

新型电源实用技术系列书

逆变器新技术 与工程应用实例

● 周志敏 纪爱华 等 编著

- 逆变器基础知识
- 逆变器设计实例
- 逆变器工程应用案例



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

新型电源实用技术系列书

逆变器新技术 与工程应用实例

● 周志敏 纪爱华 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

现代逆变 (DC/AC) 技术是应用电力半导体器件, 将直流电能转换成交流电能的一种静止变流技术。在以直流发电机、蓄电池为主的直流电源二次电能变换和可再生能源 (太阳能、风能等) 发电等场合, 逆变技术具有广泛的应用前景。

本书以逆变高新实用技术为主线, 突出实用性, 结合国内外逆变技术的应用和发展, 全面系统地阐述了逆变器的最新应用技术。全书共 7 章, 在简述了逆变器基础知识的基础上, 系统地讲述了软开关技术在逆变器中的应用、三相逆变器、多电平逆变器、逆变器设计实例、逆变器并联技术、逆变器的工程应用实例等内容。本书题材新颖实用, 内容丰富, 深入浅出, 文字通俗, 具有很高的实用价值。

本书可供电信、信息、航天、军事、可再生能源发电、家电等领域中从事逆变技术研究开发、设计和应用的工程技术人员使用, 也可供高等院校及职业技术学院相关专业的师生阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

逆变器新技术与工程应用实例/周志敏等编著. —北京: 中国电力出版社, 2014. 10

(新型电源实用技术系列书)

ISBN 978-7-5123-5944-4

I. ①逆… II. ①周… III. ①逆变器-研究 IV. ①TM464

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 108601 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 10 月第一版 2014 年 10 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.5 印张 346 千字

印数 0001—3000 册 定价 35.00 元

敬 告 读 者

本书封底贴有防伪标签, 刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

现代逆变技术是研究逆变电路理论和应用的一项综合性技术。它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) 技术等学科基础之上的一项实用技术。它主要包括半导体功率集成器件及其应用、逆变电路和逆变控制技术三大部分。

逆变器是电源系统的重要组成部分,其性能的优劣直接关系到整个系统的安全性和可靠性。逆变器问世以来就引起了国内外电源界的普遍关注,现已成为具有发展前景和影响力的一项高新技术产品。现代逆变器以其低损耗、高效率、电路简洁等显著优点受到人们的青睐,并广泛地应用于电信、信息、航天、军事、可再生能源发电、家电等领域。近年来,随着电子信息产业的高速发展,人们对逆变器的需求与日俱增,逆变器的开发研制生产已成为发展前景十分诱人的朝阳产业。目前,随着逆变器的广泛应用,逆变器显示出了强大的生命力,具有高集成度、高性能比、最简的外围电路、最佳的性能指标等特点。

本书结合国内外逆变器技术的发展动向,集逆变技术的基础知识、设计实例、工程应用于一体,系统地介绍了逆变器的前沿技术和典型应用电路。本书尽量做到有针对性和实用性,力求做到通俗易懂和结合实践,使得从事逆变器开发、设计、应用和维护的技术人员从中获益,读者可以此为“桥梁”,系统全面地了解和掌握逆变器的设计和工程应用技术。

参加本书编写工作的有周志敏、纪爱华、周纪海、纪达奇、刘建秀、顾发娥、刘淑芬、纪和平、纪达安、陈爱华等,在本书写作过程中,作者在资料的收集和技术信息交流上得到了国内的专业学者、同行及逆变器制造商的大力支持,在此表示衷心的感谢。

由于时间短,加之作者水平有限,书中难免有错误之处,敬请读者批评指正。

编者



目 录

前言

第 1 章 逆变器基础知识	1
1.1 逆变器分类及主要技术性能指标	1
1.1.1 逆变器分类	1
1.1.2 逆变器的主要技术性能指标	3
1.2 逆变器的工作原理及基本电路	5
1.2.1 逆变器的工作原理	5
1.2.2 电压型逆变电路	6
1.2.3 电流型逆变电路	9
1.3 逆变器控制技术	11
1.3.1 电流型控制技术	11
1.3.2 逆变器的消谐控制技术	15
第 2 章 软开关技术在逆变器中的应用	18
2.1 软开关技术	18
2.1.1 硬开关问题分析及软开关概念	18
2.1.2 软开关电路的分类	19
2.1.3 典型的软开关电路工作原理	21
2.2 采用软开关技术的逆变器	25
2.2.1 软开关逆变器拓扑结构	25
2.2.2 双幅有源钳位谐振直流环节逆变器	31
2.2.3 单极倍频电压型 SPWM 软开关逆变器	33
2.2.4 综合性能的高频软开关逆变器	35
第 3 章 三相逆变器	39
3.1 三相逆变器工作方式	39
3.1.1 三相逆变器工作方式分析	39
3.1.2 三相正弦波逆变器偏磁的抑制	41
3.2 三相软开关逆变器	45
3.2.1 硬开关和软开关三相 PWM 逆变器	45
3.2.2 三相软开关逆变器的 PWM 实现方法	49
3.3 三相 PWM 波形产生器及驱动器	52
3.3.1 三相 PWM 波形产生器 SA4828 在逆变器中的应用	52
3.3.2 基于 SA4828 的三相组合式逆变器设计	55

3.3.3	基于 SA828 的三相逆变器设计	58
3.3.4	IR2130 驱动器在逆变器中的应用	62
第 4 章	多电平逆变器	65
4.1	多电平变换技术	65
4.1.1	电压钳位多电平逆变器拓扑结构	65
4.1.2	多电平逆变电路的控制方法	73
4.2	多电平逆变电路	75
4.2.1	5 电平逆变器三维 PWM 控制	75
4.2.2	三电平逆变器 SVPWM 控制策略	78
4.2.3	3 电平逆变器中点电压平衡的电压空间矢量控制	83
4.2.4	多电平逆变器与输出谐波	86
第 5 章	逆变器设计实例	92
5.1	单相及三相车载逆变器设计实例	92
5.1.1	多功能单相逆变器设计实例	92
5.1.2	新型单相逆变器设计实例	94
5.1.3	单相正弦脉宽调制逆变器的设计实例	98
5.1.4	DC 12V/AC 220V 逆变器设计实例	101
5.1.5	三相 120W 车载逆变器设计实例	103
5.2	全桥电流源高频链逆变器设计实例	107
5.2.1	全桥电流源高频链逆变器电路结构	107
5.2.2	全桥电流源高频链逆变器设计	109
5.3	模块化逆变器设计实例	111
5.3.1	模块化逆变器设计实例	111
5.3.2	低电压输入模块化 DC/AC 逆变器设计实例	116
5.3.3	高性能脉宽调制稳压型逆变器设计实例	118
5.3.4	基于 SA08 输出频率 400Hz 逆变器设计实例	120
5.4	光伏逆变器设计实例	122
5.4.1	离网光伏逆变器设计实例	122
5.4.2	离网光伏逆变器主电路及控制电路设计	124
5.4.3	并网光伏逆变器设计实例	131
5.4.4	光伏发电并网无变压器逆变器拓扑	135
5.4.5	光伏并网微型逆变器设计	141
5.4.6	光伏并网逆变器设计实例	147
第 6 章	逆变器并联技术	152
6.1	逆变器并联运行	152
6.1.1	逆变器的并联运行方法	152
6.1.2	逆变器并联系统中基准信号同步	156
6.2	基于 DSP 控制的逆变器并联系统	158
6.2.1	逆变器并联	158

6.2.2	逆变器并联的数字控制	160
6.2.3	SPWM 逆变器的无互联信号线并联控制技术	165
第 7 章	逆变器的工程应用实例	170
7.1	车载逆变器应用实例	170
7.1.1	VICTRON 车载逆变器/充电器解决方案	170
7.1.2	车载逆变器的电磁兼容性	176
7.2	串并联调整式 UPS	179
7.2.1	串并联调整式 UPS 电路特性	179
7.2.2	串并联调整式 UPS 应用实例	186
7.3	太阳能光伏发电系统逆变器选择	187
7.3.1	离网太阳能光伏发电系统逆变器选择	187
7.3.2	并网光伏发电系统逆变器选择	189
7.3.3	太阳能并网光伏发电系统逆变器配置实例	199
参考文献		204

第 1 章

逆变器基础知识

1.1 逆变器分类及主要技术性能指标

1.1.1 逆变器分类

在实际应用的电源系统中,有时需要把交流电转换成直流电供负载使用;有时则相反,要求把直流电转换成交流电供负载使用。这种把直流电变为交流电的过程,就是逆变。这样的电路称为逆变电路。在实际工程应用中,调节交流电频率、改变交流电波形、减小电路的功耗等也可以通过逆变来实现。

首先将电力系统电网交流电,通过整流技术变成直流电,然后通过逆变技术,将直流变成高频交流,再通过高频变压器降压,就达到缩小变压器体积和质量的目的。要实现上述过程,需要大功率高反压电力电子器件,过去由于只有硅整流管和晶闸管整流式电源,使得上述技术难以推广应用。20世纪90年代,随着电力电子技术及电力半导体器件的飞速发展,发达国家大量推广采用了逆变技术的电源,由此推动了各种工业技术的发展,也促进了逆变式电源的发展。

逆变器的目标是在任何负载条件(过载情况除外)和瞬态情况下,保证标准的额定值以正弦波输出。对于实际的逆变电源系统而言,高质量的输出波形有两方面的指标要求:一是稳态精度高,包括THD值小,基波分量相对于参考波形在相位和幅度上无静差;二是动态性能好,即在外界扰动下调节快,输出波形变化小。

逆变电源虽然发展历史不长,但发展速度迅速,它是一种更新换代的革命性电源,逆变电源在现代技术及新器件的支持下,无论是从可靠性还是从性能价格比,或从高效节能方面考虑,都有着广泛市场和发展前景。

随着电力电子功率开关器件的高压大容量化、集成化、全控化、高频化及多功能化方向的发展,材料学科的超导材料和软磁材料惊人发展速度,以及智能化控制技术、信息网络技术的发展,相信不久的将来逆变电源将会进入一个新的发展时代。

现代逆变技术是研究逆变电路理论和应用的一项科学技术,它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)技术等学科基础之上的一项实用技术。它主要包括半导体功率集成器件及其应用、逆变主电路和逆变控制电路技术三大部分。

(1) 逆变器按应用范围分为以下几类。

1) 普通型逆变器。直流12V或24V输入,交流220V、50Hz输出,功率为75~5000W,有些型号具有交、直流转换(即UPS)功能。

2) 逆变/充电一体逆变器。此类逆变器可以使用各种形式的电源为交流负载供电:有交流电时,通过逆变器使用交流电为负载供电,或为蓄电池充电;无交流电时,将蓄电池的电逆变为

交流电实现为负载供电。它可与各种电源结合使用,如蓄电池、发电机、太阳能电池板和风力发电机等。

3) 通信专用逆变器。为通信提供高品质的 48V 电源,其产品性能好、可靠性高,具有模块式(模块功率为 1kW)结构,并具有 $N+1$ 冗余功能,可扩充(功率为 2~20kW)。

4) 航空、军队专用逆变器。此类逆变器为直流 28V 输入,可提供交流输出电压为 26V、115V、230V,其输出频率可为 50Hz、60~400Hz,输出功率为 30~3500W。

5) 光伏发电逆变器。其按光伏发电方式可分为独立光伏发电系统逆变器、并网光伏发电系统逆变器。

(2) 逆变器按输出波形分为以下几类。

1) 方波逆变器。方波逆变器输出的交流电压波形为方波,此类逆变器可通过不同的逆变拓扑实现,但其共同的特点是线路比较简单,使用的功率开关管数量少。设计功率一般为百瓦至千瓦。方波逆变器的优点:线路简单,价格便宜,维修方便。其缺点:由于输出的方波电压中含有大量高次谐波,在带有铁心电感或变压器的负载用电器中将产生附加损耗,对音频和某些通信设备有干扰。此外,这类逆变器还有调压范围不够宽,保护功能不够完善,噪声比较大等缺点。

2) 阶梯波逆变器。此类逆变器输出的交流电压波形为阶梯波,逆变器实现阶梯波输出也有多种不同的电路结构,输出波形的阶梯数目差别很大。阶梯波逆变器的优点:输出波形比方波有明显改善,高次谐波含量减少,当阶梯达到 17 个以上时输出波形可实现准正弦波,当采用无变压器输出时,整机效率很高。其缺点:阶梯波叠加电路使用的功率开关管较多,其中有些电路形式还要求有多组直流电源输入。这对太阳能电池方阵的分组与接线和蓄电池的均衡充电不利。此外,阶梯波电压对音频和某些通信设备仍有一些高频干扰。

3) 正弦波逆变器。正弦波逆变器输出的交流电压波形为正弦波,正弦波逆变器的优点:输出波形好,失真度很低,对音频及通信设备干扰小,噪声低。此外,保护功能齐全,对电感性和电容型性负载适应性强,整机效率高。其缺点:电路相对复杂,对维修技术要求高,价格较贵。

(3) 逆变器按输出交流电能的频率分为工频逆变器(工频逆变器频率为 50~60Hz 的逆变器);中频逆变器(中频逆变器的频率一般为 400Hz 到十几千赫兹);高频逆变器(高频逆变器的频率一般为十几千赫兹到几兆赫兹)。

(4) 逆变器按输出的相数分为单相逆变器、三相逆变器、多相逆变器。

(5) 逆变器按输出电能的去向分为有源逆变器、无源逆变器。凡将逆变器输出的电能向工业电网输送的逆变器,称为有源逆变器;凡将逆变器输出的电能输向某种用电负载的逆变器,称为无源逆变器。

(6) 逆变器按主电路的形式分为单端式逆变器、推挽式逆变器、半桥式逆变器、全桥式逆变器。

(7) 逆变器按主开关元器件的类型分为晶闸管逆变器、晶体管逆变器、场效应逆变器、绝缘栅双极晶体管(IGBT)逆变器。也可将其归纳为“半控型”逆变器和“全控制”逆变器两大类:“半控型”逆变器不具备自关断能力,元器件在导通后即失去控制作用,故称之为“半控型”,普通晶闸管即属于这一类;“全控型”逆变器则具有自关断能力,即元器件的导通和关断均可由控制极加以控制,故称之为“全控型”,电力场效应晶体管和绝缘栅双极晶体管等均属于这一类。

(8) 逆变器按直流电源分为电压源型逆变器(VSI)、电流源型逆变器(CSI)。VSI 直流电压近于恒定,输出电压为交变方波;CSI 直流电流近于恒定,输出电流为交变方波。

- (9) 逆变器按控制方式分为调频式 (PFM) 逆变器、调脉宽式 (PWM) 逆变器。
- (10) 逆变器按开关电路工作方式分为谐振式逆变器、硬开关式逆变器、软开关式逆变器。
- (11) 逆变器按换流方式分为负载换流式逆变器和自换流式逆变器。
- (12) 逆变器按隔离方式分为隔离逆变器和非隔离逆变器。

1.1.2 逆变器的主要技术性能指标

逆变器的主要技术性能指标如下。

(1) 额定输出电压。在规定的直流输入电压允许波动范围内, 在输出额定电流时, 逆变器输出的电压应为额定值。逆变器的输出电压稳定度表征了逆变器输出电压的稳压能力, 多数逆变器产品给出的是在输入直流电压允许波动范围内, 该逆变器输出电压的偏差百分数, 通常称为电压调整率。对输出额定电压值的稳定精度有如下规定。

1) 在稳态运行时, 电压波动范围应有一个限定, 电压波动范围: 单相 $220 \times (1 \pm 5\%) \text{V}$, 三相 $380 \times (1 \pm 5\%)$ 。

2) 高性能的逆变器应同时给出当负载在 $0\% \sim 100\%$ 变化时, 该逆变器输出电压的偏差百分数, 通常称为负载调整率。性能良好的逆变器其电压调整率应 $\leq \pm 3\%$, 负载调整率应 $\leq \pm 6\%$ 。

3) 在 10% 的非对称负载下, 固定频率的三相逆变器输出电压的非对称度应 $\leq 10\%$ 。输出电压的不对称度在正常工作条件下, 各相负载对称, 输出电压的不对称度应 $\leq 5\%$ 。在正常工作条件下, 逆变器输出的三相电压不平衡度 (逆序分量对正序分量之比) 应不超过一个规定值, 一般以 $\%$ 表示, 如 5% 或 8% 。

4) 要求逆变器具有较好的调压性能, 以保证输出稳定的交流电压。对于一个合格的逆变器, 输入端电压在这个范围内变化时, 其稳态输出电压的变化量应不超过额定值的 $\pm 5\%$, 同时, 当负载发生突变时, 其输出电压偏差不应超过额定值的 $\pm 10\%$ 。

5) 输出电压的波形失真度及最大谐波含量。当逆变器输出电压为正弦波时, 应规定允许的最大波形失真度 (或谐波含量)。通常以输出电压的总波形失真度表示, 其值不应超过 5% 。正弦波逆变器在阻性负载下, 输出电压的最大谐波含量应 $\leq 10\%$ 。逆变器输出的高次谐波电流会在感性负载上产生涡流等附加损耗, 如果逆变器波形失真度过大, 会导致负载严重发热, 不利于电气设备的安全, 并且严重影响系统的运行效率。

(2) 额定输出频率。在规定的条件下, 逆变器输出交流电压的频率应是一个相对稳定的值, 通常为工频 50Hz 。正常工作条件下, 其偏差应在 $\pm 1\%$ 以内。我国的交流负载是在 50Hz 的频率下进行工作的。而高质量的设备需要精确的频率, 因为频率偏差会引起用电设备性能下降。

(3) 负载功率因数表征逆变器带感性负载或容性负载的能力, 在正弦波条件下, 负载功率因数为 $0.7 \sim 0.9$ (滞后), 额定值为 0.9 。逆变器产生的电流与电压间的相位差的余弦值即为功率因数。对于电阻型负载, 功率因数为 1 , 但电感型负载 (用户系统中常用负载) 功率因数会下降, 有时可能低于 0.5 。功率因数是由负载确定而不是由逆变器确定的。在负载功率一定的情况下, 如果逆变器的功率因数较低, 则所需逆变器的容量就要增大, 一方面造成成本增加, 另一方面将使交流回路的视在功率增大, 回路电流增大, 损耗必然增加, 系统效率也会降低。

(4) 额定输出电流 (或额定输出容量)。在规定的输出频率和负载功率因数下, 逆变器应输出的额定电流值即额定输出容量。有些逆变器产品给出的是额定输出容量, 其单位以 VA 或 kVA 表示。逆变器的额定输出容量是当输出功率因数为 1 (即纯阻性负载) 时, 额定输出电压与额定输出电流的乘积。

(5) 逆变器的效率是指在规定的条件下,其输出功率与输入功率之比,通常以百分数表示,逆变器的效率会因负载的不同而有很大变化。逆变器的效率值表征了自身功率损耗的大小。10kW 级的通用型逆变器实际效率只有 70%~80%,将其用于太阳能光伏发电系统时将带来总发电量 20%~30% 的电能损耗。太阳能光伏发电系统专用逆变器,在设计中应特别注意减少自身功率损耗,提高整机效率。这是提高太阳能光伏发电系统技术经济指标的一项重要措施。在整机效率方面,对太阳能光伏发电专用逆变器的要求是:千瓦级以下逆变器额定负荷效率 $\geq 80\%$,低负荷效率 $\geq 65\%$;10kW 级逆变器额定负荷效率 $\geq 85\%$,低负荷效率 $\geq 70\%$ 。容量较大的逆变器还应给出满负荷效率值和低负荷效率值。逆变器效率对太阳能光伏发电系统提高有效发电量和降低发电成本有着重要影响。

(6) 保护功能。一款性能优良的逆变器应具备完备的保护功能或措施,以应对在实际使用过程中出现的各种异常情况,使逆变器本身及系统其他部件免受损伤。太阳能光伏发电系统在正常运行过程中,因负载故障、人员误操作及外界干扰等原因会引起供电系统的过电流或短路。逆变器对外部电路的过电流及短路现象最为敏感,是太阳能光伏发电系统中的薄弱环节。因此,逆变器应设置过电压保护、欠电压保护、过电流保护、短路保护、防雷保护和过温保护等。

1) 过电压保护:逆变器输入端若为蓄电池组,蓄电池在过充电时,逆变器的直流输入电压就会超过标称值,如一个 12V 的蓄电池在过充电以后,电压可能会达到 16V 或者更高,这时就有可能损坏后级的逆变器。所以控制蓄电池的充电状态是十分必要的,逆变器需有检测输入电压及过电压保护电路,当电压高于设定值时,保护电路会将逆变器断开。对于没有电压稳定措施的逆变器,应有输出过电压的保护措施,以使负载免受输出过电压的损害。当输入端电压低于额定电压的 85% 时,逆变器应有保护和显示。当输入端电压高于额定电压的 130% 时,逆变器应有保护和显示。

2) 过电流保护:逆变器的过电流保护电路应在负载发生短路或电流超过允许值时及时动作,使其免受浪涌电流的损伤。当工作电流超过额定的 150% 时,逆变器应能自动保护。

3) 短路保护:逆变器短路保护动作时间应不超过 0.5s。

4) 输入反接保护:当输入端正、负极接反时,逆变器应有防护功能和显示。

5) 防雷保护:逆变器应有防雷保护。

6) 过温保护。

(7) 启动特性。它表征逆变器带负载启动的能力和动态工作时的性能,逆变器应保证在额定负载下可靠启动。高性能的逆变器可做到连续多次满负载启动而不损坏功率器件。小型逆变器为了自身安全,有时采用软启动或限流启动。在正常工作条件下,逆变器在满负载和空载运行条件下,应能连续 5 次正常启动。

(8) 噪声。逆变器中的电子开关、变压器、滤波电感、电磁开关及风扇等部件均会产生噪声。当逆变器正常运行时,其噪声应不超过 65dB。不经常操作、监视和维护的逆变器,噪声应 $\leq 95\text{dB}$;经常操作、监视和维护的逆变器,噪声应 $\leq 80\text{dB}$ 。

(9) 使用环境条件。逆变器正常使用条件:海拔高度不超过 1000m,空气温度 0~40℃。

(10) 干扰与抗干扰。逆变器在规定的正常工作条件下,应能承受一般环境下的电磁干扰。逆变器的抗干扰性能和电磁兼容性应符合有关标准规定。

(11) 显示。逆变器应设有交流输出电压、输出电流和输出频率等参数的数据显示,并有输入带电、通电和故障状态的信号显示。

1.2 逆变器的工作原理及基本电路

1.2.1 逆变器的工作原理

逆变器是将直流电转变为交流电的装置，逆变器的基本工作原理框图如图 1-1 所示。其性能特点有：采用 DSP 芯片控制；智能功率模块组装；纯正弦波输出；输出稳压、稳频；具有过电压、欠电压、过载、短路、输入极性反接等各种保护功能；逆变效率 $\geq 85\%$ ；并具有交流旁路功能，输入/输出具有优异的 EMI/EMC 指标，可配备 RS232/485 接口，具有高可靠性。

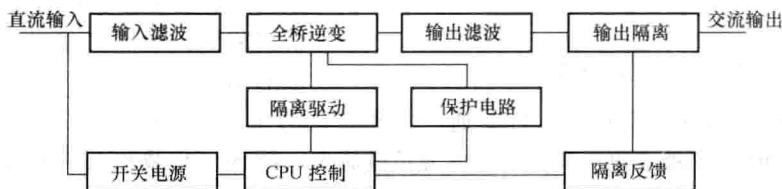


图 1-1 逆变器的基本工作原理框图

采用 TMS320C2000 DSP 构成的逆变器基本设计方案框图如图 1-2 所示。TMS320C2000 DSP 内核中的 32 位 CPU 以 150MHz 的最高频率运行，能够高效地执行在最大功率点下操作面板所需的高精度算法，可确保最高的电源转换效率。DC/AC 主桥由 TMS320C2000 器件的 PWM（脉冲宽度调制）模块驱动，并与片上高速 12 位模/数转换器配合使用，调节输出电压和电流，从而获得正弦波形的交流输出。

TMS320C2000 DSP 片上高速 12 位模/数转换器可对太阳能电池电压、温度、环境温度与计量计数器的模拟量并行模/数转换。DC/DC 变换环节调整光伏阵列的工作点，使其跟踪最大功率点。所以在太阳能电池输出端设有 Boost 升压斩波器，将电压升到 400V，这样设计有利于提高系统效率。

太阳能电池输出的最大功率随着光照强度和温度的变化而变化，系统的最大功率跟踪由前级 Boost 升压斩波器控制。Boost 升压斩波器和全桥逆变器的控制由 DSP 芯片 TMS320C2000 协调完成。该设计方案的性能特点如下。

- 1) DSC 芯片控制，智能功率模块组装。
- 2) MPPT 控制方式适时追踪太阳能电池的最大输出功率。
- 3) 纯正弦波输出，电流谐波含量小。
- 4) 具有扰动检出技术，实现运行过程的自动控制。
- 5) 采用 LCD、LED 显示功能，保护和报警功能齐全。
- 6) RS232/485 通信，实现远程数据采集和监视。

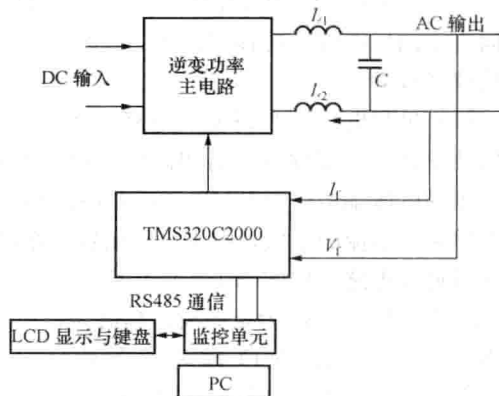


图 1-2 逆变器基本设计方案框图

1.2.2 电压型逆变电路

1. 单相桥式逆变电路

单相桥式逆变电路如图 1-3 (a) 所示, 在图 1-3 (a) 中, $S_1 \sim S_4$ 是桥式电路的 4 个臂, 由电力电子器件及辅助电路组成。当 S_1 、 S_4 导通, S_2 、 S_3 截止时, 负载电压 u_o 为正。当 S_1 、 S_4 截止, S_2 、 S_3 导通时, u_o 为负。通过控制两组桥臂开关的导通和截止, 将输入端的直流电转换为交流电。改变两组开关切换频率可改变输出交流电的频率。电阻负载时, 负载电流 i_o 和 u_o 的波形相同, 相位也相同。感性负载时, i_o 滞后于 u_o , 波形如图 1-3 (b) 所示。

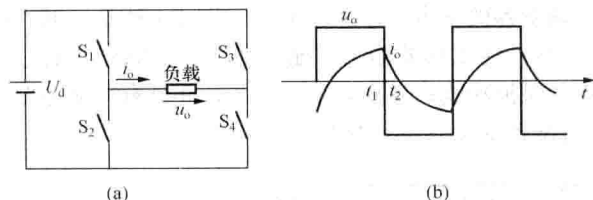


图 1-3 逆变电路及波形

在图 1-3 (b) 中, t_1 时刻前 S_1 、 S_4 导通, u_o 和 i_o 均为正。 t_1 时刻时 S_1 、 S_4 截止, S_2 、 S_3 导通, u_o 变为负, 但 i_o 不能立刻反向, i_o 从电源负极流出, 经 S_2 、负载和 S_3 流回正极, 负载电感能量向电源反馈, i_o 逐渐减小, t_2 时刻降为零, 之后 i_o 才反向并增大。

2. 单相电压型逆变电路

单相电压型逆变电路如图 1-4 电路所示, 单相电压型逆变电路具有以下特点。

1) 直流侧为电压源或并联大电容, 直流侧电压基本无脉动。

2) 输出电压为矩形波, 输出电流因负载阻抗不同而不同。

3) 电感性负载时需提供无功, 为了给交流侧向直流侧反馈的无功提供通道, 逆变桥各臂并联反馈二极管。

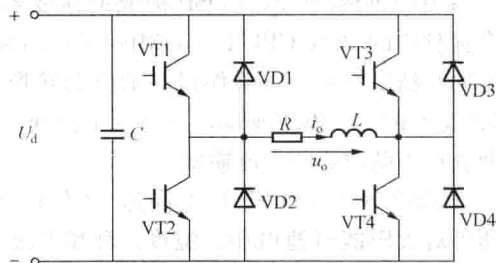


图 1-4 单相电压型逆变电路（全桥逆变电路）

(1) 单相电压型半桥逆变电路。半桥逆变电路的功率开关元器件少, 结构简单, 但主电路交流输出的电压幅值仅为 $U_d/2$, 在同等容量下, 其功率开关的额定电流为全桥逆变电路中的功率元器件额定电流的 2 倍, 由于分压电容的作用, 该电路还具有较强的抗电压输出不平衡能力。单相半桥逆变电路结构如图 1-5 (a) 所示, 其工作原理如下。VT1 和 VT2 互补, 栅极信号各半周正偏、半周反偏, u_o 为矩形波, 幅值为 $U_m = U_d/2$, i_o 波形随负载而异, 感性负载时的工作波形如图 1-5 (b) 所示。VT1 或 VT2 导通时, i_o 和 u_o 同方向, 直流侧向负载提供能量, VD1 或 VD2 导通时, i_o 和 u_o 反向, 电感中储能向直流侧反馈, VD1、VD2 称为反馈二极管, 它们使 i_o 连续, 又称续流二极管。

单相电压型半桥逆变电路的优点: 电路结构简单, 使用元器件少。单相电压型半桥逆变电路的缺点: 交流电压幅值仅为 $U_d/2$, 直流侧需两个电容器串联, 要控制两个电容器电压的均衡。单相电压型半桥逆变电路广泛应用于几千瓦以下的小功率逆变器, 而单相电压型全桥、三相桥式都可看做若干个电压型半桥逆变电路的组合。

(2) 单相电压型全桥逆变电路。全桥逆变电路使用了 4 个开关元器件, 开关端电压为 U_i , 在相同的直流输入电压下, 其最大输出电压是半桥逆变电路的 2 倍。这就意味着在输出相同功率的情况下, 全桥逆变电路输出电流和通过开关元器件的电流均为半桥逆变电路的一半, 但驱动电路相比比较复杂。全桥逆变电路如图 1-4 所示, 全桥逆变电路为两个半桥电路的组合; VT1 和

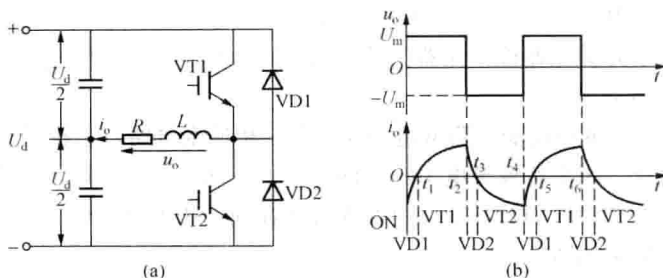


图 1-5 单相半桥电压型逆变电路及工作波形

VT4 为一对桥臂，VT2 和 VT3 为另一对桥臂，成对的桥臂同时导通，交替各导通 180° ， u_o 波形同图 1-5 (b) 所示半桥电路的 u_o ，但电压幅值增加一倍，即 $U_m = U_d$ ， i_o 波形和图 1-5 (b) 中的 i_o 相同，电流幅值增加一倍，单相全桥逆变电路的应用最广泛。全桥逆变电路输出电压 u_o 展开的傅里叶级数为

$$U_o = \frac{4U_d}{\pi} \left(\sin\omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right) \quad (1-1)$$

基波幅值为

$$U_{olm} = \frac{4U_d}{\pi} \approx 1.27U_d \quad (1-2)$$

基波有效值为

$$U_{ol} = \frac{2\sqrt{2}U_d}{\pi} \approx 0.9U_d \quad (1-3)$$

式中： U_d 为直流输入电压； U_{ol} 为输出电压。

U_o 为正负各 180° 时，要改变输出电压有效值只能改变 U_d 来实现。

(3) 移相调压逆变电路。移相调压逆变电路及其工作波形如图 1-6 所示，图中 VT1 和 VT2 互补，VT3 和 VT4 互补。VT1 和 VT2 的栅极信号为 180° 正偏，VT3 和 VT4 的栅极信号为 180° 反偏。

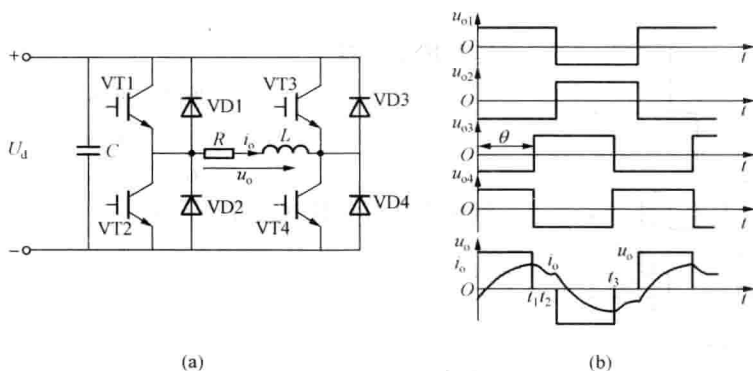


图 1-6 移相调压逆变电路及其工作波形

VT3 的栅极信号比 VT1 落后 q ($0^\circ < q < 180^\circ$)，VT3、VT4 的栅极信号分别比 VT2、VT1 的前移 $180^\circ - q$ 。输出电压 u_o 为正负各为 q 的脉冲，改变 q 即可调节输出电压的有效值。

(4) 带中心抽头变压器的逆变电路。带中心抽头变压器的逆变电路如图 1-7 所示，交替驱动两个开关管，经变压器耦合给负载加上矩形波交流电压。两个二极管的作用是提供无功能量的反馈通道。

U_d 和负载相同,变压器匝比为1:1:1时, u_o 和 i_o 波形及幅值与全桥逆变电路完全相同。它比全桥电路少用一半开关元器件,元器件承受的电压为 $2U_d$,比全桥电路高一倍。

3. 三相电压型逆变电路

(1) 电路结构。三个单相逆变电路可组合成一个三相逆变电路,三相桥式逆变电路可看作由三个半桥逆变电路组成。每个桥臂导电 180° ,同一相上下两臂交替导电,各相开始导电的角度相差 120° ,任一瞬间有3个桥臂同时导通。每次换流都在同一相上下两臂之间进行,也称为纵向换流。三相电压型逆变电路如图1-8所示。

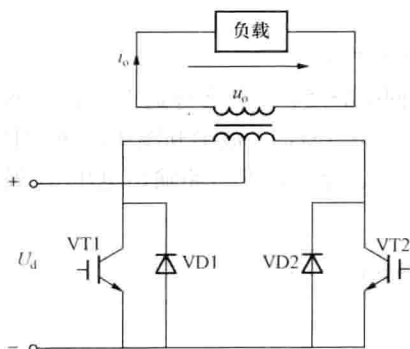


图 1-7 带中心抽头变压器的逆变电路

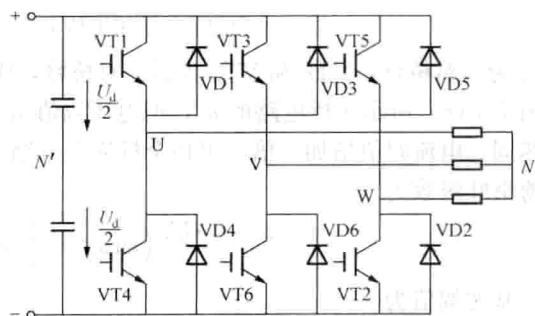


图 1-8 三相电压型逆变电路

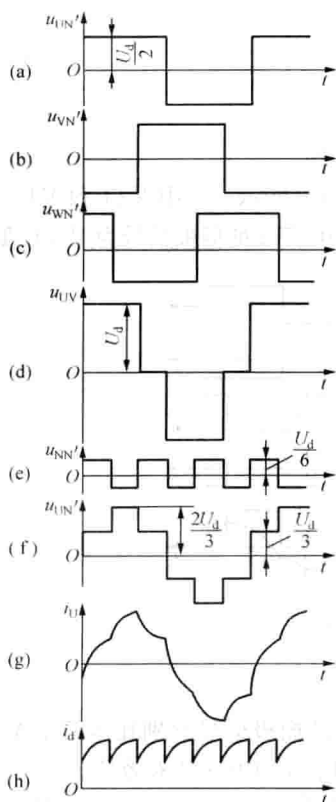


图 1-9 三相电压型桥式逆变电路的工作波形

(2) 波形分析。三相电压型桥式逆变电路的工作波形如图1-9所示,负载各相到电源中点 N' 的电压: U 相,桥臂1导通时, $u_{UN'} = U_d/2$,桥臂4导通时, $u_{UN'} = -U_d/2$ 。负载线电压为

$$\begin{aligned} u_{UV} &= u_{UN'} - u_{VN'} \\ u_{VW} &= u_{VN'} - u_{WN'} \\ u_{WU} &= u_{WN'} - u_{UN'} \end{aligned} \quad (1-4)$$

负载相电压为

$$\begin{aligned} u_{UN} &= u_{UN'} - u_{NN} \\ u_{VN} &= u_{VN'} - u_{NN} \\ u_{WN} &= u_{WN'} - u_{NN} \end{aligned} \quad (1-5)$$

负载中点和电源中点间电压为

$$u_{NN} = \frac{1}{3}(u_{UN'} + u_{VN'} + u_{WN'}) - \frac{1}{3}(u_{UN'} + u_{VN'} + u_{WN'}) \quad (1-6)$$

负载三相对称时有 $u_{UN'} + u_{VN'} + u_{WN'} = 0$, 于是有

$$u_{NN} = \frac{1}{3}(u_{UN'} + u_{VN'} + u_{WN'}) \quad (1-7)$$

利用式(1-5)和式(1-7)可绘出 u_{UN} 、 u_{VN} 、 u_{WN} 的波形,负载已知时,可由 u_{UN} 的波形求出 i_U 的波形。一相上下两桥臂间的换流过程和半桥电路相似,桥臂1、3、5的电流相加可得直流侧电流 i_d 的波形, i_d 每 60° 脉动一次(直流电压基本无脉动),因此逆变器从直流侧向交流侧传送的功率是脉动的,

这是电压型逆变电路的一个特点。三相电压型桥式逆变电路输出线电压 u_{UV} 展开成傅里叶级数为

$$\begin{aligned} u_{UV} &= \frac{2\sqrt{3}U_d}{\pi} \left(\sin \omega t - \frac{1}{5} \sin 5\omega t - \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \frac{1}{11} \sin 11\omega t + \frac{1}{13} \sin 13\omega t - \dots \right) \\ &= \frac{2\sqrt{3}U_d}{\pi} \left[\sin \omega t + \sum_n \frac{1}{n} (-1)^n \sin n\omega t \right] \end{aligned} \quad (1-8)$$

式中: $n = 6k \pm 1, k$ 为自然数。

负载相电压有效值为

$$U_{UV} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_{UV}^2 d\omega t} = 0.816U_d \quad (1-9)$$

基波幅值为

$$U_{UV1m} = \frac{2\sqrt{3}U_d}{\pi} = 1.1U_d \quad (1-10)$$

基波有效值为

$$U_{UV1} = \frac{U_{UV1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} U_d = 0.78U_d \quad (1-11)$$

负载相电压 u_{UN} 展开成傅里叶级数为

$$\begin{aligned} u_{UN} &= \frac{2U_d}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \frac{1}{11} \sin 11\omega t + \frac{1}{13} \sin 13\omega t + \dots \right) \\ &= \frac{2U_d}{\pi} \left(\sin \omega t + \sum_n \frac{1}{n} \sin n\omega t \right) \end{aligned} \quad (1-12)$$

式中: $n = 6k \pm 1, k$ 为自然数。

负载相电压有效值为

$$U_{UN} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_{UN}^2 d\omega t} = 0.471U_d \quad (1-13)$$

基波幅值为

$$U_{UN1m} = \frac{2U_d}{\pi} = 0.637U_d \quad (1-14)$$

基波有效值为

$$U_{UN1} = \frac{U_{UN1m}}{\sqrt{2}} = 0.45U_d \quad (1-15)$$

为防止同一相上下两桥臂开关元器件直通, 采取“先断后通”的控制方法。

1.2.3 电流型逆变电路

1. 电流型逆变电路的概念

电流型逆变电路一般在直流侧串联大电感, 电流脉动很小, 可近似看作直流电流源。图 1-10 所示为电流型三相桥式逆变电路, 交流侧电容用于吸收换流时负载电感中存储的能量。电流型逆变电路的主要特点如下。

1) 直流侧串联大电感, 相当于电流源。

2) 交流输出电流为矩形波, 输出电压的波形和相位因负载不同而不同。

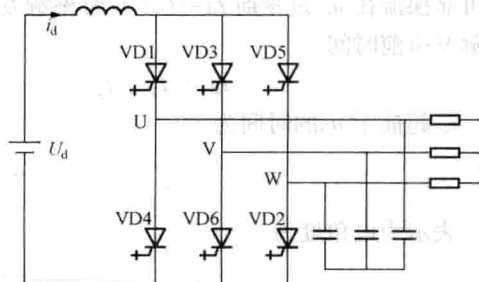


图 1-10 电流型三相桥式逆变电路

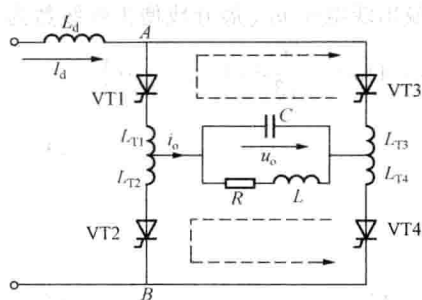


图 1-11 单相电流型逆变电路

3) 直流侧电感起缓冲无功能量的作用，不必给开关元器件反并联二极管。

在电流型逆变电路中，采用半控型元器件的电路应用较多，换流方式有负载换流、强迫换流。

(1) 单相电流型逆变电路。单相电流型逆变电路如图 1-11 所示，每个桥臂开关管各串联一个电抗器 L_T 限制开关管开通时的 di/dt ，VT4 和 VT2、VT1 和 VT3 以 1000~2500Hz 的频率轮流导通，可得到不同频率的交流电。

采用负载换流方式，要求负载电流超前于电压，负载若为感性，则 R 、 L 串联为其等效电路。因功率因数很低，故并联 C ， C 和 L 、 R 构成并联谐振电路，故此电路也称为并联谐振式逆变电路。

单相电流型逆变电路的输出电流波形接近于矩形波，含基波和各奇次谐波，且谐波幅值远小于基波。因基波频率接近于负载电路谐振频率，故负载对基波呈高阻抗，对谐波呈低阻抗，谐波在负载上产生的压降很小，因此负载电压波形接近于正弦波。

(2) 工作波形分析。单相电流型逆变电路一个周期内的工作波形如图 1-12 所示，有两个稳定导通阶段和两个换流阶段。

$t_1 \sim t_2$ 为 VT1 和 VT4 稳定导通阶段， $i_o = i_d$ ， t_2 时刻前在 C 上建立了左正右负电压。

在 $t_2 \sim t_4$ ， t_2 时刻触发 VT2 和 VT3 导通，进入换流阶段。 L_T 使 VT1、VT4 不能立刻关断，电流有一个减小过程，VT2、VT3 电流有一个增大的过程，4 个开关管全部导通，负载电压经两个并联的放电回路同时放电： $L_{T1} \rightarrow VT1 \rightarrow VT3 \rightarrow L_{T3} \rightarrow C$ ， $L_{T2} \rightarrow VT2 \rightarrow VT4 \rightarrow L_{T4} \rightarrow C$ 。

在 $t = t_4$ 时，VT1、VT4 电流减至零而关断，换流阶段结束。 $t_4 - t_2 = t_g$ 称为换流时间。 i_o 在 t_3 时刻，即 $i_{VT1} = i_{VT2}$ 时刻过零， t_3 时刻位于 t_2 和 t_4 的中点。

因开关管需一段时间才能恢复正向阻断能力，为保证开关管的可靠关断，换流结束后还要使 VT1、VT4 承受一段反压时间 t_b ， $t_b = t_5 - t_4$ 应大于晶闸管的关断时间 t_q 。为保证可靠换流在 u_o 过零前 $t_d = t_5 - t_2$ 时刻触发 VT2、VT3， t_d 为触发引前时间

$$t_d = t_\gamma + t_\beta \quad (1-16)$$

i_o 超前于 u_o 的时间为

$$t_\varphi = \frac{t_\gamma}{2} + t_\beta \quad (1-17)$$

表示为电角度为

$$\varphi = \omega \left(\frac{t_\gamma}{2} + t_\beta \right) = \frac{\gamma}{2} + \beta \quad (1-18)$$

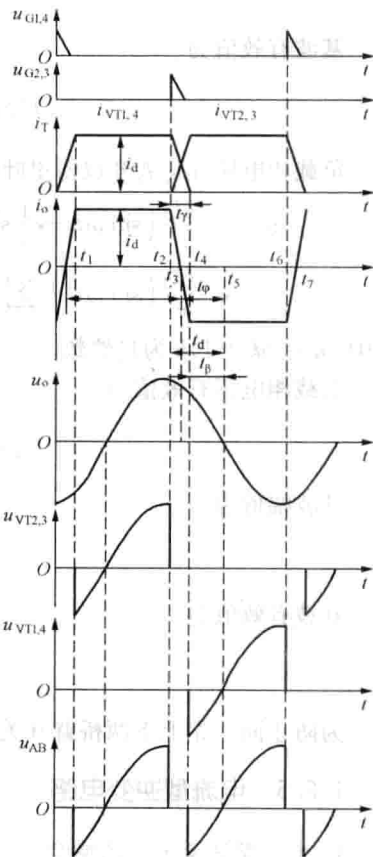


图 1-12 单相电流型逆变电路工作波形