

“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

机械工业出版社



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](http://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：

印刷（ 装订）

2018 年 7 月第 2 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·16 印张·393 千字

0001— 册

标准书号：ISBN 978-7-111-60482-2

定价： 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](http://www.cmpbook.com)

机工官博：[weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

读者购书热线：010-88379649

教育服务网：[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

封面无防伪标均为盗版

金书网：[www.golden-book.com](http://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研究人员提供帮助。

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
<b>第 3 章</b>	<b>光伏逆变器的结构与原理</b>	<b>36</b>
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
<b>第 4 章</b>	<b>光伏逆变器的脉宽调制技术</b>	<b>52</b>
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	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
<b>第 5 章</b>	<b>带高频环节的光伏逆变技术</b>	<b>74</b>
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
<b>第6章</b>	<b>光伏逆变器相关技术</b>	<b>96</b>
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
<b>第7章</b>	<b>光伏逆变器的最大功率点跟踪技术</b>	<b>133</b>
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
<b>第 8 章</b>	<b>光伏电池和光伏逆变电源的仿真技术</b>	<b>165</b>
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
<b>第 9 章</b>	<b>并网逆变器的孤岛效应与检测方法</b>	<b>185</b>
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
<b>第 10 章</b>	<b>光伏逆变器设计实例</b>	<b>208</b>
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

机械工业出版社

# 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，煤炭资源也将在百余年内耗尽。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，它正迅猛地发展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，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。

新兴市场小而多，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。

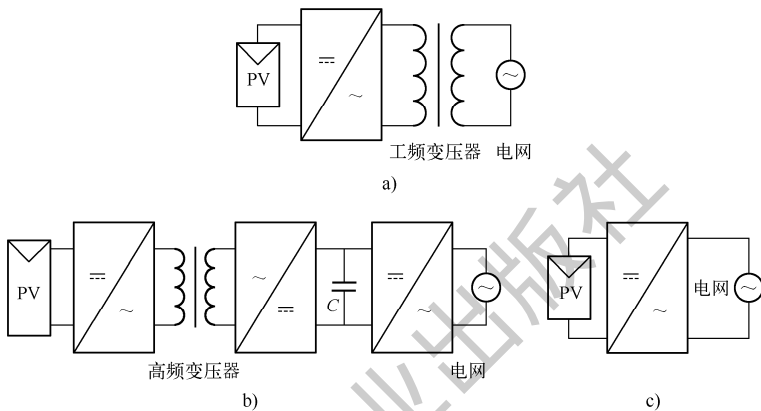


图 1-1 三种类型逆变器结构图

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：

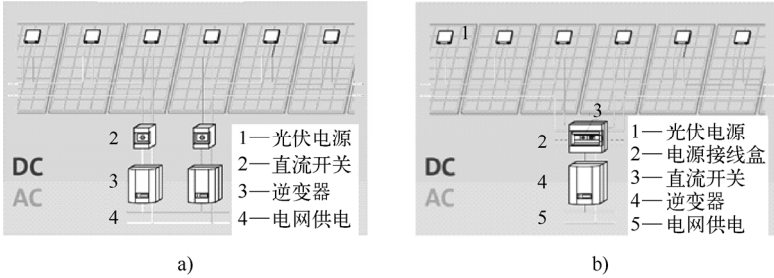


图 1-2 组串式逆变器和集中式逆变器  
a) 组串式逆变器 b) 集中式逆变器

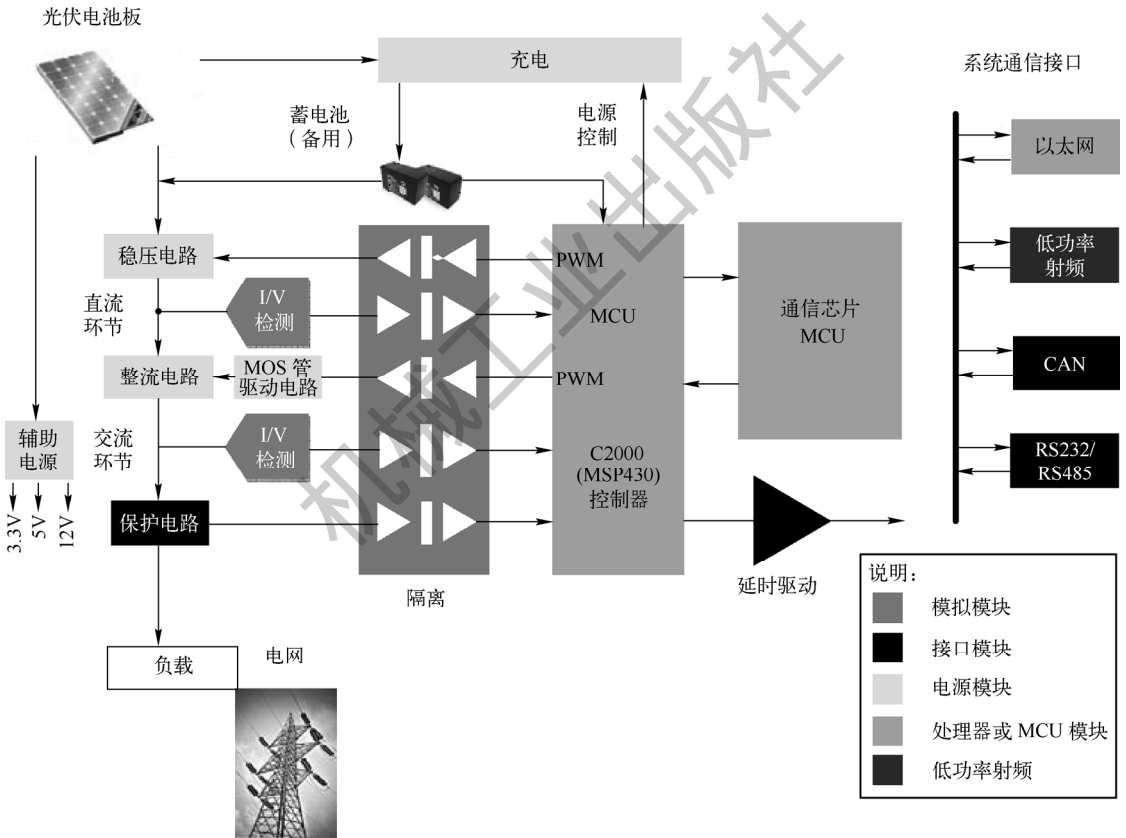


图 1-3 集中式逆变器的框图

- 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( $\varphi$ )的余弦叫作功率因数(Power Factor, PF),用符号  $\cos \varphi$  表示。在数值上,功率因数是有效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。

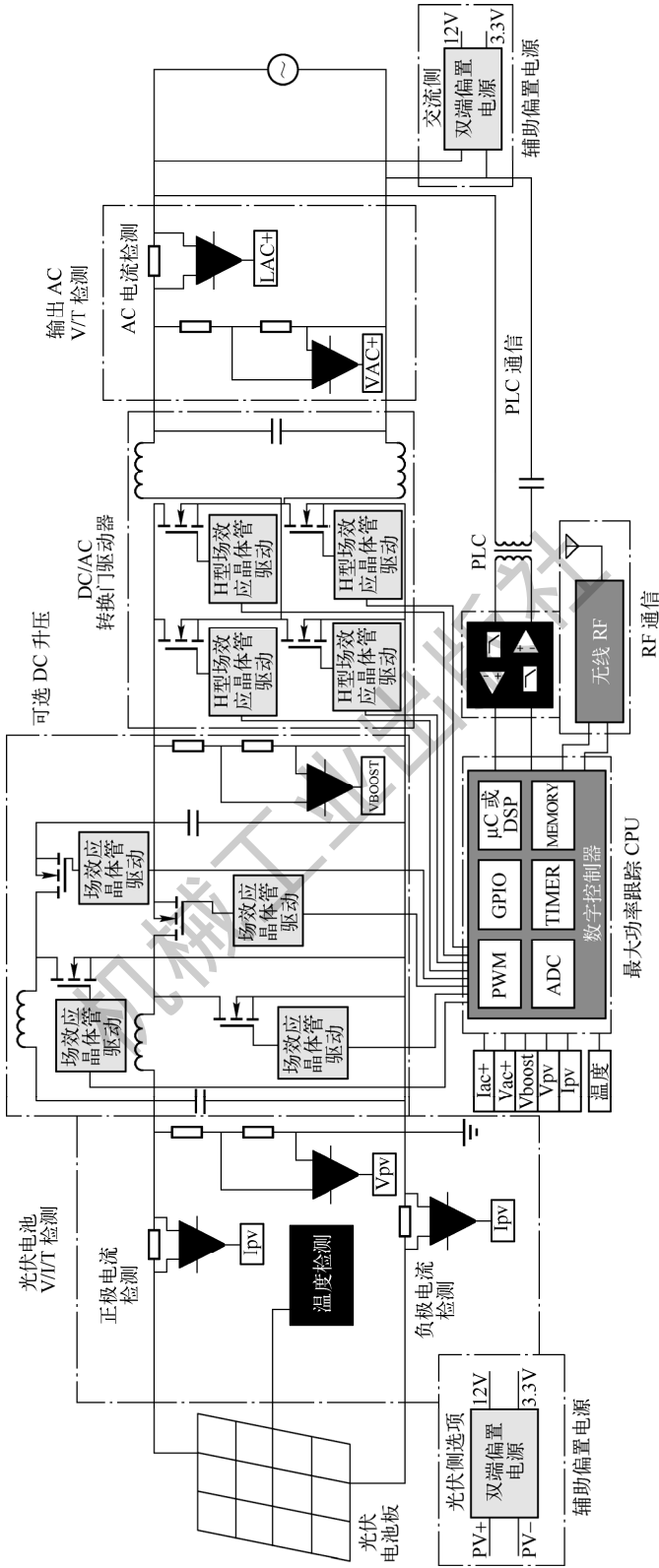


图 1-4 微型逆变器的典型电路图

## 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在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。

## 2. 光伏逆变器的发展状况

光伏组件产生的电能为准直流电，必须通过将直流变换成交流的设备——逆变器，才能实现将太阳能光伏产生的电能接入公共电网和供给负载。根据所发电力是否馈入电网，光伏逆变器分为并网逆变器和离网逆变器。一般并网系统的逆变器功率与光伏系统的功率一致，而离网系统的逆变器功率由负载决定。对于利用太阳能进行大规模发电来说，必须并网才能实现电能的远距离传输，并网逆变器的重要性也就不言而喻。目前，并网光伏系统占光伏总安装量的比例越来越大，而并网逆变器的技术指标也代表了光伏逆变器的技术水平。逆变器的功率正朝着功率越来越高和微型化两个方向发展效率则向着更高方向发展。

光伏逆变器总趋势是朝着高频化、小型化发展。为了得到更高的效率，采用无变压器拓扑的趋势已逐渐成为主流。对于一些必须采用变压器或阵列接地等标准的国家而言，需要对标准进行修改，以满足无变压器逆变器市场发展的需要。未来最具发展前景的是微型逆变器。在日照不均、光伏组件多样化、安装条件复杂等情况下，微型逆变器具有广阔市场空间，可以实现模块化、分布式模式发电。

对于光伏逆变器来讲，提高电源的转换效率是一个永恒的主题，但是当系统的效率越来越高，几乎接近 100%时，效率的进一步改善会伴随着性价比的降低，因此，如何保持一个很高的效率，又能维持很好的价格竞争力将是当前的重要课题。与努力改善逆变器的效率相比，如何提高整个逆变系统的效率，正逐渐成为光伏系统的另一个重要课题。在一个光伏阵列中，当局部 2%~3%的面积阴影出现时，系统输出电力甚至会出现 20%左右的功率下降。为了更好地适应天气等变化的状况，针对单一或部分光伏组件，采用一对一的 MPPT 或多个 MPPT 控制功能是十分有效的解决方法。

当逆变系统处于并网运行时，系统对地漏电会造成严重的安全问题；同时，为了提高系统的效率，光伏阵列大多会被串联成很高的直流输出电压使用，因此，当电极间有异常状况发生时，很容易产生直流电弧，由于直流电压很高，导致灭弧困难，在这种情况下极易造成火灾。随着光伏逆变系统的广泛采用，系统安全性的问题也将是逆变技术需要研究的重要内容。

此外，电力系统正在进入智能电网技术的快速发展和普及阶段。大量的太阳能等新能源电力系统的并网，给智能电网系统的稳定性提出了新的技术挑战。设计出能够更加快速、准确、智能化地兼容智能电网的逆变系统，将成为今后光伏逆变系统的必要条件。

总体来说，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发展而发展。随着时间的推移，逆变技术正向着频率更高、功率更大、效率更高、体积更小的方向发展。

## 3. 光伏逆变器的市场竞争激烈

由于目前光伏逆变器市场发展迅速，竞争也异常激烈。最早起家的德国 SMA 公司虽然目前仍然是世界排名第一的光伏逆变器厂商，但其市场份额却在不断缩小，已经从几年前的 40%缩小到现在的 30%左右。国内最大的光伏逆变器厂商合肥阳光电源成立于 1997 年，其国内市场份额在 2008 年曾一度高达 70%，但现在其国内市场份额不到 40%。尽管如此，我国的光伏市场规模仍然很小，我国的光伏逆变器厂商的发展空间十分广阔。2011 年，我国国内光伏逆变器市场份额前十的厂商，总共占据了 80%的市场份额，这其中只有一家外国厂商。光伏逆变器生产由于不需要复杂、庞大、昂贵的装配生产设备，固定资产投资小，上游元器件供给充足，品质高的逆变器的供应商又少，因此整机毛利率在 35%~40%。随着我国

光伏发电规模的快速加大，预计毛利率会有所下降，但这更有利于电力平价上网，尽快打开光伏发电市场。

光伏逆变器产品在技术方面，国外仍然处于领先地位。但是这种现象必然会随着我国产品技术的进一步提高而有所改变。目前国内生产逆变器的厂商主要有合肥阳光电源有限公司（专业生产离网/并网光伏及风力发电逆变器）、北京索英电气技术有限公司（回馈电源及逆变器）、北京科诺伟业科技有限公司（系统集成及逆变器）、广东志诚冠军集团有限公司（UPS 为主）、北京日佳电源有限公司（小功率为主）、南京冠亚电源设备有限公司（控制逆变为主）等企业。表 1-1 是国内外逆变器的技术对比情况。

表 1-1 国内外逆变器技术对比

技术指标	国外	国内
并网逆变器	商业化	商业化
并网/独立双功能	商业化	商业化
逆变效率	85%~98%	85%~98%
高频逆变	商业化、可靠、耐冲击	小功率可以批量生产，以离网为主
模块化生产	1~5kW，要求大功率时可并机，有利于标准化批量生产	大功率产品实现模块化生产，可以并机运行，离网产品成熟
双向逆变	成熟，一组功率模块，既可以用于逆变，又可用于整流充电	仅有少数几家公司可以生产

#### 4. 全球逆变器市场发展趋势

据 GTM Research 发布的 2017 全球光伏逆变器榜单中，全球前十大逆变器企业分别为：华为（26.4%）、阳光电源（16.7%）、SMA（8.7%）、ABB（5.6%）、上能（4.6%）、特变电工（3.9%）、PowerElectronics（2.9%）、三菱电机（2.8%）、施耐德（2.6%）、SolarEdge（2.5%）。

2017 年全球逆变器市场规模为 98.563GW，同比增长 23%。根据统计，2017 年有 20 家企业光伏逆变器出货量超过 1GW，这 20 家企业的总出货量占据了全球 93% 的市场份额，是自 2010 年以来的最高水平。

2015-2017 三年里，全球前四大光伏逆变器企业排行保持不变，而华为自 2015 年以来已经连续三年位居全球第一。

2017 年全球三相组串逆变器出货量为 46.233GW，同比增长 49%。2017 年集中式逆变器出货量为 42.382GW，组串式逆变器出货量为 4GW。

组串式逆变器由于多路 MPPT 优势带来的发电量高、适应复杂环境、可靠性高、维护成本低等，使其在大型光伏电站中占有优势。

## 1.4 光伏发电系统

一个完整的光伏发电系统由多个部分组成，主要包括光伏面板或光伏阵列、逆变器，同时还包括诸如跟踪支架、控制器等组件以及电网。一个典型的光伏发电系统如图 1-5 所示。光伏发电系统需要对光伏面板的工作状态进行监测、控制，并且对光伏面板的输出电能进行

有效利用。目前广泛应用的光伏发电系统的形式主要分为独立（离网）光伏系统和并网光伏系统两种。光伏发电系统根据是否与其他发电系统或电网连接可分为单机系统和电网连接系统；单机系统又包括三大类：无存储装置、有存储装置和混合发电系统。电网连接系统包括直接与公共电网连接的系统和通过内部电网连接到公共电网的系统。光伏发电系统的具体分类如图 1-6 所示。

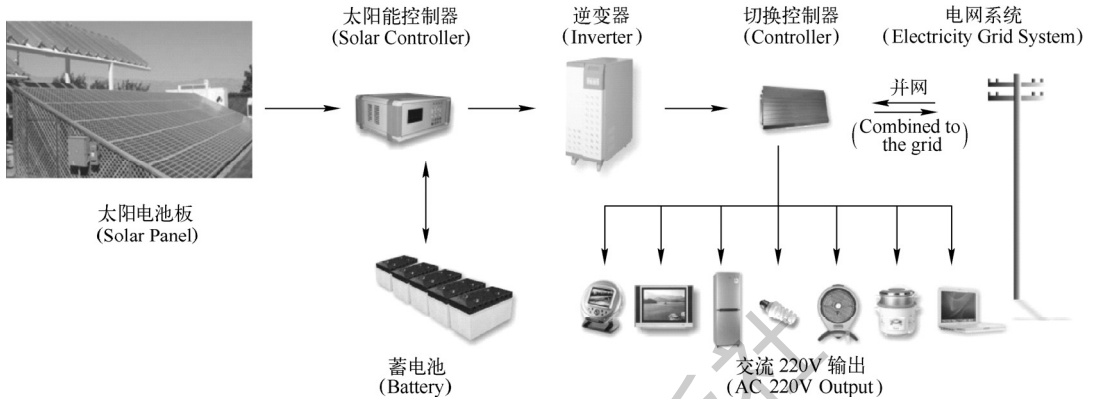


图 1-5 典型的光伏发电系统

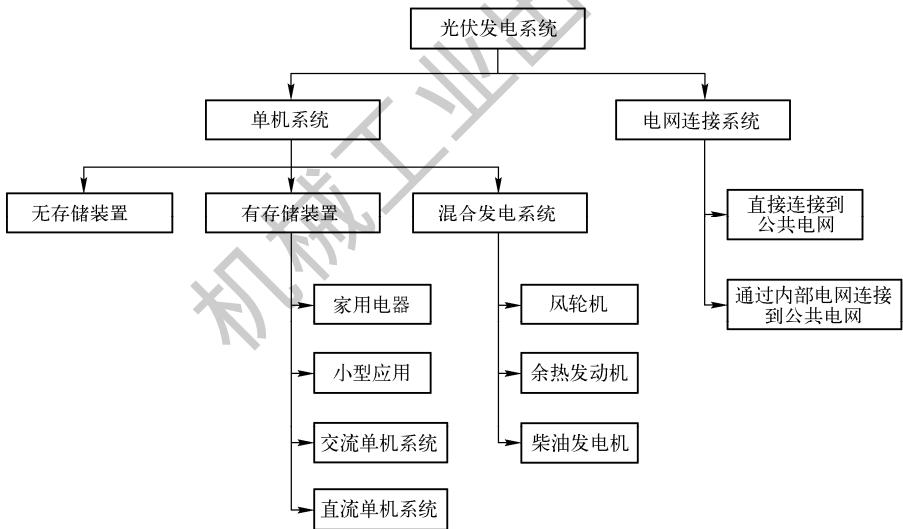


图 1-6 光伏发电系统的具体分类

### 1.4.1 独立光伏系统

独立光伏系统（stand-alone PV system）不与公共电网相连，只满足小范围的电力需求，特别适用于电网难以覆盖的偏远地区，以及通信基站、太阳能照明系统等需要灵活部署或者需要持续供电保障的场合。蓄电池将日照充足时发出的剩余电能储存起来，供日照不足或没有日照时使用。为了延长蓄电池的寿命，直流控制中应具有一个调节和保护环节来控制蓄电池的充放电的速率和深度。蓄电池的充放电控制是独立光伏系统的重要内容。图 1-7 所示是

一个典型的独立光伏系统，主要由光伏电池板、充/放电控制器、电能存储装置（蓄电池）和逆变器等组成，下面对各个组成部分进行详细的介绍。

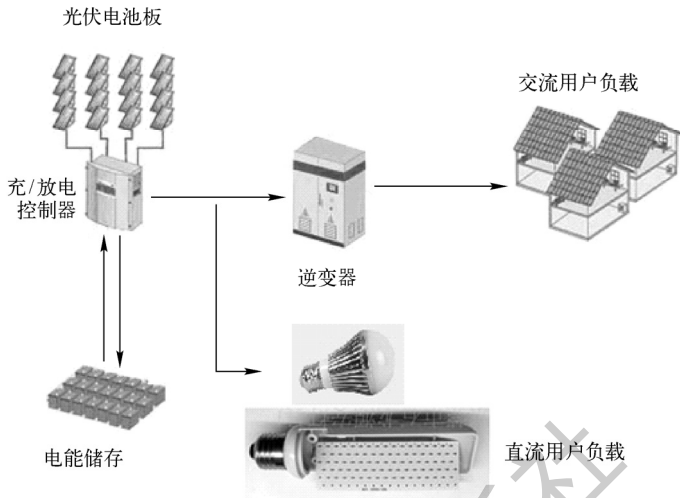


图 1-7 典型的独立光伏系统

## 1. 光伏电池板

一块电池板由许多互相连接的电池（通常为 36 块串联的电池）组成，把互相连接的电池封装起来的主要原因是为了保护电池及其连接线不受周围环境的破坏。由于光伏电池非常薄，在缺乏保护的情况下很容易受到机械损伤。此外，电池表面的金属网格以及连接每个电池的金属线都有可能受到水或水蒸气的腐蚀，通过封装就能阻止损坏的发生。比如，非晶硅光伏电池通常被封装在柔软的板块内，而在偏远地区使用的晶体硅光伏电池则通常保护在刚硬的玻璃封装内，一般规定的硅光伏电池板的使用寿命为 20 年以上，组件封装可使其可靠性大大提高。

## 2. 充/放电控制器

充/放电控制器的作用是将光伏电池板产生的电能存储到蓄电池中，在用户需要电能的时候，将蓄电池中的电能释放出来供用户使用，充/放电控制器在充电、放电过程中还要对蓄电池起保护作用。

## 3. 电能储存装置

电能储存用来储存光伏电池产生的能量，目前主要的储存方式有铅酸蓄电池、锂电池和大容量电容器等。

## 4. 逆变器（在需要提供交流电压的情况下）

由于目前的用电设备，如普通照明用的电灯、计算机等都是 220V 的交流电，机床、水泵等都是 380V 的交流电，为了使光伏发电产生的电能够用于日常生活和工农业生产，还需要将其产生的直流电能转换为交流电能，这就需要逆变器来完成。

### 1.4.2 并网光伏系统

并网光伏系统是指与公共电网相连的光伏发电系统，主要有大型光伏电站和分布式光伏

发电系统两种形式。并网光伏系统产生的电能可以馈送至电网，使光伏发电成为能源供应中的重要组成部分。大型光伏电站通常设立在偏远空旷山区或沙漠地区，而分布式光伏系统则是分散安装在城市建筑物的墙壁或屋顶上。典型的并网光伏系统如图 1-8 所示。

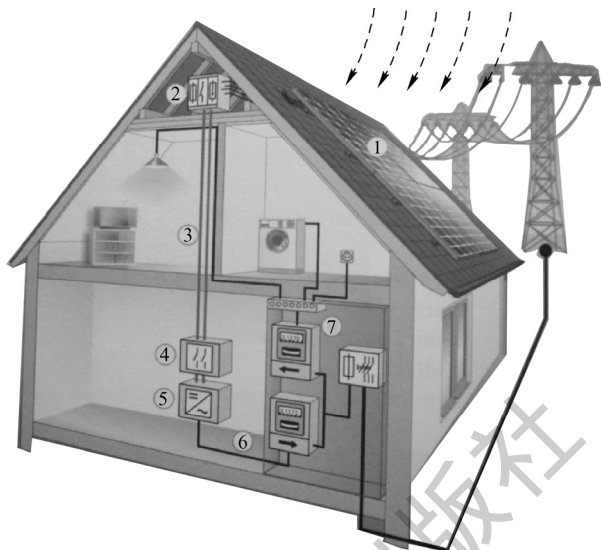


图 1-8 典型的并网光伏系统

- 1—光伏阵列 2—汇流箱 3—直流电缆 4—直流配电柜  
5—逆变器 6—交流电缆 7—交流配电柜及供、输电表和电气连接

并网光伏发电系统由光伏阵列、汇流箱、逆变器和交、直流配电柜等组成，各部分的功能如下。

### 1. 汇流箱

在光伏发电系统中，数量庞大的光伏电池组件进行串并组合达到需要的电压电流值，以使发电效率达到最佳。光伏汇流箱的主要作用就是对光伏电池阵列的输入进行一级汇流，用于减少光伏电池阵列接入到逆变器的连线，优化系统结构，提高可靠性和可维护性。在提供汇流防雷功能的同时，还监测光伏电池板的运行状态、汇流后的电流、电压和功率、防雷器状态、直流断路器状态、继电器接点的输出等。

### 2. 交、直流配电柜

交、直流配电柜包含直流配电单元和交流配电单元，直流配电单元提供直流输入、输出接口，主要是将光伏组件输入的直流电源进行汇流后接入逆变器或直接供给其他直流负载（如蓄电池、充电电源等）；交流配电单元主要通过本柜给逆变器提供并网接口，配置输出交流断路器直接供交流负载使用，另外还含有（市电或发电机）网侧断路器、光伏防雷模块、逆变器输出计量电度表（可带 RS485 接口）和交流电网侧配置电压电流表等测量仪表，方便系统管理。

并网光伏系统与离网光伏系统在结构上的差别不是很大，其主要差别体现在技术实现上，并网光伏系统除了要具有独立光伏系统的功能外，还要考虑并网的相关标准和要求，具体会在以后章节中介绍。

## 1.5 习题

1. 什么是光伏逆变器？
2. 按系统分，光伏逆变器有几种形式？
3. 光伏逆变器的主要参数有哪些？
4. 画出光伏逆变器的组成结构。
5. 独立光伏系统和并网光伏系统有什么区别？

机械工业出版社

## 第2章 光伏电池

光伏电池实际上是一个 PN 结，PN 结在光照下产生电动势的现象称为光生伏特效应。当光照射到 PN 结上时，PN 结受光激发而产生电子—空穴对，从而产生势垒电场，空穴在势垒电场的作用下向 P 区移动，而电子则向 N 区移动，这样就在 PN 结附近形成与势垒电场相反的光生电动势。光生电动势的一部分抵消势垒电场，另一部分使 P 区带正电，N 区带负电，从而在 P 区与 N 区之间产生光生伏特效应。这就是光伏电池的最小单元。

### 2.1 光伏电池的分类、结构和发电原理

在光伏发电系统中，实现光电转换的最小单元是光伏电池单体（solar cell）。光伏电池的基本特性和二极管类似，但它的单体一般不作为电源使用。通常，光伏电池串联（通常是 36 个单体串联）后组成光伏模块，然后再将模块进行串、并联组成光伏阵列进行发电。光伏电池单体的开路电压和短路电流都较小，但光伏模块和光伏阵列可以通过串、并联使输出达到较高值，并可输出较大功率的能量。

#### 2.1.1 光伏电池的分类

光伏电池是由半导体材料制造的，图 2-1 中是对常见光伏电池种类的总结。

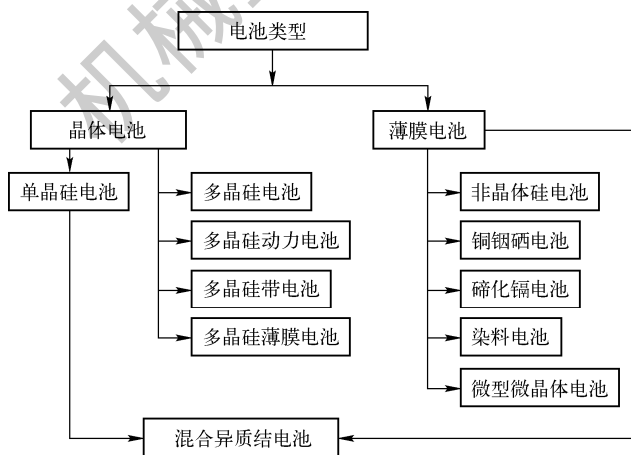


图 2-1 常见光伏电池种类

#### 2.1.2 光伏电池的结构

光伏电池是一种能直接把太阳的光照直接转化为电能的半导体器件，它受光照射后就会

产生电流和电压。这个过程的发生需要两个条件：

1) 太阳光的照射，把低能级的电子激发到了高能级。

2) 处于高能级的电子，从电池内部移动到外部电路中，然后经过负载后又回到了电池内部中。图 2-2 展示了能实现这种功能的光伏电池封装结构图。

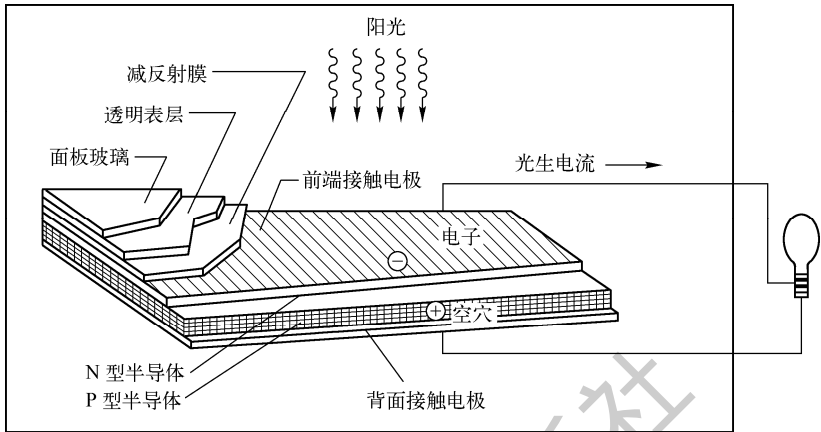


图 2-2 光伏电池封装结构图

光伏电池工作的基本步骤是：①通过光照射后，产生光生载流子；②大量的光生载流子聚集成光生电流；③产生跨越光伏电池的高电压；④光生电流在电压的驱动下，穿过外电路然后再回到光伏电池中。

### 2.1.3 光生电流的产生过程

光伏电池在光照下产生的电流叫作“光生电流”，它的产生包括了两个主要的过程：

#### 1. 产生电子—空穴对的过程

电子—空穴对只能由能量大于光伏电池禁带宽度的光子激发而产生，由于P型材料中的电子和N型材料中的空穴是处在亚稳定状态的，在复合之前其平均生存时间等于少数载流子的寿命。如果载流子被复合了，光生电子—空穴对将消失，也产生不了电流。

#### 2. PN 结对光生载流子收集的过程

PN 结对光生载流子收集的过程实际上就是把电子和空穴分散到不同的区域，阻止了它们的复合，PN 结是通过其内建电场的作用把载流子分开的。如果光生少数载流子到达PN结，将会被内建电场移到另一个区，便成了多数载流子。如果用一根导线把P区跟N区连接在一起（使电池短路），光生载流子将流到外部电路。

图 2-3 展示了外部连接方式。外接负载情况下电子和空穴在PN结中流动，少数载流子不能穿过半导体和金属之间的界限，如果要阻止复合并对电流有贡献的话，必须通过PN结收集。

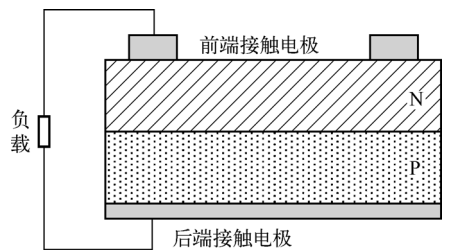


图 2-3 外部连接方式

## 2.2 光伏效应

如果产生了电能，则必定同时产生了电压和电流。在光伏电池中，电压是由“光生伏特效应”产生的。PN 结对光生载流子的收集引起了电子穿过电场移向 N 型区，而空穴则穿过电场移向 P 型区。在电池外接电路短路的情况下，将不会出现电荷的聚集，因为载流子都参与了光生电流的流动。

### 2.2.1 光伏电池的伏安曲线

光伏电池的伏安曲线是二极管在黑暗时的伏安曲线与光生电流的叠加，用光照射电池并加上二极管的暗电流，则二极管的方程为

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{qU}{nkT}\right) - 1 \right] - I_L \quad (2-1)$$

式中， $n$  为二极管的理想系数； $k$  为波尔兹曼常数； $T$  为绝对温度； $q$  为单位电荷量； $I_0$  为二极管反向饱和电流； $I_L$  为光生电流。

则伏安曲线方程为

$$I' = -I = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{qU}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2-2)$$

下面讨论用于描述光伏电池特性的重要参数。短路电流 ( $I_{SC}$ ) 和开路电压 ( $U_{OC}$ ) 以及功率 ( $P$ ) 与开路电压 ( $U_{OC}$ ) 之间的关系，如图 2-4 所示。

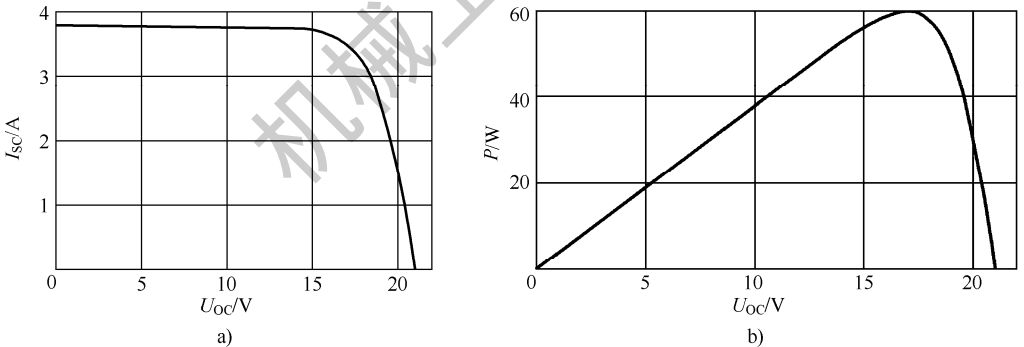


图 2-4 光伏电池特性

a)  $I_{SC}$  与  $U_{OC}$  的关系 b)  $P$  与  $U_{OC}$  的关系

#### 1. 短路电流

短路电流是指当光伏电池的电压为零时，即 P、N 结外电路短路时流过电池的电流，通常记作  $I_{SC}$ 。对于理想的光伏电池来说，短路电流等于光生电流，因此短路电流是光伏电池输出的最大电流。短路电流的大小取决于以下几个因素：

- 1) 光伏电池的表面积。
- 2) 光子的数量（即入射光的强度）。光伏电池输出的短路电流  $I_{SC}$  的大小直接取决于光

照强度。

3) 入射光的光谱。测量光伏电池通常使用的标准为 AM1.5<sup>⊖</sup>的大气质量光谱。

4) 电池的光学特性(吸收和反射),特别是玻璃覆盖层的光学特性。

5) 电池的收集概率。主要取决于电池表面钝化和基区的少数载流子寿命。

在 AM1.5 大气质量光谱下的硅光伏电池,其可能的最大电流为 46mA/cm<sup>2</sup>。实验室测得的数据已经达到 42mA/cm<sup>2</sup>,而商业用光伏电池的短路电流在 28~35mA/cm<sup>2</sup>之间。

## 2. 开路电压

开路电压  $U_{OC}$  是光伏电池输出的最大电压,此时输出电流为零。开路电压的大小相当于光生电流在电池两边形成的正向偏压。开路电压可参考图 2-3a 的伏安曲线。使式(2-2)中的  $I' = 0$ ,即输出电流设置成零,便可得到光伏电池的开路电压方程为

$$U_{OC} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \quad (2-3)$$

由式(2-3)可知:  $U_{OC}$  的大小取决于光伏电池的饱和电流和光生电流。由于短路电流的变化很小,而饱和电流的大小可以改变几个数量级,所以主要影响来自于饱和电流。实验室测得的单个硅光伏电池在 AM1.5 光谱下的最大开路电压能达到 720mV,而商业用光伏电池通常为 600mV。

## 2.2.2 电阻效应

### 1. 特征电阻

光伏电池的特征电阻就是电池在输出最大功率时的输出电阻,如图 2-5 所示的 C 点。如果外接负载的电阻大小等于电池本身的输出电阻,那么电池输出的功率达到最大,即工作在最大功率点。此参数在分析光伏电池特性、研究寄生电阻损失时非常重要。

特征电阻也可以写成

$$R_{CH} = U_{mp} / I_{mp} = U_{OC} / I_{SC} \quad (2-4)$$

### 2. 寄生电阻

光伏电池的电阻效应消耗了电池的能量,降低了电池的发电效率。其中最常见寄生电阻为串联电阻  $R_s$  和并联电阻  $R_{sh}$ ,如图 2-6 所示的电池单二极管的等效电路。

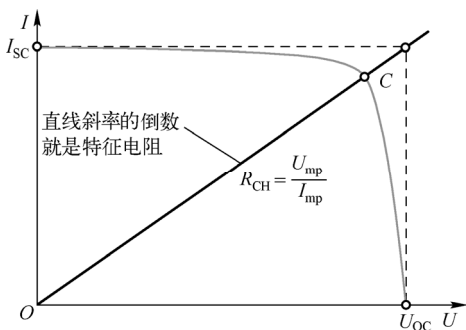


图 2-5 特征电阻

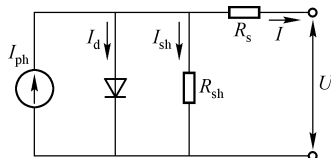


图 2-6 单二极管的等效电路

⊖ AM1.5 指的是光照强度为 1000W/m<sup>2</sup>。

### 3. 串联电阻

引起串联电阻的因素有三种：①穿过光伏电池发射区和基区的电流；②金属电极与 PN 结之间的接触电阻；③顶部和背部的金属电阻。

串联电阻对光伏组件的  $I-U$  输出特性曲线在最大功率点附近的形状有着较大的影响，并且光伏组件的效率随着串联内阻近似呈指数减少。图 2-7 所示为串联内阻分别为参考值以及参考值的 2 倍和 1/2 时，光伏组件的  $I-U$  输出特性曲线，外部环境参数为温度=25℃、光照强度=1000W/m<sup>2</sup>。

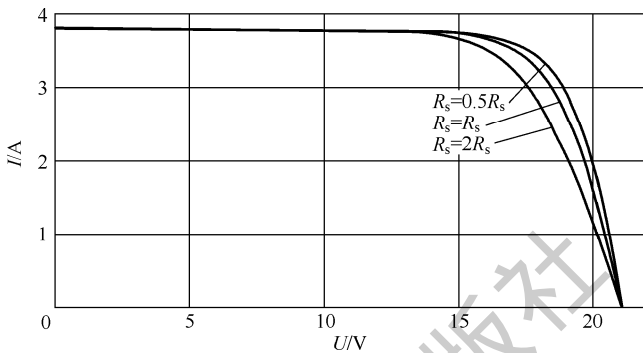


图 2-7 不同串联内阻  $R_s$  下光伏组件的  $I-U$  特性曲线

### 4. 并联电阻

并联电阻  $R_{sh}$  造成的功率损失通常是由制造缺陷引起的，并联电阻以分流的形式造成功率损失，减小了流经 PN 结的电流，同时还降低了光伏电池的电压。在光强很低的情况下，并联电阻对电池的影响最大，因为此时光伏电池的电流很小。

并联电阻对  $I-U$  特性曲线的影响没有串联电阻对  $I-U$  特性曲线的影响明显。

### 5. 串、并联电阻的共同影响

当并联电阻和串联电阻同时存在时，光伏电池的电流  $I$  与电压  $U$  关系为

$$I = I_L - I_0 \exp\left[\frac{q(U + IR_s)}{nkT}\right] - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (2-5)$$

## 2.2.3 其他效应

### 1. 温度效应

温度是影响光伏组件输出特性的重要外部环境因素之一。图 2-8 所示为光照强度等于 1000W/m<sup>2</sup> 时，光伏组件在 15℃、25℃ 和 35℃ 时的  $I-U$  输出特性曲线。

如图 2-8 所示，在温度为 15℃ 时，小于标准检测环境中的温度标准 ( $T=25^\circ\text{C}$ )，光伏组件的短路电流变化较小，比标准检测温度时略微下降，而开路电压的变化相对较明显，比标准检测温度下增加 1V 左右；在温度为 35℃ 时，大于标准检测温度时，光伏组件的短路电流变化也较小，比标准检测温度下略微增加，而开路电压则较标准检测温度时减小 1V 左右。综上所述，光伏组件的输出电流与温度成正比关系，但变化较小，在温差为 10℃ 时，电流变化约为 0.04A；光伏组件的输出电压与温度成反比关系，变化相对较大，在温差为 10℃ 时，

电压变化约为 1V。

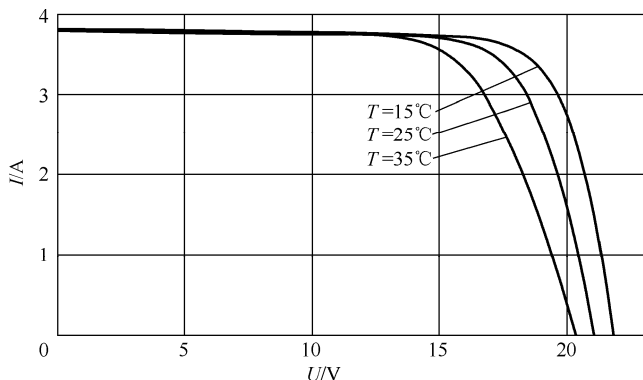


图 2-8 不同温度  $T$  下光伏组件的  $I-U$  特性曲线

## 2. 光强效应

光照强度是影响光伏组件输出特性的另一个重要外部因素之一。图 2-9 所示为标准检测温度（25℃）下光伏组件在不同光照强度下的  $I-U$  输出特性曲线，光照强度分别为  $1000\text{W}/\text{m}^2$ 、 $750\text{W}/\text{m}^2$  以及  $500\text{W}/\text{m}^2$ 。

如图 2-9 所示，光伏组件的短路电流与光照强度成正比，变化比较大，光照强度每增加  $250\text{W}/\text{m}^2$ ，组件的短路电流增加约 1A；开路电压随光照强度的变化并不明显，趋势是随着光照强度的增加开路电压略有增加，光照强度每增加  $250\text{W}/\text{m}^2$ ，组件的开路电压增加 0.5V 左右。由图 2-10 所示的  $P-U$  特性曲线可知，随着光照强度的增加，组件的输出功率也将相应地增加，特别是最大功率点相差最大。

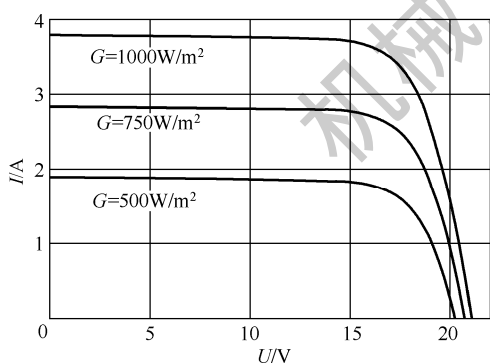


图 2-9 标准检测温度下光伏组件在不同光照强度  $G$  下的  $I-U$  输出特性曲线

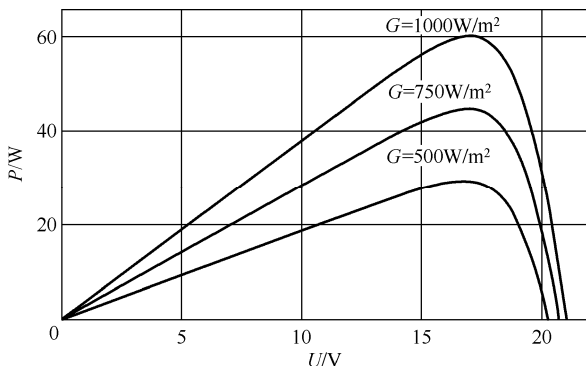


图 2-10 不同光照强度  $G$  下光伏组件的  $P-U$  特性曲线

## 2.3 光伏电池板

### 1. 简介

一块光伏电池板是由许多单光伏电池连接而成的，这样能增加输出功率。相互连接的电池被封装起来制成光伏面板以防止来自周围环境的破坏。电池互联起来形成的光伏电池阵列

最主要的问题是：①不匹配的电池之间的互联引起的损耗；②电池板的温度；③电池板的故障模式。光伏电池板如图 2-11 所示。

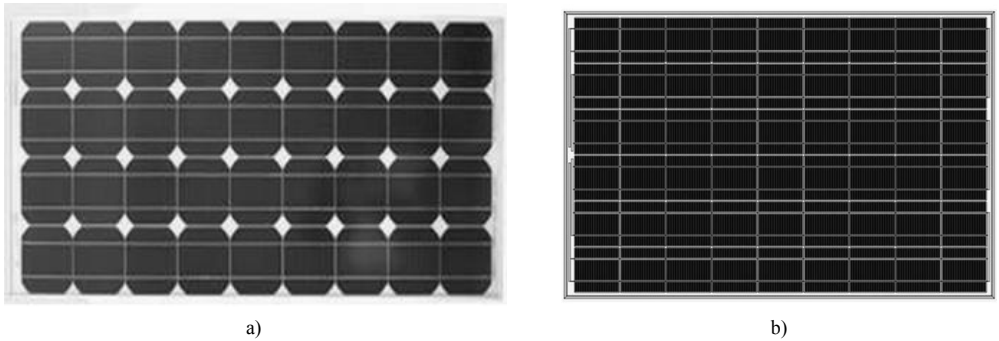


图 2-11 光伏电池板

a) 单晶硅 b) 多晶硅

## 2. 电池板的结构

一块光伏电池板是由许多互相连接的光伏电池单元封装而成的。由于光伏电池非常薄，所以在缺乏保护的情况下很容易受到机械损伤。另外，电池表面的金属网格以及连接每个电池的金属线都有可能受到水或水蒸气的腐蚀。封装能防止这些破坏。光伏电池板的使用寿命通常为 20 年以上，可见组件经过封装后具有较高的可靠性，封装对于光伏面板的工作具有很高的重要性。

## 2.4 互联效应

### 2.4.1 组件电路的设计

通常将多块光伏电池单元串联成一块光伏电池板，以提高输出电压，如图 2-12 所示。独立光伏系统中，光伏组件的输出电压通常被设计成与 12V 蓄电池相匹配。在 25℃ 和 AM1.5 条件下，单个光伏电池的输出电压只有 0.6V 左右。考虑到由于温度造成的电池板电压损失和蓄电池所需要的充电电压要达到 15V 或者更高，由 36 块电池片组成的光伏电池组件，在标准测试条件下，输出的开路电压将达到 21V 左右，最大功率点处的工作电压大约为 17V 或 18V。

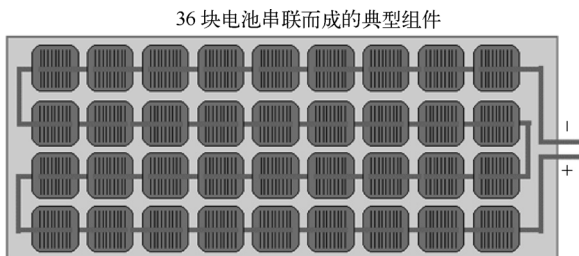


图 2-12 光伏电池组件的外形和连接形式

虽然光伏组件输出电压的大小取决于电池的数量，但是组件的输出电流却取决于单个光伏电池的尺寸大小和它的转换效率。在 AM1.5 和最优倾斜角度下，商用电池的电流密度大约在  $30\sim 36\text{mA}/\text{cm}^2$  之间。单晶硅电池的面积若为  $100\text{cm}^2$ ，则总的输出电流大约为  $3.5\text{A}$ 。多晶硅电池组件的电池片面积更大，但电流密度相对较低，因此输出的短路电流约为  $3\text{A}$  左右。但是，多晶硅电池的面积可以有多种变化，因此电流也可以有多种选择。

如果组件中的所有光伏电池都具有相同的电特性，并处于相同的光照和温度下，则所有的电池都将输出相等的电流和电压。在这种情况下，光伏组件的  $I-U$  曲线的形状将和单个电池的曲线形状相同，只是电压和电流都增大了。则此电路的方程为

$$I_T = MI_L - MI_0 \left\{ \exp \left[ \frac{q \left( \frac{U_T}{N} + I_T \frac{R_s}{M} \right)}{nkT} \right] - 1 \right\} \quad (2-6)$$

式中， $N$  为串联电池的个数； $M$  为并联电池的个数； $I_T$  为电路的总电流； $U_T$  为电路的总电压； $I_0$  为单个电池的饱和电流； $I_L$  为单个电池的短路电流； $R_s$  为单个电池单元的串联电阻； $n$  为单个电池的理想因子； $q$ 、 $k$  和  $T$  为常数。

## 2.4.2 错配效应

错配损耗是由互相连接的电池或组件，因为性能不相同或者工作条件不同造成的。在工作条件相同的情况下，错配损耗是由其性能不相同造成的，这是一个相当严重的问题，因为整个光伏模组的输出是取决于那个表现最差光伏电池的输出。例如，在一个模组中有一块电池片被阴影遮住（见图 2-13），则其他工作正常的电池所产生的电能，大部分将被阴影遮挡的电池所抵消。反过来还可能会导致局部电能的严重损失，由此产生的局部加热也可能引起模组致命的损害。模组局部被阴影遮住是引起光伏组件错配的主要原因。



图 2-13 阴影下的光伏组件

当模组中的一个光伏电池的参数与其他的明显不同时，错配现象就会发生。由错配造成的影响和电能损失大小取决于：①光伏模组的工作点；②电路的结构布局；③受影响电池的参数。

一个电池与其余电池在  $I-U$  曲线的上任何一处的差异都将引起错配损耗。图 2-14 展示

了光伏电池在非理想下的  $I-U$  曲线。尽管错配现象可能是由电池参数引起的，但是严重的错配通常都是由短路电流或开路电压的差异所引起的。错配影响力的大小还取决于电路的结构和错配的类型，最大的错配差异存在于电池处于反向偏压的时候。

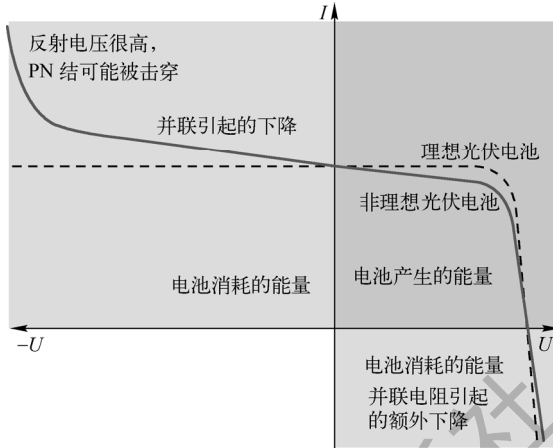


图 2-14 理想光伏电池和非理想光伏电池的比较

### 2.4.3 串联电池的错配

因为大多数光伏组件都是串联形式连接的，所以串联错配是最常遇到的错配类型，如图 2-15 所示。在两种最简单的错配类型中（短路电流错配和开路电压错配），短路电流的错配比较常见，它很容易被组件的阴影部分所引起。同时，这种错配类型也是最严重的。

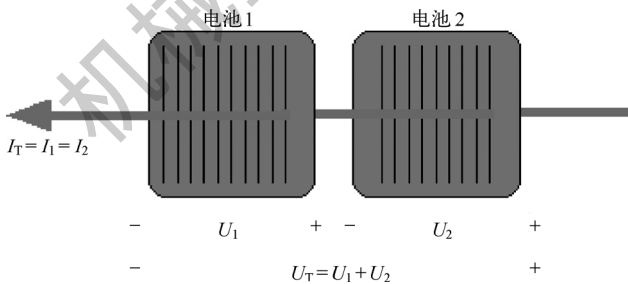


图 2-15 两个互相串联的电池

对于两个串联的光伏电池来说，流过两者的电流大小是一样的，产生的总电压等于两个电池电压之和。因为串联电路中，电流大小相等，所以在电流上出现错配就意味着总电流等于各个光伏电池光生电流中的最小值。

#### 1. 串联电池的开路电压错配

串联电池的开路电压错配是一个不太严重的错配类型，如图 2-16 所示。在短路电流处，光伏组件输出的总电流是不受影响的。而在最大功率点处，总的功率却减小了，因为总有一个电池产生的能量较少。由于两个电池是串联起来的，所以流经两个电池的电流是一样的，而总的电压则等于每个电池的电压之和。

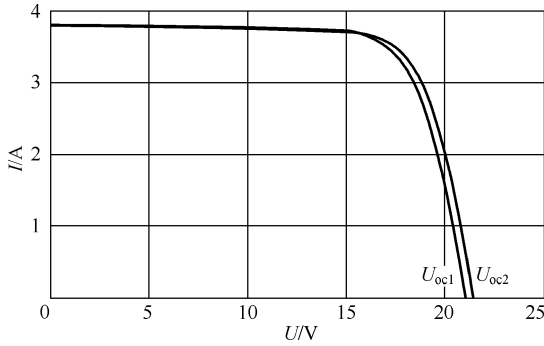


图 2-16 串联电池的开路电压错配

## 2. 串联电池的短路电流错配

短路电流错配对光伏组件有重大影响，如图 2-17 所示。由于穿过每个光伏电池单元的电流需要一致，所以串联电路的总电流应该是两个光伏电池组件中的最小电流，产生大电流的光伏电池单元的电流被产生小电流的光伏电池单元抵消了。

点画线框内的电路元器件为光伏电池的模型，电流的大小等于光伏电池单元的光生电流  $I$ ，因为电池外电路短路，故电池的前置偏压为零

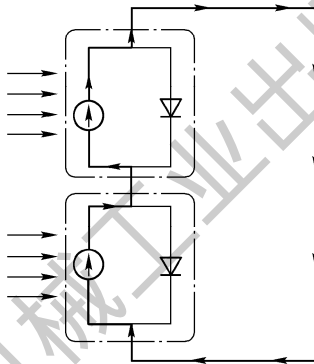


图 2-17 短路电流相等的串联错配

总体来说，在有电流错配的串联电路中，若问题光伏电池产生的光生电流小于正常单元在最大功率点时的电流，或者光伏电池工作在短路电流或欠电压处，则问题电池的高功率耗散会对组件造成致命的伤害，产生严重的功率损失。

两个串联光伏电池的电流错配问题，非常普遍，且有时会是相当严重的，串联电路的电流受到问题电池的电流限制。两线交点的电流表示串联电路的短路电流，这是一个计算串联电池的错配短路电流的简单方法，如图 2-18 所示。

### 2.4.4 旁路二极管

通过使用旁路二极管可以避免错配对组件造成的破坏，二极管与电池并联且方向相反，如图 2-19 所示，这是通常避免错配的方法。在正常工作状态下，每个光伏电池的电压都是正向偏置的，所以旁路二极管的电压为反向偏置，相当于开路，此时二极管不起作用。然而，如果串联电池中有一个电池发生错配而导致电压被反向偏置，则旁路二极管就会立即导通，因此使得来自正常电池的电流流向外部电路，即二极管电路，而不是变成每个电池的前置偏压。

穿过问题电池的最大反向电压将等于单个旁路二极管的管压降，由此限制了电流的大小。

在短路且电流匹配的情况下，穿过电池和旁路二极管的电压都为零，旁路二极管也不对电池产生影响。

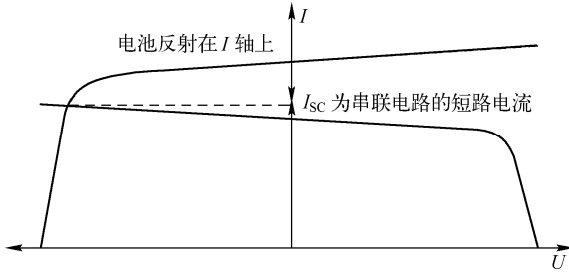


图 2-18 串联电流的短路电流表示

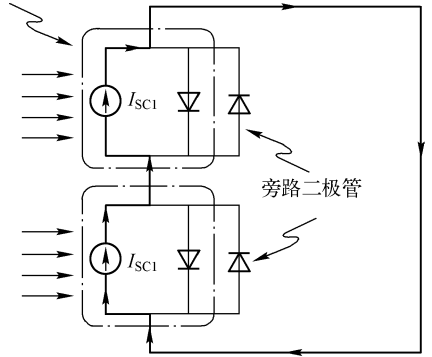


图 2-19 接有旁路二极管的串联光伏电池

要计算旁路二极管对  $I-U$  曲线的影响，首先要画出单个光伏电池（带有旁路二极管）的  $I-U$  曲线，然后再与其他电池的  $I-U$  曲线进行比较。旁路二极管只在电池出现电压反向时才对电池产生影响。如果反向电压高于电池的反向电压，则二极管将导通并让电流流过。图 2-20 是两种情况的  $I-U$  曲线。

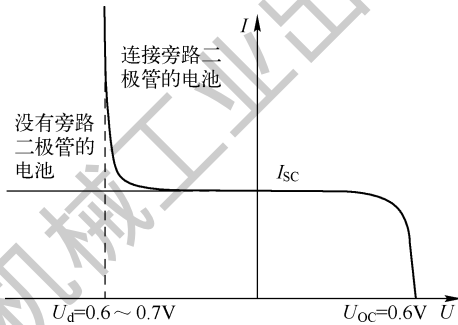
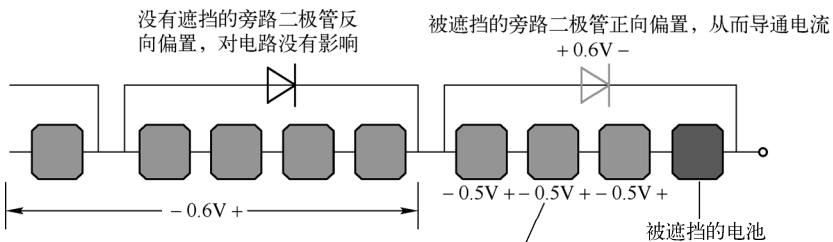


图 2-20 有、无旁路二极管的  $I-U$  曲线

图 2-21 给出了一种带有旁路二极管的电池组件示意图。图中画出了 9 个光伏电池，其中有 8 个正常电池和 1 个问题电池。典型的光伏组件由 36 个电池组成，如果没有旁路二极管，错配效应的破坏将更严重。



电池串中的电流被最小电流的电池单元所限制，如果一些电池单元被遮挡，那么最大电流将来自串中正向偏置的电池单元的正常电池单元，偏置电压的大小取决于问题单元的问题严重程度，不一定为 0.5V

图 2-21 带有旁路二极管的电池组件

然而，实际应用中若每个光伏电池都连接一个二极管，成本会很高，所以一个光伏组件通常包含 1~2 个二极管。穿过问题电池的电压大小等于串联电路中其他正常光伏电池（即与问题电池共享一个二极管的电池）的前置偏压加上二极管的电压。那些正常电池的电压大小取决于问题电池的问题严重程度。例如，如果一个电池完全被阴影遮住了，那些没有被阴影覆盖的电池会因短路电流而导致正向电压偏置，而电压值大约为 0.6V。如果问题电池只是部分被阴影遮住，则正常电池中的一部分电流将穿过电路，而剩下的则被用来对每个电池产生前置偏压。问题电池导致的最大功率耗散几乎等于那一组电池所产生的所有能量。通常在“36 电池”的光伏组件中，每个组件可以接有两个二极管。

### 2.4.5 并联电池的错配

在小的电池组件中，电池都是以串联形式相接的，所以不用考虑并联错配问题。通常在大型光伏阵列中组件才以并联形式连接，所以错配通常发生在组件与组件之间，而不是电池与电池之间。

图 2-22a 是电池的并联示意图，穿过每个电池的电压总是相等的，电路的总电流等于两个电池的电流之和。如图 2-22b 所示，电池 1 产生的光生电流小于电池 2。并联错配对电流的影响不大，总的电流总是比单个电池电流大。图 2-22c 是并联电池的电压错配，电池 2 较高的电压实际上起到了降低正常电池开路电压的作用。

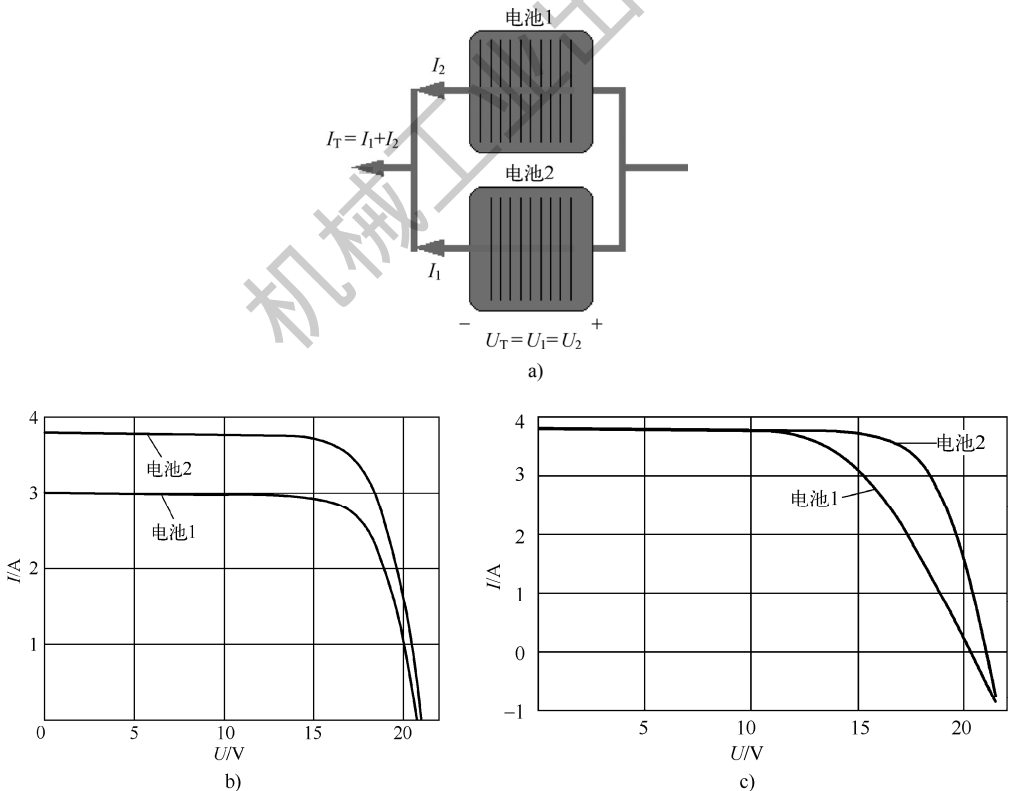


图 2-22 并联电池及其电压错配

a) 电池的并联 b) 电池 1 的输出电流小于电池 2 c) 电池 2 的电压的增加事实上降低了正常电池的开路电压

简单计算错配并联电池的开路电压，即在坐标图中以电压为自变量画出  $I-U$  曲线，则两线的交点就是并联电路的开路电压，如图 2-23 所示。

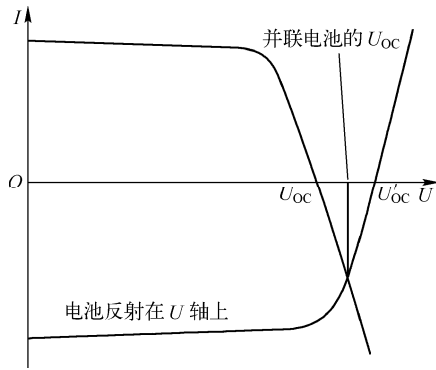


图 2-23 计算错配并联电池的开路电压

## 2.4.6 光伏阵列中的错配效应

光伏阵列是由多个光伏组件通过串联和并联形式连接起来的，串联与并联相结合可能会导致光伏阵列中出现问题。一个潜在的问题是当组件中的一个电池发生了开路，则来自这个组件的电流要小于阵列中的其余组件。这种情况与串联电路中有一个电池被阴影遮挡的情况相似，即整个光伏阵列输出的能量将会下降，如图 2-24 所示。

如果旁路二极管的额定电流与整个并联电路的输出电流大小不匹配，则并联电路的错配效应同样会导致严重的问题。比如，由串联组件组成的并联电路中，每个串联组件的旁路二极管也以并联形式连接，如图 2-25 所示。串联组件中的一个错配将会导致电流从二极管流过，从而使二极管发热。然而，二极管发热会减少饱和电流和有效电阻，从而使组件中的另一串电池也受影响。电流可能会流过组件中的每一个二极管，但也会流过与二极管相连的那一串电池，使这些旁路二极管变得更热，将大大降低它们的电阻并提高电流。如果二极管的额定电流小于电池组件的并联电流，二极管将会被烧坏，光伏组件也将会损坏。

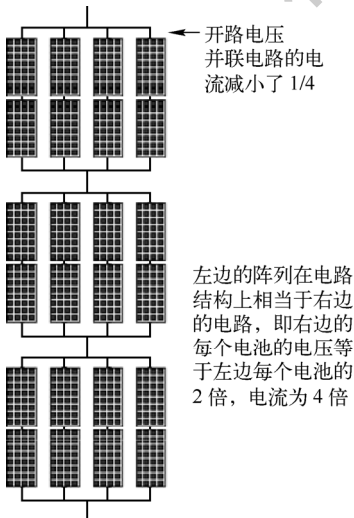


图 2-24 光伏阵列的错配效应

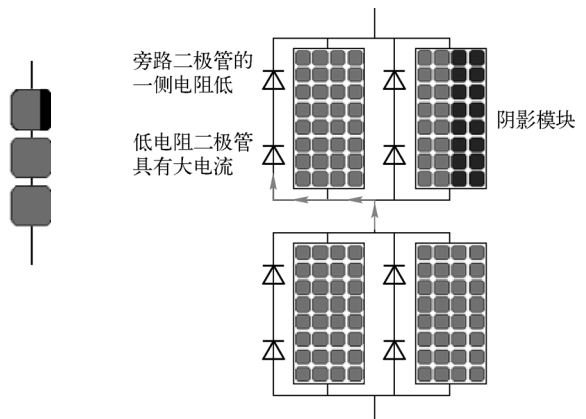


图 2-25 并联组件中的旁路二极管

除了使用旁路二极管来阻止错配损失外，通常还会使用阻塞二极管来减小错配损失，如图 2-26 所示。它不仅能降低驱动阻塞二极管的电流，还能阻止电流从一个正常工作的电池板流到有问题电池板，也因此减小了并联组件的错配损失。

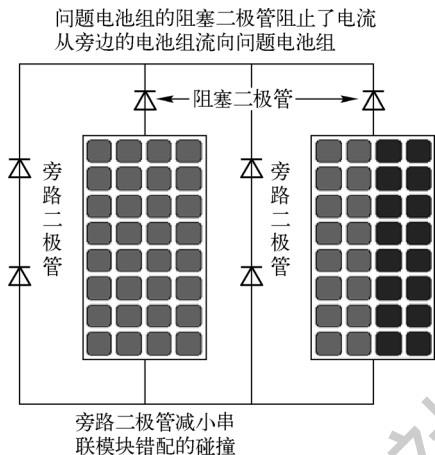


图 2-26 并联组件中的阻塞二极管

## 2.5 局部阴影特性

光伏组件作为光伏发电系统的基本单元，在均匀光照下，光伏组件的输出呈现单峰特性。但光伏组件处于复杂光照条件时，如被周围建筑物、树木及乌云等遮挡时，光伏组件中将有一部分电池处于阴影状态，会造成输出效率的降低，并容易发生热斑现象而损坏电池。传统光伏电池的单二极管等效模型只适用于光照均匀的情况，没有考虑热斑效应，因此不能显示阵列在部分阴影条件下的输出多峰值特性曲线。也就是说，针对阴影条件下的光伏阵列进行建模，并对其输出特性进行分析，是今后研究多峰值最大功率点跟踪的重要理论依据和基础。

### 2.5.1 双二极管模型

由于光伏阵列部分阴影情况下会发生的热斑效应，考虑到反向雪崩效应的光伏电池双二极管的等效电路模型如图 2-27 所示。

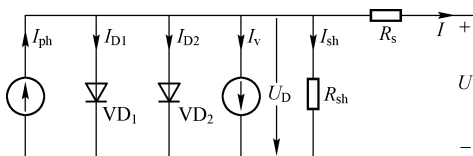


图 2-27 双二极管的等效电路

图中， $I_{ph}$  为光生电流， $I_{D1}$  为流过二极管  $VD_1$  的电流， $I_{D2}$  为流过二极管  $VD_2$  的电流， $I_v$  为反向雪崩击穿电流， $U_D$  为  $R_{sh}$  的端电压， $R_{sh}$ 、 $R_s$  分别为等效并联电阻和串联电阻， $U$ 、 $I$  分别为光伏电池单元的输出端电压和电流。由等效电路模型可得光伏电池的数学模型为

$$I = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_v - I_{sh} \tag{2-7}$$

$$\text{其中, } I_{D1} = I_{01} \left( e^{\frac{qU_D}{n_1 kT}} - 1 \right) = I_{01} \left( e^{\frac{q(U+IR_s)}{n_1 kT}} - 1 \right)$$

$$I_{D2} = I_{02} \left( e^{\frac{qU_D}{n_2 kT}} - 1 \right) = I_{02} \left( e^{\frac{q(U+IR_s)}{n_2 kT}} - 1 \right)$$

$$I_V = \alpha (U + IR_s) \left( 1 - \frac{U + IR_s}{U_{br}} \right)^{-\beta}$$

式中,  $I_{01}$ 、 $n_1$ 为二极管  $VD_1$  的反向饱和电流和品质因子;  $I_{02}$ 、 $n_2$ 为二极管  $VD_2$  的反向饱和电流和品质因子;  $U_{br}$  为雪崩击穿电压;  $\alpha$ 、 $\beta$  为雪崩击穿特征常数;  $T$  为绝对温度;  $q$  为单位电子电荷;  $k$  为波尔兹曼常数。

图 2-28 为  $n$  个光伏电池串联支路,  $m$  条并联形成的光伏组件。当光伏组件中各个光伏电池单元的特性完全相同时,  $n$  个光伏电池串联支路的等效电路如图 2-28a 所示,  $n \times m$  个光伏电池等效电路如图 2-28b 所示。

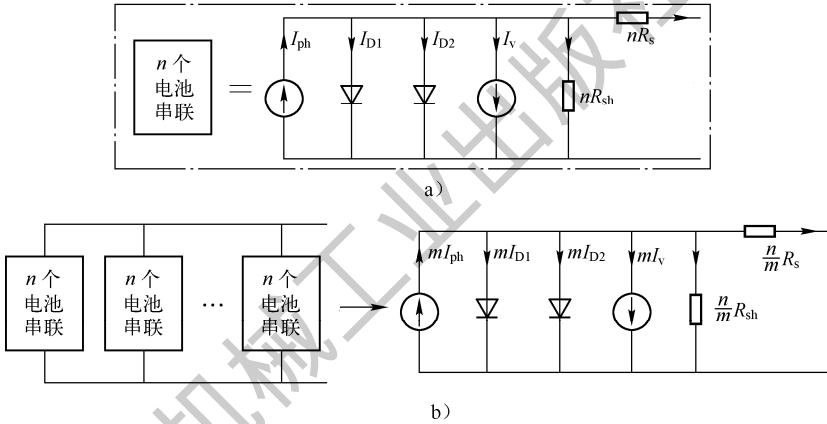


图 2-28 具有  $n \times m$  个电池光伏组件的等效电路

a)  $n$  个光伏电池串联电路模型 b)  $n \times m$  个光伏电池串并联的光伏组件电路模型

根据电路串、并联关系, 可得光伏模组的一般数学模型为

$$I = mI_{ph} - mI_{01} \left( e^{\frac{q(U/n+IR_s/m)}{n_1 kT}} - 1 \right) - mI_{02} \left( e^{\frac{q(U/n+IR_s/m)}{n_2 kT}} - 1 \right) - m \frac{(U/n + IR_s/m)}{R_{sh}} - m\alpha (U/n + IR_s/m) \left( 1 - \frac{(U/n + IR_s/m)}{R_{br}} \right)^{-\beta} \quad (2-8)$$

当光伏组件被遮挡到一定程度时, 外电流大于光生电流, 此时有可能造成反向雪崩击穿现象, 该模型考虑了这一可能性, 符合部分阴影条件下的光伏电池模型的电气特性。

## 2.5.2 外部环境对输出特性的影响

局部阴影条件下, 光伏组件的输出特性除了与外界光照和电池本身的温度相关外, 还与光伏组件的连接方式以及阴影电池的数目和分布相关。

### 1. 遮挡率对输出特性的影响

遮挡率  $k$  是指在阴影状态下，太阳光照不能被光伏电池表面能够接收光照的百分比。设  $k=0.1$ ，即有 10% 的光照被挡住， $1-k$  即 90% 的光仍照在光伏阵列上，因此在局部阴影条件下光伏电池的光生电流可表达为

$$I_{ph} = \frac{(1-k)G}{1000} I_{ph0}$$

式中， $I_{ph0}$  为标准测试条件下的光生电流； $G$  为遮挡物之前的太阳能光照强度。

对于由 36 个电池组成的某型号光伏电池组件，照度为  $1000\text{W/m}^2$ ，温度为  $25^\circ\text{C}$ ，且只有一个电池被遮挡时，其透光率分别为 0%、30%、50% 和 65% 时，其  $I-U$  特性曲线如图 2-29 所示。

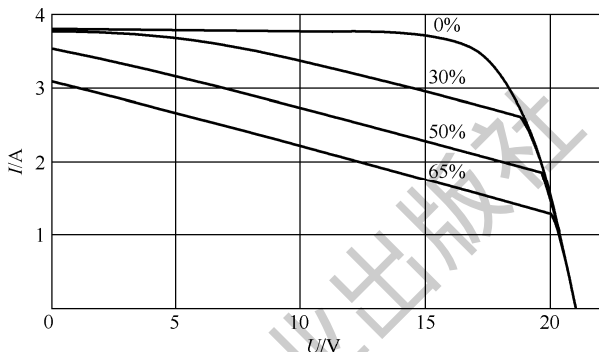


图 2-29 不同  $U/V$  透光率下电池的  $I-U$  特性曲线

由图 2-29 可见，电池在不同的透光率时，输出的短路电流几乎相同，随着透光率的降低，短路电流下降不大；在低透光率的情况下，在低压区域和接近开路的区域，随着电压的增加，短路电流迅速减少；而所有情况下的开路电压几乎相同，阴影对开路电压值几乎没有影响。

### 2. 光照度的影响

当一个光伏电池的遮挡率一定时，随着光照强度的增加，如从  $200\text{W/m}^2$  增至  $1000\text{W/m}^2$  时，其  $I-U$  特性曲线如图 2-30 所示。随着光照强度的增加，短路电流将增加，并且增加幅度较大；开路电压的值也随着照度的增加而增加，幅度相对较小。

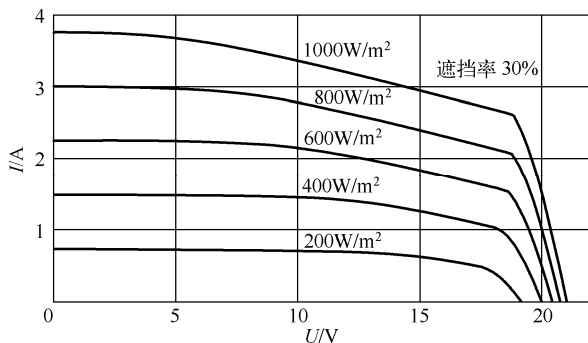


图 2-30 不同照度下电池的  $I-U$  特性曲线 (1 个阴影电池)

### 3. 温度的影响

考虑被遮挡电池的温度变化对阵列输出的影响。图 2-31 为一个电池在遮挡率为 60% 时，被遮挡电池温度在 25℃、40℃、60℃、80℃ 时的光伏阵列  $I-U$  特性曲线。从图 2-31 可以看出，温度越高，光伏组件的开路电压越小，短路电流越大。同时，随着温度的变化，最大功率点的位置也有相应的改变。证明此模型可以考虑电池温度，当有确切的实时温度数据时，可以进行温度输入，使输出曲线更加精确。

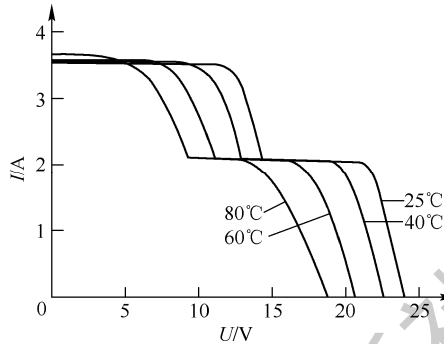


图 2-31 不同温度下电池的  $I-U$  特性曲线 (1 个阴影电池)

### 4. 阴影电池的个数对输出特性的影响

在遮挡率为 65% 时，增加被遮挡电池的数目分别为 0、1、2、3，其  $I-U$  特性曲线如图 2-32 所示。

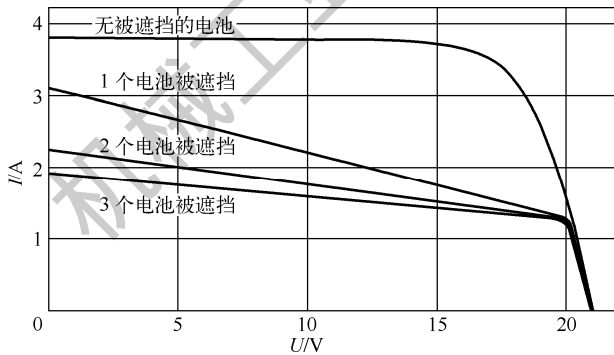


图 2-32 不同阴影电池数目的  $I-U$  特性曲线

由图 2-32 可以看出，当遮挡率相同时，随着阴影电池数目的增加，短路电流显著降低，而开路电压几乎相同，阴影电池数量对开路电压几乎没有影响。

## 2.5.3 电池连接方式对输出特性的影响

相同电池数目采用不同连接方式组成光伏模组，在部分阴影的情况下其输出特性不同。

### 1. 串、并联电池数目的影响

以 108 个 PV 电池按照不同串联、并联方式进行连接组成光伏组件，组成方式如下：

1) 每 18 个电池串联，接一个旁路二极管，然后 6 串再串联，记为  $6 \times 18S$ 。

- 2) 每 27 个电池串联，接一个旁路二极管，然后 4 串再串联，记为 4×27S。
- 3) 每 36 个电池串联，接一个旁路二极管，然后 3 串再串联，记为 3×36S。
- 4) 每 54 个电池串联，接一个旁路二极管，然后 2 串再串联，记为 2×54S。

只有一个电池在完全阴影的情况下，即  $k=0$ ，其输出特性曲线如图 2-33 所示。由图 2-33 可以看出，随着串联电池数目的增加即一个旁路二极管保护的电池数目的增加，输出曲线变形越来越显著，开路电压和短路电流差别不大，最大功率点降低，和最大功率点对应的电压值有较大的减少，电流值减少幅度较小。最大功率点和相应的电流、电压值见表 2-1。

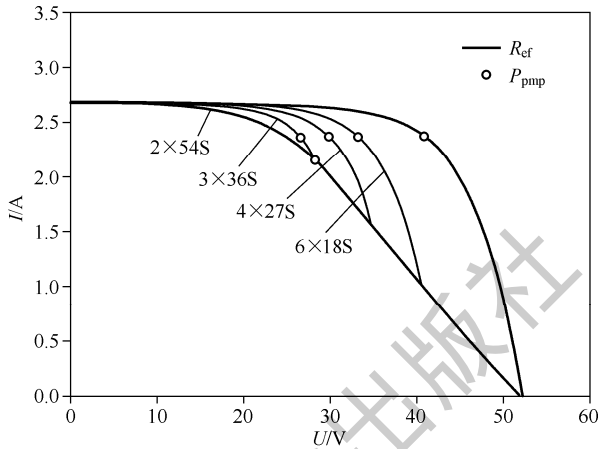


图 2-33 不同的电池串、并联输出特性曲线（1 个电池被完全遮挡）

表 2-1 不同的联结形式下最大功率点及相应的电流、电压值

联结形式	$P_{pmp}/W$	$U_{pmp}/V$	$I_{pmp}/A$
108S	96.8	40.9	2.37
6×18S	78.8	33.2	2.37
4×27S	70.7	29.8	2.37
3×36S	62.6	26.5	2.36
2×54S	60.7	28.2	2.15

## 2. 阴影电池分布对输出特性的影响

当有几个阴影电池分布在一个或不同的串联电池支路中时，阴影电池的数目和分布支路不相同，输出特性也不相同。

当有 18 个电池串联组成串联支路时，阴影电池数目如下：

- 1) String A: 18S, 18 个电池串联均接受正常光照。
- 2) String B1: 18S, 17 个接受正常光照，1 个电池遮挡率为 75%。
- 3) String B2: 18S, 16 个接受正常光照，2 个电池遮挡率为 75%。
- 4) String B3: 18S, 15 个接受正常光照，3 个电池遮挡率为 75%。
- 5) String Bn: 18S, 18-n 个接受正常光照，n 个电池遮挡率为 75%。

图 2-34 为 18 个电池串联，不同的阴影电池数目的  $I-U$  特性曲线。由图 2-33 可以看

出,随着阴影电池数目的增加,曲线变形变得更明显,主要由于随着阴影电池数目的增加,串联支路中电流减少,结论与图 2-33 相同。

当阴影电池处于相同的串联支路时(即有一个旁路二极管),不同的串联形式的输出  $I-U$  特性曲线如图 2-35 所示。不同的串联支路中时(即每 18 个电池串联有一个旁路二极管),特性曲线如图 2-36 所示。图中, A 表示 18 个电池串联; 3A 表示 3 个 A 串联; 2A+B1 表示 2 个 A 和 1 个 B1 串联; 1A+2B1 表示 1 个 A 和 2 个 B1 串联; 3B1 表示 3 个 B1 串联。由图 2-35 可以看出,在相同的串联电路中,不同阴影电池的数目其最大功率点相同,即阴影电池数量对最大功率点没有影响。而图 2-36 可以看到,当阴影电池位于不同的串联支路时,随着阴影电池数目的增加,最大功率点降低,相应工作点电流、电压值见表 2-2。

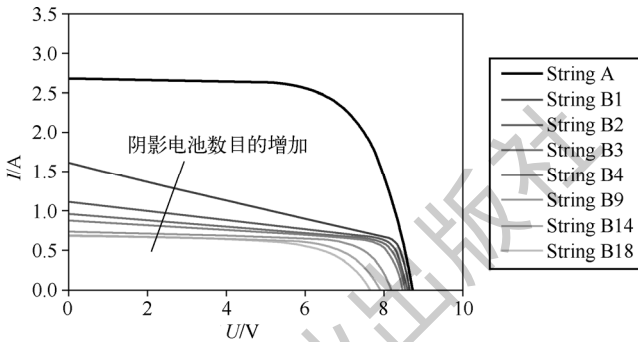


图 2-34 不同阴影电池数目的  $I-U$  特性曲线 (18S)

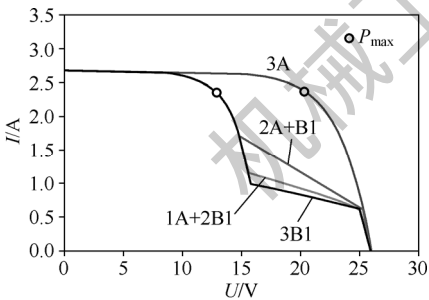


图 2-35 在同一个串中不同的阴影电池 (3×18S)

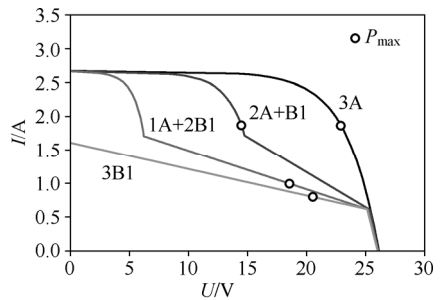


图 2-36 在不同串中不同的阴影电池 (3×18S)

表 2-2 最大功率点及相应电流、电压值

联结形式	$P_{\text{pmp}}/\text{W}$	$U_{\text{pmp}}/\text{V}$	$I_{\text{pmp}}/\text{A}$
3A	43.0	22.8	1.88
2A+B1	27.1	14.4	1.88
1A+2B1	18.5	18.5	1.00
3B1	16.6	20.5	0.81

### 3. 不同阴影模式对输出特性的影响

对于大的光伏组件，串、并联电池数目多，所处的阴影形式也更加复杂，在阴影存在时使输出特性发生较大的变化。以 SM55 光伏模组为例进行说明，该模块由 20 个电池串联，再由 3 个这样的支路并联组成，记为 SP20×3。阴影模式如图 2-37 所示。在阴影模式下的照度分别为  $1000\text{W/m}^2$ 、 $750\text{W/m}^2$ 、 $500\text{W/m}^2$  和  $250\text{W/m}^2$ 。

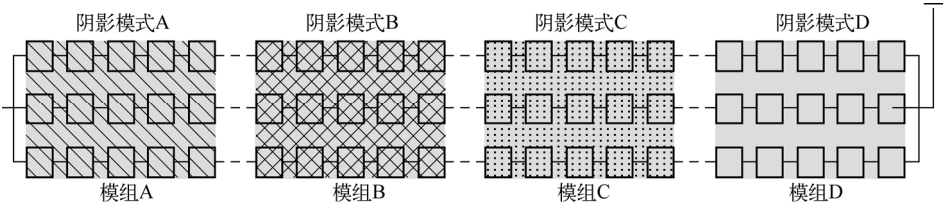


图 2-37 SP20×3 光伏模组的阴影模式

在温度为  $50^\circ\text{C}$  时，该模组在照度分别为 A、B、C、D 四种情况变化时的输出  $I-U$  特性曲线如图 2-38 所示， $P-U$  曲线如图 2-39 所示。图中对比了是否有旁路二极管对输出的影响。

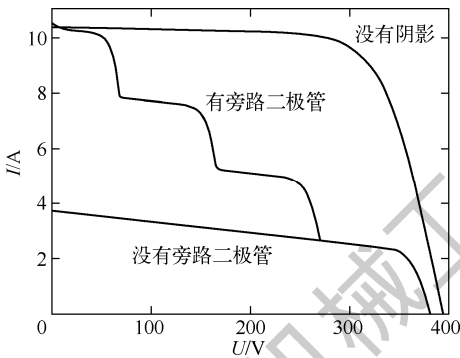


图 2-38 组件在不同阴影情况下的输出特性  $I-U$  曲线

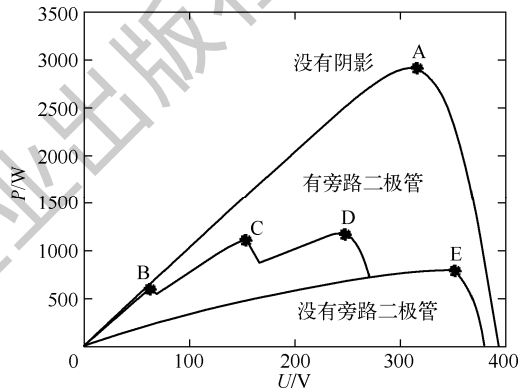


图 2-39 组件在不同阴影情况下的输出特性  $P-U$  曲线

由图 2-38、图 2-39 可以看出，在有旁路二极管的情况下，呈现多峰现象，相对于没有旁路二极管的情况，功率输出能力大大提高。输出的功率在照度没有变化时，只有一个峰值点即最大功率点，而当处于不同的阴影时，其输出功率呈现多峰值，并且峰值的个数等于照度的水平等级，这会给后续的最大功率点跟踪提出新的课题。因为传统的最大功率点跟踪算法都是基于均匀光照环境下并且假定温度恒定时进行的，而光伏模组在实际的工作环境中时处于复杂光照环境中。因此，在考虑光伏电池的输出特性和最大功率点跟踪的研究中，除了考虑温度、均匀照度的影响外，还要考虑部分阴影情况及模组的连接方式。

## 2.6 习题

1. 描述光伏发电的基本原理。
2. 什么是光伏效应？

3. 写出光伏电流的方程，用 MATLAB 仿真光伏电池的特性曲线？
4. 什么是光伏电池的短路电流、开路电压及最大功率点？
5. 写出光伏电池的双二极管模型，画出光伏电池的双二极管模型的等效电路。
6. 仿真光伏电池在不同光照度、不同温度下的特性，根据  $I-U$  特性曲线理解光伏电池的特性。
7. 仿真复杂光照条件下的光伏电池的  $I-U$  特性曲线，并考虑如何判断其最大功率点。

机械工业出版社

## 第3章 光伏逆变器的结构与原理

光伏逆变器是实现光伏能量转换的核心，它对光伏发电系统稳定、安全、可靠、高效的运行起着决定性的作用，因此了解光伏逆变器的结构和工作原理对光伏逆变器的设计十分重要。本章将对光伏逆变器的结构和工作原理进行介绍。

### 3.1 光伏逆变器的结构

逆变器也称逆变电源，是将直流电能转变成交流电能的变流装置，是太阳能、风力等再生能源发电系统中的一个重要部件。随着电力电子技术和功率电子器件的发展，逆变技术有了长足的发展。从20世纪六七十年代的晶闸管逆变技术，到21世纪的MOSFET、IGBT、GTO、IGCT、MCT逆变技术，控制电路从模拟电路发展到单片机和数字信号处理器(DSP)控制。各种现代控制理论如自适应控制、自学习控制、模糊逻辑控制、神经网络控制等智能控制理论和算法也大量应用于逆变领域。其应用领域也达到了前所未有的广阔程度，从瓦级的液晶背光板逆变电路到兆瓦级的太阳能光伏电站，从日常生活的变频空调、变频冰箱到航空航天领域的机载设备，从常规化石能源的火力发电设备到可再生能源发电的太阳能风力发电设备，都少不了逆变电源。随着计算机技术和新型功率器件的发展，逆变装置也将向着体积更小、效率更高、性能指标更优越的方向发展。

光伏逆变器可分为独立和并网型两种，它们又可分为方波逆变器、阶梯波逆变器和正弦波逆变器。逆变器根据是否使用变压器可以划分成有变压器型逆变器和无变压器型逆变器。逆变器是一种由半导体器件组成的电力调整装置，主要用于把直流电力转换成交流电力，一般含有升压电路和逆变桥电路。升压电路将光伏电池板的不规则输出电压升高到所需的稳定直流电压，为后续逆变电路提供稳定的直流母线电压。

在介绍光伏逆变器的工作原理之前，首先应该了解光伏逆变器的基本构成。

#### 3.1.1 光伏发电系统的基本构成

光伏发电系统的结构如图3-1所示，该系统主要由光伏阵列、充/放电控制器、储能系统、逆变器与负载系统5个部分组成。

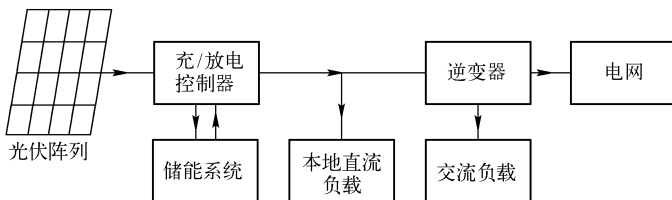


图3-1 光伏发电系统的结构框图

## 1. 光伏电池阵列

光伏电池是组成光伏发电系统的电源，单个光伏电池功率较小，为满足不同负载的供电需要，将光伏电池串、并联后统一封装构成光伏电池模块（Photovoltaic Module, PVM），这是目前光伏电池的主要存在及应用形式，用户可根据需要构建任意功率的光伏电池模块。如果光伏发电系统中所需功率超过光伏电池模块功率，需将同规格的光伏模块串联或并联起来构成光伏阵列（PV Array），以便为系统提供更大的输出功率。

## 2. 充/放电控制器

充/放电控制器主要是把光伏阵列输出的电压存入储能系统和释放给逆变器。由于光伏阵列输出的功率是日照强度和模块温度的非线性函数，存在着最大功率点跟踪（Maximum Power Point Tracking, MPPT）问题，如果不加以控制就直接给负载提供能量，则不能把光伏电池模块转换的能量最大限度地存储在储能系统中，因此还需要增加 MPPT 控制功能。

## 3. 逆变器

光伏电池输出的是准直流电，而包括电网在内的许多用电场合是交流电，因此逆变器是光伏发电系统中的一个关键环节。它的主要功能是将直流电转变为与交流电网或本地交流负载相匹配的交流电。该环节的主要指标是高可靠性和高转换效率。

## 4. 储能系统

光伏电池只有在白天有阳光时才能发电，而人们的一般用电时间是在晚上，所以储能单元（主要是蓄电池）可以在白天将太阳能储存起来以供人们夜间使用，同时也可起交流电网断电时不间断电源（Uninterruptible Power Supply, UPS）的功能，为本地重要交流负载供电。这种以蓄电池作为储能环节的光伏发电系统称为“可调度式光伏并网发电系统”。尽管这种系统在功能上有很多的优点，如作为 UPS、可根据运行需要控制并网输出功率以实现一定的电网调峰功能等，但增加了储能环节后，系统成本增加，而且蓄电池的寿命短、体积笨重及存在污染等缺点极大地制约了可调度光伏并网发电系统的广泛应用。所以目前这种形式应用较少，而用得较多的是“不可调度式光伏并网发电系统”，其结构框图如图 3-2 所示，与“可调度式光伏并网发电系统”不同的是它不含蓄电池组储能环节。

不可调度式光伏并网发电系统中，并网逆变器将光伏阵列产生的直流电能转化为和电网电压同频、同相的交流电能，当主电网断电时，系统自动停止向电网供电。白天，当光伏系统产生的交流电能超过本地负载所需时，超过部分馈送给电网。当光伏系统产生的电能不能满足本地负载时，电网自动向负载提供补充电能。当电网故障或维修时，出于安全考虑，逆变器应停止工作，而且必须使逆变器、电网和负载三者电气断开，光伏并网系统不再向电网和负载提供电能。

不可调度式光伏并网发电系统和可调度式光伏并网发电系统相比，最大的不同处是系统中不再配有储能环节。可调度式光伏并网发电系统的主要优点表现在以下几方面：

1) 逆变器一般由并网逆变器和蓄电池充/放电器两部分组成。其功能不仅是将光伏电池阵列产生的直流电能逆变后输向电网，同时还向蓄电池充电。

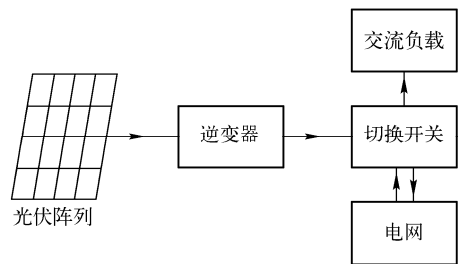


图 3-2 不可调度式光伏并网发电系统

2) 逆变器配备有主开关和负载开关。正常情况下, 两者均闭合, 当交流电网断电时, 逆变器断开其本身的并网发电主开关, 但本地负载开关仍保持闭合, 以便光伏电池阵列和蓄电池组提供的直流电仍能通过逆变器向交流负载供电, 对交流负载而言, 系统兼具不间断电源(UPS)的作用。这对于诸如银行、医院、公共场所等重要负荷甚至某些家庭用户来说是十分具有吸引力的。

3) 系统不仅能向电网馈送同频、同相的正弦波电能, 而且还可作为电网终端的有源功率调节器, 用于补偿电网终端缺乏的无功分量以稳定电网电压, 同时亦可抵消有害的高次谐波分量, 对提高电能质量极为有益。

4) 大功率可调度式光伏并网发电装置可以根据运行需要自由确定并网电流的大小, 这有益于电网调峰。电网负荷增加时, 可以调度增加光伏并网发电装置的上网电流, 有助于电网的运行质量。

可调度式光伏并网系统在功能上虽优于不可调度式光伏并网系统, 也有若干严重的弱点, 正是这些弱点使可调度式并网系统的应用规模还难与不可调度式相比较, 这是因为:

1) 蓄电池组的寿命较短。目前免维护蓄电池在良好环境下的工作寿命通常为 3 年, 而光伏阵列稳定工作的寿命则在 25~30 年左右, 因此只有为数较少的场合使用可调度式光伏并网系统。

2) 蓄电池组的价格目前仍较高。

3) 蓄电池组较为笨重, 需占用较大空间, 如有漏液, 则会泄漏出腐蚀性液体。此外, 报废的蓄电池必须进行后处理, 否则将会造成“铅污染”。

4) 不可调度式光伏并网发电系统的集成度高, 安装和调试相对方便, 可靠性也高。

根据以上的比较, 选用哪种结构需根据具体情况来决定, 没有哪种结构绝对优劣。

另外, 由于光伏电池模块输出电压和系统的功率等级有关, 为发挥光伏电池模块的效能, 需根据光伏阵列的输出电压选择合适的光伏发电系统的结构。根据光伏系统功率情况, 逆变器主要有集中式逆变器、集成式逆变器、串型逆变器以及多重串型逆变器 4 种结构, 其结构原理框图分别如图 3-3a~d 所示。

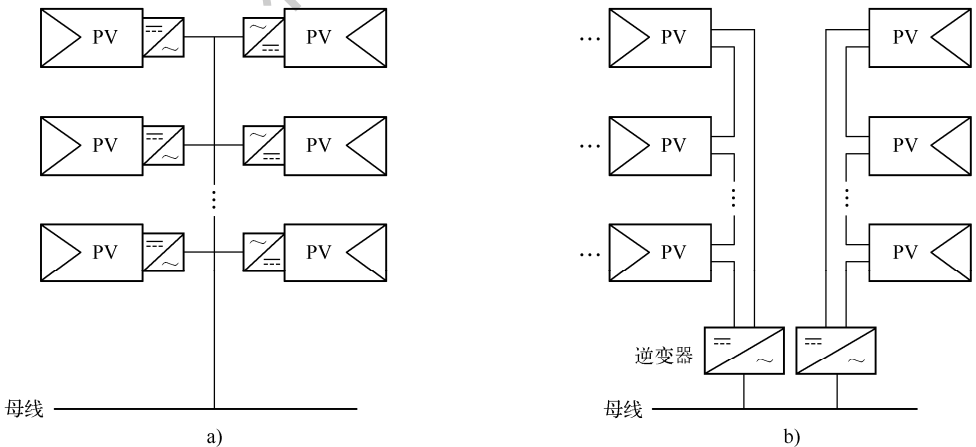


图 3-3 逆变器 4 种结构的原理框图

a) 集中式逆变器 b) 集成式逆变器

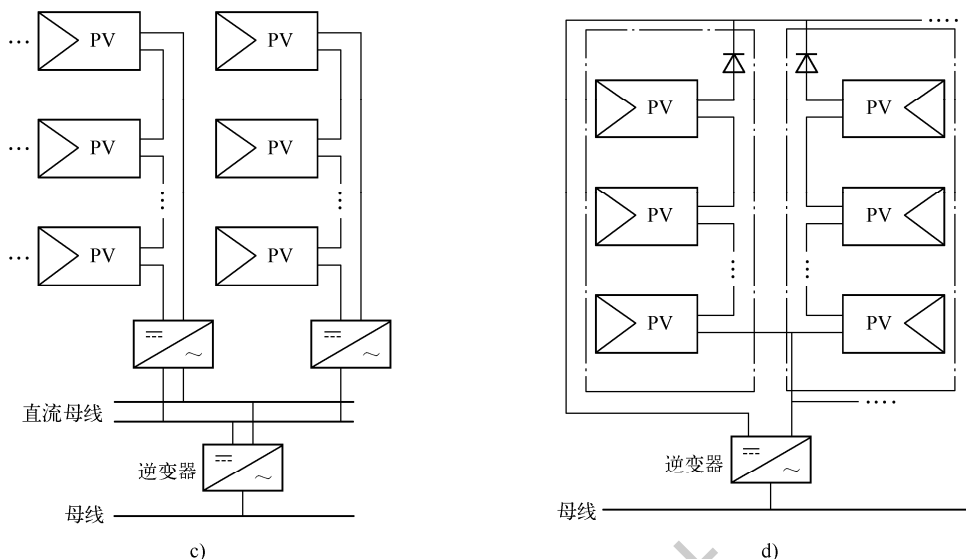


图 3-3 逆变器 4 种结构的原理框图 (续)

c) 串行逆变器 d) 多重串行逆变器

表 3-1 给出了这 4 种逆变器结构的特性比较。

表 3-1 4 种逆变器结构的特性

逆变器	集中式	集成式	串型	多重串联型
MPPT	集中式	独立式	独立式	独立式
功率等级	MW	$\leq 500\text{W}$	$\leq 2\text{kW}$	MW
系统可扩充性	不可扩充	不可扩充	不可扩充	可扩充
直流母线	需要	不需要	不需要	需要
效率	低	较低	高	高
是否容错	无	有	无	有
单位功率生产成本	较低	高	较低	较低

### 3.1.2 光伏发电系统的运行模式

光伏并网发电系统根据系统本身的结构、系统运行环境情况、输出容量的大小、本地负载容量的大小以及交流电网的情况，可工作于独立运行模式、并网发电运行模式和混合运行模式 3 种。

#### 1. 独立运行模式

独立运行光伏发电系统的电能来源于光伏阵列。为了保证整个系统连续稳定运行，必须要使用蓄电池来调节电能。因天气等原因照度不足时，可由蓄电池提供能量；当太阳能充足时，可以将多余的能量存储于蓄电池中。充/放电控制器中通常都有一个保护和调节环节对太阳能充/放电的速率进行控制，以延长蓄电池的使用寿命。

虽然独立系统的构成分类有许多，但其基本原理都是将太阳能通过光伏器件转换成电能，再经过能量储存、控制、保护和能量变换等环节，最终提供以直流或交流形式的电能提

供给负载，满足不同负载用户的要求。

## 2. 并网运行模式

在公用电网的场合，光伏发电系统可直接与电网连接，在系统容量足够大而日照强度较大时，可将多余的电能馈送电网，所以该系统对应的逆变器所输出的交流电要求满足并网的条件。

## 3. 混合型运行模式

所谓混合型光伏发电系统是指在光伏发电的基础上增加一组发电系统，以弥补光伏发电系统受环境变化影响较大造成的发电不足，或电池容量不足等因素带来的供电不连续。较为常见的混合系统是风光互补系统，系统结构框图如图 3-4 所示。

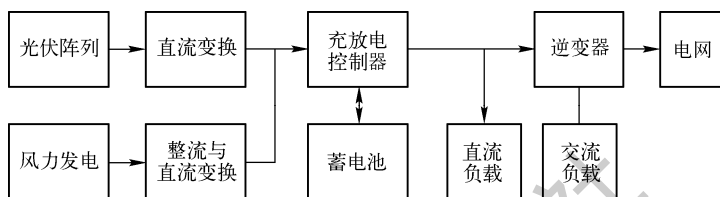


图 3-4 风光互补系统结构框图

通常情况下，白天日照强，夜间风多。风能发电与太阳能发电具有很好的互补性，利用太阳能、风能的互补特性可以产生稳定的输出，提高系统供电的稳定性和可靠性；在保证供电情况下，可以大大减少储能蓄电池的容量；对混合发电系统进行合理的设计和匹配，可以基本上由风/光系统供电，无须启动备用电源和备用发电机，以此获得较好的经济效益。当然，风光互补联合发电系统存在一次性投资较大是一大缺点。

### 3.1.3 光伏逆变器的电路结构

光伏逆变器的电路结构根据有无变压器隔离主要分为隔离型和非隔离型，下面对这两种类型分别讨论。

#### 1. 隔离型光伏逆变器的结构

工频隔离型是光伏逆变器最常用的结构之一，其结构形式如图 3-5 所示。光伏电池输出的电能首先通过 DC/AC 变换器变为工频频率的交流电能，然后再经过工频变压器将这个交流电能变换成具有一定幅值的交流电能，该工频变压器同时完成电压匹配和隔离的作用。采用工频变压器的优点是主电路和控制电路简单，而且光伏阵列与 DC/AC 变换器输入电压的匹配范围较大。使用工频变压器进行电压变换和电气隔离，具有结构简单、可靠性高、抗冲击性能好、安全性能良好等优点。然而，工频变压器体积大的缺点，使得逆变器的外形笨重；此外，工频变压器系统效率较低，损耗了很多电能，不符合节能的要求。早期的逆变器主要采用的就是这种形式，随着电力电子技术的发展，高频隔离型逆变器已经逐渐取代了工频隔离型逆变器。

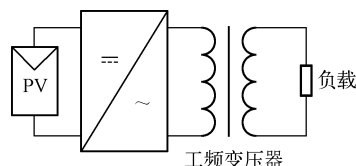


图 3-5 工频光伏逆变器的基本结构

高频隔离型逆变器与工频隔离型逆压器的主要不同点在于前者在前级升压电路使用了高频变压器，取代了后级的工频变压器，其逆变效率大大提高，从而使逆变器的体积和重量大大减小。由于非晶材料、纳米材料等技术的发展，采用这些新材料制作的高频变压器的工作频率

可以做得很高,如图 3-6 所示是一种高频光伏逆变器的结构形式。光伏电池输出的准直流电能通过 DC/AC 变换器转化为高频电能,再通过高频变压器转化为较高电压的交流电能,然后经过 AC/DC 变换和整流滤波,变换为具有较高电压的直流电能,最后再通过 DC/AC 变换为符合一定频率和电压要求的交流电能。高频变压器既有隔离作用又有升压作用,同时提高了逆变器的效率、减小了体积,是逆变器的发展趋势。这种结构同时具有电气隔离和重量轻的优点,而且效率得到了提高。其缺点是功率等级一般较小,所以这种结构集中在 5kW 以下;高频工作的工作频率较高,一般为几十 kHz 或更高,系统存在 EMI 问题;系统的抗冲击性能差。

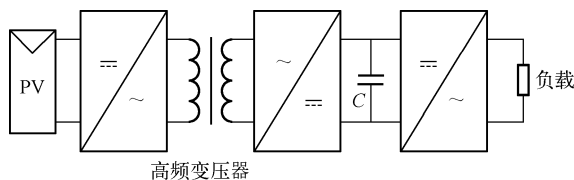


图 3-6 高频光伏逆变器的基本结构

逆变技术正向着频率更高、功率更大、效率更高、体积更小的方向发展。因此,隔离型的两种结构中,高频隔离型是逆变器的发展趋势。

## 2. 非隔离型逆变器的结构

相对于隔离型光伏逆变器,非隔离型光伏逆变器中没有了变压器,避免了变压器电磁转化环节上的能量损耗,进一步提高了光伏发电系统的转化效率。在非隔离系统中,系统的结构变简单、重量变轻,成本也就降低了。非隔离型光伏逆变器又可以分为单级和多级两类,如图 3-7 所示。

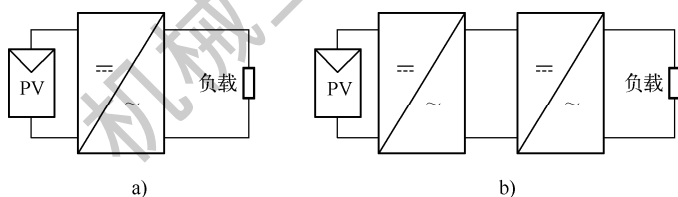


图 3-7 非隔离型的基本结构

a) 单级型 b) 多级型

单级非隔离型光伏逆变器的结构如图 3-7a 所示,逆变器直接将直流电能转化为交流电能。为了使直流侧电压满足逆变交流输出的电压等级,一般是将多个光伏阵列串联,使其具有较高的输出电压,省去了笨重的工频变压器。其特点是效率高、重量轻、结构简单,成本低。但光伏电池板与电网没有电气隔离,光伏电池板两极有电网电压,对人身安全不利,这对于光伏电池组件乃至整个系统的绝缘有较高要求,容易出现漏电现象。

多级非隔离型光伏逆变器的结构如图 3-7b 所示,光伏电池输出的准直流电先经过 DC/DC 转化为较高电压的直流电,再经过 DC/AC 将直流电转化为符合用电设备要求的交流电能。整个系统由 DC/DC 和 DC/AC 两(或多)级功率变换部分组成。由于系统中包含多级功率变换部分,不需要刻意将多个光伏阵列串联在一起,也不需要变换比很高的 DC/AC 变换器,所以在实际应用中多采用多级非隔离型光伏逆变器的结构。由于加入了 Boost 或 Buck/Boost 电路

用于 DC/DC 直流输入电压的提升,所以光伏电池阵列的直流输入电压范围可以很宽,这种结构越来越成为市场的主流。同样,光伏电池板与电网没有电气隔离,光伏电池板两极有电网电压。由于电路中使用了高频 DC/DC, EMC 难度加大。

除了以上两种非隔离型的结构,多 DC/DC (MPPT)、单逆变系统也比较常见。结构如图 3-8 所示。这种结构主要区别于以上两种结构的特点是每一路光伏阵列采用单独 DC/DC 结构。由于具有多个 DC/DC 电路,适合多个不同倾斜面阵列接入,即阵列 1~ $n$  可以具有不同的 MPPT 电压,十分适合应用于分布式光伏发电系统。由于每路光伏阵列单独工作,系统整体的可靠性得到了提高。

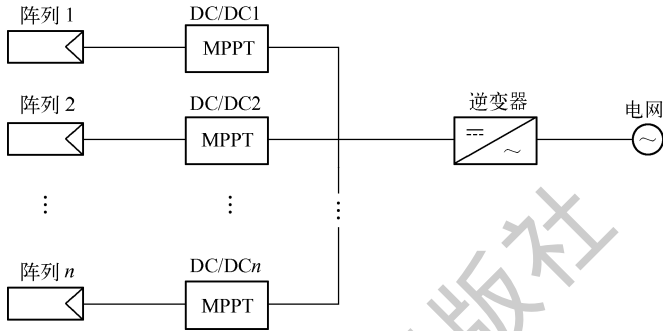


图 3-8 多 DC/DC (MPPT)、单逆变系统结构

### 3.1.4 光伏逆变器的主要技术指标

合格的逆变器需要有许多重要指标,主要的技术指标如下。

#### 1. 输出电压的稳定性

在独立型光伏系统中,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 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  $\pm 10\%$ 。

在并网型光伏发电系统中,光伏电池输出的电压受环境的影响而发生变化,此时同样要求逆变器要输出稳定的交流电能。

#### 2. 输出电压的波形失真度

对正弦波逆变器,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,其值应不超过 5% (单相输出允许 10%)。由于逆变器输出的高次谐波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。

#### 3. 额定输出频率

对于包含电动机之类的负载,如洗衣机、电冰箱等,由于其电动机最佳频率工作点为 50Hz,频率过高或者过低都会造成设备发热,降低系统运行效率和使用寿命,所以逆变器的输出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。

#### 4. 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，同时光伏系统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。

#### 5. 逆变器效率

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。一般情况下，光伏逆变器的标称效率是指纯阻负载，80%负载情况下的效率。由于光伏系统总体成本较高，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85%~96%之间，对小功率逆变器，要求其效率不低于90%。在实际的光伏发电系统中，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。

#### 6. 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。

#### 7. 保护措施

一款性能优良的逆变器，应具有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。

#### 8. 起动特性

起动特性表征逆变器带负载起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起动。

#### 9. 噪声

电力电子设备中的变压器、滤波电感、电磁开关及风扇等部件均会产生噪声。逆变器正常运行时，其噪声应不超过80dB，小型逆变器的噪声应不超过65dB。

## 3.2 光伏逆变器的基本工作原理

逆变器主要由晶体管、MOS晶体管、IGBT等开关器件构成，通过有规则地使开关器件重复开-关（ON-OFF），从而实现直流输入到交流输出。当然，这样单纯地由开和关回路产生的逆变器输出波形并不实用。一般需要采用高频脉宽调制（High Pulse Width Modulation, HPWM），使靠近正弦波两端的电压宽度变窄，正弦波中央的电压宽度变宽，并在半周期内始终让开关器件按一定频率朝一个方向动作，这样就形成一个脉冲序列（拟正弦波），然后让脉冲通过简单的滤波器输出正弦波。要使逆变器的输出满足要求，还需要在逆变器的控制中采用闭环控制。在独立型的逆变器中，负载变化时，需要输出电压稳定。在并网逆变器中，逆变器需要实现对电网电压锁相跟踪。因此，逆变器的控制是整个系统的关键。

### 3.2.1 单相逆变器

根据逆变器输出类型的不同，可以分为电压源逆变器和电流源逆变器。单相逆变器在独立运行状态中主要应用类型为电压源逆变器。电压源逆变器是通过控制输出电压将直流电能

转变为交流电能，是逆变技术中最为常见的一种，下面从单相电压源逆变器入手，介绍逆变器的主要原理。将一个直流电能转换成交流电能，有多种方式，但至少应使用两个功率开关器件，单相逆变器有推挽式、半桥式、全桥式 3 种电路拓扑。如果每半个工频周期内只输出一个脉冲，称其为方波逆变器。如果每半个周期内有多个脉宽，并且脉冲宽度符合正弦波调制（SPWM）规律，则称其为正弦波脉宽调制输出。下面介绍 3 种电路拓扑的工作原理。

### 1. 推挽式逆变器

图 3-9 是单相推挽式逆变器的拓扑，该电路由两只共负极的功率开关器件和一个一次带有中心抽头的升压变压器组成。

电路驱动波形如图 3-10 所示，若交流负载为纯阻性负载，当  $t_1 \leq t \leq t_2$  时，VF<sub>1</sub> 功率管加上栅极驱动信号  $u_{g1}$ ，VF<sub>1</sub> 导通、VF<sub>2</sub> 截止，变压器输出端感应出正电压；当  $t_3 \leq t \leq t_4$  时，VF<sub>2</sub> 功率管加上栅极驱动信号  $u_{g2}$ ，VF<sub>2</sub> 导通、VF<sub>1</sub> 截止，变压器输出端感应出负电压。

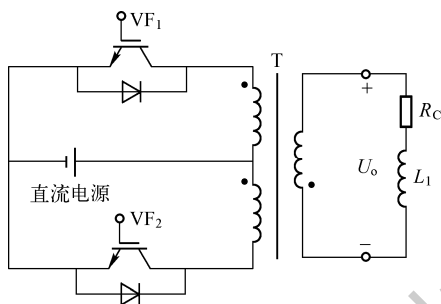


图 3-9 单相推挽式逆变器的拓扑

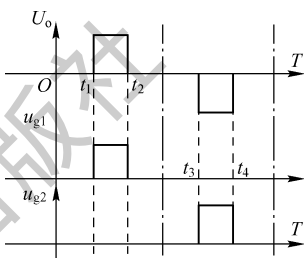


图 3-10 电路驱动波形

若负载为感性负载，则变压器内的电流波形连续，输出电压、电流波形如图 3-11 所示，推挽逆变器的输出只有两种状态  $U_o$  和  $-U_o$ ，实质上是双极性调制，可通过调节 VF<sub>1</sub> 和 VF<sub>2</sub> 的占空比来调节输出电压。

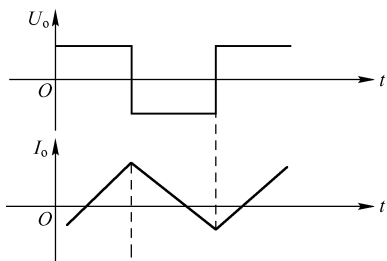


图 3-11 输出电压、电流波形

推挽式方波逆变器的电路拓扑简单，两个功率管可共地驱动，但功率管承受开关电压两倍的直流电压，因此适合应用于直流母线电压较低场合。另外，变压器的效率较低，驱动感性负载困难。

### 2. 半桥式逆变器

半桥式逆变电路的拓扑如图 3-12 所示，两只串联电容的中点作为参考点，负载连接在直流电源中点和两个桥臂联结之间。

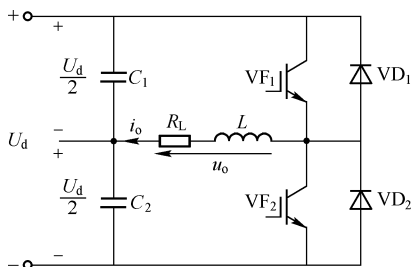


图 3-12 半桥式逆变电路的拓扑

当开关器件  $VF_1$  导通时, 电容  $C_1$  上的能量释放到负载  $R_L$  上, 而当  $VF_2$  导通时, 电容  $C_2$  上的能量释放到负载  $R_L$  上,  $VF_1$  和  $VF_2$  轮流导通时在负载两端获得了交流电能, 半桥逆变电路在功率开关器件不导通时承受直流电源电压  $U_d$ , 由于电容  $C_1$  和  $C_2$  两端的电压均为  $U_d/2$  (假设  $C_1=C_2$ ), 因此功率开关器件  $VF_1$  和  $VF_2$  承受的电流为  $2I_d$ 。

半桥型逆变器的工作波形如图 3-13 所示, 开关器件  $VF_1$  和  $VF_2$  的栅极信号在一个周期内各有半周正偏、半周反偏, 且两者互补。输出电压  $u_o$  为矩形波, 其幅值为  $U_m=U_d/2$ 。

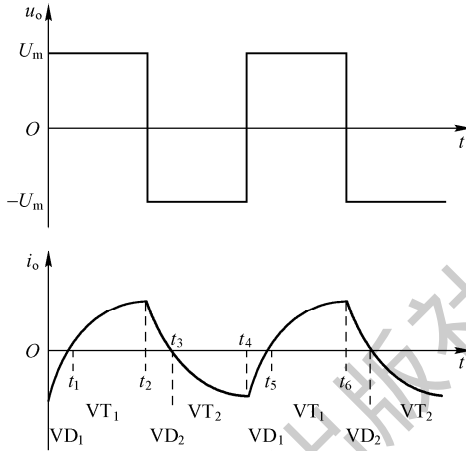


图 3-13 半桥型逆变器的工作波形

当电路带感性负载时,  $t_2$  时刻给  $VF_1$  关断信号, 给  $VF_2$  开通信号, 则  $VF_1$  关断, 但感性负载中的电流  $i_o$  不能立即改变方向, 于是  $VD_2$  导通续流, 当  $t_3$  时刻  $i_o$  降零时,  $VD_2$  截止,  $VF_2$  导通,  $i_o$  开始反向, 由此得出如图 3-13 所示的电流波形。  $VF_1$  或  $VF_2$  导通时,  $i_o$  和  $u_o$  同方向, 直流侧向负载提供能量;  $VD_1$  或  $VD_2$  导通时,  $i_o$  和  $u_o$  反向, 电感中储能向直流侧反馈。  $VD_1$ 、 $VD_2$  称为反馈二极管, 它又起着使负载电流连续的作用, 又称续流二极管。

半桥型逆变电路结构简单, 由于两只串联电容的作用, 不会产生磁偏或直流分量, 非常适合后级带动变压器负载, 当该电路工作在工频 (50Hz) 时, 电容必须选取较大的容量, 使电路的成本上升, 因此该电路主要用于高频逆变场合。其优点是简单, 使用器件少。缺点是输出交流电压的幅值  $U_m$  仅为  $U_d/2$ , 且直流侧需要两个电容器串联, 工作时还要控制两个电容器电压的均衡。因此, 半桥电路常用于几千瓦及以下的小功率逆变电源。

### 3. 单相全桥逆变器

单相全桥逆变电路也称为“H 桥”电路, 其电路拓扑如图 3-14 所示, 由两个半桥电路组成。以  $180^\circ$  方波为例说明单相全桥电路的工作原理, 功率开关器件  $VF_1$  与  $VF_4$  互补,  $VF_2$  与  $VF_3$  互补, 当  $VF_1$  与  $VF_3$  同时导通时, 负载电压  $U_o=U_d$ ; 当  $VF_2$  与  $VF_4$  同时导通时, 负载两端  $U_o=-U_d$ ,  $VF_1$ 、 $VF_3$  和  $VF_2$ 、 $VF_4$  轮流导通, 负载两端就得到交流电能。

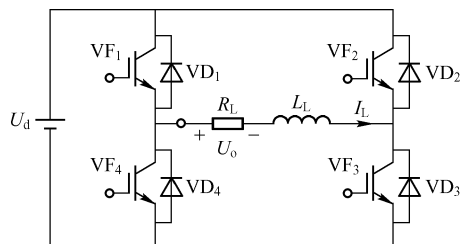


图 3-14 单相全桥逆变电路拓扑

如图 3-15 所示的全桥输出电压、电流波形, 假设负载具有一定电感, 即负载电流落后

于电压 $\phi$ 角度,在 $VF_1$ 、 $VF_3$ 功率管栅极加上驱动信号时,由于电流的滞后,此时 $VD_1$ 、 $VD_3$ 仍处于导通续流阶段,当经过 $\phi$ 角度时,电流过零,电源向负载输送有功功率,同样当 $VF_2$ 、 $VF_4$ 加上栅极驱动信号时 $VD_2$ 、 $VD_4$ 仍处于续流状态,此时能量从负载馈送回直流侧,再经过 $\gamma$ 电角度后, $VF_2$ 、 $VF_4$ 才真正流过电流。

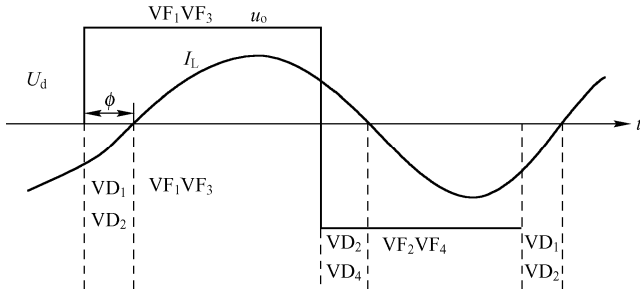


图 3-15 全桥输出电压、电流波形

单相全桥电路上述工作状况下 $VF_1$ 、 $VF_3$ 和 $VF_2$ 、 $VF_4$ 分别工作半个周期,其输出电压波形为 $180^\circ$ 的方波,事实上这种控制方式并不实用,因为在实际的逆变电源中输出电压是需要可以控制和调节的。

下面介绍输出电压的调节方法——移相调压法和脉宽调压法。

### 3.2.2 输出电压的调节方法

#### 1. 移相调压法

图 3-16 为移相控制原理, $VF_1$ 、 $VF_4$ 互补, $VF_2$ 、 $VF_3$ 互补,且均为 $180^\circ$ 方波信号,但 $VF_1$ 、 $VF_4$ 桥臂所加的方波与 $VF_2$ 、 $VF_3$ 桥臂所加的方波相位错开 $\phi$ 角度,假设负载功率因数在 $0\sim 1$ 之间,且电流滞后于电压某一角度,则移相电路可分为 6 个不同的工作时段:

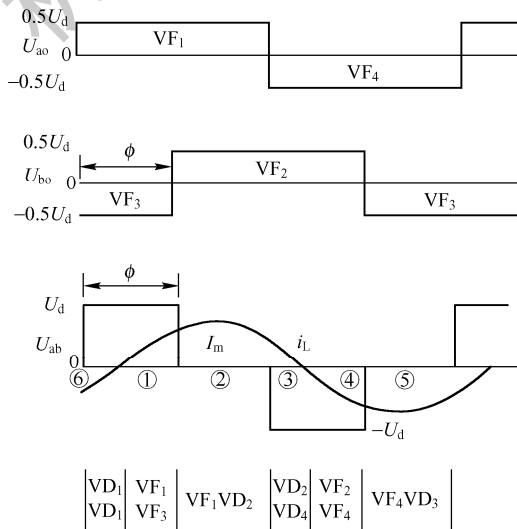


图 3-16 移相控制原理

第1时段：有功输出模式，输出电压电流均为正， $VF_1$ 、 $VF_3$  导通。

第2时段：续流模式，电压为零但电流为正， $VF_1$ 、 $VF_2$  导通。

第3时段：回馈模式，电压为负但电流为正， $VD_2$ 、 $VD_4$  导通。

第4时段：有功输出模式，电压为负电流为负， $VF_2$ 、 $VF_4$  导通。

第5时段：续流模式，电压为零但电流为负， $VF_4$ 、 $VF_3$  导通。

第6时段：回馈模式，电压为正但电流为负， $VD_1$ 、 $VD_3$  导通。

根据移相调压原理可知，改变 $\phi$ 的大小就可以调节输出电压。

## 2. 脉宽调节法

脉宽调节的控制波形如图 3-17 所示，用一个幅值为  $U_r$  的直流参考电平与幅值为  $U_c$  的三角波载波信号进行比较，得到  $VF_1$ 、 $VF_3$  和  $VF_2$ 、 $VF_4$  的基极驱动信号，其中  $VF_1$  和  $VF_4$  互补。当  $U_c$  在  $0\sim 1$  范围内变化时，脉冲宽度可在  $0\sim 180^\circ$  范围内变化，从而改变输出电压  $U_o$ 。图 3-14 所示的控制方式中“H 桥”斜对角的功率开关同时导通和关断，4 个功率开关在  $\left[0, \frac{\pi}{2} - \frac{\theta}{2}\right]$  区间、 $\left[\frac{\pi}{2} - \frac{\theta}{2}, \frac{\pi}{2} + \frac{\theta}{2}\right]$  区间、 $\left[2\pi - \frac{\theta}{2}, 2\pi\right]$  区间均不导通，在这种情况下若负载功率因数在  $0\sim 1$  之间，续流二极管将完成部分能量从负载回馈至直流侧的作用，这种工作方式中输出只有 1、-1 两种状态，称之为双极性调制；与之相反的单极性调制法是保证输出具有 1、0、-1 三种状态，该方法将在后续章节中详细讨论。

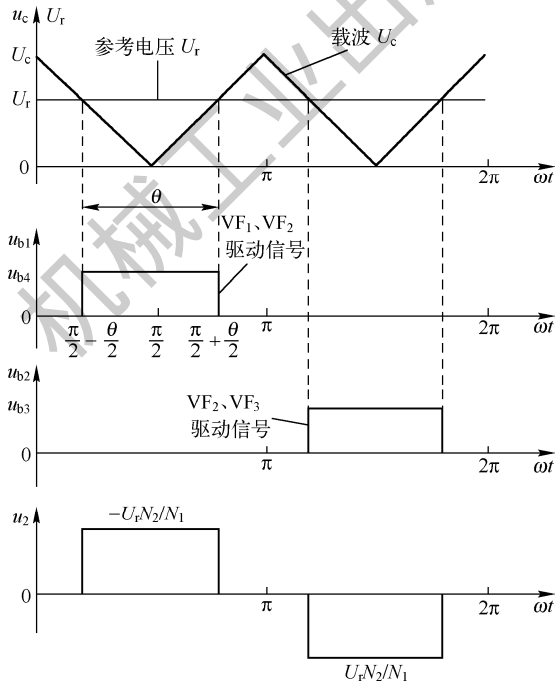


图 3-17 脉宽调节的控制波形

## 3.2.3 三相逆变器

单相逆变器由于受到功率器件容量、中性线（俗称零线）电流、电网负载平衡要求和用

电负载的性质（如三相交流异步电动机等）的限制，其容量一般都在  $100\text{kV}\cdot\text{A}$  以下，大容量的逆变电路多采用三相形式，三相逆变器按照直流电源的性质分为三相电压型逆变器和三相电流型逆变器。

### 1. 三相电压型逆变器

图 3-18 所示为三相电压型逆变器的基本电路。图中标示出了直流电压源的中性点，在大部分应用中并不需要该中性点。 $S_1\sim S_6$  采用 GTO、GTR、IGBT、MOSFET 等自关断器件， $VD_1\sim VD_6$  是与  $S_1\sim S_6$  反并联的二极管，其作用是感性负载提供续流回路。图中， $L$  和  $R$  为负载相电感和相电阻。

#### (1) 三相电压型方波逆变器

在图 3-18 中，开关器件  $S_1\sim S_6$  的使用开关频率较低，一般适宜做  $0\sim 400\text{Hz}$  方波逆变。与其反并联的续流二极管，可采用普通整流二极管。在该电路中，当控制信号为三相互差  $120^\circ$  的方波信号时，可以控制每个开关导通  $180^\circ$ 。同一相（即同一半桥）上、下两臂交替导电，各相开始导电的角度差为  $120^\circ$ ，任一瞬间有 3 个桥臂同时导通。每次换相都是在同一相上、下两臂之间进行，也称为纵向换相。驱动脉冲波形如图 3-19 所示。

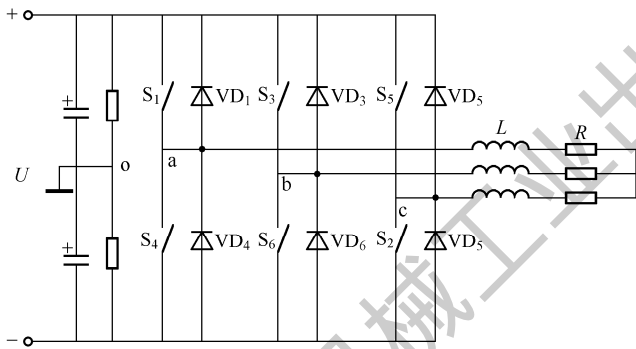


图 3-18 三相电压型逆变器的基本电路

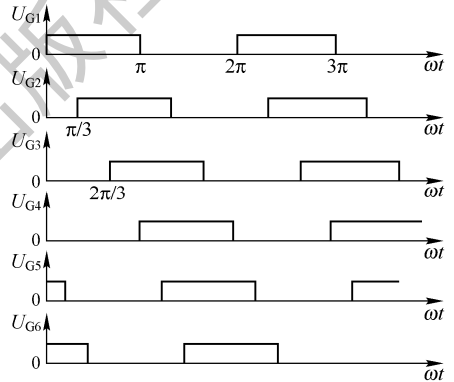


图 3-19 驱动脉冲波形

由图 3-19 可见，逆变桥中 3 个桥臂上部 and 下部开关器件以  $180^\circ$  间隔交替开通和关断， $S_1\sim S_6$  以  $60^\circ$  的相位差依次开通和关断，在逆变器输出端形成 a、b、c 三相电压。逆变输出电压波形与电路接法和“导通型”有关，但不受负载影响。在  $0 < \omega t \leq \pi/3$  期间，开关器件  $S_1$  和  $S_5$  及  $S_6$  被施加正向驱动脉冲而导通。负载电流经  $S_1$  和  $S_5$  被送到 a 和 c 相绕组；然后经 b 相负载和开关  $S_6$  流回电源。在  $\omega t = \pi/3$  时刻， $S_5$  的驱动脉冲下降到零电平， $S_5$  迅速关断，由于感性负载电流不能突变，c 相电流将由与  $S_2$  反并联的二极管  $VD_2$  提供，c 相负载电压被钳位到零电位。其他两相电流通路不变。当  $S_5$  被关断时，不能立即导通  $S_2$ ，以防止  $S_5$  没完全关断而出现同一桥臂的两个器件  $S_5$ 、 $S_2$  同时导通造成短路，必须保证在一段时间  $t$ ，在该时间内同一桥臂的两个器件都不通，称之为死区时间或互锁延迟时间。经互锁延迟时间  $t$  后，与  $S_5$  同一桥臂的下部器件  $S_2$  被施加正向驱动脉冲而导通。当  $VD_2$  中续流结束时（续流时间取决于负载电感和电阻值），c 相电流反向经  $S_2$  流回电源。此时负载电流由电源送出，经  $S_1$  和 a 相负载，然后分流到 b 和 c 相负载，分别经  $S_6$  和  $S_2$  流回电源。在  $\omega t = 2\pi/3$  时刻， $S_6$  的驱动脉冲由高电平下降到零使  $S_6$  关断，b 相电流由  $VD_3$  续流。 $S_6$  关断

后经互锁延迟时间  $t$ ，同一桥臂上部器件  $S_3$  被施加正向驱动脉冲而导通。当续流结束时，b 相电流改变方向由  $S_3$  流入 b 相负载。此时电流由电源送出，经  $S_1$  和  $S_3$  及 a、b 相负载汇流到 c 相。类似地，可以分析整个周期中各管的运行工况。各相输出的波形如图 3-20 所示。

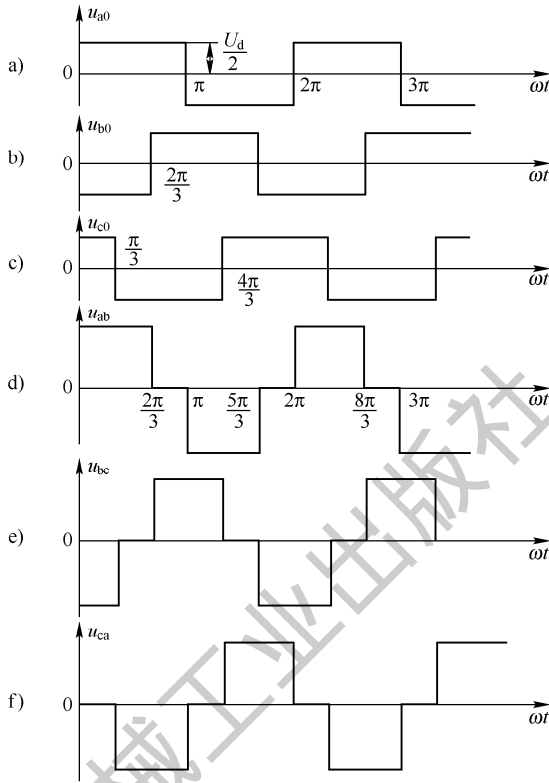


图 3-20 各相输出的波形

把输出相电压展开成傅里叶级数得

$$\begin{cases} u_{a0} = \frac{2U_d}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin n\omega t & (n = 1, 3, 5, \dots) \\ u_{b0} = \frac{2U_d}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin n(\omega t - 120^\circ) \\ u_{c0} = \frac{2U_d}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin n(\omega t + 120^\circ) \end{cases}$$

线电压为

$$\begin{cases} u_{ab} = u_{a0} - u_{b0} \\ u_{bc} = u_{b0} - u_{c0} \\ u_{ca} = u_{c0} - u_{a0} \end{cases}$$

线电压展开为傅里叶级数为

$$u_{ab} = \frac{4U_d}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cos \frac{n\pi}{6} \sin n \left( \omega t + \frac{\sqrt{6}}{\pi} \right) \quad n=1,3,5,\dots$$

$$u_{bc} = \frac{4U_d}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cos \frac{n\pi}{6} \sin n \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$u_{ca} = \frac{4U_d}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cos \frac{n\pi}{6} \sin n \left( \omega t - \frac{7\pi}{6} \right)$$

线电压基波有效值为

$$u_{a1b1} = \frac{4U_d}{\pi} \frac{1}{\sqrt{2}} \cos \frac{\pi}{6} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} U_d$$

线电压平均值为  $\frac{2}{3}U_d$ ，有效值为  $\sqrt{\frac{2}{3}}U_d$ 。

## (2) 三相电压型 SPWM 逆变器

在图 3-19 所示电路中，开关器件用 GTR、IGBT、MOSFET 等开关频率较高的功率器件。以 a 相桥臂为例，在  $0 < \omega t \leq \pi$  期间，对开关器件  $S_1$  施加如图 3-21b 所示脉宽调制驱动波形，开关器件  $S_4$  驱动信号为零。在  $\pi < \omega t \leq 2\pi$  期间，对功率器件  $S_4$  施加如图 3-21c 所示脉宽调制波形，而  $S_1$  驱动信号为零，即将 6 个功率器件方波信号置换为每半周期  $n$  个脉冲宽度按正弦规律变化的系列方波信号，即可构成三相电压型 SPWM 逆变器。与方波逆变器不同之处是，在正弦波调制的半个周期内，方波逆变器是连续导通的，而 SPWM 逆变器要分别导通和关断  $n$  次。

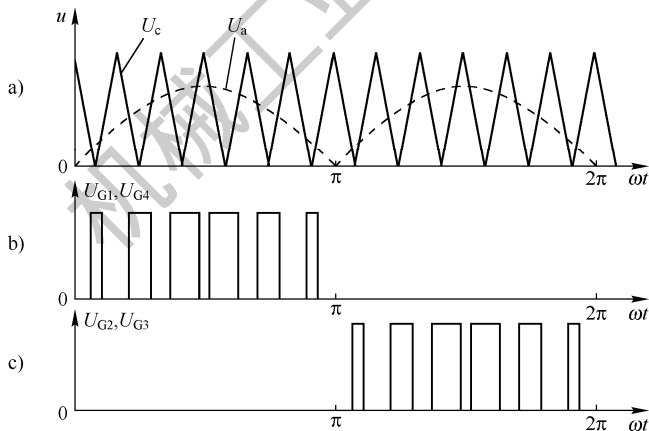


图 3-21 脉宽调制驱动波形

## 2. 三相电流型逆变器

前文讨论的逆变电路中的输入直流能量由一个稳定的电压源提供，称之为电压型逆变器，其特点是逆变器在脉宽调制时的输出电压的幅值等于电压源的幅值，而电流波形取决于实际的负载阻抗。

在电流型逆变器中，有两种不同的原理可用于控制基波电流的幅值，一种是直流电流型的幅值变化法，这种方法使得交流侧的电流控制简单，另一种方法是用脉宽调制来控制基波电流，这种方法控制电流输出更加精准。

电流型逆变器非常适合于并网型应用，电流型逆变器有如下特点：

- 1) 直流侧接有较大的滤波电感。
  - 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。
  - 3) 在逆变器的桥式电路中，与功率开关器件串联的是反向阻断二极管。
- 电路结构如图 3-22 所示。

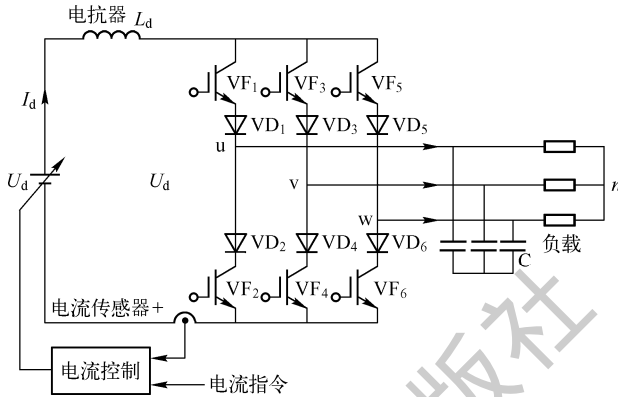


图 3-22 三相电流型逆变器的电路结构

电流型逆变器的电源即直流电流源是利用可变电压的电源通过电流反馈控制来实现的。该电源通常采用他励式正变换器或者自励式正变换器。但是，仅仅用电流反馈，不能减小因开关动作形成的逆变器输入电压  $U_d$  的脉动而产生的电流脉动，所以，要与电源串联电抗器  $L_d$ 。电流型逆变器的各个开关流过的电流是单方向的（零或者正），但加在开关上的电压是双向的。因此，电流型逆变器的开关，采用与晶体管（其他的自关断型器件也可以）串联二极管的形式。

### 3.3 习题

1. 画出光伏逆变器的基本结构。
2. 描述集中式逆变器与组串式逆变器的相同点与不同点？
3. 描述工频逆变器与高频逆变器的优缺点？
4. 画出推挽式逆变器的原理拓扑图，并画出驱动电路的控制波形图。
5. 画出全桥式逆变器的拓扑结构图，并画出其移相控制波形图。
6. 画出三相逆变器的基本原理图，并画出其驱动波形图。