



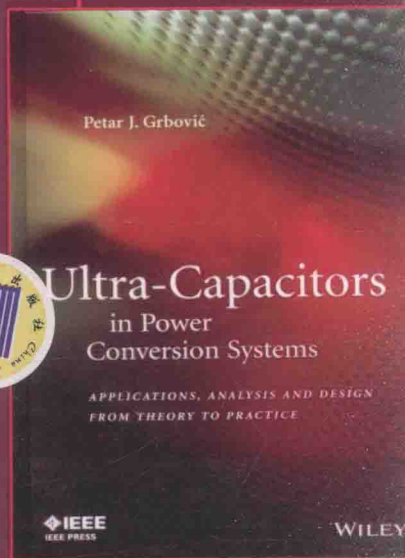
国际电气工程先进技术译丛

IEEE WILEY

# 超级电容器在功率变换系统中的应用、分析与设计 ——从理论到实际

Ultra-Capacitors in Power Conversion Systems:  
Applications, Analysis and Design from Theory to Practice

[德] 佩塔尔 J. 格尔波维奇 (Petar J. Grbović) 著  
田立亭 李相俊 连晓峰 秦晓辉 等译



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

国际电气工程先进技术译丛

# 超级电容器在功率变换 系统中的应用、分析与 设计——从理论到实际

[德] 佩塔尔 J. 格尔波维奇 (Petar J. Grbović) 著  
田立亭 李相俊 连晓峰 秦晓辉 等译



机械工业出版社

Copyright © 2014 John Wiley & Sons Ltd.

All Right Reserved. This translation published under license. Authorized translation from English language edition, entitled Ultra - Capacitors in Power Conversion Systems: Applications, Analysis and Design from Theory to Practice, ISBN: 978 - 1 - 118 - 35626 - 5, by Petar J. Grbović, 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 - 2014 - 2542 号。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

超级电容器在功率变换系统中的应用、分析与设计: 从理论到实际/ (德) 佩塔尔 J. 格尔波维奇著; 田立亭等译. —北京: 机械工业出版社, 2017. 5

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Ultra - Capacitors in Power Conversion Systems: Applications, Analysis and Design from Theory to Practice

ISBN 978-7-111-56266-5

I. ①超… II. ①佩… ②田… III. ①电容器 - 应用 - 功率变换器 - 研究 IV. ①TM761

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 047018 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: 顾 谦 责任编辑: 顾 谦

责任校对: 张 薇 封面设计: 马精明

责任印制: 李 昂

三河市宏达印刷有限公司印刷

2017 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 18.5 印张 · 349 千字

0 001—3000 册

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 56266 - 5

定价: 79.00 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](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线: 010 - 68326294

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

010 - 88379203

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

本书主要介绍超级电容器及其在功率变换系统中的应用,着重分析了超级电容器模块以及接口 DC-DC 功率变换器的分析、建模和设计。主要包括储能技术及直接/间接储能系统装置的背景、超级电容器的相关理论及模型、不同充/放电方法下的超级电容器电压和电流特性以及电流应力和功率损耗的分析与计算。同时还包括功率变换系统及其应用基础,集成超级电容器储能的典型功率变换系统结构和特殊应用需求中储能装置的选型过程。在超级电容器模块设计的主要参数基础上,介绍了超级电容器模块的选型与设计过程,超级电容器的损耗、效率与尺寸、成本的关系,超级电容器单体的串联和电压均衡问题,以及超级电容器模块的散热设计。另外,详细分析了接口 DC-DC 变流器的分类以及多相交错式双向 DC-DC 变流器。

本书主要面向从事超级电容器应用的电力电子工程师和研究人员,也可作为超级电容器和功率变换应用研究领域的相关专业研究生以及教师的参考用书。

# 译者序

本书主要介绍了超级电容器及超级电容器在功率变换系统中的应用，着重分析了超级电容器模块以及接口 DC-DC 功率变换器的分析、建模和设计。首先介绍储能技术及装置的背景，包括直接和间接储能系统。第 2 章详细介绍了超级电容器的相关理论，建立了面向应用的超级电容器模型，然后对超级电容器的能量和功率进行定义和讨论，分析了不同的充/放电方法，如电压-电阻模式、电流模式和功率控制模式。在不同的充/放电方法下，导出了超级电容器的电压和电流特性。讨论了不同运行条件下超级电容器电流应力和功率损耗的分析与计算。第 3 章介绍了功率变换系统及其应用基础。讨论了功率变换系统中短期储能设备的应用需求，介绍了集成超级电容器储能的典型功率变换系统结构，简要给出了特殊应用需求中储能装置的选型过程，并比较了两种主要储能设备：电化学电池和超级电容器。然后讨论了不同的功率变换应用。第 4 章介绍了超级电容器模块的选择与设计过程。超级电容器模块的设计基于 3 个主要参数：模块电压、电容和内阻。另外还讨论了超级电容器的损耗、效率与尺寸、成本的关系，介绍了超级电容器模块设计的几个方面，讨论了超级电容器单体的串联和电压均衡问题，以及超级电容器模块的散热设计。第 5 章对接口 DC-DC 变流器进行了详细分析，着重分析了接口 DC-DC 变流器的分类以及多相交错式双向 DC-DC 变流器。

作者 Petar J. Grbović 博士长期从事超级电容的研究，曾在施耐德电气公司的施耐德东芝逆变器 (STI) 研发中心工作。具有丰富的研究经验，发表了多篇相关学术论文。

本书第 1、3、5 章由田立亭翻译，第 2 章由连晓峰翻译，第 4 章由李相俊翻译。全书由连晓峰和秦晓辉审校、整理。同时，潘峰、赵旭、毋冬、郭柯、姚舜才、李东红、潘媛、侯宝奇、贾琦、叶璐、王炎、刘鹏华、申震云、郭朝辉、张栋、何宇婷、任杰等人也参与了本书部分内容的翻译。另外，感谢付旺保、王庆刚工程师对本书部分翻译内容提供悉心指导。

限于译者的经验和水平，书中难免存在缺点和错误，敬请广大读者批评指正。

译者

# 原书前言

## 本书是关于什么的？

这是一本关于超级电容器及超级电容器在功率变换系统中应用的专著。本书着重于超级电容器模块以及接口 DC-DC 功率变换器的分析、建模和设计。

功率变换系统和电力电子器件在日常生活中扮演着重要的角色。很难想象没有电力电子器件和静态功率变换设备的应用，比如工业受控电力驱动、可再生能源、发电和输电装置、家用电器、移动式柴油发电机组、土方机械及设备、交通运输等。在大多数应用中，需要一种可以在短时间段内存储和释放一定能量的设备，这种需求正在增长。受控电力驱动中需要储能回收制动能量或在供电中断时提供能量。风力发电机需要利用储能平滑风速波动引起的功率波动。输电设备如静止同步补偿器 (STATCOM)，需要在电力系统故障或不稳定运行中，利用储能提供有功功率支撑。移动式柴油发电机组需要利用储能减少燃料消耗和二氧化碳排放。交通运输对储能有强烈需求，用于提高系统的效率和可靠性。

储能装置应具备高功率等级的快速存储和释放能量的能力。充放电时间可持续几秒至数十秒，而功率密度应在  $5 \sim 10\text{kW/kg}$ 。当前有两种储能技术符合这样的要求：①飞轮储能；②电化学双层电容器 (EDLC)，多称为“超级电容器”。本书只考虑超级电容器。

## 本书中有什么？

本书共包括 5 章。首先介绍储能技术及装置的背景，接着详细讲解了超级电容器的相关理论，并介绍了功率变换系统及其应用基础。超级电容器模块的选型与设计过程是本书的一项重要内容。最后，本书对接口 DC-DC 变换器进行了详细分析。

第 1 章给出了储能技术及装置的基础。所有储能系统都可归为两类：直接和间接储能系统。直接储能设备直接存储电能，并不进行能量类型的转换。电抗器和电容器是直接储能设备。超导磁储能 (SMES) 设备和超级电容器是具有高能量密度的直接储能设备。间接储能系统和设备将电能转换为其他更容易处理和存储的能量类型。典型系统为机电储能系统，如飞轮、抽水蓄能和压缩空气储能系统。电化学储能系统也是广为人知的间接储能系统，如电化学电池和氢燃料电池。

第 2 章介绍了超级电容器的背景理论。首先特别建立了面向应用的超级电容器模型，然后对超级电容器的能量和功率进行定义和讨论，分析了不同充/放电

方法,如电压-电阻模式、电流模式和功率控制模式。在不同的充放电方法下,导出了超级电容器的电压和电流特性。讨论了不同运行条件下超级电容器电流应力和功率损耗的分析与计算。解释了超级电容器的损耗与充/放电频率的关联,以及当充放电电流频率在兆赫<sup>⊖</sup>范围(非常低的频率)和赫范围(低频)时如何确定损耗。最后,给出了一些应用实例,如具有制动和穿越能力的变速驱动器。

第3章的第1部分介绍了功率变换的基本原理,讨论了功率变换系统中短期储能设备的应用需求,介绍了集成超级电容器储能的典型功率变换系统结构,简要给出了特殊应用需求中储能装置的选型过程,并比较了两种主要储能设备:电化学电池和超级电容器。第3章的第2部分讨论了不同功率变换应用,如受控电力驱动器、可再生能源(例如风能、光伏和海洋流)、自备柴油和液化天然气(NLG)机组、具有短时有功支撑能力的STATCOM、UPS以及牵引。

第4章深入讨论了超级电容器模块的选型。超级电容器模块的设计基于3个主要参数:模块电压、电容和内阻。模块电压实际上为一组不同的工作电压和模块额定电压。工作电压、额定电压、模块电容和内阻根据应用需求确定,如储能能力、运行寿命、效率等。第4章的第2部分讨论了超级电容器的损耗、效率与尺寸、成本的关系,介绍了超级电容器模块设计的几个方面,讨论了超级电容器单体的串联和电压均衡问题,以及超级电容器模块的散热设计。最后,通过几个实际的功率变换应用案例对上述理论分析进行支撑。

第5章讨论了接口DC-DC变流器。首先介绍了双向DC-DC变流器的背景,将变流器分为不同的类别,如全功率与部分功率变流器、隔离与非隔离式变流器、两电平与多电平变流器、单相与多相交错式变流器。根据应用需求,对比了当前的各类拓扑。在第5章的第2部分中,详细分析了多相交错式双向DC-DC变流器,并给出了设计导则。最后,通过几个实际算例对理论分析进行支持,如高功率UPS和受控电力驱动。

### 谁应该读这本书(为什么)

本书主要面向需要提升先进超级电容器储能的知识 and 理解,并关注现在和未来超级电容器在功率变换中应用的电力电子工程师和专业人士。本书也可作为希望了解更多关于超级电容器和功率变换应用的硕士生和博士生的背景资料。读者最好掌握数学、电路原理和系统、电磁学、电力电子学方面的基本知识。

### 致谢

几年前作者开始了超级电容器的研究,当时在施耐德电气公司位于法国厄尔河畔帕西的施耐德东芝逆变器(STI)研发中心工作。在此特别要感谢 Philippe

⊖ 原文为“mega-herz”有误,应为毫赫(mHz)。——译者注

Baudesson 博士和 Fabrice Jadot 博士的支持。在开始思考超级电容器在受控电力驱动中的应用时，获得了他们的支持。

向 Philippe Delarue 教授和法国里尔电气工程及电力电子实验室 (L2EP) 的 Philippe Le Moigne 教授表达深深的谢意，感谢所有富有创意和成效的讨论，以及所有的意见和建议。

向发行人 Peter Mitchell、项目编辑 Richard Davies、助理编辑 Laura Bell、高级出版编辑 Genna Manaog、项目经理 Radhika Sivalingam 和文字编辑 Caroline McPherson 表示衷心的感谢，和他们一起工作感到真正的快乐。

最后且重要的是，要向家人表示最深切的感谢，感谢妻子 Jelena、儿子 Pavle 和母亲 Stojka，感谢他们的爱和支持，感谢他们对作者的信心。

**Petar J. Grbović**博士  
德国，伊斯马宁



# 目 录

译者序

原书前言

第 1 章 储能技术及装置	1
1.1 简介	1
1.1.1 能量	1
1.1.2 电能及其在日常生活中的作用	1
1.1.3 储能	2
1.2 直接式电能存储装置	3
1.2.1 电力电容器作为储能装置	3
1.2.2 电抗器储能	7
1.3 间接储能技术及装置	9
1.3.1 机械储能	10
1.3.2 化学储能	13
1.4 电力储能技术比较	16
参考文献	18
第 2 章 超级电容器储能装置	19
2.1 超级电容器背景知识	19
2.1.1 超级电容器技术概述	19
2.2 EDLC	20
2.2.1 EDLC 发展简史	20
2.2.2 超级电容器的结构	21
2.2.3 超级电容器的物理模型	21
2.3 超级电容器的宏观(电路)模型	23
2.3.1 完整理论模型	23
2.3.2 简化模型	32
2.3.3 仿真/控制模型	34
2.3.4 习题	35
2.4 超级电容器的能量和功率	36

2.4.1	超级电容器的能量和能量密度	36
2.4.2	超级电容器的储能效率	37
2.4.3	超级电容器的功率密度	38
2.4.4	电极碳负荷限制	38
2.4.5	习题	39
2.5	超级电容器的充/放电方法	40
2.5.1	恒电阻负载	41
2.5.2	恒流充电和负载	41
2.5.3	恒功率充电和负载	44
2.5.4	习题	49
2.6	频率相关损耗	50
2.6.1	周期性电流	51
2.6.2	非周期性电流	55
2.7	超级电容器的热特性	56
2.7.1	发热	56
2.7.2	热模型	57
2.7.3	温升	58
2.7.4	习题	59
2.8	超级电容器大功率模块	62
2.9	超级电容器的发展趋势与未来	64
2.9.1	未来超级电容器的要求	64
2.9.2	技术发展方向	64
2.10	小结	65
	参考文献	66
<b>第3章</b>	<b>功率变换与储能应用</b>	<b>68</b>
3.1	静态功率变流器基本原理	68
3.1.1	开关变流器	68
3.1.2	功率变流器的分类	69
3.1.3	电压源型变流器示例	70
3.1.4	间接静态 AC-AC 变流器	71
3.2	具有储能功能的变流器	73
3.2.1	问题提出	73
3.2.2	解决方案	75
3.2.3	储能类型的合理选择	75

3.2.4 电化学电池与超级电容器对比	76
3.3 受控电力驱动应用	80
3.3.1 受控电力驱动控制的发展	81
3.3.2 受控电力驱动的应用	82
3.3.3 应用问题的提出	84
3.3.4 解决方案	85
3.4 可再生能源发电应用	91
3.4.1 可再生能源	91
3.4.2 问题提出	95
3.4.3 虚拟惯量和可再生能源“发电机”	97
3.4.4 解决方案	98
3.5 自备发电机及其应用	100
3.5.1 应用	100
3.5.2 问题提出	103
3.5.3 解决方案	105
3.6 输配电应用	107
3.6.1 STATCOM 应用	107
3.6.2 问题提出	108
3.6.3 解决方案	111
3.7 UPS 应用	113
3.7.1 UPS 系统应用	113
3.7.2 具有超级电容器储能的 UPS	114
3.8 电力牵引应用	118
3.8.1 轨道车辆	118
3.8.2 道路车辆	121
3.8.3 一般牵引系统	125
3.9 小结	128
参考文献	130
<b>第4章 超级电容器模块选择及设计</b>	<b>132</b>
4.1 简介	132
4.1.1 分析和设计目标	133
4.1.2 主要设计步骤	133
4.1.3 超级电容器模型	133
4.2 模块额定电压和电压等级的选择	134

4.2.1	内电压和终端电压之间的关系 .....	135
4.2.2	最大工作电压 .....	136
4.2.3	最小工作电压 .....	137
4.2.4	超级电容器中间电压 .....	138
4.2.5	超级电容器额定电压 .....	142
4.2.6	习题 .....	143
4.3	选择电容 .....	145
4.3.1	电能存储/释放能力 .....	145
4.3.2	变换效率 .....	146
4.3.3	寿命对电容选择的影响 .....	151
4.3.4	习题 .....	152
4.4	超级电容器模块设计 .....	153
4.4.1	单体串/并联设计 .....	153
4.4.2	电流应力和损耗 .....	156
4.4.3	串联电压均衡 .....	158
4.4.4	习题 .....	165
4.5	模块的热管理 .....	168
4.5.1	模型定义 .....	169
4.5.2	模型参数的确定 .....	171
4.5.3	模型参数——实验确定 .....	171
4.5.4	设计冷却系统 .....	173
4.5.5	习题 .....	175
4.6	超级电容器模块测试 .....	185
4.6.1	电容和内阻 .....	185
4.6.2	漏电流和自放电 .....	189
4.7	小结 .....	190
	参考文献 .....	191
<b>第5章 接口 DC-DC 变流器 .....</b>		<b>193</b>
5.1	简介 .....	193
5.2	接口 DC-DC 变流器及其分类 .....	194
5.2.1	电压源和电流源 DC-DC 变流器 .....	195
5.2.2	全功率和部分功率接口 DC-DC 变流器 .....	197
5.2.3	隔离和非隔离式 DC-DC 变流器 .....	197
5.2.4	两电平和多电平接口 DC-DC 变流器 .....	198

5.2.5	单相和多相交错式接口 DC - DC 变流器 .....	198
5.3	常用接口 DC - DC 变流器 .....	200
5.3.1	两电平 DC - DC 变流器 .....	200
5.3.2	三电平 DC - DC 变流器 .....	201
5.3.3	Boost - Buck 和 Buck - Boost DC - DC 变流器 .....	201
5.3.4	隔离式 DC - DC 变流器 .....	203
5.3.5	应用总结 .....	205
5.4	超级电容器的电压和电流定义 .....	206
5.5	多相交错式 DC - DC 变流器 .....	207
5.5.1	交错式 DC - DC 变流器的背景知识 .....	207
5.5.2	两相交错式 DC - DC 变流器分析 .....	209
5.5.3	$N$ 相交错式变流器一般情况分析 .....	214
5.6	两电平 $N$ 相交错式 DC - DC 变流器设计 .....	229
5.6.1	ICT 设计: 两相交错式示例 .....	229
5.6.2	滤波电抗器设计 .....	234
5.6.3	直流母线电容器选择 .....	240
5.6.4	输出滤波电容器选择 .....	246
5.6.5	功率半导体器件选择 .....	249
5.6.6	习题 .....	256
5.7	变流器功率损耗: 一般性分析 .....	264
5.7.1	损耗的来源 .....	264
5.7.2	导通损耗 .....	266
5.7.3	开通损耗和关断损耗 .....	266
5.7.4	阻断损耗 .....	267
5.7.5	滑动平均值和有效值定义 .....	267
5.8	变流器热管理: 一般性分析 .....	268
5.8.1	变流器热管理的重要性 .....	268
5.8.2	功率半导体器件的热模型 .....	268
5.8.3	电磁装置的热模型 .....	273
5.8.4	电解电容器的热模型 .....	276
5.9	小结 .....	279
	参考文献 .....	280

# 第 1 章 储能技术及装置

## 1.1 简介

### 1.1.1 能量

根据定义，能量是物质的一种属性，可以用于做功。能量既不能被创造也不能被毁灭，只能从一种形式转化为另一种形式。能量可以以多种形式存在，如电磁场、重力、化学能、核能等<sup>[1,2]</sup>。电能是人们日常生活中广泛使用的一种能量形式，本章将讨论电能的存储技术与装置。

### 1.1.2 电能及其在日常生活中的作用

电能可定义为通过电气设备做功的能力。自从 19 世纪特斯拉和爱迪生时代，电能已经用于日常生活的方方面面。今天，电能已成为主导能源形式。约 60% 的一次能源被转换成电能，并应用于各种领域，如工业、交通运输、照明、家用电器、电信、计算、娱乐等。

图 1.1 所示为电能生产 - 传输 - 消费过程的简化框图。电能通常由机电式发电机“生产”。发电机由汽轮机、NLG<sup>⊙</sup>（液化天然气）涡轮机、水轮机、风机或内燃机驱动。此外，电能还可以由静态发电机“生产”，如光伏电池板和氢

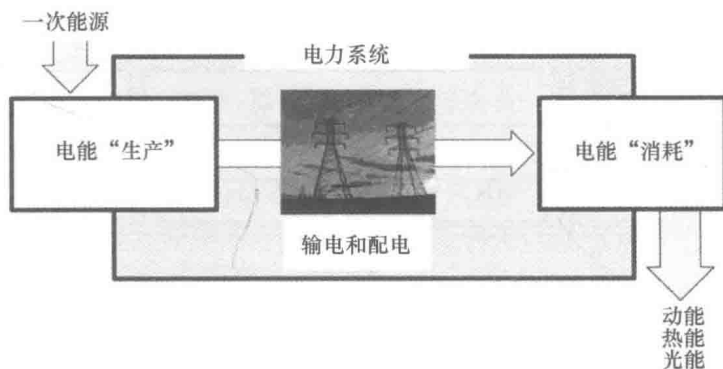


图 1.1 电能生产 - 传输 - 消费过程

⊙ 原书为“NLG”，按当前的使用习惯，多为“LNG”。——译者注

燃料电池。

从“生产地”到“消费地”的电能的传输也很便利。“生产地”可以为远离“消费地”（如大城市）的集中式电站。电能通过高压输电和中/低电压配电网进行传输和分配。最后，电能被终端用户“消耗”。实际上，电能只是被转换成另一种形式的能量，如热、光、化学能、线性或旋转运动等。

在小规模系统中，如柴油电力机车、混合动力车、土方设备（挖掘机）和RTG（轮胎式龙门）起重机，电能是由车载柴油发电机产生，并传输到车载负载（电动机）。

从其他能源形式（如机械或者化学形式）产生电能非常方便，但电能难以存储。因此，电能必须在“生产”的同时被“消耗”掉。生产总量和消耗总量之间不平衡将会产生电能质量、电网不稳定以及电力系统崩溃等问题。这使得电能很难应用在动态、波动的“生产”和/或“消费”系统中。由此，需要储能装置来存储和释放电能，使得“生产”和“消耗”之间达到动态平衡。本章将简要介绍主要的储能技术和装置。

### 1.1.3 储能

储能装置是一种具有以不同形式储能能力的多物理设备。电力系统中的能量，即“电能”，取决于存储介质可以被直接或间接存储。图 1.2 给出了直接和间接能量存储过程和装置。

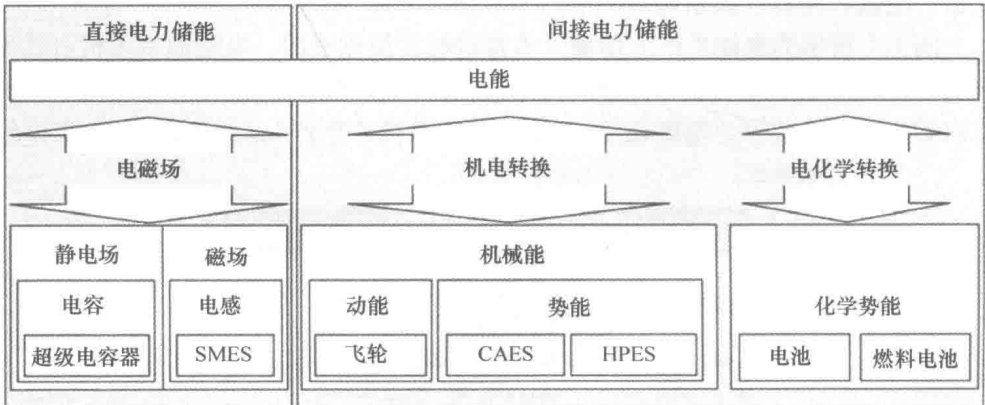


图 1.2 储能技术与装置

无需将电能转换为另一种形式的储能装置称为直接式电能存储装置，其储能介质是电磁场，储能装置可以是电容也可以是电感。将电能转换到其他形式并存储的装置称为间接式储能装置。某些形式的能量可以由电能转换并转换为电能。

其中,最适合的能量形式为机械能和化学能。机械能以两种形式存在:位置能,通常称为势能,以及运动能,通常称为动能。相应的储能装置为飞轮、压缩空气储能(CAES)和抽水蓄能(HPES)。使用化学能作为储能形式的装置有电化学电池和燃料电池。

## 1.2 直接式电能存储装置

直接式电能存储装置可直接存储电能,而无需将电能变换为其他能量形式。根据定义,能量以电磁场形式存储在某一确定体积 $V$ 内,电磁场主要为静电(电)场 $E$ 和磁场 $H$ 。主要采用电场作为储能介质的装置称为电力电容器,而主要采用磁场作为储能介质的装置称为磁性设备(如电抗器)。对于大多数功率变换应用,传统电容器和电抗器的储能能力不足。为克服上述缺点,现已开发出超级电容器储能(UCES)<sup>[3-6]</sup>与超导磁储能(SMES)<sup>[1,2,6]</sup>。

### 1.2.1 电力电容器作为储能装置

在此考虑由两个金属体,及其之间体积为 $V$ 的电介质构成的静电系统。对上述静电系统中的金属体充电,电能以电场形式直接存储。该系统中所存储能量为

$$W_E = \frac{1}{2} \iiint_V \epsilon(E) E^2 dv \quad (1.1)$$

式中, $V$ 为介电质的体积; $E$ 为电场; $\epsilon(E)$ 为介电材料的介电常数。

现在,考虑一个如图1.3所示的平板电容器。该电容器由两个极板以及两个极板之间的介电质组成。极板之间的距离为 $d$ ,极板面积为 $A$ 。极板分别带有电荷 $+Q$ 和 $-Q$ 。

不失一般性,假设该电容器为一个电压与电荷和电容相关的非线性电容器。非线性电容器的电荷和电容关系如图1.4所示。一旦电压达到一定值,非线性电容器的电荷达到饱和,电容下降。然而也有一些电容会随施加电压而增大的情况。接下来,将以电化学超级电容器为例进行讨论。

非线性电容器充电到电压 $U_0$ 的能量为

$$W_E = \int_0^{Q_0} u(q) dq = \int_0^{U_0} \left( C(u) + \frac{\partial C(u)}{\partial u} u \right) u du \quad (1.2)$$

式中, $C(u)$ 为与电压相关的电容。

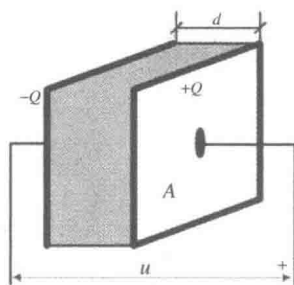


图1.3 平板电容器



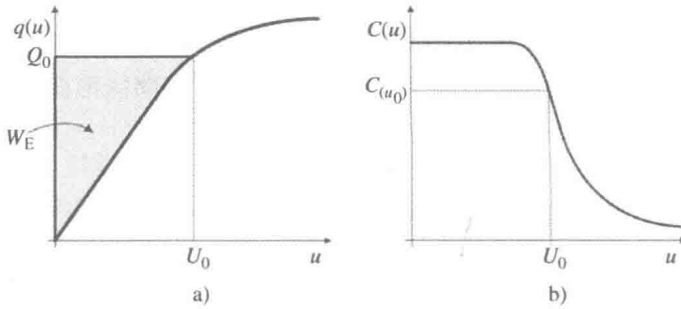


图 1.4 a) 电容器充电特性和 b) 电容与电压的关系

如果电介质是线性的，则可由式 (1.2) 计算能量：

$$W_E = \frac{1}{2} Q_0 U_0 = \frac{1}{2} C_0 U_0^2 \quad (1.3)$$

式中， $C_0$ 是电容器的电容； $Q_0$ 是电容器的电荷。

由式 (1.3) 和式 (1.2) 可以看出，电力电容器的储能能力很大程度上取决于电容器的电压和电容。很明显，为增加电容器的储能能力，电压等级和电容必须尽可能高。电容器的电压等级和电容取决于电容器的技术类型。最常见的电力电容器技术为电解电容器和聚丙烯薄膜电容器。

### 1.2.1.1 UCES

UCES 以两个导电板之间电场<sup>[3,4]</sup>的形式储存电能。储能系统由超级电容器和一个接口功率变流器组成，如图 1.5 所示。传统上使用接口功率变流器使 UCES 具有更好的可控性和灵活性。根据所应用电气系统的性质，接口功率变流器可以为一个 AC - DC 或一个 DC - DC 双向变流器。在某些应用中，接口功率变流器为级联的 AC - DC 和 DC - DC 变流器。

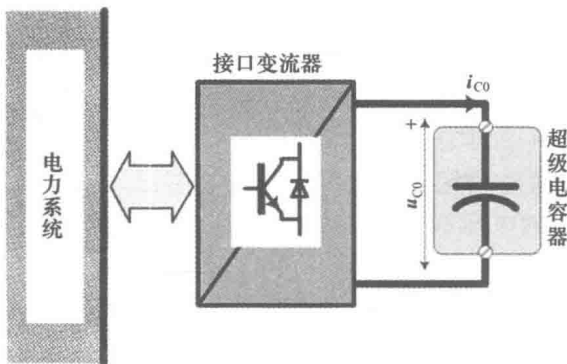


图 1.5 接入电力系统的 UCES 系统