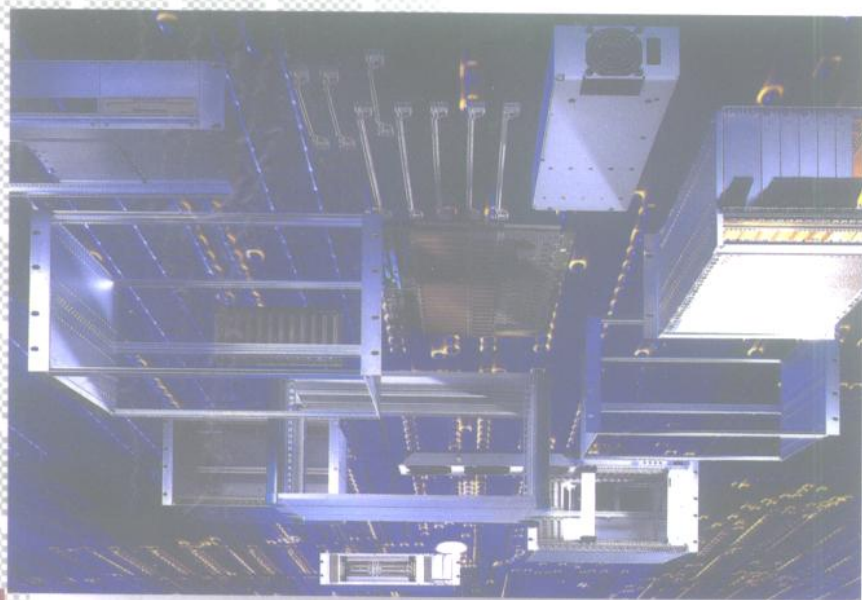


实用电源技术丛书

# 现代逆变技术及其应用

李爱文 张承慧 编著



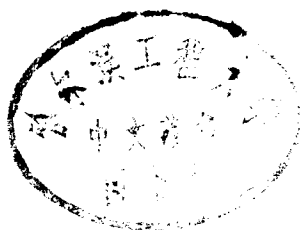
科学出版社

464069

实用电源技术丛书

# 现代逆变技术及其应用

李爱文 张承慧 编著



00464069

科学出版社

2000

## 内 容 简 介

本书是《实用电源技术丛书》之一。

现代逆变技术广泛应用于各个领域的用电设备或功率变换装置中。本书从应用和设计的角度,详细论述了现代逆变技术,逆变开关器件,逆变系统结构及电路形式,变压器和电抗器设计,功率变换技术,逆变控制技术,逆变系统的整流滤波,并介绍了相关的设计技术和设计实例。本书总结了近年来国内外逆变技术及其应用的研究成果和作者多年的经验,侧重于应用、设计方法和设计实例。

本书可供高等院校工业自动化、电机、焊接设备、电力电子技术、电气技术、电力电源技术等专业的师生阅读,也可供从事电能变换研究和设计的科技人员参考。

DY84/36 03

## 图书在版编目 (CIP) 数据

现代逆变技术及其应用/李爱文、张承慧编著. -北京:科学出版社,2000  
(实用电源技术丛书)

ISBN 7-03-008359-8

I. 现… II. ①李… ②张… III. ①逆变电源-技术 ②逆变器 IV. TM91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 04261 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号  
邮政编码:100717

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2000年9月第一版 开本:787×1092 1/16  
2000年9月第一次印刷 印张:17 3/4  
印数:1—2 600 字数:400 000

定价:35.00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、通信、宇宙探索等等，哪一样能少得了电源？只要用电就离不了电源。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射线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。总地来说，所谓电源，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：**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，则相应获得稳压、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、软磁材料以及外围无器件等。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，比如高温、高寒、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，已融汇了电子、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，它服务于各行各业、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，电源技术浩若烟海，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 徐德洪 徐兰筠 袁维慈 黄济青

龚绍文 喻 翔 谭 信

# 前 言

逆变,是对电能进行变换和控制的一种基本形式,“现代逆变技术”是综合了现代电力电子开关器件的应用、现代功率变换、模拟和数字电子技术、PWM 技术、频率及相位调制技术、开关电源技术和控制技术等的一门实用设计技术,已被广泛地用于工业和民用领域中的各种功率变换系统和装置中。近年来,关于电力变换、电动机调速、不间断电源、逆变弧焊电源、感应加热、直流电源变换装置等方面,已出版了一些专著,它们分别从各自的角度论述了其特点、发展、应用和部分设计方法。实际上,以上各种系统和装置都是逆变技术的应用领域,它们的主要设计都是逆变主回路和逆变控制电路的设计。对于一名从事电力电子技术研究和设计的科技人员来说,全面掌握了现代逆变技术及其应用的系统知识,便可较容易地从事电力电子技术各个领域的研究和设计工作。

作者对八九十年代国内外逆变技术及其应用的研究成果和多年来从事逆变技术及其应用的研究经验进行了总结。在本书中,不详细讲解基础理论,而是专门论述器件的应用、逆变系统的设计方法和步骤,并介绍逆变系统设计所需要的技术和资料。本书主要论及以下几方面内容:

- (1) 现代逆变技术的概念、特点和应用领域;
- (2) 逆变用自关断开关器件的特性和应用问题;
- (3) 现代逆变系统的分类结构和主回路设计;
- (4) 逆变变压器和铁芯电抗器的实用工程设计;
- (5) 现代功率变换技术的种类、发展及其设计;
- (6) 现代逆变系统中的控制技术及其设计;
- (7) 现代逆变系统中的整流和滤波电路设计;
- (8) 与现代逆变系统密切相关的其他设计技术;
- (9) 涉及内容非常广泛的典型的设计实例。

本书由山东工业大学李爱文副教授和张承慧教授合作编著。参与编写的还有陈仁富、尹海、张光先、李思海、周常森副教授和路京利工程师、赵海晖老师。全书由李爱文副教授统稿和定稿,由中国电源学会倪本来高级工程师主审。

在编写过程中,还得到了研究生王跃和宋军等同学的支持,在此表示诚挚的感谢。

由于作者水平所限,书中难免有错误和不妥之处,衷心地希望广大读者不吝赐教和批评指正。

编者著

2000年1月

# 目 录

<b>第一章 概述</b> .....	(1)
1.1 现代逆变技术的概念和分类 .....	(1)
1.1.1 现代逆变技术的概念 .....	(1)
1.1.2 现代逆变技术的分类 .....	(1)
1.2 逆变的目的和优越性 .....	(2)
1.2.1 逆变的目的 .....	(2)
1.2.2 采用逆变技术的优越性 .....	(2)
1.3 逆变技术的应用领域 .....	(4)
<b>第二章 现代逆变技术中的开关器件及其应用</b> .....	(7)
2.1 电力电子开关器件的类型、发展和应用范围 .....	(7)
2.1.1 电力电子开关器件的类型和发展 .....	(7)
2.1.2 电力电子开关器件的应用范围 .....	(8)
2.2 可关断晶闸管的基本性能和应用 .....	(10)
2.2.1 GTO 的基本特性 .....	(10)
2.2.2 GTO 的主要参数 .....	(12)
2.2.3 GTO 的应用问题 .....	(14)
2.3 功率场效应管的性能和应用 .....	(17)
2.3.1 VMOSFET 的基本特性 .....	(18)
2.3.2 VMOSFET 的基本参数 .....	(21)
2.3.3 VMOSFET 的应用问题 .....	(24)
2.4 大功率晶体管的性能和应用 .....	(26)
2.4.1 GTR 的基本性能和参数 .....	(26)
2.4.2 GTR 的使用问题 .....	(29)
2.5 绝缘栅双极晶体管的性能和应用 .....	(31)
2.5.1 IGBT 的基本结构和特点 .....	(31)
2.5.2 IGBT 的基本特性 .....	(31)
2.5.3 智能型功率模块 (IPM) .....	(35)
2.6 IGBT 的主要参数和应用 .....	(36)
2.6.1 IGBT 的主要参数及其定额选择 .....	(36)
2.6.2 IGBT 的栅极驱动 .....	(39)
2.6.3 IGBT 的保护 .....	(40)
2.6.4 IPM 的特殊参数和应用 .....	(41)
2.7 其他新型开关器件 .....	(42)
2.7.1 MOS 控制晶闸管 .....	(42)
2.7.2 静感应晶闸管 .....	(43)
2.7.3 静电感应晶体管 .....	(45)



<b>第三章 现代逆变系统结构和主回路设计</b>	<b>(46)</b>
3.1 现代逆变系统基本结构和变换电路	(46)
3.1.1 现代逆变系统基本结构	(46)
3.1.2 非隔离式电压变换电路的基本形式	(47)
3.2 逆变主电路的基本形式	(50)
3.2.1 隔离式逆变主电路形式	(50)
3.2.2 各种逆变电路的特点和应用	(54)
3.3 功率转换电路的不平衡问题	(55)
3.3.1 全桥、推挽式电路的不平衡问题	(55)
3.3.2 半桥式电路抗不平衡的能力的分析	(57)
3.3.3 串联耦合电容对不平衡的校正	(58)
3.4 直流电源变换装置逆变系统结构和主回路设计	(59)
3.4.1 直流电源变换装置逆变系统结构	(59)
3.4.2 直流电源变换装置逆变主回路设计	(60)
3.5 交流电动机变频调速系统	(62)
3.5.1 交流电动机变频调速系统	(62)
3.5.2 变频器三相逆变器主电路的设计	(64)
3.6 三相有源逆变系统的应用和组成结构	(66)
3.6.1 交流电动机制动再生能量回馈系统	(66)
3.6.2 交流电动机串级调速系统	(69)
3.6.3 电力调节装置	(69)
3.6.4 风力发电并网运行	(71)
3.7 不间断电源逆变系统	(72)
3.7.1 UPS 逆变系统结构	(72)
3.7.2 UPS 逆变系统电路设计	(74)
<b>第四章 逆变变压器和铁芯电抗器的设计</b>	<b>(78)</b>
4.1 逆变变压器的设计原则和依据	(78)
4.1.1 逆变变压器和铁芯电抗器的设计原则	(78)
4.1.2 电磁理论基础	(78)
4.1.3 集肤效应	(79)
4.2 逆变变压器的设计方法和步骤	(80)
4.2.1 变压器铁芯尺寸计算公式	(80)
4.2.2 逆变变压器的设计步骤	(83)
4.2.3 逆变变压器的功耗	(86)
4.3 铁芯材料和结构	(86)
4.3.1 铁芯材料的种类和性能对比	(86)
4.3.2 硅钢片及其铁芯	(88)
4.3.3 铁氧体铁芯	(89)
4.3.4 非晶态合金和微晶合金	(93)
4.4 逆变变压器绕制中的几个问题	(97)
4.4.1 变压器绕组的漏感及减小漏感的措施	(97)

4.4.2	导体和绕组的涡流损耗 .....	(98)
4.4.3	绝缘材料的类型和选择 .....	(101)
4.5	单端反激式开关电源变压器的设计 .....	(101)
4.6	铁芯电抗器的结构设计 .....	(104)
4.6.1	切开铁芯直流电抗器的结构设计 .....	(105)
4.6.2	交流铁芯电抗器的结构设计 .....	(107)
4.7	磁性元件的实验和测试 .....	(107)
<b>第五章</b>	<b>现代逆变系统中的功率变换技术及其设计</b> .....	<b>(111)</b>
5.1	逆变式功率变换技术概述 .....	(111)
5.1.1	现代功率变换技术的分类和发展 .....	(111)
5.1.2	逆变式功率变换器的基本设计步骤 .....	(113)
5.2	负载谐振 PFM 变换技术 .....	(115)
5.2.1	串联负载谐振变换技术及其设计 .....	(115)
5.2.2	并联负载谐振变换技术及其设计 .....	(117)
5.2.3	复合谐振变换和 E 类变换 .....	(118)
5.3	硬开关 PWM 变换技术 .....	(120)
5.3.1	硬开关 PWM 变换技术的基本原理 .....	(120)
5.3.2	硬开关 PWM 变换的特点和应用 .....	(121)
5.4	准谐振双零开关变换技术 .....	(122)
5.4.1	准谐振双零开关 .....	(122)
5.4.2	零电流开关 (ZCS) 变换电路及其设计 .....	(123)
5.4.3	零电压开关 (ZVS) 变换电路及其设计方法 .....	(125)
5.5	双零转换 PWM 软开关变换技术 .....	(127)
5.5.1	双零转换 PWM 基本变换技术 .....	(127)
5.5.2	ZCT-PWM 变换技术及其设计方法 .....	(129)
5.5.3	ZVT-PWM 变换技术及其设计方法 .....	(131)
5.6	ZVT-PWM 变换技术的典型应用 .....	(134)
5.6.1	移向全桥 ZVT-PWM 变换技术及其设计 .....	(134)
5.6.2	有源箝位/复位变换技术及其应用 .....	(137)
<b>第六章</b>	<b>现代逆变系统中的控制技术</b> .....	<b>(140)</b>
6.1	现代逆变控制技术的系统设计 .....	(140)
6.1.1	逆变控制系统的结构和时域性能指标 .....	(140)
6.1.2	现代逆变系统稳定性分析和设计 .....	(142)
6.2	现代逆变控制系统中主要环节的设计 .....	(145)
6.2.1	控制调节器和校正环节的分类和应用 .....	(145)
6.2.2	时间比例控制及脉冲形成电路 .....	(148)
6.3	PWM 型逆变控制系统的设计 .....	(149)
6.3.1	电压型 PWM 控制系统 .....	(149)
6.3.2	电流型 PWM 控制系统 .....	(151)
6.4	谐振开关变换集成控制芯片及其应用 .....	(155)
6.4.1	谐振开关变换集成控制芯片的结构和特性 .....	(155)

6.4.2	谐振开关变换集成控制芯片的应用	(158)
6.5	电压型 PWM 控制集成芯片及其应用	(158)
6.5.1	电压型 PWM 控制集成芯片的结构和性能	(159)
6.5.2	电压型 PWM 控制 IC 芯片的应用	(163)
6.6	电流型 PWM 控制集成芯片及其应用	(164)
6.6.1	单端输出电流型 PWM 控制集成芯片	(164)
6.6.2	双路输出电流型 PWM 控制集成芯片及其应用	(166)
6.7	ZVT 变换集成控制芯片及其应用	(168)
6.7.1	移项式 PWM 控制集成芯片结构和特性	(168)
6.7.2	移相式 PWM 控制芯片的应用	(171)
6.7.3	有源箝位/复位集成控制芯片及其应用	(173)
6.8	正弦波调制 PWM 控制技术	(176)
6.8.1	正弦波调制 PWM 控制的用途和基本原理	(176)
6.8.2	SPWM 的设计实现——分立电路、IC、单片机	(177)
<b>第七章</b>	<b>现代逆变系统中的整流和滤波电路设计</b>	<b>(182)</b>
7.1	整流电路的形式及其应用	(182)
7.1.1	整流电路的分类	(182)
7.1.2	单相整流电路的形式和用途	(182)
7.1.3	三相整流电路的形式和用途	(183)
7.2	整流器件的类型及其选择	(185)
7.2.1	半导体整流二极管的分类和用途	(185)
7.2.2	可控整流器件的类型和应用	(189)
7.3	特种整流电路的原理和设计	(190)
7.3.1	倍压整流电路及其应用	(190)
7.3.2	倍流整流电路及其应用	(192)
7.3.3	同步整流和异步整流	(193)
7.4	输入滤波电路的形式及其设计	(194)
7.4.1	输入滤波电路和功率因数校正 (PFC)	(194)
7.4.2	无源输入滤波和 PFC 电路的设计	(196)
7.4.3	高频有源输入滤波和 PFC 电路设计	(197)
7.5	直流输出滤波电路的形式及其设计	(206)
7.5.1	直流输出滤波电路的形式和应用	(206)
7.5.2	LC 滤波电路的参数设计	(207)
7.6	滤波电容器的类型和应用	(208)
7.6.1	电容器的分类及其特性	(208)
7.6.2	电容器的应用场合和适用频率范围	(211)
7.6.3	电解电容器的主要参数及性能	(212)
7.6.4	电解电容器的应用	(214)
<b>第八章</b>	<b>现代逆变系统中的其他设计技术</b>	<b>(217)</b>
8.1	开关管的开通和关断缓冲电路设计	(217)
8.1.1	开关管缓冲电路的分类和作用	(217)

8.1.2	开通缓冲电路的设计	(218)
8.1.3	关断缓冲电路的设计	(218)
8.1.4	尖峰电压吸收缓冲电路设计	(219)
8.2	电流检测和过流保护电路设计	(220)
8.2.1	电流信号检测的方法和应用	(220)
8.2.2	过流保护电路的功能和组成	(223)
8.3	散热技术设计	(224)
8.3.1	功率损耗的计算	(224)
8.3.2	热阻和热路欧姆	(226)
8.3.3	散热器的热阻计算和选择	(226)
8.4	电磁兼容性(EMC)及其设计	(229)
8.4.1	电磁干扰(EMI)	(229)
8.4.2	电磁兼容性设计的内容、元器件和材料	(230)
8.4.3	整体结构布局和布线 EMC 设计	(234)
8.4.4	电磁兼容的有关标准	(237)
8.5	逆变系统中的合闸启动电路设计	(240)
8.5.1	逆变系统合闸控制和软启动的意义	(240)
8.5.2	逆变系统合闸控制和软启动电路的设计	(240)
8.6	现代逆变技术 CAD 和微机控制技术	(242)
8.6.1	现代逆变技术 CAD	(242)
8.6.2	现代逆变系统中的微机控制技术	(247)
<b>第九章</b>	<b>典型的逆变系统设计实例</b>	<b>(250)</b>
9.1	电力直流操作电源的系统结构和主电路设计	(250)
9.1.1	直流操作电源的设计要求和系统结构	(250)
9.1.2	整流模块初级主电路的设计	(252)
9.1.3	输出整流滤波电路和散热设计	(256)
9.2	直流操作开关电源整流模块控制电路设计	(257)
9.2.1	PWM 控制电路的设计	(257)
9.2.2	控制系统环路分析和补偿设计	(259)
9.3	正弦波逆变器的设计	(260)
9.3.1	正弦波逆变器的设计要求和主电路形式	(260)
9.3.2	有工频变压器的逆变电源主电路设计	(260)
9.3.3	无工频变压器的逆变器主电路设计	(262)
9.3.4	逆变控制电路的设计	(262)
9.4	逆变电源 DC-DC 变换器的设计	(263)
9.4.1	技术要求和主回路设计	(263)
9.4.2	控制电路设计	(265)
9.5	单端反激式电流型辅助开关电源的设计实例	(266)
9.5.1	设计要求和方案选择	(266)
9.5.2	具体电路和变压器设计	(267)
<b>参考文献</b>		<b>(269)</b>

# 第一章 概 述

## 1.1 现代逆变技术的概念和分类

### 1.1.1 现代逆变技术的概念

随着各行各业控制技术的发展和对其操作性能要求的提高,许多行业的用电设备都不是直接使用通用交流电网提供的交流电作为电能源,而是通过各种形式对其进行变换,从而得到各自所需的电能形式。它们的幅值、频率、稳定度及变化方式因用电设备的不同而不尽相同,如通信电源、电弧焊电源、电动机变频调速器、加热电源、化工电源、汽车电源、绿色照明电源、不间断电源、医用电源、充电器等等,它们所使用的电能都是通过整流和逆变组合电路对原始电能进行变换后得到的。

通常,把交流电变成直流电的过程叫做整流;完成整流功能的电路叫做整流电路。与之相对应,把将直流电变成交流电的过程叫做逆变,完成逆变功能的电路则称为逆变电路,而实现逆变过程的装置叫做逆变设备或逆变器。

现代逆变技术就是研究现代逆变电路的理论和应用设计方法的一门科学。这门学科是建立在工业电子技术、半导体器件技术、现代控制技术、现代电力电子技术、半导体变流技术、脉宽调制(PWM)技术、磁性材料等学科基础之上的一门实用技术。现代逆变技术主要包括三部分内容:半导体功率集成器件及其应用、功率变换电路和逆变控制技术。

### 1.1.2 现代逆变技术的分类

现代逆变技术的种类很多,可以按照不同的形式进行分类。其主要的分类方式如下:

1) 按逆变器输出交流的频率,可以分为工频逆变、中频逆变和高频逆变。工频逆变一般指 50~60Hz 的逆变器;中频逆变的频率一般为 400Hz 到十几 kHz;高频逆变器的频率则一般为十几 kHz 到 MHz。这里需要说明的是,在现代高频开关电源领域,500 kHz 以上才算是高频,但是在逆变领域,有时功率比较大,20kHz 的超音频算做高频。

2) 按逆变器输出的相数,可分为单相逆变、三相逆变和多相逆变。

3) 按逆变器输出能量的去向,可分为有源逆变和无源逆变。

4) 按逆变主电路的形式,可分为单端式、推挽式、半桥式和全桥式逆变。

5) 按逆变主开关器件的类型,可分为晶闸管逆变、晶体管逆变、场效应管逆变、IGBT 逆变,等等。

6) 按输出稳定的参量,可分为电压型逆变和电流型逆变。

7) 按输出电压或电流的波形,可分为正弦波输出逆变和非正弦波输出逆变。

8) 按控制方式,可分为调频式(PFM)逆变和调脉宽式(PWM)逆变。

9) 按逆变开关电路的工作方式,可分为谐振式逆变、定频硬开关式逆变和定频软开关式逆变。

以上各种形式的逆变分别应用于不同的场合和设备,在以后的章节中分别予以论述,并给出相应的设计方法和实例。

## 1.2 逆变的目的和优越性

### 1.2.1 逆变的目的

采用逆变技术是为了获得不同的稳定或变化形式的电能。例如:

- 1) 由蓄电池中的直流电源获得交流电,如不间断电源(UPS)、应急灯电源、通用逆变电源等。
- 2) 由蓄电池中的直流电源获得多路稳定的直流电,如程控电话交换机二次电源等各种通用 DC/DC 变换器。
- 3) 获得可变频率的交流电源,如交流电动机调速变频器等。
- 4) 实现电能回馈,如电动机制动再生能量回馈有源逆变系统等。
- 5) 使电源设备小型化、高效节能、获得更好的稳定性和调节性能,如各种类型的直流电源变换器。
- 6) 利用感应涡流产生热量,如中频炉和高温感应加热(电磁灶等)。

### 1.2.2 采用逆变技术的优越性

在现代逆变技术的应用领域中,许多用电设备和系统都有一个发展的过程。由磁放大式到硅二极管整流式,再到可控硅(晶闸管)整流式,直至发展到逆变式(或者叫开关式),这不仅是因为现代电力电子技术的发展为逆变技术的采用提供了必要的条件,更重要的还是因为采用逆变技术有很多优越性。

#### 1. 灵活地调节输出电压或电流的幅度和频率

在后面的章节里我们将介绍逆变器的逆变主回路和控制回路。通过控制回路,我们可以控制逆变电路的工作频率和输出时间比例,从而使输出电压或电流的频率和幅值按照人们的意愿或设备工作的要求来灵活地变化。例如,交流电动机的调速需要灵活地改变三相电流的频率和电压幅度(VVVF 调速);感应加热电源输出电压的频率和幅度变化就可以改变被加热金属件产生的热量。

#### 2. 将蓄电池中的直流电转换成交流电或其他形式的直流电

这种转换的用途也很广泛,下面给出几个例子。

不间断电源设备在电网停电时,将蓄电池中的直流电逆变成交流电,供计算机等用电设备使用,不间断其工作,从而不会造成太大损失。

程控电话交换机二次电源是一种 DC/DC 变换器,它把蓄电池中的(或一次电源送来的)直流电转换成其他形式的直流电供交换机使用,它不会因为交流电网停电或剧烈变换而影响工作。

### 3. 明显地减小用电设备的体积和重量, 节省材料

很多用电设备中, 变压器和电抗器在很大程度上决定了其体积和重量。我们知道, 对于变压器有以下公式:

$$U = KfNSB_m \quad (1.1)$$

式中  $U$ ——绕组电压(V);

$K$ ——波形系数(正弦波为 4.44, 方波为 4);

$f$ ——工作频率(Hz);

$N$ ——绕组线圈匝数;

$S$ ——变压器铁芯的有效横截面积( $m^2$ );

$B_m$ ——铁芯工作最大磁通密度(T)。

由式(1.1)可知, 当  $U$ ,  $K$  和  $B_m$  都不变时,  $NS$  与  $f$  成反比关系, 即

$$NS = \frac{U}{KB_m} \frac{1}{f} \quad (1.2)$$

在功率变换电路中,  $U$  一般为市电级电压, 变化不会太大, 各种磁性材料允许的磁通密度也不会相差很大。但是, 如果能将变压器绕组中所加电压的频率大幅度提高, 则变压器绕组匝数与有效横截面积之积就会显著减小。比如, 如果  $f$  由 50Hz 增加到 50kHz, 提高 1000 倍, 则  $NS$  将会减小为原来的千分之一, 假设  $N$  变为原来的 1/40,  $S$  变为原来的 1/25, 可见变压器的体积和重量明显地减小了, 当然也节约了制作变压器的铜材和磁性材料。

### 4. 高效节能

采用逆变技术具有高效节能的优越性, 主要表现在以下四个方面:

1) 在许多利用交流电动机的场合, 如风机、液体泵、牵引、拖动等, 在其负载变化时, 或者说当要改变电动机做功的量时, 传统的方法就是调节电动机的通电时间所占比例, 这样电动机就会频繁地制动、起动。而电动机的起动、制动消耗的能量往往很大, 如果采用变频调速来调节电动机做功的量, 则可以节约很大一部分能量。

2) 电动机制动时, 处于再生发电状态。为加速制动过程, 一般的方法是加入能耗电阻来消耗掉电动机制动发出的能量, 这样会造成严重的浪费。如果采用有源逆变将这部分能量回馈到电网, 将会达到明显的节能效果。

3) 采用逆变技术大大减小了变压器的体积和重量, 也即减小了铁芯横截面积和线圈匝数。变压器本身的损耗主要包括原、副边铜耗和铁芯损耗。铁芯横截面积的大幅度减小使得其铁耗变得很小; 铁芯横截面积的大幅度减小和绕组匝数的大量减小也大大降低了铜耗。因此, 采用逆变技术大大提高变压器的工作频率, 使得变压器的损耗变得比工频工作时小得多, 从而达到了节能的目的。

4) 传统的、采用工频变压器的整流式电源设备的功率因数一般在 0.5~0.8 之间, 这是因为其电流谐波成分和相移角都比较大。现代功率因数的概念由下式给出:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{UI_1 \cos \varphi}{UI} = \frac{I_1}{I} \cos \varphi = \gamma \cos \varphi \quad (1.3)$$

式中 PF——功率因数(Power Factor 的缩写);

$P$ ——有功功率(W);

$S$ ——视在功率(VA);

$U$ ——输入电压有效值(V);

$I$ ——输入电流有效值(A);

$I_1$ ——输入电流基波有效值(A);

$\varphi$ ——输入电流基波与电压波形的相位角。

我们把  $\gamma = \frac{I_1}{I}$  称为谐波因数, 把  $\cos\varphi$  叫做相位因数, 这样功率因数 PF 就等于谐波因数与相位因数的乘积。

在逆变器中, 对输入电压进行全波不控整流再进行逆变,  $\varphi$  很小,  $\cos\varphi \approx 1$ 。如果采用功率因数校正技术(Power Factor Corrector, PFC), 能使输入电流的谐波成分变得很小, 从而使  $\gamma \approx 1$ 。这样,  $PF \approx 1$ , 节能的效果也是非常明显的。

#### 5. 动态响应快、控制性能好、电气性能指标好

由于逆变电路的工作频率高, 调节周期短, 使得电源设备的动态响应或者说动态特性很好。具体表现为: 对电网波动的适应能力强(源效应好), 负载效应好, 启动冲击电流小, 超调量小, 恢复时间快, 输出稳定、纹波小等。

#### 6. 保护快

由于逆变器工作频率高、控制速度快, 对保护信号的反应也快, 从而增加了系统的可靠性。

### 1.3 逆变技术的应用领域

随着电力电子技术的飞速发展和各行各业对电气设备控制性能要求的提高, 逆变技术在许多领域应用越来越广泛。虽然在前面我们已提到一些, 但逆变技术的应用领域很多, 下面列举的是其主要的應用。

#### (1) 交流电动机变频调速

采用逆变技术将普通交流电网电压转换成电压可调、频率可调的交流电, 供给交流电动机, 以调节电动机的转速, 可用于控制风机、水泵、机床、轧机、机车牵引、电梯、传动、空调等很多场合。

#### (2) 电动机制动再生能量回馈

交流电动机和直流电动机在制动过程中都会处于发电状态而使直流母线电压泵升。采用有源逆变系统将能量回馈到交流电网而代替传统的电阻能耗制动, 既节约了电能, 又提高了安全性能。

#### (3) 不间断电源系统

在许多领域中被广泛应用的计算机、通信设备、检测设备等都需要采用不间断电源。在 UPS 中, 主要有充电器和逆变器。在电网有电时, 充电器为蓄电池充电; 在电网停



电时,逆变器将蓄电池中的直流电逆变成交流电供给用电设备。

#### (4) 感应加热

中频炉、高频炉、电磁灶等设备利用逆变技术产生交流电,从而产生交变磁场,金属在磁场中产生涡流而发热,从而达到加热的目的。

#### (5) 弧焊电源<sup>[20]</sup>

手工电弧焊、电阻焊、埋弧焊、电渣焊、TIG 焊、MIG、MAG、CO<sub>2</sub> 气体保护焊、等离子弧焊与切割电源也正在用逆变式电源代替传统的整流式弧焊电源。

#### (6) 通信开关电源

通信电源包括一次电源和二次电源<sup>[19]</sup>。一次电源将交流电转换成直流电给蓄电池充电,同时供给二次电源。一次电源正在由带逆变器的开关电源替代传统整流式电源,而二次电源一般都是逆变式开关电源。

#### (7) 变频电源

世界上一些国家采用的是 60Hz 的市电(有的场合还采用 400Hz 的交流电),而我们国家采用的是 50Hz 的交流电。我们在生产出口外销的家电、电动机等产品时,调试、检测、老化过程中都需要大量的 60Hz 的交流电源。采用逆变技术就可以设计出这种电源。

#### (8) 医用电源

X 射线机高压电源、超生波发生器电源等都是逆变式开关电源。

#### (9) 风力发电

风力发电机因受风力变化的影响,发出的交流电很不稳定,并网或供给用电设备都不安全。可以将其整成直流,然后再逆变成比较稳定的交流,就能安全地并到交流电网上或直接供给用电设备。

#### (10) 直流输电

我们通常采用的都是交流输变电,由于交流输电架线复杂、损耗大、电磁波污染环境等,所以直流输电是一个发展方向。首先把交流电整成高压直流,再进行远距离输送,然后再逆变成交流,供给用电设备。

#### (11) 电子镇流器

普通日光灯镇流器效率低、功率因数低。采用逆变技术设计的电子镇流器,有效地提高了效率和功率因数,实现了绿色照明。

#### (12) 环保电源

对空气、水等生活用品,可以采用高压静电除尘、高频臭氧或超声波消毒,这些设备的电源都要用到逆变技术。

#### (13) 磁悬浮列车

为减小列车轮子与铁轨之间的摩擦而提高牵引效率,正在发展磁悬浮列车。磁悬浮就是采用逆变等技术产生一种磁场,使列车与铁轨不完全接触。

#### (14) 有源滤波、无功补偿

对交流电网进行滤波,消除电流谐波,进行无功补偿也要采用逆变技术。

#### (15) 化学电源

化工领域的电解、电镀、刷镀、静电喷涂、蒸发等,都可以采用逆变式开关电源。

#### (16) 现代汽车