

燃料电池的 建模与控制及其 在分布式发电 中的应用

MODELING AND CONTROL
OF FUEL CELLS:
DISTRIBUTED
GENERATION
APPLICATIONS

[美] M. 哈希姆·内里 (M. Hashem Nehrir) 著
王才胜 (Caisheng Wang)
赵仁德 张龙龙 李睿 徐海亮 何金奎 译

储能科学与技术丛书 ■

燃料电池的建模与控制及其 在分布式发电中的应用

Modeling and Control of Fuel Cells:
Distributed Generation Applications

[美] M. 哈希姆·内里 (M. Hashem Nehrir) 著
王才胜 (Caisheng Wang)

赵仁德 张龙龙 李 睿 徐海亮 何金奎 译

机械工业出版社

燃料电池技术近年来得到了快速的发展,尤其是在分布式发电的应用领域。本书除介绍质子交换膜燃料电池的建模外,还介绍了固体氧化物燃料电池和电解器的模型,同时分析了用于燃料电池的电力电子接口电路、并网型和独立型燃料电池发电系统的控制、混合型燃料电池能量系统,以及对燃料电池的挑战与展望。

值得肯定的是,本书中所有的模型在 PSpice 和 MATLAB 中都有建立,同时在书中给出了本书所有模型的仿真文件。

本书对从事分布式发电、燃料电池方面工作的技术人员以及相关专业的高校生,将会提供极大的帮助。

Copyright © 2009 by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Modeling and Control of Fuel Cells; Distributed Generation Applications, ISBN: 9780470233283, by M. Hashem Nehrir, Caisheng Wang, 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:01-2013-8269 号。

图书在版编目(CIP)数据

燃料电池的建模与控制及其在分布式发电中的应用/(美)M. 哈希姆·内里(M. Hashem Nehrir)等著;赵仁德等译. —北京:机械工业出版社,2018.12

(储能科学与技术丛书)

书名原文:Modeling and Control of Fuel Cells; Distributed Generation Applications
ISBN 978-7-111-61454-8

I. ①燃… II. ①M… ②赵… III. ①燃料电池-研究 IV. ①TM911.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 267360 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:付承桂 责任编辑:付承桂 阎洪庆

责任校对:陈越 封面设计:鞠杨

责任印制:常天培

北京圣天亚美印刷有限公司印刷

2019 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·15 印张·2 插页·284 千字

0 001—2600 册

标准书号:ISBN 978-7-111-61454-8

定价:85.00 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

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

译者序

化石能源的不可持续及其引发的环境问题，使得太阳能、风能等可再生能源在近 20 年来得到了迅猛发展。并网发电是开发和利用太阳能、风能的主要方式，但由于它们具有随机性和不稳定性的特征，当其发电的比例较高时，将影响电力系统的运行，弃光、弃风不可避免。通过合理配置储能环节，使太阳能和风力发电系统成为可信的电源，具有重要的意义。

而在众多的储能方式中，氢能是最理想的方案，它与电能互补，是未来绿色、低碳、清洁、高效能源体系的重要组成部分。电解水制氢和由燃料电池将氢气和氧气结合起来产生电力，可以实现电能与氢能的相互转换，且转换的过程安静、无污染。

燃料电池是氢能转换为电能的枢纽，种类繁多，相关书籍很多。本书主要介绍了作者 10 多年来在质子交换膜燃料电池和固体氧化物燃料电池方面的研究成果，融汇了燃料电池系统的理论、建模、接口和控制。对于使用燃料电池进行发电系统设计的研究人员和工程师，有很好的参考作用。本书相关的 MATLAB/SIMU - LINK 和 PSpice 仿真模型在网站 ftp://ftp.wiley.com/sci_tech_med/fuel_cells 中给出，并且在附录中详细介绍了使用方法，对希望深入研究燃料电池发电系统的读者，本书将起到极好的引导作用。

本书译校者具体分工为：赵仁德译第 1、3、5、7、8 章及附录，张龙龙译第 2 章，李睿译第 9 章，徐海亮译第 4、10 章，何金奎译第 6 章，赵仁德统稿并校对全书。本书在翻译过程中，吴尚谦、袁诚、宣丛丛和董雪梅等做了大量工作，在此深表谢意。

限于译者水平，书中难免存在错误和不妥之处，恳请广大读者批评指正。

译者

原 书 前 言

燃料电池在过去的十年受到了密切的关注，在美国国家航空航天局于 20 世纪 60 年代成功地将燃料电池应用于载人航天计划之后，燃料电池技术和不同类型燃料电池的应用取得了显著的进步。

环境问题、降低二氧化碳排放的世界范围内的社会和政治压力、在发电方面追求更高能量转换效率的愿望，是燃料电池技术发展和应用的主要推动力。燃料电池的应用包括分布式发电和燃料电池电动汽车。发电商通过寻求各种降低排放的方法来获得在放开管制的电力市场中的竞争力。另外，为发展新技术以降低碳排放，汽车工业已经开始发展燃料电池汽车，最终的目标是要实现零排放。

以电化学原理为基础的燃料电池的工作原理，通常能够被科学家（即化学家、物理学家和材料学家）和工作于该领域的化学工程师更好地理解。因为燃料电池的最终输出是电，所以，燃料电池的工作原理也需要能够被工作于这一领域的电气工程师所理解，以便于他们能够设计出充分提升燃料电池性能的接口电路和控制器。因此，需要准确的、用户容易掌握的动态燃料电池模型来从电气工程的角度评估燃料电池的稳态和动态性能。本书建立起沟通化学工程师和电气工程师的桥梁。它以一种易被电气工程师理解的简单的语言来解释燃料电池的工作原理，还介绍了在分布式发电和电动汽车领域有较大应用潜力的质子交换膜燃料电池（PEMFC）和固体氧化物燃料电池（SOFC）的物理动态模型。本书的重点就是这两种燃料电池的建模、控制和应用。PEMFC 适用于居民用电和备用电源，如用于分布式发电和燃料电池电动汽车。SOFC 是高温燃料电池，适用于分布式发电和热电联产以获得较高的系统能量效率。

本书主要介绍了作者十多年来在 PEMFC 和 SOFC 方面的研究成果。在本书里融汇了燃料电池系统的理论、建模、接口和控制。本书旨在作为工程师们的参考资料，尤其是

电气、化学、机械工程师以及所有对将来的燃料电池能量系统和燃料电池汽车的控制器设计、接口电路设计感兴趣的研究人员。本书各章的内容梗概如下:

第1章简要介绍了美国公共电力系统的构成和重构公共电力系统的背景,这种重构导致分布式发电受到日益广泛的关注。然后,本章又概述了分布式发电的概况和分类、燃料电池的分布式发电应用、氢能经济的介绍和对燃料电池供电的社会需求。

第2章概述了电能、热能、热力学的基础知识和电化学的过程,这些引出了燃料电池的工作原理。主要几类燃料电池和电解器的工作原理也将在本章介绍。

第3~5章分别阐述了 PEMFC、管式 SOFC 和电解器的模型。第3章给出了 PEMFC 的物理动态模型和电路等效模型及模型的验证。第4章给出了管式 SOFC 在不同工作状态下的物理动态模型。水电解的过程和电解器的建模将在第5章介绍。这3章的重点是 PEMFC、管式 SOFC 和电解器的电气端子特性。

第6章给出了燃料电池能量系统用的电力电子开关器件和电路的介绍和建模。电力电子装置是燃料电池系统获得高质量、可控电能输出的重要组成部分。还介绍了旋转(dq)坐标系下的数学模型,在随后两章关于控制器设计的内容中会用到。

燃料电池会面临各种负载和电气的扰动。为使燃料电池系统可靠地、持续地输出高质量的电能,合适的控制器是必不可少的。第7章和第8章分别介绍了燃料电池分布式发电系统的独立和并网运行的控制方法和控制器设计。

混合新能源发电系统被认为是将来电力供应的重要部分。第9章介绍了两个典型地应用前面讲到的燃料电池模型和控制器设计方法来设计包含燃料电池的混合分布式发电系统的例子。一是使用 PEMFC 的风能、光伏和燃料电池-电解器的混合式系统的设计与性能研究,二是 SOFC 在热电联产模式下的运行与效能评估。

第10章概述了燃料电池商品化面临的三大挑战(成本,燃料和燃料基础设施,以及材料和制造)。本章还概述了作者对燃料电池当前发展状况和未来潜力的看法和总结。

本书的一个重要的特色是提供计算机仿真模型的电子文件, 可在 ftp://ftp.wiley.com/sci_tech_med/fuel_cells 中下载。这些文件包括: MATLAB/SIMULINK 和 PSpice 环境下的 PEMFC 仿真模型、MATLAB/SIMULINK 环境下的 SOFC 动态模型以及它们在燃料电池分布式发电中的应用模型。这些模型是在 MATLAB/SIMULINK 7.0.4 版本中建立的, 相应的仿真结果也是在这个版本中仿真得到的。模型的运行指南在本书附录中给出。使用这些模型需要具备 MATLAB/SIMULINK 和 PSpice 软件的基础知识。作者们希望这些模型及其在燃料电池中的应用能够对全世界研究未来燃料电池能量系统的建模和控制方面新技术的教师、学生 and 研究人员有所裨益。

M. Hashem Nehrir

王才胜

美国蒙大拿州博兹曼市

美国密歇根州底特律市

原书致谢

作者诚挚地感谢在准备本书的过程中给予过帮助的人和组织，可以说，没有这些帮助，本书将不可能成书。

我们由衷地感谢蒙大拿州立大学电气和计算机工程系的荣誉教授 Don Pierre 博士，他为本书提供了宝贵的建议，并且非常仔细地编辑和校对了几乎整本书。我们还感谢蒙大拿州立大学电气和计算机工程系的 Steven Shaw 博士，在我们研究的过程中曾与他有过富有成效的讨论。

蒙大拿州立大学化学和生物工程系的 Paul Gannon 博士对本书第 10 章（燃料电池目前的挑战和发展趋势）的写作有很大贡献。他在燃料处理、燃料电池内部的运行和燃料电池广泛应用所面临的挑战等方面的知识帮助我们为本书完美收官。

蒙大拿州立大学电气和计算机工程系的博士研究生 Chris Colson 先生，为从热与功率结合的角度分析 SOFC 的混合运行及效率评价做出贡献，他以前的部分工作被用作第 9 章的一个例子，这部分工作是他与本书的作者、蒙大拿州立大学化学和生物工程系的 Emeritus Max Diebert 教授、蒙大拿州立大学机械和工业工程系的 Ruhul Amin 教授合作完成的。Colson 先生还帮助我们编辑了本书的部分内容。对此，我们非常感谢。

在我们研究的过程中，我们在技术会议上做过很多有关 PEMFC 和 SOFC 建模与控制的报告。我们感谢许多人在听完我们的报告后给我们提出的建设性的意见和建议。他们的意见帮助我们丰富了本书的内容。

我们对由下列单位提供的与本书内容有关的项目资助表示感谢：蒙大拿 DOE/EPSCoR (1994—2001)，蒙大拿 NSF - EPSCoR (1998—2000)，美国国家科学基金（批准号 0135229，2002—2006）和由美国能源部资助的蒙大拿州立大学高温电化学燃料电池项目，它是一个来自美国巴特尔纪念研究所和西北太平洋国家实验室（批准号 DE -

AC06 -76RL01830, 2002—2008) 的分包项目。

M. Hashem Nehrir 感谢蒙大拿州立大学为他提供宽松的时间(公休假)来准备本书第1版草稿。他还感谢蒙大拿州立大学电气和计算机工程系提供的支持和鼓励。

我们感谢为本书提供产品照片的下列燃料电池公司: Ballard Power Systems 公司、FuelCell Energy 公司、Re-liOn 公司、Siemens 公司、Versa Power Systems 公司和 Hydrogenics 公司。

我们感谢美国俄克拉荷马州立大学的 Rama Ramakumar 博士和德国柏林技术大学的 Kai Strunz, 他们认真地审阅本书, 他们建设性的意见和建议使本书更加全面。我们还感谢 IEEE -Wiley 出版社和汤姆逊数码的工作人员为本书所做的贡献。

最后, 我们感谢我们的家庭在我们写作本书的过程中给予的鼓励与支持。

M. Hashem Nehrir

王才胜

目 录

译者序

原书前言

原书致谢

第1章 绪论 1

1.1 背景：美国电网的形成与重构简介 2

1.2 电力管制放开和分布式发电 5

1.3 分布式电源的类型 6

1.4 燃料电池分布式电源 8

1.5 氢能经济 11

1.5.1 简介 11

1.5.2 转型到氢能经济的挑战 12

1.5.3 氢的生产 12

1.5.4 氢能的存储和配送 16

1.5.5 美国能源部的与氢有关的活动 16

1.5.6 本书的任务 18

参考文献 20

第2章 燃料电池的工作原理 22

2.1 引言 23

2.2 元素的化学能与热能 23

2.3 热力学基础 24

2.3.1 热力学第一定律 24

2.3.2 热力学第二定律 24

2.4 电化学基础 26

2.4.1 吉布斯自由能 26

2.5 化学反应中的能量平衡 27

2.6 能斯特方程 28

2.7 燃料电池的基础 29

2.8 燃料电池的类型 30

2.9 燃料电池等效电路 39

2.10 双电层电容效应 40

2.11 总结 41

参考文献 42

第3章 质子交换膜燃料电池的动态建模与仿真 ... 43

3.1 引言：燃料电池动态模型的需求 44

3.2 专门术语 (PEMFC)	44
3.3 PEMFC 的动态模型建立	47
3.3.1 电极上的气体扩散	48
3.3.2 物质守恒	50
3.3.3 PEMFC 的输出电压	50
3.3.4 PEMFC 的电压降	51
3.3.5 PEMFC 热力学平衡	53
3.4 PEMFC 的模型结构	54
3.5 PEMFC 的等效电路模型	55
3.6 PEMFC 模型的验证	59
参考文献	64
第4章 固体氧化物燃料电池的动态建模与仿真	65
4.1 引言	66
4.2 术语 (SOFC)	66
4.3 SOFC 动态建模	68
4.3.1 有效分压	69
4.3.2 物质守恒	71
4.3.3 SOFC 输出电压	72
4.3.4 管状 SOFC 的热力学能量平衡	76
4.4 SOFC 动态模型结构	78
4.5 恒定燃料流量操作下 SOFC 模型的响应特性	79
4.5.1 稳态特性	79
4.5.2 动态响应	81
4.6 恒定燃料利用率模式下的 SOFC 模型响应	85
4.6.1 稳态特性	86
4.6.2 动态响应	87
参考文献	88
第5章 电解槽的运行原理和建模	90
5.1 电解槽的运行原理	91
5.2 电解槽的动态建模	92
5.2.1 电解槽的静态 ($V-I$) 特性	93
5.2.2 制氢速率的建模	93
5.2.3 电解槽的热模型	94
5.3 电解槽模型的实现	95
参考文献	97
第6章 应用于燃料电池的功率变换器	98
6.1 引言	99
6.2 功率半导体开关器件的概述	100
6.2.1 二极管	100
6.2.2 晶闸管	100

6.2.3 双极结型晶体管	101
6.2.4 金属-氧化物半导体场效应晶体管	102
6.2.5 门极可关断晶闸管	103
6.2.6 绝缘栅双极型晶体管	103
6.2.7 MOS 控制晶闸管	104
6.3 AC/DC 整流器	105
6.3.1 电路拓扑	105
6.3.2 三相可控整流器的简化模型	107
6.4 DC/DC 变换器	110
6.4.1 升压变换器	110
6.4.2 降压变换器	114
6.5 三相 DC/AC 逆变器	117
6.5.1 电路拓扑	117
6.5.2 状态空间模型	119
6.5.3 abc/dq 变换	122
6.5.4 dq 坐标系下状态空间模型	123
6.5.5 三相 VSI 的理想模型	124
参考文献	127
第 7 章 并网型燃料电池发电系统的控制	128
7.1 引言	129
7.2 并网系统的配置	129
7.2.1 PEMFC 单元的配置	130
7.2.2 SOFC 单元的配置	131
7.3 DC/DC 变换器和逆变器的控制器的设计	132
7.3.1 升压 DC/DC 变换器电路和控制器的设计	132
7.3.2 三相 VSI 的控制器的设计	136
7.4 仿真结果	143
7.4.1 期望输出到电网的有功和无功率——重载	143
7.4.2 轻载情况下向电网输出有功功率、从电网吸收无功功率	146
7.4.3 燃料电池的负载性能跟随分析	150
7.4.4 故障分析	152
7.5 总结	154
参考文献	154
第 8 章 独立型燃料电池发电系统的控制	157
8.1 引言	158
8.2 系统描述和控制策略	158
8.3 减缓负载瞬变控制	159
8.3.1 铅酸蓄电池的电路模型	160
8.3.2 电池充/放电控制器	161
8.3.3 滤波器的设计	162

8.4 仿真结果	163
8.4.1 负载的暂态变化	163
8.4.2 负载瞬变减缓	166
8.4.3 蓄电池充/放电控制器	170
8.5 总结	172
参考文献	172
第9章 基于混合燃料电池的能源系统案例研究	174
9.1 引言	175
9.2 混合电子接口系统	176
9.2.1 直流耦合系统	176
9.2.2 交流耦合系统	178
9.2.3 不同于并网系统的独立运行系统	178
9.3 热电混合运行模式下的燃料电池	179
9.4 案例研究 I：风能-光伏-燃料电池混合式独立发电系统	180
9.4.1 系统结构	180
9.4.2 系统单元规格	182
9.4.3 系统组件特性	185
9.4.4 系统控制	186
9.4.5 仿真结果	191
9.5 案例研究 II：混合运行模式 SOFC 的效率评估	196
9.5.1 热力学定律与 SOFC 效率	196
9.5.2 氢燃料热值	200
9.5.3 SOFC 电效率	201
9.5.4 混合热电联产运行模式 SOFC 的效率	202
9.6 总结	204
参考文献	204
第10章 燃料电池目前的挑战和发展趋势	210
10.1 引言	211
10.2 燃料电池系统运行	211
10.2.1 燃料处理器	211
10.2.2 燃料电池堆	212
10.2.3 功率调节器系统	213
10.2.4 发电厂平衡 (BOP) 系统	215
10.3 当前的挑战和机遇	216
10.3.1 成本	216
10.3.2 燃料和燃料基础设施	216
10.3.3 材料和制造	217
10.4 美国燃料电池研发项目	218
10.4.1 美国能源部的 SOFC 相关项目	218
10.5 燃料电池的未来：综述和作者的观点	219
参考文献	220
附录 运行 PEMFC、SOFC 模型及其分布式发电应用模型的指南	223

第1章

绪论

全球环境问题和日益增加的发电需求、稳步推进电力放松管制和新建用于长距离电能输送的输电线路的严格限制增加了大家对分布式发电的兴趣。特别让大家感兴趣的是由风能、光伏等免费能源构成的可再生分布式发电和由燃料电池、微型燃气轮机发电系统构成的低污染气体排放的可替代能源分布式发电。

本章首先介绍了电力系统重构的一些背景，电力重构导致人们对分布式发电兴趣增加；然后，对不同类型的分布式发电进行了概述；接下来介绍了燃料电池分布式发电系统；由于所有可行的燃料电池都使用氢气作为燃料，本章的最后一部分涉及氢能经济和对燃料电池供电的需要。

1.1 背景：美国电网的形成与重构简介^[1-4]

美国电网形成于 19 世纪晚期，是各自独立没有相互连接的电力系统。在 20 世纪 20 年代，为了相互协助实现负荷分担和电源备用，独立的电力系统相互连接起来。1934 年，美国国会通过了《公共事业控股法案》(PUHCA)，它增加了证券交易委员会的管辖范围以及联邦电力委员会的管辖范围。该法案建立了激励机制来促进独立电网扩张并构建地区电网，几个州的电网公司可以组合成一个地区电网公司。每个电网公司在其投资者拥有的区域内垄断经营，有发电、输电和配电等业务。但是，每个电网公司受国家调控，其价格须由公用事业委员会批准。

1977 年，美国能源部 (DOE) 成立，其目的是为了监督国家的与能源相关的活动。在能源部中，设有联邦能源监管委员会 (FERC) 来建立电能生产、传输和电能质量的规则。

1978 年，美国国会通过了《公共事业政策法案》。这一法案鼓励将非电力企业所有的发电技术整合到现有的电网中，这些发电技术包括传统能源发电技术和非传统（可再生/替代）能源发电技术。在上面的法案中，联邦能源监管委员会为这些电源接入电网设置了规则。直到 20 世纪末，电网仍是在垂直的（垄断）结构下运行，每个电力公司在特定的区域垄断发电、输电和配电的业务。

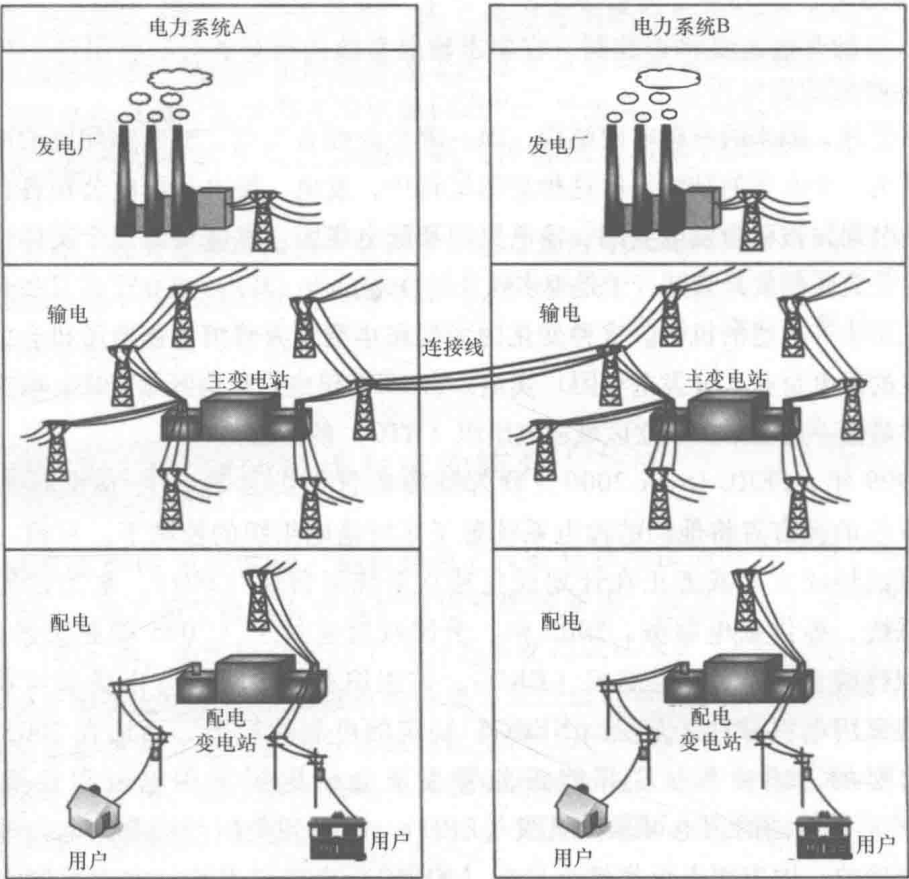
1992 年由美国国会颁布的主要的能源政策法案，推动了美国电力行业进入全面重构，到现在已超过了 15 年，仍在重构的过程中。因为这个法案诞生了“免税大规模发电机 (EWG)”实体，它们只能在批发市场上而不能在零售市场上出售它们发的电。相反地，电网没有要求必须从 EWG 买电，但被要求从包括可再生/替代能源发电企业的合格发电企业买电。这项能源政策法案在常规电能供应上产生了由区域级到联邦级的重要转换，而联邦能源监管委员会仍是其规则制定机构。根据这项政策法案，发电实体可将其发的电接入输电系

统。1996年，联邦能源监管委员会发布了“麦格规定（Mega Rule）”，规定了输电入口的开放程度将被控制，它要求输电系统的拥有者对所有用户一视同仁且服务必须明码标价。

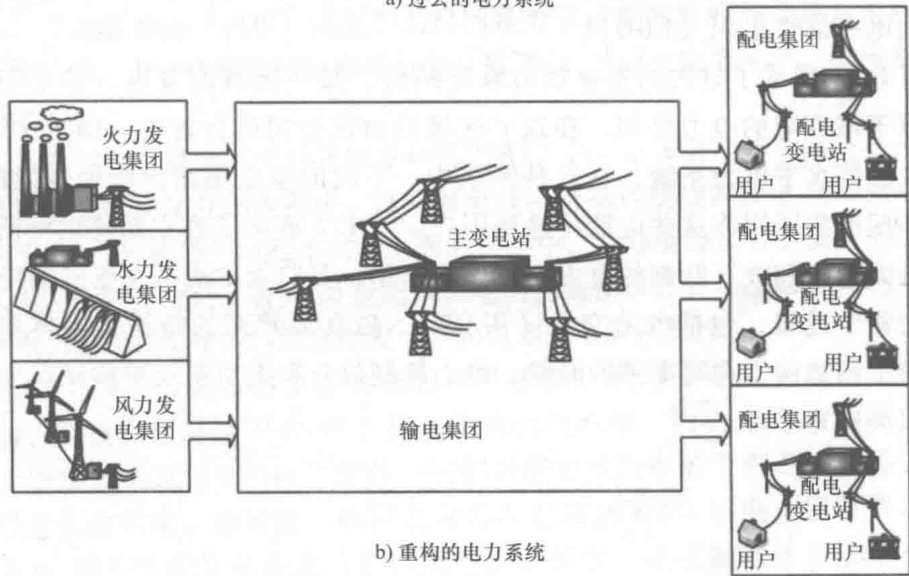
逐渐地，原来的垂直电网结构，即一家企业拥有发电、输电和配电的所有业务，变为一个水平的结构。在这种新的结构中，发电、输电和配电公司各自变为独立的公司，被称为发电集团、输电集团和配电集团。发电只是三个实体中的一个，这是真正的放开管制，于是很多独立的发电企业（IPP）成立了并且找到了销售他们所生产电能的机会。这种变化为大型和小型电力营销商创造了机会，他们为独立的发电企业（或发电集团）卖电。自1996年电力重构开始以来，联邦能源监管委员会一直在推广成立区域输电组织（RTO）的做法。

1999年，FERC Order 2000（联邦能源监管委员会2000年指南）中要求输电系统的拥有者将他们的输电系统置于区域输电组织的控制下。目前，有几个区域已经成立了或者正在计划成立独立系统运营商（ISO），来运营他们的输电系统、提供输电服务。2005年，美国政府通过了《2005能源法案》，该法案授权成立用电可靠性组织（ERO），该组织有权要求所有市场参与者必须遵守国家用电可靠性委员会（NERC）制定的可靠性标准，而这在2005年以前是自愿的。2006年，联邦能源监管委员会认定国家用电可靠性委员会（NERC）是美国的用电可靠性组织（ERO）。考虑到美国与加拿大电力系统是紧密连接的，国家用电可靠性委员会（NERC）也在寻求被加拿大政府正式承认为用电可靠性组织（ERO）。

图1.1a展示了过去的垂直电力系统结构，某一区域的发电、输电和配电系统属于该区域的电力公司，在这一区域内由该公司进行售电。图1.1b展现了重构后的水平电力系统，在这种系统中，不同的发电集团出售他们发的电，输电和配电集团则将这些电能传递到用户。图1.2展示了独立系统运营商在重构的电力系统和放开管制的电力市场中的作用，其监管电能从发电到输电再到配电的整个过程，包括电的交易（买/卖）。独立运营商的结构和实体取决于当地的市场结构。在写本书的时候，电力管制放开和电力系统重构正在全球范围内积极开展着。



a) 过去的电力系统



b) 重构的电力系统

图 1.1 过去和现在的电力系统构成