_{max}}$ 的情况除外。

第四节 各种应用的初步探讨

为了列举各种类型变频器的实际用途，以及根据不同特性而灵活设计的各种变频器，现