

调速用 变频器及 配套设备 选用 指南

吴忠智 黄立培 吴加林 编著



机械工业出版社
China Machine Press

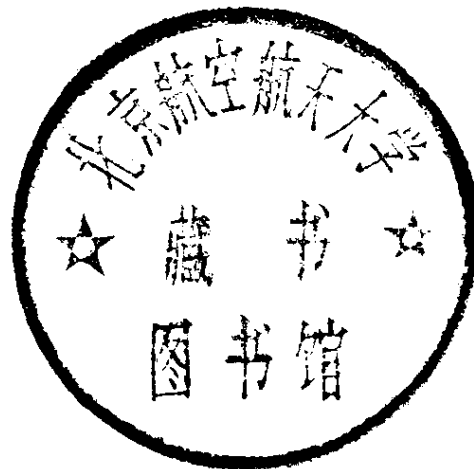
TN773-62

02

00007242

调速用变频器及配套设备 选用指南

111 869
吴忠智 黄立培 吴加林 编著



C0483220

机械工业出版社

本书主要介绍变频器的型式、电力半导体器件的使用、异步电动机的控制方式、CPU 芯片和变频器的可靠性等方面的知识；同时还介绍了电动机用变频器供电的特性，并对如何选用变频器的配套设备和各种电动机，以及对变频器安装、接线、维修检查、故障诊断等做了详细介绍，回答了一些使用中的实际问题。本书内容实用、新颖，可供工矿、企事业单位、设计院的电气人员使用；也可供大专院校教学参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

调速用变频器及配套设施选用指南/吴忠智编著. —北京：机械工业出版社，2000.3

ISBN 7-111-07808-X

I. 调… II. 吴… III. ①变频调速-变频器-指南 ②变频调速-变频器-配件-指南 IV. TN773-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 10876 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑：李振标 版式设计：霍永明 责任校对：肖新民

封面设计：姚 毅 责任印制：路 琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2000 年 3 月第 1 版·第 1 次印刷

850mm × 1168mm¹/₃₂ · 6.625 印张 · 173 千字

0 001—4 000 册

定价：14.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

前 言

随着电力电子技术、微电子技术及控制理论的发展,变频器已经广泛用于交流电动机速度控制。其最主要的特点是具有高效率的驱动性能、良好的控制特性。应用变频器不仅可以节约大量电能,而且变频器的自动控制性能可以提高产品质量和数量;机械行业中应用变频器是改造传统产业、实现机电一体化的重要手段;在工厂自动化技术中,交流伺服系统正在取代直流伺服系统。发展变频器的应用技术,可以有效地提高经济效益和产品质量。为了迎接交流调速新时代,以及贯彻原机械部、国家计委、国家经贸委、国家科委、国家技术监督局等八部委以机械科[1996] 68号文公布的第十七批机电产品节能推广项目,应机械工业出版社的约稿特编写本书。

我们将几年来在变频器的生产、教学、科研、销售服务过程中积累的资料、知识和经验汇编成本书,供设计院所电气设计人员及各企事业单位选用变频器及配套设备。

全书分为7章,内容包括变频器的类型、电力半导体器件的使用、电动机变频调速的原理、变频器的基本功能和合理使用、变频器的安装与调试、变频器的配套设备以及变频器在节能中的应用,并回答了变频器使用过程中的一些实际问题。全书以通用变频器为主,适当介绍了高性能交流调速系统的有关知识。

本书可以作为工程技术人员进行变频器设计、安装调试的参考书,亦可作为在职人员进行继续教育的教材。

由于我们水平有限,研究不深,有不足之处,还希望广大读者提出宝贵意见。

全书由吴忠智、黄立培、吴加林共同编写,吴忠智统稿,黄立培负责统校。黄立培负责编写第二章第二~五节及第三章第四

IV

节，吴加林编写第五章，其余章节由吴忠智编写。

在编写过程中还得到了成都市佳灵电气制造公司的支持，在此表示感谢！

作者 吴忠智 黄立培 吴加林

目 录

前言

第一章 调速用变频器	1
第一节 变频器的种类	1
第二节 变频器的基本工作原理及特点	7
第三节 变频器的构成与功能	15
第四节 电力半导体器件	29
第五节 变频器单片机的应用	38
第六节 变频器质量及可靠性指标	43
第二章 异步电动机变频调速的控制原理	50
第一节 异步电动机的基本工作原理	51
第二节 V/f 恒定控制	58
第三节 转差频率控制	65
第四节 矢量控制	72
第五节 逆变器的电压空间矢量和磁通轨迹控制	85
第三章 变频器的配套设备	91
第一节 对电源电网干扰的防止	91
第二节 变频器谐波干扰的防止	99
第三节 变频器的配套设备	108
第四节 制动电阻与制动单元	119
第四章 电机和负载的特性与变频器的选择	130
第一节 电机的负载特性	130
第二节 电机的转矩特性	134
第三节 负载的转矩特性	136
第四节 噪声、振动	140
第五节 各种电动机配套使用变频器的选择	144
第五章 变频器的安装接线、调试与维修	160
第一节 变频器原理框图及接线	160

第二节	变频器的安装	172
第三节	变频器的维修与检查	173
第四节	变频器的保护功能及故障诊断	176
第六章	调速用变频器在节能等领域中的应用	180
第七章	变频器通俗问答	197
参考文献		206

第一章 调速用变频器

变频器是一种静止的频率变换器，可将配电网电源的 50Hz 恒定频率变成可调频率的交流电，作为电动机的电源装置，当前国内外使用较为普遍。使用变频器可以节能、提高产品质量和劳动生产率。本章主要介绍变频器的类型、原理、特点、构成、质量及可靠性，为广大读者选用变频器有个基本了解。

第一节 变频器的种类

变频器的种类很多，按以下几种分类：

一、按变换频率的方法分类

1. 交-直-交变频器

交-直-交变频器首先将恒定 50Hz 的交流经整流，变换成直流，经过滤波，再将平滑的直流逆变成频率可调的交流。根据滤波部分使用的元件不同，变频器的型式又分为两种：一种是用电容滤波，其直流回路的电压波形比较平直，输出阻抗很小，电压不易突变，相当于直流恒压源，称之为电压型变频器；另一种是用电感滤波，其直流回路的电流波形比较平直，输出阻抗很大，电流不易突变，称之为电流型变频器。图1-1为交-直-交电压型

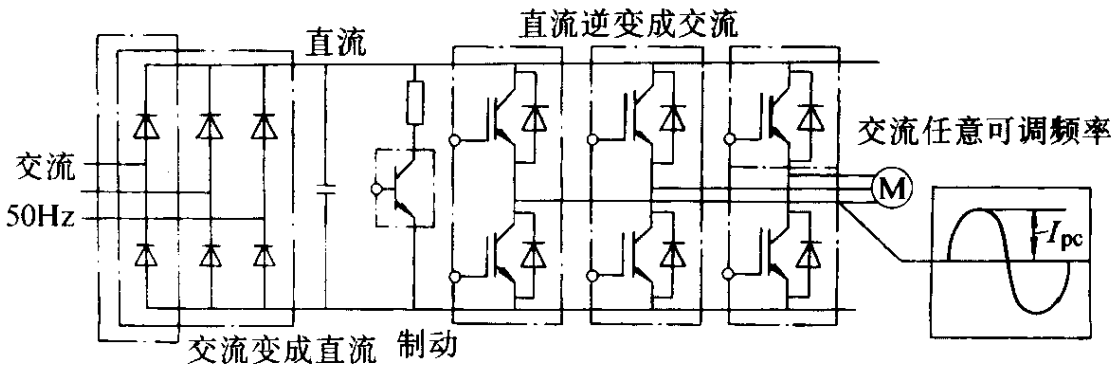


图 1-1 交-直-交电压型变频器主电路及输出电流波形

变频器的主电路及输出电流，图 1-2 为交-直-交电流型变频器的原理图。

2. 交-交变频器

交-交变频调速系统如图 1-3 所示。它由三组反并联晶闸管可逆桥式变流器组成，采用电网自然换相原理，具有过载能力强、效率高、输出波形好等优点，但同时也有着输出频率低(最高频率小于 1/2 电网频率)、电网功率因数低、旁频谐波影响等缺点，交-交变频分为有环流方式和无环流方式，可驱动同步电动机或异步电动机。

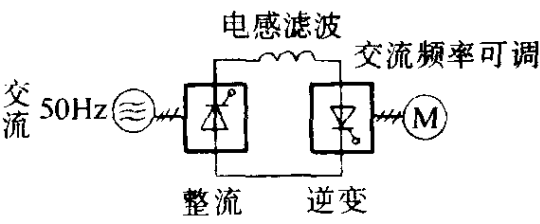


图 1-2 交-直-交电流型变频器原理图

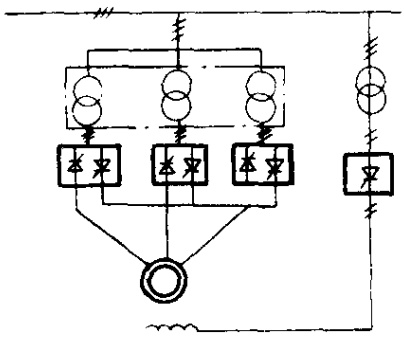


图 1-3 交-交变频同步电动机调速系统

二、按改变变频器输出电压（或电流）的方法分类

1. PAM

所谓 PAM (Pulse Amplitude Modulation)，是一种改变电压源的电压 E_d 或电流源的电流 I_d 的幅值，进行输出控制的方式。因此，在逆变器部分只控制频率，在变流器部分控制输出的电压或电流。采用 PAM 调节电压时，高电压及低电压时的输出电压波形示于图 1-4。

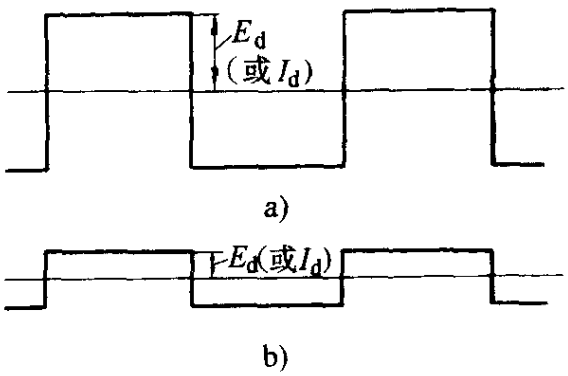


图 1-4 采用 PAM 的电压调节
a) 高电压时 b) 低电压时

2. PWM

PWM (Pulse Width Modulation) 方式是在输出波形的半个周期中产生多个脉冲，使各脉冲的等值电压为正弦波状，输出电压或电流波形平滑且低次的谐波少。

图 1-5 为 PWM 逆变器的电压调节原理。在图 a 中，三角波形的调制波与正弦波形的信号波比较，取其逻辑（设信号波比三角波大时为正逻辑），就可得到相应于信号波幅值的脉冲宽度调制电压输出波形，它与正弦波形等效，如图 b 和图 c 所示。

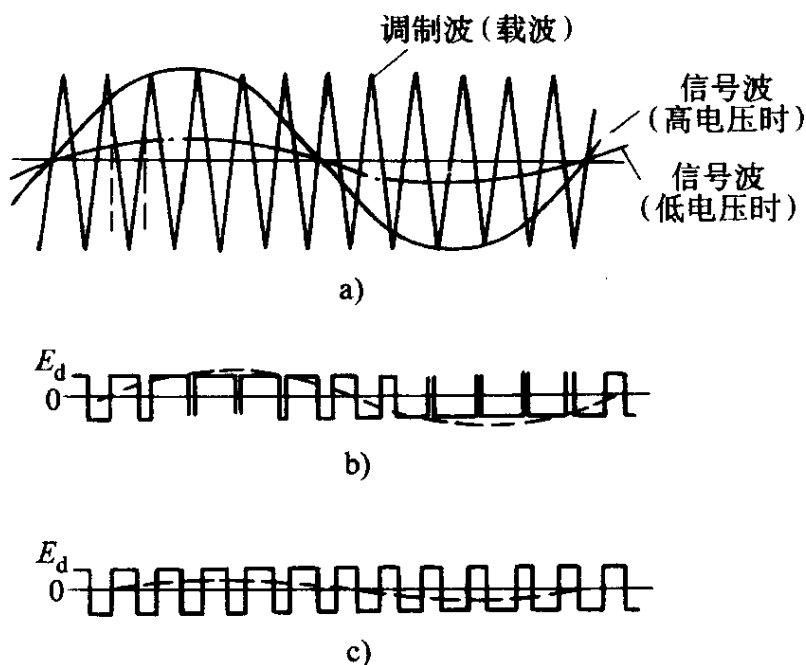


图 1-5 采用 PWM 的电压调节

在晶闸管逆变器中，其换相时间需要一百至数百微秒 (μs)，开关频率低，难以实现 PWM 控制，通常采用 PAM 方式。

对于可自关断器件晶体管和 GTO 晶闸管逆变器，可以采用 PWM 方式，对频率和输出电压进行控制调整。因此，在 PWM 方式中，直流环节可以是固定电压（或电流）的直流，整流部分通常采用二极管桥式整流。

三、按电压等级分类

变频器按电压等级分为两类：一种是变频器电压等级为 380V ~ 460V 属低压型变频器；第二种是高压型变频器，电压等级为 3kV、6kV、10kV。

1. 低压型变频器

这类变频器单相为 220V ~ 240V，三相为 220V 或 380V ~ 460V，容量从 0.2kW ~ 280kW ~ 500kW，一般称为中小容量变频器。

2. 高压大容量变频器

高压大容量变频器主要有两种结构形式：一种是采用升、降压变压器称之为“高-低-高”式变频器，亦称为间接高压变频器；另一种采用高压大容量 GTO 晶闸管或晶闸管功率元件串联结构，无输入、输出变压器，直接将高压电源整流为直流，再逆变输出高压，称之为“高-高”式变频器，亦称直接高压变频器。

1) 间接高压变频器 间接高压变频器的结构形式是由于受功率器件电压等级、容量等的限制而推出的，系统包括输入和输出变压器、旁路开关、低压变频器等。输入变压器为降压变频器，它将高压电源电压降到变频器允许的电压（如 380V ~ 460V），经低压变频器变频变压后，再经输出变压器（即升压变压器）升压，供给高压电动机。间接高压变频器技术难度不大，单位成本也不高，但由于增加了输入、输出变压器等，使整个系统结构复杂，占地面积大，损耗增加，效率降低。但这种系统对于高压中、小容量的交流电机，仍是一种有效、经济而实用的形式。

我国某厂转炉鼓风机从法国引进了两套用于 6kV、2000kW 异步电动机的 IMDRIVE-2000 高压变频调速系统，以分别调节 D680-31 型离心式鼓风机的风量，取得了很好的节电效果，在 2 年内从节电费用中收回全部投资。

采用变压器耦合的“高-低-高”式高压变频器，利用多重化技术，可有效降低谐波分量，减少转矩脉动，提高电机运行效率。

2) 异步电动机用直接高压变频器 随着功率半导体器件向高压大容量化的发展，使大、中功率容量的变频器直接高压化成为可能。这种直接高压变频调速驱动方式由于省去了输入、输出变压器等，减少了损耗，提高了设备效率，减少了占地面积，是

高压变频器的的发展方向。

近年来，国外的直接高压变频器有了很大发展，其技术已经成熟，并有批量产品供应市场。根据主电路所用功率器件的不同，可有不同形式的直接高压变频器。

·采用晶闸管的直接高压变频器：

这种直接高压变频器主电路功率器件全部采用晶闸管串联构成的晶闸管阀串，其主要生产厂家有：俄罗斯莫斯科电力科学研究所，以及由它提供技术的乌克兰、爱沙尼亚等国家的生产厂家，另外法国也可生产这种产品。

莫斯科电力科学研究所研制的高压异步电动机直接变频器采用晶闸管高压串结构作为主电路功率器件，它由多个晶闸管串联组成，其触发系统采用光纤传导和互感器两种方式，前者用于 5000kW 以上的产品，后者用于 5000kW 以下的产品。晶闸管采用风冷和水冷两种冷却方式，可根据用户需要选择。

采用 GTO 晶闸管的直接高压变频器：

这种变频器采用 GTO 晶闸管串联组成的阀串作为主电路的功率器件，由于 GTO 晶闸管是全控型器件，所以它不像晶闸管变频器那样需要用于晶闸管关断的换相电路，因而它的主电路结构简单，这种类型的高压变频器的生产厂家有美国的 A-B 公司、GE 公司、德国 SIEMENS（西门子）公司、日本富士公司、瑞典 ABB 公司等。

A-B 公司的 Bulletin1557 系列变频器是一种高压（2.3kV ~ 6.9kV）电流源型变频器，其逆变器采用 GTO 晶闸管串联组成的阀串作为功率器件，整流器的功率器件则采用串联的晶闸管进行三相全波晶闸管整流。它采用 CSI-PWM 控制技术，把电流源型逆变器的功率结构与 PWM 控制技术的优点结合起来，使之具有许多重要特点。

·采用低压变频器串联构成的高压变频器：

前已介绍，为了实现变频器的高压大容量化，可以采用带输入、输出变压器的“高-低-高”方式，也可以采用无输入、输出

变压器的“高-高”方式，但这种变频器需要主电路功率单元串联，也有不少公司推荐采用“高-低”方式，即采用降压变压器将电网电压降低到低压变频器允许的电压，经低压变频器变频后，供给低压电动机调速，但这种方案不适合对已有的设备改造，除非更换电机，采用低压变频器串联构成的高压变频器可以克服这种缺点。

这种采用低压变频器串联构成的高压变频器是美国 ROBINCON（罗宾康）公司的产品，它将电网电压经变压器降低到低压变频器允许的电压，在二次各相中，串入用 IGBT 构成的单相变频器，经低压单相变频器串接后，实现高压输出，直接供给高压电动机，这种方式不需要输出变压器，电流波形接近于正弦波。单相变频器串联的数量决定于输出电压的高低。

3) 同步电机高压变频调速系统 由于同步电机起动困难，调速不便，所以以往仅用于风机、泵类等不调速、没有正反运行和很少起动的设备上，但在晶闸管变频调速技术日益发展的基础上，同步电机变频调速也和异步电机变频调速技术一样受到人们的重视。

高压同步电机变频调速和高压异步电机变频调速一样，也有“高-低-高”间接式和“高-高”直接式两种。

四、按不同用途分类

变频器在各行各业应用很多，根据各行业应用的特点设计成专用的变频器不少，如轧机同步电机用变频器、空调用变频器、电梯用变频器、地铁机车用变频器和电动车辆用变频器。现就国内外研制的情况简要介绍如下：

1. 地铁机车用变频器

目前，国外已将大功率门极关断（GTO）晶闸管成功地应用于无轨电车、轻轨车辆、地铁机车、钢轮支撑直线电机传动车辆、内燃机车、干线电力机车和磁悬浮试验车辆的传动系统中。

2. 电动车辆用变频器

汽车是人们外出活动的重要工具，特别在西方工业化国家，

其客运的 80% 由汽车来承担，汽车进入家庭早已是平常的事。但是由于汽车所使用的石油储量逐渐减少，以及汽车对大气的污染，因而研制电动汽车正受到广泛关注。

3. 轧机用变频器

轧钢机是大容量、高过载、快速响应的生产机械，过去一直以直流电动机传动为主，从 1970 年以后开始用交流异步机、同步机代替，采用矢量控制的交流变频调速不仅具有直流传动同样优越的调速性能，还有许多优于直流传动的特点。轧机用变频器的种类有：

(1) 交-交变频，由三组反并联晶闸管可逆桥式变流器组成。可分为有环流和无环流方式，可驱动同步电机或异步电机。

(2) 交-直-交同步电机用变频器，也称为无换向器电机变频器。采用晶闸管整流和逆变，运用同步电机转子过励磁的容性无功功率来提供晶闸管换相，主要用在不可逆轧机上。

(3) 交-直-交多电平脉宽调制变频器，这种变频器的一个桥臂上有 4 个以上的电力半导体器件，通常为 GTO 晶闸管或 IGBT，对这些器件进行合适控制，其输出电压有多个电平，可以有效地改善电压波形。

4. 风机、泵类用变频器

风机、泵类在我国用电量中占 40%，为了节能同时又要降低变频器价格，在世界各国都生产有节能型风机、泵类用变频器，表 1-1 为风机、泵类变频器和通用型变频器的比较。

表 1-1 风机、泵类变频器和通用变频器的区别

性能参数	风机、泵类变频器	通用变频器
最高频率/Hz	50 ~ 120	50 ~ 400
起动转矩	50% 以上	150% 以上
过载电流	120%，1min	150%，1min

第二节 变频器的基本工作原理及特点

异步电动机用逆变器传动时的框图示于图 1-6。如图所示，

变流器将交流变为直流，经直流滤波后，由逆变器将它变换为频率可调的交流。为了进行电动机的调速，所给出的操作量有电压、电流、频率。

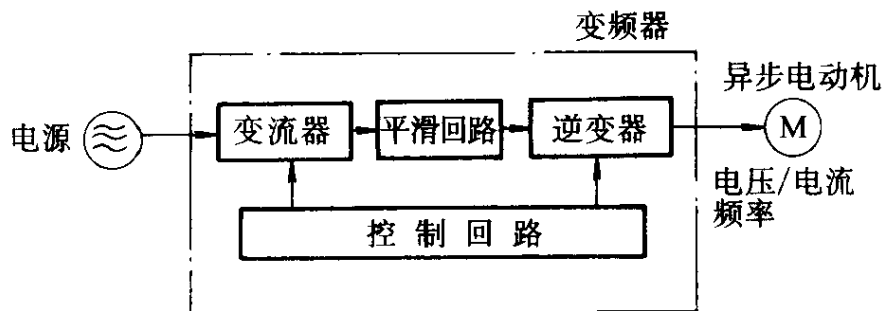


图 1-6 变频器的基本构成

这里以单相变频器为例来说明电压型、电流型等变频器的基本工作原理。

1. 电压型与电流型

作为主回路方式有电压型逆变器和电流型逆变器。电压型逆变器是将电压源的直流变换为交流的逆变器，电流型逆变器是指将电流源的直流变换为交流的逆变器。

1) 电压型 电压型变频器的原理图及其工作示于图 1-7。其中图 a 为单相桥式电压型变频器，如果使开关 $S_1 \sim S_4$ 像图 d 中那样导通、关断，那么负载电压 V 就成为矩形波交流电压，其大小等于直流电压源 E_d ，如图 b 中实线所示。这里我们假定：负载电流 i 由于负载电感的平滑作用为正弦波状交流电流，如图 b 中虚线所示。

现在，使开关 S_1 、 S_2 导通，由直流电压源 E_d 沿图中①路线供给负载电流 i 。在时刻 t_1 使这两个开关关断，同时使开关 S_3 、 S_4 导通，于是负载电流就沿②路线经直流电压源 E_d 续流。

考虑负载电流 i 和开关的动作状态，直流电流 I_d 的波形如图 c 所示。另外，负载电压 V 与负载电流 i 的积为瞬时功率 p ，它与直流 I_d 的波形相同，瞬时功率 p 的平均值 P_d 为向负载提供的有功功率。

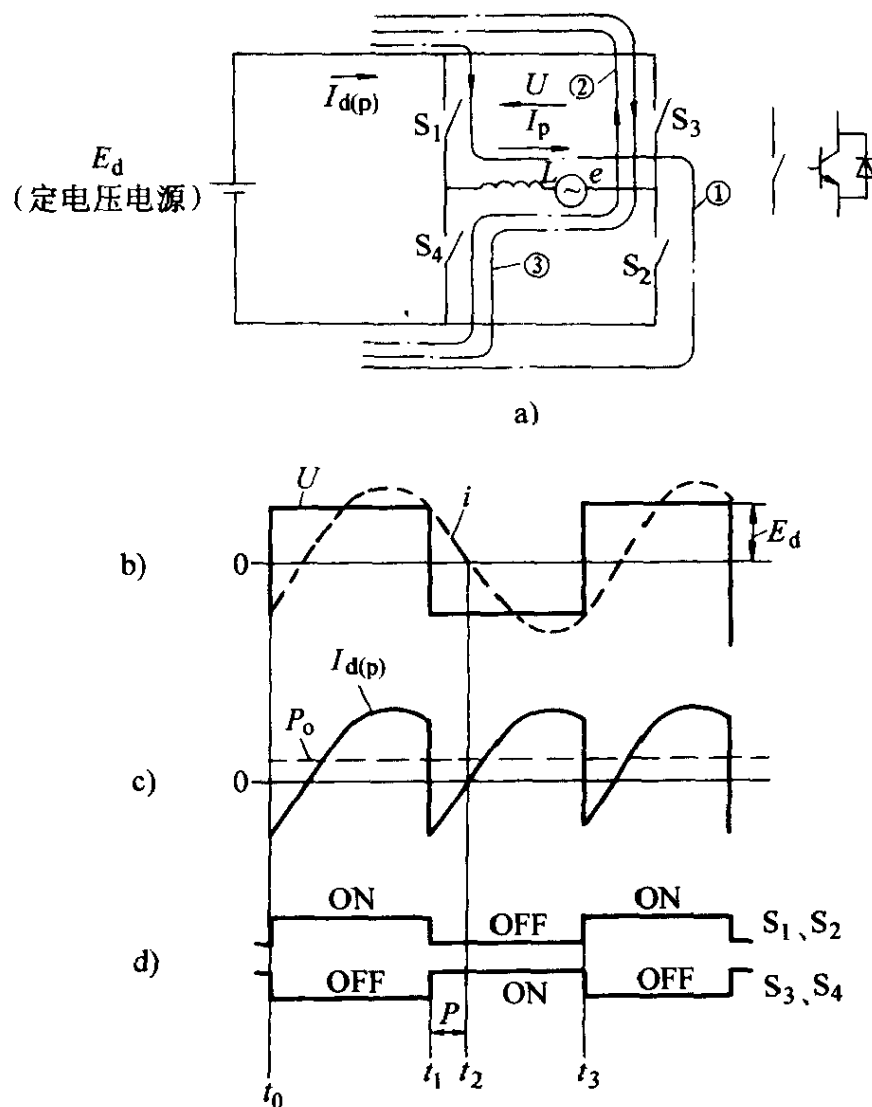


图 1-7 电压型逆变器的原理

a) 回路构成 b) 电压/电流波形 c) 直流
电流波形 (瞬时功率) d) S_1, S_2 动作状态
 S_3, S_4 动作状态

时刻 $t_1 \sim t_2$ 的滞后角 φ 相当于异步电动机的滞后功率因数角, $\varphi < 90^\circ$ 时有功功率为正 (电动状态), $\varphi > 90^\circ$ 时为负 (再生状态)。滞后角 φ 与瞬时功率 p 及有功功率 P_a 的关系, 示于图 1-8。

当开关采用单向导通的半导体开关时, 以晶体管为例, 为了向电源回馈 (路线②), 要同晶体管反并联续流二极管。

2) 电流型 电流型变频器的原理及其动作示于图 1-9, 其中图 a 为单相桥式电流型变频器, 如果使开关 $S_1 \sim S_4$ 像图 d 那样导通、关断, 则负载电流 i 就变为矩形波交流电, 大小等于直流电流源 I_d , 如图 b 中实线所示。负载电压 V 由负载的感应电势 e 决定, 为正弦波形, 如图 b 中虚线所示。

现在, 使开关 S_1, S_2 导通, 负载电流 i 从电流源 I_d 经图示的路线①流出。在时刻 t_1 关断这两个开关时, 因为是电流源, 负载电流必须急速地反向, 但是电感负载的电流不可能瞬时反向, 在负载两端需要有吸收电感内所贮存能量的回路。在吸收此能量期间, 负载两端将产生基于 Ldi/dt 的尖峰电压。

由于能量吸收回路的作用, 负载电流反向后, 功率从负载向电源回馈, 在时刻 t_2 负载电压反向。此后, 在 $S_1、S_2$ 再次导通时刻 t_3 之前的期间, 为功率从电源流向负载的电动状态。

考虑负载电压 V 和开关的动作状态, 直流电压波形 E_d 为图 c 的波形。另外瞬时功率 P 与直流电压波形相同。此瞬时功率 P 的平均值为有功功率 P_a , 如图 c 中虚线所示。

异步电动机的滞后功率因数角 φ 与瞬时功率 p 和有功功率 P_a 的关系, 同图 1-8 中的电压型逆变器波形一样。

采用半导体开关时, 对于电流型变频器, 通常采用晶闸管,

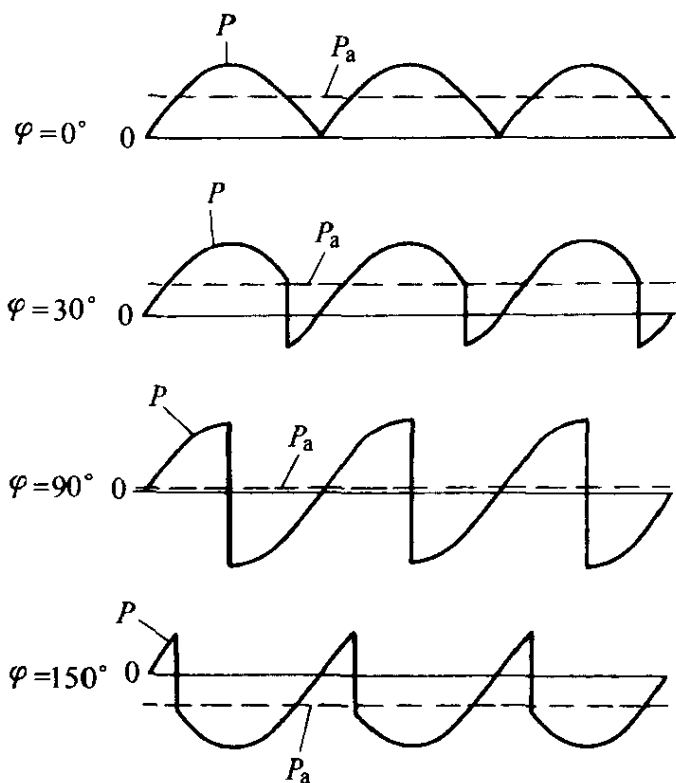


图 1-8 滞后角 φ 与瞬时功率 p 、有功功率 P_a