

新能源技术

Technology
实用技术

全華



太阳能光伏并网 发电及照明系统

吴财福 张健轩 陈裕恺 编著
袁立强 审校



科学出版社

www.sciencep.com

新能源技术

太阳能光伏并网发电及 照明系统

吴财福 张健轩 陈裕恺 编著
袁立强 审校

科学出版社

北 京

图字: 01-2009-6281 号

内 容 简 介

本书是“能源技术”丛书之一,主要介绍了太阳能光伏并网发电及照明系统的基本原理、系统构成和实际应用。本书内容包括太阳能光伏电池特性简介,多级式太阳能光伏照明系统,单级式太阳能光伏照明系统,太阳能光伏充电系统,太阳能光伏并网发电系统,基于模糊控制的太阳能光伏并网发电系统,多功能太阳能光伏并网发电与照明系统,多模块逆变器并联系统,孤岛效应防治,多功能电网接口处理系统,有源滤波与并网发电,太阳能光伏转换系统技术评估,等等。

本书可供从事太阳能光伏并网发电及照明系统研究、设计、运行和管理等工作的专业科技人员、技术管理人员使用,也可作为高等院校相关专业师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

太阳能光伏并网发电及照明系统/吴财福,张健轩,陈裕恺编著;袁立强
审校. —北京:科学出版社,2009
(新能源技术)

ISBN 978-7-03-025834-2

I. 太… II. ①吴… ②张… ③陈… ④袁… III. ①太阳能发电 ②太阳能-照明 IV. TM615 TU113.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 189650 号

责任编辑:孙力维 杨 凯/责任制作:董立颖 魏 谨

责任印制:赵德静/封面设计:李 力

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>

北京天时彩色印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 11 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2009 年 11 月第一次印刷 印张: 21

印数: 1—4 000 字数: 400 000

定 价: 39.80 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

编辑部序

“系统编辑”是我们的编辑方针,我们所提供给您,绝不只是一本书,而是关于这门学问的所有知识,它们由浅入深,循序渐进。

能源对国家及工商业的影响极大,如何有效取得能源是一项极重要的课题。中国台湾目前所耗用能源有 95% 仰赖进口,更应极力推广太阳能的应用。本书主要是探讨太阳能光伏的应用,述及各种系统的制作、转换等各项技术,以使整体系统更有经济效益及更符合实际需求。本书极适合对再生能源、环保有兴趣及热心人士参考使用。

再版序

太阳能的应用日趋广泛,市场的成长率每年约在 30% 以上,因而对于太阳能光伏变换器的需求也快速增加。十年前,本研究团队投入太阳能光伏变换器的研究,而于六年前出版本书;而今应时代的变迁及应用层面的扩增,我们再度审视太阳能光伏发电系统,将部分初版内容进行修改,并且加入新的应用系统和光伏变换器技术,以及产品可行性评估,以飨读者。

在翻新的部分,我们针对并网发电型系统“孤岛效应防治”的课题进行更深入的探讨,并且依规范的要求,设计负载来测试孤岛现象的产生及防治的方法,其中包括 RLC 各式负载和主、被动检测方法,让读者能深刻体会孤岛现象,也懂得如何防治,这对于想要研制并网发电型逆变器的工程师有很大的帮助。在新增的章节中,我们强调未来的产品或技术走向——直流供电暨电网接口处理系统。现有的许多 OA 或家电产品,如电脑、电子镇流器、变频式空调、变频式风扇、变频式洗衣机等都是使用直流输入电源,因此应该将太阳能发电系统所发的直流电直接优先供给负载,若有剩余再并入电网;反之,若不足则由电网补充供电,如此不但可以提升供电效率,还可以节省零组件成本,并且可以改善电网供电品质,甚至可以结合智能型电表提供用电资讯,可以说是一举多得。此外,我们还针对光伏变换器的技术和产品进行探讨和整理,列表分析其 SWOT,并对投入此行业的成功因素和潜在风险进行客观的评估。这是一般技术书籍较欠缺的部分,而在本书中,我们将多年积累的经验和所收集到的市场资讯,经整理、分析而摘录于本书最后一章。

时值初冬,在这感恩的季节里,我们要特别感谢精致电能应用研究中心 (EPARC) 的成员陈耀铭教授、林仲信、林奇德、苏明彬诸位校友及助理程雅芬和廖文瑄小姐的协助。

吴财福 张健轩 陈裕恺
谨志于中正大学电机工程学系

序

能源为万业之母,它的充裕供应或匮乏短缺,直接影响到各行各业的繁荣或萧条。今天,人类赖以度日的化石能源日渐减少,开发再生能源势在必行,而在各种再生能源中,以直接取用太阳能最受重视,这包括太阳能光热与太阳能光伏两种。日、美及欧洲的先进国家在太阳能的应用研究已进行得如火如荼,尤其是无自产能源的国家如日本,更是积极研订各项法规,大力推广太阳能的应用。台湾目前所耗用的能源 95% 以上均仰赖进口,更应该极力推广太阳能的应用,以弥补化石能源之不足。

本书主题是围绕太阳能的应用系统作探讨,书中将谈到了太阳能并网发电的转换及控制技术,谈到如何设计独立发电的照明与充电系统,同时也叙述如何将既有的变换器作多功能应用,以使整体系统更有经济效益及更符合实际需求;此外,这些系统的相关技术,如多模块并联技术、模糊控制技术及太阳能光伏电池的电气特性,也在书中一一详述,供读者进一步研究参考。

虽然目前太阳能的应用系统成本仍较高,不过,相关技术的研究本应该走在前面,预先探讨可能的应用技术及可能发生的问题,及早提出因应对策,有助于电业法规的修订,对实际的应用也有实质的帮助。本书收集这些方面的文献并融入作者多年来的研究心得,希望达到抛砖引玉的功能,邀请有兴趣的读者一同来共襄盛举,造福后代子孙。

本书撰写之际,承蒙中正大学电机工程研究所电力电子应用研究室的研究生刘智仁、杨志祥、赖彦任、何佩怡及助理蔡宜伦提供协助,谨此由衷致谢。

吴财福 张健轩 陈裕恺
谨志于中正大学电机工程学系

目 录

1 绪 论

1.1 概 述	1
1.2 太阳能光伏电池特性简介	1
1.3 多级式太阳能光伏照明系统	2
1.4 单级式太阳能光伏照明系统	3
1.5 太阳能光伏充电系统	3
1.6 太阳能光伏并网发电系统的相位落后控制	4
1.7 太阳能光伏并网发电系统的模糊控制	4
1.8 多功能太阳能光伏并网发电与照明系统	5
1.9 多模块逆变器并联系统	6
参考文献	7

2 太阳能光伏电池特性简介

2.1 概 述	9
2.2 太阳能光伏电池光电转换原理	10
2.3 硅太阳能光伏电池介绍	12
2.3.1 单晶硅太阳能光伏电池	12
2.3.2 多晶硅太阳能光伏电池	13
2.3.3 非晶硅太阳能光伏电池	13
2.4 太阳能光伏电池特性简介	14
2.5 最大功率点跟踪方法分析	18
2.5.1 电压反馈法	19
2.5.2 功率反馈法	19
2.5.3 扰动与观察法	19

2.5.4 电导增量法	21
2.5.5 直线近似法	21
2.5.6 实际测量法	23
2.6 结 论	24
参考文献	25

3 多级式太阳能光伏照明系统

3.1 多级式太阳能光伏照明系统的架构	28
3.2 充电器及放电器设计与分析	29
3.2.1 降压型充电器	30
3.2.2 升压型放电器	36
3.3 调光电子镇流器的电路分析与制作	41
3.3.1 相移调制式调光的工作原理分析	42
3.3.2 谐振电路动作原理分析	44
3.3.3 桥式驱动电路分析	45
3.3.4 调光控制电路分析	47
3.4 以微处理器实现最大功率点跟踪控制	48
3.5 计算机仿真与硬件实验结果	49
3.6 结 论	56
参考文献	57

4 单级式太阳能光伏照明系统

4.1 多功能单级式变换器推导	61
4.2 单级式变换器分析	72
4.2.1 双向充放电器分析	72
4.2.2 串联谐振并联负载逆变器分析	75
4.2.3 单级式电路的整体考量	78
4.3 单级式变换器的模糊控制器设计	81
4.4 系统架构介绍	85
4.5 计算机仿真与硬件实测	89
4.5.1 设计方法与步骤	89

4.5.2 计算机仿真与硬件实测结果	90
4.6 结 论	97
参考文献	98

5 太阳能光伏充电系统

5.1 概 述	101
5.2 系统架构	102
5.3 充电器介绍	103
5.3.1 动作原理	104
5.3.2 充电方式	106
5.3.3 控制策略	108
5.4 讨 论	109
5.5 结 论	110
参考文献	112

6 太阳能光伏并网发电系统

6.1 系统架构	115
6.2 太阳能光伏电池简介	116
6.3 升压变换器	117
6.4 全桥逆变器	118
6.4.1 电路架构	118
6.4.2 工作原理	119
6.5 直流侧滤波电路	122
参考文献	124

7 基于模糊控制的太阳能光伏并网发电系统

7.1 概 述	125
7.2 逆变器的系统架构	126
7.3 模糊控制	128
7.4 模糊控制器的设计	130
7.4.1 输入/输出变量的选择与精确量模糊化	130

7.4.2	建立模糊规则	132
7.4.3	解模糊化(输出信息的模糊决策)	132
7.5	系统控制电路	132
7.5.1	反馈降压电路	133
7.5.2	精密全波整流与正、负半周判别电路	134
7.5.3	过电压保护电路	135
7.5.4	死区电路	135
7.5.5	驱动电路	136
7.5.6	继电器驱动电路	136
7.5.7	80C196MC 微处理器	137
7.6	计算机仿真与硬件实测结果	139
7.6.1	计算机仿真结果	140
7.6.2	硬件实测结果	141
7.7	结 论	145
	参考文献	146

8 多功能太阳能光伏并网发电与照明系统

8.1	系统架构及其操作模式介绍	148
8.2	功率因数校正与镇流器推导	149
8.3	各操作模式的工作原理分析	151
8.3.1	并网发电模式	151
8.3.2	功率因数校正与电子镇流器模式	153
8.4	仿真与实验结果	154
8.4.1	并网发电模式	154
8.4.2	功率因数校正与电子镇流器模式	157
8.5	结 论	159
	参考文献	160

9 多模块逆变器并联系统

9.1	前 言	161
9.2	单模块逆变器的系统架构	162

9.2.1 系统架构	162
9.2.2 控制策略	163
9.2.3 单模块逆变器的仿真与实测结果	167
9.3 多模块逆变器并联运转的分析与设计	170
9.3.1 多模块逆变器并联运转的系统架构	170
9.3.2 控制策略	171
9.3.3 链状控制法则的分析	172
9.3.4 仿真与实测结果	176
9.4 保护电路	181
9.5 结 论	184
参考文献	185

10 孤岛效应防治

10.1 孤岛现象的发生	189
10.1.1 孤岛现象发生的原因	189
10.1.2 孤岛效应的影响	191
10.2 孤岛效应防治技术	192
10.2.1 被动式检测法	192
10.2.2 主动式检测法	193
10.3 孤岛效应防治测试	195
10.4 规范比较	199
10.4.1 美国 IEEE 929 规范	199
10.4.2 美国、德国、日本的孤岛效应防治规范	202
10.4.3 台湾电力公司再生能源发电系统并网技术与设备运转 规范	203
10.5 孤岛效应防治机制验证	204
10.5.1 规范的保护机制验证	204
10.5.2 孤岛效应被动检测方式	208
10.5.3 孤岛效应主动检测方式	211
参考文献	214

11 多功能电网接口处理系统

11.1 整体系统架构	217
11.2 功率因数校正与并网发电	221
11.2.1 系统架构	221
11.2.2 最大功率点跟踪器	222
11.2.3 多功能全桥逆变器	225
11.2.4 系统辅助电源	232
11.2.5 功能介绍	236
11.2.6 直流侧电压稳压机制	238
11.2.7 讨 论	246
11.2.8 后级多功能全桥逆变器	246
11.2.9 系统整合验证	251
参考文献	254

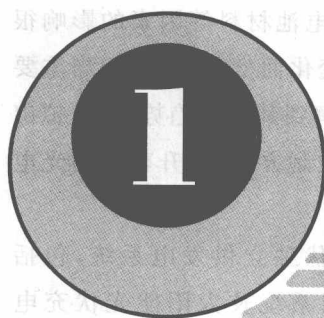
12 有源滤波与并网发电

12.1 系统架构	255
12.1.1 最大功率点跟踪器	255
12.1.2 全桥逆变器	257
12.2 系统功能介绍	259
12.2.1 并网发电模式	259
12.2.2 直接供电模式	260
12.2.3 有源滤波模式	260
12.3 系统控制机制	261
12.3.1 最大功率点跟踪功能	262
12.3.2 并网发电功能	263
12.3.3 有源滤波模式	263
12.4 直流侧电压稳压机制	266
12.5 功能验证	268
12.5.1 并网发电功能	268
12.5.2 有源滤波功能	269
12.5.3 系统整合	273

参考文献	277
------------	-----

13 太阳能光伏转换系统技术评估

13.1 技术概要	279
13.1.1 技术及产品描述	279
13.1.2 国内外技术发展现况及未来趋势	289
13.1.3 产品及技术分析	296
13.1.4 技术及产品的产业链	299
13.2 市场潜力分析	299
13.2.1 市场现况与潜力	299
13.2.2 竞争状况	302
13.3 技术可行性分析	302
13.3.1 SWOT	302
13.3.2 知识产权状况	303
13.3.3 技术规格	304
13.3.4 技术竞争分析	305
13.4 经营团队	305
13.4.1 需求人力专长组合	305
13.4.2 人才市场供需状况	306
13.5 成功的关键因素	307
13.6 风险分析	307
13.7 总 结	308
参考文献	310



绪 论

1.1 概 述

化石能源逐渐短缺,环境污染问题日益严重,人类的生存空间受到极大的威胁,该是我们这些工程师、设计师们停下脚步思索的时候了。我们若希望子子孙孙生活得更惬意、更舒适,能源问题是必须解决的。我们这一代人把化石能源用罄,以后的子孙如何过日子?解决此问题,最先想到的就是来自太阳的能量。目前,地球上的能源都是直接或间接来自太阳,如风力、水力、潮汐、海洋温差、太阳照射等,这些能源统称为再生能源。其中,以太阳能这种既干净又不污染空气,更无需费力开采即可直接供应的天然能源最受人们的青睐。因此,在取代化石能源的开发工程上太阳能已被视为最理想的能源之一。据报道,近年来人们对太阳能光伏电池的需求每年平均增长率约为18%,以1995年为例,其总发电容量约为72MW^[1]。

近年来随着科学技术的提升,商品化的太阳能光伏电池的转换效率已达到18%,此结果使得其应用范围更加宽广,例如,在电力应用方面有下列几种实例:

- ① 并网发电的家用型发电系统^[2~4]。
- ② 独立供电型的照明系统^[5,6]。
- ③ 一般电池储能应用^[4,7,8]。
- ④ 电机驱动应用^[9]。

以上可简单分类为并网发电型及独立发电型。本书主要探讨并网发电系统与独立发电的照明或充电系统,同时也探讨其系统共用硬件的智能型整合系统。以下就每一章的内容作简要说明。

1.2 太阳能光伏电池特性简介

首先,我们将介绍太阳能光伏电池的电气特性,作为应用设计时的依据。太阳

能光伏电池的输出功率受日照强度、温度、元件老化、光电池材料等因素的影响很大,因此探讨光伏电池的电压、电流如何随这些因素的变化而变化,是一相当重要的课题。本章将针对这些课题进行深入的探讨,从中了解到其变化趋势,从而拟出如何在各种不同的工作条件下得到其最大输出功率的控制方法,提升整体的光电转换效率,换言之,可降低整体的系统装设成本。

继本章之后,紧接着以3章内容来介绍太阳能光伏独立供发电系统,包括多级式太阳能光伏照明系统、单级式太阳能光伏照明系统及太阳能光伏充电系统。

1.3 多级式太阳能光伏照明系统

一个独立供电型的照明系统往往含有充电器、放电器及电子镇流器,并且配备有最大功率点跟踪(MPPT)控制器,如图1.1所示。此系统利用 Buck-Boost 变换器作为双向的充/放电器以减少零件数,另外,利用串联谐振并联负载换流器作为电子镇流器的功率级,可降低开关损耗。整体系统会根据太阳的日照强度点亮不同组数的灯管。另外,配以充/放电器与电池组可弥补因乌云遮蔽所造成的光闪烁,也可作最大功率点追踪。本章将分别说明如何设计及制作这些变换器,然后讨论系统整合后的测试、改善及实务考量。

此系统的MPPT控制器及点灯和功率流向的控制器是以Intel 8752来实现

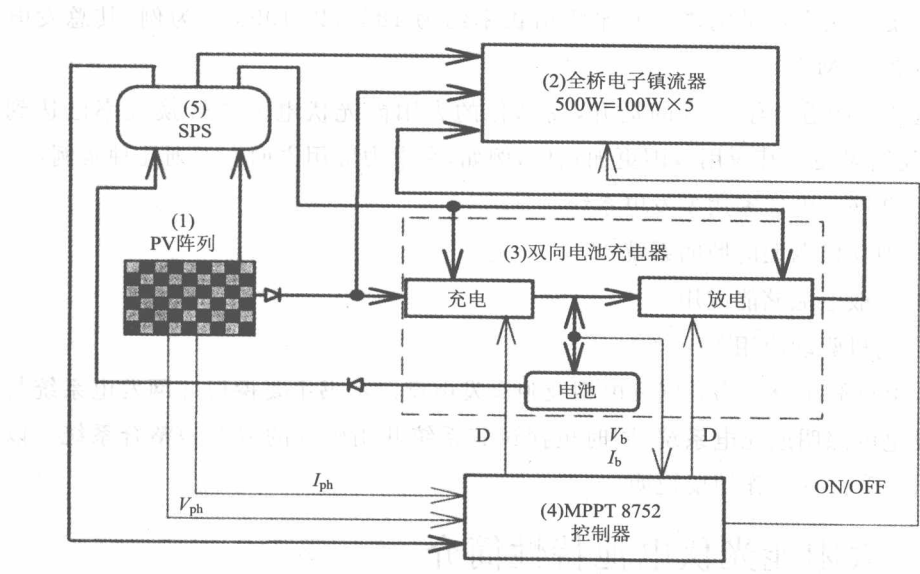


图 1.1 多级式太阳能光伏照明系统

的,并配以外加的 PID 补偿器来提高系统的动态性能及降低稳态误差。文中将会讨论如何设计此控制器及补偿器,而且会说明如何撰写程序,让后续的研究人员或设计工程师有所依循及改进。

1.4 单级式太阳能光伏照明系统

本章所讨论的主题是延续前一章的系统架构,唯一不同的是利用同步操作将充电器、放电器及换流器(作为电子镇流器的功率级)整合成一单级的功率级,整体单级式照明系统如图 1.2 所示。文中将详细说明如何将这三级整合成一级[电路如图 1.2(b)所示],并且说明当开关器件的控制自由度减少后,充/放电及点灯功能是如何达成,又如何影响其动态性能。另外,此系统的控制器是用 PIC16C74 IC 来实现的,此 IC 采用 RISC 的架构完成,与一般的芯片有所不同,因此在文中也将简略说明其功能,以便系统地整体介绍。

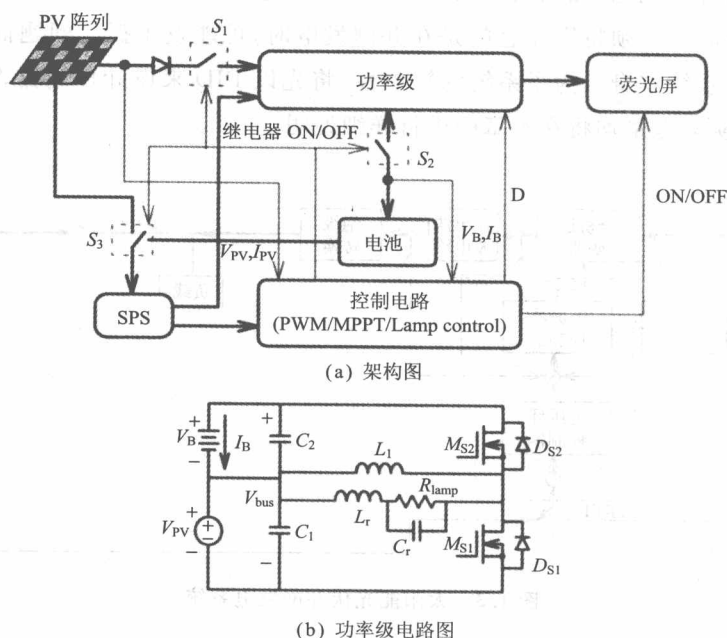


图 1.2 单级式太阳能光伏照明系统

1.5 太阳能光伏充电系统

太阳能光伏充电系统将以电动机车为充电对象。一般而言,机车停车场皆建有遮阳或遮雨棚,若将石棉瓦换成太阳能光伏电池,则可兼具遮蔽与发电双重效

果。本章将介绍如何设计一个适用的充电系统,此系统包括充电器及网路连线监控装置。另外,我们将会探讨如何应用零电压开关及零电流开关技术来提升功率转换效率及如何最有效地多组充电,让系统发挥其最佳功效。系统中加入网路连线监控装置可随时从远端了解到充电系统的运作情形,并且可兼作收费连线用。文中将详细介绍其所需的软、硬件及系统的测试结果。

介绍完了独立供电系统,将进一步介绍太阳能光伏并网发电系统,这包括太阳能光伏并网发电系统的相位落后控制、太阳能光伏并网发电系统的模糊控制、多功能太阳能光伏并网发电系统及多模块换流器并联系统。

1.6 太阳能光伏并网发电系统的相位落后控制

典型的太阳能光伏并网发电系统如图 1.3 所示,其中包括了全桥换流器、输出滤波电路、MPPT 控制器及电压/电流环控制器。并网发电系统有两种操作模式:独立供电与并网发电,独立供电是操作在电网断电时,而并网发电则是操作在电网能正常输电时。必须特别注意的是在并网发电时,可能发生孤岛问题而损伤维修人员或危及系统本身。为了系统的简单性,将先以 PID 来设计控制器。以上的设计、讨论及实务考量均将在本章中进行详细说明。

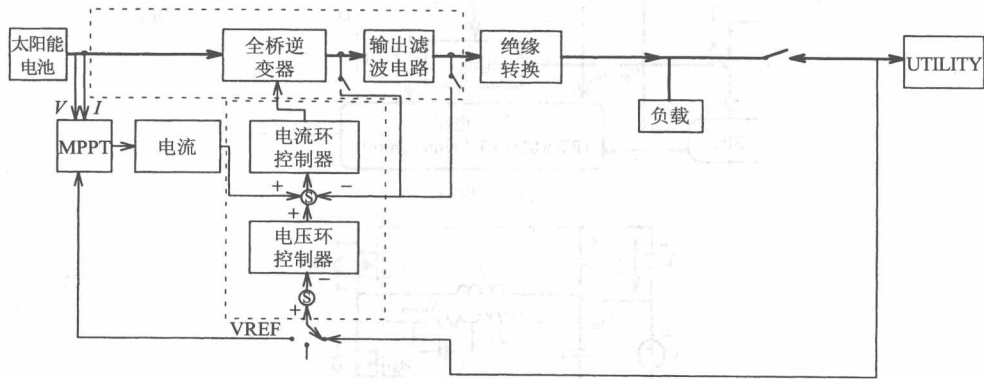


图 1.3 太阳能光伏并网发电系统

1.7 太阳能光伏并网发电系统的模糊控制

以 PID 控制的系统,虽然单纯,但可能很难涵盖许多变数,如太阳能光伏电池的输出电压变化与负载的大变动,因此,在本章中将探讨采用具有较佳适应能力与强健能力的模糊控制来调节充/放电电流及实现最大功率跟踪。PID 控制系统采用 Intel 80196MC 来实现 PID 及其他的系统控制;而在此系统中,则采用