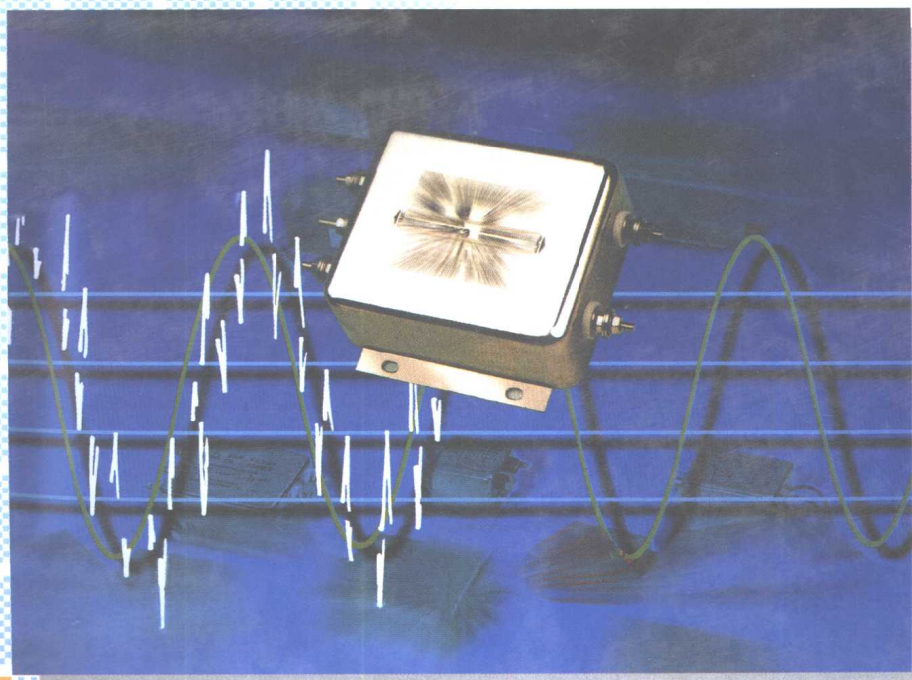


实用电源技术丛书

正弦波逆变器

刘凤君 编著



科学出版社

TM464

1

实用电源技术丛书

正弦波逆变器

刘凤君 编著

科学出版社

2002

内 容 简 介

本书全面详细地介绍了正弦波逆变器技术,阐述正弦波逆变器发展过程中各阶段典型逆变方式的工作原理,以及典型逆变器的工作过程. 主要内容包
括:多重叠加式逆变器,如电压型电流型逆变器的多重叠加;PWM 脉宽调制式
逆变器,如 SPWM 逆变器和电流电压利用率高的 PWM 逆变器;其它 PWM 逆
变器,如消除特定谐波逆变器、优化式和跟踪式 PWM 逆变器;正弦波逆变器
的缓冲电路与软开关逆变器,如适合于正弦波逆变的各种缓冲电路、直流谐
振环逆变器和极谐振逆变器.

本书可作为高等学校电力电子、工业自动化等专业的高年级学生及研
究生的教学参考书,也可供从事电力电子技术研究的广大科技人员阅读.

图书在版编目(CIP)数据

正弦波逆变器/刘凤君编著. -北京:科学出版社,2002

(实用电源技术丛书)

ISBN 7-03-009659-2

I. 正… I. 刘… III. 正弦波-逆变器 IV. TM464

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 058337 号

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2002年2月第一版 开本:787×1092 1/16

2002年2月第一次印刷 印张:27

印数:1—3 000 字数:618 000

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

序 言

什么是电源？很难用一句话概括。但是，现代人谁能离得开电源？衣食住行离不开电源，文化娱乐、办公学习、科学研究、工农业生产、国防建设、教育、环境保护、医疗卫生、交通运输、照明、通讯、宇宙探索等等，哪一样能少得了电源？只要用电就离不开电源。绝大部分的电是由发电厂生产发送的，称为市电。白炽灯、电炉、交流电动机等只要接通市电就行；计算机、电视机、X光机等虽然也是打开开关就能工作，但是这些机器里面都已经做了电能变换处理，将正弦波的交流市电转换成各自需要的直流电、高压电、脉冲电；在无法提供市电的岛屿、车船上，可以用蓄电池经过电能变换获得跟市电一样的交流电，让计算机、仪器设备等工作起来；进入太空的卫星、飞行器，把太阳能收集起来，再经过电能变换，获得需要的各种电能来维持长期运行。电能是宝贵的资源，需要珍惜和节约。绿色照明的节能荧光灯、高光效的HID灯电子镇流器，是经过功率因数校正和高频化处理的电源装置，既省电又净化了电网；交流电动机经过频率变换即所谓变频调速实现了电动机科学运转及电能的合理使用。水力发电、火力发电、核电站是电的主要来源；太阳光、风力、沼气、潮汐、生物能、化学能等等在特定环境里也能发电，作为电力的补充，这些补充发电需要经过DC/DC和DC/AC电能变换使其便于储存，并转换成与电网频率一致的正弦波。电网不稳定给用电设备带来许多麻烦，甚至无法正常工作；太阳、风力受四季和天气影响，发出的电更是不稳，很多场合需要稳压供电，这有赖于电能变换加以调整。总括起来，所谓电源乃是利用电能变换技术将市电或电池等一次电能转换成适合各种用电对象的二次电能的系统或装置。

上述电能变换主要体现在变压、调压、整流、滤波、稳定、变换等。而这些基本的电能变换是通过一系列的技术方法实现的，并且这些技术方法分别适用于不同的环境条件和要求。

变压：变压器是交流变压最常用的装置，相位控制也能完成交流变压，线性补偿、频率变换、时间分割（脉冲宽度调制，即著名的PWM）等都能实现变压。直流变压最常用的手段就是DC/DC变换，无源和有源分压器是小功率直流变压较简便的方法。

调压：在变压的基础上加以步进和连续的设置就成为调压。根据需要可以手动、自动或遥控。

整流：整流是最早使交流电转换成直流电的方法。利用单相性的无源器件来实现则最简单，利用有源开关的同步整流器能将整流器的损耗减至极小。

滤波：为获得平滑的直流，可以通过无源或有源的滤波电路来实现。

稳定：将变压或调压引入自动负反馈控制，就能使之稳定。若反馈量分别是电压、电流、功率、频率、相位，则响应获得稳压、稳流、恒功率、稳频、稳相的稳定电源。

变换：变换的特定含义是由一种状态转变到另一种状态。比如交流-直流之间的转换；正弦波、方波、三角波、梯形波、脉冲波、特种波等波形转换；低频-高频转换；光、热、

机械、风、磁、理化等能量与电能之间的转换。

电能变换涉及的技术非常多，常见的有参数稳压、线性反馈稳压、磁放大器技术、数控调压技术、相控技术、变频、PWM、SPWM、软开关PWM、移相谐振、无功补偿、功率因数校正、裂相、电流均分、传感采样、驱动保护、储能、充电、抗干扰、电磁兼容等等。实际需要推动这些技术不断发展和进步，使电源装置能满足负载各种各样的需求。

造就这些电源装置还需要专用的元器件和材料。电能变换用到的器材有功率开关器件、专用的集成电路、软磁材料以及外围元器件等。由于很多电源装置结构相当复杂，为简化设计而出现的集功率开关、变换控制电路、传感保护电路为一体的智能功率集成模块受到欢迎。

厚膜集成的电源模块、积木式的功能模块，灵活机动，既能单独使用，又能相互组合成较大的电源系统。在这里器件和整机的界限已相当模糊。

不同的负载要求不同的电源装置，万能的电源至少今天还未出现。一个特定用途的电源装置，应当具有符合负载要求的性能参数和外特性，这是基本的要求。安全可靠是必须加以保证的。高效率、高功率因数、低噪音是普遍关注的品质。无电网污染、无电磁干扰、省电节能等绿色指标是全球范围的热门话题，并有相关的国际和国家标准规范进行约束。有时特定的使用环境又要求电源具备一些额外的适应性能力，比如耐高温、耐高寒、耐高湿、抗辐射、抗振动、防爆、体积小、重量轻、智能化等。

电源技术发展到今天，已融会了电子、功率集成、自动控制、材料、传感、计算机、电磁兼容、热工等诸多技术领域的精华，已从多学科交叉的边沿学科成长为独树一帜的功率电子学。

电源技术又是实用性极强的技术，服务于各行各业、各个领域的各式各样的负载，它们的性能特点以及采用的技术方法千差万别，这就造就了电源技术的丰富内涵。

由中国电源学会和科学出版社联合组织出版的《实用电源技术丛书》将展示多彩的电源世界，帮助读者全面了解当今电源的方方面面，并希望读者能从这套丛书中获得启示，在实际工作中找到最佳的电源方案。为此，丛书的选题力求从实际需要出发，内容突出实用性、新颖性和广泛性，写作侧重于原理阐述、实例解剖和经验介绍。我们将尽力让《实用电源技术丛书》成为广大读者的良师益友，但是，电源技术浩如烟海，有限的书目实难尽述。另外，电源的新技术不断涌现，且成长周期相当短，作者的实践有限，谬误之处在所难免，敬请读者指正。

《实用电源技术丛书》编辑委员会

《实用电源技术丛书》编辑委员会

顾 问：蔡宣三 丁道宏
主 任：倪本来
副主任：张建荣 侯振程
委 员：马传添 马鹤亭 区键昌 刘凤君 庄蓄田
李厚福 李朔生 李宗光 陈 坚 严仰光
张 立 张广明 张志国 张 嵘 张承志
张占松 张卫平 陆 鸣 段军政 季幼章
周庭光 赵良炳 赵修科 徐德高 徐会明
徐泽玮 徐德鸿 徐兰筠 袁维慈 黄济青
龚绍文 喻 翔 谭 信

前 言

随着各国工业与科学技术的飞速发展,在将来工业高度自动化的情况下,计算技术、电力电子技术以及自动控制技术将成为三种最重要的技术。

所谓电力电子技术,就是利用半导体功率开关器件、电子技术和控制技术,对电气设备的电功率进行变换和控制的一门技术。这项技术自 20 世纪 50 年代诞生以来,经过了半个世纪的发展,现在已成为理论和科学体系比较完整,而且又相对独立的一门科学技术。特别是 80 年代以来,由于电力电子技术突飞猛进的发展,及其对工业发展所产生的作用,它已被各国专家学者称为是人类社会继计算机之后的第二次电子革命,它在世界各国工业文明的发展过程中所起的关键作用,可能仅次于计算机。预计在 21 世纪,电力电子技术对工业自动化、交通运输、城市供电、节能、环境污染控制等方面的发展,将会产生更大的推动作用。

正弦波逆变器技术是电力电子技术中的一个最重要的组成部分,它的作用是把从电网上得到的定压定频交流电能,或从蓄电池、太阳能电池等得到的电能质量较差的原始电能,转换成电能质量较高的、能满足负载对电压和频率要求的交流电能。这种交流电能不仅可用于交流电机的传动,而且可作为不间断电源(UPS)、变频电源、有源滤波器、电网无功补偿器等逆变器中的电能。

今后,随着工业和科学技术的发展,用户对电能质量的要求将越来越高,包括市电电网在内的所有原始电能的质量可能满足不了用户的要求,必须经过加工后才能使用,而正弦波逆变器技术在这种加工中将起到重要的作用。

作者欲通过本书各章节的论述,对正弦波逆变器技术进行全面深入的介绍。但这项技术所涉及的是一个发展很快的研究领域,它所包含的内容比较广,比较深,作者虽竭尽全力,但由于水平有限,书中内容难免有不足和错漏之处,敬请广大读者批评指正,在此表示衷心感谢。

对为本书出版给予帮助的张建荣和唐正必编辑表示深切谢意。特别感谢唐正必编辑在审阅书稿时所给予的多方面的指导、建议和帮助。

编著者

2000 年 9 月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 逆变器主电路的基本形式	3
1.2 电压型和电流型逆变器	3
1.3 脉波数、脉冲数和电平数.....	5
第二章 多重叠加式与阶梯波逆变器	7
2.1 电压型逆变器的多重叠加	7
2.1.1 电压型与电流型逆变器的输出量调制法和脉冲数	7
2.1.2 多重叠加的原理	9
2.1.3 单相串联多重叠加式逆变器	11
2.1.4 三相串联不等幅多重叠加的分组特性和余弦规律	17
2.1.5 利用分组特性计算的应用实例	26
2.1.6 利用余弦规律设计和计算的应用实例	38
2.1.7 $N=6$ 和 $N=9$ 的各种叠加方式	41
2.1.8 采用三相逆变器的多重叠加	43
2.1.9 多重叠加法的控制电路	54
2.1.10 并联三相多重叠加式逆变器	60
2.1.11 采用一个并联多重变压器的三相多重叠加式逆变器	71
2.1.12 电压型三相逆变器的串联多重和并联多重联接方式	79
2.2 电流型逆变器的多重叠加.....	82
2.2.1 直接并联多重叠加	83
2.2.2 通过输出变压器的多重叠加	89
2.2.3 由电流型逆变器直接并联叠加与通过变压器叠加的比较及其特性	95
参考文献	97
第三章 PWM 脉宽调制式逆变器	98
3.1 同步式 RPWM 方法调制逆变器	99
3.1.1 单脉冲 RPWM 逆变器	101
3.1.2 多脉冲 RPWM 逆变器	102
3.1.3 三相 RPWM 逆变器	105
3.2 同步与非同步式 SPWM 正弦脉宽调制逆变器	110
3.2.1 载波为全波三角波的单相二阶 SPWM 逆变器	110
3.2.2 载波为半波三角波的单相三阶 SPWM 逆变器	122
3.2.3 载波为三角波的三相 SPWM 逆变器	129
3.2.4 死区对 SPWM 逆变器输出电压的影响	135

3.2.5	三相半桥式 SPWM 逆变器输出电压的空间相量表示	148
3.2.6	SPWM 与多重叠加法的联合应用	155
3.2.7	载波为全波三角波 SPWM 逆变器的规则采样法	163
3.2.8	载波为锯齿波的单相 SPWM 逆变器	169
3.2.9	载波为全波三角波和全波锯齿波的三相 SPWM 逆变器的比较	177
3.2.10	载波和调制波都是正弦波或三角波时的单相 PWM 逆变器及其与 PSWM 逆变器的比较	179
3.2.11	SPWM 逆变器的控制电路	182
3.3	直流电压利用率高的三相同步式 PWM 逆变器	188
3.3.1	两相(或两桥臂)调制的三相 PWM 逆变器	188
3.3.2	线电压控制的三相 PWM 逆变器(两相马鞍形 PWM 逆变器)	188
3.3.3	三相马鞍形 PWM 逆变器	194
3.3.4	电压空间相量 PWM 逆变器	196
3.3.5	提高直流电压利用率的规则采样法	205
3.3.6	优化阶梯波脉宽调制逆变器	205
3.3.7	载波为三角波的三相 TPWM 梯形波脉宽调制逆变器	208
3.3.8	载波为锯齿波的三相 TPWM 逆变器	222
3.3.9	三相梯形波调制信号发生器	223
3.3.10	死区对 PWM 逆变器影响的几种补偿方法	227
	参考文献	238
第四章	其它型式的 PWM 逆变器	239
4.1	消除特定谐波的同步式 PWM 逆变器	239
4.1.1	消除指定的一种或多种低次谐波的 PWM 逆变器	239
4.1.2	准消除特定谐波的 PWM 逆变器	250
4.2	优化同步式 PWM 技术	255
4.2.1	效率最优和畸变率最小的 PWM 技术	256
4.2.2	减少转矩脉动控制的 PWM 技术	258
4.2.3	谐波电流有效值最小的 PWM 逆变器	260
4.2.4	减少谐波损耗的控制方式	265
4.2.5	三阶中点钳位(NPC)PWM 逆变器	266
4.2.6	多阶中点钳位 PWM 逆变器	276
4.2.7	随机 PWM 逆变技术	282
4.3	跟踪型两态 Delta PWM 式逆变器及电流型 PWM 逆变器	286
4.3.1	基本的两态 Delta PWM 调制系统	287
4.3.2	两态 Delta PWM 系统调制器的改进	294
4.3.3	电流控制两态 Delta PWM 调制技术	299
4.3.4	跟踪型 PWM 逆变器	301
4.3.5	利用瞬时空间相量的比较器方式跟踪型 PWM 逆变器	303

4.3.6	用三角比较方式的电流跟踪方式	307
4.3.7	PWM 逆变器的无差拍微处理器控制	308
4.3.8	电流型 PWM 逆变器	313
	参考文献	317
第五章	缓冲电路与软开关逆变器	319
5.1	缓冲电路与轨迹法	320
5.1.1	缓冲电路和 $\frac{di}{dt}$ 抑制电路	320
5.1.2	变形的 RCD 缓冲电路	330
5.1.3	简化的 Jung 缓冲电路	331
5.1.4	整体模块使用的缓冲电路	333
5.1.5	减少开关损耗的轨迹法	335
5.1.6	复合型无损耗缓冲电路	338
5.2	直流谐振环逆变器	341
5.2.1	基本直流谐振环逆变器(RDCLI)	341
5.2.2	无源主动钳位直流谐振环逆变器(ACRDCLI)	348
5.2.3	并联直流谐振环逆变器(PRDCLI)	350
5.2.4	直流谐振环逆变器的 PWM 控制方式	355
5.2.5	PWM 调制式直流谐振环逆变器	358
5.2.6	结实型直流谐振环与组合式 PWM 逆变器	363
5.3	极(pole)谐振逆变器	367
5.3.1	准谐振电流模式逆变器(QRCMI)	368
5.3.2	加入辅助二极管的极谐振 PWM 逆变器(ADRPI)	375
5.3.3	零电压转换三相 PWM 逆变器(ZVTI)	391
5.3.4	采用反馈电感在死区内换流的辅助谐振变换极 PWM 逆变器(IFARCPI)	398
5.3.5	三电平与多电平逆变器的软开关电路	403
	参考文献	416

第一章 绪 论

所谓逆变器,是指整流(又称顺变)器的逆向变换装置.其作用是通过半导体功率开关器件(例如 SCR, GTO, GTR, IGBT 和功率 MOSFET 模块等)的开通和关断作用,把直流电能变换成交流电能,因此是一种电能变换装置.由于是通过半导体功率开关器件的开通和关断来实现电能转换的,因此转换效率比较高,但转换输出的波形却很差,是含有相当多谐波成分的方波.而多数负载要求逆变器输出的是正弦波,那么如何利用半导体功率开关器件的开通和关断的转换,使逆变器输出正弦波或准正弦波呢?这项技术就是本书所要介绍的主要内容.

逆变器,特别是正弦波逆变器,其主要用途是用于交流传动,静止变频和 UPS 电源.逆变器的负载多半是感性负载.为了提高逆变效率,存储在负载电感中的无功能量应能反馈回电源.因此要求逆变器最好是一个功率可以双向流动的变换器,即它既可以把直流电能传输到交流负载侧,也可以把交流负载中的无功能量反馈回直流电源.

逆变器的原理早在 1931 年就在文献中提到过.1948 年,美国西屋(Westinghouse)电气公司用汞弧整流器制成了 3000Hz 的感应加热用逆变器.

1947 年,第一只晶体管诞生,固态电力电子学随之而诞生.1956 年,第一只晶闸管问世,这标志着电力电子学的诞生,并开始进入传统发展时代.在这个时代,逆变器继整流器之后开始发展.首先出现的是 SCR 电压型逆变器.1961 年, W. McMurray 与 B. D. Bedford 提出了改进型 SCR 强迫换向逆变器,为 SCR 逆变器的发展奠定了基础.1960 年以后,人们注意到改善逆变器波形的重要性,并开始进行研究.1962 年, A. Kernick 提出了“谐波中和消除法”,即后来常用的“多重叠加法”,这标志着正弦波逆变器的诞生.1963 年, F. G. Turnbull 提出了“消除特定谐波法”,为后来的优化 PWM 法奠定了基础,以实现特定的优化目标,如谐波最小,效率最优,转矩脉动最小等.

20 世纪 70 年代后期,可关断晶闸管 GTO、电力晶体管 GTR 及其模块相继实用化.80 年代以来,电力电子技术与微电子技术相结合,产生了各种高频化的全控器件,并得到了迅速发展,如功率场效应管 Power MOSFET、绝缘门极晶体管 IGT 或 IGBT、静电感应晶体管 SIT、静电感应晶闸管 SITH、场控晶闸管 MCT,以及 MOS 晶体管 MGT 等.这就使电力电子技术由传统发展时代进入到高频化时代.在这个时代,具有小型化和高性能特点的新逆变技术层出不穷,特别是脉宽调制波形改善技术得到了飞速的发展.

1964 年,由 A. Schonung 和 H. Stemmler 提出的、把通信系统调制技术应用到逆变技术中的正弦波脉宽调制技术(Sinusoidal-PWM,简称 SPWM),由于当时开关器件的速度慢而未得到推广.直到 1975 年才由 Bristol 大学的 S. R. Bowes 等把 SPWM 技术正式应用到逆变技术中,使逆变器的性能大大提高,并得到了广泛的应用和发展,也使正弦波逆变技术达到了一个新高度.此后,各种不同的 PWM 技术相继出现,例如注入三次谐波的 PWM、空间矢量调制(SVM)、随机 PWM、电流滞环 PWM 等,成为高速器件逆变器的主导控制方式.至此,正弦波逆变技术的发展已经基本完善.

一般认为,逆变技术的发展可以分成如下两个阶段:

1956~1980年为传统发展阶段.这个阶段的特点是,开关器件以低速器件为主,逆变器的开关频率较低,波形改善以多重叠加法为主,体积重量较大,逆变效率低,正弦波逆变器开始出现.

1980年到现在为高频化新技术阶段.这个阶段的特点是,开关器件以高速器件为主,逆变器的开关频率较高,波形改善以PWM法为主,体积重量较小,逆变效率高.正弦波逆变器技术发展日趋完善.

在PWM逆变器中,输出变压器和交流滤波电感的体积重量占主要部分.为了减小输出变压器和交流滤波器的体积重量,提高逆变器的功率密度,高频化是主要发展方向之一.例如提高SPWM逆变器的开关频率,采用交流传动用变频器的内高频环(High Frequency Link)等.提高SPWM逆变器开关频率可以减少交流滤波器的体积重量,内高频环可以减少变压器的体积重量.但逆变器的高频化也存在一些问题,如开关损耗增加,电磁干扰增大.此外,导体的集肤效应与邻近效应,电容的ESR以及磁元件的寄生参数等问题都需要解决.其中最主要的就是开关损耗和电磁干扰问题.为了解决这些问题,最有效的办法有两个,一是提高开关器件的速度,二是用谐振或准谐振的方式使逆变开关工作在软开关状态.这就促使人们对谐振的研究产生了兴趣.1970年,F. C. Schwarz提出了电流谐振技术;1975年,N. O. Sokal提出了电压谐振技术,这两项技术都是用LC与开关器件共同组成一个串联或并联谐振回路,利用回路在一个开关周期中的全谐振使器件工作在零电压转换(串联谐振)或零电流转换(并联谐振)的软开关状态,从而把开关损耗减小到零.这就是最早的软开关方式.这种方式虽有效,但它不能按照PWM方式工作.20世纪80年代初,美国弗吉尼亚电力电子技术中心(VPEC)对谐振技术进行了改进,提出了准谐振变换技术,即把LC回路在一个开关周期中的全谐振改变为半谐振或部分谐振,这才使得软开关与PWM技术的结合成为可能.由此掀起了一场准谐振变换器热,并在DC/DC变换器中普遍采用.在此基础上,美国威斯康星(Wisconsin)大学的D. M. Divan教授于1986年提出了直流谐振环软开关逆变技术,1987年,O. D. Patterson, D. M. Divan教授又提出了伪谐振支路(极)(Pseudo-Resonant Pole)软开关技术,受到了电力电子学界的普遍关注.D. M. Divan也因提出这项新技术而获得IEEE工业应用分支优秀论文一等奖.从此时开始,掀起了全球性研究软开关逆变技术的热潮.

软开关逆变技术研究的最终目的是,实现PWM软开关技术,也就是将软开关技术引进到PWM逆变器中,使它既能保持原来的优点,又能实现软开关工作.为此,必须把LC与开关器件组成一个谐振网络,使PWM逆变器只有在开关转换过程中才产生谐振,实现软开关转换,平时则不谐振,以保持PWM逆变器的特点.

PWM软开关逆变技术是当今电力电子学领域最活跃的研究内容之一,是实现电力电子技术高频化的最佳途径,也是一项理论性最强的研究工作.它的研究对于逆变器性能的提高和进一步推广应用,以及对电力电子技术的发展,都有十分重要的意义,是当前逆变器的发展方向之一.但这里必须指出,软开关并不是没有损耗的,它只是把开关器件本身的一部分开关损耗转移到了为实现软开关而附加的谐振电路中的谐振元件上.

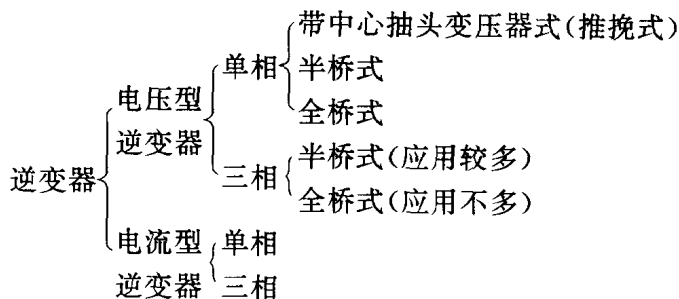
上述PWM高频软开关逆变技术产生的背景是为了克服传统逆变器的输出波形差,

具有较高的 $\frac{du}{dt}$, $\frac{di}{dt}$, 以及由此而引起的开关应力及 EMI 较大的缺点. 在相同背景下, D. A. Nabae 等针对大功率逆变器开关器件速度低的缺点, 于 1981 年提出了多电平逆变技术, 成为当前高压大功率逆变器的一个发展方向. 与 PWM 高频软开关逆变技术的思路相反, 多电平逆变技术的出发点是通过改进主电路结构, 使所有逆变开关都工作在基频或低频, 以达到减小开关应力, 改善输出电压或电流波形的目的.

电力电子技术从 1956 年晶闸管问世, 电力电子学诞生, 至今已经过近 50 年的发展历程, 目前已基本形成比较完整的理论和学科体系, 并成为一门独立的学科. 尤其是在最近 10 年, 电力电子学获得了突飞猛进的发展, 被视为人类社会的第二次电子革命. B. K. Bose 教授认为: “电力电子技术在世界范围的工业文明发展中所起的关键作用可能仅次于计算机.” 从 21 世纪开始“将对工业自动化、交通运输、城市供电、节能和环境污染控制等方面的发展, 产生巨大的推动作用”. “在将来工业高度自动化的情况下, 计算机技术、电力电子技术及自动控制技术, 将成为三种最重要的技术”. 而其中正弦波逆变器技术, 将成为电力电子技术中最重要的组成部分.

1.1 逆变器主电路的基本形式

常用逆变器主电路的基本形式有两种分类方法: 按照相数分类, 可以分为单相和三相; 按照直流侧波形和交流侧波形分类, 可以分为电压型逆变器和电流型逆变器. 具体如下:



1.2 电压型和电流型逆变器

根据逆变器的直流波形和交流波形, 可以把逆变器分为电压型和电流型.

1. 电压型逆变器

理想的逆变器, 从直流变到交流的功率总是一定的值而没有脉动, 直流电压波形和电流波形中也不应该产生脉动; 而在实际的逆变电路中, 因为逆变器的脉动数等有限制, 因而逆变功率 P 是脉动的. 当逆变器的逆变功率 P 的脉动波形由直流电流来体现时, 称之为电压型逆变器, 如图 1-1(a) 所示, 直流电源是恒压源.

电压型逆变器的特点是:

- 1) 直流侧有较大的直流滤波电容 C_d .

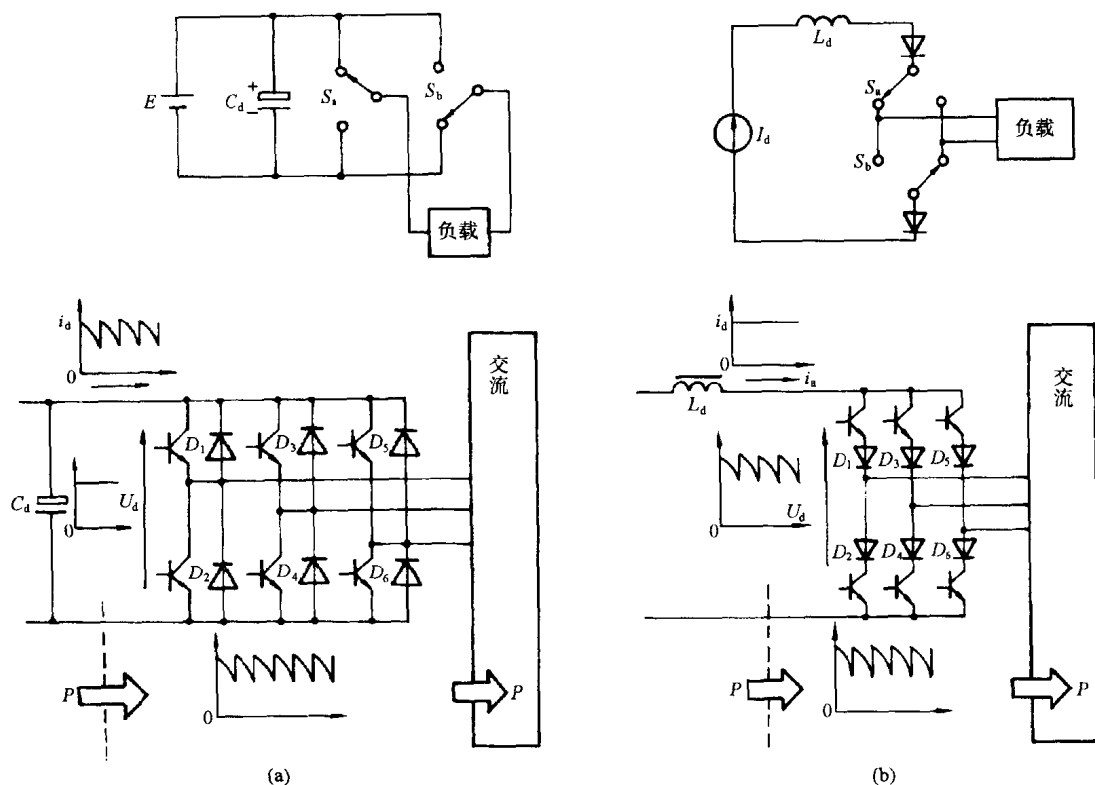


图 1-1 电压型与电流型逆变器
(a)电压型逆变器；(b)电流型逆变器

2) 当负载功率因数变化时,交流输出电压的波形不变,即交流输出电压波形与负载无关.交流输出电压的波形,通过逆变开关的动作被直流电源电容上的电压钳位成方波.

3) 在逆变器中,与逆变开关并联有反馈二极管 $D_1 \sim D_6$,所以交流电压与负载无关,是方波.

4) 输出电流的相位随负载功率因数的变化而变化.换向是在同桥臂开关管之间进行的.

5) 可以通过控制输出电压的幅值和波形来控制其输出电压.

2. 电流型逆变器

当逆变器的逆变功率 P 的脉动波形由直流电压来体现时,称之为电流型逆变器,如图 1-1(b)所示,直流电源是恒流源.

电流型逆变器的特点是:

1) 直流侧接有较大的滤波电感 L_d .

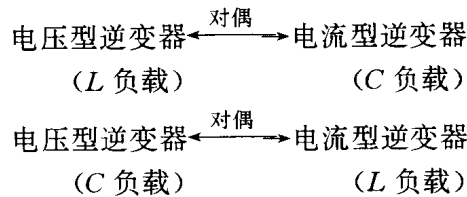
2) 当负载功率因数变化时,交流输出电流的波形不变,即交流输出电流波形与负载无关.交流输出电流波形,通过逆变开关的动作,被直流电源电感稳流成方波.

3) 在逆变器中,与逆变开关串联的有反向阻断二极管 $D_1 \sim D_6$,而没有反馈二极管.所以在逆变器中必须有释放换相时积蓄在负载电感上的能量的电路(通常用并联电容来吸收这部分能量).

- 4) 输出电压的相位,随负载功率因数的变化而变化. 换向是在两相邻相之间进行的.
- 5) 可以通过控制输出电流的幅值和波形来控制其输出电流.

3. 电压型和电流型逆变器的对偶性

电压型逆变器与电流型逆变器有如下对偶性:



对偶的电压、电流波形如图 1-2 所示.

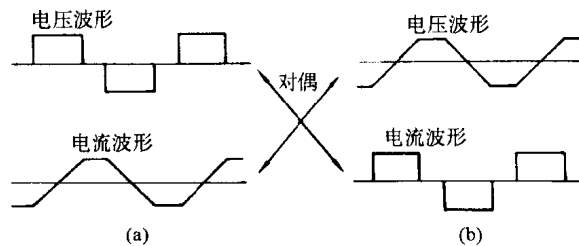


图 1-2 逆变电路的对偶性

(a)电压型逆变器(L 负载);(b)电流型逆变器(C 负载)

利用这种对偶性可以给电路的分析带来方便. 例如, 由于电压型逆变器的交流电压波形和电流型逆变器的交流电流波形的形状相同, 所以可以把对电压型逆变器交流电压的谐波分析结果, 用于电流型逆变器交流电流的谐波分析.

此外, 控制逆变器输出量(电压或电流)有两种方法, 一种是脉冲幅度调制(脉幅调制 Pulse-Amplitude Modulation, 简称 PAM), 其特点是保持脉冲宽度不变而改变脉冲幅值. 另一种是脉冲宽度调制(脉宽调制 Pulse-Width Modulation, 简称 PWM), 其特点是保持脉冲幅值不变而改变脉冲宽度.

1.3 脉波数、脉冲数和电平数

(1) 逆变电路的脉波数

逆变电路的脉波数是指在交流输出电压的一个周期内, 直流侧波形脉动的次数. 在电流型逆变电路中, 是指直流电压波形脉动的次数; 在电压型逆变电路中, 是指直流电流波形脉动的次数. 这个脉动数是和交流输出电压一周期内的换相次数一致的.

一般来说, 如果脉波数为 m , 就把逆变电路称为 m 相逆变电路.

(2) PWM 逆变电路的脉冲数和电平数

PWM 逆变电路的电平数是在输出电压一个周期内的电压电平数. 当电平数为 3 时, 把输出基波半周期内的脉冲数称为 PWM 逆变电路的脉冲数. 在三相逆变电路中, 此脉冲数就是基波一周期内同一开关器件的导通次数, 它等于载波频率和基波频率的比, 如图

1-3 所示。

(3) 电压型逆变电路的阶梯数

电压型逆变电路的阶梯数是指输出电压波形在一个周期内所包含的阶梯数,如图1-4所示。

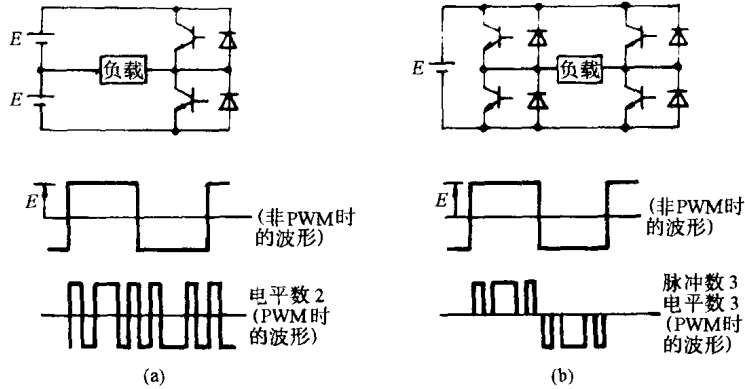


图 1-3 电压型逆变电路的脉冲数和电平数

(a) 半桥电路; (b) 全桥电路

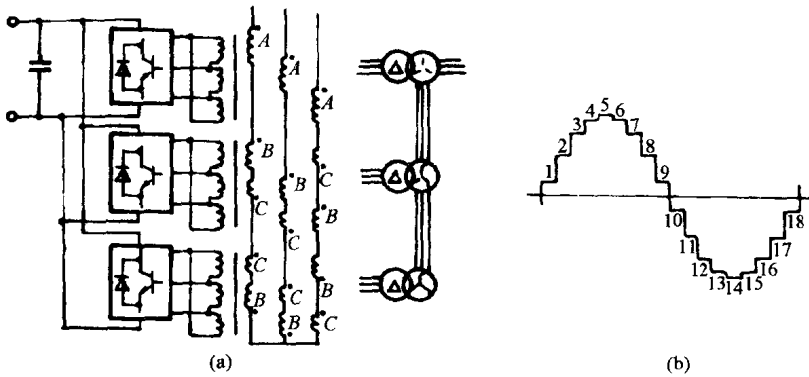


图 1-4 电压型逆变电路的阶梯数

(a) 18 脉波电压型逆变电路;

(b) 输出交流电压波形(阶梯数=18,电平数=10)

第二章 多重叠加式与阶梯波逆变器

初期传统的逆变器,其输出电压波形为脉宽 180° 的方波,它含有 3,5,7,...所有的奇次谐波.

输出电压中的这些高次奇次谐波会给负载带来很多不良后果,例如:

- 1) 使电动机的效率减低 $5\% \sim 7\%$,功率因数减低 8% ,而电流却要增加 10% ;
- 2) 使变压器的铁损增加,发热量提高,噪声增大;
- 3) 谐波能引起某些保护装置误动作,使电器测量仪表失准;
- 4) 谐波电流会引起输出导线产生串联谐振,导致绝缘强度下降或被击穿;
- 5) 高次谐波会引起电容器或电感过载、发热与共振;
- 6) 高次谐波对无线电通讯设备会产生干扰.

消除这些奇次高次谐波最普遍最直接的办法是采用交流输出低通滤波器来滤掉高次谐波,或者是利用控制逆变器输出量的办法,使逆变器本身实现波形正弦化.使逆变器本身实现波形正弦化的技术有两个:一个是采用阶梯波来逼近正弦波的脉冲幅值调制法(脉冲调制 Pulse-Amplitude Modulation,简称 PAM);另一个是采用等幅脉冲列逼近正弦波的脉冲宽度调制法(脉宽调制 Pulse-Width Modulation,简称 PWM).本章将介绍利用多重叠加法,使逆变器输出量(电压或电流)以阶梯波的形式接近于正弦波的脉冲幅值调制法 PAM.

本章介绍的多重叠加法对于低速开关器件如 SCR,GTO 等是非常适合的.多重叠加法的基本原理是,把两个以上完全相同的方波,按一定的相位差叠加起来,使它们的低次谐波相位相差 180° 而相互抵消,以得到谐波含量较少的准正弦阶梯波.此法最早是由 A. Kernick 等于 1962 年提出的.

多重叠加法又分为等幅叠加和变幅叠加,从改善输出量波形的角度看,后者比前者效果好.

2.1 电压型逆变器的多重叠加

2.1.1 电压型与电流型逆变器的输出量调制法和脉冲数

在介绍多重叠加法逆变器之前,首先重复一下电压型逆变器与电流型逆变器,因为它们所使用的多重叠加法是不同的,前者多用串联叠加,后者多用并联叠加.

前面已经介绍过,根据用途和电路结构的不同,逆变器可以分为电压型和电流型.早期传统开关式逆变器多是电压型逆变器.

图 2-1 所示是用开关表示的电压型逆变器的基本电路.这种逆变器的特点是,输出端子和直流电压之间可以用三端开关来替换,其直流侧连接有电容器.因此,电压型逆变器的输出电压总是由直流侧电容器两端电压钳位成方波.