



国际电气工程先进技术译丛

CRC Press
Taylor & Francis Group

大规模储能技术

Large Energy Storage Systems
Handbook

(美) Frank S. Barnes 等著
Jonah G. Levine

肖曦 聂赞相 等译

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

大规模储能技术

(美) Frank S. Barnes 等著
Jonah G. Levine
肖曦 聂赞相 等译



机械工业出版社

能量存储技术,特别是大功率、大规模的能量存储技术,在现代化的能量生产、传输、分配和利用中发挥着越来越重要的作用。本书基于一批国外高校、研究机构和能源管理运营企业的理论研究、技术开发和生产实际应用情况,以电能生产和使用为重点,全面深入地介绍了大规模储能技术。书中首先分析了高渗透率间歇性可再生能源对电网的影响,以此引出储能系统在其中的应用价值和发展前景。后面的章节依次详细介绍了抽水蓄能、地下抽水蓄能、压缩空气储能、电池储能、太阳热能存储和天然气储存等不同形式大规模储能技术的工作原理、研发现状,并结合具体应用案例的分析,以翔实的数据和图表证实了相关结论。本书既可以作为电气工程、热能工程等能源类专业本科和研究生的教学用书,也可作为能源领域工程技术人员的工具手册和参考用书。

Large Energy Storage Systems Handbook, by Frank S. Barnes and Jonah G. Levine
© 2011 by Taylor & Francis Group, LLC.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC. All Rights Reserved. 本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下 CRC 出版公司出版,并经其授权翻译出版,版权所有,侵权必究。

本书中文简体翻译版授权机械工业出版社独家出版并限在中国大陆地区销售,未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签,无标签者不得销售。

本书版权登记号:图字 01-2011-5824 号

图书在版编目(CIP)数据

大规模储能技术/(美)巴恩斯(Barnes, F.S.)等著;肖曦等译. —北京:机械工业出版社,2013.6

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文:Large Energy Storage Systems Handbook

ISBN 978-7-111-42412-3

I. ①大… II. ①巴…②肖… III. ①大规模-储能-技术 IV. ①TK02

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第093355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:任鑫

版式设计:霍永明 责任校对:佟瑞鑫

封面设计:马精明 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2013年7月第1版第1次印刷

169mm×239mm·13印张·258千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-42412-3

定价:58.00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



译者序

储能是指将电能、热能、机械能等不同形式的能源转化成其他形式的能量存储起来，需要时再将其转化成所需要的能量形式释放出去。因为电能是目前应用最广泛的二次能源形式，储能的变换大都与电能的生产 and 利用相关，因此电力储能为储能技术中的最主要方式。能量可以储存为化学能、势能、动能、电磁能等形态。现代化的储能系统从第一个实用的铅酸电池发展至今已有 160 多年的历史，从铅酸蓄电池、镍氢电池、超级电容器、飞轮储能、超导储能、液流电池到锂离子电池，还包括抽水蓄能电站、压缩空气储能等，其发展历程主要体现在提高能量密度和功率密度，强化环境友好和资源可循环利用。不同储能方式可按储能原理主要分为三大类：机械储能（如抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能等）、电磁储能（如超导储能等）和电化学储能（如钠硫电池、液流电池、铅酸电池、镍镉电池、超级电容器等）。

随着资源和环境问题的日益突出，储能技术的研究和发展越来越受到各国能源、交通、国防等部门的重视，储能技术的大规模应用将对现代化的能源生产、输送、分配和利用产生深远的影响和重要的作用。目前储能技术的主要应用形式包括：调节电网功率的瞬时平衡；提高可再生能源资源的利用效率；提高电能质量，增强电力系统的供电可靠性；为电动汽车、电力推进舰船及一些特殊的装备提供高效、高存储密度、高功率密度的电源。

电力系统要求电能生产与消费之间必须保持瞬时的平衡，否则将出现负载不能正常运行、供电系统不稳定等事故。储能技术是调节电能瞬时平衡的重要手段。各种形式的储能电站在电网负荷低谷时从电网吸收电能，在电网负荷峰值时向电网输出电能。将储能装置用于电力调峰，所需装置应具有较大的存储容量。

以风能和太阳能为代表的可再生能源的大规模并网利用急需储能技术的支持。煤、石油、天然气等化石能源终将枯竭，加上环保的需求，使得可再生能源的大规模应用势在必行，而这类能源的特点是随机性、间歇性和波动性较大，其对电网稳定性冲击很大，使得电力系统的安全性和经济性面临巨大的挑战。储能技术与可再生能源发电技术相结合，可以提高系统的稳定性、改善电能品质，提高资源的利用率。

储能技术可以为电能质量的提高提供新的有效方法。采用储能技术，可以使重要负荷不受瞬时性供电中断的影响。对于较长时间的供电中断，也可以在一定程度上延长采取应对措施的时间。与先进的电力电子技术相结合，储能系统还有助于降

IV 大规模储能技术

低电网谐波畸变率，消除电压凹陷以及浪涌电流等因素的影响。

在电动车辆、电力推进舰船中，需要高效高存储密度的电能储存装置。在航母电磁弹射系统、电磁炮等一些特殊军事装置中，需要在非常短的时间内提供超大量的电能，这些电能装置都需要高功率密度的储能系统作为电源。

基于储能技术方兴未艾的发展前景，本书重点针对电力系统负荷平衡、可再生能源并网等应用介绍大规模储能技术。书中不仅详细讲解了抽水蓄能、地下抽水蓄能、压缩空气储能、电池储能、太阳热能存储和天然气储存等不同形式大规模储能技术的工作原理、技术进展，还结合大量具体应用案例的分析，以翔实的数据和图表证实了相关结论。在倡导资源节约型社会和节能环保理念的今天，本书非常适合推荐给从事能源技术研发的专业工程和技术人员参考和使用。

本书翻译过程中，清华大学电机系的聂赞相、康庆、田培根、丁若星、摆念宗、聂金峰、许青松、王雅婷等老师和同学协助完成了部分章节的翻译、校对和整理工作，在此对他们表示衷心的感谢！

由于译者水平有限，文中难免存在错误和不妥之处，欢迎广大读者批评指正。

肖曦
于清华大学

原书前言

本书很大程度上得益于科罗拉多大学波尔得分校一批学生的努力，这些学生对提高电网中可再生能源的渗透率很感兴趣。我们的初期工作试图包括系统可靠性、选址、经济性和效率等问题，但随着时间的推移，透过可再生能源发电渗透率的增长对我们电网经济性和碳排放等方面的影响，这项工作开始关注能量存储。我们首先关注于效用规模，并借鉴和加入了工作于储能领域的其他研究者的诸多成果和贡献，以便更完整地覆盖该领域中所有重要专题。多年前人们提出的关于储能经济性和系统建设困难等问题，现在仍然未完全解决。很多研究也得出了不一致的结论，但我们相信，当电网中风能、太阳能和其他可再生能源大量增加时，电能存储将会变得非常重要，通过存储使用的电能将成为系统总电能中的重要部分。本书中我们调研了可以实现大容量储能，并能再将其转换成电能的大量方法。

我们希望本书内容可以有益于不同的人群，如在利用储能提高电网可再生能源渗透率时需要参考意见的决策者、研发者及学生。

Frank S. Barnes 和 Jonah G. Levine

致 谢

我们要向弗兰克 (Frank Krieth) 博士表达我们的谢意, 他为本书提供了建议, 并且帮助我们招募热能和蓄电池储能章节的作者。同时我们也要感谢科罗拉多能源研究所 (CERI)、埃克西尔能源公司 (Xcel Corporation)、科罗拉多大学的可再生与可持续能源研究所 (RASEI) 给予的经费资助, 使得本书中许多工作得以实现。

Frank S. Barnes 和 Jonah G. Levine

作者名单

Frank S. Barnes

Department of Electrical and
Computer Engineering
University of Colorado
Boulder, Colorado

Carl Begeal

Department of Mechanical
Engineering
University of Colorado
Boulder, Colorado

Porter Bennett

Bentek Energy LLC
Evergreen, Colorado

Terese Decker

Department of Mechanical
Engineering
University of Colorado
Boulder, Colorado

Se-Hee Lee

Department of Mechanical
Engineering
University of Colorado
Boulder, Colorado

Jonah G. Levine

Biochar Engineering Corporation
and
Center for Energy and
Environmental Security
Boulder, Colorado

Jozef Lieskovsky

Bentek Energy LLC
Evergreen, Colorado

Gregory G. Martin

National Renewable Energy
Laboratory
Electricity Resources and Building
Systems Integration Center
Golden, Colorado

Brannin McBee

Bentek Energy LLC
Evergreen, Colorado

Kent F. Perry

Exploration and Production Center
Gas Technology Institute
Des Plaines, Illinois

Isaac Scott

Department of Mechanical
Engineering
University of Colorado
Boulder, Colorado

Samir Succar

National Resources Defense Council
New York, New York

目 录

译者序

原书前言

致谢

作者名单

第 1 章 储能在电能的产生和消耗中的应用	1
1.1 引言	1
1.2 爬坡速率挑战	7
1.3 容量挑战	10
参考文献	13
其他可读的参考文献	14
第 2 章 间歇性能源发电的影响	15
2.1 引言	15
2.2 风能、天然气、煤炭集成发电	15
2.3 周期运行的影响	19
2.4 科罗拉多公共服务公司实例研究	26
2.4.1 数据和方法	26
2.4.2 2008 年 7 月 2 日的风电上网实例	27
2.4.2.1 所选科罗拉多公共服务公司电厂的爬坡速率	30
2.4.2.2 对影响气体污染物排放的估算	31
2.4.2.3 关于 2008 年 7 月 2 日风力发电上网实例的结论	35
2.4.3 2009 年 9 月 28 ~ 29 日的风力发电上网实例	35
2.4.4 科罗拉多公共服务公司实例分析的结论	38
2.5 科罗拉多公共服务公司和得克萨斯可靠电力委员会电力系统对比	39
2.6 得克萨斯可靠电力委员会电力系统内风能、燃煤发电及燃气发电 的相互影响	39
2.6.1 燃煤发电和燃气发电实施周期运行的频率	40
2.6.2 对气体污染物排放的影响：J. T. Deeley 电厂的实例研究	41
2.6.3 关于得克萨斯可靠电力委员会系统运转过程的总结	44

2.7 结论和展望	45
参考文献	47
第3章 抽水蓄能	48
3.1 基本概念	48
3.2 抽水蓄能接入电力系统的意义	48
3.3 实例: Dominion Power 公司在 Bath 县的抽水蓄能电站	49
3.4 抽水蓄能效率	50
3.5 美国抽水蓄能设备	51
3.6 能量与功率潜力	51
3.7 开发	57
3.7.1 环境考虑	57
3.7.2 系统组成	57
3.7.2.1 水库	57
3.7.2.2 水道	61
3.7.2.3 冲击式涡轮机与离心水泵	66
参考文献	67
第4章 地下抽水蓄能	69
4.1 引言	69
4.1.1 系统规模	69
4.1.2 设计概述	70
4.2 文献综述	71
4.3 小型(含水层)地下抽水蓄能	72
4.3.1 系统描述和运行	72
4.3.2 性能建模	74
4.3.3 水泵水轮机	78
4.3.4 电动发电机	79
4.3.5 电气系统	80
4.3.6 水井	83
4.3.7 地表蓄水池	87
4.3.8 系统效率	88
4.3.9 含水层水文地质	89
4.3.10 法律事项	90
4.3.11 经济性	93
4.4 未来前景	94

参考文献	94
第 5 章 压缩空气储能	96
5.1 背景	96
5.2 大规模储能发展的动力	97
5.3 系统的运行	99
5.4 适合于压缩空气储能的地质特性	100
5.4.1 盐岩洞	100
5.4.2 硬岩层	102
5.4.3 多孔岩	103
5.5 已有的和在建、计划的压缩空气电站	106
5.5.1 德国 HUNTORF 电站	106
5.5.2 美国亚拉巴马州 McIntosh 电站	107
5.5.3 美国俄亥俄州 Norton 在建项目	108
5.5.4 美国艾奥瓦州在建项目 IMAU	108
5.5.5 美国得克萨斯州计划项目	108
5.6 压缩空气储能的运行和性能	109
5.6.1 爬坡、转换和部分负荷运行	109
5.6.2 恒定容量和恒定气压	109
5.6.3 洞穴尺寸	111
5.6.4 压缩空气储能系统的性能指标	114
5.6.4.1 热耗率	114
5.6.4.2 充电转换率	114
5.7 单参数压缩空气储能性能指标	115
5.7.1 主能量效率	116
5.7.2 储能循环效率	116
5.8 其他度量方法	117
5.9 前沿技术	118
5.10 结论	120
参考文献	121
附录 储存量要求	126
情况 1 洞穴压力为常数	127
情况 2 变化的洞穴压力和变化的涡轮机入口压力	128
情形 3 变化的洞穴压力和恒定的涡轮机入口压力	128
第 6 章 电池储能	130

6.1	引言	130
6.1.1	蓄电池或可充电电池	131
6.2	能量和功率	131
6.2.1	铅酸电池	132
6.2.2	钠硫 (NaS) 电池	134
6.2.2.1	案例1 美国电力钠硫电池工程	137
6.2.2.2	案例2 Xcel Energy 对利用 1 MW 电池系统储存风能的测试	139
6.2.3	全钒氧化还原电池	140
6.2.3.1	其他电化学储能设备的性质	140
6.2.4	全钒氧化还原液流电池	141
6.2.4.1	商业应用: Cellstrom	143
6.2.5	锂离子电池	146
6.2.5.1	热失控	147
6.2.5.2	容量衰减	148
6.2.5.3	高倍率放电容量损失	148
	参考文献	149
第7章	太阳热能存储	151
7.1	热能存储简介	151
7.2	热能存储的物理原理	152
7.2.1	显热存储	153
7.2.1.1	显热存储材料	153
7.2.2	潜热	154
7.2.2.1	借助于相变材料的潜热存储	154
7.2.3	热化学能	155
7.2.3.1	热化学能量存储	155
7.2.4	选择存储方法	156
7.3	存储系统	158
7.3.1	双罐直接型存储	158
7.3.1.1	熔盐作为传热液	158
7.3.2	双罐间接型存储	158
7.3.3	单罐温跃层存储	158
7.4	存储容器设计	159
7.4.1	罐的几何形状	159
7.4.2	罐	161

XII 大规模储能技术

7.4.2.1 材料	161
7.4.3 压力和应力	162
7.4.3.1 机械压力	162
7.4.3.2 热应力	162
7.4.4 存储容器的热损耗与隔热	162
7.4.4.1 圆柱形容器的热损耗	162
7.4.4.2 球形容器的热损耗	164
7.5 热储能系统的经济性	165
7.5.1 调峰	166
7.5.2 能源供应商的成本	166
7.5.2.1 存储运行成本	166
7.5.3 消费者成本	167
7.6 热能存储的应用	169
7.6.1 聚光式太阳能发电应用	169
7.6.1.1 现有的大规模太阳光热能存储系统	171
7.6.2 建筑和工业过程供热	172
7.6.3 季节性供热	174
参考文献	175
第8章 天然气储存	177
8.1 引言	177
8.2 地下天然气储存的历史发展	177
8.3 影响天然气储存未来价值的关键趋势	179
8.4 天然气储存的种类	180
8.4.1 枯竭储层储存	180
8.4.2 蓄水层储存	180
8.4.3 盐穴储存	181
8.4.4 液化天然气	182
8.4.5 管道容量	183
8.4.6 气柜	183
8.5 天然气储存在天然气输配中的作用	183
8.6 客户细分	185
8.6.1 长途运输商	185
8.6.2 供应商和集成商	185
8.6.3 州内管道	186

8.6.4 州际管道	186
8.6.5 生产商	186
8.7 客户细分总结	187
8.8 储能的经济性	187
8.9 储能的演化	188
8.10 天然气储存技术发展	189
8.11 天然气储存与二氧化碳封存	191
参考文献	193
其他资料	194

第 1 章 储能在电能的产生和消耗中的应用

Jonah G. Levine 和 Frank S. Barnes

1.1 引言

目前，储能在公共电力行业扮演着重要角色。对于当前的电网，储存容量的发展是为了储存发电量大而且响应慢的火电厂所产生的能量，然后再将其重新分配到用电高峰期。储能设备可用于套利（以较低价格买进能量并用较高价格卖出）并得到利润。除了将利润最大化，当前储能主要致力于提高可靠性、效率、电能质量、优化传输和黑启动（故障状态下的自启动）功能。尽管不同的储能终端会影响储备的电量，但储能的唯一目的仍然是提高供电的灵活性。多样化的储能技术要求发电量随着电量需求的分布而变化，同时还要考虑储存容量的限制以及系统的功能。

以前的电力能源系统主要将储能用于优化大火电厂的能源调度，并能调整高峰用电需求。以后的电力能源系统将把储能作为调整未被分配的可再生能源的工具之一，用于响应负荷需求。将来，储能将会继续扮演其早期的角色，并扩大到能促进将来的科技进步。储能在电力部门的运营中也将发挥越来越重要的作用，因为它们将会面临新的挑战，而这些挑战来自于有重大意义的可再生能源的加入。

风能和太阳能依赖于天气因素，不能人为控制。这意味着发电量和需求量不会总是对应的。例如，没有阳光，太阳电池就不会有电；当没有风时，用户最终会因没有风能而不能使用空调器。此外，大量的太阳电池安装在住宅区、小型企业和那些只用太阳电池提供一小部分电能的企业。因此，电力部门必须将大批量的小且分布广泛的能源集中起来，不论这些能源是否能为用电高峰期所用。

当负荷需求减小时，产生的多余电能如何分配又是另一个难题。太阳能和风能的全天分布如图 1-1 和图 1-2 所示。从图 1-1 中可以看出太阳能的变化快慢以及在某些时刻太阳能供给不足时而导致了两个问题。第一个问题是需要消除可能因云层飘过遮住太阳（短期变化）而出现的输出电能快速变化，第二个问题是在晚上或者阴雨天（长期变化）需要持续供电的问题。其中，如果系统功率波动超过总功率的 10% ~ 15%，这些问题会变得异常难以解决。当电网功率波动小于电网总功率的 10%，可以由热备用设备补充。当负荷发生变化需要增加发电量或者可再生

能源提供的功率超过系统可以吸收的功率时，系统的运行状态也需要改变。

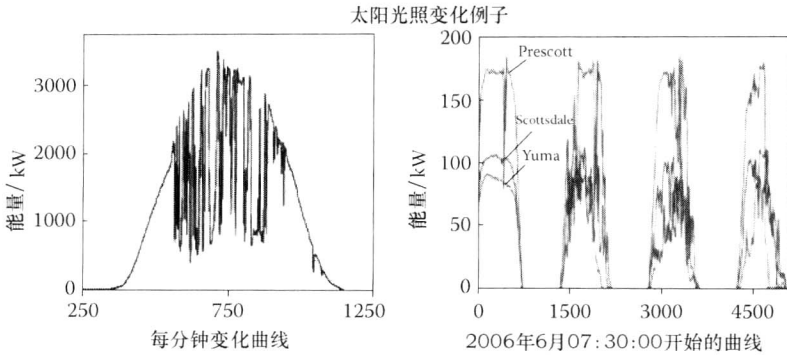


图 1-1 太阳能变化曲线

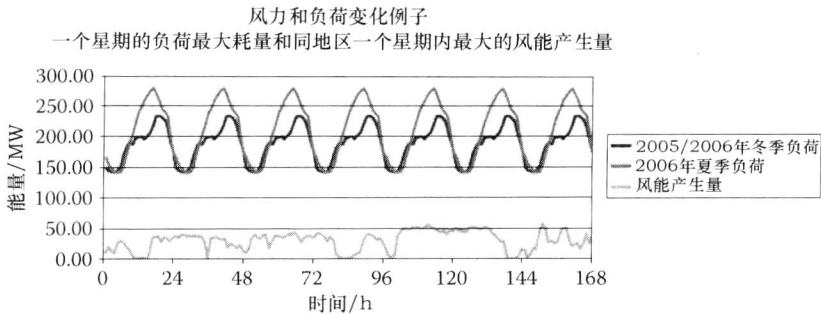


图 1-2 电能负荷和 7 天内的有效能量

由图 1-2 可以清楚地看到，当风力发电高峰时，可能正是负荷低谷期，而高负荷时却可能处于风能偏低时段。简而言之，可再生能源提供的电量只能是电力需求的一部分。在可再生能源低供应且负荷高需求时期，可以有多种解决问题的方法，包括利用储能、调整需求或者在线投入燃气发电机等。最常见的解决方案是在线投入燃气发电机，或者根据协议，以切负荷的方式来减小需求。如果一个系统有水力发电或者电力储能，则可以利用起来满足不同的负荷需求。

供电时，如果可再生能源系统提供的功率超过电网可以吸收的功率时，可相应地将其从电网中切除。这些系统管理的具体方式还要取决于供电电源的类型、负荷需求特性和电网结构。需要注意的是，在没有重大维修、运行和可靠性问题时，燃煤电厂和核电厂的电能不能被减小到一定的水平以下，因为如果燃煤发电机和核发电机被关闭，可能要花上数小时甚至数天来起动。可以通过斜率有限的速度变化限制燃煤发电。燃气发电机则容易受到天然气供应短缺和价格波动的影响。

储能系统储存的电能从发电厂到负荷的输送由电力调度根据需求分配。储能技术在经济中的实用性和地位取决于它在系统中的集成度。例如，可以在风能或者太阳能发电厂附近建一些储能装置，当负荷高峰期时提供电能，当没有风时或者不需要时储存电能。为了减少传输损耗或者延缓在负荷需求不断增长的新地区建立新的输电线路的速度，也可在负荷附近配建储能装置。

世界正走在一个以分布式发电为主的新时代，能否妥善管理日益增长的大量不同形式的电源对每一个操作领域都至关重要。为了管理发电电源的多样性，未来电网需要在负荷需求和发电量管理上增加灵活性。同时这个电源的多样性也代表着排放物（碳）的减少和化石能源的节约。电力公司及其他供能公司如何管理增加的电源多样性将取决于供能系统中固有的可变性和其他可用的资源。为了实现负荷需求和发电量的灵活管理，需要以下步骤：

- 1) 能源利用率和需求响应。
- 2) 多样性电源在空间和资源上展示出互补的特点。
- 3) 将资源通过市场传输并及时利用的能力。
- 4) 能量储存。
- 5) 通过发展智能电网中电力数据的通信，整合上述步骤。

值得注意的是，尽管储能只是改善能源系统灵活性5个步骤中的一步，但它对于风能和太阳能这些资源，却是确保灵活性和可靠性的一个关键组成部分。抽水蓄能（PHES）、压缩空气储能（CAES）和其他储能系统将促进负荷需求与可再生能源供电的协调同步。

基本负荷发电向系统提供绝大部分的电能，并且对碳排放量影响也最大。如果可再生能源要减少电能生产的排放量并显著增加供电的多样性，它必定会影响基本负荷发电。在低负荷需求时，把可再生能源接入电网提供电能将会是一个挑战，因为可能无法使基本负荷发电中的热力供电系统或者其他形式的供电系统急剧减少。储能，特别是通过抽水蓄能和压缩空气储能就能解决这样的难题，它可以协调各系统的功率爬坡速率，并平衡负荷需求和发电量之间的关系。

抽水蓄能和压缩空气储能从电网获取电能，并在需要时为电网提供能量。这样就提出了一个很重要的问题：用哪些（发电）资源为抽水蓄能和压缩空气储能提供充电功率？如果一个资源位于抽水蓄能的抽水发电站或者压缩空气储能的压缩空气站附近，那么这个资源最有效。因此，当附近有合适的煤资源，就可以用煤燃烧来充电。当附近有合适的风能，就用风能充电。有更多的可用的可再生能源，就更有可能用可再生能源作为首选为抽水蓄能和压缩空气储能提供能量。可再生能源的比例（渗透率）越大，系统所需的灵活性就越大。可再生能源的渗透率越低，则储能需要得也越少，但同时会增加非可再生能源用于储能的可能性。可再生能源的渗透率越高，则需要储存的能量越多，同时可再生能源用于储能的可能性也会增