



国际电气工程先进技术译丛



WILEY
www.wiley.com

智能电网可再生 能源系统设计

Design of Smart Power
Grid Renewable Energy Systems

(美) Ali Keyhani 著

刘长浥 陈默子 许晓艳 译

贺敬 张利

刘长浥 校

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



关于本书

智能电网可再生能源微电网系统是电力工程领域近年来兴起的一个革命性概念。本书介绍了可再生能源、智能电网和微电网的基本概念，把电力工程的三个领域（电力系统工程、电力电子学和电能转换系统）综合起来论述智能电网可再生能源微电网系统设计问题。本书作者概述了人类历史上一次能源使用的演变，介绍了电网的基本概念，深入考察了微电网变换器建模问题和智能电网系统的设计，最后论述了电网及微电网潮流分析和电网故障研究。

本书的重要特点之一是结合实例论述理论和工程问题。本书每章都先提出一个关键工程问题，然后给出解决问题的数学模型，再介绍MATLAB仿真平台，说明解题步骤。每章还都包括解题案例、习题和相关参考文献。

本书撰写的初始目的是作为电气和机械工程本科生和研究生的教科书，但由于它内容非常丰富，也可以作为相关专业的工程技术人员、研究人员和能源决策人员的参考资料。



国际电气工程先进技术译丛

智能电网可再生能源 系统设计

(美) Ali Keyhani 著
刘长浥 陈默子 许晓艳 译
贺敬 张利
刘长浥 校



机械工业出版社

本书介绍了可再生能源、智能电网和微电网的基本概念，把电力工程的三个领域（电力系统工程、电力电子学和电能转换系统）综合起来论述智能电网可再生能源微电网系统设计问题。本书作者概述了人类历史上一次能源使用的演变，介绍了电网的基本概念，深入考察了微电网变换器建模问题和智能电网系统的设计，并论述了电网及微电网潮流分析和电网故障研究。

本书的重要特点之一是结合实例论述理论和工程问题。每章都先提出一个关键工程问题，然后给出解决问题的数学模型，再介绍 MATLAB 仿真平台，说明解题步骤。每章还都包括解题案例、习题和相关参考文献。

翻译本书的目的是作为电气和机械工程本科生和研究生的教科书，同时也可以作为相关专业的工程技术人员、研究人员和能源决策人员的参考资料。

译者序

随着全球变暖和能源枯竭问题日益引起人们的关注，有效利用可再生能源从而替代化石燃料并减少温室气体排放已经成为一个极其重要的全球性问题。与此相关，电力产业在发电、输电、配电和用电等各个环节都在发生革命性的变化。智能电网可再生能源微电网系统是电力工程领域近年来兴起的一个革命性概念。它的突出特点是可以为最终用户提供发电、自维持和配送电的手段，从而使他们能控制自己的能源需求；从电网角度看，它可以提高供电连续性和可靠性，加大削峰填谷力度，降低备用需求，提高电网运营的经济性。

本书介绍了可再生能源、智能电网和微电网的基本概念，把电力工程的三个领域（电力系统工程、电力电子学和电能转换系统）综合起来论述智能电网可再生能源微电网系统设计问题。本书作者概述了人类历史上一次能源使用的演变，介绍了电网的基本概念，深入考察了微电网变换器建模问题和智能电网系统的设计，最后论述了电网及微电网潮流分析和电网故障研究。

本书的重要特点之一是结合实例论述理论和工程问题。本书每章都先提出一个关键工程问题，然后给出解决问题的数学模型，再介绍 MATLAB 仿真平台，说明解题步骤。每章还都包括解题案例、习题和相关参考文献。各章的具体内容在前言中有详细说明，此处不再赘述。

本书撰写的初始目的是作为电气和机械工程本科生和研究生的教科书，但由于它内容非常丰富，也可以作为相关专业的工程技术人员、研究人员和能源决策人员的参考资料。

本书作者阿里·凯伊哈尼博士（Ali Keyhani, PhD）现任美国俄亥俄州立大学电力及计算机工程系教授，是 IEEE 会员，曾多次获得俄亥俄州立大学工程学院研究奖。他曾为很多电力企业和其他行业做过研究和咨询工作，并在 IEEE 工程学报上发表过很多论文。他发表的专著除本书外，还有《智能电网 2011（Smart Power Grids 2011）》、《电力系统中绿色可再生能源并网（Integration of Green and Renewable Energy in Electric Power Systems）》等。

可能因为成书仓促，原书存在不少错误。最多的是图、表、例题、习题编号标示或对应性有误，数字引用错误，符号错误等；此外，还有一些表示法不规范或与我国规定不同。这些问题和一些其他错误在翻译时都尽可能改正了，并以“译者注”简要标出。另外，本书大量使用英制计量单位，可能会使我国读者感到不习惯，我们也尽量做了注解。

本书译校者都是中国电力科学研究院新能源研究所的科研人员。具体分工为：

IV 智能电网可再生能源系统设计

刘长浥译第 1、2、7、8 章和辅文及附录，陈默子译第 4 章，许晓艳译第 5 章，贺敬译第 3 章，张利译第 6 章；刘长浥通校全书并统稿。由于时间紧迫以及我们的外语和专业水平的限制，译文很可能有这样或那样的错误，还请读者不吝指教。

本书的翻译和编辑工作得到了机械工业出版社电工电子分社编辑付承桂和她的同事们的大力支持和帮助，使翻译工作得以顺利进行，本书得以尽早与读者见面，谨在此深表谢意。

原 书 序

我很荣幸能在阿里·凯伊哈尼 (Ali Keyhani) 教授撰写的这本非常重要的《智能电网可再生能源系统设计》前面说上几句话。

电力产业重组对个人股东来说是一个能使他们广泛参与电力的生产、配送和使用的关键步骤。“智能电网”进一步提供了替代手段以提高电力系统的可靠性、可持续性和供用户选择的能力。智能电网可以创建在临界运行条件下作为独立孤岛运行的微电网。这种小型装置可以在大电网面临重大事故时提高区域电力系统的可靠性。有几个微电网装置的实例表明，在分布式电网中使用智能开关可以减少停电次数，缩短停电持续时间。

此外，智能电网可以使微电网优化使用不稳定、间歇性的可再生能源，并提高区域电力系统的可持续性。使用主要跟踪发电的日负荷特性的太阳能光伏发电以及当地风力发电，并辅以微电网装置的储能设备，可以为微电网负荷提供比较廉价和可持续的供电手段。储能广泛利用的原理也见于新兴的即插即用的电动汽车市场，它可以利用低谷时期的风电。这样利用微电网可以避免穿越世界上的人口稠密区新建高压输电线来传输可再生能源发出的电力。

然而，我相信，电力工业的进化必然会使向个体用户的电力配送方式产生革命性变化。这种进化主要体现在与实时电价、以小时计的需求响应以及扩大了用户为提高能源效率而做出的选择等相关的智能电网应用。智能电网的创新使用户可以根据每天的日程、需求和喜好，并为考虑变化电价节省开支来安排他们的用电优先顺序。智能电网的发展也可以使自动化控制系统能对家庭和企业用电进行优化，确定装置运行的最佳时间以降低用电成本。

用户参与可以提供大量激励手段来优化电力运营，如免除高成本机组在峰荷期间投运，推迟只在每年的峰荷期间（只有数百小时）才需要做出响应的指令系统升级，降低输电系统事故机会等，从而降低运行成本；否则电力系统就会运行于接近崩溃临界点的状态。需求响应也可以减少日负荷曲线的波动，从而可以对日负荷曲线做出预测，更加综合、高效地规划发电的燃料及水力消耗。

我相信，本书会向读者展示一些可以在不久的将来潜在地改变发电、送电和用

VI 智能电网可再生能源系统设计

电模式的主题。我乐于祝贺凯伊哈尼教授对电力系统创新的密切关注，并感谢他致力于把这类主题介绍给我们大家。

美国伊利诺伊州芝加哥 伊利诺伊理工学院 电力创新中心
特聘教授，主任

穆罕默德·谢罕德普 (Mohammad Shahidehpour)

2011 年 1 月

原 书 前 言

可持续的电力生产和高效利用可用能源从而降低或消除碳足迹是我们在 21 世纪面临的最重大挑战之一。对于我们这些从事电力工程的人来说，这是一项特别艰巨的任务。本书把可持续电力生产问题作为微电网和智能电网可再生能源系统设计的一部分加以论述。

如今，互联网为工程专业的学生提供了浩瀚的资源；我们教师的任务是为利用这些资源提供定义明确的学习方法。我们还应该用能激发他们想象力的习题向他们提出挑战。本书处理这个问题的方式是提供系统方法，全面应用这里介绍的可持续生产绿色电力的概念，并提供可帮助进行可再生能源微电网实际设计的分析工具。我会在每一章介绍一个关键工程的习题，然后给出这一习题的数学模型和 MATLAB 试验平台，说明解题步骤。有些例子给出了解题过程，但还有很多习题放在每章的末尾，它们的设计意图是对学生的思维提出挑战。相关参考文献也列在每章末尾。

本书还提供解题指导手册和带动画的 PPT 讲义。可以采用它们并把它们转换为符合教师需要的演示形式。每章末尾所附的习题的答案也包含在解题指导手册中[⊖]。

本书介绍的概念综合了电力工程的三个领域：电力系统、电力电子学和电能转换系统。本书还介绍了作为大功率电网系统一部分的风电及光伏微电网的初步设计。本书对读者的要求是对电路知识有初步了解。本书介绍了相量系统、三相系统、变压器、DC/DC 变换器和 AC/DC 整流器，并以此作为它的基础。所有这些内容都融入作为大功率互联网一部分的可再生能源微电网的设计。

第 1 章除了对能源使用做了历史回顾外，还通过一系列碳足迹计算分析了化石燃料的使用与整个国家的化石燃料消耗及单个家用电器对应的化石燃料消耗的关系。第 2 章回顾了电力系统、单相负荷、三相负荷、单相及三相变压器、配电系统、输电线路及电力系统建模的基本原理，还介绍了电力系统分析使用的通用化标幺值系统。第 3 章内容包括 AC/DC 整流器、DC/AC 逆变器和脉宽调制（Pulse Width Modulation, PWM）方法。它重点介绍利用逆变器作为电力系统的三端口元件使风电和光伏发电并入电网，还介绍了 PWM 逆变器的 MATLAB 仿真。第 4 章介绍了智能电网的设计及运行的基本概念。该章从系统角度介绍了智能电网的元件和它们的功能，并概括说明了智能电网运行的复杂性。该章的覆盖范围包括感应、测

⊖ 译者注：本书的中文版没有包括这里说的解题指导手册和 PPT 讲义。

量、集成通信及智能计量；实时电价；智能电网的网络控制；绿色能源高度渗透到大规模互联电网；间歇性电源和电力市场。该章还介绍了同步发电机运行的初步建模和操作，输电线路的潮流限制、潮流问题、负荷系数计算及它们对智能电网运行的影响、实时电价及微电网。这些概念搭建了可再生能源并入电力系统的舞台。第5章研究了光伏能源。该章介绍如何进行光伏组件发电量的计算，以及组件对太阳所处位置的相对倾斜角要多大才能发出最大电量。该章还介绍了光伏组件的建模、光伏电站的微电网设计和光伏系统的最大功率点跟踪。第6章介绍了风力发电，以描述感应发电机建模作为可再生能源系统微电网的一部分。该章还介绍了双馈感应发电机、变速永磁发电机、无电刷发电机的使用，从系统角度看待的变速风电转换。第7章介绍了电网母线导纳和阻抗的建模，以及作为大型互联电力系统一部分的微电网的潮流分析。第8章介绍了潮流的牛顿方程，潮流问题的牛顿-拉夫逊解法以及潮流研究中的快速解耦算法。

本书给出了使用绿色能源的电网和微电网集成的基本概念，这实际上是所有国家的目标。微电网设计是使用绿色能源、电力电子、控制传感技术、计算机技术和通信系统的基础设施现代化的关键。

Ali Keyhani

2011年1月

于美国佛罗里达州 Sanibel 岛

致 谢

过去 10 年中，我的研究工作一直得到美国国家科学基金会（National Science Foundation, NSF）的支持，本书是 NSF 赠款支持的工作之一[⊖]。多年来，我的一些学生和研究生都对本书介绍的内容做出过贡献。特别要提到的是埃及 Zagazig 大学工程系电力及机械工程部的博士生 Abir Chatterjee 和 Adel El Shahat Lotfy Ahmed。

感谢我的妻子 Maureen Keyhani 的理解和支持。

我还要感谢 John Wiley & Sons 出版社发展部主任 Simone Taylor、协调部的 Michael Christian 和 STM 出版服务公司的 Kate McKay 的帮助。

⊖ 原书注：本书的某些资料基于 NSF 奖 ECCS0501349、ECCS0105320 和 ECCS0118080 支持的工作。这些材料表达的意见、成果、结论或建议都是作者本人的，并不一定反映 NSF 的观点。

目 录

译者序	
原书序	
原书前言	
致谢	
第 1 章 能源与文明	1
1.1 引言	1
1.2 化石燃料	1
1.3 能源枯竭	2
1.4 一种替代能源：核能	4
1.5 全球变暖	5
1.6 电力系统时代	8
1.7 绿色可再生能源	9
1.7.1 氢	9
1.7.2 太阳能和光伏发电	10
1.7.3 地热能	11
1.7.4 生物质能	11
1.7.5 乙醇	11
1.8 能量单位及转换	11
1.9 电量成本估计	15
1.10 小结	16
习题	17
参考文献	18
第 2 章 电网	20
2.1 引言	20
2.2 电网	20
2.2.1 背景	20
2.2.2 电网系统的结构	21
2.3 电网的基本概念	24
2.3.1 常用术语	24

2.3.2 消耗功率计算	25
2.4 负荷模型	37
2.5 电网中的变压器	40
2.5.1 变压器简史	40
2.5.2 输电电压	40
2.5.3 变压器	41
2.6 微电网系统建模	44
2.6.1 标幺值系统	45
2.7 三相变压器建模	53
2.8 抽头接换变压器	55
2.9 输电线建模	56
习题	66
参考文献	70
第3章 微电网系统中的变换器建模	71
3.1 引言	71
3.2 单相两开关逆变器	71
3.3 单相四开关双极全桥逆变器	81
3.3.1 单极性单相全桥逆变器的 PWM	83
3.4 三相 DC/AC 逆变电路	86
3.5 PWM 控制方法	86
3.5.1 三角波法	86
3.5.2 恒等式法	91
3.6 三相逆变器分析	91
3.7 可再生能源微电网	100
3.8 绿色能源系统中的直流变换器	102
3.8.1 升压变换器	102
3.8.2 降压变换器	110
3.8.3 升降压变换器	116
3.9 整流器	120
3.10 脉宽调制整流电路	123
3.11 使用正弦 PWM 开关技术的三相电压源整流器	126
3.12 微电网运行中的逆变器定容	129
3.13 微电网运行中的整流器定容	130
3.14 微电网运行中的直流变换器定容	131
习题	131

参考文献	135
第4章 智能电网系统	136
4.1 引言	136
4.2 电网运行	136
4.3 纵向组合及市场化结构的电力公司	142
4.4 电网运行控制	144
4.5 负荷-频率控制	145
4.6 自动发电控制	149
4.7 运行备用计算	154
4.8 智能电网的基本概念	154
4.9 负荷系数	160
4.9.1 负荷系数与实时定价	162
4.10 计算机控制的智能电网	165
4.11 智能电网的发展	167
4.12 智能微电网可再生绿色能源系统	168
4.13 电网汽轮发电机	174
4.14 电网建模	181
习题	187
参考文献	192
补充文献	193
第5章 太阳能微电网系统	195
5.1 引言	195
5.2 太阳能转换过程：热能电厂	198
5.3 光伏发电转换	200
5.4 光伏电池材料	201
5.5 光伏特性	202
5.6 光伏效率	204
5.7 光伏系统设计	208
5.8 光伏组件建模	218
5.9 光伏性能测试	220
5.10 光伏方阵的最大功率点	220
5.11 蓄电池储能系统	231
5.12 基于单格蓄电池的储能系统	233
5.13 光伏组件在不同入射角度下的发电量	251

5.14	光伏发电技术现状	251
5.15	光伏组件模型参数估算	252
	习题	253
	参考文献	260
	补充文献	261
第 6 章	风能微电网系统	263
6.1	引言	263
6.2	风力发电	264
6.3	风力发电机	268
6.4	感应电机建模	271
6.4.1	计算转差率	276
6.4.2	感应电机等效电路	277
6.5	感应电机潮流分析	280
6.6	感应发电机运行	282
6.7	动态特性	293
6.8	双馈感应发电机	299
6.9	无刷双馈感应发电机系统	301
6.10	变速永磁发电机	301
6.11	变速同步发电机	303
6.12	带与电网隔离变换器的变速发电机	303
	习题	305
	参考文献	306
第 7 章	电网和微电网的潮流分析	308
7.1	引言	308
7.2	电网分析中的电压计算	308
7.3	潮流问题	311
7.4	作为电力系统工程工具的潮流研究	312
7.5	母线类型	312
7.6	潮流问题的一般性表述	316
7.7	母线导纳模型	318
7.8	母线阻抗矩阵模型	319
7.9	潮流问题表述	320
7.10	母线导纳的高斯-赛德尔法	322
7.11	母线阻抗的高斯-赛德尔法	326

7.12	潮流的母线导纳和母线阻抗解法的比较	330
7.13	微电网的同步及非同步运行	331
7.14	高级潮流解法：牛顿-拉夫逊法	333
7.14.1	牛顿-拉夫逊法	335
7.14.2	牛顿-拉夫逊法的一般性表述	339
7.14.3	解耦牛顿-拉夫逊法	341
7.15	潮流快速解耦法	342
7.16	潮流问题分析	343
	习题	354
	参考文献	362
	补充文献	363
第8章	电网和微电网故障研究	365
8.1	引言	365
8.2	电网故障电流计算	365
8.3	对称分量法	368
8.4	发电机的相序网络	372
8.5	光伏电站建模	374
8.6	平衡三相输电线的相序网络	375
8.7	平衡三相变压器的地电流	377
8.8	零序网络	378
8.8.1	变压器	378
8.8.2	负荷联结	380
8.8.3	电网	381
8.9	故障研究	383
8.9.1	平衡三相故障分析	385
8.9.2	不平衡故障	399
8.9.3	单线对地故障	399
8.9.4	双线对地故障	401
8.9.5	线间故障	403
	习题	414
	参考文献	418
附录		419
附录 A	复数	419
附录 B	输电线和配电线的典型数据	421

参考文献	424
附录 C 光伏组件的发电量与入射角的关系	424
参考文献	434
附录 D 风力发电	434
参考文献	437