

Technology
实用技术

高效电能变换应用丛书

太阳能光伏发电 及其应用

赵争鸣 刘建政 编著
孙晓瑛 袁立强



科学出版社
www.sciencep.com

高效电能变换应用丛书

太阳能光伏发电 及其应用

赵争鸣 刘建政 编著
孙晓瑛 袁立强

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是“高效电能变换应用丛书”之一。本书系统地介绍了太阳能光伏发电的基本原理、系统构成和实际应用。第1章主要综述光伏发电技术的背景、意义和发展状况;第2、3章着重阐述光伏电池的基本理论和主要特性;第4章介绍光伏发电系统的种类、结构和原理;第5章讨论光伏发电系统的最大功率点跟踪原理和算法;第6、7章分别介绍光伏储能及其充放电模式和光伏水泵结构及其原理;第8章介绍光伏发电系统中的电力电子装置;第9、10章分别为光伏发电系统的仿真和应用实例分析。

本书可供从事太阳能光伏发电系统设计、研究、运行和管理等工作的专业技术人员、技术管理人员以及高等院校相关专业的教师与学生参考使用,也可作为电气工程方面的研究生教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

太阳能光伏发电及其应用/赵争鸣等编著. —北京:科学出版社,2005
(高效电能变换应用丛书)

ISBN 7-03-015809-1

I. 太… II. 赵… III. 太阳能发电 IV. TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 071071 号

责任编辑:杨 凯 崔炳哲/责任制作:魏 谨

责任印制:刘士平/封面设计:李 祥

北京东方科龙图文有限公司 制作

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

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年10月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2005年10月第一次印刷 印张: 19 1/2 插页: 1

印数: 1—4 000 字数: 373 000

定 价: 34.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

编著者简介



赵争鸣

清华大学教授。1991年获清华大学电机系博士学位，留校任教。1994年至1997年分别在美国俄亥俄州立大学和加州大学欧文分校进行博士后研究工作。

主要研究领域：电力电子与电机控制集成系统、太阳能光伏发电系统应用、变频调速电机设计与分析、非线性参数辨识及动态数学建模等。主持的科研项目先后获“中国高校科学技术一等奖”、“国家教育部科技进步三等奖”和“北京市科技进步二等奖”。

参与编写的作品有：《中国电力大百科全书——电力系统卷》（中国电力出版社，1995年）；《电工高新技术丛书——第六分册》（机械工业出版社，2000年）；《中国电机系统能源效率与市场潜力分析》（机械工业出版社，2001年）。



刘建政

清华大学副教授。1988年获清华大学电机系硕士学位，留校任教。

主要研究领域：太阳能光伏发电系统与应用、电力电子与电机传动控制、柔性输电与电力系统继电保护。参与的科研项目先后获“国家教委科技进步一等奖”、“北京市科技进步二等奖”、“电力部科技进步三等奖”。

编著者简介



孙晓瑛

清华大学高级工程师。1986年获北京科技大学自动化专业学士学位，同年入清华大学电机系任教。

主要研究领域：应用电子技术、可编程控制器应用等。参与的科研项目获“北京市科技进步二等奖”。

参与编写的作品有：《电子技术选修实验》（清华大学出版社，1995年）；《可编程控制器原理及应用上、下册》（机械工业出版社，1994、1995年第一版；2001、2002年第二版）；《现代电力传动与控制》（电子工业出版社，2004年）。



袁立强

2004年获清华大学电机系博士学位，现在清华大学电气工程流动站读博士后。

主要研究方向：电力电子与电机传动系统、太阳能光伏发电系统应用等。参与的科研项目先后获“中国高校科技进步一等奖”、国家发明专利两项。

丛书序

电能是现代社会不可或缺的重要能源。在 21 世纪,电力可持续发展已成为实现社会经济可持续发展的基础,并在社会经济、能源与环境协调发展中起着重要的平衡作用。

在现代社会所有的动力资源中,电能使用最方便,适用范围最广泛。电能在不同领域的深入应用,以及对高效率、高功率密度、高可靠性电能变换的需求,推动着电能变换技术、理论、电路、材料和工艺的发展。《高效电能变换应用丛书》即从应用“电能变换”技术的角度,讨论获取最佳供电的方法,同时探求节省能源和保护环境的高效电能变换的有效装置。

我们知道,未经加工和调理的原生态电能是有效电能的初始态。电网是电能的支柱,燃油发电机是防备电网故障或远离电网的应急和补充,太阳能电池、风力发电、潮汐发电等是向自然能换取电能的有效途径,燃料电池、铅酸蓄电池、锂离子电池、干电池等是可再生或一次性的电能载体。

对于现代社会大多数用电领域,原生态电能在某种意义上都是“粗电”。使用“粗电”将不尽如人意。例如,针对不同用户,电网上的电就不一定好用。电网是公用的,电网在高峰期和低谷期的电压存在差异。由于不同用户从电网支取电能的时机和电量的不确定性和偶然性,特别是大型设备的起动和刹车,会给邻近电网造成随机的瞬时冲击和定式落差;雷电、风暴、炎热等自然因素造成电网扰动甚至供电瞬时中断等,也将给敏感用户带来麻烦;设备运转失常、系统效率降低、计算机数据丢失、逻辑功能混乱,严重时还将造成系统硬件损坏,使系统工作陷于瘫痪。为此,需要在电网上游运用柔性输配电控制,而在电网下游采用稳压器和 UPS 对从电网下载的粗电进行整合和修补。

由于电池自身具有的电容性,电压瞬时波动可能比电网小。但电池在工作中也存在不少问题,最常见的问题是电池电量随工作时间的延长或用电量的加大会逐渐衰竭。另外,电池单体的电压较低,以其自然形态很少可直接使用,多数是串联或串并联组合使用,这种使用方式很难保证串联或串并组合中的每个单体的特性一致。为此,必须实施合理的充电、放电和监管。

太阳能电池能将阳光转换成电能,但阳光的照射会因向背、阴晴、昼夜、四季而不均衡,为此需要对转换的电能进行收集储存、再经 DC-DC 或 DC-AC 变换,获得稳定的直流电和交流电。风力等自然能发电同样受自然因素牵制,借助风力等自然力传动的发电机输出的电力经常处于不稳定状态,也必须实行调整控制。……

在供电和用电的大舞台上,电能变换充当着极其重要的角色;在电能变换领域,以高频逆变技术为核心的 PWM 开关控制能使上述的许多问题迎刃而解,它比传统的低频电能变换有更多的优点。例如,高频逆变可使电能变换设备成十倍地缩小体积和重量,还可显著降低能耗和电磁干扰,可赋予设备数字化、智能化特性等等。这里所谓的高频,是相对于工频变换 50Hz 以及 20 世纪 60 年代兴起的 20kHz 变换频率的更高变换频率:数十 kHz、数百 kHz 乃至数 MHz 等。高频变换装置的功率密度随频率的提高而提高,器件和材料的开关损耗也随之愈加突出,促使高频损耗小的功率器件和材料不断获得改进。由此,高频损耗小的软开关 PWM 电路在近十年中取得了神速的发展。这些都使高效电能变换装置日臻完美。

不论是电网、电池还是相对独立的供电系统,都存在电磁环境问题。即在电力运行中因环境电磁干扰(如雷电、汽车点火引发),或共享电源母线的负载设备的电磁干扰,或 DC-DC、DC-AC 转换装置自身的电磁干扰,搅得“四邻不安”。因此,电磁兼容性成为供电和用电都必须面对的复杂问题。

现代社会的电网面临的承载非常严酷。由于功率半导体开关器件的长足进步、控制技术日益先进,变流设备的功率等级提升极快;又由于采用变流举措的负载设备日益增多,其复杂的负载性质带来的负面影响突出。基于这些因素的电网存在功率因数低下、波形畸变、浪涌、相位丢失等不良境况。因此,电能质量控制刻不容缓,电力补偿、有源滤波等电能变换技术在电网和用户之间能起到较佳的缓冲匹配作用。

能源问题在本世纪占据瞩目位置,人们在追求节约电能方面有卓越贡献的高效能供电设备和用电方法。在现实中,相当一部分电能消费是以驱动电机的形式进行的,如机床、电动工具、电动汽车、城市轻轨、传动系统、机器人、风机、水泵、纺机、空调等等。直接用粗放的原电驱动,免不了要引入串联阻抗或并联阻抗,以便控制和调节电机的运行状态,而这些不得已介入的阻抗会白白消耗电能。为了将这些浪费掉的非常可观的电能“拣”回来,利用现代电能变换技术对电机实行变频控制,具有很好的节电潜力。

照明用电据称占全球总体用电较大比重,节电潜力巨大,起源于欧美的绿色照明浪潮大有席卷全球之势。绿色照明的主题词:最小耗电产生最大流明。除了新型电光源和新型发光介质外,以全新的高频电能变换技术装备的电子镇流器将是实现绿色照明的重要手段。

生产力愈发展,技术越进步,环境问题愈加突出。电能的生产、变换、使用在很大程度上影响到环境。电能的生产一般伴随二氧化碳、二氧化硫气体排放,前者是地球温室效应气体,后者是酸雨的成因,两者对环境危害都很大。少一点电能生产却能换得少一点环境恶化。生产发展必然要增加电力的需求,关键在于节约电力,减少电力的浪费。这要求我们的电源装置、电能变换系统提高效率。另外,干净的电磁环境也要求电能变换设备在电磁兼容性方面达标。节约电能、电磁兼容、无环境污染的绿色供电势在必行。

21 世纪将是科学技术突飞猛进的时代,技术进步必定会牵动电能变换技术需求急速膨胀。《高效电能变换应用丛书》在这一时刻呈献给读者,意在诠释电能变换技术的最新应用。

电能变换技术是实用性极强的技术,服务于各种领域,内容丰富。一套丛书毕竟规模有限,实难尽述。我们企望借助几个具有典型意义的层面,如高频功率变换、变频传动、电能质量控制等在学术、产业都呈热点的几个方面展示多彩的电能变换技术应用。丛书主要供中等技术水平的科技人员阅读,在概念和应用实例方面照顾到其他层面的科技人员。丛书的读者定位为电源技术、运动控制、电力电子、电子技术、信息技术、能源转换、过程控制等应用领域的工程技术人员,以及科技爱好者们。

《高效电能变换应用丛书》编辑委员会

《高效电能变换应用丛书》 编辑委员会成员名单

- 主任委员** 倪本来 中国电源学会编辑工作委员会主任 教授级高级工程师
- 副主任委员** 陈建业 清华大学 研究员
- 徐德鸿 浙江大学电气工程学院常务副院长 教授,博士生导师
- 阮新波 南京航空航天大学 教授,博士生导师
- 委 员** (以下按姓氏笔画排序)
- 丁道宏 南京航空航天大学 教授
- 区健昌 北京理工大学 教授
- 王志通 北方交通大学 教授
- 王贇基 清华大学 教授,博士生导师
- 邓智泉 南京航空航天大学 教授,博士
- 艾多文 航天工业总公司二院 25 所 教授级高级工程师
- 刘凤君 航天工业总公司二院 206 所 研究员
- 刘晓融 科学出版社 编审
- 阮新波 南京航空航天大学 教授,博士生导师
- 李永东 清华大学 教授,博士生导师
- 李厚福 北京电视技术研究所 高级工程师
- 沙 斐 北方交通大学抗电磁干扰中心主任 教授,博士生导师
- 张 立 天津大学 教授
- 张 宙 香港理工大学 副教授,博士
- 张卫平 北方工业大学 教授,博士
- 张中相 中国运载火箭技术研究院第十五研究所 研究员,博士生导师
- 张占松 广东工业大学 教授
- 张志国 中国运载火箭技术研究院第十四研究所主任 研究员
- 陈 坚 华中理工大学 教授,博士生导师
- 陈永真 辽宁工学院 副教授,硕士生导师
- 陈建业 清华大学 研究员
- 陈慕平 (台湾)工业技术研究院能源与资源研究所 博士
- 罗方林 新加坡南洋理工大学 教授,博士
- 季幼章 中科院等离子体研究所 研究员
- 郑琼林 北京交通大学电气学院院长 教授,博士生导师
- 赵争鸣 清华大学 教授,博士生导师
- 赵良炳 清华大学 教授
- 赵修科 南京航空航天大学 教授

倪本来 中国电源学会编辑工作委员会主任 教授级高级工程师
倪海东 北京奥米伽电源技术服务中心主任 副教授
徐德鸿 浙江大学电气工程学院常务副院长 教授,博士生导师
黄济荣 株洲电力机车研究所 教授级高级工程师,博士生导师
龚绍文 北京理工大学 教授
龚幼民 上海大学 教授
崔炳哲 科学出版社 编辑
路秋生 北京职业技术学院 教授

前 言

太阳能光伏发电及其应用是集开发利用绿色可再生能源、改善生态环境、改善人民生活条件于一体而面向 21 世纪人类发展的重大课题；同时又是集光电子半导体、电力电子、现代电力系统、电机学、电化学和现代控制理论等高新技术于一体的交叉科研课题。它既具有巨大的经济、政治和社会效益，同时又含有丰富的学术研究价值和基础理论问题。

清华大学电机工程与应用电子技术系“太阳能光伏发电及其应用研究课题组”自 1997 年以来，在原有的变频调速电机和电力电子变换器研究的基础上，开始了太阳能光伏发电及其应用的研究，先后完成了清华大学“绿色校园项目”、新疆建设兵团的“太阳能扬水与照明综合应用系统示范工程”、新疆和田皮山县“太阳能沙漠绿洲生态系统”和北京市“绿色奥运太阳能光伏发电示范工程”，以及太阳能智能照明灯、太阳能电机驱动飞行器、光伏并网系统等课题的研究，在太阳能高效综合应用、最大功率点跟踪控制、高效充放电方法以及高效光伏水泵等方面取得了创新成果。

为总结过去八年来在太阳能光伏发电及其应用方面的理论研究和实践经验，进一步推动太阳能光伏发电及其应用技术的发展，应科学出版社的邀请，我们特意编写了这本《太阳能光伏发电及其应用》，希望能起到抛砖引玉之用，与同行有机会商榷讨论，共同推进太阳能光伏发电及其应用的发展。

全书本着理论联系实际的原则，立足于基本原理和基本概念，着眼于实际应用和工程设计，力求通俗、易懂、系统、实用。从内容上看，该书包括理论、装置、系统和应用等四部分；从结构上看，全书共分 10 章，第 1 章为概述，主要综述光伏发电技术的背景和意义，以及光伏发电技术的现状和发展；第 2、3 章阐述光伏电池的基本理论和主要特性；第 4 章主要介绍光伏发电系统的种类、结构和原理；第 5 章着重讨论光伏发电系统的最大功率点跟踪原理和算法；第 6、7 章分别介绍光伏储能及其充放电模式和光伏水泵结构及其原理；第 8 章介绍光伏发电系统中的电力电子装置；第 9、10 章为光伏发电系统的仿真和应用实例分析。

本书的编写分工如下：赵争鸣负责编写第 1 章、第 6 章和第 7 章，刘建政负责编写第 4 章和第 8 章，孙晓瑛负责编写第 2 章和第 3 章，袁立强负责编写第 9 章和第 10 章，吴理博编写第 5 章。全书由赵争鸣负责统筹和定稿，孙晓瑛负责文字格式编辑，袁立强负责公式及符号校核。

卢强院士作为清华大学电机系“太阳能光伏发电及其应用研究课题组”的创建人和学术带头人，对于本书的编写工作给予了全力支持和热情鼓励，在此深表感谢。曾

经在本课题组工作和学习过的不少学者和同学,为我们的光伏发电及其应用研究作出了很多贡献,他们有刘云峰、孟朔、陈昆仑、王健、关慧、刘姗姗、何颖、热兹望·坎吉、冯保华等,在此一并表示感谢。

本书承王正元教授的仔细审阅并提出许多宝贵意见,深表感谢。本书编写过程中也得到了我们课题组其他人员,如吴理博、张海涛、白华、易荣、郭伟、刘树、钱珏、王世静、张强、蒋栋、鲁挺、崔志良、张怀晟、胡谦、张颖超、张永昌、汪书苹、杨志等同学的帮助,在此一并表示感谢。另外,在编写本书的过程中,我们参阅了大量的论著文献,有的在书中已标出,主要的已经列入了书后的参考文献。在此对这些论著文献的作者表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,编写时间仓促,且太阳能光伏发电技术正处在蓬勃发展之中,书中难免存在许多不足,甚至是错误,恳请广大读者批评指正。

赵争鸣

2005年5月于北京清华园

目 录

第 1 章 概 述	1
1.1 意义及背景	1
1.1.1 太阳能是化石能源的主要替代能源之一	1
1.1.2 太阳能是人类可利用的最直接的清洁能源之一	2
1.1.3 资源丰富的太阳能辐射	4
1.1.4 太阳能开发潜力	8
1.2 光伏发电现状及发展	9
1.2.1 光伏发电历史	9
1.2.2 光伏发电技术的现状与发展	10
1.2.3 存在的问题	14
1.2.4 前景与展望	15
参考文献	18
第 2 章 光伏电池及其特性	20
2.1 光伏电池的工作原理	20
2.1.1 半导体的物理基础	20
2.1.2 光伏电池的工作原理	24
2.1.3 光在纯净半导体中的吸收	26
2.2 硅型光伏电池的电特性	27
2.2.1 等效电路	27
2.2.2 光伏电池伏安特性曲线	28
2.2.3 输出功率和曲线因数	30
2.2.4 输出效率	30
2.3 光伏电池的外特性	31
2.3.1 光谱响应	31
2.3.2 温度特性和光照特性	32
2.3.3 负载特性	34
2.4 光伏电池的结构和分类	35
2.4.1 硅型光伏电池结构	35
2.4.2 光伏电池的组态分类	36
2.4.3 光伏电池的发展进程	38

2.4.4 现代光伏电池发展趋向	39
参考文献	42
第3章 光伏阵列设计与应用	43
3.1 光伏电池的利用率分析及计算	43
3.1.1 与太阳能相关的物理量	43
3.1.2 日照时间和太阳位置的计算	48
3.2 光伏阵列性能分析	57
3.2.1 光伏阵列的组成	57
3.2.2 光伏阵列的数学模型	60
3.2.3 光伏阵列的性能测试	63
3.3 光伏阵列的设计	67
3.3.1 设计原则和思路	67
3.3.2 光伏阵列尺寸的估算	69
3.4 光伏阵列的典型应用	71
参考文献	72
第4章 光伏发电系统	73
4.1 光伏发电系统的构成	73
4.1.1 光伏阵列结构	73
4.1.2 电 缆	80
4.1.3 负载特性	80
4.1.4 变换器	83
4.1.5 光伏发电系统分类	83
4.2 独立光伏发电系统	84
4.2.1 户用光伏系统	85
4.2.2 独立光伏电站	85
4.2.3 风力、光伏和柴油发电机一体化互补发电	91
4.3 光伏并网系统	95
4.3.1 光伏并网系统描述	95
4.3.2 VSC与PCC直流输电逆变区别	96
4.3.3 光伏逆变器电流源并网	97
4.3.4 光伏逆变器电压源并网	98
4.3.5 并网控制方法与策略	100
4.3.6 光伏并网系统的保护和孤岛问题	102
4.4 能量管理	104
4.4.1 负荷调控	104
4.4.2 光伏照明系统的能量管理	105

4.4.3 光伏照明与扬水综合系统的能量管理	106
参考文献	107
第5章 光伏阵列最大功率点跟踪	109
5.1 光伏阵列输出特性	109
5.1.1 硅光伏电池的理想电路模型	109
5.1.2 光伏阵列输出伏安特性	111
5.1.3 影响光伏阵列输出特性的因素	113
5.2 恒电压控制	115
5.2.1 恒电压控制的原理与实现	115
5.2.2 恒电压控制的不足	116
5.2.3 改进的 CVT 算法	116
5.3 最大功率点跟踪控制	117
5.3.1 MPPT 算法的原理	117
5.3.2 MPPT 与 CVT 算法的比较	117
5.3.3 经典 MPPT 算法的稳态特性分析	120
5.3.4 MPPT 算法的动态特性分析	122
5.3.5 改进的 MPPT 算法	124
5.4 现代最大功率点跟踪方法	126
5.4.1 干扰观测法	126
5.4.2 电导增量法	127
5.4.3 模糊逻辑控制	129
5.4.4 其他 MPPT 方法	130
5.5 光伏并网系统拓扑与 MPPT 技术	131
参考文献	134
第6章 光伏储能及其充放电模式	137
6.1 蓄电池基本概念与特性	137
6.1.1 蓄电池的基本概念	137
6.1.2 蓄电池主要参数	138
6.1.3 蓄电池基本特性	142
6.2 蓄电池种类及其工作原理	145
6.2.1 酸性蓄电池结构及原理	145
6.2.2 碱性蓄电池结构与原理	146
6.2.3 其他在光伏发电系统中采用的蓄电池	147
6.3 铅酸蓄电池充放电特性	152
6.3.1 铅酸蓄电池充放电原理	152
6.3.2 充放电中电流规律	153

6.3.3 充放电中的极化过程	154
6.4 蓄电池充放电控制	156
6.4.1 蓄电池的充电控制方法	157
6.4.2 充电控制的实现	159
6.4.3 蓄电池充电过程中常见的几个问题	159
6.5 铅酸蓄电池充放电等效电路	161
6.5.1 静态蓄电池模型和动态蓄电池模型	162
6.5.2 铅酸蓄电池的电路理想等效模型	162
6.5.3 Thevenin 蓄电池等效模型	163
6.5.4 改进蓄电池等效模型	163
6.5.5 一阶线性模型	163
6.5.6 四阶动态模型	164
6.5.7 PSPICE 仿真等效模型	165
6.5.8 优化蓄电池动态模型	166
6.5.9 铅酸蓄电池的其他等效模型	167
6.5.10 光伏发电系统中蓄电池模型的分析与比较	169
参考文献	170
第7章 光伏水泵	172
7.1 光伏水泵结构与原理	172
7.1.1 基本概念	172
7.1.2 泵的结构与原理	174
7.1.3 日照及其运行条件	177
7.1.4 流量与水压关系	181
7.2 光伏水泵电机	181
7.2.1 变频调速电机基本原理	182
7.2.2 主要设计概念	184
7.2.3 转子槽优化设计	186
7.3 光伏水泵优化设计	195
7.3.1 总体设计原则	195
7.3.2 一体化结构	196
7.3.3 水泵流量和扬程与电机功率匹配	196
7.3.4 水泵速度与电机输出功率	197
7.3.5 优化设计实例	198
7.4 光伏水泵速度闭环控制	200
7.4.1 变频调速原理	200
7.4.2 其他调速类型及效率	201

7.4.3 光伏水泵系统应用实例	202
参考文献	202
第 8 章 光伏发电系统中的电力电子变换电路及其控制	203
8.1 光伏直流变换电路	203
8.1.1 直流斩波器	203
8.1.2 开关电源型 DC/DC 变换器	208
8.2 光伏发电系统中的蓄电池充放电控制器	212
8.2.1 充电控制器	212
8.2.2 放电控制器	218
8.3 光伏逆变电路	220
8.3.1 逆变器及其分类	220
8.3.2 复杂逆变电路	223
8.4 光伏并网发电系统	227
参考文献	231
第 9 章 光伏发电系统仿真	233
9.1 仿真软件平台	233
9.1.1 用于光伏发电系统仿真的软件综合比较	233
9.1.2 选用的光伏发电系统仿真平台介绍	234
9.2 光伏电池特性数学表达以及仿真模型	237
9.2.1 光伏阵列物理机制的数学表达	237
9.2.2 基于物理机制的光伏阵列仿真模型	239
9.2.3 基于外特性的数学表达	241
9.2.4 基于外特性的光伏阵列模型	242
9.2.5 太阳光光照强度模型	243
9.3 光伏发电系统主电路和负载模型及实现	244
9.3.1 电力电子器件模型的选择	245
9.3.2 主电路模型	248
9.3.3 异步电机模型	250
9.3.4 机械负载模型	253
9.4 光伏发电系统控制模型及实现	257
9.4.1 子电路控制模型	258
9.4.2 DLL 方式的控制模块	262
9.4.3 其他方式的控制模型	265
参考文献	266
第 10 章 光伏发电系统应用范例	267
10.1 太阳能路灯照明系统	267