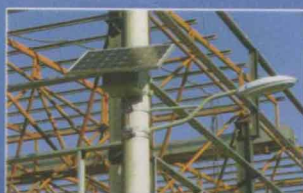


光伏发电技术 及其应用

魏学业 王立华 张俊红 谷建柱 惠子南 编著



瞄准前沿 探索光伏科技前沿，把握太阳能应用技术

内容系统 系统介绍光伏电池、光伏逆变器的基本原理和应用实例

立足基础 涵盖了光伏发电的基础知识和设计思想

面向应用 给出了实用的仿真和设计解决方案



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



光伏发电技术及其应用

魏学业 王立华 张俊红 谷建柱 惠子南 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。

图书在版编目(CIP)数据

光伏发电技术及其应用 / 魏学业等编著. —北京: 机械工业出版社, 2013.7

ISBN 978-7-111-43462-7

I. ①光… II. ①魏… III. ①太阳能发电 IV. ①TM615

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第170102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 王 荣

责任印制: 张 楠

唐山丰电印务有限公司印刷

2013年8月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·15.75印张·392千字

0001—3000册

标准书号: ISBN 978-7-111-43462-7

定价: 39.80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

社服务中心: (010) 88361066

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

经济的发展和人们生活水平的提高,导致了化石能源的过度消耗,并伴随着生态环境的日益恶化,迫使世界各国大力推动可再生能源的开发和利用。太阳能光伏电池和光伏发电技术的不断进步,以及太阳能取之不尽、用之不竭、清洁无污染等特点,使太阳能成为替代化石能源最重要的新能源之一。

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技术与实际应用相结合,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。本书还得到了江苏省产学研联合创新资金(项目编号:BY2013068)和北京市教育委员会科技计划面上项目——建筑集成光伏系统并网逆变器的建模与控制研究(编号:KM201310016014)的资助。

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	4
1.2 逆变器的基本知识	5
1.2.1 逆变器的基本概念	6
1.2.2 光伏逆变器的分类	6
1.2.3 光伏逆变器的参数	8
1.3 逆变器的发展现状	11
1.3.1 普通逆变器的发展现状	11
1.3.2 微型逆变器的发展现状	14
1.4 光伏发电系统	17
1.4.1 独立光伏系统	18
1.4.2 并网光伏系统	19
第 2 章 光伏电池	21
2.1 光伏电池的分类、结构和发电原理	21
2.1.1 光伏电池的分类	21
2.1.2 光伏电池的结构	21
2.1.3 光生电流的产生过程	22
2.2 光伏效应	23
2.2.1 光伏电池的伏安曲线	23
2.2.2 电阻效应	24
2.2.3 其他效应	25
2.3 光伏电池板	26
2.4 互联效应	27
2.4.1 组件电路的设计	27
2.4.2 错配效应	28
2.4.3 串联电池的错配	29
2.4.4 旁路二极管	30
2.4.5 并联电池的错配	32
2.4.6 光伏阵列中的错配效应	33
2.5 局部阴影特性	34

2.5.1	双二极管模型	34
2.5.2	外部环境对输出特性的影响	35
2.5.3	电池连接方式对输出特性的影响	37
第 3 章	光伏逆变器的结构与原理	41
3.1	光伏逆变器的结构	41
3.1.1	光伏发电系统的基本构成	41
3.1.2	光伏发电系统的运行模式	44
3.1.3	光伏逆变器的电路结构	45
3.1.4	光伏逆变器的主要技术指标	47
3.2	光伏逆变器的基本工作原理	48
3.2.1	单相逆变器	48
3.2.2	输出电压的调节方法	51
3.2.3	三相逆变器	52
第 4 章	光伏逆变器的脉宽调制技术	57
4.1	PWM 的基本原理	57
4.2	PWM 方式的谐波含量评价指标	58
4.3	PWM 模式	58
4.3.1	单极性 PWM 模式	58
4.3.2	双极性 PWM 模式	59
4.4	正弦波脉宽调制技术	59
4.4.1	单相单极性 SPWM	60
4.4.2	单相双极性 SPWM	61
4.5	SPWM 实现方案	61
4.5.1	计算法和调制法	63
4.5.2	异步调制和同步调制	65
4.5.3	自然采样和规则采样法	67
4.5.4	PWM 逆变电路的谐波分析	73
4.5.5	PWM 跟踪控制技术	74
第 5 章	带高频环节的光伏逆变技术	78
5.1	概述	78
5.2	高频 DC/DC 变换器	78
5.2.1	非隔离型直流斩波器	78
5.2.2	隔离型 DC/DC 变换器	81
5.3	后级 DC/AC 逆变器	85
5.3.1	DC/AC 逆变器的等效模型	85
5.3.2	逆变器并网控制模型	87
5.3.3	光伏逆变器的输出控制	88
5.3.4	输出滤波参数的设计	91

第 6 章	光伏逆变器相关技术	93
6.1	软开关技术	93
6.1.1	硬、软开关方式及开关过程器件损耗	93
6.1.2	软开关电路的分类	96
6.1.3	典型的软开关电路	98
6.1.4	软开关技术的发展趋势	105
6.2	逆变器并联运行技术	106
6.2.1	逆变器并联运行控制模式	106
6.2.2	逆变器并联运行条件	109
6.2.3	逆变器并联均流控制方法	110
6.2.4	逆变器并联的环流分析与抑制	112
6.2.5	逆变器并联的同步控制	114
6.3	逆变器的多重叠加技术	115
6.3.1	移相多重叠加法	115
6.3.2	多重叠加法的基本原理	116
6.3.3	两个单相桥式逆变器的串联叠加	117
6.3.4	三个单相桥式逆变器的串联叠加	120
6.4	逆变器的多电平变换技术	122
6.4.1	二极管钳位型三电平变换	122
6.4.2	飞跨电容型多电平逆变器	124
6.4.3	级联型多电平逆变器	125
6.4.4	多电平调制策略的研究现状	128
第 7 章	光伏逆变器的最大功率点跟踪技术	130
7.1	光伏模块的最大功率跟踪原理	130
7.1.1	影响光伏模块 MPP 的因素	130
7.1.2	MPPT 的基本原理	132
7.1.3	MPPT 的研究现状	133
7.2	传统的最大功率点跟踪技术	134
7.2.1	恒定电压法	134
7.2.2	电导增量法	135
7.2.3	扰动观测法	136
7.2.4	改进的扰动观测法	140
7.3	智能 MPPT 技术	145
7.3.1	模糊逻辑控制法	145
7.3.2	人工神经网络控制法	149
7.4	局部阴影环境下的最大功率点跟踪	153
7.4.1	局部功率点的产生原理	154
7.4.2	局部阴影条件下的 MPPT 方法	156

第 8 章	光伏逆变电源的仿真技术	161
8.1	PSIM 简介	161
8.1.1	软件界面	162
8.1.2	菜单栏和工具栏 PSIM 主窗口	162
8.1.3	基本使用	168
8.2	光伏电池模型仿真	171
8.2.1	光伏电池模型	171
8.2.2	光伏模块 $I-U$ 仿真	173
8.3	最大功率点跟踪仿真	175
8.4	光伏逆变电源的仿真	178
第 9 章	并网逆变器的孤岛效应与检测方法	181
9.1	孤岛效应的产生机理及危害	181
9.1.1	孤岛效应的定义	181
9.1.2	孤岛效应发生的机理	181
9.1.3	孤岛效应的危害	184
9.2	孤岛检测标准及发展现状	185
9.2.1	孤岛检测标准	185
9.2.2	孤岛检测方法研究现状	187
9.3	被动式孤岛检测方法	188
9.3.1	过/欠电压和高/低频率检测法	188
9.3.2	电压相位突变检测法	191
9.3.3	电压谐波检测法	193
9.4	主动式孤岛检测方法	194
9.4.1	频率偏移检测法	194
9.4.2	周期性检测法	196
9.4.3	滑膜频率漂移法	198
9.4.4	自动相位偏移法	201
第 10 章	光伏逆变器设计实例	204
10.1	逆变器的电路结构及设计要求	204
10.1.1	逆变器的电路构成	204
10.1.2	逆变器设计的技术要求	205
10.2	离网光伏逆变器的设计	206
10.2.1	纯正弦逆变器的设计	206
10.2.2	高频直流升压电路设计	207
10.2.3	DC/AC 逆变电路设计	212
10.2.4	系统仿真和结果分析	215
10.3	并网型光伏逆变器	218
10.3.1	并网逆变器的结构和工作原理	218

10.3.2	DC/DC 级电路的 MPPT 实现	222
10.3.3	孤岛检测方法	224
10.3.4	DC/AC 的控制方案	225
10.4	微型逆变器的组成及其工作原理	228
10.4.1	微型逆变器硬件电路设计	229
10.4.2	微型逆变器的控制策略	234
10.4.3	系统仿真及实验结果分析	238
10.5	离/并网双模式逆变器	241
参考文献		242

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，取得了良好的社会效益。在国际市场的带动下，我国太阳能光伏产业也得到了快速发展，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。从发展趋势来看，太阳能光伏发电已成为技术可行、经济合理、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，地球上所有的动物（包括人类）和植物的生存都依赖于太阳能。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、树阴等存在阴影，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，成为了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多的技术。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,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了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,但光伏电池价格昂贵、系统转换效率低(10%~15%)、没有形成规模化等因素制约着光伏发电的发展。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,随着相关技术进步和产业规模的不断扩大,以及光伏组件制造工艺的提高,光伏组件的价格下降较快,太阳能光伏发电的成本在不断下降,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。随着国家一系列扶持和优惠政策的出台,我国光伏产业的发展与应用即将进入快速增长时期,并逐步在技术和成本上形成较大优势。

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年代的环境污染问题,激发了人们对光伏发电技术的研究热情,从而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。

2000年以来,全球光伏产业连续6年以30%以上的速度增长。2002年全球光伏电池产量为560MW,2003年已高达750MW,增长了34%。2004年开始,德国对《可再生能源法》进行了修订,促使了德国光伏市场的爆发,随之而来的是发达国家新一轮的政策热潮和全球光伏市场的更高速膨胀。2004年全球光伏电池年产量达到1256MW,年增长率高达68%,2005年产量达到1818MW,增长率仍有45%。2006年,美国加州提出了要在加州实施“百万个太阳能屋顶计划”,在未来10年内建设3000MW光伏发电系统的提案,这象征着美国光伏政策新纪元的到来。正是由于欧洲诸多发达国家、日本和美国强有力的政策推动,全球太阳能光伏发电系统市场才呈现出欣欣向荣的景象。太阳能光伏发电的前景广阔,同时也带来了光伏电池的价格下降(见表1-1),以及装机容量的增加(见图1-1)。

近10年来,全球光伏电池年产量增长约6倍,年均增长50%以上。2011年,全球光伏电池年产量为37.2GW,其中我国年产量为4000万kW。到2011年,全球光伏发电总装机容量超过220000万kW,主要应用市场在德国、西班牙、日本、意大利。随着太阳能光伏发电规模、转换效率和工艺水平的提高,全产业链的成本快速下降。光伏电池组件价格已经从2008年3美元/W下降到2012年的0.48美元/W以下,太阳能光伏发电的经济性明显提高。

美国和欧盟不少发达国家将太阳能光伏发电作为可再生能源的重要领域,制定了长远的发展目标。到2020年,欧盟太阳能发电总装机容量将超过9000万kW,其中德国光伏发电总装机容量将达到5100万kW,西班牙光热发电将达到1000万kW。欧盟启动了“欧洲沙漠行动”,计划在撒哈拉沙漠建设大规模太阳能电站向欧洲电力负荷中心输电。同时,德国、西班牙、美国等均制定专门法律支持可再生能源的发展。欧盟各国普遍通过优惠上网电价政策支持太阳能发电等可再生能源电力的发展,美国通过税收减免和初投资补贴等政策支持太阳能发电发展。

表 1-1 世界光伏电池产量和价格变化情况

年份	基本数据	世界光伏总产量	中国光伏发电平均价格/(元/kW·h)
2012		52.5GW	1.15
2011		37.2GW	1.4
2010		27.4GW	1.7
2009		20GW	2.05
2008		7.9GW	4.0
2007		3.436GW	4.5
2006		2.204GW	5.0
2005		1.759GW	6.5
2004		1.2GW	6.5
2003		760MW	
2002		540MW	
2001		396MW	
2000		287MW	

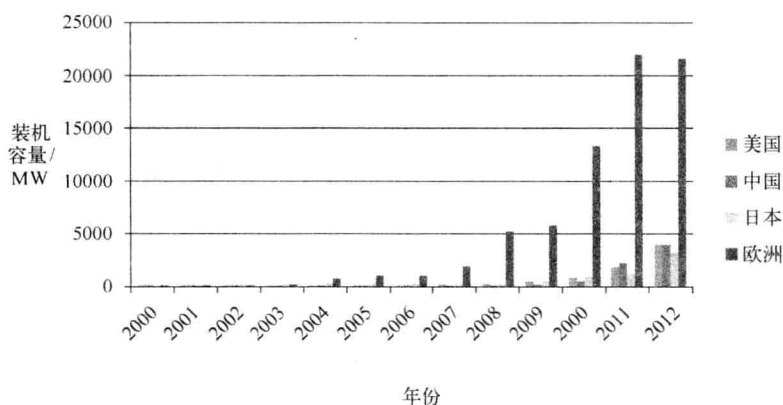


图 1-1 世界各国光伏发电年装机容量汇总表

综上所述，世界光伏发电产业的高速发展主要表现在以下几方面。

1. 光伏电池产量持续增长

多年来光伏产业一直是世界增长速度最高和最稳定的领域之一，2000~2011年间，光伏电池产量以年均增长率超过40%的速度高速发展，光伏电池的产量从2000年的287MW增加到2011年的37200MW，增长了近130倍。

2. 生产规模不断扩大

我国2012年光伏电池的生产目标是1.35GW，而实际到2012年年底能生产出1.8GW的光伏电池。德国光伏企业Q-cells是欧洲最大的光伏电池专业生产商，2011年产出排名全球第四位，2012年的生产目标是1.1GW。

3. 光伏市场飞速膨胀

相比于2008年，2009年世界光伏市场增长了15%，光伏系统累计安装量也比同期增长了45%，达到20GW。到2011年，装机容量达到了21.9GW。

4. 新技术不断出现, 电池效率不断提高

随着自动化程度和生产技术水平的提高, 电池效率正由现在的水平(单晶硅 16%~18%, 多晶硅 14%~17%)向更高水平(单晶硅 18%~20%, 多晶硅 16%~18%)发展。

5. 太阳能发电技术多元化发展

光伏发电和光热发电具有不同的技术特点。晶体硅光伏电池、薄膜光伏电池技术以及塔式、槽式、碟式等光热发电技术, 都各自具有不同的技术优势, 太阳能发电将呈现出多元化技术路线和发展趋势。有效的市场竞争将会促进太阳能发电技术不断进步和成本持续下降, 并形成各类太阳能发电技术互为补充、共同发展的格局。

6. 太阳能发电逐步成为电力系统的重要组成部分

由于太阳能发电技术经济性的明显提高, 使太阳能发电进入规模化发展阶段。2010 年以来, 在欧盟新增发电装机容量中, 太阳能发电已经超过了风电, 成为欧盟新增发电装机最多的电力可再生能源。随着全球太阳能发电产业技术的进步和规模的扩大, 太阳能发电已经成为继水电、风电之后重要的可再生能源, 成为传统电力的重要补充。

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。

1998 年, 中国政府开始关注太阳能发电, 投资建设一个 3MW 多晶硅电池及应用系统示范项目, 这个项目为光伏电池以后的迅速发展奠定了基础。

2001 年, 无锡尚德建立 10MW 光伏电池生产线获得成功, 2002 年 9 月, 无锡尚德第一条 10MW 光伏电池生产线正式投产, 产能相当于此前四年全国光伏电池的总产量, 一举将我国与国际光伏产业的差距缩短了 15 年。

2003~2005 年, 在欧洲特别是德国市场的拉动下, 无锡尚德和天威英利新能源有限公司持续扩产, 其他多家企业也纷纷建立光伏电池生产线, 使我国光伏电池的生产迅速增长。

2004 年, 洛阳单晶硅厂与中国有色设计总院共同组建的中硅高科公司, 自主研发出了 12 对棒节能型多晶硅还原炉。以此为基础, 2005 年, 国内第一个 300 吨多晶硅生产项目建成投产, 从而拉开了中国多晶硅大发展的序幕。

2007 年, 我国成为生产光伏电池最多的国家, 产量从 2006 年的 400MW 一跃达到 1GW。之后发展更为迅速, 到 2008 年达到了 2.6GW, 2010 年接近 11GW, 2011 年我国的光伏电池产量达到了 21.3GW。

近年来, 我国光伏电池制造产业发展迅猛, 下游产业链完善, 生产能力得到了扩张, 具体表现在以下方面:

1) 光伏电池制造产业基本形成。2011 年, 我国大陆地区光伏电池产量达 21.3GW, 占

全球市场 61% 的份额。

2) 国内市场快速启动。为积极培育我国光伏电池的应用市场,在西部地区组织了共计 300MW 光伏电站特许权项目招标,在内蒙古组织了 50MW 太阳能热发电特许权项目招标。国家制定了太阳能发电上网电价政策,在西部太阳能资源优势地区建成了一批并网光伏电站,组织实施了金太阳示范工程,利用财政补贴资金支持用户侧光伏发电系统建设。同时,光伏发电系统在无电地区供电、太阳能交通信号、太阳能路灯,以及在通信、气象、铁路、石油等领域也得到普遍利用。

3) 产业服务体系日趋完善。大型太阳能电站和分布式光伏发电系统的应用,推进了太阳能发电产业服务体系的建立和完善,建立了光伏电池组件产品的标准、检测和认证体系,基本具备了光伏发电系统及平衡部件的测试能力。

在资源方面,我国太阳能资源十分丰富,适宜太阳能发电的国土面积和建筑物受光面积也很大,青藏高原、黄土高原、冀北高原、内蒙古高原等太阳能资源丰富地区占到陆地国土面积的 2/3,具有大规模开发利用太阳能的资源潜力。东北地区、河南、湖北和江西等中部地区,以及河北、山东、江苏等东部沿海地区,太阳能资源也很丰富,可供太阳能利用的建筑物面积很大。在四川、重庆、贵州、安徽、湖南等太阳能资源总体一般的区域,也有许多局部地区适宜开发利用太阳能。

虽然我国光伏发电在资源上都具有相当的优势,但是与常规电力相比,太阳能发电在经济性和与电力系统协调方面,还存在许多需要解决的问题,突出表现在以下几方面:

1) 经济性仍是制约太阳能发电发展的主要因素。太阳能发电成本虽然已显著降低,但与常规能源发电相比,光伏发电的经济性较差,目前光伏发电的成本是常规能源发电成本的两倍左右。

2) 并网运行管理是制约太阳能发电发展的关键因素。与建筑结合的分布式光伏发电是太阳能发电的重要应用方式,我国正在形成适应分布式发电发展的电力体制和价格机制。特别在电网接入和并网运行管理上,正在建立与分布式发电相适应的电网接入和并网运行机制,这样更能充分发挥分布式光伏发电规模小、效率高、效益好的优势,推动分布式光伏发电企业的积极性,从而推动分布式光伏发电的大规模发展。

3) 促进太阳能发电的政策体系还不完善。促进太阳能发电的土地、上网电价、财税等方面的政策和电网接入等方面的政策还不够完善,适应分布式光伏发电的电力管理体制还不成熟,完善太阳能发电政策体系、促进电力体制改革的任务十分迫切。

4) 光伏制造业亟待转型升级。我国光伏产品产能扩张过快,国内光伏应用市场培育不足,严重依赖出口。光伏制造的关键技术研发滞后,主要生产设备依赖进口,缺乏核心竞争力,许多企业生产规模小、技术水平不高,低劣产品扰乱市场和无序竞争现象时有发生,产业亟待整合和转型升级,行业管理需要加强。

因此,光伏发电在我国面临着机遇与挑战并存的局面,如何解决上述存在的问题,促进光伏产业的更大发展是我们今后的发展方向。

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、电瓶等）转化为交流电（一般为 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应用技术。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、储存和传送）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 1-2 为三种类型电路的电路结构示意图。

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。

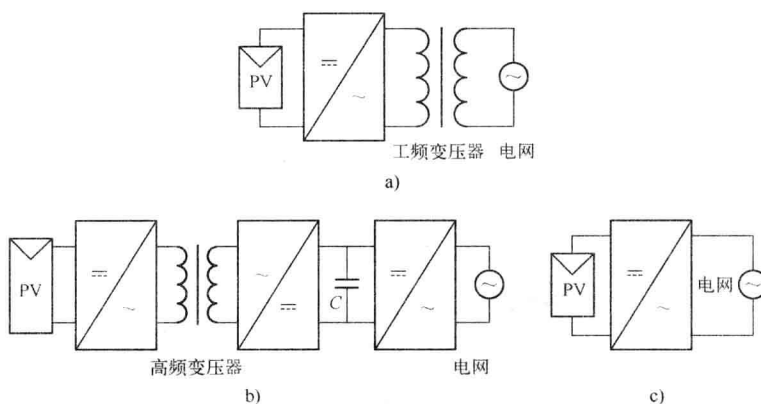


图 1-2 三种类型逆变器结构图

a) 工频隔离型 b) 高频隔离型 c) 非隔离型

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、晶闸管逆变器及可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 1-3a 所示。

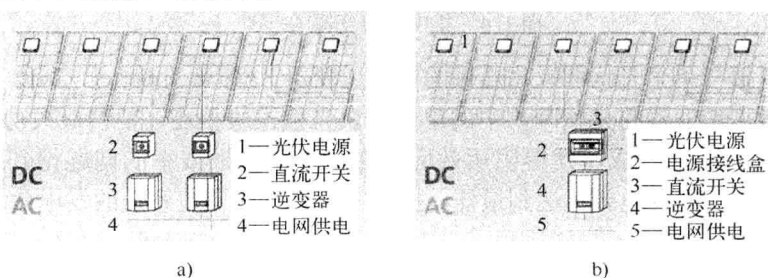


图 1-3 组串式逆变器和集中式逆变器

a) 组串式逆变器 b) 集中式逆变器

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 1-3b 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 1-4 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:

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。

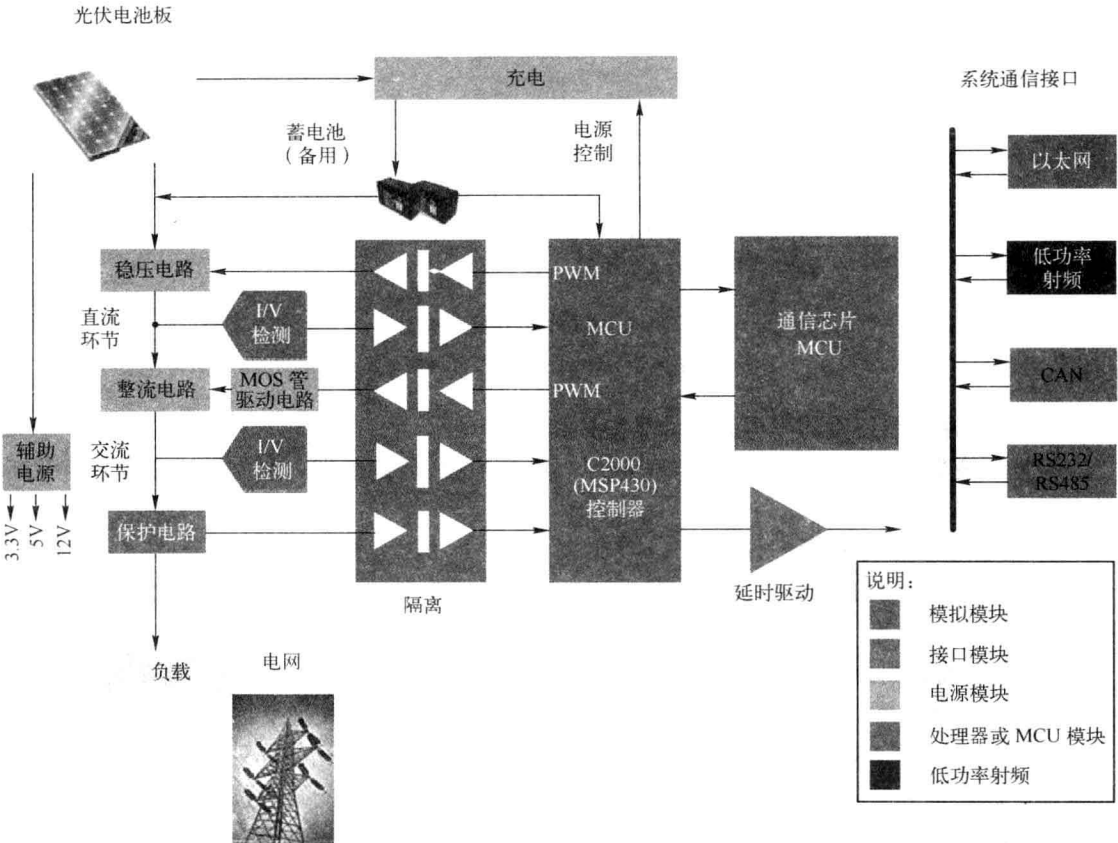


图 1-4 集中式逆变器的框图

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 1-5 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 $\pm 10\%$ 。