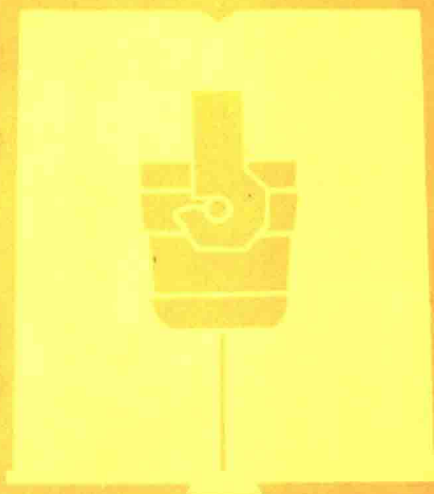


● 高等学校教学用书 ●

交流调速中的 变频技术

GAODENG XUEXIAO JIAOXUE YONGSHU



冶金工业出版社

高等学校教学用书

交流调速中的变频技术

北京科技大学 诸祖同·主编

冶金工业出版社

(京)新登字036号

高等学校教学用书

交流调速中的变频技术

北京科技大学 诸祖同 主编

冶金工业出版社出版

(北京北四环大街嵩祝院北巷39号)

新华书店总店科技发行所发行

香河县第二印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张 8.5 字数 201千字
1993年11月第一版 1993年11月第一次印刷
印数 1~2600册

ISBN 7-5024-1244-1

TP·46(课) 定价4.20元

前 言

为了适应交流变频调速技术的发展,目前许多高校工业电气自动化专业开设了交流调速中的变频技术这门课,重点介绍各种变频器的工作原理及其应用。为使学生深入了解变频调速技术,掌握较完整的基本理论和基本知识,我们编写了此书。

全书共分四章。第一章为交-直-交电压型变频器,分析电压型变频器主电路、换流原理以及电压型变频器在交流调速中的应用。第二章为交-直-交电流型变频器,分析电流型逆变器主电路、换流原理以及电流型变频器在交流调速中的应用,并对工业中应用较为广泛的中频加热装置作较为详细的叙述。第三章为脉宽调制型变频器,分析脉宽调制原理及其控制方法,对新型电力电子器件 GTR、GTO 等在脉宽调制变频器中的应用作重点介绍。第四章为交-交变频器,分析交-交变频器的工作原理,重点介绍它在工业应用中的有关技术问题,如输出电压控制、影响输出频率的因素以及谐波、功率因数等。

本书主要作为高等工业院校工业电气自动化专业的教材,也可供有关专业师生及工矿企业的工程技术人员参考。

本书由北京科技大学自动化系诸祖同(第一、二章)、南方冶金学院陈惠民(第三章)、鞍山钢铁学院汪仁先(第四章)编写。诸祖同担任主编。

东北工学院、华东冶金学院、北方工业大学等院校的有关同志对本书原稿进行了审阅,并提出了宝贵的修改意见,在此对他们表示感谢。

由于编者水平有限,书中一定存在缺点和错误,诚恳希望读者批评和指正。

编 者

一九九二年六月

目 录

绪论	1
第一章 交-直-交电压型变频器	3
第一节 逆变器的基本概念	3
第二节 单相逆变器	8
第三节 电压型三相逆变器	13
第四节 交-直-交电压型变频器	25
第五节 交-直-交电压型变频器的电压控制	26
第六节 交-直-交电压型变频器中异步电动机运行在回馈制动状态	27
第二章 交-直-交电流型变频器	30
第一节 异步电机的简化等值电路图	30
第二节 串联二极管式电流型逆变器	32
第三节 其它型式电流型逆变器	40
第四节 交-直-交电流型变频器	42
第五节 交-直-交电流型变频器中异步电动机运行在回馈制动状态	42
第六节 交-直-交电流型变频器的多重化连接	44
第七节 单相并联谐振式逆变器	49
第三章 脉宽调制型(PWM)变频器	59
第一节 PWM型逆变器的脉宽调制原理	59
第二节 逆变器中使用的新型电力电子器件	70
第三节 PWM控制技术	81
第四章 交-交变频器	98
第一节 单相交-交变频器工作原理	98
第二节 交-交变频器中的环流及环流控制	104
第三节 三相交-交变频器	110
第四节 交-交变频器的一些其它问题	110
第五节 交-交变频器的谐波分析	117
第六节 交-交变频器的输入功率因数	125
主要参考文献	131

绪 论

电力拖动系统分为恒速拖动系统和调速拖动系统,调速拖动系统对于提高产品质量、提高劳动生产率和节约电能具有重要意义。调速拖动系统又可分为直流调速系统和交流调速系统。长期以来由于直流调速系统的性能指标优于交流调速系统,因此直流调速系统一直在调速领域占主导地位。但是直流调速系统具有下面几个主要缺点:

- (1) 采用直流电动机拖动,直流电动机容易出现故障,维修困难。
- (2) 使用场合受到限制,在易燃易爆以及环境恶劣的地方不能采用。
- (3) 由于直流电动机的结构因素使单机容量及转速受到限制,以致直流调速系统发展受到了限制。

(4) 直流电动机的价格远高于交流电动机。

随着电力电子技术的发展,特别是控制技术的发展,近年来交流调速获得飞跃的发展。交流调速系统具有下面几个主要优点:

- (1) 交流电动机特别是鼠笼异步电动机的价格远低于直流电动机。
- (2) 交流电动机不易出现故障,维修非常简单。
- (3) 交流电动机的使用场合没有限制。
- (4) 交流电动机的单机容量可远大于直流电动机。

随着交流调速系统的发展,它的调速性能已可与直流调速系统的性能相媲美,已有取代直流调速系统的趋势,从而将进入交流调速系统的时代。特别要指出的是交流调速对节约能源的作用,如在工业用电占 30% 以上的风机和泵类负载上采用交流调速技术,那么在我国每年至少可节电上百亿度。

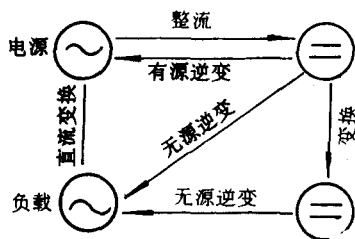


图 1 交流技术包含分支

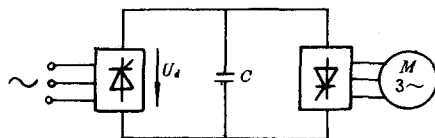


图 2 交-直-交电压型变频器

交流调速系统可采用许多不同的交流调速方法,如调压调速、串级调速、变频调速等等。但是最有代表性的是变频调速。变频调速获得迅速的发展与变频技术的发展密切相关,变频技术是变流技术的重要组成部分。变流技术如图 1 所示,它包括交流和直流相互变换的总体。而不同的变频技术可采用图 1 中不同的分支。

在交流调速系统中的变频技术总体上可分为三大类:

- (1) 交-直-交电压型变频器,示意图如图 2 所示。
- (2) 交-直-交电流型变频器,示意图如图 3 所示。

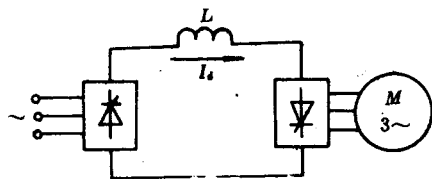


图 3 交-直-交电流型变频器

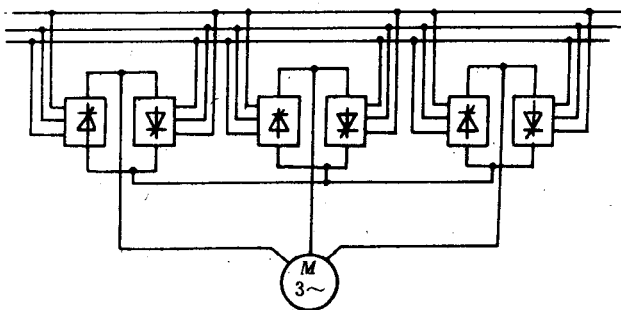


图 4 交-交变频器

(3) 交-交变频器，示意图如图 4 所示。

虽然变频技术不仅可应用于交流调速系统，而且还有其它广泛的用途，如变频加热装置等等。但是结合专业的需要，本课程只结合交流调速技术来阐述变频技术的基本原理。由于交流调速系统中的变频技术还处在不断发展和不断完善的过程，因此变频电路类型繁多，本教材只能结合几种常用典型线路，分析其基本工作原理，同时结合目前新发展的线路，指出其特点，从而掌握变频技术的基本特点和要求，为今后学习交流调速系统有关课程打下一定的理论基础。

第一章 交-直-交电压型变频器

交-直-交电压型变频器是交流调速系统中最早采用的一种变频器,它的结构原理图如图 1-1 所示。它由可控整流器、中间滤波环节和逆变器三部分组成。可控整流器是将工频电源整流为电压可调的直流电压,作为逆变器的直流电源。逆变器是将这直流电压逆变为频率可调的交流电压,供给要求调速的交流电动机。中间滤波环节由电容器和电感组成,它的作用是将脉动的整流电压滤为平直的直流电压。

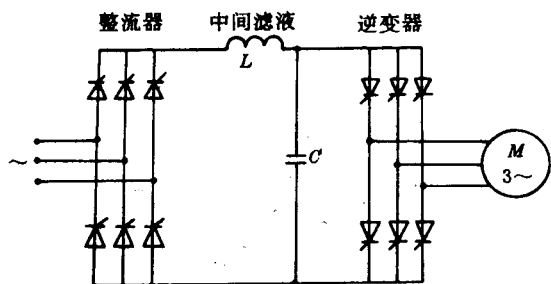


图 1-1 交-直-交电压型变频器

本章重点讲述晶闸管逆变器的工作原理以及交-直-交电压型变频器在交流调速系统中的作用及其工作方式。

第一节 逆变器的基本概念

在变频器中将直流电逆变为交流电的环节统称为逆变器。在晶闸管整流电路中也讲述过晶闸管整流器运行在有源逆变的工作原理,它是将直流侧的能量经整流桥回送给工频交流电源,而在变频器中,逆变器是将直流电能变为交流电能供给负载,如异步电动机,而不是回送给交流电源,所以这种逆变状态称为无源逆变。无源逆变和有源逆变工作原理完全不同,它们最本质的区别是换流原理不同,有源逆变是靠电网换流,而无源逆变是靠强迫换流。

一、无源逆变器的工作原理

在无源逆变器中,如何将直流电压逆变为交流电压,可用图 1-2 简单地加以说明。图中 A, B 表示两组开关的接点, R 为逆变器交流侧的负载。当开关接点 A, B 依次导通或关断,即依次轮流切换时,如图 1-2(a) 及 (b) 所示,这时负载 R 上的端电压便是一交流电压,如图 1-2(c) 所示,这样就把直流电压逆变为负载上的交流电压,而且交流电压的幅值决定于直流电压,交流电压的频率又取决于这两组开关的切换频率。

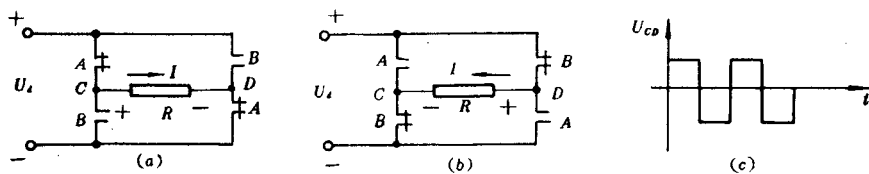


图 1-2 无源逆变器的原理线路

如果将这两组开关的节点用晶闸管元件代替,如图 1-3 所示,当控制图 1-3 中的晶闸管如图 1-2 中的 A, B 接点那样依次轮流导通和关断,这样就构成了晶闸管逆变器的原理电路。

二、无源逆变器的换流

1. 晶闸管的关断特性

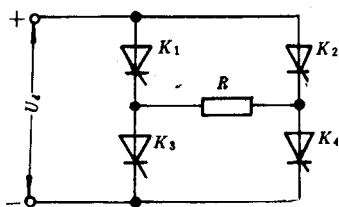


图 1-3 用晶闸管组成的无源逆变器

由晶闸管的导通和关断特性可知,当晶闸管触发导通后,它不能自行关断。为了使晶闸管能可靠地关断,必须满足以下的条件,即当它的阳极电流下降到零值以后,在它的阳极上仍需承受一定时间的反向电压,承受这反压的时间 t_0 应大于晶闸管本身的关断时间 t_q 。所谓晶闸管的关断时间 t_q ,系指当晶闸管电流降到零值以后到它恢复正向阻断能力

所需的时间。晶闸管的关断时间 t_q 在承受的反向电压值大于 50V 以后几乎不变,而承受的反向电压值小于 50V 时,关断时间 t_q 将急剧地增加。

晶闸管整流电路对晶闸管的关断时间没有什么要求,但是在晶闸管无源逆变器中,晶闸管的关断时间是一个极为重要的参数,它对电路的结构、参数、体积、成本、效率等有着极大的影响。所以在逆变器中应尽量采用关断时间 t_q 较短的晶闸管,例如有时要采用快速晶闸管,它的关断时间在 $10\mu\text{s}$ 和 $30\mu\text{s}$ 之间。

在晶闸管整流电路中,晶闸管关断时承受的反向电压是在触发导通下一个晶闸管以后由工频交流电压提供的,也即两个晶闸管之间的换流是靠电网交流电压来完成的,这种换流方式称为电网换流,以前也称之为自然换流。以图 1-4 三相零式整流为例,当在 ωt_2 触发 K_2 关断 K_1 的过程是由于当 K_2 触发导通后 b 点电位高于 a 点,使 K_1 承受反压 U_{ba} ,如图中(d)所示,使 K_1 中电流很快下降到零后而关断,而且关断后它承受的反压时间远大于晶闸管的关断时间 t_q 。因此在整流器中对晶闸管的关断时间 t_q 没有特殊的要求,一般晶闸管都能满足换流的要求。

在晶闸管无源逆变电路中,晶闸管关断的情况就完全不同了。如图 1-3 所示,如 K_1 、 K_4 一旦触发导通后,它就无法关断,因为这时电源电压为直流电压。如果在 K_1 和 K_4 仍处在导通状态时,再触发 K_2 和 K_3 并使之导通,这时不但不能使 K_1 和 K_4 关断,而且会造成直流电源的短路。因此,在无源逆变器中必须首先解决晶闸管之间的换流问题,也就是在触发晶闸管 K_2 、 K_3 以后,必须能可靠地关断 K_1 和 K_4 ,使负载电流从 K_1 和 K_4 换流到 K_2 和 K_3 ,这就需要采用强迫换流。解决无源逆变器的换流是一个十分重要的问题,它将直接影响到逆变器运行的可靠性和经济性。

2. 无源逆变器中的换流装置

无源逆变器中晶闸管之间的换流必须依靠逆变器中的换流装置,换流装置的作用是强迫使原先导通的晶闸管中的电流降到零后而关断,并且为了能使它可靠地关断,换流装置还能使它承受一定的反压时间,在这同时使负载电流换流到之后被触发导通的晶闸管。

虽然无源逆变器中换流装置的电路形式各不相同,但就其工作原理来说,可将其分为三种类型,如图 1-5 所示。

图 1-5(a)表示换流是通过导通元件本身在关断时刻的内阻值极大地提高,亦即相当在电路中串入一高阻抗(如可关断晶闸管、大功率晶体管)来实现的。而采用晶闸管元件不能实现这类换流方式。

图 1-5(b)表示换流是通过在晶闸管主电路中串入一反向电压来实现的。当辅助晶闸管 K_2 触发导通时,由电容器 C (如图中所示的电压极性)向 L_1 放电,因而在 L_1 两端感应电势,

使主晶闸管 K_1 承受反向电压而关断。

图 1-5(c) 表示换流是通过主晶闸管 K_1 上的旁路电容 C 向 K_1 提供反向电压来实现的。这反向电压是在触发辅助晶闸管 K_2 导通时由 C 提供的, 反向电压直接加在 K_1 两端而使其关断。

图 1-5(b)、(c) 中的电容器 C 称为逆变器的换流电容器(也称换向电容器), 它是换流装置中的重要组成部分。从上面分析可知, 为了使晶闸管换流, 换流电容器必须提供所需的电压极性和电压值。换流电容器怎样获得这样的充电电压, 取决于不同的换流装置, 下面以两个简单例子来说明晶闸管的换流过程。

(1) 电容强迫换流

为了简化分析, 以晶闸管关断纯电阻负载电路来说明其换流过程。如图 1-6 所示, K_1 为主晶闸管, R 为负载电阻, 虚线框中的元件组成换流装置, K_2 称为辅助晶闸管, C 为换流电容器, R_1 为充电电阻, 通常 $R_1 \gg R$ 。

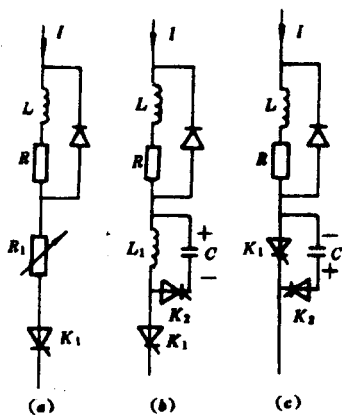


图 1-5 换流回路的三种类型

因为 $t=0$ 时, $u_c(0) = -U_d$, 所以 u_R 的初始值为 $u_R(0) = 2U_d$ 。

电容器 C 上电压变化方程式为:

$$u_c(t) = u_c(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i_c dt \quad (1-2)$$

在 $t > 0$ 以后, K_1 关断后承受的电压就是电容器 C 上的电压, 即

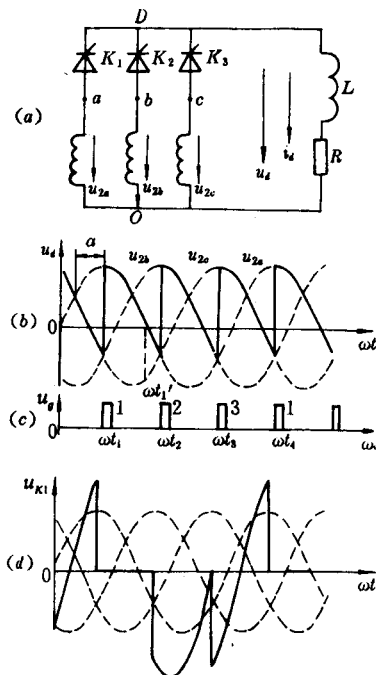


图 1-4 三相零式电路电感性负载整流波形

线路工作原理如下: 当主晶闸管 K_1 触发导通后, K_1 和负载 R 通过负载电流:

$$i = i_{K_1} = \frac{U_d}{R}$$

在这同时可认为电容器 C 已经经过 R_1 和 K_1 充电结束, 充电极性如图所示, $u_c = -U_d$ 。为了关断主晶闸管, 在 $t=0$ 瞬间, 触发辅助晶闸管 K_2 , 由于换流电容器上 u_c 的作用, K_2 立刻导通, C 经 K_2 和 K_1 放电, 很快使 K_1 中的电流降到零而关断。之后换流电容器 C 经 K_2 、电源、负载 R 放电并接着反向充电, u_c 、 i_c 和 u_R 的变化规律可由下面的方程式加以确定:

$$u_R = U_d - u_c \quad (1-1)$$

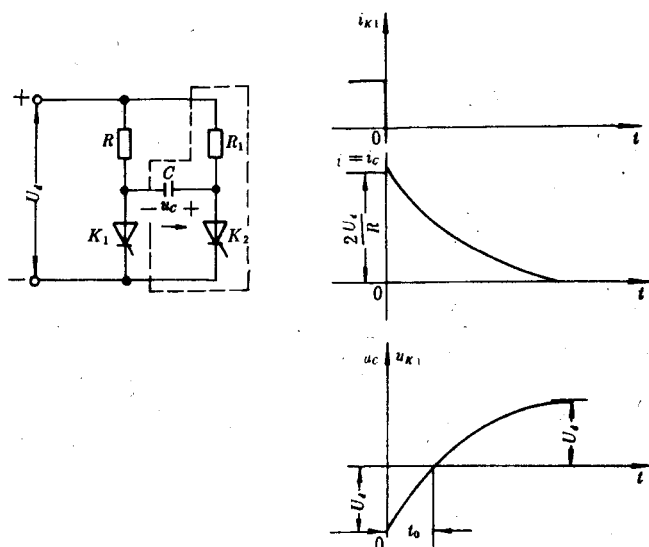


图 1-6 利用电容强迫换流线路及其波形

$$u_{K_1} = u_c \quad (1-3)$$

由式(1-1)和式(1-2)得:

$$\begin{aligned} u_R &= U_d - u_c \\ &= U_d - \left[u_c(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i_c dt \right] \\ &= 2U_d - \frac{1}{R \cdot C} \int_0^t u_R dt \end{aligned} \quad (1-4)$$

将式(1-4)两边微分得:

$$\dot{u}_R + R \cdot C \frac{du_R}{dt} = 0 \quad (1-5)$$

式(1-5)的解为:

$$u_R(t) = u_R(0)e^{-t/\tau} = 2U_d e^{-t/\tau} \quad (1-6)$$

式中 $\tau = RC$ 是放电回路的时间常数, 又因为

$$i_c(t) = \frac{u_R(t)}{R} = \frac{2U_d}{R} e^{-t/\tau} \quad (1-7)$$

所以

$$\begin{aligned} u_c(t) &= u_c(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i_c dt \\ &= -U_d + \frac{1}{C} \int_0^t i_c dt \end{aligned} \quad (1-8)$$

式(1-8)的解为:

$$u_c(t) = U_d(1 - 2e^{-t/\tau}) \quad (1-9)$$

图 1-6 中的曲线表示这些变量的变化规律。从曲线可以看出, 当 $t=0$, K_1 立刻关断时, 负载 R 上的电流并没有消失, 而是变为通过换流电容器 C 的放电电流。只有当换流电容器反向充电结束后, 负载 R 上的电流才降到零。

$u_c(t)$ 的变化规律对换向过程起着决定的作用,显然主晶闸管 K_1 关断后承受反向电压的时间决定于换流电容器 C 的放电速度, $u_c(t)$ 从 $u_c(0)$ 上升到 $u_c(t)=0$ 的这段时间即为 K_1 承受反压时间,如图中 t_0 所示。 t_0 可由式(1-9)求得:

$$t_0 = T \ln 2 = 0.693RC \quad (1-10)$$

如前所述,为了使主晶闸管 K_1 可靠关断, t_0 必须大于 K_1 的关断时间 t_q ,即

$$t_0 > t_q \quad (1-11)$$

由此可求得换流电容器 C 所需的电容量为:

$$C > \frac{t_q}{0.693R} = 1.443 \frac{t_q}{R} \quad (1-12)$$

当负载电阻 R 一定时,换流电容器 C 的大小直接由晶闸管的关断时间 t_q 来决定。这个重要概念在分析换流过程中经常会提及的。

(2) 负载谐振式换流

图 1-7 中的负载电阻 R 与线路中的 L, C 元件组成谐振回路,则可利用它们之间的谐振特性强迫关断晶闸管 K 。线路工作原理如下:

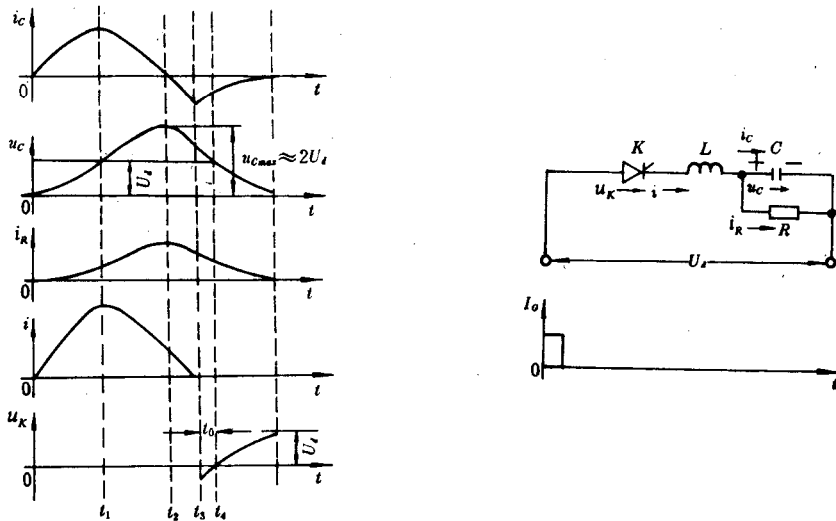


图 1-7 负载谐振式换流线路及波形

当 $t=0$ 瞬间触发晶闸管 K 使之导通,这时通过晶闸管 K 的电流 i 将逐渐增大,其变化规律决定于谐振回路的参数。为了简化分析,假设电阻 R 足够大时,电路可近似看作 L, C 串联谐振,所以 i_c 和 u_c 将近似按正弦规律变化,如图中波形所示。当 $t=t_1$ 时, i_c 达到最大值,而 C 充电到 $u_c=U_s$,此时电感中电流 $i=i_c+i_R$ 也达到最大值,所以电感中的自感电势 $e_L=0$ 。之后电流 i 开始减小,自感电势 e_L 为正,继续向 C 充电。根据 LC 谐振原理,电容 C 在 $t=t_1$ 充电达到最大值时, $i_c=0$,当 R 足够大时, $u_{cmax} \approx 2U_s$ 。之后电容器 C 要经 L 和 K 反向放电,迫使 K 中电流很快降到零,即在 $t=t_3$ 时, $i=0$ 。在 K 关断后,电容器 C 向负载电阻 R 继续放电,显然这时 u_c 将按指数曲线下落。在 $t=t_4$ 时, $u_c=U_s$,此时晶闸管承受电压 $u_K=0$, $t_0=t_4-t_3$ 即为晶闸管 K 承受反向电压时间,它必须满足 $t_0 > t_q$,才能使晶闸管 K 可靠关断。

通过上面对两个换流电路的分析,我们了解晶闸管的关断过程,这种依靠晶闸管本身的换流装置的换流称为强迫换流,与整流电路中的电网换流是完全不同的。由于逆变器中的换流回路形式繁多,工作原理也可能不同,但是在掌握了换流过程的基本特点以后,就容易分析不同形式的换流电路了。

第二节 单相逆变器

一、单相并联逆变器

图 1-8(a)表示常用的单相并联逆变器,为了说明它的简单工作原理,可把它简化成图 1-8(b)。当晶闸管 K_1 和 K_2 交替地导通和关断,则变压器原边的两半绕组交替地接到直流电压 U_d ,因而在变压器的副边感应出一交变电势,如图 1-8(c)所示。

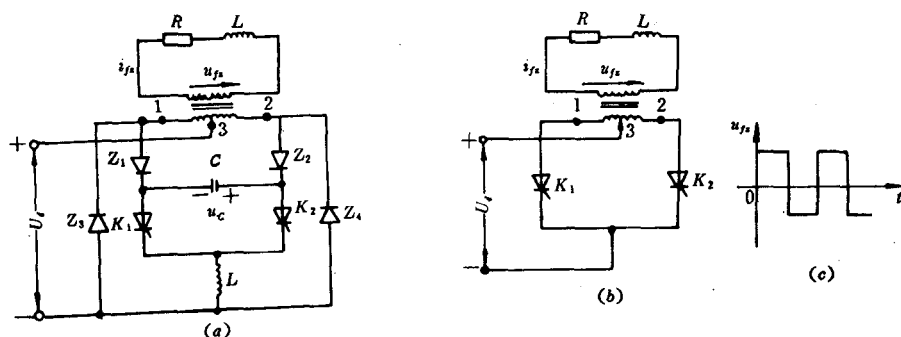


图 1-8 单相并联逆变器
(a)原理线路;(b)简化线路;(c)电压波形

图 1-8(a)中元件 L 、 C 、 $Z_1 \sim Z_4$ 构成逆变器的换流装置,它们各自功能如下:

C 是换流电容器,利用 C 的充电电压可迫使 K_1 或 K_2 关断。因为换流电容器 C 与逆变器的输出变压器并联,所以称为并联逆变器。

L 是换流电感,它有两个作用,一个作用是当晶闸管 K_1 和 K_2 在换流过程中,在短暂的时间内同时导通时, L 可防止造成电源短路。第二个作用是在换流过程中,换流电容器 C 要通过反向并联二极管 Z_3 或 Z_4 放电, L 可限制换流电容器 C 的放电速度,这样使被关断的晶闸管 K_1 或 K_2 能够承受一定时间的反向电压,以便使它们能够可靠地关断。

Z_1 、 Z_2 是隔离二极管,它可防止换流电容器在交流侧尖峰负载时向变压器放电,这样就防止了换流电容器 C 的充电电压的急剧下降,保证晶闸管的可靠换流。

Z_3 、 Z_4 是反馈二极管,在交流侧为感性负载时,它们使感性滞后无功电流有一续流回路,这样可防止在换流电容 C 和晶闸管 K_1 或 K_2 上出现过电压尖峰,这点在下面还将进一步叙述。

逆变器的工作原理如下:

首先假设晶闸管 K_1 触发后处在导通状态,如图 1-9(a)所示,电源电压 U_d 加在变压器的左半部分绕组上(端点 1 和 3 之间),这时在变压器的右半部分绕组上(端点 3 和 2 之间)也将感应相同大小的电势,这样在变压器的原绕组上感应的总电势是 $2U_d$,亦即在端点 1 和 2

之间的电压为 $2U_d$ 。此时换流电容器 C 由电源 U_d 、经变压器绕组 3-2、 Z_2 、 K_1 、 L 充电到 $2U_d$ ，其极性如图 1-9(a) 所示。变压器副边感应电势大小为 $2U_d/k$ ， k 为变压器的变比。图 1-9(e) 表示出副边电压 u_{f2} 的波形(设 $k=1$ 时情况)。

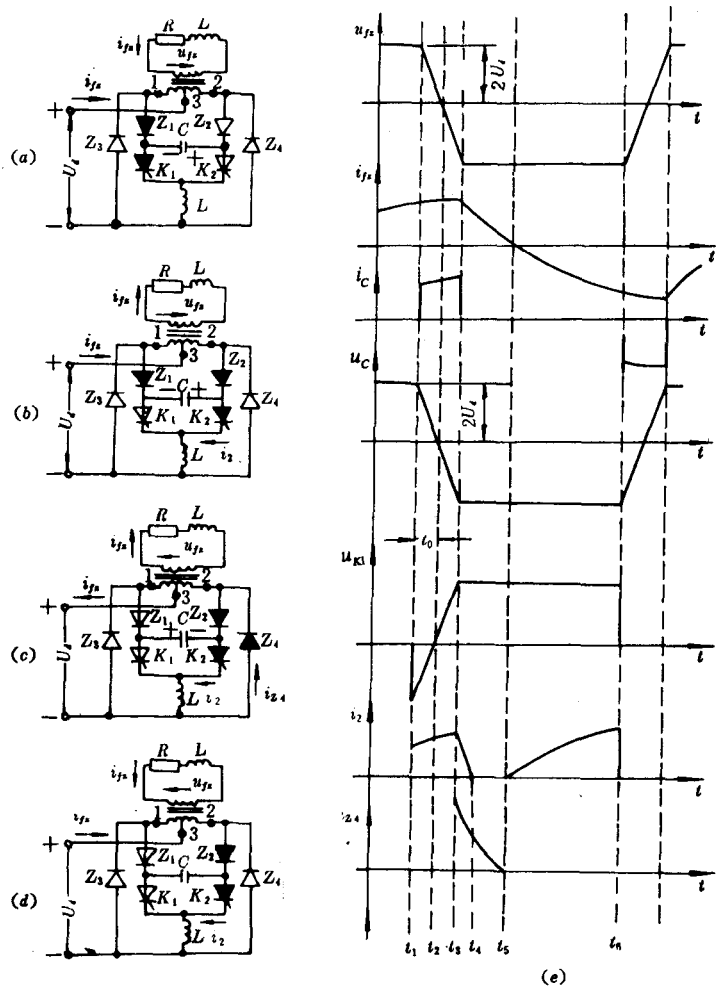


图 1-9 单相并联逆变器的换流过程和波形

假设在 $t=t_1$ 时刻触发晶闸管 K_2 ，由于换流电容器 C 上充电电压的作用，使 K_2 立刻导通，同时也立刻使 K_1 关断。在 K_1 关断后，由于感性负载电流的滞后作用，负载电流 i_{f2} 的方向不能立刻改变，所以原边负载电流仍按原来的方向通过换流电容器 C 和晶闸管 K_2 继续流通，如图 1-9(b) 所示。这时 C 的放电电流即为原边负载电流 i_{f2} 。随着 C 的放电， u_c 逐渐下降，在 u_c 下降到零值之前，被关断的晶闸管 K_1 一直承受反向电压。如图 1-9(c) 所示，在 $t=t_2$ 时， u_c 降到零， K_1 承受反压时间为 t_0 ，必须满足 $t_0 > t_q$ 。之后电容器 C 反向充电，充电电流仍认为是负载电流 i_{f2} ，这过程一直持续到电容器充电至 $u_c = -2U_d$ 为止，因为在这时候变压器原边每半绕组感应电势也达到了 U_d 。之后变压器中的感性电流从左半绕组转移到右半绕组，为了保持变压器原边磁势方向不变，这时电流流动方向如图 1-9(c) 所示，从变压器端点 2 流

向端点 3,经电源+、电源-、反馈二极管 Z_4 构成回路,说明感应滞后电流开始流向电源,回送其电感储能。由于反馈二极管 Z_4 的作用,避免负载电流 i_{fz} 无止境地对电容器充电,以致造成 u_c 过大,为此在电压型逆变器的线路中都有反馈二极管,它的作用就是使感性滞后电流能够经它回送给直流电源,这样负载电流 i_{fz} 下降到零后才开始反向增加。

当负载电流 i_{fz} 从对电容器 C 充电回路转向反馈二极管 Z_3 瞬间,在换流电感 L 中通过的电流为 i_{fz} ,这样由于 L 中的储能,它将经 Z_4 、 Z_2 、 K_2 回路释放这能量,形成如图 1-9(c)中 i_2 环流。当 L 中能量释放完时,晶闸管 K_2 的电流 i_2 又降到零,如图 1-9(e)中 $t=t_4$ 时刻。

当负载感性储能经反馈二极管 Z_4 全部回送给电源时,负载电流降到零,即 $i_{fz}=0$ 如图 1-9(e)中 $t=t_5$ 时刻。之后在电源电压的作用下,负载电流开始反向流入变压器原绕组,如图 1-9(d)所示,其路径从电源+、变压器端点 3、端点 2、 Z_2 、 K_2 、 L 到电源-。负载电流又第二次换流到晶闸管 K_2 ,换流过程即告结束。为了要实现这第二次换流,晶闸管 K_2 的触发脉冲宽度要求大于 90° ,否则有可能在 K_2 没有触发脉冲时不能再次导通,以实现第二次换流。

经过半个周期,重新触发晶闸管 K_1 ,上面所描述的过程将在图 1-9 的另外半边重复进行,这样就在负载上得到一交变电压,交变电压的频率决定于晶闸管 K_1 和 K_2 的切换速度。

上面提到了在换流过程中,换流电感 L 中的储能需要释放这就产生了能量损耗,因此使逆变器的效率降低。有时为了加快 L 释放能量的速度,可在释放回路中增设一个电阻,如图 1-10 所示,这样也可减少晶闸管的负担,但是并不能减少这时的能量损耗,为了减少这能量损耗,可采用隔离耦合电路的方式,如图 1-11(a)所示,将 L 中的储能回送到电源中去,有时也常采用自耦耦合方式反馈这部分能量,如图 1-11(b)所示。减少了这部分损耗,可提高逆变器的效率,这对于大容量逆变器和频率较高的逆变器来说尤其显得重要。

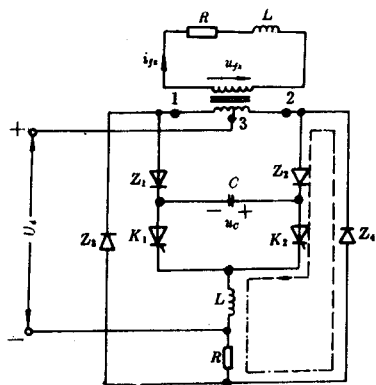


图 1-10 在换流回路增设附加电阻

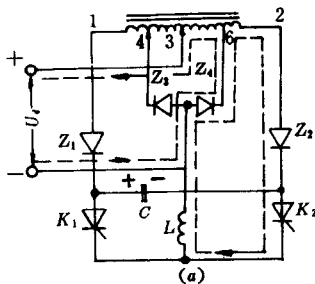
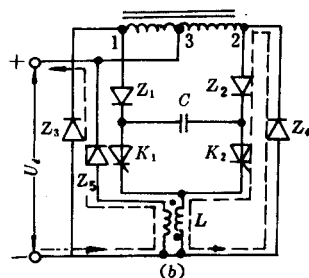


图 1-11 在换流回路具有耦合回馈电路



二、单相桥式逆变器

单相并联逆变器的缺点是晶闸管承受的最大电压是电源电压的两倍,而且必须装设输出变压器,为了克服这些缺点,可采用单相桥式逆变线路,如图 1-12 所示。

单相桥式逆变器中包含四个晶闸管 $K_1 \sim K_4$,四个隔离二极管 $Z_1 \sim Z_4$,四个反馈二极管 $Z_5 \sim Z_8$,两个换流电容器 C_1 、 C_2 和两个换流电感 L_1 、 L_2 。这种换流装置中各元件的作用与单相并联逆变器相同。该逆变器的工作原理如下:

当晶闸管 K_1 、 K_4 或 K_2 、 K_3 成对的依次导通和关断时,就使负载 Z 两端交替地接于直流

电源的正极和负极,从而在负载 Z 两端获得一交变电压。假设当 K_1 、 K_4 导通时,换流电容器 C_1 和 C_2 充电电压极性如图 1-12 所示。经过半个周期触发 K_2 、 K_3 ,则在换流电容器充电电压极性的作用下,使 K_2 、 K_3 立刻导通,同时使 K_1 、 K_4 立刻关断。负载电流按原来方向对换流电容器 C_1 、 C_2 进行充放电,直至它们充电到 $u_c = -U_d$ 时,负载中的感性电流才经反馈二极管 Z_6 、 Z_7 回送给电源,这回送过程一直延续到负载电流降到零值为止。

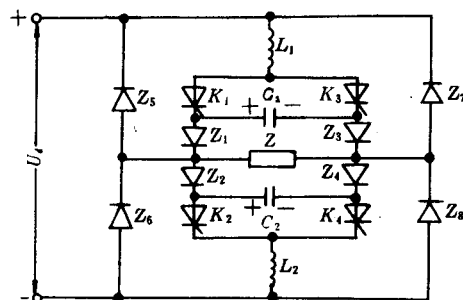


图 1-12 单相桥式逆变器

当负载电流降到零值之后,由于 K_2 、 K_3 触发导通,负载电流开始反向,而处于负半周期。换向电感 L_1 、 L_2 的作用是可以消除在换流过程中两个串联连接的晶闸管 K_1 和 K_2 或 K_3 和 K_4 同时导通而造成电源短路,同时它们也限制了换流电容器的放电速度,保证晶闸管关断时承受一定时间的反向电压,从而保证晶闸管能可靠地关断。

隔离二极管 $Z_1 \sim Z_4$ 的作用是防止在尖峰负载时,换流电容器直接向负载放电而造成 u_c 急剧下降,使换流不能正常进行而造成逆变颠覆。

三、输出电压波形为脉冲列的逆变器

上述逆变器输出电压波形是矩形波,因为在半个周期中导通的晶闸管一直处于导通状态,只有在下半个周期中触发相对应的晶闸管以后,才可使它关断。这种逆变器有两个缺点,一是输出电压波形中包含较大的低次、高次谐波,对异步电动机工作不利;二是当直流电压 U_d 恒定时,输出交流电压值不能调节,这样逆变器只能改变输出电压的频率,而不能改变输出交流电压值,因而逆变器本身不能满足异步电动机变频调速时调节电压的要求。

如果使导通的晶闸管在半个周期中能够多次实现导通和关断,这样逆变器输出电压波形变为一脉冲列,如图 1-13 所示。如果脉冲列的宽度能够调节时,输出交流电压的幅值也就可以改变,同时也可减少电压波形中的低次、高次谐波,因此可满足异步电动机变频调速的要求。为了能使晶闸管在半个周期中多次导通和关断,必须使逆变器中每一个晶闸管有自己单独的换流装置,这样的逆变器称为脉冲列逆变器或称为脉宽调制逆变器(简称 PWM)。

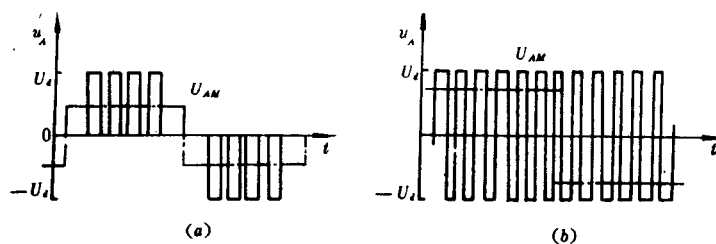


图 1-13 脉冲列逆变器输出电压波形

改变脉冲列逆变器输出交流电压有两种方法,一种称为三点式,输出电压波形如图 1-13(a)所示,电压波形中出现三个值, $+U_d$ 、 0 、 $-U_d$ 。另一种称为二点式,输出电压波形如图 1-

13(b)所示。电压波形中只出现二个值, $+U_d$ 、 $-U_d$ 。调节电压波形的脉冲宽度即可改变输出交流电压的幅值 U_{AM} 。最理想的情况是脉冲宽度按正弦规律调节, 输出电压波形接近正弦波。

用普通晶闸管组成的脉冲列逆变器是十分复杂的。图 1-14(a) 表示一种脉冲列逆变器线路, 每一桥臂是由四个晶闸管和一个换流电容器组成的晶闸管组, 每一个晶闸管组的导通或关断可以受到人为地控制, 该线路的简单工作原理如下:

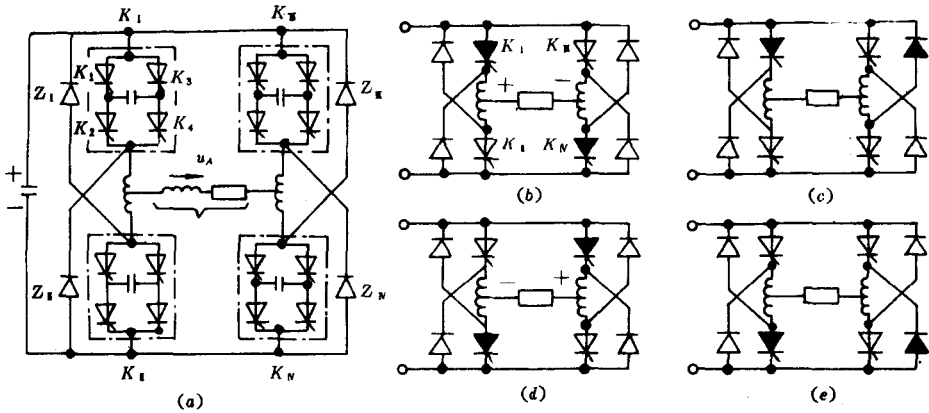


图 1-14 脉冲列逆变器
(a)原理线路; (b)、(c)、(d)、(e)接通次序

当晶闸管组 K_1 和 K_N 导通时, 负载上的电压 u_A 为正, 如图 1-14(b) 所示。当人为地控制晶闸管组 K_N 关断, 负载电流经晶闸管组 K_1 和反馈二极管 Z_1 续流, 如图 1-14(c) 所示, 这时负载上的电压为零。在负半周期晶闸管组 K_1 和 K_N 导通时, 负载上的电压 u_A 为负, 如图 1-14(d) 所示。当人为控制晶闸管组 K_N 关断, 负载电流经 K_1 和 Z_N 续流, 如图 1-14(e) 所示, 负载上的电压为零。显然这种线路属于三点式控制。

控制晶闸管组导通和关断的原理如下: 如图 1-15 所示, 首先 K_1 、 K_4 导通, 换流电容器 C 可经负载很快充电。当充电结束、充电电流小于晶闸管的维持电流后, K_1 和 K_4 自然关断, C 上的充电电压为关断晶闸管作好准备。此时可给 K_1 、 K_2 触发脉冲, K_1 、 K_2

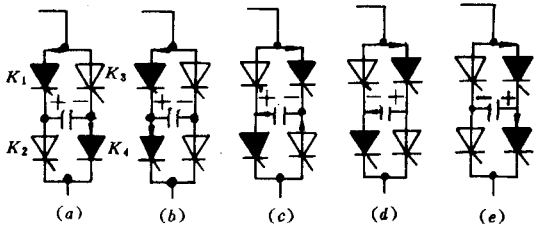


图 1-15 晶闸管组关断过程

导通后即相当这晶闸管组导通, 电压加到负载上, 如图 1-15(b) 所示。当要关断这晶闸管组时, 可触发 K_3 , 如图中(c)所示, K_3 导通后换流电容器 C 的充电电压强迫使 K_1 立即关断, 负载电流换流到 K_3 , 如图中(d)所示, 电容器 C 由负载电流反向充电, 充电结束后 K_2 、 K_3 自然关断, 相当这晶闸管组关断, 负载电流经续流二极管组成回路, 负载上的电压为零。经某一时刻可再触发 K_3 、 K_4 , 如图中(e)所示, 晶闸管组又处于导通状态, 负载电压又为正。当又要关断晶闸管组时, 可触发 K_1 , 使 K_3 立刻关断, C 又反向充电, 充电结束后, K_1 、 K_4 又自然关断,