

“十三五”普通高等教育规划教材

光伏发电技术 及其应用

第②版

魏学业 王立华 张俊红 编著



含电子课件



<http://www.cmpedu.com>



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

规划教材

光伏发电技术及其应用

第2版

魏学业 王立华 张俊红 编著



机械工业出版社

光伏逆变器是将光伏电池产生的准直流电能转换为交流电能的装置,是太阳能光伏发电系统中的核心器件。本书系统地介绍了光伏电池的基本原理、光伏逆变器的基本原理和实用实例,特别是对光伏逆变器的结构特点、转换原理、最大功率点跟踪原理、阴影下的光伏电池的发电特性进行了详细介绍。本书注重简洁的基础知识和实际应用,在表达方式上力求做到语言通俗、简洁易懂,提高研究和和使用人员的兴趣。

本书可作为高等院校自动化、电气自动化、仪器仪表等专业的教材,也可供从事相关领域的工程技术人员参考。

本书赠送电子课件,可通过 www.cmpedu.com 下载,或联系编辑索取(电话 010-88379753, QQ6142415)。

图书在版编目(CIP)数据

光伏发电技术及其应用 / 魏学业, 王立华, 张俊红编著. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2018.7

“十三五”普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-111-60482-2

I. ①光… II. ①魏… ②王… ③张… III. ①太阳能光伏发电—高等学校—教材 IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 149345 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 李馨馨 责任校对: 张艳霞

责任印制: 张 博

河北鑫兆源印刷有限公司印刷

2018 年 7 月第 2 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·16 印张·393 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-60482-2

定价: 49.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88379833

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-88379649

机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网: www.golden-book.com

前 言

太阳能光伏发电作为太阳能利用的一种有效方式，在全球得到了迅速的发展。我国政府为促进光伏发电技术的发展，出台了一系列的优惠扶持政策，并将光伏发电明确列入了国家《“十二五”可再生能源发展规划》中，因此光伏发电作为我国的朝阳产业，引起了研究者和使用者的极大兴趣。

本书立足于光伏发电系统，从应用的角度出发，介绍了光伏发电技术中的若干关键问题，并对其核心部分——光伏逆变器及相关技术进行了详细的分析和介绍，以期对研究光伏逆变器的人员提供帮助。

全书共分 10 章，以简洁和实用的表述方式，系统地介绍了光伏发电和逆变器的基础知识以及光伏发电系统中的光伏电池的发电原理和特性；详细介绍了逆变器的结构、工作原理、光伏逆变器的脉宽调制技术，以及目前流行的高频逆变器和光伏逆变器的相关技术；并全面介绍了并网发电系统中的最大功率点跟踪技术、孤岛检测技术等新技术；最后通过具体的逆变器设计实例将上述理论与实际应用相结合，力求为研究人员在逆变器的设计中提供参考。本书各章后配有习题，以便学生更好地掌握每章的知识。

本书的编写源自编者多年从事光伏发电和相关技术的研究成果及心得体会。在编写过程中，参阅了国内外大量光伏发电与逆变器技术的论文和专著，为本书的内容提供了素材和技术对照，大部分技术仿真和逆变器的实例来源于编者的一些实际项目成果。

光伏发电是一门高新热点技术，光伏逆变器技术也处于快速发展之中。限于编者自身的学识和水平，书中难免存在疏漏之处，恳请读者指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 光伏发电的发展	1
1.1.1 国外光伏发电的发展现状	2
1.1.2 我国光伏发电的发展	2
1.2 逆变器的基本知识	3
1.2.1 逆变器的基本概念	3
1.2.2 光伏逆变器的分类	3
1.2.3 光伏逆变器的参数	6
1.3 逆变器的发展现状	8
1.4 光伏发电系统	10
1.4.1 独立光伏系统	11
1.4.2 并网光伏系统	12
1.5 习题	14
第 2 章 光伏电池	15
2.1 光伏电池的分类、结构和发电原理	15
2.1.1 光伏电池的分类	15
2.1.2 光伏电池的结构	15
2.1.3 光生电流的产生过程	16
2.2 光伏效应	17
2.2.1 光伏电池的伏安曲线	17
2.2.2 电阻效应	18
2.2.3 其他效应	19
2.3 光伏电池板	20
2.4 互联效应	21
2.4.1 组件电路的设计	21
2.4.2 错配效应	22
2.4.3 串联电池的错配	23
2.4.4 旁路二极管	24
2.4.5 并联电池的错配	26
2.4.6 光伏阵列中的错配效应	27
2.5 局部阴影特性	28
2.5.1 双二极管模型	28
2.5.2 外部环境对输出特性的影响	29

2.5.3	电池连接方式对输出特性的影响	31
2.6	习题	34
第3章	光伏逆变器的结构与原理	36
3.1	光伏逆变器的结构	36
3.1.1	光伏发电系统的基本构成	36
3.1.2	光伏发电系统的运行模式	39
3.1.3	光伏逆变器的电路结构	40
3.1.4	光伏逆变器的主要技术指标	42
3.2	光伏逆变器的基本工作原理	43
3.2.1	单相逆变器	43
3.2.2	输出电压的调节方法	46
3.2.3	三相逆变器	47
3.3	习题	51
第4章	光伏逆变器的脉宽调制技术	52
4.1	PWM 的基本原理	52
4.2	PWM 方式的谐波含量评价指标	53
4.3	PWM 模式	53
4.3.1	单极性 PWM 模式	53
4.3.2	双极性 PWM 模式	54
4.4	正弦波脉宽调制技术	54
4.4.1	单相单极性 SPWM	55
4.4.2	单相双极性 SPWM	56
4.5	SPWM 实现方案	56
4.5.1	计算法和调制法	58
4.5.2	异步调制和同步调制	60
4.5.3	自然采样和规则采样法	62
4.5.4	PWM 逆变电路的谐波分析	68
4.5.5	PWM 跟踪控制技术	69
4.6	习题	73
第5章	带高频环节的光伏逆变技术	74
5.1	概述	74
5.2	高频 DC/DC 变换器	74
5.2.1	非隔离型直流电路	74
5.2.2	隔离型 DC/DC 变换器	82
5.3	后级 DC/AC 逆变器	88
5.3.1	DC/AC 逆变器的等效模型	88
5.3.2	逆变器并网控制模型	90
5.3.3	光伏逆变器的输出控制	91
5.3.4	输出滤波参数的设计	93

5.4	习题	95
第 6 章	光伏逆变器相关技术	96
6.1	软开关技术	96
6.1.1	硬、软开关方式及开关过程器件损耗	96
6.1.2	软开关电路的分类	99
6.1.3	典型的软开关电路	101
6.1.4	软开关技术的发展趋势	108
6.2	逆变器并联运行技术	109
6.2.1	逆变器并联运行控制模式	109
6.2.2	逆变器并联运行条件	112
6.2.3	逆变器并联均流控制方法	113
6.2.4	逆变器并联的环流分析与抑制	115
6.2.5	逆变器并联的同步控制	117
6.3	逆变器的多重叠加技术	118
6.3.1	移相多重叠加法	118
6.3.2	多重叠加法的基本原理	119
6.3.3	两个单相桥式逆变器的串联叠加	120
6.3.4	三个单相桥式逆变器的串联叠加	122
6.4	逆变器的多电平变换技术	124
6.4.1	二极管钳位型三电平变换	125
6.4.2	飞跨电容型多电平逆变器	126
6.4.3	级联型多电平逆变器	128
6.4.4	多电平调制策略的研究现状	130
6.5	习题	132
第 7 章	光伏逆变器的最大功率点跟踪技术	133
7.1	光伏模块的最大功率跟踪原理	133
7.1.1	影响光伏模块 MPP 的因素	133
7.1.2	MPPT 的基本原理	135
7.1.3	MPPT 的研究现状	136
7.2	传统的最大功率点跟踪技术	137
7.2.1	恒定电压法	137
7.2.2	电导增量法	138
7.2.3	扰动观测法	139
7.2.4	改进的扰动观测法	143
7.3	智能 MPPT 技术	148
7.3.1	模糊逻辑控制法	148
7.3.2	人工神经网络控制法	152
7.4	局部阴影环境下的最大功率点跟踪	156
7.4.1	局部功率点的产生原理	157

7.4.2	局部阴影条件下的 MPPT 方法	159
7.5	习题	164
第 8 章	光伏电池和光伏逆变电源的仿真技术	165
8.1	PSIM 简介	165
8.1.1	软件界面	166
8.1.2	菜单栏和工具栏 PSIM 主窗口	166
8.1.3	基本使用	172
8.2	光伏电池模型仿真	175
8.2.1	光伏电池模型	175
8.2.2	光伏模块 $I-U$ 仿真	177
8.3	最大功率点跟踪仿真	179
8.4	光伏逆变电源的仿真	182
8.5	习题	184
第 9 章	并网逆变器的孤岛效应与检测方法	185
9.1	孤岛效应的产生机理及危害	185
9.1.1	孤岛效应的定义	185
9.1.2	孤岛效应发生的机理	185
9.1.3	孤岛效应的危害	188
9.2	孤岛检测标准及发展现状	189
9.2.1	孤岛检测标准	189
9.2.2	孤岛检测方法研究现状	191
9.3	被动式孤岛检测方法	192
9.3.1	过/欠电压和高/低频率检测法	192
9.3.2	电压相位突变检测法	195
9.3.3	电压谐波检测法	197
9.4	主动式孤岛检测方法	198
9.4.1	频率偏移检测法	198
9.4.2	周期性检测法	200
9.4.3	滑膜频率漂移法	202
9.4.4	自动相位偏移法	205
9.5	习题	207
第 10 章	光伏逆变器设计实例	208
10.1	逆变器的电路结构及设计要求	208
10.1.1	逆变器的电路构成	208
10.1.2	逆变器设计的技术要求	209
10.2	离网光伏逆变器的设计	210
10.2.1	纯正弦逆变器的设计	210
10.2.2	高频直流升压电路设计	211
10.2.3	DC/AC 逆变电路设计	216

10.2.4	系统仿真和结果分析	219
10.3	并网型光伏逆变器	222
10.3.1	并网逆变器的结构和工作原理	222
10.3.2	DC/DC 级电路的 MPPT 实现	226
10.3.3	孤岛检测方法	228
10.3.4	DC/AC 的控制方案	229
10.4	微型逆变器的组成及其工作原理	232
10.4.1	微型逆变器硬件电路设计	233
10.4.2	微型逆变器的控制策略	238
10.4.3	系统仿真及实验结果分析	242
10.5	离/并网双模式逆变器	245
10.6	习题	245
	参考文献	246

第1章 绪 论

太阳能资源丰富，分布广泛，开发利用前景广阔。太阳能光伏发电作为太阳能利用的重要方式，已经得到世界各国的极大关注。近十几年来，太阳能光伏发电技术得到了突飞猛进的发展，产业规模得到了极大的扩张，光伏组件的产量和发电容量不断增加，已有许多发电站投入使用，取得了良好的经济和社会效益。在政府的推动和市场的驱动下，我国太阳能光伏产业得到了快速发展，在光伏发电技术和光伏电池的成本上均已形成一定的国际竞争力。太阳能光伏发电已成为技术可行、具备规模化发展条件的可再生能源利用方式，对合理控制能源消费总量、实现非化石能源目标起重要作用。

太阳能是地球上所有能源的源头，是动物（包括人类）和植物的生存所依赖的能源。交通运输、传统发电用的化石燃料（例如石油、煤炭）是一种来自以前地质时代的植物材料，它本质上就是储存了无数年的太阳能。人类若要将太阳能应用于交通运输、工业生产等中，一个主要的渠道就是先将太阳能转变成电能。而在地球的某个小范围内，由于下雨、云雾、树荫等存在阴影，以及地球的运转，不可能连续地接收到太阳的光能，而且光照强度也随着时间和天气在变化，因此利用太阳能发的电是断续的、慢变化的直流电能。为了能将这种能量应用于现实生产、生活中，需要将其转变成稳定的交流电能，这就需要光伏逆变器。

光伏发电（Photovoltaic, PV）是一种简易而清洁的太阳能利用方式，因为光伏电池能将入射光线直接转换成电而不会产生噪声、污染，而且发电装置牢固、可靠、寿命长久。

1.1 光伏发电的发展

18 世纪中叶的工业革命本质上是一次能源革命，此后的两百多年中，对化石燃料的大规模利用带动了人类社会历史上不曾有过的高速发展，同时也造成了环境的严重污染。然而石油和天然气资源是有限的，据测算将在四十年内耗尽，煤炭资源也将百余年内耗尽。恶劣的环境问题也促使人类不断寻找新的能源，当前能源危机和环境保护成为人类社会最紧迫的问题之一。寻找、研究新能源是解决人类发展困境的重要手段，而太阳能因其取之不尽、用之不竭，以及不受地域限制等特点，成为诸多新能源技术中的重要一种。

太阳能发电是新兴的可再生能源技术，目前已经实现产业化应用的主要是太阳能光伏发电和太阳能光热发电。太阳能光热发电通过聚光集热系统加热介质，再利用传统蒸汽发电设备发电，近年来开始建立产业化示范项目。太阳能光伏发电是利用光伏电池的光生伏特效应而进行发电的，光伏电池具有电池组件模块化、安装维护方便、使用方式灵活等特点，是太阳能光伏发电应用最主要的形式之一。光伏发电也称为太阳能光伏发电，是光伏电池将太阳的辐射能直接转换为电能的过程，它正迅猛发展并成为化石燃料发电的重要替代品。但相比于化石燃料的传统发电技术，光伏发电还是后起之秀，直到 20 世纪 50 年代，第一个实用的光伏器件才被展示出来。20 世纪 60 年代，航空航天业的应用大大地推动了光伏发电产业的

研究和发展的,目前太阳能光伏发电在全球已经实现较大规模的应用,太阳能光伏发电成为一个令人瞩目的研究领域。

光伏太阳能等新能源的开发和利用是保持经济可持续发展的重要环节,近些年来,由于常规能源成本的上升和环境污染的日益严重,以及相关技术进步和产业规模的不断扩大,光伏组件制造工艺的提高,光伏组件价格的下降 80%,转换效率达到 19.5%,太阳能光伏发电的成本也在不断下降,为太阳能光伏技术的进一步发展和广泛应用提供了必要条件。

1.1.1 国外光伏发电的发展现状

自 1839 年发现光生伏特效应和 1954 年第一块实用的光伏电池问世以来,太阳能光伏发电取得了长足的进步,但是它的发展仍然比信息技术慢得多。1973 年的石油危机和 20 世纪 90 年代以来的环境污染问题,激发了人们对光伏发电技术的研究热情,促进了太阳能光伏发电的进一步发展。随着人们对能源和环境问题认识的不断提高,光伏发电越来越受到各国政府的重视,政府的支持力度不断加大,鼓励和支持光伏产业发展的政策也不断出台。以 1997 年美国的“百万太阳能光伏屋顶计划”为标志,日本以及欧洲的德国、丹麦、意大利、英国、西班牙等国也纷纷制定了本国的可再生能源法案,刺激了光伏产业的高速发展。

美国市场需求持续旺盛。美国过去几年光伏装机量的大爆发得益于政府、公共事业的需求拉动。据测算,从 2018 年至 2020 年美国约 52GW 的新装机需求,美国市场在中长期看仍有很大的潜在发展空间。

日本市场趋于稳定。福岛核灾难后大多数核电站的关闭导致电力需求量高涨,而日本政府出台的政策及规划对光伏产业支持力度极大,同时国民环保意识提高,推动了日本光伏市场高速发展。截至 2016 年末,日本以 42.8GW 的规模成为全球第二大太阳能市场,仅次于中国大陆。

传统欧洲市场增长乏力。由于传统欧洲市场出于补贴资金等方面的考虑,欧洲各国的上网电价补贴下调较为严厉,传统欧洲市场逐渐萎缩,欧洲市场的主导地位不复存在。传统欧洲市场的新增装机量由 2012 年的 16GW 下降至 2016 年的 6.9GW 左右,其在全球市场的占比也从 55%下降至 9.2%左右。

新兴市场小年多,印度市场快速崛起。目前新兴市场中,装机规模超过 1GW 的国家和地区有 24 个,超过 10MW 规模的国家和地区有 112 个,已经制定光伏政策目标的国家有 176 个。光伏系统装机成本快速下降,越来越多的国家和地区有条件开发光伏发电,新兴市场将是接下来全球光伏新增装机的主要动力之一。为了改善电力短缺,治理国内严重的空气污染,印度的太阳能市场的需求潜力非常巨大。印度的光伏累积装机量在 2016 年底已超过 9GW。

综上所述可见,越来越多的新兴市场开始投资光伏,行业正在逐渐摆脱补贴,依靠市场驱动力增长。预计到 2020 年,中国、美国、印度以及全球新增装机将达到 75GW、22GW、25GW、151GW;中国国内复合增长率达到 21.43%,全球复合增长率达到 18.42%。

1.1.2 我国光伏发电的发展

我国作为世界经济最有活力的市场,光伏产业发展迅猛。大量规模化的光伏企业应运而生,在世界光伏产量中占有很大的比重。以下为中国太阳能的发展历史:

1958年,我国研制出了首块硅单晶。1968~1969年底,中国科学院半导体所承担了为“实践1号卫星”研制和生产硅光伏电池板的任务,为光伏电池的研究奠定了良好的基础。1969年,天津18所为东方红二号、三号、四号系列地球同步轨道卫星研制生产光伏电池阵列。1975年,宁波、开封先后成立光伏电池厂,光伏电池的应用开始从空间降落到地面。这些早期的研究和生产,主要是为空间和军事领域的应用,而没有规模化应用。

2013~2016年,中国连续4年光伏发电新增装机容量世界排名第一。2016年,新增装机容量34.54GW,同比增长126.31%,占全球新增装机总量的45.65%,累计装机容量达到77.42GW。2017年前三季度,全国光伏发电新增装机达到42GW,同比增加近60%,超过2016年全年34.54GW的装机量,其中,分布式光伏的装机量约15GW,占新增装机量的37.50%,同比增长幅度在300%以上。

1.2 逆变器的基本知识

电力电子变换电路中,将交流电经整流变换成直流的电路称为稳压电路,而将直流电能变换成交流电能的电路称为逆变电路,逆变器就是将直流电能变换为交流电能的设备。

1.2.1 逆变器的基本概念

通常,把交流电能变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桥或整流器。与之相对应,将直流电能变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器或逆变电源。通俗地讲,逆变器是一种将直流电(光伏输出、电池、蓄电池等)转化为交流电(中国为220V、50Hz的正弦波)的装置。它由逆变桥、控制逻辑和滤波电路组成。逆变器根据发电电源的不同,分为煤电逆变器、太阳能逆变器、风能逆变器、氢能逆变器和核能逆变器等,广泛适用于空调器、电视机、电动工具、计算机、洗衣机、冰箱和照明灯具等。

现代逆变技术是研究逆变电路技术和应用的一门科学技术,它是建立在电力电子技术、功率半导体器件技术、控制技术、变流技术、脉宽调制(PWM)技术等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三大部分。

1.2.2 光伏逆变器的分类

光伏逆变器是逆变器的一个重要分支,是特别为光伏发电系统设计的逆变器,符合光伏发电的标准。同时,由于光伏逆变器与光伏模块的工作连接十分紧密,通常将光伏控制器与逆变器组合成为光伏控制与逆变一体机。通常有以下几种分类方式:

1. 按功能用途分类

光伏逆变器可分为离网型(独立式)光伏逆变器和并网型光伏逆变器两大类。并网光伏系统中的逆变器,直接与公共电网相连接,具有将光伏系统产生的电能输送到电网的功能,相对于独立式逆变器,技术上要求更高、控制算法更加复杂。并网光伏逆变器的主要功能有:

- 1) 将光伏模块产生的直流电转换为符合电网标准的交流电。
- 2) 具有光伏模块最大功率点跟踪(MPPT)功能。
- 3) 具有工作状态监控和记录(数据的显示、存储和传送)功能。

4) 具有电路保护(欠电压保护、过电压保护、过电流保护、过载保护、短路保护、反接保护、防雷保护、过温保护)。

5) 具有预防孤岛效应的能力。

2. 按是否隔离分类

根据光伏模块是否与市电隔离, 并网逆变器又分为带变压器和不带变压器两大类。带变压器的称为隔离型逆变器, 又分为带工频变压器的隔离型逆变器和带高频变压器的隔离型逆变器。而不带隔离变压器的逆变器, 通常称为高频逆变器或无隔离型逆变器。带隔离变压器的逆变器, 可以使光伏模块与市电隔离, 以避免人接触光伏电池板时产生的安全隐患。图 1-1 为三种类型电路的电路结构示意图。

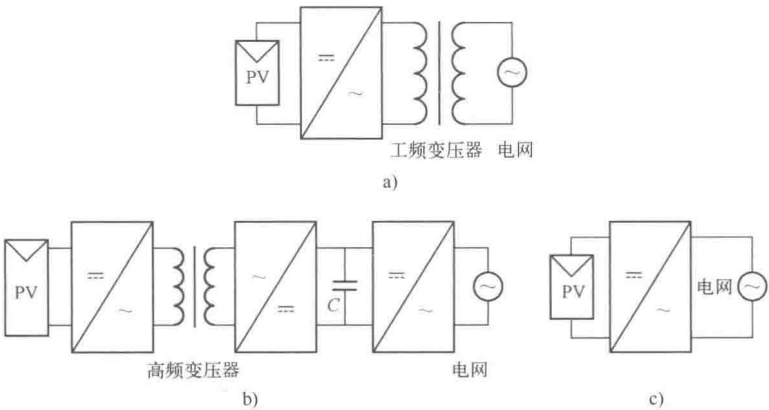


图 1-1 三种类型逆变器结构图

a) 工频隔离型 b) 高频隔离型 c) 非隔离型

3. 按输出相数分类

按输出相数分类, 光伏逆变器可以分为单相逆变器和三相逆变器。单相逆变器转换出的交流电压就是单相, 即 AC 220V; 三相逆变器转换出的交流电压就是三相, 即 AC 380V。

4. 根据逆变器使用的半导体器件类型分类

根据逆变器使用的半导体器件类型分类, 可分为晶体管逆变器、晶闸管逆变器及门极关断晶闸管逆变器等。

5. 根据逆变器电路原理分类

根据逆变器使用的半导体器件类型, 可分为自激振荡型逆变器、阶梯波叠加型逆变器和脉宽调制型逆变器等。

6. 按系统形式分类

按系统形式分类, 光伏逆变器可分为组串式、集中式以及微型逆变器三类。

组串式逆变器 (String Inverter) 是指光伏器件通过串联构成光伏阵列给光伏发电系统提供能量, 优点是可以避免并联模块因电压跌落造成系统不能工作的缺点, 组串式逆变器通常功率在 10kW 以下, 如图 1-2a 所示。

集中式逆变器 (Central Inverter) 是光伏发电系统最早采用的逆变器形式, 如图 1-2b 所示。在该系统中所有的光伏模块通过串、并联构成一个光伏阵列, 该阵列的能量通过一个逆

变器集中转换为交流电，因此称为集中式逆变器，其结构框图如图 1-3 所示。集中式逆变器的优点是输出功率可达到 MW 级，单位发电成本低，因而主要用于光伏电站等功率较大的场合。但光伏器件的这种串、并联连接方式容易带来以下缺点：

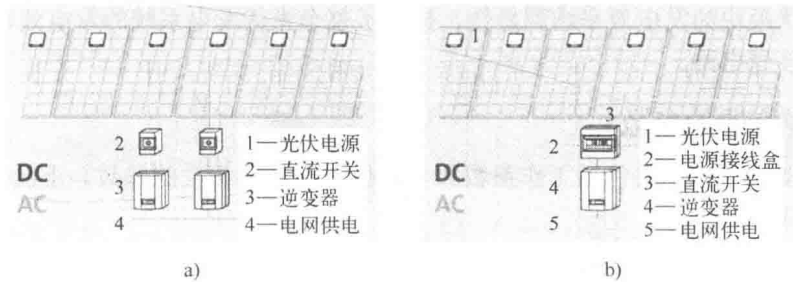


图 1-2 组串式逆变器和集中式逆变器
a) 组串式逆变器 b) 集中式逆变器

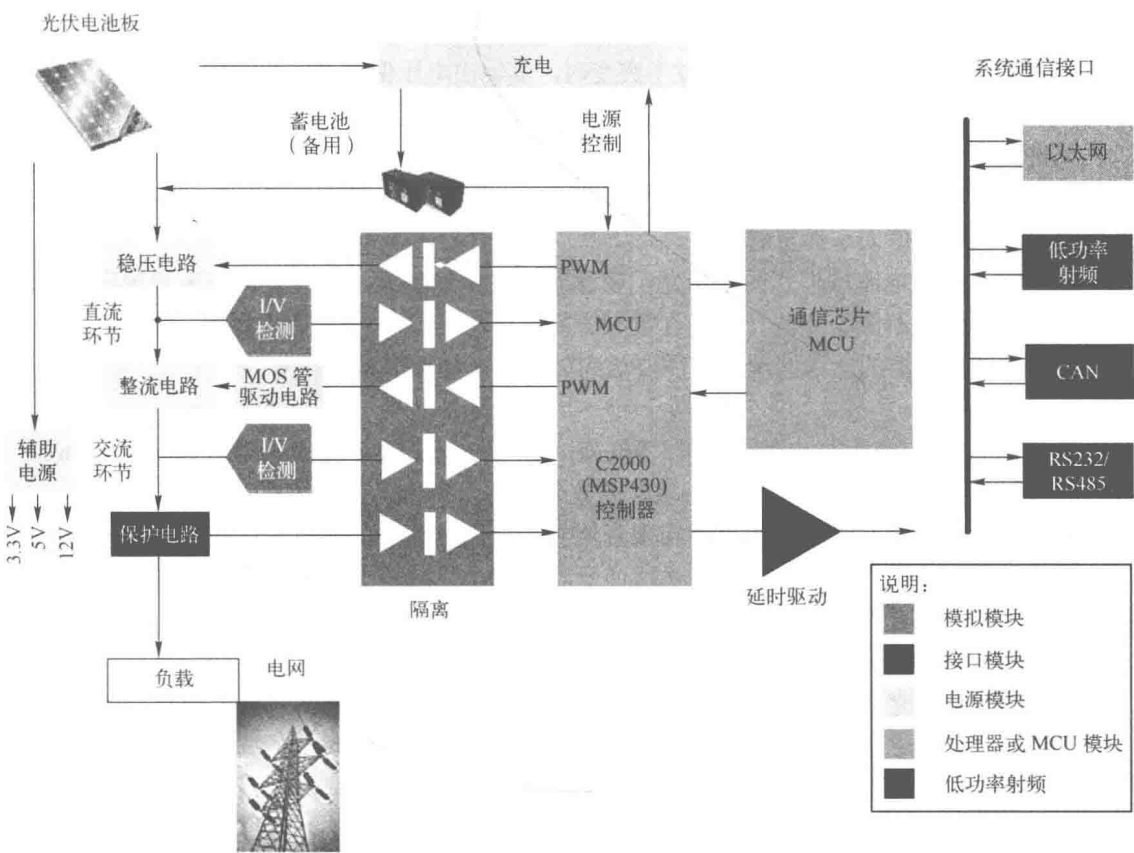


图 1-3 集中式逆变器的框图

- 1) 同一阵列中光伏器件不仅受串联模块特性的相互影响，也受并联模块之间特性的相互影响，因此会影响光伏器件的输出功率，使得该类逆变器对光伏器件的利用率低于其他方式。
- 2) 光伏阵列中某一个组件被阴影覆盖时，该组件不仅不能输出功率，还会成为系统的负载，引起该组件的发热，甚至损坏。

近年来,直接与单个光伏面板相连接的微型逆变器(Micro Inverter, MI)越来越被市场所接受。每个微型逆变器与光伏阵列中的单一一块光伏模块相连,使得最大功率点跟踪可以在单个光伏模块的层次完成,使得阴影效应等影响光伏面板效率的问题得到最大程度的减弱,使每块光伏模块的发电效率达到最佳,提高了整个光伏发电系统的发电效率。图 1-4 为微型逆变器的典型电路。

1.2.3 光伏逆变器的参数

光伏逆变器的参数主要包括工作参数和与光伏发电功能相关的参数。下面介绍一些比较重要的参数及其意义。

1. 输出电压的稳定度

在光伏系统中,光伏电池发出的电能先由蓄电池储存起来,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,如标称电压为 12V 的蓄电池,其电压值可在 10.8~14.4V 之间变动(超出这个范围可能对蓄电池造成损坏)。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 $\pm 10\%$ 。

2. 总谐波畸变率

总谐波畸变率(Total Harmonic Distortion, THD)是指全部谐波分量有效值与基波分量有效值之比,用百分数表示。THD 一般指的是以 2 次到 39 次谐波总量与基波的百分比,再高次的谐波因绝对值太小而忽略不计。

电网中电压和电流最理想的波形是正弦波。谐波含量越大,总谐波畸变率就越高,电压或电流的波形就越不像正弦波。谐波含量大容易损坏电器设备,也使得电磁干扰更为严重,因而光伏并网逆变器的总谐波畸变率需要达到国家规定的标准。

3. 功率因数

交流电路中,电压与电流之间的相位差(φ)的余弦叫作功率因数(Power Factor, PF),用符号 $\cos \varphi$ 表示。在数值上,功率因数是有功功率和视在功率的比值。

由于光伏逆变器是通过开关电路实现直流到交流的转换的,所以光伏逆变器的输出中存在有功功率和无功功率,因此在设计光伏逆变器时应尽量减少无功功率,从而提高光伏逆变器的功率因数。

4. 逆变器的效率

逆变器的效率是指在规定的工作条件下,其输出功率与输入功率之比,用百分数表示,一般情况下,光伏逆变器的标称效率是指纯阻性负载时,在 80% 负载情况下的效率。由于光伏电池的成本较高,因此应该最大限度地提高光伏逆变器的效率,降低系统成本,提高光伏系统的性价比。目前主流逆变器标称效率在 80%~95% 之间,对小功率逆变器要求其效率不低于 85%。在光伏系统实际设计过程中,不但要选择高效率的逆变器,同时还应通过系统合理配置,尽量使光伏系统负载工作在最佳效率点附近。

5. 额定输出电流

额定输出电流表示在规定的负载功率因数范围内逆变器的额定输出电流。有些逆变器产品给出的是额定输出容量,其单位以 $V \cdot A$ 或 $kV \cdot A$ 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。

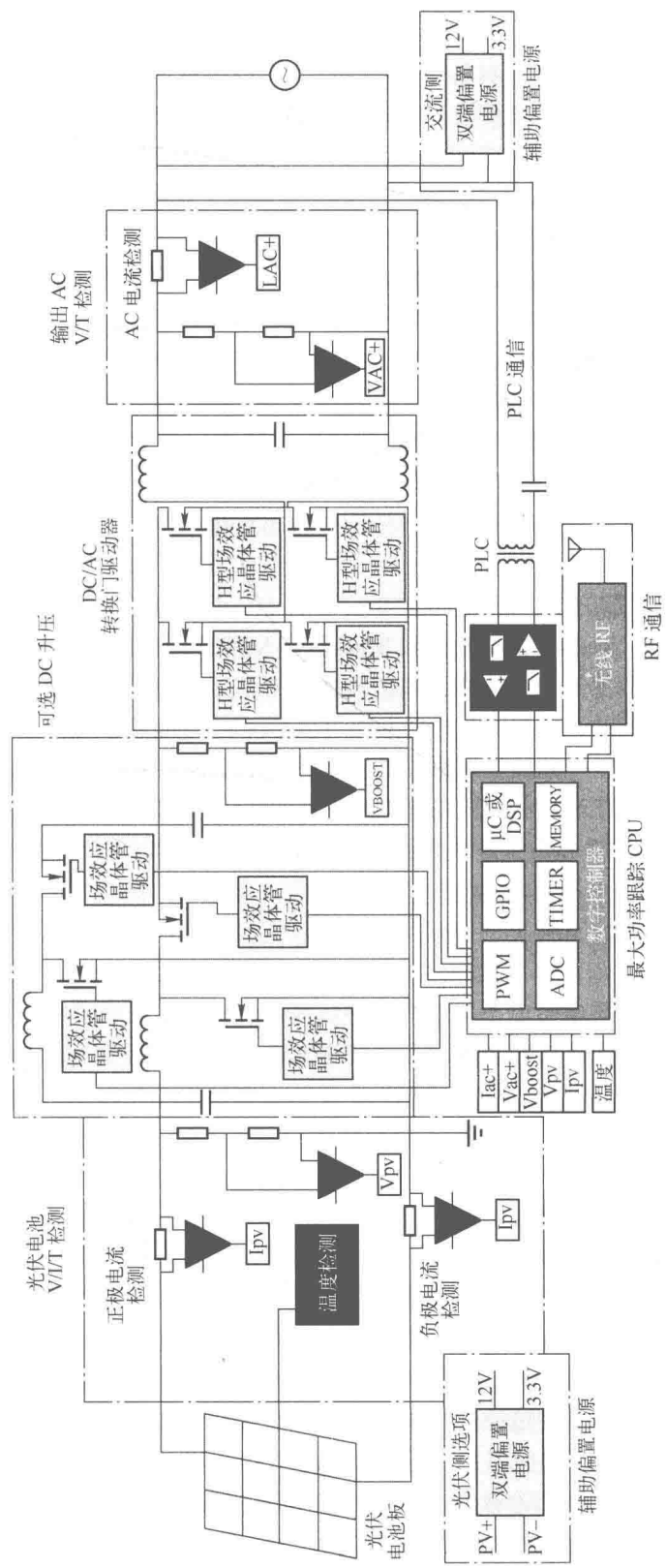


图 1-4 微型逆变器的典型电路图

6. 保护措施

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。

1) 输入欠电压保护。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。

2) 输入过电压保护。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。

3) 过电流保护。逆变器的过电流保护，应能保证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。

4) 输出短路保护。逆变器短路保护动作时间应不超过 0.5s。

5) 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。

6) 防雷保护。逆变器应有防雷保护。

7) 过温保护等。

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. 最大功率点跟踪

最大功率点跟踪 (Maxim Power Point Tracking, MPPT) 是通过寻找光伏模块输出功率最大时对应的电压值，使得光伏模块在最高的转换效率下工作。由于太阳光照射到地球表面的光强度是随时间而变动的，所以光伏电池板产生的功率是变化的。要使光伏电池板发电效率最大化，就必须不断地变化光伏电池板的输出电压，从而找到其峰值功率点。

涉及 MPPT 的参数有 MPPT 电压范围和 MPPT 精度，MPPT 电压范围指 MPPT 系统可以扫描的电压范围区间，MPPT 精度指最大功率点的准确程度。

1.3 逆变器的发展现状

逆变器的发展始终与电力电子、功率器件以及控制技术的发展紧密结合在一起，器件的发展带动着逆变器的发展，控制技术的发展使逆变器的技术指标和各项性能不断提高。逆变器出现于电力电子技术飞速发展的 20 世纪 60 年代，以及到现在为止的单片机和数字信号处理器 (DSP) 时代。

1. 逆变器技术发展历程

1) 20 世纪 50~60 年代，晶闸管 (SCR) 的诞生为正弦波逆变器的发展创造了有利条件，KACO 公司于 1953 年制造出第一个半导体闸流管逆变器。

2) 20 世纪 70 年代，GTO (门极关断晶闸管) 的问世使得逆变技术得到发展和应用。

3) 20 世纪 80 年代，功率场效应晶体管 (MOS)、绝缘栅双极晶体管、MOS 控制晶闸管 (MCT) 及静电感应功率器件的诞生为逆变器向大容量方向发展奠定了基础。

4) 20 世纪 90 年代，矢量控制技术、多电平变换技术、重复技术、模糊逻辑控制技术等逆变器领域得到了很好的应用。

5) 21 世纪初，逆变技术随着电力电子技术、微电子技术和现代控制理论的进步不断改进，逆变技术正向着频率更高、体积更小的方向发展。在功率方面，出现了两个发展方向：一个是向着大功率逆变器方向发展，另一个是向着微型逆变器方向发展。