



国际电气工程先进技术译丛

电力系统储能

(原书第2版)

**Energy Storage for Power Systems
(2nd Edition)**

[美] A. G. Ter-Gazarian 著
周京华 陈亚爱 孟永庆 译



 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

电力系统储能

(原书第2版)

[美] A. G. Ter-Gazarian 著
周京华 陈亚爱 孟永庆 译



机械工业出版社

本书主要讨论储能技术在电力系统中的具体应用,详细介绍了各种储能技术的基本原理、具体示例以及储能对电力系统的影响,并对各种储能技术的特点进行了分析,重点关注了可再生能源与储能之间的关系。

本书适合从事电力系统储能技术研究的科研工作人员或企业研发人员阅读,也可作为新能源科学与工程及相关专业的高年级本科生、研究生和教师的参考用书。

Original English Language Edition published by The IET, Copyright 2011, All Rights Reserved.

本书中文简体字版由 IET 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:01-2013-3567 号

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统储能:第2版/(美)特-加拉雷(Ter-Gazarian, A. G.)著;周京华,陈亚爱,孟永庆译.一北京:机械工业出版社,2015.3

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文:Energy storage for power systems, 2nd edition

ISBN 978-7-111-49405-8

I. ①电… II. ①特… ②周… ③陈… ④孟… III. ①电力系统-储能
IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 034934 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

责任校对:张晓蓉 封面设计:马精明 责任印制:李洋

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2015 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 14.25 印张 · 272 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-49405-8

定价:68.00 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

风力发电、太阳能发电自身固有的间歇性问题是新能源发展的瓶颈。随着新能源发电规模的逐渐扩大，其对电力系统的影响也越来越大。用电低谷将多余的能量储存起来，用电高峰期再释放出来，是解决新能源发电功率间歇性问题的关键。因此，大规模储能技术的研究就变得越来越重要。

本书主要讨论了各种储能技术，详细论述了各种储能方法的基本概念、工作原理和应用。全书共分为三部分。第一部分为储能应用，主要包括电力系统的发展趋势、作为电力系统结构单元的储能装置、储能技术的应用。第二部分为储能技术，主要包括热能储存、飞轮储能、抽水蓄能、压缩空气储能、氢气与其他合成燃料储能、电化学储能、电容器储能、超导磁储能、电力系统自身储能以及储能系统选择注意事项。第三部分为电力系统储能注意事项，主要包括储能系统集成、储能对电力系统瞬态的影响、电力系统储能优化机制、储能与可再生能源。

本书适合从事电力系统储能技术研究的科研工作人员或企业研发人员阅读，也可作为新能源科学与工程及相关专业的高年级本科生、研究生和教师的参考用书。

全书共有 17 章，其中前言、绪论、第 1~6 章由北方工业大学的周京华翻译，第 7~11 章由北方工业大学的陈亚爱翻译，第 12~17 章及结论由西安交通大学的孟永庆翻译。全书由周京华统稿。

本书的翻译及出版得到了 2014 年北京市自然科学基金项目的资助。

由于时间仓促加之经验不足，书中译文难免存在不妥之处，请读者谅解，并提出宝贵意见与建议。

译者

2015 年 4 月

原 书 前 言

20 世纪五六十年代，电力行业发生了诸多变化。20 世纪 50 年代以来，电力行业先后连续建设了一批核电站、燃煤发电厂、燃油发电厂和燃气联合循环发电厂。不同规模与发电量的传统发电厂向用户提供连续、可靠、廉价的电力。这些发电厂在集中管理与控制的电力市场中运营，通过高压电网保证规模输送效率，并确保资源使用的安全性。

自 20 世纪 90 年代以来，电力行业又发生了新的变化。这些变化起因于电力供应自由化、对发电的环境影响的关注、对现有和新建热电厂实行相关排放控制，以及最近将可再生能源开发列为国家目标。无法断定在接下来的 50 年中随着经济、政治和技术的发展会不会给电力行业带来根本性变化。但是有一种变化是可以预料到的，尤其是考虑到可再生能源发电的增长所带来的变化，那就是储能的发展和应用。

不能单独考虑电能的供应，必须同时考虑双重电力和能量供应要求。可再生能源的主要缺陷在于尽管可以在一年内提供一定量的电能，但大多数可再生能源是间歇性的（用“多变”表述更合适），另外一些是随机性的，这样就无法按需提供电能。因此，它们对供电安全的贡献有限。如果可再生能源大规模使用，电力输出的这种变化可能会给电力系统带来问题。在利用可再生能源发电满足供电系统需求时必须对随机间歇性供电与供电安全性之间的相互影响进行更为详细的研究。注意供电安全需要的是电力输送的连续性而不是能量的连续性。而且，可再生能源发电的特征是针对具体系统而定的，并取决于系统的自然地理情况和位置。

供电的变化性可以同时具有短期和长期的性质，其中短期变化性与储能的使用关系更为密切。对于长期变化性的情况，即间歇发电对变化性没有影响或影响很小时（例如，当大型反气旋天气系统覆盖大部分风力发电场时，这种没有影响或影响很小的情况会持续几天），供电安全可能取决于与当前峰值需求有关的传统发电厂的装机容量裕量。

从短期看，电力输出的日常变化在一定程度上可以通过现有传统发电厂来补偿，但是这样会产生额外的成本。产生这些成本的因素包括频繁循环的低效率欠载运行及快速负荷增加，这会对发电设备造成损坏，从而需要耗费更多的维护成本。另外，也可以采用大量快速反应发电厂，例如开式循环燃油（燃气）轮机或柴油发

电机以及其他同样经济效益低下并会产生污染的方案。在这些情况下，使用储能装置从技术和经济角度来说都是值得考虑的，特别是风力发电具有很高渗透率的情况。例如，风能可以提供大量电力，但不一定具备满足峰值需求的能力，这就会大大增加系统成本。

关于更高效发电和用电的储能应用存在于 Ter-Gazarian 博士在本书中提到的包括化学、生物、电化学、电气、机械和热力在内的各种可选择方案中。新兴的潜在颠覆性技术正在不断涌现，为储能提供可选择的未来解决方案，以此来满足从小规模消费者到电力系统规模储能的各个不同层面的市场需求。

除了已经在发电和能量传输中成为主流储能形式的化学燃料（包括氢）以外，目前最主要的储能形式包括：

- 蓄电池：大约从 21 世纪头 10 年中期开始，就已经研究出了较新的蓄电池技术。这些技术目前可以提供重要的公共电网的载荷平衡能力，随着锂电池技术在电动汽车上的应用，在接下来的 10 年中，随着锂电池性能的明显提高，电动和混合动力汽车将会大量被消费者所使用。

- 电网储能：电网储能也被称为汽车—电网储能系统。在该系统中，并入能量网的现代化电动汽车可以在需要时将储存在蓄电池中的电能释放回电网中。

- 燃料电池：电动装置可以通过燃料电池供电，但是在所有潜在市场中，供氢成了重要的问题。燃料电池具有应用潜力的 3 个市场被分类为固定应用、汽车应用和便携应用。固定电力市场包括小功率家用设施；商用住宅、医院和酒店使用的中等功率设施；以及在兆瓦级工厂使用的大功率设施。旨在满足运输用途的主要技术已经出现，即低温固体聚合物燃料电池（Solid Polymer Fuel Cell，简称 SPFC），特别是质子交换膜燃料电池（Proton Exchange Membrane Fuel Cell，简称 PEMFC）。便携式电力市场包括电力需求在几毫瓦到数百瓦的设备，从电子产品、笔记本式计算机到军用设备。

- 可再生燃料电池：这一项发展也是建立在燃料电池技术基础之上，但是也可以被分类为蓄电池，因为其充电量受到化学成分数量的限制。

- 太阳能光伏：作为可再生能源，与化石燃料发电相比，太阳能光伏有很多优点。太阳能光伏的突出优点是低碳，而且由于在当地发电，不需要通过国家电网输送，从而减少相关的输送损失。高成本仍然是太阳能光伏发展的主要障碍，但是如果科学家可以制造出可靠、低成本的光伏电池即廉价的有机光伏产品，就可以为满足日益增长的能源需求和减少碳排放做出重要贡献。

- 大型太阳能发电厂：通过绝缘的容器存储利用太阳能光线加热的热熔盐，这些液体将用于产生供送到汽轮机用于发电的蒸汽。最近西班牙和美国取得了一些进

VI 电力系统储能 (原书第2版)

展,可能会在以色列、埃及、法国、澳大利亚、阿尔及利亚和南非进一步安装。

- 抽水蓄能:抽水蓄能是世界上最大的公共电网储能方式。

- 海洋能:目前正在考虑选择不同的水闸或潮汐泻湖,尤其是在英国塞汶河口。

- 压缩空气:这些方案使用泵将可再生能源产生的压缩空气送到地下洞穴或地下蓄水层中,以便在电力需求达到峰值时,可以释放这些压缩空气来供给使用天然气的燃气轮机。几年来,全球范围内只有两个项目:一个项目在阿拉巴马州;另一个在德国。美国目前有新设施在建。

- 风袋:这是压缩空气储能的一种变形。目前英国正在开发一种柔性风袋,用于以海底压缩空气的形式储存风机中的多余能量。

- 地下储热:目前正在开展一些项目来调研如何使用地质构造储存位于地质构造附近的发电厂产生的大量热能。与此同时,此举旨在对“砾石层”局部储能进行调研,并将其作为较小规模储热的一种方式。热能将以水的形式储存并通过泵送到用水的住宅或公司,其运行方式与集中供热系统的运行方式相似。

- 热能储存:从20世纪80年代以来人们就开始利用热能储存来满足空调需求。其工作原理是利用非峰值电力制冰,然后在峰值时段利用,从而通过冰储存以实现制冷。2009年,已经在35个国家的3300多栋建筑中使用。

- 飞轮:最近利用一个20MW飞轮储能厂作为应急备用电源,同时为系统频率调节提供辅助,即保证供电质量。供电质量是一个很重要的问题。

世界人口每35年翻一番,对能源的需求增长则更为快速,每年约增长5%,也就是每14年翻一番,这也导致了对碳氢资源的需求的增长。这种情况下,除了环境因素外,可持续能源的开发对于长期发展是非常重要的。尽管不确定性大大增加,但是如果假设可以提供足够的电能(MW级),则关键的问题在于在考虑到系统中存在大量可变输出可再生资源以及智能电网随时间变化的需求快速增长的前提下持续保证供电和需求的平衡。可再生资源将发挥重要作用,但是使用可提供容量支持从而提高可再生资源和输电设施的价值储能设施也将具有重要意义。

M. A. Laughton

2010年12月22日

致 谢

这本书的编写离不开 D. T. Swift-Hook 博士的鼓励。与 D. T. Swift-Hook 博士进行的深入探讨，对第 17 章的编写起到了很大的帮助。该章内容基于 D. T. Swift-Hook 博士在该领域所做的工作。作者还希望表达对妻子 Olga Ter-Gazarian 的感谢，感谢她在初稿录入过程中的耐心和细致工作。此外，还要感谢 Kathy Abbott 女士在访问伦敦期间的热情接待和帮助。

引言

能量转换：从一次能源到消费者

社会文明离不开能源。与远古时代相比，技术进步和发展都与能源的使用量有关。这一点可以通过图 I-1 来帮助理解。能量消耗从第二次世界大战后开始剧增。在过去的五十年中，消耗的能量超过总能量（900000 ~ 950000TWh）的 2/3，这些能源中有 90% 不是可再生能源。这并不足为奇，因此，最近的几十年中，一次能源已经成为人们的关注点：能源需求在不断增长，但是传统能源有限，且分布不均衡。

能量出现的形式有多种，取决于从一种形式转换为另一种形式的相互作用的性质。主要存在四种相互作用：重力作用、弱核作用、电磁作用和强核作用，它们与重子、轻子和光子等宇宙成分之间的相互作用会产生大量不同形式的能量。能量的主要形式是势能、动能、电能、质量和辐射。常见的各种能量形式列于表 I-1 中。

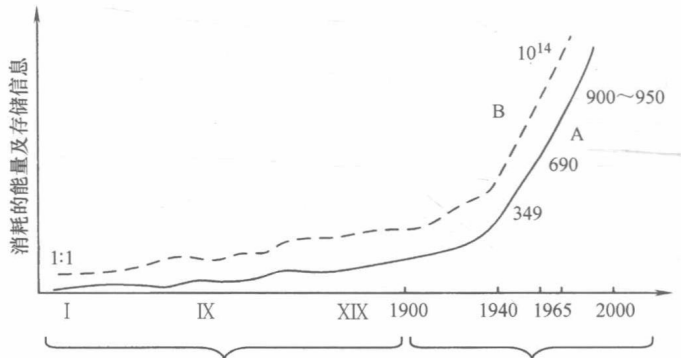


图 I-1 从史前到现代人类消耗的能量 (A, 10^6 GW) 及存储信息 (B, bt)

表 I-1 能量的物质形式

类型	形式	势能	数量	是否可以储存	示例
重力	高度	重力势能, g_h	质量, m	可以储存	大坝
动能	速率, v	$v/2$	质量, m	可以储存	飞轮、子弹
空间	压力	压力, P	体积, V	可以储存	压缩气体
热能	热量	温度, t	熵, S	可以储存	热水
化学能	电子电荷	化学电位, G	摩尔数, n	可以储存	化学蓄电池
电荷	电子电荷	电压, U	电荷	可以储存	电容器
电介质		电场, E	电介质极化, P	不可储存	极化
磁能	电子自旋	磁场, H	磁化强度, M	不可储存	磁化
电磁能	运动电荷	自感电压, Ldl/dt	电流	可以储存	电磁线圈
弱核能	质量变化		质量	不可储存	发光漆
强核能	质量变化		质量	不可储存	核反应堆、星星
辐射	光子			不可储存	

图 I-2 和图 I-3 中的全球能源分布图表明实际上几乎所有的能源都通过一种方式或其他方式与太阳相关。在靠近赤道的位置，外层大气中，地球接收到的太阳能约为每平

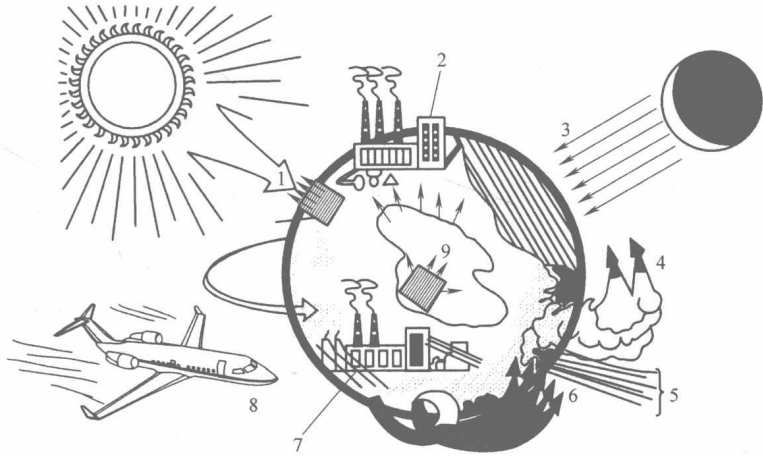


图 I-2 人工和自然能量流对比

- 1—太阳辐射 100% ($E=7.5 \times 10^{14}$ MWh/年)
- 2—电力装置 0.01%
- 3—潮汐能 0.05%
- 4—风能 0.035%
- 5—蒸发 0.0005%
- 6—飓风 0.04%
- 7—发电站 0.0015%
- 8—飞机 0.0002%
- 9—直接反射 30%

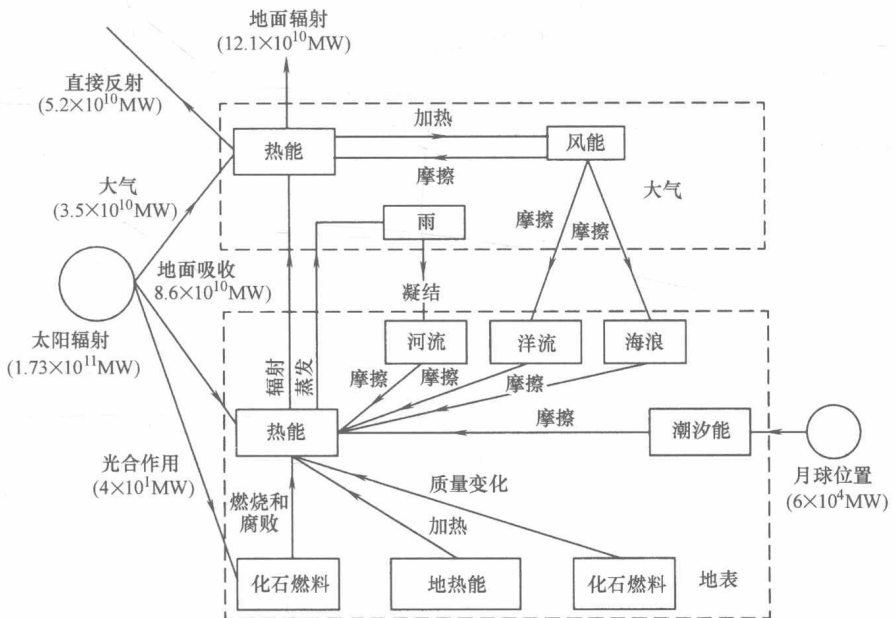


图 I-3 地球能源图

方米每秒 1360J, 即 $1.36\text{kW}/\text{m}^2$ 。在海平面上的能量约为 $1\text{kW}/\text{m}^2$, 刚刚超过每平方米[⊖] 1 马力[⊖]。

但是, 我们并非直接消耗太阳能, 我们所使用的大部分能源都是以不同形式储存的太阳能。

自然能源储存介质包括有机燃料 (木材、煤、油)、水蒸发和风。风是太阳能几个季度累积的结果, 河流蒸发是太阳能几年累积的结果, 而有机燃料则是太阳能数十亿年累积的结果。

在能量从一种形式转换成另一种形式的过程中, 有时储存机制可以储存能量以便日后使用, 其储存率并不取决于初始转化率。在能量转换过程中的双重去耦具有深远的意义, 因为这恰好是大自然允许我们聚集能量并在能量生成后的某个时间消耗这些能量。

一般而言, 一次能源的能量流动并不恒定, 而是取决于季节、一天中的时间和气候条件。能源需求同样也不均衡, 取决于相同的情况, 但是往往是相反的。因此, 需要在能源和消费者之间存在某种协调者, 而这个协调者就是储能。储能以某种方式在所有自然和人为过程中发挥着作用。

储能是物理过程中的一个必要部分, 如果不储能, 所有的事件将会同时发生。储能是能源管理中的一项关键技术。

从历史上讲, 人们曾采用打木桩或筑坝的形式为水车提供工作压头来解决储能问题。此后, 更浓缩的燃料储能形式, 即煤, 成为最重要的储能方式。现在我们通常将油箱作为最便捷的储能方式。基于油的燃料使用简单、容易获得且价格相对较低。从技术层面讲, 储油并不难, 储存时间取决于油箱龙头关闭的时间。长时间储存不会发生损失, 且能量密度很高。油可以用作电源、热源, 用于运输和固定应用。不同类型的自然储能方式对比见表 I-2。

表 I-2 作为自然能源储存方式的燃料

燃料类型	密度 $10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$	能量密度		沸点 $^{\circ}\text{C}$
		$10^7 \text{ J}/\text{kg}$	$10^{10} \text{ J}/\text{m}^3$	
木材	0.48	1.5	0.72	无
煤	1.54	2.93	4.5	无
石油	0.786	4.12	3.24	127
丙烷	0.536	4.7	2.52	-42.2
甲烷	4.2	0.5	2.1	-161.3
铀		8.2×10^3		无

⊖ 1 码 = 0.9144m。

⊖ 1 马力 = 735.499W。

包括发电行业在内的所有一次燃料和能量生产行业都大量利用储能作为在一次燃料初步提取和随后向消费者输送过程中对系统进行有效管理的方式。一次燃料库存用于防备生产中断从而确保能源安全, 保证向客户提供能量的价格稳定, 并使得近乎恒定的一次能源生产率与变化的载荷需求相匹配。库存实例包括煤堆、油罐区和储藏在地下洞穴中的压缩天然气。储能也用于最大限度提高主要配送系统, 即煤场、车库和气罐(包括储气管道)的效率。

可再生能源受到了广泛关注。但是, 绝大部分可再生能源不能像燃料一样提供恒定的能量供应, 也无法直接进行储存, 因此需要二次储能系统或在具备足够储能能力的传统发电厂的电力系统中使用。

电力系统是能源生产者和消费者之间最灵活、最方便的载体。电力系统有一些特别的属性, 其中包括:

- 机械能至电能的转换装置强健、高效并易于控制。
- 输电线路效率很高, 并可以长距离以经济可靠的方式输送电能。
- 绝大部分发达国家都有广泛分布且相互连通的电力系统。因此, 原则上讲, 很容易将间歇性的能源并入电网。

- 以电能形式提供从间歇性能源获取的能量是经济有利的, 因为与固态或液态燃料相比, 产生每千瓦时电能需要的成本更低。这是因为可再生能源是一种“高品位”能量, 而在燃料向电能的转化过程中, 卡诺循环会导致能量的低效转换。

电力作为一种能源载体的主要不足就是不能大量储存。随着电力系统的发展和设备容量的不断增加, 储能问题也变得越来越重要。

可以通过在电力系统中使用中间设备来改善这一缺陷, 中间设备可以将发电和用电过程部分或完全分离。我们称之为“二次能源储存”。

二次能源储存(Secondary Energy Storage, SES)是一种专门用于接收电力系统中产生的能量的装置, 可以将能量转换为一种适合储存的形式, 并保持一段时间, 然后将等量的能量送回电力系统中, 转换为消费者需要的形式。

一条略为简化的规则表明, 储热节约能源, 储电节约资本投资。由于在全球范围内能源行业因为一次能源和资本投资而面临资源危机, 这为研究低品位和高品位能源储存提供了一个契机。

使用储存在化学蓄电池中的电能进行大规模供电并非一个新概念: 这些是本世纪初很多电力设施的必要部分。1890年, 蓄电池最早在宾夕法尼亚州德国镇投入使用。那时, 电力系统主要为直流(DC)系统, 并相互独立运行。蓄电池用于在直流发电机不运行时满足峰值电能需求并提供应急电能。随着直流电力系统的发展, 蓄电池的使用越来越广泛, 但是与直流电力系统竞争的交流电力系统的发展改变了这一趋势。由于设备和系统设计的发展提高了交流系统的可靠性, 其得到了广泛认可, 蓄电池的使用也就此中断。

随着工业化程度的加深以及能量转化的增加, 高效储能和能量回收的需求也同样增长。近年来, 化石燃料中储存的化学能的大规模转化已经强调了保存能量的必要性, 而

能量保存通常可以通过在系统中引入某种形式的储能来实现。

尽管通过储能实现能量循环必然会带来一定的损失,但总体的经济效益是很明显的。这些效益主要是通过提高运营效率降低一次燃料消耗,包括与储存技术相关或依赖于储存技术的新设备的开发。

根本上,当可用发电量超过需求时将会储能,当需求超过可用发电量时,储存的能量将返回。

在能量消耗的四种形式即机械、热、光和电中,实际上只有热能可以由与电力系统相连的消费者储存。其他形式的能量(只能根据客户的需求以电能的形式进行传输)可以在本地储存,主要以电能形式储存,但其成本远高于供给侧的储能成本。

事实上,除了明显的规模效应外,制造商可以使用储存的能量来平衡载荷需求。这种储能利用方式对不同消费者的峰值需求时间分布多样性加以充分利用,不能由单个用户来完成。换言之,如果每个消费者都使用自己的储存方式来平衡自身的载荷消耗,则可能出现的情况是一部分储能装置处于发电状态,而其他储能装置处于待机状态或甚至储存状态,这意味着储存量的总体利用率将会很低。同时也会出现选址和控制问题。

在众多消费者中,只有因为距离而不能与电力系统连接的孤立用户和本身独立的电动汽车能够便捷地自行储存能量,就像他们可以便捷地自行发电一样。

在公共电网上安装储能设备后,其可以储存燃煤或核电站产生的电能,并在白天需求最高的时候将储存的电能返回电网中。这样可以降低对燃气或燃油涡轮机的需求。

大规模利用太阳能或风能等可再生能源取决于储能设施,因为这些能源在全天和全年都是变化的。

供给侧储能所能发挥的作用与前面讨论的简单作用有所不同,这是因为储能方式在特征上通常与发电方式有很大的不同。因此,储能还可以发挥其他功能,作为对发电设备功能的补充,这从技术和经济的角度讲都很重要。这些功能在本书的第一部分讨论。本书的第二部分将对不同的储能技术展开讨论。

关于选择最适当的混合发电和储存结构的问题也成为电力系统工程师面临的最重要的问题。因此,本书第三部分将专门讨论这一特别复杂的问题。如果了解包含储能的电力系统要求的信息以及储能设备的技术和经济参数,这一问题就可以迎刃而解。

目 录

译者序	
原书前言	
致谢	
引言	

第一部分 储能应用

第 1 章 电力系统的发展趋势	3
1.1 需求侧特点	3
1.1.1 储能方法	6
1.1.2 日负荷曲线结构	7
1.2 供给侧特点	9
1.3 发电机组扩展规划	17
1.4 满足负荷需求	18
第 2 章 作为电力系统单元的储能装置	21
2.1 概述	21
2.2 储能单元的能量与功率平衡	24
2.3 储能数学模型	26
2.4 储能计量经济模型	28
第 3 章 储能技术的应用	30
3.1 概述	30
3.2 储能装置的静态职能	30
3.3 用户级储能	32
3.4 储能与输送	33
3.5 储能装置的动态职能	34
3.6 可能的应用领域	35

第二部分 储能技术

第 4 章 热能储存	39
4.1 概述	39
4.2 储能介质	44
4.3 安全容器	46

4.3.1	钢制容器	47
4.3.2	预应力混凝土压力容器	47
4.3.3	预应力铸铁容器	47
4.3.4	地下洞室	47
4.3.5	含水层储存高温水	48
4.3.6	安全容器设计总结	48
4.4	功率提取	49
4.4.1	变压力蓄能器	49
4.4.2	扩容蓄能器	49
4.4.3	等容蓄能器	50
4.5	发电厂热能储存	52
4.6	经济评估	54
第5章	飞轮储能	57
5.1	概述	57
5.2	作为中央储能的飞轮	58
5.3	能量释放问题	61
5.4	飞轮储能的应用	61
第6章	抽水蓄能	63
6.1	概述	63
6.2	功率提取	64
6.3	抽水蓄能中央储能	68
6.4	迪诺威克	69
第7章	压缩空气储能	75
7.1	概述	75
7.2	基本原则	77
7.3	中央储能	78
7.4	功率提取	81
7.5	两个工业示例	87
7.5.1	亨托夫 (Huntorf)	87
7.5.2	麦金托什 (McIntosh)	90
7.6	调度与经济局限性	91
第8章	氢气与其他合成燃料储能	93
8.1	概述	93
8.2	合成储能介质	93
8.3	氢气的生产	94
8.4	氢气储存容器	99

8.5	氢化物概念	100
第9章	电化学储能	103
9.1	概述	103
9.2	蓄电池	104
9.3	燃料电池	109
9.4	储能单元装配	111
9.5	热动态	114
9.6	功率提取	115
第10章	电容器储能	116
10.1	理论背景	116
10.2	电容器储能介质	119
10.3	功率提取	119
第11章	超导磁储能	121
11.1	基本原则	121
11.2	超导线圈	123
11.3	低温系统	126
11.4	功率提取	127
11.5	环境与安全问题	128
11.6	项目与实现	131
第12章	电力系统自身储能	134
12.1	作为飞轮的电力系统	134
12.2	超高压电网互联	135
第13章	储能系统选择注意事项	137
13.1	储能技术对比	137
第三部分 电力系统储能注意事项		
第14章	储能系统集成	145
14.1	问题界定	145
14.2	电力系统成本函数	147
14.3	系统约束条件	150
14.4	储能装置引入的设计标准	153
第15章	储能对电力系统瞬态的影响	156
15.1	问题界定	156
15.2	模型描述	157
15.3	稳态稳定性分析	158
15.4	确保瞬态稳定性的储能参数	162

15.5	储能选址	168
15.6	多功能储能装置参数选择	169
第16章	电力系统储能优化机制	171
16.1	电力系统储能机制	171
16.2	优化机制标准	172
16.3	单节点系统简化标准	175
16.4	优化机制算法	176
第17章	储能与可再生能源	179
17.1	为什么使用可再生能源	179
17.2	可再生能源的类型	181
17.2.1	波浪能	182
17.2.2	风能	183
17.2.3	潮汐能	184
17.2.4	小规模水电能源	184
17.2.5	太阳能热能技术与太阳能光伏	185
17.3	使用可再生能源的独立电力系统中储能的作用	187
17.4	间歇性来源的稳定电力	188
17.5	使用可再生能源并网发电的综合电力系统中储能的作用	190
17.6	结论	194
结论	196
参考文献	202