

Transactive Energy

电力分布式交易

可持续的电力商业运营和监管模式

A Sustainable Business and Regulatory Model for Electricity

[美] Stephen M. Barrager Edward G. Cazalet 著

陈政 张翔 曹芳 冷媛 译



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

Transactive Energy

电力分布式交易

可持续的电力商业运营和监管模式

A Sustainable Business and Regulatory Model for Electricity

[美] Stephen M. Barrager Edward G. Cazalet 著

陈政 张翔 曹芳 冷媛 译



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

· 广州 ·

著作权合同登记号 图字: 19-2017-203

图书在版编目(CIP)数据

电力分布式交易: 可持续的电力商业运营和监管模式/(美)斯蒂芬·M. 巴拉格尔, (美)爱德华·G. 卡扎莱特著; 陈政等译. —广州: 华南理工大学出版社, 2018.3

书名原文: Transactive Energy: A Sustainable Business and Regulatory Model for Electricity
ISBN 978-7-5623-5509-0

I. ①电… II. ①斯… ②爱… ③陈… III. ①电力工业-工业企业-运营管理 ②电力工业-工业企业-监管制度 IV. ①F416.61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 311898 号

Authorized translation from the English language edition, entitled *Transactive Energy: A Sustainable Business and Regulatory Model for Electricity* by Stephen M. Barrager and Edward G. Cazalet, 9780991505203 (eBook), published by Baker Street Publishing, LLC.

Copyright © 2014 Baker Street Publishing.

此《电力分布式交易: 可持续的电力商业运营和监管模式》由美中绿色能源促进会(US-China Green Energy Council)许可出版。

电力分布式交易: 可持续的电力商业运营和监管模式

[美]斯蒂芬·M. 巴拉格尔(Stephen M. Barrager) 爱德华·G. 卡扎莱特(Edward G. Cazalet) 著;
陈政 张翔 曹芳 冷媛 译

出版人: 卢家明

出版发行: 华南理工大学出版社

(广州五山华南理工大学 17 号楼, 邮编 510640)

http://www.scutpress.com.cn E-mail: scutcl3@scut.edu.cn

营销部电话: 020-87113487 87111048(传真)

策划编辑: 吴翠微

责任编辑: 陈 蓉

印刷者: 广州市天河穗源印刷厂

开 本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 11.25 字数: 218 千

版 次: 2018 年 3 月第 1 版 2018 年 3 月第 1 次印刷

印 数: 1~1500 册

定 价: 98.00 元

版权所有 盗版必究 印装差错 负责调换

译者序

当前,以能源技术革命为驱动,能源供给和能源消费革命正在全世界范围内发生。以分布式光伏等为代表的分布式发电技术的广泛应用,使得传统用户向产消者转变;电动汽车、各类储能技术的发展,使得用户需求响应能力、市场博弈能力大幅增强;云计算、大数据、物联网、移动互联网、人工智能等技术的快速发展,将大幅提升用户参与市场的便利性,降低用户市场参与成本。这场正在发生并将持续推进的技术变革,必将对现有能源电力体制机制和市场形态产生深刻影响。

为了提高电力系统运营效率,包括美国、英国在内的世界各国一直不断进行着电力市场化改革,其市场模式细节虽不尽相同,但大多遵循从发—输配—售垂直一体化到发—售两端放开的改革路径,市场化改革比较成功的地区也大都建立起以批发市场为主,“批发+零售”的市场架构体系。自2002年开始,我国电力市场化改革持续推进,10余年来我国已基本完成“厂网分开,主辅分离”的改革任务。2015年,《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》的发布揭开了新一轮电力改革序幕,“放开两端,管住中间”也成为我国电力体制改革的既定方向。

面对日新月异的能源供给、能源消费及能源技术革命新形势,我们到底该构建什么样的电力市场体系来适应新时代需要?这是值得所有电力体制改革参与者、关注者研究思考的问题。

本书作者提出一种新的市场模式,即电力分布式交易(Transactive Energy, TE)模式来适应未来新形势的需要,其核心思想是依托通信、计算机等技术的发展,实现传统批发市场与零售市场的完全融合,所有普通用户而不仅仅是大用户都能直接参与市场交易,通过各类大小市场主体的博弈,充分挖掘市场潜力,实现资源的优化配置和能源系统的高效运营。作者在书中对电力分布式交易模式框架、相关支持系统规范、实施路线方案等进行了系统阐述,虽然相关市场机制细节还有待进一步深化研究,但作者无疑为未来的电力市场发展打开了一扇新的窗户,对于指导我国下一步电力市场化改革持续向纵深推进,也具有重要的参考借鉴意义。

在翻译过程中,我们力求准确表达作者原意,同时也尽量照顾到国内读者的阅读习惯,多用国内惯用的电力市场话语体系来进行表达,对于个别很难找到对应词汇的,比如本书的书名“Transactive Energy”,我们没有采用直译

的方式，而是根据其内涵翻译为“电力分布式交易”，目的是让读者更好地理解这个概念。总的来说，我们力求做到最好，但水平有限，难免有疏漏之处，也请广大读者批评指正。

本书的翻译出版由中国南方电网有限责任公司电网技术研究中心资助，特别感谢本书作者 Stephen Barrager 教授、Edward Cazalet 教授的信任，授权我们翻译出版本书，也感谢美中能源促进会对本书的翻译出版给予的支持。同时，还要感谢蒙文川、宋艺航、黄国日、闵亮、张子昊、李扶中、陈晖、路明和辜炜德为本书翻译做出的贡献。

特别声明，本书出版的目的是方便国内研究人员学习参考国外研究成果，中国南方电网有限责任公司电网技术研究中心仅负责翻译工作，内容观点不代表本单位立场。

译 者
2017 年 9 月于广州

前言

当你走到岔路口时，就选择一条路走吧！^①

——约吉·贝拉

本书介绍了如何运用基本的商业理念将电力市场带向新的模式，该新模式的核心是利用远期交易和现货交易来指导电力投资和经营决策。

当前电力市场是严格监管服务成本和集中优化资源的运作模式，但是随着电力系统由集中式逐步向分散式演变，电力市场的旧模式也将逐渐被新模式取代。

新的运营和监管模式即电力分布式交易(Transactive Energy, TE)模式具备良好的可适应性，该模式能够协调优化适应各种规模和技术的决策，对集中式电源规划和智能家用电器运行同样有效，同时支持竞价和以服务成本定价。

电力分布式交易体现四大理念：

- 电能和传输服务两种产品；
- 通过远期交易管控风险和协调优化投资决策；
- 通过现货交易优化协调经营决策；
- 各参与方自主行动。

在当前的电力批发市场中，电能和输电服务采用的是远期交易模式，该远期交易的表现形式为长期的电力买卖合同，电力系统运营商利用现货交易在预测和实际购销量之间做出调整。电力分布式交易模式将远期交易和现货交易从批发市场扩展到电力市场的各个角落：工业用户、零售商、商业用户和普通家庭。

太阳能电池板和储能的成本正在迅速下降，高科技、摩尔定律和互联网已经涌入发展缓慢且被高度监管的电力行业。现在，从调度系统到 iPhone 再

^① 来源：Yogi Berra. When You Come to a Fork in the Road, Take It!: Inspiration and Wisdom from One of Baseball's Greatest Heroes. Hyperion, 2002, P. 1.

到家用电器，我们可以在任何地方、任何设备之间通信，高速计算和数据存储已经不再昂贵，而且正变得越来越便宜。

我们可以让汽车、房屋和家用电器内的微型计算机替我们做决策。我们不必清楚什么时间该回调恒温控制器，或者哪家电力公司的电价对我们是最有利的。在新兴世界中，这些事情将由我们的微型计算机“代理人”代劳。

我们很幸运，这样的技术已经出现，它将帮助我们减少对石油的依赖，降低二氧化碳的排放量。

电力系统正随着新技术的出现而不断发展，我们也面临着一些新的挑战 and 机遇，其中包括：

- (1)大量的间歇性能源，如风能和太阳能。
- (2)各种分布式能源，如屋顶光伏电池板、热电联产和就地发电。
- (3)储能需求和新储能方法的可用性。
- (4)微电网：微电网可以孤岛运行，规划自己的综合能源系统。
- (5)越来越多的电动汽车。

落后的调度和控制系统亟待升级，它不仅不利于技术创新，还阻碍当前急需的效率提升。

本书介绍了电力分布式交易运营和监管模式以及未来我们怎样使用这一模式。我们认为，电力分布式交易模式是解决当前问题的良方，它将激励投资、提高效率、降低发电商和用户的成本。电力分布式交易模式是公平透明的，它既会受到用户的欢迎，也会对政府产生吸引力，还将刺激全球的技术创新和组织创新。

我们撰写本书的目的是在全球范围内将电力分布式交易作为常规业务模式推广。电力分布式交易模式是高效、公平和透明的电力系统的基石。

本书面向的读者是电力市场中的各种利益相关方，包括：用户，电力公司高管，立法者，环保人士，监管机构，经济学者，电力行业的专业人士，投资人和供应商，系统、电力和电气工程师，学生，电力研究人员。本书作者斯蒂芬·巴拉格尔(Stephen Barrager)和爱德华·卡扎莱特(Edward Cazalet)是新电力系统规划方法设计领域的领军人物，他们都曾在斯坦福大学管理科学与工程系修读系统工程和经济学，成立了多家服务于电力行业的开创性公司。您可以在本书的“关于作者”中了解他们的资质信息。

我们相信，本书将为全球范围内那些向电力分布式交易运营和监管模式转变的先行者提供一条核心思路。您可以与电力分布式交易协会一同关注和参与电力分布式交易的讨论，通过讨论您将会发现关于电力分布式交易的多个不同角度的论点；同时，您将会找到关于电力分布式交易模式的实施和技术细节的问答，虽然这些问答可能已经超出本书的范围和宗旨。

我们正处在一个重要的历史转折点，也是能源（尤其是化石燃料）大量消耗时代的终点。我们有机会更快地实现这一转变，到达一个新的竞争环境，一个比我们目前所拥有的明显更为公平的环境。

目 录

第1章 绪 论	1
第2章 电力分布式交易模式的愿景	19
第1节 背景	21
第2节 流程：报价、交易和交付	26
第3节 远期交易和现货交易	32
第4节 输电服务	41
第3章 电力分布式交易三大支柱：系统、连接和协议	49
第1节 系统	51
第2节 连接	60
第3节 协议	66
第4章 挑战与机遇	75
第1节 整合风能和太阳能	79
第2节 整合储能系统	84
第3节 整合住宅和商业建筑物	89
第4节 整合分布式能源	97
第5节 整合微电网	100
第6节 整合电动汽车	102
第7节 维持可靠性	106
第5章 选择电力分布式交易模式的原因	109
第1节 提高效率	111

第2节 鼓励创新 116

第3节 更具公平性 120

第4节 更具透明性 123

第6章 向电力分布式交易模式平稳转型的措施 125

第1节 立法决策 130

第2节 对利益相关者的影响 136

第3节 路线图 140

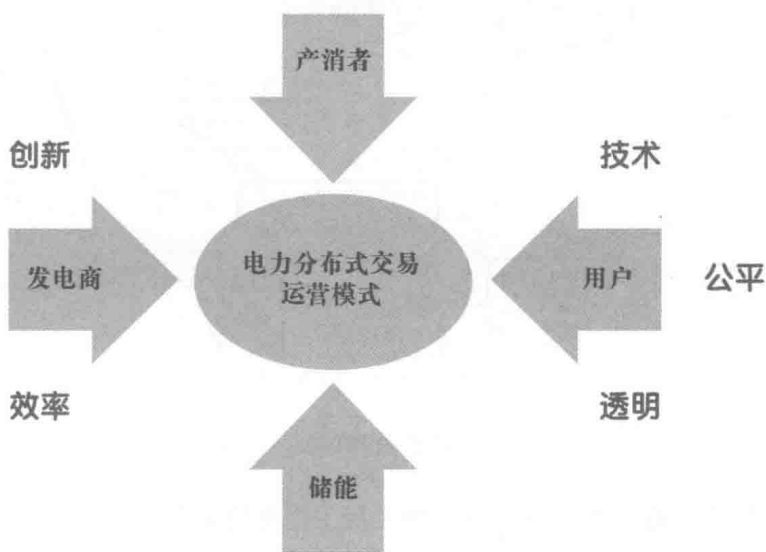
第4节 管理委员会 142

附录 专有名词释义 148

关于作者 166

第1章

绪 论



■ 本章首先介绍了美国电力市场的现状以及全世界其他市场正在经历的类似的发展趋势，电力市场的巨大变化为规划者和监管者带来了新的挑战。

在讨论了背景之后，我们将介绍电力分布式交易（Transactive Energy, TE）运营模式。电力分布式交易模式与通信和信息技术（communication and information technology, CIT）的高速发展息息相关，互联网和分布式计算正使电力分布式交易在整个电力市场上具有可行性。不论是在简单的智能家电还是最大的集中式发电站中，电力分布式交易与通信和信息技术一起将共同刺激创新和提高效率，它比我们当前的运营模式更为公平和透明。

背景

在 2000 年时,电力系统还相对简单,仅包括三类用户:居民用户、商业用户和工业用户。居民用户和商业用户接入配电系统(电线杆和架空电线),发电厂通过高压输电网向配电系统供电,抽水蓄能电站直接接入输电系统(见图 1-1)。

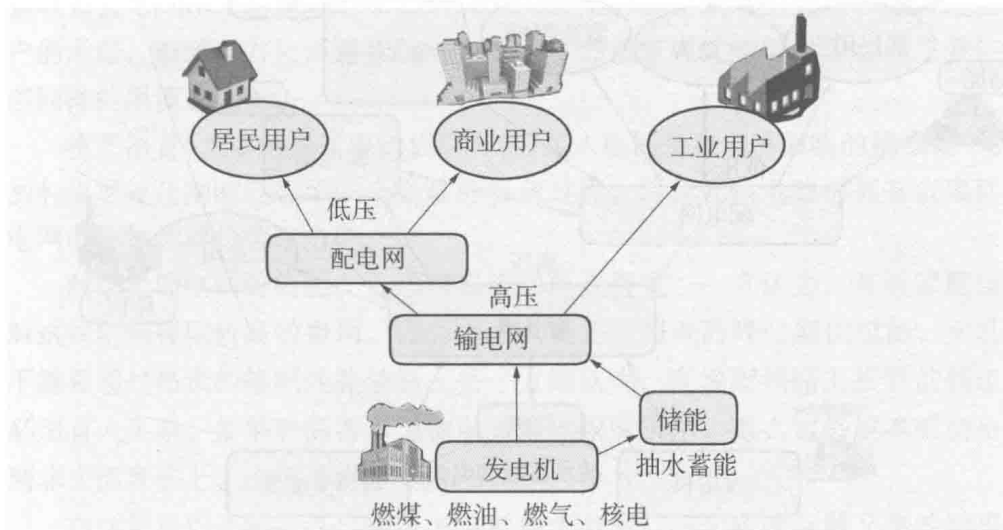


图 1-1 2000 年的电力系统^①

电力系统在过去的 20 年里发生了巨大的变化。社会各界愈发关注发电厂温室气体排放的问题,社会舆论要求我们降低对空气和水的影响,促使政府也开始采取有关行动。鉴于此,加利福尼亚州的许多火电厂不得不提前关闭。同时关注这些问题的民众要求我们增加太阳能发电、风电和热电联产等可再生、可持续能源发电技术的使用。此外,多家初创企业也迫切希望利用这些新技术。

我们已经通过使用水力压裂技术降低天然气开采成本。尤其是在北美,这与社会上对环境问题的关注不谋而合,天然气供应成本的降低使得分布式的燃气发电站如雨后春笋般涌现。

到 2020 年,电力系统形态(见图 1-2)将与现在大不相同,其变化包括以下方面:

- (1) 可再生能源发电技术日益普及,主要是风能和太阳能发电技术。
- (2) 储能需求增长。只有在有阳光照射或刮风时太阳能和风能才可以用来

^① 贝克街出版社(Baker Street Publishing)2014 年版权所有,保留所有权利。

发电，因此，太阳能发电和风能发电出力是不稳定的。当可用风能和/或太阳能与用电需求不匹配时，我们就需要将能量储存起来，避免浪费。对于太阳能、风能这种低成本能源的强烈需求正刺激着储能新技术的开发和应用：电池、储热和压缩空气。

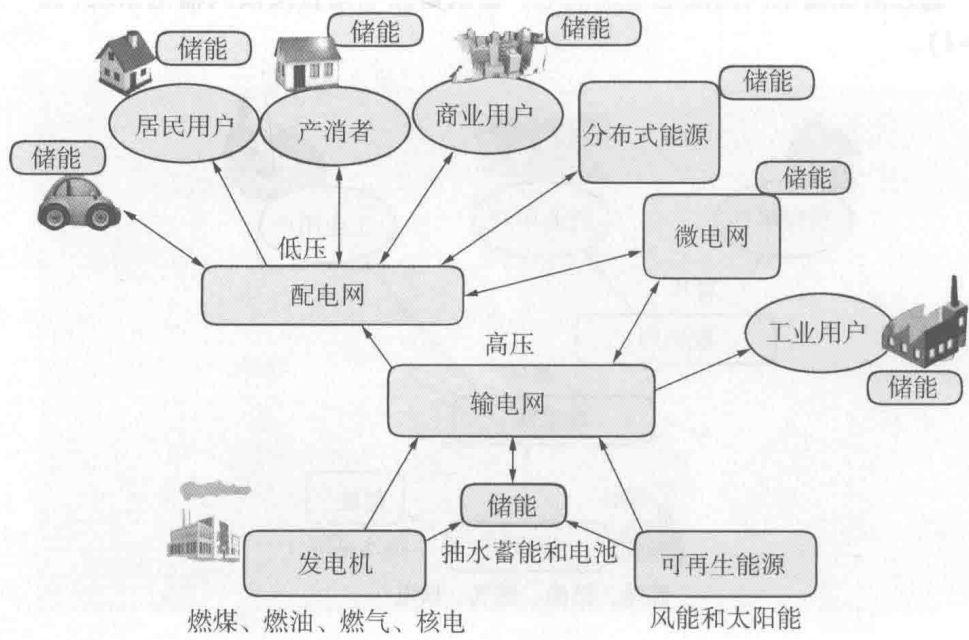


图 1-2 预计 2020 年的电力生态系统^①

(3) 分布式能源 (decentralized energy resources, DERs) 和“产消者”大量涌现。为了提高效率，许多大用户自己建设发电设备供自己使用，又经常会将多余的电能卖给电网。然而，即使大客户在用电上实现了自给自足，仍然需要依赖并网来确保供电的可靠性。许多居民用户和商业用户也都安装了太阳能电池板，这些用户通过将多余电能卖给电网，从而收回部分的投资，他们就是“产消者”：既是电能生产者，也是电能消费者。

(4) 微电网兴起。一些完整的电力网络正在从主网中脱离出来。一些高校和军事基地等机构表示，通过规划一个完备和独立的电力生态系统，能够降低成本，提高可靠性。比如，加利福尼亚大学圣地亚哥分校将其校区作为独立的电网规划与运行。这些独立的“电网”通过整合、优化与使用各种电力资源，实现了效率的提升。他们能够为自己的微网做好投资规划，并使其脱网运行。

^① 贝克街出版社 (Baker Street Publishing) 2014 年版权所有，保留所有权利。

(5)电动汽车销量日益增加。电动汽车是一个新的、潜力巨大的用电市场,汽车车载电池为储能技术提供了发展机遇。电池的充电时间和地点具有相当大的灵活性,如果时间控制得当,可以在不影响驾驶需求的前提下,合理控制电动汽车向电网充放电。汽车储能分布在整个系统中,因而能够节省配电成本和提高可靠性。

电力市场的复杂性正开始让监管者、规划者和运营商不知所措。大型私营电力公司(investor-owned utilities, IOUs)正努力满足政府的要求和履行对客户的承诺,市政电力公司和其他电力公司虽然监管模式不同,但也面临着许多同样的困境。

将产消者(大多为光伏电池板拥有者)接入电网是我们所面临的挑战之一。加利福尼亚州刚刚经历了一个艰难的协商过程,即就光伏电池板拥有者卖回电网的电如何定价达成协议。

对于卖回电网的电,普通家庭应如何收费呢?一方认为,普通家庭应对这些电能收取较高的费用,因为这些电能是在用电高峰时期供应的,而且不需要通过昂贵的输配线路输送;另一方则认为,在输配线路上投资的钱也必须有人买单,如果产消者不为输电和配电投资买单,那么这些成本就会落到非产消者头上,这样是不公平的。

在加利福尼亚州制订出解决方案的两个月后,一个新的问题又突然出现了。光伏电池板拥有者开始安装储能电池,作为太阳能电池板的后备,一般家庭可以在谷期对电池充电、峰期放电,他们开始按净计量电价将存储在电池中的电卖给电力公司。而电力公司认为这是不合法的并希望停止这种交易,但这很不合理,因为电池的容量可能与太阳能电池板具有同样的价值。我们并不真正了解,当人们开始将电动汽车电池组中的电池作为他们的光伏发电系统的后备时,将会发生什么呢?

对于过时的调度和控制系统来说,这些问题很难解决,如果跟不上技术变化的脚步就是在阻碍创新。电力公司和监管模式也已经过时而且设备落后,无法解决分布式能源、产消者、储能和微电网等问题。新的电力分布式交易模式则可以应对这一挑战。

电力分布式交易运营模式

我们从电力系统如何做出投资和经营决策的角度来介绍电力分布式交易运营模式。供应商和用户都要做出投资和经营的决策:供应商投资于发电和输配电环节;用户则投资于更广义的发电和节能设备。投资总是伴随着风险。对运营模式进行试验,就是要看这种模式怎样能提高协调决策效率,同时又

能让投资者管理风险。

发电商通过长期合同或贷款担保等金融手段降低投资风险。电能项目投资者可以通过签署长期合同，将其项目部分出售给外部投资者或风险投资者（或两者）来控制风险。

当今许多大的投资决策都是由私营电力公司做出的，这些公司的行为受到美国州和联邦监管部门的严密监管。这些私营电力公司拥有依法授予的特许经营权，颁发该特许经营权的监管机构允许这些公司向用户收取的费用，足以保障其股东“合理”的收益率。私营电力公司股东正是使用这种手段来控制风险的，这些公司能够获得低利率贷款，并将这一福利传递给他们的用户。

我们必须在无法准确获得每年、每月或每小时供电需求的情况下增加发电容量，而且也不知道未来的电价会是多少。举个例子，假设我们在考虑投资一个风电场，要思考的问题可能包括：“气候变化是否会改变风况？”“我们发出的电能以什么价格卖出？”“会不会出现某些新的技术，使我们的风电场不再具有竞争力？”“接入风电场的输电线路能否获批？”而在我们做出决策时，这些问题还是不确定的，正是这种不确定性将带来投资风险。

在发电厂建成后，我们要决定如何经营。经营决策是极具挑战性的，因为需求是变化的，部分需求还是无法预测的。图 1-3 显示了一家电力公司在一年的时间中用电需求的变化，其中需求最高的时期在夏季。整体波段随着季节变化而起伏变化，7 月份空调需求量最大时，用电需求最高。

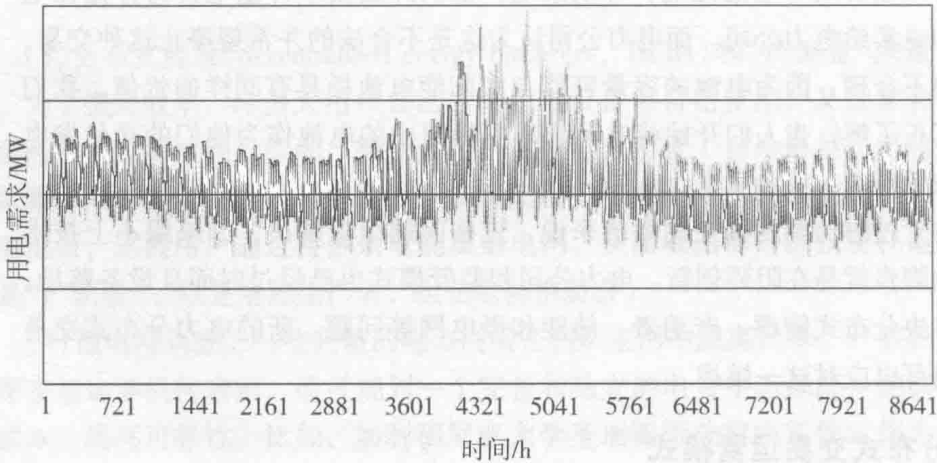


图 1-3 用电高峰在夏季的电力公司一年中的每小时用电需求
来源：Steve Bubb, Energy Pursuits, LLC

周末用电需求较低，显示为宽波段，可以看到，用电需求从周五下午很早就开始下降，周六的用电需求低，周日则更低。您能看出哪些时间是节日吗？

几乎所有其他的上下波动都是因为每天的天气变化造成的，尤其是在夏季。

在加利福尼亚州，独立系统运营商 (Independent System Operator, ISO) 可以决定由哪个电厂出力，什么时候出力。对于大型的发电厂，这些决策大多是根据独立系统运营商的集中调度流程得出的，该程序还会计算出每 5 分钟和每小时的节点电价。

对于火电厂 (燃煤、燃油和燃气电厂) 的运行要求取决于太阳能和风能的利用率。我们更希望风能和太阳能在可用的时候都能用来发电，因为它们的边际发电成本非常低。加利福尼亚州的独立系统运营商有一个网站^①，在该网站上可以看到当天每分钟的用电需求变化和可再生能源的可用性 (见图 1-4)，这些信息也可以在智能手机的“APP” (即应用软件)^②上查看。

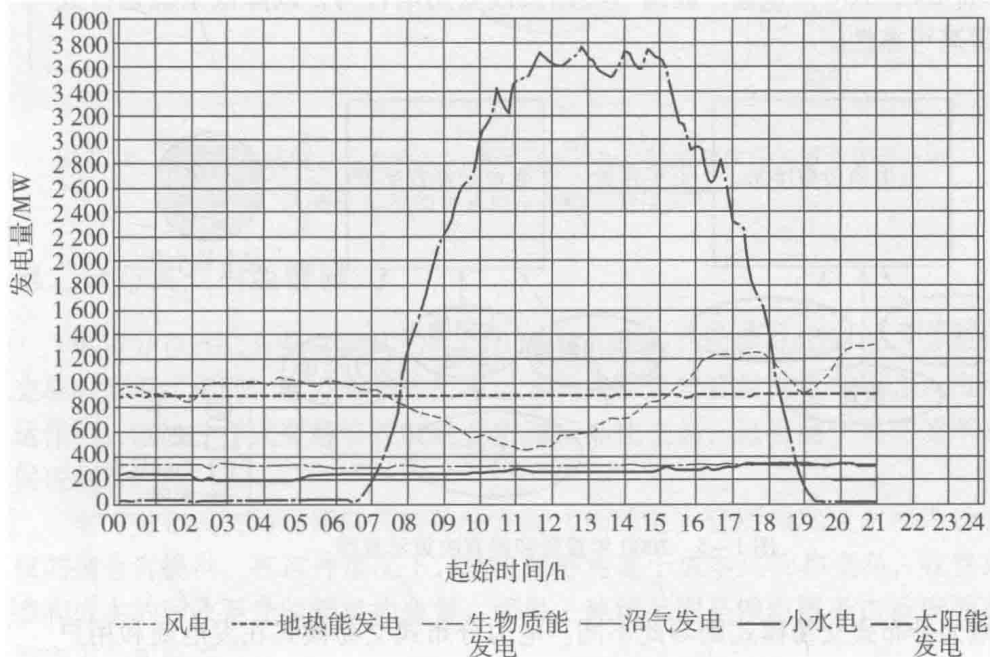


图 1-4 2014 年 4 月 10 日可再生能源发电量

来源：加利福尼亚州独立系统运营商网站

图中所示为并入独立系统运营商电网的可再生能源总发电量：

当前可再生能源发电量：3033.32 MW

当前太阳能发电量：15.39 MW

当前风电量：1323.63 MW

① <http://www.caiso.com/TodaysOutlook/Pages/default.aspx>

② http://www.caiso.com/Documents/20130208_ISO_NewsRelease_ISO_phone_app_gives_near_minute-by-minute_grid_status.pdf