

谭兴国 著



微电网储能应用技术研究

WEIDIANWANG CHUNENG YINGYONG JISHU YANJIU



煤炭工业出版社

微电网储能应用技术研究

谭兴国 著

煤炭工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

微电网储能应用技术研究 / 谭兴国著. -- 北京:
煤炭工业出版社, 2015

ISBN 978 - 7 - 5020 - 4994 - 2

I. ①微… II. ①谭… III. ①电网—储能—研究
IV. ①TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 215764 号

微电网储能应用技术研究

著 者 谭兴国
责任编辑 徐 武
编 辑 杜 秋
责任校对 刘 青
封面设计 于春颖

出版发行 煤炭工业出版社 (北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
电 话 010 - 84657898 (总编室)
010 - 64018321 (发行部) 010 - 84657880 (读者服务部)

电子信箱 cciph612@126.com

网 址 www.cciph.com.cn

印 刷 煤炭工业出版社印刷厂

经 销 全国新华书店

开 本 850mm × 1168mm¹/₃₂ 印张 6 字数 153 千字

版 次 2015 年 9 月第 1 版 2015 年 9 月第 1 次印刷

社内编号 7840 定价 18.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换,电话:010 - 84657880

前 言

微电网是由分布式发电、储能装置、能量转换装置、负荷、控制和保护装置等构成的系统单元，是一个能够实现自我控制、保护和管理的自治系统。微电网既可与电网联网运行，也可在电网故障或需要时与电网断开单独运行。微电网在接入电力系统时，入网标准只针对微电网与电网的公共连接点，而不针对各个具体的微电源，因此，可以充分发挥分布式电源的各项优势。微电网作为电网的有益补充，可以经济有效地解决偏远地区的供电，避免单一供电模式造成的地区电网薄弱和大面积停电事故，提高供电系统的安全性、灵活性和可靠性。

由于微电网中的电源多为分布式电源，如风力发电机、光伏发电以及微型燃气轮机、燃料电池、超级电容、飞轮、蓄电池等储能装置，它们接在用户侧，具有低成本、低电压和低污染的特点，是电力系统的发展方向。然而，微电网电源的应用技术还不成熟，尤其是微电网电源的储能应用技术。目前，微电网常用的储能技术有蓄电池、超级电容、磷酸铁锂电池、飞轮储能、液流电池等，这些储能技术功能单一，难以满足微电网中的多种功能需求，再加上储能装置功率变换器的可靠性、微电网中储能容量的确定方法等方面还存在亟待解决的技术难题，为此，加大微电网储能技术研究，探索适合现代微电网功能的储能技术势在必行。

本书对微电网储能应用技术做了如下研究：①在多端口复合储能拓扑的基础上，采用基于异步占空比移相 PWM 算法的三端

口复合储能定功率传输控制策略，实现了微电网电源端口间电压匹配，提升了微电网电源的功率传输效率；②针对三相四开关拓扑输出不平衡的内在作用机制，采用直流中点电压差值前馈补偿的等效 SVPWM 算法，提高了四开关储能变换器输出平衡度；③将储能技术与主动电能质量治理设备有源电力滤波器（APF）相结合，采用储能型四开关有源电力滤波器（APF）统一工作模式自适应切换方法，解决了微电网中的电能质量和功率平衡需求问题；④针对微电网中复合储能容量的多目标优化问题，提出了基于目标函数适应度离差均值排序的子目标权重确定方法，建立了以投资成本、功率波动、供求平衡为目标的复合储能容量多目标配置优化模型。

本书得到了国家自然科学基金“微电网复合储能拓扑及多目标优化控制技术（51107068）”、新能源电力系统国家重点实验室开放课题“高渗透率微网复合储能柔性控制及多目标优化配置技术（LAPS15013）”和河南省高等学校控制工程重点学科开放实验室开放课题（KG2014-14）的资助，得到了河南理工大学电气工程与自动化学院的大力支持，在此表示衷心的感谢。在图书的出版过程中，煤炭工业出版社的徐武编辑为该书的出版提出了很多中肯的修改意见，在此一并感谢。

由于作者水平有限，文中不妥之处，敬请读者批评指正。

作者

2015年8月于河南理工大学

内 容 提 要

本书介绍了微电网储能技术的发展现状及常用的储能应用技术，分析了常用储能应用技术存在的问题，提出了复合储能装置的接入与控制、储能变换器的容错运行控制、储能对微电网电压频率稳定及电能质量的关键柔性支撑、微电网中复合储能容量多目标优化配置等改善微电网储能的方法和技术。

本书可供电气工程及自动化专业的教师、研究生、本科高年级学生使用，也可供从事微电网应用技术研究、储能装置的设计开发与应用、储能容量优化设计的工程技术人员及研究人员参考。

目 录

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 微电网运行中存在的技术问题	4
1.3 微电网中储能种类及作用	7
1.4 微电网中储能应用关键技术	17
参考文献	34
2 储能变换拓扑与复合储能接入技术	36
2.1 典型储能变换拓扑	36
2.2 复合储能接入控制技术	41
参考文献	66
3 三相储能变换器的容错控制技术	68
3.1 容错型三相四开关储能变换器	68
3.2 三相储能变换器故障诊断技术	74
3.3 三相四开关储能变换器的容错运行技术	87
参考文献	107
4 储能技术对微电网的柔性支撑	109
4.1 基于储能补偿的微电网电压、频率稳定 控制技术	109
4.2 三相四开关并联型有源滤波器(APF)电能 质量控制技术	122

参考文献	157
5 微电网复合储能容量管理的多目标优化技术	160
5.1 微电网复合储能容量配置的多目标 优化建模	160
5.2 复合储能多目标优化算法	163
5.3 微电网复合储能多目标优化的算例分析	169
参考文献	182

1 绪 论

1.1 引言

分布式发电一般指能满足特定用户需要、支持现有配电网经济运行、在用户现场或附近配置、装机容量为 50 MW 以下、与环境兼容的小型化发电单元，也被形象地称作分散式或嵌入式发电（Dispersed or Embedded Generation）。采用分布式发电，有助于充分利用各地丰富的清洁和可再生能源，向用户提供“绿色能源”，是“节能减排”的重要措施。近年来，分布式发电（Distributed Generation, DG）凭借其投资节省、发电方式灵活、与环境兼容等优点而备受关注。

分布式发电与大电网联合运行可显著提高系统的经济性、安全性、可靠性和灵活性，且能满足可持续发展的要求，大大减轻环保压力。为此，世界各国纷纷制定各自的可再生能源发展战略，大力发展分布式发电技术。例如，美国要求未来几年分布式发电装机容量占其新增容量比例不少于 20%；欧盟规划 2020 年其各成员国可再生能源比例超过 20%，其中德国在 2011 年已经突破该指标；日本历来有着强烈的能源危机意识，计划到 2030 年可再生能源的份额在能源结构中达到 30%；我国 2007 年发布了可再生能源中长期发展规划，到 2020 年中国可再生能源将占全部能源比重的 15%。

随着分布式发电的日益广泛应用，现有的分布式发电运行模式已不能满足电网运营商和用户的不同要求。单独的分布式电源尽管优点突出，但同时也存在许多问题，如介入成本高、控制困难、未充分利用分布式发电的发电能力、影响系统的电能质量

等。大量分散的小容量分布式电源并网发电对电力系统的运行提出了新的挑战，这些分布式电源对于电力系统运行人员而言往往是“不可见”的，其中的一些分布式发电通常又是“不可控”或“不易控”的。由于分布式电源的“不可控”性，一旦发生故障，往往需要采取限制、隔离措施，以减少其对大电网的冲击。例如 IEEE - P1547/D08 “关于分布式电源与电力系统互联的标准草案”中对分布式发电的并网标准做了相关规定，当电力系统发生故障时，分布式电源必须马上退出运行，这就大大限制了分布式电源效能的充分发挥，也不利于实现风电、光伏发电的故障穿越。

特别是当电网渗透率（局部地区分布式发电系统容量占配电网系统容量的比率称为渗透率）水平较高时，要实现配电系统的功率平衡和可靠运行，这就对运行管理提出了很高的要求。常规配电系统的构架和运行策略已经不能很好地满足分布式电源大规模接入的要求，例如当前配电网系统的无源辐射状运行结构以及能量流动的单向、单路径特征，使得分布式发电必须以负荷形式并入和运行，即发电量必须小于本地负荷，导致分布式发电能力受到极大的限制。

为协调大电网与分布式电源的矛盾，促进分布式发电，特别是可再生能源的综合应用，人们提出了微电网（Microgrid）的概念。微电网，也称微网，是由分布式电源（微电源）、负荷、储能装置及控制单元共同组成，能够实现自我控制和管理的自治系统。图 1-1 是一个典型微电网的系统示意图。微电源包括光伏发电、风力发电、微型燃气轮机与燃料电池等，由电力电子接口和控制器件实现能量转换，使得微电网具有控制上的灵活性。对系统而言，每个微电网都是一个可控负荷，其接入和退出并不影响整个系统的运行控制，从而实现“即插即用”（Plug and Play）功能；对用户而言，微电网作为一个可定制电源，能满足用户对电能质量和供电安全的多样化需求。微电网既可与大电网并网

运行，也可根据需与主网断开独立运行。在微电网独立运行模式下，各微电源逆变器和储能装置的优化控制是关键。

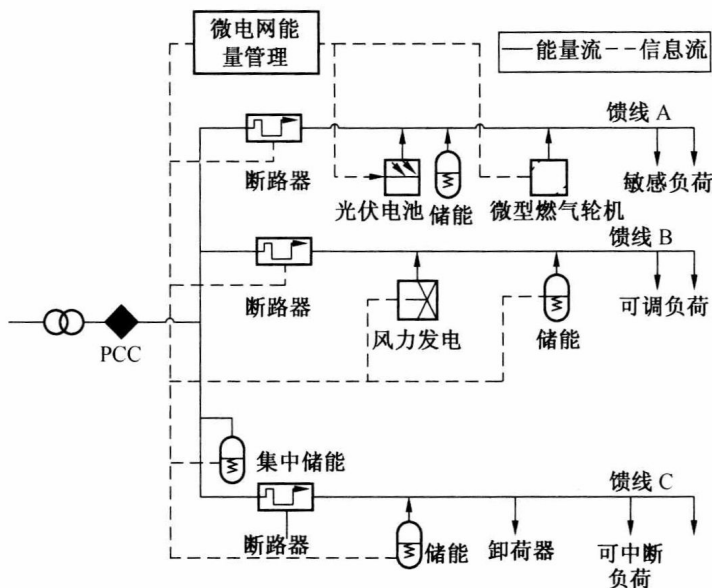


图 1-1 典型微电网系统示意图

与传统集中式能源发电网相比，微电网更接近负荷，无须进行大容量线路扩容建设，可节省投资升级费用，减少损耗；由于兼顾发电、供热等多种功能，分布式能源的综合利用率更高；当外部配网出现扰动的情況下，微电网内部分布式电源即使暂态情况下自主运行，仍可对重要负荷进行可靠供电；微电网具备的黑启动功能，故障时停电时间短，且可帮助外部电网重新恢复正常运行。微电网技术已经成为促进传统电网转型并可能对未来电网带来重大变革的前瞻性技术。

1.2 微电网运行中存在的技术问题

微电网内部有多种能源输入及能量转换单元，是化学、热力学、电学、动力学等相互耦合的复杂系统。微电网可以运行在多种状态：并网运行时，功率可以双向流动；外部电网故障时，可以通过保护动作解列退出电网，进入孤岛运行状态，独立向内部重要负荷供电；故障消除后，又可并入电网，重新运行。微电网的运行状态既与大电网的运行状况有关，也与内部分布式电源的特性、负载特性和储能运行状态有关。

1.2.1 微电网与大电网的交相影响

分布式发电具有自身惯性弱、可控性快速精准、电源种类和电气特性多样性等特点，使得微电网的总体特性与传统电网差异较大。联网运行时，微电网根据运行方式不同，既可以充当电源，又可以充当负载，可有效调节互联电网的供电平衡，提高电网供电的稳定性。并网运行系统故障时，微电网根据自身的孤岛检测以及孤岛控制策略进入孤岛，配合孤岛电源的网络重构，尽可能多地保护系统内部的关键性负荷。

然而，分布式电源多采用电力电子技术控制的电子电源，其弱鲁棒性和弱惯性，也会给电网互联运行带来不利影响。如在系统发生严重功率缺额的情况下，微电网应向电网提供供电功率，增加系统的阻尼，但因微电网的孤岛策略与大电网解列，进而加剧了电网的功率缺额；微电网的引入使配网中的备用容量发生变化，影响了系统内关键设备的正常运行及保护，给电网的安全运行带来隐患。

1.2.2 高渗透率微电网安全运行存在的问题

微电网内部可再生能源占比较高会给微电网，特别是孤立运行的自治微电网的稳定运行带来不利影响。微电网中的分布式电源（DG）利用了大量的风能、太阳能和生物能等可再生资源，能量的输出受地理情况、天气和气候等外界因素影响，导致微电

网中功率交换特性复杂,交换功率波动范围大,具有间歇性和不可预知性,大规模接入势必会对微电网的电压、频率造成影响,使得高渗透率微电网系统故障后的电气量特征发生巨大变化,传统的故障检测方法和继电保护模式难以满足微电网安全运行的要求,因此需对微电网的控制理论进行深入研究。

1.2.3 微电网控制技术及多分布式电源协调控制

微电网若要实现灵活的运行方式和高质量的供电服务,离不开稳定的控制系统。由于微电网中微电源和负荷众多,难以以一个中心控制点对整个系统做出相应控制,因此要求微电网控制能够基于本地信息对电网状况做出自主反应。例如,对于本地的电压跌落、故障、停电等,内部变换器应能充分利用本地信息自动切换到独立运行状态。

另外,微电网可被视为具有独特运行特征的虚拟发电装置,并网运行时,可以向大电网供电,也可以吸收电能(功率为负值)。与发电机相同之处在于并网运行必须满足电压、频率要求,不同之处在于微电网中分布式电源类型不同,特征不同,必须建立特殊的协调控制方式才能满足并网运行条件。微电网作为自治系统,可脱网独立运行,此时也需要满足负荷对电压、频率的要求,根据分布式微电源特性和负载情况采取相应的协调控制措施。由于设备类型多样、运行模式多样、可控性能差异较大,微电网中的分布式发电电源的协调控制问题较为复杂。

1.2.4 微电网规划亟待解决的问题

微电网在可再生能源发电和负荷用能长期预测、能源构成、微电源和储能容量、网架结构等方面的科学规划,是微电网经济性建设和运行的前提条件,是微电网能够得以可持续发展的关键所在。目前,微电网在科学规划设计方面还需解决如下难题:①微电网规划方案的制定是建立在综合负荷用能情况、对可再生能源发电长期预测的基础上,受外部条件和预测方法有效性的影响,预测结果存在着较大的不确定性;②微电网由于具备特定的

控制目标、灵活多变的系统组合和运行策略，规划过程中需充分考虑具体控制策略的影响；③原有的配网规划方案不再适用，需要开发新型配电系统的规划模型、理论和方法；④微电网中特定装置或设备容量的优化配置，尤其是两种或者多种储能构成的复合储能优化配置，其优化目标往往是多个，目前多采用工程经验来优化配置，缺乏优化的理论支撑，因此需要开发新的多目标优化理论及应用软件。

1.2.5 微电网中的电能质量问题

随着微电网中分布式电源的大量应用，以及用户侧对电能质量的要求越来越高，微电网中的电能质量问题日益显现。如：微电网中间歇性电源引起的暂态功率平衡的波动，导致负载侧的电能质量下降；微电网中的各种分布式发电和用电设备多采用电力电子装置作为接口会产生不同水平的谐波；微电网中大量单相分布式电源会加剧三相不平衡程度等等。因此，微电网中的电能质量问题必须引起高度重视。

1.2.6 微电网中的继电保护

含多个分布式电源及储能装置的微电网的接入，很大程度上改变了配电系统的故障特征，使故障后的电气量变化更加复杂，传统检测方法的适用性受到影响，甚至无法准确实现故障的定位。微电网在正常并网运行时，若内部发生电气故障，微电网的继电保护应确保故障点切除后，微电网仍能继续稳定并网运行。而若外部配网发生故障，微电网的继电保护应在可靠定位和切除故障的前提下，确保微电网解列后仍能继续可靠运行。而对一些特定的情况，微电网的继电保护还可能要求微电网能够实现低电压穿越或者故障穿越，为大电网故障恢复提供支撑服务。为此，必须对传统继电保护和控制方法进行改进。

1.2.7 微电网的经济运行和能量优化管理

同常规电力系统一样，可以通过对微电网中的可调变量进行优化控制，使得微电网以最优方式运行。微电网中，可调变量较

为丰富,如分布式电源的有功功率输出、电压型逆变器的出口电压、电流型逆变器的出口电流、储能装置的有功控制、可调电容的无功补偿量、可控微电源的功率输出等,通过对这些变量的优化控制,可以实现微电网的优化运行与能量的合理分配,最大限度地利用可再生能源。

1.3 微电网中储能的种类及作用

1.3.1 储能种类及其性能

1. 储能种类

储蓄电能主要有物理储能、电磁储能和电化学储能 3 种形式。物理储能有抽水蓄能、飞轮储能、压缩空气储能(CAES)等;电化学储能有蓄电池、液流电池、锂电池、钠硫电池等;电磁储能有超级电容、超导储能等。

1) 物理储能

(1) 抽水蓄能。抽水蓄能电站如图 1-2 所示,这种电站需配建上、下游两个水库。在负荷低谷时段,抽水储能设备在电动机状态下工作,将下游水库的水抽到上游水库;在负荷高峰时,抽水储能设备在发电机状态下工作,利用储存在上游水库中的水发电。

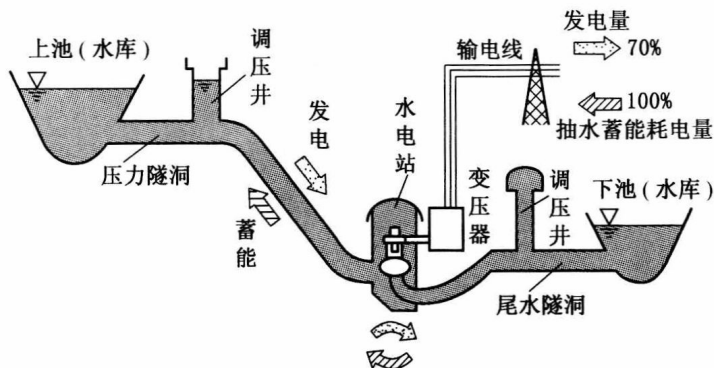


图 1-2 抽水蓄能电站

抽水蓄能是目前电力系统中容量最大的储能方式。由于抽水蓄能电站需要建在有一定落差的高低水库之间，对地理条件有特殊要求且建设周期长、投资大。虽然抽水蓄能方式在大电网表现出较好的经济性，但电站受安装位置、容量和投资成本限制，这种方式在微电网中实施难度较大。

(2) 压缩空气储能。压缩空气储能 (Compressed - Air Energy Storage, CAES) 是指在电网负荷低谷期用电能压缩空气，将空气高压密封在报废矿井、储气罐、山洞、过期油气井或新建储气井中，在电网负荷高峰期释放压缩空气推动发电机的储能方式。建设压缩空气储能电站的关键是压缩空气的储存，目前最理想的是水封恒压储气站，它能保持输出恒压气体。压缩空气储能电站建设和运行成本较低，具有很好的经济性，场地受限少，储能规模可以持续数小时乃至几天，使用寿命长，安全可靠。目前研究人员正在研究将小型压缩空气储能系统应用于分布式发电和不间断电源 (UPS)，用来取代电池储能系统。图 1-3 所示为清华大学研制的非补燃压缩空气储能发电示范系统。

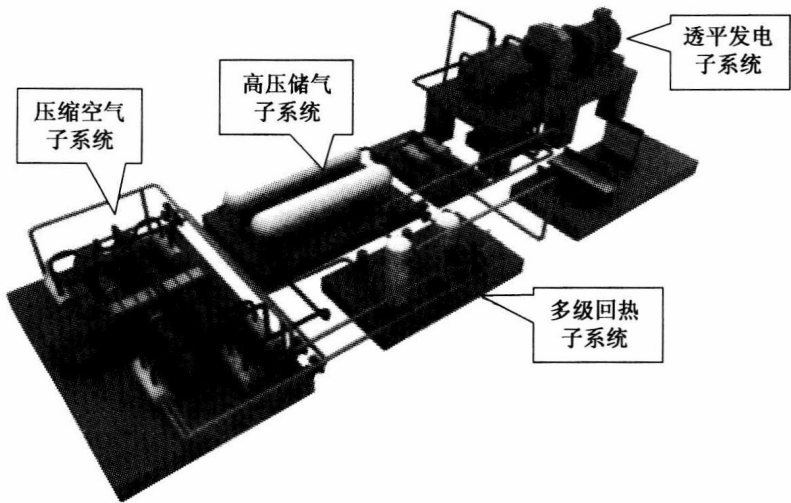


图 1-3 非补燃压缩空气储能发电示范系统

(3) 飞轮储能。飞轮储能是一种机械储能形式，其原理如图 1-4 所示。电能经功率变换器驱动飞轮高速旋转，从而将能量以动能形式存储起来。储能多少与飞轮的质量、旋转速度有关。飞轮与电动机或者发电机相连，通过电力电子装置对飞轮进行转速调节，可实现储能装置与电网之间的功率交换。飞轮储能具有功率密度大、循环寿命长、维护简单、无污染等优点。

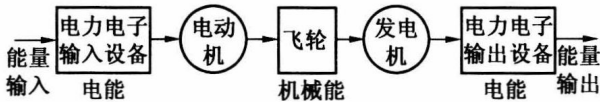


图 1-4 飞轮储能原理

2) 电磁储能

(1) 超导储能。20 世纪 70 年代首次提出将超导磁储能作为一种储能技术应用于电力系统。超导储能系统 (SMES) 是利用超导体制成的线圈储存磁场能量，功率输送时无须能源形式的转换，具有电磁响应速度快、转换效率高、比容量大等优点。超导磁储能的效率很高 (一般大于 95%)，并且能够快速响应 (ms 级)，循环次数大于 10 万次，超导磁储能的比能量和比功率都比较高。如比能量为 0.1 ~ 10 Wh/kg，比功率为 1000 W/kg。和其他的储能技术相比，超导储能成本较高，此外，超导产生的强磁场对环境的影响也尚待进一步评估。图 1-5 为中科院电工所研制的 1MJ 超导储能装置。

(2) 超级电容储能 (Super-capacitor Storage)。超级电容是根据电化学双电层理论研制而成的，可提供强大的脉冲功率，大多用于高峰值功率、低容量的场合。由于超级电容能在充满电的浮充状态下正常工作十年以上，因此可以在电压跌落和瞬态干扰期间提高供电水平。超级电容储能的比功率非常高，达到