国际电气工程先进技术译丛

WILEY

光伏系统的PSpice建模

Modelling Photovoltaic Systems Using PSpice

[西] Luis Castañer
Santiago Silvestre 著

张晓强 张卫平 刘元超 赵一阳 张懋 译

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际电气工程先进技术译丛

光伏系统的 PSpice 建模

[西] Luis Castañer
Santiago Silvestre 著

张晓强 张卫平 刘元超 赵一阳 张 懋 译

机 械 工 业 出 版 社

Copyright © 2002 John Wiley & Sons Ltd.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled < Modelling Photovoltaic Systems Using PSpice >, ISBN: 978-0-470-84528-8, by Luis Castaner and Santiago Silvestre, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面允许，本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有，翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记图字：01-2012-0579 号

图书在版编目（CIP）数据

光伏系统的 PSpice 建模/（西）路易斯特纳，（西）塞维斯特著；张晓强等译. —北京：机械工业出版社，2014.7

（国际电气工程先进技术译丛）

书名原文：Modelling photovoltaic systems using pspice

ISBN 978-7-111-47479-1

Ⅰ.①光… Ⅱ.①喀…②塞…③张… Ⅲ.①太阳能发电－电子电路－计算机辅助设计－应用软件－系统建模 Ⅳ.①TM615②TM702

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 169930 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：江婧婧 责任编辑：江婧婧

版式设计：霍永明 责任校对：刘雅娜

封面设计：马精明 责任印制：李 洋

三河市国英印务有限公司印刷

2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm · 19.5 印张 · 389 千字

0 001— 3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-47479-1

定价：88.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务 网络服务

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

本书首先介绍了光伏（PV）系统的一些基本定义和基础理论知识，在此基础上利用计算机仿真软件 PSpice 对 PV 系统进行建模。

本书主要内容包括 PV 系统的光谱响应与短路电流，太阳电池的电气特性，太阳电池阵列、PV 模块和 PV 发电组件，PV 模块与负载和蓄电池连接的建模，功率调节器和逆变器的建模，最后介绍了独立 PV 系统和并网 PV 系统以及小型 PV 系统。

本书适合于从事 PV 系统、PV 电池研究的科研工作人员或企业研发人员参考，同时可作为该专业的高校本科生、研究生和教师的参考用书。

译 者 序

随着化石能源的枯竭和能源损耗量的持续增加，太阳能利用成为全世界关注的热点问题之一。基于通用的电路分析软件——PSpice，本书介绍光伏（PV）发电系统的定量分析和仿真技术，涵盖了PV系统的主要基础知识和工程应用。

全书分为9章。第1章主要介绍太阳辐射、标准光谱和通用计算机仿真软件（PSpice）的基础知识。第2章介绍光谱响应及其PV电池短路电流的PSpice简化模型。第3章介绍PV电池的伏安特性及其环境影响。第4章分别介绍太阳电池阵列、地面PV模块以及PV发电组件建模方法。第5章介绍PV模块与典型负载匹配以及蓄电池连接的建模。第6章介绍功率调节器与逆变器建模。第7章介绍独立运行的PV系统。第8章介绍并网PV系统。第9章给出若干典型的小功率PV应用系统。

本书提供了用PSpice仿真研究PV发电系统主要问题的核心技术，是一部用数值仿真技术研究工程问题的专著。虽然本书涉及半导体物理学、电力电子学、电工学及计算机仿真等学科的基础知识，但关键问题的叙述通俗易懂，简单实用。所以，译者认为本书可作为电力电子工程技术人员和大专院校师生学习PV发电系统的参考用书。本书在翻译过程中得到了清华大学陈建业教授、浙江大学吴兆麟教授、合肥工业大学张兴教授、北方工业大学杨兵副教授等人的校对，在此表示深深的谢意。本书的出版得到国家自然科学基金项目：光伏发电系统PV阵列串—并联功率优化技术的研究（NO. 51277004）的资助，在此表示感谢。

由于译者对原著的理解不够透彻，难免有“望文生义”之嫌，恳请同行学者及前辈不吝赐教，雅正为盼！

译 者

2014年10月1日

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

原 书 序

光伏（PV）工程深深植根于半导体物理学中太阳电池的理论和技术，并十分依赖电气与电子工程系统分析和设计，是一个多学科专业。

PV 系统的概念、设计和分析这些重要任务通常需要计算机的帮助以进行快速、准确的计算或模拟。如今的工程师和相关领域的专业人员，甚至不同技术学科的学生也能够使用计算机，并能熟练运用专业软件。计算机辅助技术对 PV 系统有巨大的帮助，因为大多数元器件是非线性的，并且要求解电流和电压值的节点电路方程，通常没有解析解。此外，太阳电池和 PV 发电机的特性强烈依赖于太阳辐射强度和环境温度。因为这些都是随时间变化的变量，如果采用了长期的有辐射和温度的时间序列的系统性能估算值，则在系统设计阶段将会更加准确。

本书的主要目标是帮助理解 PV 系统的运行的相关概念，设计标准和结论，这些同时也使用计算机软件，即 PSpice 进行定义或说明。

书中所述内容已经作为本科课程在西班牙巴塞罗那的 UPC（卡特卢那理工大学）教学内容 10 多年，在与学生的大量互动中，内容逐步准确。1992 年，PSpice 作为一个工具被引入教学过程，来模拟一个基本的太阳电池，之后，硕士和博士生不仅为光伏电池也为 PV 发电机、蓄电池、转换器、逆变器开发出了更详细的模型。在我们教师的印象中，学生迅速掌握了工具，并主动准备使用和应用书中的程序和模型。PSpice 通用版本或更先进的版本十分有助于与学生互动，互动中使课程的发展能够因材施教，同时学生可以把发现的困难反馈给老师。我们认为，教学经验的一个关键特征是，定量的结果都是已有的，从网页得到的 PV 组件和蓄电池的数据值可以使用在问题和练习中，使转换结果接近真实值。

PSpice 是进行模拟信号和混合信号仿真的最流行的权威软件。工程师们依靠 PSpice 进行设计的准确性和鲁棒性分析。大学和半导体制造商使用 PSpice 并提供新器件的 PSpice 模型。PSpice 是一个强大的仿真工具，与 Orcad Capture®，HDL 语言，或 PSpice 原理图构成完整运行环境，可以让工程师创建设计、建立和运行模拟，并分析仿真结果。更多 PSpice 的细节和信息可以在 http：// www. pspice. com / 找到。

同样在这个网站有免费的 PSpice 程序，PSpice 9. 1 学生版可以下载。也可以在 http：//www. pspice. com/download/default. asp 申请免费的 Orcad Lite 版 CD 来得到 PSpice 仿真软件。

PSpice 手册和其他技术文件也可以在上述网站获取 PDF 格式文档。虽然在本书的第 1 章进行了 PSpice 软件的简单使用介绍，我们强烈建议读者去查阅这些手

册以获得更详细的信息。用户还可以在 http: // www. pspice. com/publications/books. asp 找到一个专用于 PSpice 的优秀书籍列表。

本书中出现的为光伏电池和 PV 系统的性能仿真开发的所有模型，都适用于在 PSpice 9 版本下运行。PSpice 提供了一个很好的图表环境，Orcad Capture 提供了可以进行 PSpice 仿真的电路设计界面，尽管如此，本书中所有的 PSpice 模型仍采用可以用作输入文件的文本文件。我们认为，这种选择提供了一个更全面的模型，有助于理解这些模型是如何实现的，并允许快速改写这些模型以适应不同 PV 系统体系结构或根据不同的设计环境改写模型。第二个选择文本文件的原因是，它们很容易被移植到其他现有的 PSpice 版本中。

这里描述光伏电池和 PV 系统的其他组件所有的模型，都可以在 www. esf. upc. es/esf/查找到，在那里用户可以下载本书中所有实例的仿真文件和结果。复现本书部分仿真必要的一组激励、库文件等的相应文档，也可以在上述网站下载。访问本网站需要的用户名为 esf，密码为 esf。

原书前言

随着光伏（PV）系统组件性能提高和由大规模工业生产引起的生产成本降低，PV发电迅速成为一个成熟的行业。政府和其他的一些机构采取资助安装费用的措施以及部分国家出台一些关于购买并网发电系统的规定及公众环保意识的提高，使得太阳能发电得到广泛应用。

在过去的几年中，PV发电行业的快速发展引起了全世界对PV发电教育培训的兴趣，特别是在系统级上的培训，越来越多的人参与其中。在现有的书本中，PV系统工程和系统设计通常被认为只是肤浅地介绍了关于PV的知识。因此，本书成为了第一本包含计算机建模并进行详细定量分析讲述PV系统的书籍。PSpice软件是一个很好的仿真软件，已被全世界广泛应用于电子电路仿真。因此，可以用它学习PV系统或协同解决其设计、尺寸或分析等技术问题。

在大学和专业技术学校中，学生们精通计算机知识，应用计算机辅助学习越来越熟练。通过利用实用友好的计算机软件，使得学生们学习光伏的兴趣被进一步提高，这些软件可以用来求解复杂和非线性方程。由于教学关注概念、标准及结果，因此从事电气工程或电力电子的教育工作者也可以使用这本书中的PV案例作为教学参考。

这本书也将有助于协助专业工程师获得PV发电专业知识，并允许他们使用书中的这些技术和行为模型。

这本书涵盖了PV系统工程知识，第1章主要介绍太阳辐射及标准光谱的一些基本知识和通用计算机仿真软件（PSpice）的基础知识。第2章介绍PV电池短路电流的PSpice简化模型和光电转化效率以及频谱响应等基本概念。第3章介绍PV电池的伏安特性，并考虑串并联电阻、光照度、温度和空间辐射对太阳电池特性的影响，还对其PSpice模型进行了一些修正。这样，就建立了一个可以对任意时刻的光照强度和环境温度等参数进行模拟的太阳电池的行为模型。第4章主要介绍太阳电池阵列、地面PV模块以及PV发电组件建模方法。针对具体问题进行建模和说明，如旁路二极管的使用，太阳电池阵列的部分阴影及安全运行区域介绍。从而将太阳电池行为模型扩展应用到任意大小的发电设备中。第5章描述抽水系统和蓄电池的PSpice模型，这样模拟出PV电池阵列的性能与抽水系统的瞬态响应。第6章描述充电调节器、最大功率点跟踪器和逆变器的模型。得到的多天PV测量数据被用来与仿真波形进行比较，从而建立逆变器模型，为标准的逆变电路、行为模型及长时间仿真做准备。第7章致力于独立PV系统，详细地介绍简化计算过程，用每小时辐射时间序列来仿真太阳光辐射一年能量平衡详细情况与系统的长时间响应

过程。随后介绍负载缺电概率，并给出实际的例子。最后，通过提炼得出简化计算方法。第8章作为一个新的问题讲述利用第6章逆变器模型搭建的并网发电系统，并介绍交流PV发电模块和使用这些系统的具体情况。最后，第9章讲述多种情况下的“小型PV产业”，比如一个袖珍计算器在人造光随机有效照射下的工作情况。基于蒙特卡罗方法生成的随机数，生成了随机时间序列的PSpice仿真辐照度，来模拟PV最糟糕一个月的性能。

另外，我们欢迎其他光伏文献的出版发行，相信很多人都会从PV发电文献提出的实用方法中受益。

Martin A. Green
Scientia教授
PV工程中心
新南威尔士州，悉尼大学
2002年4月

致　　谢

在西班牙 UPC（卡特卢那理工大学），我们 GDS 研究组的多个人都为建立 PV PSpice 软件模型做出了贡献，这里作者要特别感谢丹尼尔·卡尔斯指导的罗蒙德·阿洛伊修斯。他们在电池建模上的工作是完美的、系统的和综合性的。安德烈·莫雷诺和哈维尔·朱丽叶继续这项工作，开发了修订模型，以及特征宏模型，并能够比较长期仿真与大学中 PV 装置的监测实验结果。这些工作增强了对所创模型有效性，仿真环境的实用性的信心，激励了作者写作本书。我们还要感谢那些自 1992 年以来一直有兴趣在 UPC 选修 PV 发电的学生。他们的批评、评论和热情有助我们取得成果。

作者还在 PV 系统建模领域研究合同 TIC97 - 0949 下得到科学技术部际委员会的支持，促进作者收集所有的材料，增加更多的基本原理和基本内容，形成一本具有可读性的书。

Luis Castañer 和 Santiago Silvestre

目　　录

译者序
原书序
原书前言
致谢

第 1 章　PV 系统与 PSpice 的简介 …… 1

1.1　PV 系统 …… 1
1.2　重要的定义：辐射度和太阳辐射通量 …… 1
1.3　PSpice 基础知识 …… 3
1.4　用子电路程序简化可移植性 …… 5
1.5　PSpice 分段线性源和受控电压源 …… 7
1.6　AM1.5G 标准太阳光谱密度 …… 7
1.7　AM0 标准太阳光谱密度和黑体辐射对照 …… 9
1.8　PV 系统能量的输入：可用的太阳辐射通量 …… 12
1.9　习题 …… 15
参考文献 …… 15

第 2 章　光谱响应与短路电流 …… 16

2.1　介绍 …… 16
2.1.1　吸收系数 $\alpha(\lambda)$ …… 16
2.1.2　反射系数 $R(\lambda)$ …… 17
2.2　太阳电池的解析模型 …… 18
2.2.1　短路光谱电流密度 …… 18
2.2.2　光谱光子通量 …… 20
2.2.3　总短路光谱电流密度及其单位 …… 20
2.3　短路光谱电流密度的 PSpice 模型 …… 21
2.3.1　吸收系数的子电路 …… 21
2.3.2　短路电流子电路模型 …… 21
2.4　短路电流 …… 24
2.5　量化效率 …… 25
2.6　光谱响应 …… 26

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

2.7 暗电流密度 …… 27
2.8 太阳电池的材料 …… 28
2.9 电流密度的叠加 …… 29
2.10 DC 扫描图和太阳电池的伏安特性 …… 30
2.11 非理想电路模型：串并和分流电阻及其组合项 …… 32
2.12 习题 …… 32
参考文献 …… 33

第 3 章 太阳电池的电气特性 …… 34

3.1 理想等效电路 …… 34
3.2 理想太阳电池的 PSpice 模型 …… 35
3.3 开路电压 …… 37
3.4 最大功率点 …… 38
3.5 填充因子和能量转换效率 …… 40
3.6 太阳电池的广义模型 …… 42
3.7 太阳电池的广义 PSpice 模型 …… 43
3.8 串联电阻对短路电流和开路电压的影响 …… 44
3.9 串联电阻对填充因子的影响 …… 45
3.10 并联电阻的影响 …… 47
3.11 复合二极管的影响 …… 48
3.12 温度影响 …… 48
3.13 空间辐射的影响 …… 52
3.14 太阳电池的行为模型 …… 56
3.15 用太阳电池行为模型和 PWL 电源来模拟太阳电池对温度和光照强度时间序列的响应 …… 59
3.15.1 时间单位 …… 59
3.15.2 变量单位 …… 59
3.16 习题 …… 61
参考文献 …… 62

第 4 章 太阳电池阵列、PV 模块和 PV 发电组件 …… 63

4.1 介绍 …… 63
4.2 太阳电池串联 …… 63
4.2.1 相同的太阳电池组合 …… 64
4.2.2 相同的太阳电池在不同光照条件下的组合：热斑问题 …… 64
4.2.3 串联太阳电池中的旁路二极管 …… 65

4.3 太阳电池的并联 …… 67
4.4 地面 PV 模块 …… 69
4.5 PV 模块的标准特性与任意光照和温度条件下特性的转化 …… 73
4.6 单个 PV 模块的 PSpice 行为模型 …… 74
4.7 PV 模块中的热斑问题和安全操作区域 …… 77
4.8 PV 阵列 …… 78
4.9 PV 发电组和 PV 发电站的扩展 …… 81
4.10 习题 …… 82
参考文献 …… 83

第 5 章 PV 模块与负载和蓄电池连接的建模 …… 84

5.1 直流负载直接连接到 PV 模块 …… 84
5.2 PV 水泵系统 …… 85
5.2.1 直流串励电动机 PSpice 电路 …… 85
5.2.2 离心泵 PSpice 模型 …… 86
5.2.3 参数提取 …… 87
5.2.4 一个 PV 阵列—直流串励电动机离心泵系统的 PSpice 仿真 …… 90
5.3 PV 模块连接到一个电池和负载 …… 92
5.3.1 铅酸蓄电池特性 …… 92
5.3.2 铅酸蓄电池 PSpice 模型 …… 95
5.3.3 根据厂家参数调整的 PSpice 模型 …… 100
5.3.4 在现实的 PV 系统条件下的电池模型 …… 101
5.3.5 简化后的 PSpice 电池模型 …… 107
5.4 习题 …… 108
参考文献 …… 109

第 6 章 功率调节器和逆变器的建模 …… 110

6.1 介绍 …… 110
6.2 阻流二极管 …… 110
6.3 充电调节 …… 111
6.3.1 并联调节器 …… 111
6.3.2 串联调节器 …… 115
6.4 最大功率点跟踪 …… 119
6.4.1 基于 DC - DC 降压变换器的 MPPT …… 120
6.4.2 基于 DC - DC 升压变换器的 MPPT …… 121
6.4.3 MPPT PSpice 行为模型 …… 122

6.5 逆变器 …… 128
6.5.1 逆变器拓扑的 PSpice 模型 …… 130
6.5.2 与 PV 发电装置直接连接的逆变器的 PSpice 行为模型 …… 136
6.5.3 和电池相连的逆变器的 PSpice 行为模型 …… 141
6.6 习题 …… 145
参考文献 …… 146

第 7 章 独立 PV 系统 …… 148

7.1 独立 PV 系统 …… 148
7.2 等效峰值日照时数的概念 …… 149
7.3 PV 系统中的能量平衡：简化估算 PV 阵列容量的过程 …… 152
7.4 PV 系统中的日常能量平衡 …… 155
7.4.1 瞬时功率失调 …… 155
7.4.2 夜间负载 …… 157
7.4.3 日间负载 …… 157
7.5 PV 系统的季节性能量平衡 …… 159
7.6 独立 PV 系统中的电池容量简化计算方法 …… 160
7.7 随机辐射时间序列 …… 162
7.8 负载不足概率 …… 164
7.9 PSpice 仿真结果与监测结果对比 …… 170
7.10 独立 PV 系统的长期 PSpice 仿真：一个案例研究 …… 173
7.11 水泵 PV 系统的长期 PSpice 仿真 …… 176
7.12 习题 …… 178
参考文献 …… 179

第 8 章 并网 PV 系统 …… 180

8.1 介绍 …… 180
8.2 通用系统 …… 181
8.3 相关技术问题 …… 182
8.3.1 孤岛保护 …… 182
8.3.2 电压扰动 …… 182
8.3.3 频率扰动 …… 183
8.3.4 断路 …… 183
8.3.5 并网失败后的重连 …… 183
8.3.6 注入电网的直流分量 …… 183
8.3.7 接地 …… 183

8.3.8　EMI …… 183
8.3.9　功率因数 …… 183
8.4　并网 PV 系统逆变器的 PSpice 模型 …… 184
8.5　交流模块 PSpice 模型 …… 189
8.6　并网 PV 系统的估算和能量平衡 …… 192
8.7　习题 …… 203
参考文献 …… 203

第 9 章　小型 PV 系统 …… 204

9.1　介绍 …… 204
9.2　小型 PV 系统的特殊要求 …… 204
9.3　辐射度和光通量 …… 204
9.4　光通量和照度 …… 205
9.4.1　距离平方律 …… 206
9.4.2　光通量和照度之间的关系 …… 206
9.5　人造光源产生的 PV 电池短路电流密度 …… 206
9.5.1　照度的影响 …… 209
9.5.2　量子效率的影响 …… 209
9.6　在人造光源照射下 PV 电池的伏安特性曲线 …… 210
9.7　AM1.5G 光谱的照度等效 …… 211
9.8　随机蒙特卡罗分析 …… 212
9.9　典型应用研究：太阳能袖珍计算器 …… 215
9.10　LED 照明 …… 216
9.11　典型应用研究：光信号报警 …… 218
9.11.1　PSpice 产生辐射的随机时间时序 …… 220
9.11.2　闪烁式照明系统的长时间仿真 …… 222
9.12　典型应用：路灯照明系统 …… 225
9.13　习题 …… 226
参考文献 …… 226

附录 …… 227

附录 A　第 1 章用到的 PSpice 文件 …… 227
附录 B　第 2 章用到的 PSpice 文件 …… 236
附录 C　第 3 章用到的 PSpice 文件 …… 239
附录 D　第 4 章用到的 PSpice 文件 …… 244

附录 E 第 5 章用到的 PSpice 文件 …… 253
附录 F 第 6 章用到的 PSpice 文件 …… 254
附录 G 第 7 章用到的 PSpice 文件 …… 258
附录 H 第 8 章用到的 PSpice 文件 …… 267
附录 I 第 9 章用到的 PSpice 文件 …… 269
附录 J 太阳电池基本理论摘要 …… 280
附录 K 任意取向表面辐射的估计 …… 284

第 1 章　PV 系统与 PSpice 的简介

摘要：本章综述了太阳辐射的一些基本知识和通用计算机仿真软件（PSpice）的基础知识。通过定义光谱密度、辐射度和辐射通量简述光伏（Photovoltaic，PV）系统。简要介绍本书中最常用的 PSpice 命令和语句，并使用这些命令和语句将 AM1.5G 和 AM0 太阳光谱写为 PSpice 文件。这个文件用来绘制光谱密度与波长之间的关系曲线，并与黑体辐射比较。太阳辐射到地球表面是本章的另一个内容，本章还绘制出每月和每年在地球上倾斜面所接收的辐射量。本章最后介绍了一些用于系统设计的重要的、有用的规律。

1.1　PV 系统

PV 系统是一个能将太阳能转化为电能的装置。这一基本原则涉及复杂的技术，这些技术用来建立有效的装置，在 PV 系统中，PV 电池是关键部件。生产高效率、低成本的 PV 电池需要半导体处理技术。本书主要研究 PV 电池输出电气特性，而利用数学公式深入研究 PV 电池的相关内容已超出了本书的研究内容。

PV 系统是一个由多个模块组成的模块化系统，既可以将这些模块放大构建一个大系统，又可以将其缩小变为一个小系统。PV 系统的用途十分广泛，其输出功率的等级从 mW 到 MW，其用途从手表到通信卫星、地面太阳能电站以及并网系统。尽管如此，各种用途及功率等级的系统具有相同的工作原理，区别仅限于功率等级大小的特殊限制。

组成 PV 系统的基本模块含有两大部分：其一是电池片/PV 模块以及以适当方式封装与连接的阵列；其二是连接 PV 模块到如下系统的电子装置：

1）独立发电系统的储能装置；

2）并网发电系统；

3）通过合适 DC－DC 或 DC－AC 变换器连接的 DC 或 AC 负载。

在设计和连接这些系统时一定要考虑各个系统的特殊约束条件，同时需要建立特殊模型对其电气特性进行仿真。

1.2　重要的定义：辐射度和太阳辐射通量

波长在 300nm～4μm 范围内的太阳光，在传输过程中部分被大气层反射，部分到达地球表面。所以位于太空（如卫星、飞船）的 PV 发电装置不同于地面上的

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com