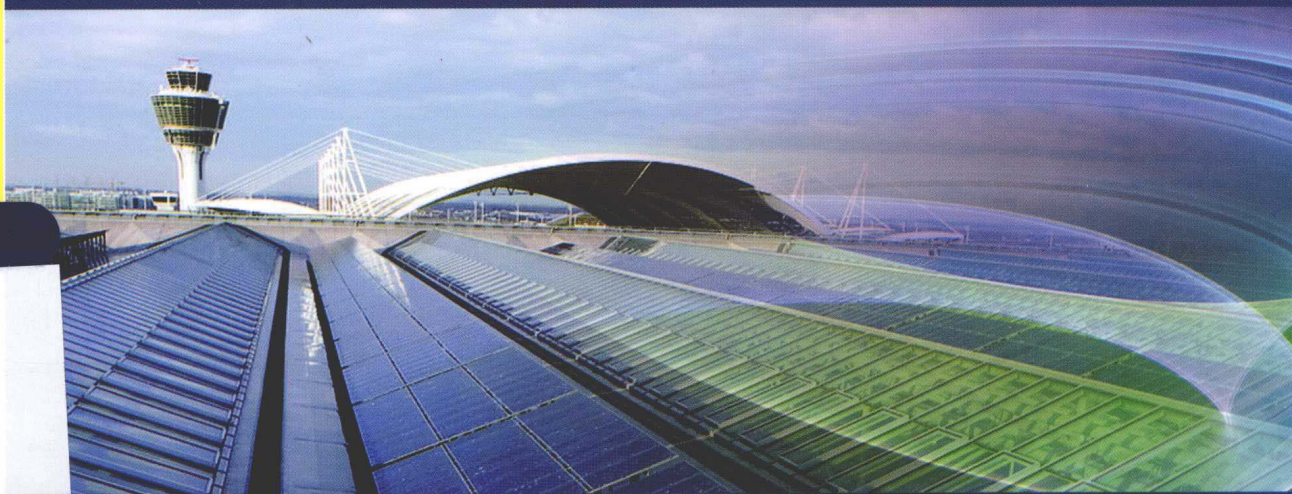


电子工程技术丛书

<http://www.phei.com.cn>

太阳能光伏逆变器 设计与工程应用

● 周志敏 纪爱华 编著



 电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

电子工程技术丛书

太阳能光伏逆变器 设计与工程应用

周志敏 纪爱华 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

现代 DC/AC 逆变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。逆变技术在太阳能光伏发电领域具有广泛的应用前景。本书结合国内外光伏逆变器的应用和发展,全面系统地阐述了光伏逆变器设计和最新应用技术,包括光伏逆变器基础知识、软开关技术在逆变器中的应用、三相逆变器、多电平逆变器、光伏逆变器设计、逆变器并联技术、光伏逆变器工程应用等内容。本书题材新颖、内容丰富、深入浅出、文字通俗,具有很高的实用价值。

本书可供从事太阳能光伏发电逆变器设计与应用的工程技术人员和高等院校及职业技术学院相关专业的师生阅读参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

太阳能光伏逆变器设计与工程应用 / 周志敏, 纪爱华编著. —北京: 电子工业出版社, 2013.3
(电子工程技术丛书)

ISBN 978-7-121-19641-6

I. ①太… II. ①周… ②纪… III. ①太阳能发电—逆变器—设计 IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 032002 号



策划编辑: 富 军

责任编辑: 桑 昀

印 刷: 北京天宇星印刷厂

装 订: 三河市鹏成印业有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 16.25 字数: 420 千字

印 次: 2013 年 3 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 48.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

现代逆变技术是研究逆变电路理论和应用的一门科学技术，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门实用技术，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3大部分。

光伏逆变器是太阳能光伏发电系统的重要组成部分，其性能的优劣直接关系到整个光伏发电系统的安全性和可靠性指标。光伏逆变器现已成为具有发展前景和影响力的一项高新技术产品。现代光伏逆变器以其低损耗、高效率、模块化等显著优点，广泛应用于太阳能光伏发电领域。近年来随着太阳能光伏发电技术的高速发展，对光伏逆变器的需求与日俱增，光伏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。

本书结合国内外光伏逆变器的发展动向及最新应用技术，集逆变技术基础知识、设计实例、工程应用于一体，系统地介绍了光伏逆变器的前沿技术和设计实例。本书尽量做到针对性和实用性，力求做到通俗易懂和结合实际，使从事光伏逆变器开发、设计、应用的技术人员从中获益，读者可以以此为“桥梁”，系统全面地了解和掌握光伏逆变器的设计和最新应用技术。

为了便于读者查阅，书中电路图元器件符号及其标注均与原电路图一致，未做标准化处理，在此特加以说明。

本书由周志敏、纪爱华编著，参加编写的还有周纪海、纪达奇、刘建秀、顾发娥、刘淑芬、纪和平、纪达安等。本书在写作过程中无论从资料的收集，还是在技术信息交流方面都得到了国内的专业学者和同行及光伏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，加之编者水平有限，书中错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

编著者

《太阳能光伏逆变器设计与工程应用》

读者调查表

尊敬的读者：

欢迎您参加读者调查活动，对我们的图书提出真诚的意见，您的建议将是我们创造精品的动力源泉。为方便大家，我们提供了两种填写调查表的方式：

1. 您可以登录 <http://yydz.phei.com.cn>，进入“客户留言”栏目，将您对本书的意见和建议反馈给我们。
2. 您可以填写下表后寄给我们（北京市海淀区万寿路 173 信箱电子技术出版分社 邮编：100036）。

姓名：_____ 性别： 男 女 年龄：_____ 职业：_____

电话（寻呼）：_____ E-mail：_____

传真：_____ 通信地址：_____

邮编：_____

1. 影响您购买本书的因素（可多选）：

- 封面封底 价格 内容简介、前言和目录 书评广告 出版物名声
- 作者名声 正文内容 其他 _____

2. 您对本书的满意度：

- 从技术角度 很满意 比较满意 一般 较不满意 不满意
- 从文字角度 很满意 比较满意 一般 较不满意 不满意
- 从排版、封面设计角度 很满意 比较满意 一般 较不满意
- 不满意

3. 您最喜欢书中的哪篇（或章、节）？请说明理由。

4. 您最不喜欢书中的哪篇（或章、节）？请说明理由。

5. 您希望本书在哪些方面进行改进？

6. 您感兴趣或希望增加的图书选题有：

邮寄地址：北京市海淀区万寿路 173 信箱电子技术出版分社 富军 收 邮编：100036

编辑电话：(010) 88254456 E-mail: fujun@phei.com.cn

目 录

| | |
|---------------------------|----|
| 第 1 章 光伏逆变器基础知识 | 1 |
| 1.1 逆变器的分类及主要技术性能指标 | 1 |
| 1.1.1 逆变器的分类 | 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 | 6 |
| 1.2.1 逆变器的工作原理 | 6 |
| 1.2.2 电压型逆变电路 | 7 |
| 1.2.3 电流型逆变电路 | 12 |
| 1.3 逆变器控制技术 | 15 |
| 1.3.1 电流型控制技术 | 15 |
| 1.3.2 逆变器的消谐控制技术 | 19 |
| 1.3.3 并网逆变器的控制策略 | 21 |
| 1.4 逆变器功率器件 | 24 |
| 1.4.1 功率 MOSFET 工作原理及基本特性 | 24 |
| 1.4.2 IGBT 工作原理及工作特性 | 30 |
| 1.4.3 用于逆变器的功率器件 | 42 |
| 1.4.4 用于全桥电路的功率模块 | 51 |
| 第 2 章 软开关技术在逆变器中的应用 | 56 |
| 2.1 软开关技术 | 56 |
| 2.1.1 硬开关问题分析及软开关概念 | 56 |
| 2.1.2 软开关电路的分类 | 58 |
| 2.1.3 典型的软开关电路工作原理 | 60 |
| 2.2 采用软开关技术的逆变器 | 64 |
| 2.2.1 软开关逆变器拓扑结构 | 64 |
| 2.2.2 双幅有源钳位谐振直流环节逆变器 | 72 |
| 2.2.3 单极倍频电压型 SPWM 软开关逆变器 | 75 |
| 2.2.4 综合性能的高频软开关逆变器 | 77 |
| 第 3 章 三相逆变器 | 82 |
| 3.1 三相逆变器工作方式 | 82 |
| 3.1.1 三相逆变器工作方式分析 | 82 |
| 3.1.2 三相正弦波逆变器偏磁的抑制 | 85 |

| | | |
|--------------|-------------------------------------|------------|
| 3.2 | 三相软开关逆变器 | 89 |
| 3.2.1 | 硬开关和软开关三相 PWM 逆变器 | 89 |
| 3.2.2 | 三相软开关逆变器的 PWM 实现方法 | 94 |
| 3.3 | 三相 PWM 波形产生器 | 98 |
| 3.3.1 | 三相 PWM 波形产生器 SA4828 在逆变器中的应用 | 98 |
| 3.3.2 | 基于 SA4828 的三相组合式逆变器设计 | 102 |
| 3.3.3 | 三相 SPWM 产生器 SA8282 在静止逆变器中的应用 | 106 |
| 3.3.4 | IR2130 驱动器及其在逆变器中的应用 | 110 |
| 第 4 章 | 多电平逆变器 | 114 |
| 4.1 | 多电平变换技术 | 114 |
| 4.1.1 | 电压钳位多电平逆变器拓扑结构 | 114 |
| 4.1.2 | 多电平逆变电路的控制方法 | 124 |
| 4.2 | 多电平逆变电路 | 126 |
| 4.2.1 | 5 电平逆变器三维 PWM 控制 | 126 |
| 4.2.2 | 3 电平逆变器 SVPWM 控制策略 | 130 |
| 4.2.3 | 3 电平逆变器中点电压平衡的电压空间矢量控制 | 136 |
| 4.2.4 | 多电平逆变器与输出谐波 | 139 |
| 第 5 章 | 光伏逆变器设计 | 147 |
| 5.1 | 离网光伏逆变器设计 | 147 |
| 5.1.1 | 离网太阳能光伏发电对逆变器的要求及基本数据 | 147 |
| 5.1.2 | 离网光伏发电逆变器的主电路及其控制电路设计 | 150 |
| 5.2 | 并网光伏逆变器的设计 | 157 |
| 5.2.1 | 并网光伏发电系统对逆变器的要求及其基本设计 | 157 |
| 5.2.2 | 光伏发电并网无变压器逆变器拓扑 | 161 |
| 5.2.3 | 光伏并网微型逆变器 | 169 |
| 5.3 | 光伏发电逆变器设计实例 | 176 |
| 5.3.1 | 太阳能光伏并网逆变器的设计实例 | 176 |
| 5.3.2 | 高频链逆变器设计 | 181 |
| 第 6 章 | 逆变器并联技术 | 187 |
| 6.1 | 逆变器并联运行 | 187 |
| 6.1.1 | 逆变器并联运行的方法 | 187 |
| 6.1.2 | 逆变器并联系统中基准信号同步 | 191 |
| 6.2 | 基于 DSP 控制的逆变器并联系统 | 194 |
| 6.2.1 | 逆变器并联系统 | 194 |
| 6.2.2 | 逆变器并联系统的数字控制 | 197 |
| 6.2.3 | SPWM 逆变器的无互连信号线并联控制技术 | 204 |

| | |
|--------------------------------|-----|
| 第 7 章 光伏逆变器工程应用 | 209 |
| 7.1 太阳能光伏发电系统逆变器的选择 | 209 |
| 7.1.1 离网太阳能光伏发电系统逆变器的选择 | 209 |
| 7.1.2 并网光伏发电系统逆变器的选择 | 211 |
| 7.1.3 太阳能并网光伏发电系统逆变器配置实例 | 221 |
| 7.2 太阳能光伏发电系统逆变器安装与调试 | 226 |
| 7.2.1 光伏发电逆变器安装环境 | 226 |
| 7.2.2 逆变器安装前的准备工作及安装方式 | 230 |
| 7.2.3 逆变器的布线设计 | 233 |
| 7.2.4 逆变器布线的抗干扰设计 | 237 |
| 7.2.5 光伏发电系统逆变器调试操作 | 242 |
| 参考文献 | 251 |

第 1 章

光伏逆变器基础知识

1.1 逆变器的分类及主要技术性能指标

通常把将交流电能转换成直流电能的过程称为整流，把完成整流功能的电路称为整流电路，把实现整流过程的装置称为整流设备或整流器。与之相对应，把将直流电能转换成交流电能的过程称为逆变，把完成逆变功能的电路称为逆变电路，把实现逆变过程的装置称为逆变设备或逆变器。

现代逆变技术是研究逆变电路理论和应用的一门科学技术，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门实用技术。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 3 大部分。

1.1.1 逆变器的分类

1. 按逆变器应用的范围分

按逆变器应用的范围可分为以下几类。

(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（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。例如，当有交流电时，通过逆变器采用交流电为负载供电，或为蓄电池充电；当无交流电时，将蓄电池的电能逆变为交流电为交流负载供电。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，采用模块式（模块为 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，可提供的交流输出电压有 26V、115V、230V，其输出频率可为 50Hz 或 60~400Hz，输出功率为 30~3500VA 不等。

(5) 光伏发电逆变器。按光伏发电方式可分为：独立光伏发电系统逆变器和并网光伏发电系统逆变器。

2. 按逆变器输出的波形分

按逆变器输出的波形可分为以下几类。

(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，但其共同的特点是电路比较简单，使用的功率开关管数量少。它的设计功率一般在百瓦至千瓦之间。方波逆变器的优点是：电路简单、价格便宜、维修方便；缺点是：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。

(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，由于阶梯波逆变器有多种不同的电路结构，因此输出波形的阶梯数目差别很大。阶梯波逆变器的优点是：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。缺点是：阶梯波叠加线路使用的功率开关管数目较多，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是：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，对电感性和电容性负载适应性强，整机效率高。缺点是：电路相对复杂，对维修技术要求高，价格较高。

3. 按逆变器输出交流电能分

按逆变器输出交流电能的频率可分为：工频逆变器（工频逆变器的频率为 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兆赫兹级）。

4. 按逆变器输出的相数分

按逆变器输出的相数可分为：单相逆变器、三相逆变器和多相逆变器。

5. 按逆变器输出电能的去向分

按逆变器输出电能的去向可分为：有源逆变器和无源逆变器。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. 按逆变器主电路的形式分

按逆变器主电路的形式可分为：单端式逆变器、推挽式逆变器、半桥式逆变器和全桥式逆变器。

7. 按逆变器主开关管的类型分

按逆变器主开关管的类型可分为：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。又可将其归纳为“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，故称为“半控型”，普通晶闸管即属于这一类；“全控制”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，故称为“全控型”，电力场效应晶体管和绝缘栅双极晶体管（IGBT）等均属于这一类。

8. 按逆变器直流电源分

按逆变器直流电源可分为：电压源型逆变器（VSI）、电流源型逆变器（CSI）。由于 VSI 直流电压近似于恒定，所以输出电压为交变方波，而 CSI 直流电流也近似于恒定，因此输出电流也为交变方波。

9. 按逆变器控制方式分

按逆变器控制方式可分为：调频式（PFM）逆变器和调脉宽式（PWM）逆变器。

10. 按逆变器开关电路工作方式分

按逆变器开关电路工作方式可分为：谐振式逆变器、硬开关式逆变器和软开关式逆变器。

11. 按逆变器换流方式分

按逆变器换流方式可分为：负载换流式逆变器和自换流式逆变器。

12. 按逆变器隔离方式分

按逆变器隔离方式可分为：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的范围内，输出额定电流时，逆变器应输出的额定电压值。逆变器的输出电压稳定度表征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以下规定。

(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 $220\text{V}\pm 5\%$ ，三相 $380\text{V}\pm 5\%$ 。

(2) 高性能的逆变器应同时给出当负载由 $0\%\sim 100\%$ 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。性能良好的逆变器的电压调整率应不大于 $\pm 3\%$ ，负载调整率应不大于 $\pm 6\%$ 。

(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性应不大于 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不大于 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) 在离网太阳能光伏发电系统中均以蓄电池为储能设备，然后经过逆变器逆变成 220V 或 380V 的交流电。但是蓄电池受自身充、放电的影响，其输出电压的变化范围较大，当标称

电压为 12V 的蓄电池处于浮充电状态时，端电压可达到 13.5V，短时间过充状态可达到 15V。蓄电池带负荷放电终止时端电压可降至 10.5V 或更低。蓄电池端电压的起伏可达标称电压的 30% 左右。这就要求逆变器具有较好的调压性能，才能保证太阳能光伏发电系统以稳定的交流电压供电。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不大于 10%。由于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，会导致负载部件严重发热，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，因为频率偏差会导致用电设备的性能下降。

3. 负载功率因数

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 0.7~0.9（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，但对电感型负载（户用系统中常用负载）功率因数会下降，有时可能低于 0.5。功率因数由负载确定而不是由逆变器确定。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，光伏发电系统交流回路的视在功率增大，会导致回路电流增大，损耗必然增加，系统效率也会随之降低。

4. 额定输出电流（或额定输出容量）

额定输出电流是指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。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

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，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自身功率损耗的大小，通常以百分数表示。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会带来总发电量 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的损耗，提高整机的效率。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：千瓦级以下逆变器的额定负荷效率应不低于 85%，低负荷效率应不低于 75%；10kW 级逆变器额定负荷效率应不低于 90%，低负荷效率应不低于 80%。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。逆变器效率的高低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。例如，太阳能光伏发电系统在正常运行过程中，就会因负载故障、人员误操作及外界干扰等原因而引起的供电系统过流或短路。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) 电压保护：逆变器输入端若为蓄电池组，而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逆变器。所以控制蓄电池的充电状态是十分必要的，逆变器须有检测输入电压及过压保护电路，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，应有输出过电压的防护措施，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，逆变器应具备保护功能和故障显示功能。

(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电流的 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。另外，对无电压稳定措施的逆变器，还应有输出过电压防护措施，以使负载免受过电压的损害。

7. 启动特性

启动特性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，而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，逆变器在满载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。在逆变器正常运行时，其噪声应不超过 65dB。不经常操作、监视和维护的逆变器，应不大于 95dB；经常操作、监视和维护的逆变器，应不大于 80dB。

9. 使用环境条件

逆变器正常使用条件为海拔高度不超过 1000m，空气温度 0~+40℃。

10. 干扰与抗干扰

逆变器应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的规定。

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功能，并有输入带电、通电和故障状态的信号显示功能。

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换为交流电的装置，是太阳能光伏发电系统的核心部件。根据产品设计情况可分为太阳能光伏发电专用正弦波逆变器和经济型太阳能光伏发电控制逆变一体机。太阳能光伏发电专用正弦波逆变器基本工作框图如图 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，以及具有过压、欠压、过载、短路、输入极性反接等各种保护功能。它的逆变效率不小于 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 RS-232/485 接口，可靠性高。

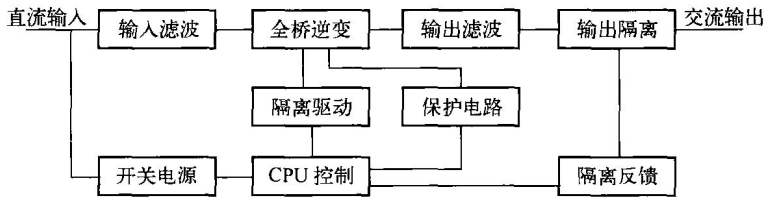


图 1-1 太阳能光伏发电专用正弦波逆变器基本工作框图

采用 TMS320C2000DSP 构成的太阳能光伏逆变器基本设计方案框图，如图 1-2 所示。

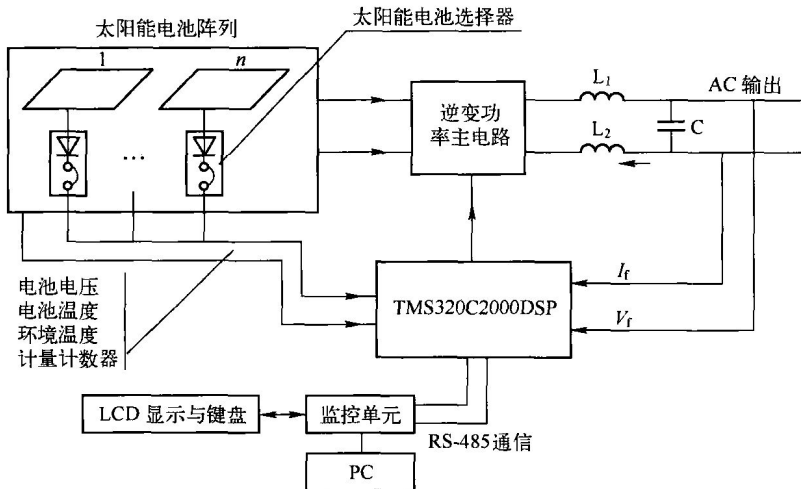


图 1-2 太阳能逆变器基本设计方案框图

TMS320C2000DSP 内核 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 TMS320C2000DSP 器件的 PWM 模块驱动, 并与片上高速 12 位 ADC 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。

TMS320C2000DSP 片上高速 12 位 ADC 可对太阳能电池电压、电池温度、环境温度与计量计数器的模拟量并行 A/D 转换。DC/DC 转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的效率。

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, 而 Boost 升压斩波器和全桥逆变器的控制由 DSP 芯片 TMS320C2000DSP 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, 实现运行过程自动控制。
- (5) 采用 LCD、LED 显示功能, 保护和报警功能齐全。
- (6) RS-232/485 通信, 实现远程数据采集和监视。

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, 负载电压 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。当阻性负载时, 负载电流 i_o 和负载电压 u_o 的波形相同, 相位也相同; 当感性负载时, i_o 滞后于 u_o , 波形也不相同, 如图 1-3 (b) 所示。

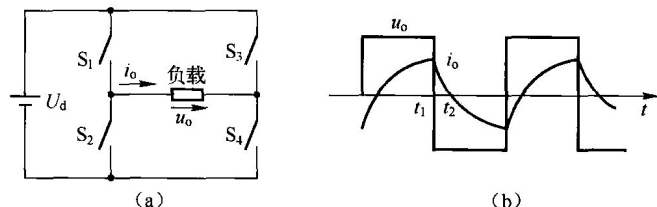


图 1-3 单相桥式逆变电路及波形

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, 在 t_1 时刻时 S_1 、 S_4 截止, S_2 、 S_3 导通, u_o 变负, 但 i_o 不能立刻反向, i_o 而是从电源负极流出, 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. 电压型逆变电路

电压型逆变电路如图 1-4 电路所示, 电压型逆变电路具有以下特点。

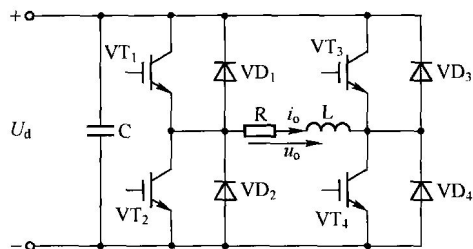


图 1-4 电压型逆变电路（全桥逆变电路）

- (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的不同而不同。
- (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。

1) 单相半桥电压型逆变电路

单相半桥电压型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两倍，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。单相半桥电压型逆变电路结构如图 1-5 (a) 所示，其工作原理为： VT_1 和 VT_2 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，感性负载时工作波形如图 1-5 (b) 所示。当 VT_1 或 VT_2 导通时， i_o 和 u_o 同方向，直流侧向负载提供能量，当 VD_1 或 VD_2 导通时， i_o 和 u_o 反向，电感中的储能向直流侧反馈， VD_1 、 VD_2 称为反馈二极管，同时还使 i_o 连续，又称续流二极管。

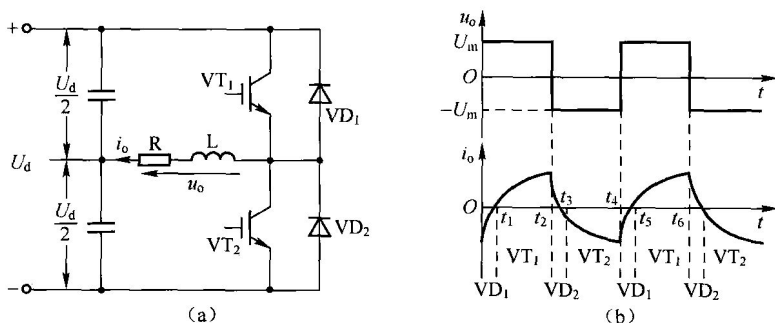


图 1-5 单相半桥电压型逆变电路及工作波形

单相半桥电压型逆变电路的优点是：电路结构简单，使用器件少；其缺点是：交流电压幅值仅为 $U_d/2$ ，直流侧需两电容器串联，要控制两电容器电压的均衡。该类型电路广泛应用于几千瓦以下的小功率逆变器，而单相全桥、三相桥式都可看成若干个半桥逆变电路的组合。

2) 电压型全桥逆变电路

电压型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两倍。这就意味着在输出相同功率的情况下，全桥逆

变器输出电流和通过开关元件的电流均为半桥逆变电路的一半，但驱动电路相对比较复杂。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，其中 VT_1 和 VT_4 为一对，而 VT_2 和 VT_3 为另一对，当成对的桥臂同时导通，交替各导通 180° 。它的 u_o 波形同图 1-5 (b) 半桥电路的 u_o ，但电压幅值高出一倍，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。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

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

基波有效值为

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

式中 U_d ——直流输入电压；

u_o ——输出电压。

当 u_o 正、负各 180° 时，要改变输出电压有效值，只能通过改变 U_d 来实现。

3) 移相调压逆变电路

移相调压逆变电路及工作波形如图 1-6 所示，图中 VT_1 和 VT_2 互补， VT_3 和 VT_4 互补。 VT_1 和 VT_2 的栅极信号为 180° 正偏， VT_3 和 VT_4 的栅极信号为 180° 反偏。

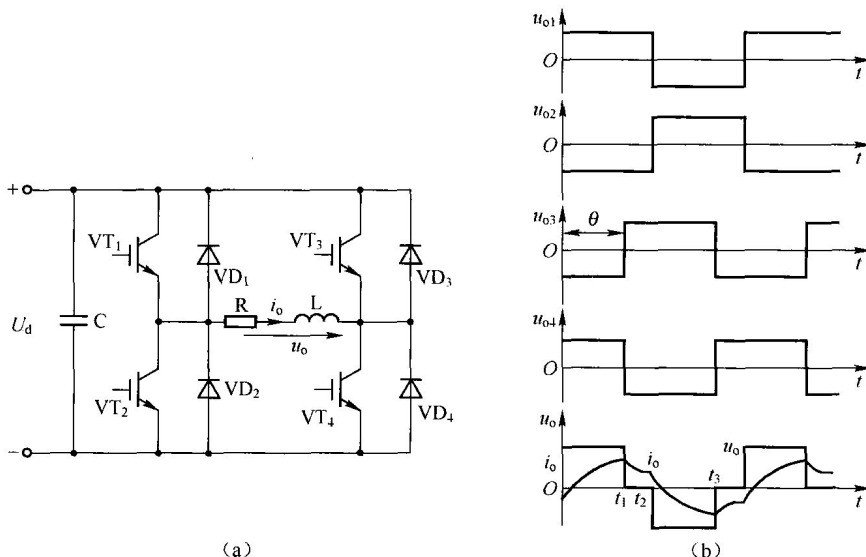


图 1-6 移相调压逆变电路及工作波形

VT_3 的栅极信号比 VT_1 落后 q ($0^\circ < q < 180^\circ$)， VT_3 、 VT_4 的栅极信号分别比 VT_2 、 VT_1 的前移 $180^\circ - q$ 。输出电压 u_o 正负各为 q 的脉冲，改变 q 即可调节输出电压的有效值。