



国家科学技术学术著作出版基金资助出版

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
能源革命与绿色发展丛书
储能科学与技术丛书

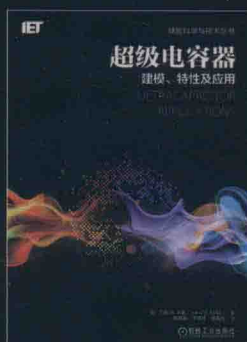
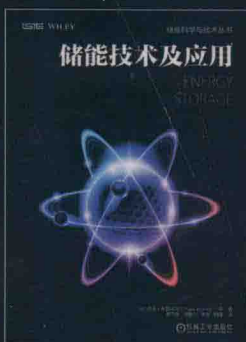
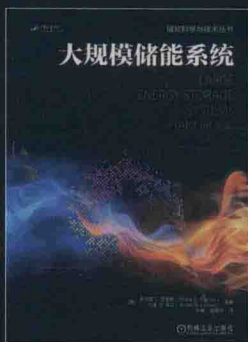
电力储能技术 及应用

POWER ENERGY
STORAGE
TECHNOLOGIES
AND
APPLICATIONS

唐西胜 齐智平 孔力 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



内容简介

本书从电力系统应用需求出发，介绍了典型的电力储能技术、系统组成、控制架构，结合储能微电网、虚拟电厂、可再生能源发电波动平抑与调频调压等方面的应用，重点从系统设计、运行控制等方面展开分析，并给出了储能大数据分析及应用方法。

本书旨在从电力系统的未来发展出发，为储能技术和电力系统之间搭起一座桥梁，以适宜的储能，更好的技术经济性，满足电力系统的应用需求。



机械工业出版社
微信公众号



E 视界
传播电类内容
提升专业知识



科技电眼
行业新闻 科技资讯
投资动向 一站购书



上架指导 新能源 / 储能

ISBN 978-7-111-64218-3

策划编辑◎付承桂

编辑邮箱: fuchengui2018@163.com



定价: 79.00元



国家科学技术学术著作出版基金资助出版
“十三五”国家重点出版物出版规划项目
能源革命与绿色发展丛书
储能科学与技术丛书

电力储能技术及应用

唐西胜 齐智平 孔力 著

机械工业出版社



本书关注电力储能系统及其应用技术,凝聚了作者近年来在电力储能、分布式发电、微电网及智能电网等领域的理论积累与实践经验。全书分为3篇,第1篇为概论,面向电力系统的变革性发展,分析了储能应用于系统调频、调峰、可再生能源消纳、输配电阻塞管理、分布式发电与微电网等的作用,介绍了目前典型储能的技术原理与应用发展态势。第2篇重点介绍了电池和飞轮储能的系统构成、电网接入拓扑及其控制技术,分析了复合储能的理论基础与控制方法,以及储能大数据分析方法与应用。第3篇分析了基于储能的微电网双模式运行与对等控制方法,储能应用于可再生能源发电波动平抑与调频调压特性改善的方法,以及基于储能的虚拟电厂优化调度方法。

本书旨在从电力系统的未来发展出发,为储能技术和电力系统之间搭起一座桥梁,以适宜的储能,更好的技术经济性,满足电力系统的应用需求。本书可供电气工程、新能源发电、智能电网等相关领域的工程技术人员,以及高等院校相关专业的师生阅读使用。

图书在版编目(CIP)数据

电力储能技术及应用/唐西胜,齐智平,孔力著. —北京:机械工业出版社,2019.12

(能源革命与绿色发展丛书·储能科学与技术丛书)

国家科学技术学术著作出版基金资助出版 “十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-111-64218-3

I. ①电… II. ①唐… ②齐… ③孔… III. ①电力系统-储能-研究
IV. ①TM7

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第268476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 闫洪庆

责任校对:杜雨霏 封面设计:鞠 杨

责任印制:张 博

三河市国英印务有限公司印刷

2020年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·16.5印张·2插页·320千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-64218-3

定价:79.00元

电话服务

网络服务

客服电话:010-88361066 机工官网:www.cmpbook.com

010-88379833 机工官博:weibo.com/cmp1952

010-68326294 金书网:www.golden-book.com

封底无防伪标均为盗版 机工教育服务网:www.cmpedu.com

前 言

电力系统稳定与高效运行的关键，是要处理好能量的瞬时平衡与时空协调，由于可再生能源发电的规模化接入显得尤为突出，而储能则是维系这种平衡与协调的重要手段。近年来多种新型储能技术逐步实用化，如先进抽水蓄能、新型压缩空气储能、锂离子电池、铅碳电池、液流电池、钠硫电池，以及飞轮储能和超级电容器等，它们具有各自独特的技术经济特点，大大丰富了电力储能技术的内涵，也为其应用增添了更多选择。

目前关于储能应用于电力系统的研究、示范和运营越来越多，多种储能技术及其系统正在其适宜的领域不断完善。但由于电力储能系统涉及多学科和专业，如何根据不同的应用需求选择适宜的储能技术、设计合理的应用系统，并实现高效调控，是提高其技术经济性的重要保证。

本书从电力系统应用需求出发，介绍了典型的电力储能技术、系统组成、控制架构，结合储能在微电网、虚拟电厂、可再生能源发电波动平抑与调频调压等方面的应用，重点从系统设计、运行控制等方面展开分析，并给出了储能大数据分析及应用方法。

本书是中国科学院电工研究所电网技术实验室多年来研究成果的总结，冯之钺、童建忠、裴玮、韦统振、黄胜利、周龙、霍群海、邓卫、刘文军、苗福丰、周国鹏、孙玉树、张天骄、李毓烜、李宁宁、张国伟、师长立、高超、胡泉、张国驹、殷正刚、汪建威、范梦寒等都对本书的研究做出了很大贡献。感谢机械工业出版社付承桂编辑对本书的大力支持！感谢领域内众多专家和企业的鼎力支持！

由于作者水平有限，书中难免存在不当之处，敬请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 篇 概 论	1
第 1 章 储能在电力系统中的作用	3
1.1 参与电力系统辅助服务	3
1.2 参与电力系统调峰	5
1.2.1 常规调峰手段	5
1.2.2 用户侧储能调峰	6
1.3 提高可再生能源发电消纳能力	8
1.3.1 改善可再生能源发电特性	8
1.3.2 通过时移消纳弃风弃光	9
1.3.3 提高电力系统的供电充裕度	10
1.4 延缓输配线路升级改造	11
1.5 分布式发电和微电网	13
1.6 主辅结合, 展现储能多重价值	14
第 2 章 主要电力储能技术	16
2.1 抽水蓄能	16
2.2 压缩空气储能	17
2.3 电化学储能	18
2.4 飞轮储能	21
2.5 超级电容器	22
2.6 超导储能	23
2.7 其他	24
第 2 篇 电力储能系统	25
第 3 章 电池储能系统	27
3.1 电池储能系统组成	27
3.2 储能 PCS 主电路拓扑	32
3.2.1 基于 Δ/Y 变压器拓扑	33

3.2.2	三单相变压器组合式拓扑	33
3.2.3	基于直流母线分裂电容拓扑	34
3.2.4	三相四桥臂拓扑	34
3.2.5	基于级联 H 桥的中高压拓扑	34
3.3	储能 PCS 控制技术	35
3.3.1	PCS 数学模型	36
3.3.2	V/f 控制	45
3.3.3	PQ 控制	46
3.3.4	下垂控制	47
第 4 章	飞轮储能系统	50
4.1	飞轮储能系统的结构	50
4.2	飞轮储能系统的主电路拓扑	51
4.2.1	主电路拓扑	51
4.2.2	永磁同步电机数学模型	52
4.2.3	电机侧控制器参数设计与稳定性	52
4.3	飞轮储能系统的运行控制	55
4.3.1	并网准备	55
4.3.2	并网运行	56
4.3.3	飞轮储能实验	56
第 5 章	复合储能系统	66
5.1	复合储能的提出	66
5.2	复合储能系统模型与分析	67
5.2.1	复合储能系统建模	67
5.2.2	功率能力的提高	69
5.2.3	内部损耗的降低	72
5.2.4	运行时间的延长	75
5.3	复合储能的控制策略	76
5.3.1	直接并联复合储能系统	76
5.3.2	通过电感器并联复合储能系统	77
5.3.3	有源式复合储能系统	78
5.4	复合储能应用案例	81
第 6 章	储能系统的大数据分析	86
6.1	大数据技术及其在储能中的运用	86
6.2	储能系统的数据分析	88
6.2.1	铅碳电池	89

6.2.2	BMS 数据	91
6.2.3	PCS 数据	94
6.2.4	储能系统数据采集及数据特点	97
6.3	基于聚类的储能系统数据分析方法	98
6.3.1	储能大数据分析思路	98
6.3.2	聚类算法介绍	99
6.4	储能大数据应用案例	104
6.4.1	数据预处理	104
6.4.2	数据清洗	105
6.4.3	初步统计	107
6.4.4	聚类的预处理——权重分配	109
6.4.5	聚类的预处理——手肘法确定聚类数	112
6.4.6	k - means 聚类结果	115
6.4.7	电池健康状态分化	120
第 3 篇 储能电力系统中的应用		125
第 7 章 储能在微电网中的应用		127
7.1	微电网中储能的作用和微电网的主要应用形态	127
7.1.1	微电网中储能的作用	128
7.1.2	微电网的主要应用形态	131
7.2	基于储能的微电网并/离网控制	132
7.2.1	并网运行控制	133
7.2.2	离网运行控制	134
7.2.3	并/离网切换控制	142
7.3	基于储能的微电网对等控制	146
7.3.1	对等控制	146
7.3.2	改进下垂控制	148
7.3.3	主从下垂控制	158
7.4	微电网应用案例	163
第 8 章 储能用于可再生能源波动平抑		166
8.1	风电功率波动特征及其影响分析	166
8.1.1	风电功率波动特征分析与建模	166
8.1.2	风电功率波动对系统频率和电压的影响	175
8.1.3	风电功率波动对系统低频振荡的影响	181
8.2	储能平滑风电有功功率波动	187

8.2.1	多类型储能平抑风电功率波动的总体架构	188
8.2.2	基于一阶低通滤波器的储能控制	189
8.2.3	基于模型预测控制的储能控制	194
第9章	风储联合参与系统调频调压	204
9.1	风储联合参与系统调频	204
9.1.1	电力系统调频	204
9.1.2	风电机组调频	207
9.1.3	储能参与风电调频	211
9.1.4	风储联合调频控制	212
9.2	风储联合参与系统调压	214
9.2.1	电力系统调压	214
9.2.2	风电机组调压	216
9.2.3	风储联合调压控制	219
9.3	风储联合参与系统调频调压	220
9.3.1	风储联合调频调压方案	220
9.3.2	风储联合调频调压控制策略	222
9.3.3	风储联合调频调压案例	224
第10章	基于储能的虚拟电厂	231
10.1	虚拟电厂概述	231
10.2	虚拟电厂资源模型	234
10.2.1	可控电源模型	234
10.2.2	不可控电源模型	235
10.2.3	可中断负荷模型	236
10.2.4	储能系统模型	236
10.2.5	其他资源	237
10.3	考虑不确定性的 VPP 优化调度	237
10.3.1	两阶段分布鲁棒优化模型	238
10.3.2	求解算法	241
10.3.3	虚拟电厂案例	242
参考文献	247

第一篇 概论

本部分围绕未来电力系统的发展，介绍了储能在电力系统主要环节中的作用与典型应用模式，并结合目前电力储能的主流技术方向，简要地介绍了其技术原理和典型应用情况。

第 1 章

储能 在电力系统中的作用

传统电力系统是集电力生产、传输、分配和消耗于一体的连续系统，储能的应用为传统电力系统增加了存储电能的环节，使电力系统由“刚性”系统变成了“柔性”系统，大大提高了电力系统的安全性、灵活性和可靠性^[1-3]。特别地，面对可再生能源规模化接入与消纳、智能电网和能源互联网发展的内在需求，储能被寄予了“基石”般的角色定位。

储能，本书主要指电力储能，在技术上一般分为机械储能、电磁储能和电化学储能。机械储能将电能转换为机械能进行存储，在需要时再重新转换为电能，主要包括抽水蓄能、压缩空气储能和飞轮储能。电磁储能将电能转换为电磁能进行存储，主要包括超导储能和超级电容器储能。电化学储能将电能转换为化学能进行存储，目前应用较多的有铅酸电池、锂离子电池、液流电池和钠硫电池等。

不同的储能技术在容量等级、充放电能力、循环寿命、效率和成本等指标上相差很大，因此其适用的应用场景也有很大区别。当前应用较多的为抽水蓄能、铅酸电池和锂离子电池，其他储能的研发应用也在快速推进。

理论上，储能在电力系统“发、输、配、用”的各个环节均可发挥重要作用，可以提高电力系统运行稳定性、供电可靠性和电能质量，可以提高电力资产利用率和运行经济性，可以增强对可再生能源的接纳能力。当然，储能到底在电力系统的哪个环节中能规模化应用，还取决于其自身的技术经济性，电力市场的支撑，以及与其他技术手段的博弈。

1.1 参与电力系统辅助服务

电力系统辅助服务，是为了平衡很短时期内较小的电能供需差和应对系统中的突发事件，包括调频备用和运行备用。辅助服务一般由集中辅助服务市场完成，根据市场出清容量和价格，对承诺提供服务备用的资源，包括发电机组、可调节负荷、储能装置等进行补偿^[4]。

由于辅助服务功能配置的目的是解决短时间内的电能供需平衡问题，因而总

的辅助服务容量相对于系统的总负荷量比较小，一般不超过总负荷量的 15%，当然这要取决于实际电力系统的电源和网架结构。

调频分上调和下调，是用于不断地、自动地平衡非常短时间（通常在 1s 到几秒）内的较小的电能供需偏差，即不平衡能量。通常由市场控制区域内部装有 AGC（自动发电控制）装置的发电机组提供，也可以由能够响应 AGC 信号的需求侧资源，比如需求响应资源和储能提供。运行备用是为了应对负荷增加或系统突发事件，可分为旋转或同步备用，由正在在线发电并有能力增加出力的发电机组提供；非旋转备用或非同步备用，由没有在线发电但能在给定时间（通常在 10 ~ 30min）内启动并提供电力的发电机组提供。

调频主要包含一次调频和二次调频。一次调频是由系统中的负荷和有旋转备用容量的发电机组共同自发完成的有差调节；二次调频主要是通过实时调节电网中调频电源的有功功率，对频率和联络线功率进行控制，解决区域电网的功率不平衡问题，以实现无差调节。

一般电网调频需求主要由燃煤机组、水电机组及燃气机组等提供。火电、水电通过不断地调整机组出力来响应电网频率变化，实现对电力系统频率的调节。但是，无论是火电调频机组还是水电调频机组，均由旋转的机械部件组成，受机械惯性和磨损等作用，会影响电网频率的安全与品质^[5]。例如，火电机组响应时滞长，不适合参与更短周期的调频，受蓄热制约而存在调频量不足的问题；而水电机组的调频容量则易受地域与季节性的制约。同时，传统电源在控制中要考虑机组对响应功率的幅值与方向改变频次的限制，甚至对同一方向的功率信号持续时间规定一个限值，在此时间段内封锁反向功率信号。以上限制均会导致调节的延迟、偏差及反向等问题，而对调频信号不能准确响应。

储能系统通过充放电控制，可以在一定程度上削减电力系统的有功功率不平衡或区域控制偏差，从而参与一次调频和二次调频。相比传统电源在电力系统调频中的不足，储能系统具有一定的技术优势^[6-8]：

1) 响应速度快。可在百毫秒范围内满功率输出，响应能力完全满足调频时间尺度内的功率变换需求。

2) 控制精度高。储能可以快速精确地跟踪调度指令，相应地减少调频响应功率储备裕度。

3) 运行效率高。储能系统，尤其是各类电池储能系统，充放电效率高，使得调频过程中的损耗低。

4) 可双向调节。储能系统可以不受频次限制实现上调和下调的交替，调节能力强。

因此，采用储能系统进行调频，调频曲线能够很好地跟踪指令曲线，避免调节反向、偏差和延迟等问题。此外，相比火电机组，储能应用于调频的主要价值

体现在其调控的灵活性和运行的高效上。以飞轮储能为例,相关研究指出其调频能力为水电机组的1.7倍,燃气机组的2.7倍,火电机组和联合循环机组的近20倍^[9]。

在运行成本上,由于AGC上下调节的过程可以近似为能量平衡的过程,因此储能系统运行成本较低,主要为储能系统自身的能量消耗与维护费用。尽管储能对电力系统总调频成本的影响还较难估测,但因其快速精确的跟踪特性,可显著减少电力系统所需的旋转备用容量,而节省的旋转备用容量可用于电网调峰、事故备用等,能够产生一定的间接效益。由此可见,与传统电源相比,储能系统参与调频的技术经济性优势较明显。因此,在合适的场景下,配置一定的储能系统参与调频,能有效提升以火电机组为主的电网整体调频能力,提高频率及ACE(区域控制误差)控制的合格率,进而保证电网安全稳定。

行业内针对大规模储能参与电网调频等辅助服务展开了很多示范验证。自2008年开始,已建成多个示范项目,涉及锂离子电池等多种储能类型,单个电站容量从1MW到几十MW逐步放大^[10-12],对系统设计、设备性能、操作运维、标准制定等方面进行了很好的探索。近年来,一些商业化运营项目逐步开始建设、运营,并随着各地辅助服务市场改革的推进,储能在区域电网辅助服务中发挥着越来越明显的作用。

1.2 参与电力系统调峰

满足负荷的供电可靠性和电能质量需求是电力系统长期努力的方向,由于负荷的不可控性和随机性,电力系统应具有随时满足负荷需求的能力。但是,用户对电力的需求在白天和黑夜、不同季节之间存在较大的峰谷差,而可再生能源发电接入比例的不断增大,将进一步加剧这种现象,这使得电力系统必须为满足峰值负荷而预留很大的备用容量,导致电力设备运行效率低。有效调节电力系统的峰谷差,提高负荷率,是提高电力系统资产利用率的重要手段。

调峰电源是在用电高峰时期向电网输送电能,在用电低谷时期从电网获取电能,实现“削峰填谷”和调节电网负荷的电力设备。调峰电源在现代电力系统中的作用越来越重要和不可或缺,是实现电网安全、可靠、经济、高效的必要手段。

1.2.1 常规调峰手段

因为系统的峰谷负荷是可以精确预测的,调峰问题可以由日前能量市场或运行调度部门做出的日计划解决。目前电力系统中削峰填谷主要采用火电机组、水

电机组、负荷管理和抽水蓄能电站等几种方式实现。

1. 利用火电机组进行削峰填谷

当前我国的电源结构以火电为主，通过调节火电机组以适应负荷的峰谷变化是当前电网中最主要的峰谷调节方式。但是，火电机组进行峰谷调节存在以下问题：

首先，利用火电机组进行削峰填谷的经济性差。火电机组频繁起停和深度调峰使点火用油和助燃用油大幅增加，同时，峰谷调节时火电机组运行会偏离经济运行点，使火电机组总体经济性下降。

其次，利用火电机组进行削峰填谷会提高火电机组的故障概率，反复起停调峰的火电机组容易出现各种设备问题，使维护工作量和维护费用增加。

第三，火电机组的调节速度较慢，难以适应电力系统负荷变化的要求。

此外，从电网规划来讲，单纯依靠火电机组进行削峰填谷的电网为了满足调峰要求往往要增加装机容量，这样势必造成系统闲置容量过大，资产利用率低。

2. 利用水电机组进行削峰填谷

相对于火电机组而言，水电机组起停速度快，经济性好，污染少，适宜用作调峰电源。但是水电有一个明显的缺点就是丰、枯水期发电能力差别大，水电站弃水调峰现象时有发生，因此造成很大浪费。

3. 利用负荷管理进行削峰填谷

通过负荷管理可以实现对电力系统峰谷差的调节，采用分时电价的方法可以使用户主动改变消费行为和用电习惯，同时减小电量消耗和电力需求。

4. 利用抽水蓄能电站进行削峰填谷

抽水蓄能电站采用在用电低谷时抽水蓄能、在用电高峰时放水发电的方式进行峰谷调节。抽水蓄能电站机组的调节容量较大，且具有快速起停的特点，是电力系统峰谷调节的优质调节手段。但是，建造抽水蓄能电站需要特定的地理条件，而且建设工期长，工程投资较大，给抽水蓄能电站的发展带来一定的制约。

1.2.2 用户侧储能调峰

利用布置于负荷侧的储能系统，在分时电价或实时电价的引导下，主动通过对用户用电进行削峰或移峰，可以为用户节约用电费用，并在客观上起到对电力系统进行峰谷调节的效果。储能参与峰谷调节的优势如下：

1) 响应快。储能装置具有双向功率调节功能，其充放电转换速度可以达到百毫秒级以下，远快于传统电源。

2) 效率高。各类电池储能系统的充放电循环效率一般较高，用于峰谷调节的电量损失小。

3) 损耗小。储能可以分散式布置于用户侧，直接与邻近负荷进行时空匹

配,可以避免远距离输送的网络损耗。

以某地区某三班制加工型企业为例,对安装储能系统的作用进行分析,图1-1为该企业的分时电价,图1-2为其典型工作日负荷曲线。

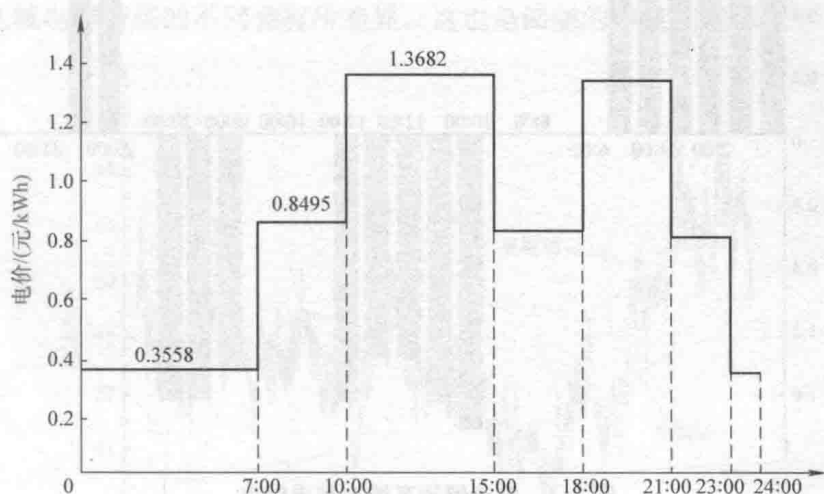


图 1-1 某企业用户的分时电价

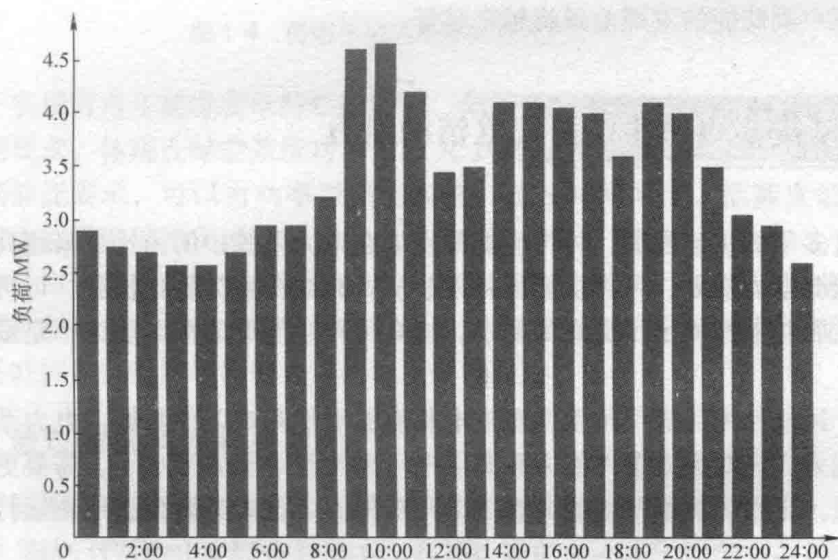


图 1-2 某企业的典型工作日负荷曲线

针对企业用电负荷的峰谷特点,采用电池储能系统进行削峰填谷,其运行时序如图1-3所示。

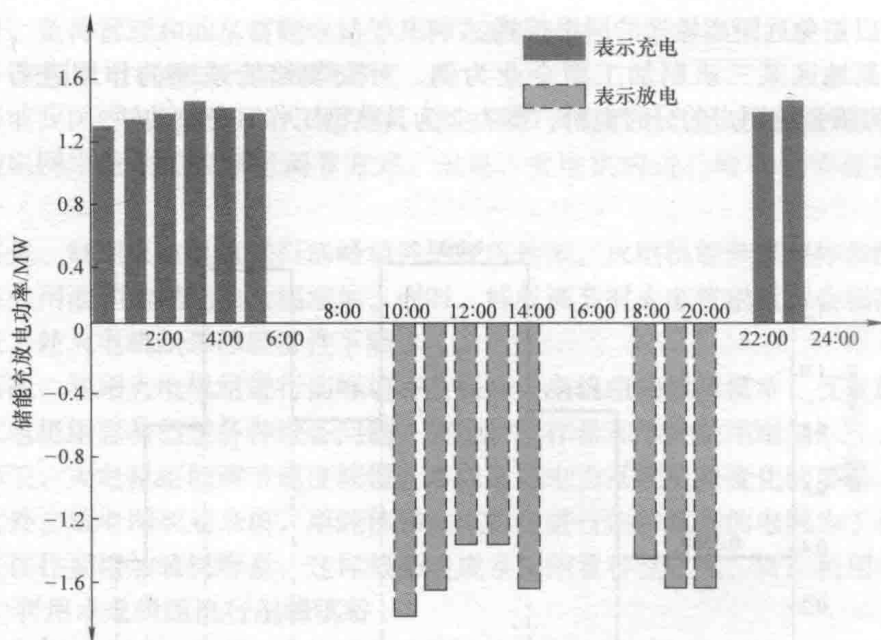


图 1-3 电池储能系统充放电时序

采用图 1-3 所示的充放电策略，可以较好地实现企业用电的削峰填谷，从而降低用电费用。随着电池储能系统的技术成熟和成本下降，以及电力市场改革的推进，用户侧储能的发展前景将越来越好。

1.3 提高可再生能源发电消纳能力

经过多年的快速发展，可再生能源发电在电力系统中的占比越来越高。结合各国的能源电力规划，可再生能源将逐步从补充能源变为替代能源。可再生能源规模化发展对电网提出了更高的要求，提高可再生能源的消纳能力，是亟须解决的问题。

由于风电和光伏等可再生能源发电具有波动性和难以预测性，电力系统要维持调节能力、应对突发事件能力和高供电可靠性及电能质量水平，需要更准确的天气预报，更强的机组爬坡能力和负荷跟踪能力，更大的调频备用和运行备用服务容量。可再生能源发电的消纳能力提升，主要就是围绕电源特性改善、输电通道阻塞管理以及系统安全稳定控制等方面展开。

1.3.1 改善可再生能源发电特性

利用储能控制灵活和响应快速的特点，可以改善可再生能源发电的电源特