

CHUNENG XITONG GUANJIAN JISHU
JIQI ZAI WEIWANGZHONG DE YINGYONG

储能系统关键技术 及其在微网中的应用

李建林 修晓青 惠东等 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

2015 年度中国电力科学研究院专著出

储能系统关键技术 及其在微网中的应用

李建林 修晓青 惠 东
徐少华 马会萌 房 凯 著
谢志佳 靳文涛 孙 威

内 容 提 要

本书主要讨论储能技术在微网中应用的关键技术及相关示范工程现状,详细介绍了微网中储能的作用、政策与标准、微网结构与模型,重点分析了储能系统的容量配置技术与控制策略,并结合示范工程对微网中储能的作用进行了介绍,本书遵循理论分析与实例仿真相结合的原则,以期为广大读者提供借鉴。

本书可作为从事储能技术研究的科研工作者参考使用,亦可作为高等院校相关专业广大师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

储能系统关键技术及其在微网中的应用 / 李建林等著. —
北京: 中国电力出版社, 2016.6

ISBN 978-7-5123-9481-0

I. ①储… II. ①李… III. ①储能—研究 IV. ①TK02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 134048 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 6 月第一版 2016 年 6 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 10 印张 225 千字

印数 0001—1500 册 定价 45.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



前 言

在能源供给与环境问题的双重压力下，自2015年，中共中央国务院、国家能源局、发改委等相继出台了强有力的政策文件，《中共中央国务院关于进一步深化电力体制改革的若干意见》（中发〔2015〕9号）及相关配套文件《关于改善电力运行调节促进清洁能源多发满发的指导意见》《发改委关于做好电力需求侧管理城市综合试点工作的通知》首先肯定了储能微网中提高系统消纳能力和能源利用效率的重要作用，继而《关于促进智能电网发展的指导意见》《国家能源局关于推进新能源微电网示范项目建设的指导意见》，紧接着，2016年《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》，均明确提出储能技术在智能电网发展中的重要地位。

储能系统能够优化分布式电源并网与消纳、参与调峰调频、提高用户参与需求侧响应的积极性，微网中为容纳高比例波动性可再生能源，需考虑技术经济性，配置一定容量的储能系统。

本书得到了科技部“863”项目（2014AA052004）、国家电网公司软科学项目（8142DG160001）以及中国电科院专著出版基金的大力资助，在此深表谢意。在本书编辑过程中，中国电力科学研究院的同事李蓓、杨水丽、张明霞、闫涛、胡娟、许守华、渠展展、汪免伶等同志也付出了辛勤劳动，参与了部分内容的撰写、校对等工作，硕士生陈明轩、吴小刚、吴振威、马速良、张娅等完成了书中部分算法、建模和仿真，在此一并致谢。

限于作者水平和条件，书中疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

2016年5月
作者于北京

目 录

前 言

第 1 章 概述	1
1.1 分布式发电及微网现状	1
1.2 储能微网中的作用	8
1.3 储能微网中的关键技术	9
1.4 政策法规、标准规范	13
第 2 章 微网系统结构与模型	17
2.1 系统结构	17
2.2 光伏系统模型	20
2.3 储能系统模型	33
2.4 柴油发电机模型	49
第 3 章 储能系统配置技术	53
3.1 数据补齐算法	53
3.2 光伏系统出力特性	62
3.3 储能在联网电网中的配置技术	70
3.4 储能在独立电网中的配置技术	79
3.5 混合储能系统容量配置	88
第 4 章 储能系统控制策略	100
4.1 微网运行方案	100
4.2 光伏系统控制策略	104
4.3 储能系统控制策略	107
4.4 混合储能协调控制策略	122
4.5 算例	129
第 5 章 示范工程	135
5.1 示范工程现状	135
5.2 典型示范工程	146

概 述

1.1 分布式发电及微网现状

近年来，国内外能源危机日渐严峻，传统化石燃料引起的环境污染也日益加剧。与此同时，集中式发电由于其拓扑结构单一、供电灵活性较差等特点，难以满足用户对供电安全性、可靠性的要求。因此，各国相继将目光投向以可再生能源为能量来源的分布式发电，发展扩大新型清洁能源的开发利用成为解决能源环境以及供电安全可靠问题的必然选择。

分布式发电技术主要有：风能发电、光伏发电、潮汐能发电、生物质能发电以及燃气轮机/内燃机发电等。目前，国内外分布式发电的研究主要集中在风力发电和光伏发电。与传统的集中式大规模发配电方式相比，分布式发电技术具有发电系统分散独立、可靠性高、可对区域电网的电能质量和性能进行实时控制、投资少、安装地点灵活、建设周期短、用户可自主控制、能源利用率高以及环境污染小等优势。但是，可再生分布式能源的大规模接入也给传统电网带来巨大的挑战和冲击：其一，分布式可再生能源出力具有随机性和波动性，可控性较差；其二，分布式能源的接入将改变传统配电网中单向潮流的基本格局，这一特点可能会严重影响电网的电压质量、短路电流和供电可靠性。因此，为减少分布式电源接入对大电网产生的不利影响，充分整合分布式发电技术的优势，相关研究人员提出了一种更加灵活、更加智能的分布式发电系统组织形式——微网（microgrid）。

将各种分布式电源组成微网的形式运行，具有多方面的优点，例如，①有利于提高配电网对分布式电源的接纳能力；②可有效提高间歇式可再生能源利用率，并可根据实际用户需求提供多样化的电能质量服务；③可降低配电网损耗，优化配电网运行方式；④可在电网故障状态下保证关键负荷供电，提高网络的供电可靠性；⑤可用于解决偏远地区、荒漠或海岛中用户的用电问题。微网已成为解决分布式电源无障碍接入的友好载体。

微网中往往融合了先进的信息技术、控制技术和电力技术，在提供可靠的电力供应、满足用户多种需求的同时，还能保证实现能源效益、经济效益和环境效益的最大化。与此同时，微网可在常规电网中扮演电网支撑、提高效率、节能降耗、防震减灾、农村电气化等角色。由微网的种种优点决定，微网将是智能电网建设中不可或缺的重要部分，微网技术的全面发展是实现智能电网建设的客观要求。

因此，大力发展微网技术，使其配合当前的电力系统组成更加灵活的供电格局，可以有效加强我国电力系统的安全性和可靠性，为提高当前电力系统的供电能力和电能质量指出了一条有效途径，也为优化当前电力系统结构及构建坚强、完全可控的智能电网



提供理论支持。在我国,大力地推广微网技术,是走可持续发展道路的具体体现,是对我国调整能源结构、解决边远地区用电、保护环境、落实科学发展观、构建社会主义和谐社会的有力支撑。

在微网的概念提出后,迅速受到了包括美国、欧盟、日本、中国等世界各国、各地区的高度重视,各国政府纷纷制订相关的能源发展策略,为微网的发展提供了强劲的动力。

1.1.1 美国

美国电气可靠性技术解决方案协会(Consortium for Electric Reliability Technology Solutions, CERTS)是世界分布式发电微网领域研究的先行者,它发表了一系列关于微网概念和控制的著述,这些著述针对微网的思想及重要性技术问题进行了详细的描述。CERTS在威斯康辛麦迪逊分校建立了自己的实验室规模的测试系统,并与美国电力公司合作,在俄亥俄州的哥伦布Dolan技术中心,建立了微网平台。美国北部电力系统承接的曼德瑞沃(Mad River)微网是美国第一个微网示范性工程,该示范工程主要用于检验微网建模及仿真方法、微网保护及其控制策略研究和微网的经济效益等,与此同时初步的探讨了制定微网管理条例和相关法规。美国能源部(DOE)在“Grid 2030”发展战略中,提出以微网的形式安装和利用分布式发电系统的阶段性计划,该计划对此后微网技术的发展规划进行了较为详尽的阐述。

1.1.2 日本

日本在分布式发电的应用和微网建设领域走在了世界前列,已在国内建立了多个微网示范工程。可再生能源一直是日本电力行业关注的重点,新能源与工业技术发展组织(The New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO)支持了多项微网示范工程的建设,同时鼓励和倡导可再生能源和分布式发电技术在微网中的应用。NEDO早在2003年就启动了包含可再生能源的地区配电网项目,分别在京都、爱知和青森3个县建立了微网示范性工程。在青森县的微网示范工程中,电能和热能全部由可再生能源(风能、太阳能和生物质能)供给,示范工程中的整个微网通过公共连接点与大电网连接。微网成功投运后,增加了可再生能源利用率,减少了当地用户从大电网的购电量,并且CO₂排放量明显降低,在为期1周的试运行测试期间,整个系统的电压和频率均维持在允许范围内,较好地实现了系统的安全、稳定运行。

1.1.3 欧洲

欧盟通过资助和建设Microgrids和MoreMicrogrids 2个微网项目,拓展对微网概念的理解、提高分布式发电装置在微网中的渗透率,基于微网项目及示范工程初步形成了微网运行、控制、保护、通信,以及安全等相关的理论体系。希腊、德国、西班牙等国建立了不同规模的微网示范性试验平台,其中由德国太阳能研究所(ISET)建立的微网实验室是欧洲微网的典型代表,容量达200kVA,试验平台上设计并且安装了简单的能量管理系统。

未来欧盟针对微网的研究主要集中于分布式可再生发电系统的控制策略、单微网的



运行规划、多微网运行管理技术的研发、微网技术和商业化规范的制定、微网示范性测试平台的建立及推广,以及电力系统运行性能的综合评估等方面,为分布式可再生发电系统大规模接入电网提供理论和实践依据,也为传统电网向智能电网的过渡做好铺垫。

欧盟第五框架计划(1998~2002年)项目——The Microgrids: Large Scale Integration of Micro-Generation to Low Voltage Grids activity,总投资450万欧元,形成了以雅典国立科技大学为首的包含7个欧盟国家14个研究组织参与的科研团队。该项目在微网控制策略、并网和孤岛运行、微网保护、微网经济性、实验室建设方面等取得了重大成果,并在雅典、曼彻斯特、ISET等地建立了微网实验平台。

欧盟第六框架计划(2002~2006年)项目——Advanced Architectures and Control Concepts for More Microgrids,总投资850万欧元,相对于第五框架计划,第六框架计划的研究团队进一步的扩大,不仅包括ABB、Siemens这样的电气设备制造商,还包括一些欧盟成员国的电力企业和来自希腊、英国、西班牙、葡萄牙、德国等国家的技术人员共同参与,研究的对象也由单微网运行拓展到多个微网并列运行,该框架计划项目的目标是保证并实现多微网在电力市场环境下的技术及商业接入。同时,欧盟还建立了多个微网示范工程,例如,由希腊CRES公司牵头在爱琴海南部建立的基斯诺斯岛微网工程,由荷兰Continuon公司牵头在Bronsbergen假日公园建立的微网工程,由德国MVEnergie公司牵头在一个包含1200户居民的生态区建立的多微网试验点,西班牙LABEIN公司、葡萄牙EDP公司、意大利CESI公司、丹麦OESTKRAFT公司也均在各国建立了相应的微网试验点。这些示范工程的研究成果已成为欧盟“智能电网——欧洲未来电网展望和战略”中的重要组成部分。

1.1.4 中国

微网技术作为前沿技术研究领域,以其高可靠性、环保、灵活等众多优点在欧美等发达国家得到了大力发展,与发达国家相比,我国对分布式发电和微网的研究起步较晚,相对来说技术尚不够成熟,还需要进一步的努力与发展。在《中华人民共和国可再生能源法》等一系列国家政策法规的鼓励引导下,在国家科技部“973”项目、“863”项目及国家自然科学基金等资金支持下,国内众多高校、科研机构和企业投入到可再生能源和微网的研究开发及应用实践中,取得了一些阶段性的研究成果,建设了一批微网示范工程。从地域上来看,我国微网示范工程主要分布于边远地区、海岛及城市等传统电网投资成本高、可再生能源丰富、环境压力大的地区。

(1) 我国西藏、青海、新疆、内蒙古等边远地区人口密度低、生态环境脆弱,扩展传统电网成本高,采用化石燃料发电对环境的损害大。但边远地区风、光等可再生能源丰富,因此利用本地可再生分布式能源的独立微网是解决我国边远地区供电问题的合适方案,例如,西藏阿里地区狮泉河水光储互补微网、青海玉树州杂多县大型独立光伏储能微网等。

(2) 我国拥有超过7000个面积大于 500m^2 的海岛,其中超过450个岛上有居民。这些海岛大多依靠柴油发电在有限的时间内供给电能,目前仍有近百万户沿海或海岛居民生活在缺电的状态中。考虑到向海岛运输柴油的高成本和困难性以及海岛所具有的丰



富可再生能源，利用海岛可再生分布式能源、建设海岛微网是解决我国海岛供电问题的优选方案。从更大的视角看，建设海岛微网符合我国的海洋大国战略，是我国研究海洋、开发海洋、走向海洋的重要一步，目前已建设了一批海岛微电网示范工程，例如，浙江鹿西岛并网型微网示范工程、浙江东福山岛风光储柴及海水综合新能源微网、浙江南麂岛离网型微网示范工程等。

(3) 我国城市微网示范工程，重点示范目标包括集成可再生分布式能源、提供高质量及多样性的供电可靠性服务、冷热电综合利用等，例如，天津生态城二号能源站综合微网、河南分布式光伏发电及微网运行控制试点工程等。

另外，还有一些发挥特殊作用的微网示范工程，例如，江苏大丰的海水淡化微网项目。

1.1.5 其他国家和地区

世界上还有许多国家和地区开展微网相关研究和示范工程建设，例如，韩国济州岛示范工程、印尼电信产业微网工程、澳大利亚珀斯等地的 9 个微网示范工程、泰国 Kohjig 等地的 7 个微网示范工程、南非罗本岛微网示范工程、香港晨曦岛微网示范工程等。越来越多的国家和地区加入到微网的研发和应用中，根据具体国情和实际需求建设各具特点的微网示范工程。表 1-1 中列出了国内外的一些典型微网示范工程。

表 1-1 典型微网示范工程

序号	名称(地点)	能源种类	储能系统	主要特点
1	NREL Microgrid (美国)	柴油发电机: 125kW 燃气轮机: 30kW 光伏: 10kW 风机: 100kW	蓄电池	电源形式较多, 负荷相对单一、无电动机负荷, 分布式发电系统可靠性测试
2	Sandia DETL Microrid (美国)	光伏、燃气轮机	电池储能	分析分布式电源利用效率, 监测分布式电源、负荷变化对微网稳态运行的影响
3	CERTS Microgrid (美国)	燃气轮机: 60kW×3	蓄电池	电源类型单一, 没有考虑光伏、风机等分布式能源
4	Waitsfield Microgrid Project (美国)	光伏: 10kW 燃气轮机: 30kW 柴油发电机: 380kW	计划后期增加风机和飞轮储能	分布式电源配电网规划、微网上层监控研究
5	Distributed Utility Integration Test Project (美国)	光伏: 150kW 微型燃气轮机: 90kW 柴油发电机: 300kW	锂离子电池: 500kW 液流电池: 1MW	微网的电压和频率调整、电能质量监测与分析, 微网继电保护机分布式电源渗透率对配电网影响的研究
6	Palmdale, Calif. City Microgrid Project (美国)	风电: 950kW 水轮机: 250kW 汽轮机: 200kW 备用柴油发电机: 800kW	超级电容器: 2×225kW	研究超级电容对电能质量的影响
7	Santa Rita Prison Microgrid project (美国)	光伏: 275kW	锂离子电池: 2MW	为监狱提供日常用电, 可孤岛运行 8h 以上, 低储高发



续表

序号	名称(地点)	能源种类	储能系统	主要特点
8	DOD Marine Corps Air Station Miramar Microgrid (美国)	光伏: 230kW	锌溴电池: 250kW	降低高峰用电需求, 并在无法获得电网电力时为关键军事系统提供电力
9	PSU GridSTAR Microgrid Test Center (美国)	——	锂离子电池: 250kW	集成了可再生能源与能源存储、电动汽车充电等先进技术
10	Scripps Ranch Community Center BESS (美国)	光伏: 30kW	锂离子电池: 100kWh	平抑可再生能源功率波动, 后备电源
11	EnerDel Mobile Hybrid Power System (美国)		锂离子电池: 15kW	节省发电机燃料供应, 保证电力供需平衡
12	BCITMicrogrid Demonstration Site (加拿大)	光伏: 27kW 柴油发电机: 300、500、125kW 天然气: 15kW	电池储能	加拿大第一个校园智能微网示范站点
13	Bronsbergen Holiday Park microgrid (荷兰)	光伏: 335kW	电池储能	提供 200 幢别墅电力, 联网孤岛自动切换, 黑启动能力
14	AM Steinweg residential microgrid project (德国)	光伏: 35kW 热电联产: 28kW	铅酸电池: 50kWh	系统能够进行孤岛运行, 满足长时间的电力需求
15	CESI RICERCA DER test microgrid (意大利)	燃气轮机: 150kW 光伏: 24kW 模拟风机: 8kW 柴油发电机: 7kW	飞轮: 100kW/30s 蓄电池: 110kW 全钒氧化还原液流电池: 42kW 钠氯化镍电池: 64kW	进行稳态、暂态运行过程测试和电能质量分析
16	Kythnos Islands Microgrid (希腊)	6 台光伏发电单元: 11kW 柴油发电机: 5kW	电池储能: 3.3kW/50kWh	微网运行控制以提高系统满足峰荷能力和改善可靠性, 目前只能独立运行
17	Labein Microgrid Project (西班牙)	光伏: 0.6、1.6、3.6kW 柴油发电机: 2×55kW 微型燃气轮机: 50kW 风电: 6kW	飞轮: 250kW 超级电容器: 5kW/5s 电池储能: 11.8kWh	并网集中和分散控制策略分析, 需求侧管理, 电力市场交易
18	DeMoTec test microgrid system (德国)	光伏: 1.4kW, 1.4、20kW 模拟光伏 柴油发电机: 20、30kVA 燃气轮机: 5.5kVA 风电: 5kVA	电池储能: 52.8、52.8、44.2kWh	电源类型多样, 借助线路模拟、电网模拟和微网模拟装置, 设置外延网络运行状态
19	MVV Residential Microgrid Demonstration Project (德国)	燃气轮机: 1.2kW 光伏: 23.5kW	电池储能: 6kW/18kWh	微网性能测试, 经济效益评估
20	NTUA Microgrid system (希腊)	光伏: 1.1kW、110W 风机: 2.5kW	电池储能: 15kWh	微网经济评估, 分层控制策略、联网和孤岛模式切换研究
21	Armines Microgrid (法国)	光伏: 3.1kW 燃料电池: 1.2kW 柴油发电机: 3.2kW	电池储能: 18.7kWh	微网的上层调度管理和联网及孤岛运行控制



续表

序号	名称 (地点)	能源种类	储能系统	主要特点
22	Aegean Islands Microgrid system (希腊)	光伏: 12kW 柴油发电机: 9kVA 风机: 5kW	电池储能: 85kWh	通过微网运行控制以提高系统满足峰荷能力和改善可靠性。目前只能孤网运行
23	Hachinohe Project (日本)	沼气内燃机: 3×170kW 光伏: 80kW 风电: 20kW	铅酸电池: 100kW	供需平衡研究
24	Aichi Project (日本)	光伏: 330kW 燃气轮机: 130kW 磷酸型燃料电池: 800kW 固体氧化物燃料电池: 25kW 熔融碳酸盐燃料电池: 440kW	钠硫电池: 500kW	多种分布式能源的区域供电系统及对大电网的影响研究
25	Sendai Microgrid Project(日本)	燃料电池: 250kW 内燃机: 2×350kW 光伏: 50kW	电池储能	分布式电源和无功补偿、动态电压调节装置的研究与示范
26	Kyotango Microgrid Project (日本)	光伏: 50kW 内燃机: 400kW 燃料电池: 250kW 风机: 50kW	铅酸电池: 100kW	微网能量管理、电能质量控制研究
27	TokyoShimizu Construction Company Microgrid Project (日本)	内燃机: 90、350kW 燃气轮机: 27kW 光伏: 10kW	超级电容: 100kW 电池储能: 420kWh	负荷预测、负荷跟踪、优化调度、热电联产控制的研究
28	Tokyo Gas Microgrid projects (日本)	光伏: 10kW 内燃机: 2×25、9.9kW 风机: 6kW	电池储能	保证微网内电力供需平衡, 实现本地电压控制, 保证电能质量, 减少温室气体排放
29	ERI Microgrid (韩国)	光伏: 20kW 风电: 10kW 柴油发电机: 70kW	电池储能	
30	Central India system (印度)	风电: 2×7.5kW 光伏: 5kW 柴油发电机: 2、5kW	电池储能	为移动电话基站持续提供电力。减少柴油发电机的燃料成本, 减少二氧化碳排放
31	Bulyansungwe Microgrid (非洲)	光伏: 2×3.6kW 柴油发电机: 4.6kW	电池储能: 21.6kWh	为两所宾馆、学校和修道院供电
32	Ile de l'Encois Island Microgrid (巴西)	光伏: 21kW 风电: 3×7.5kW 柴油发电机: 53kW	电池储能	风光柴储独立微网系统
33	西藏阿里地区狮泉河水光储互补微电网项目	光伏: 10MW 水电: 6.4MW 柴油发电机: 10MW	储能: 5.2MWh	光电、水电、火电多能互补; 海拔高、气候恶劣
34	西藏日喀则地区吉角村微电网项目	水电 光伏发电: 6kW 风电: 15kW 柴油应急发电 总装机: 1.4MW	电池储能	风光互补; 海拔高、自然条件艰苦



续表

序号	名称(地点)	能源种类	储能系统	主要特点
35	西藏那曲地区丁俄崩贡寺微电网项目	光伏: 6kW 风电: 15kW	储能系统	风光互补; 西藏首个村庄微网
36	青海玉树州玉树县巴塘乡10MW级水光互补微电网项目	光伏: 2MW(单轴跟踪光伏发电) 水电: 12.8MW	储能: 15.2MWh	兆瓦级水光互补, 全国规模最大的光伏微电网电站之一
37	青海玉树州杂多县大型独立光伏储能微电网项目	光伏: 3MW	双向储能系统: 3MW/12MWh	多台储能变流器并联, 光储互补协调控制
38	青海海北州门源县智能光储路灯微电网项目	光伏: 3MW	锂电池储能: 3MW/12MWh	高原农牧地区首个此类系统, 改变了目前户外铅酸电池使用寿命在2年的状况
39	新疆吐鲁番新城新能源微网示范区项目	光伏(包括光伏和光热): 13.4MW	储能系统	当前国内规模最大、技术应用最全面的太阳能利用与建筑一体化项目
40	内蒙古额尔古纳太平林场风光储微网项目	光伏: 200kW 风电: 20kW 柴油发电机: 80kW	铅酸蓄电池: 100kWh	边远地区林场可再生能源供电解决方案
41	广东珠海市东澳岛兆瓦级智能微网项目	光伏: 1MW 风电: 50kW	铅酸蓄电池: 2MWh	与柴油发电机和输电系统组成智能微电网, 提升全岛可再生能源比例至70%以上
42	广东珠海市担杆岛微网	光伏: 5kW 风电: 90kW 柴油发电机: 100kW 波浪发电: 10kW	储能: 442kWh	拥有我国首座可再生独立能源电站; 能利用波浪能; 具有60t/天的海水淡化能力
43	浙江东福山岛风光储柴及海水综合新能源微网项目	光伏: 100kW 风电: 210kW 柴油发电机: 200kW 负荷: 240kW 海水淡化: 24kW	铅酸蓄电池: 1MWh 单体 2V/1000AH, 共2×240节	我国最东端的有人岛屿; 具有50t/天的海水淡化能力; 储能平抑风光波动, 提高新能源利用率, 辅助柴发维持微网稳定, 储能类型单一, 功能单一
44	浙江南鹿岛离网型微网示范工程项目	光伏: 545kW 风电: 1MW 柴油发电机: 1MW 海流能: 30kW	铅酸蓄电池: 1MWh	全国首个兆瓦级离网型微网示范工程; 能够利用海洋能; 引入了电动汽车充换电站、智能电能表、用户交互等先进技术; 储能用以平抑风光流波动, 提高可再生能源利用率, 减少柴油机发电机运行时间。储能系统功率较小, 能量结构单一
45	三沙市500kW独立光伏发电示范项目	光伏: 500kW	磷酸铁锂电池: 1MWh	我国最南方的微网
46	江苏大丰风电储海水淡化独立微网项目	风电: 2.5MW 柴油发电机: 1.2MW 海水淡化负荷: 1.8MW	铅碳蓄电池: 1.8MWh	研发并应用了世界首台大规模风电直接提供负荷的孤岛运行控制系统



从已有示范工程或示范试验系统来看，储能由于具有能量双向流动能力，能够对电网能量进行快速响应，是微网中的关键技术。由于储能技术在分布式电源及微网中的应用还处于起步阶段，大力开展储能系统在微网中的应用研究具有重要意义。

1.2 储能在微网中的作用

1.2.1 提供短时供电

微网存在两种典型的运行模式，即并网运行模式和孤岛运行模式。在正常情况下，微网与常规配电网并网运行；当检测到电网故障或发生电能质量事件时，微网将及时与电网断开，独立运行。微网在这两种模式的转换中，往往会有一定的功率缺额，在系统中安装一定的储能装置，可以保证在这两种模式转换下的平稳过渡，保证系统的稳定。另外，对于离网型微网，可将白天风电、光伏发出的电力存储到储能系统中，夜间储能系统放电，为用户提供电能。

1.2.2 电力调峰

由于微网中的微源主要由分布式电源组成，其负荷量不可能始终保持不变，并随着天气的变化发生波动。另外，一般微网的规模较小，系统的自我调节能力较差，电网及负荷的波动就会对微网的稳定运行造成十分严重的影响。为了调节系统中的峰值负荷，就必须使用调峰电厂来解决，但是现阶段主要运行的调峰电厂，运行昂贵，实现困难。

储能系统可以有效地解决这个问题，它可以在负荷低谷时储存分布式电源发出的多余电能，而在负荷高峰时回馈给微网以调节负荷需求。储能系统作为微网中必要的能量缓冲环节，其作用越来越重要。它不仅可以降低为满足峰值负荷需求的发电机组容量，同时充分利用了负荷低谷时段的电能。

1.2.3 改善微网电能质量

近年来，人们对电能质量问题日益关注，国内外都做了大量的研究。微网与大电网并网运行时，必须达到电网对功率因数、电流谐波畸变率、电压闪变以及电压不对称的要求。此外，微网必须满足自身负荷对电能质量的要求，保证供电电压、频率、停电次数满足允许的范围。储能系统对于微网电能质量的提高发挥重要作用，通过对储能并网逆变器的控制，可以调节储能系统向电网和负荷提供的有功和无功功率，达到提高电能质量的目的。

对于微网中的光伏或者风电等分布式电源，外在条件的变化会导致输出功率的变化，从而引起电能质量的下降。如果将这类分布式电源与储能系统结合，可以有效解决电压骤降、电压跌落等电能质量问题。在微网的电能质量调节装置，针对系统故障引发的瞬时停电、电压骤升、电压骤降等问题，此时利用储能系统提供快速功率缓冲，吸收或补充电能，提供有功、无功功率支撑，进行有功或无功补偿，以稳定、平滑电网电压的波动。当微网与大电网并联运行时，微网相当于一个有源电力滤波器，能够补偿谐波电流



和负荷尖峰；当微网与大电网断开孤岛运行时，储能系统能够保持微网电压的稳定。

1.2.4 提升分布式电源性能

多数可再生能源诸如太阳能、风能、潮汐能等，由于其本身具有随机性和不可控性，当外界的光照、温度、风力等发生变化时，分布式电源的输出功率随之发生变化，将储能系统应用于微网中，通过分布式电源与储能系统的协同控制，可以平抑风电、光伏等分布式电源出力波动，提高可再生能源的利用率。另外，太阳能发电的夜间、风力发电在无风的情况下，或者其他类型的分布式电源处于维修期间，微网中的储能系统能够发挥过渡作用，储能系统的容量主要取决于负荷需求。

1.3 储能在微网中的关键技术

从当前科学技术的发展和应用角度来看，针对储能在微网研究中的关键问题集中在以下几个方面：①微网运行问题；②微网建模与仿真；③微网中储能配置技术；④微网控制策略；⑤微网能量管理策略。上述问题的研究和解决对于储能系统在微网中的应用、示范、运行和推广都至关重要，下面针对储能系统在微网研究中的关键问题进行归纳总结和综述。

1.3.1 微网运行问题

对于用户来说，微网是一个可定制的电能源，在满足用户多样化电能需求的同时实现增强网络可靠性、降低损耗、支撑局部电网频率、电压等功能；对于大电网来说，微网又是一个可以调度的负荷，该“负荷”能够在短时间内做出响应从而满足调度需要。基于以上特性，微网具有两种典型的运行模式，一种模式是脱离大电网，自主运行，即孤岛（离网）运行模式；另一种模式是与大电网相连的并网运行模式。对应于两种典型运行模式，存在两种过渡状态，一种是微网在正常运行状态下与电网的解列、并列过渡过程；另一种是微网从停运状态转向稳态运行的黑启动过渡状态。微网的典型运行模式和过渡状态间的相互关系如图 1-1 所示。

当大电网运行正常时，微网通过闭合与主网的并网开关从而实现联网运行。此时微网内部的可再生分布式电源向微网中的本地负荷供电，当微网内部分布式电源出力不足时，由主网补充供电；当微网自身出力充裕时，可将多余电能回馈大电网；在主网存在电压/频率跌落时，通过控制实现微网对主网进行补充供电，微网作为独立电源，对大电网的平稳运行起到调节、辅助作用。

当大电网出现故障或因调度需求需要断开并网点开关时，微网进入孤岛运行模式。此时

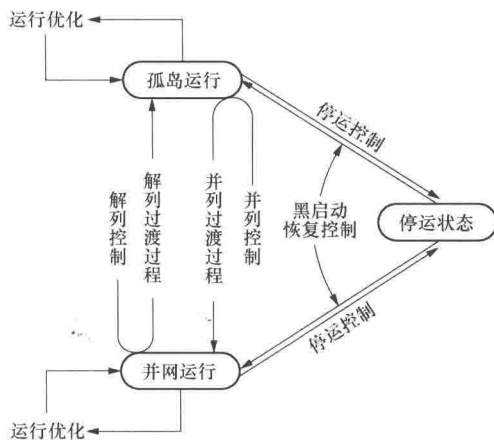


图 1-1 微网状态及转换关系



微网内本地负荷由微网中各分布式电源供电，形成独立的小型电力系统。此时，如果微网内部分布式电源出力能够满足微网本地负荷，则由微网内部可再生分布式电源联合储能系统，实现对网内负荷供电；如果微网内部分布式电源出力无法完全满足微网本地负荷，可以考虑切除微网内的普通负荷（非重要负荷），此时微网仅对网内的重要负荷（敏感型负荷）供电，从而保证重要负荷的不间断供电和微网的供电可靠性。当主网恢复运行或根据调度指令可以恢复并网时，可通过闭合微网与主网的并网点开关恢复并网运行。

1.3.2 微网建模与仿真

对微网进行建模仿真分析，不仅能够预先验证运行控制策略的正确性与合理性，而且可以确保系统实际运行时的安全性、稳定性和可靠性。目前，微网系统的仿真分析主要以单元级和系统级两种形式展开。微网单元级仿真分析主要侧重于对各分布式发电单元的单元结构、各分布式电源控制算法、储能系统控制策略等方面进行建模分析。此类模型的仿真分析，可以保证微网合理规划系统组成及配置、提高可再生能源渗透率和利用率、提高微网运行安全性和可靠性。微网系统级的仿真分析是指在单元级仿真分析的基础上，建立整体的系统运行模型，该模型主要用于研究和分析微网系统各组成部分的出力变化规律、建立系统与各组成单元间的能量流动对应关系、定量描述系统中的瞬时能量关系及流动过程、确定可以保证系统稳定运行的关键性参数。

因此，为保证微网系统运行的经济、安全和稳定，针对各个组成单元的物理特性，分别建立相应的单元级仿真模型和系统模型对微网系统前期配置、拓扑结构确定和控制策略制订是十分必要的。

1.3.3 储能系统配置技术

储能系统的容量对工程经济性以及其平抑效果有很大影响，因此在利用储能系统时，需要考虑其容量配置问题，常用的储能容量配置方法如下：

(1) 以指标最优为目标。相关学者在分析风功率预测误差分布特征的基础上，就电池储能系统的功率和容量对风功率预测考核指标的影响进行了仿真分析，采用截止正态分布法求解了电池储能单元的功率和容量，并将储能系统应用于独立风光微网系统中，就储能系统的容量计算进行了分析，在进行储能容量配置时选取了负荷缺电率作为指标，求取满足指标要求的储能容量。相关研究在考虑储能单元荷电状态等约束的基础上，以减小风电场有功波动为目标进行储能容量计算，使得风电机组输出功率波动能够满足电网接入指标。

(2) 以储能容量最小为目标。相关学者研究了储能单元容量对电网稳定性的影响，并在此基础上提出一种以容量最小为目标的储能优化配置模型，采用饱和控制理论以及内点法进行求解。此外，对光伏功率和负荷功率的预测误差进行了概率统计，并对二者的随机过程进行了分析，采用区间估计法求得储能系统的容量函数，分别就储能集中配置和分布式配置进行了仿真分析，结果表明分布式配置时储能对光伏的补偿效果优于集中配置的补偿效果。王成山等学者为确定储能系统的补偿范围，对分布式发电的频谱进行分析，分析过程中采用了离散傅里叶变换法，在配置过程中考虑了多种约束条件，如



储能充放电效率、荷电状态等,以期得到满足系统输出功率波动率所需的最小储能容量。

(3) 以系统成本最小为目标。以系统成本最小为目标储能系统容量配置的研究,考虑了离网型微网系统中的负荷缺电率等指标,建立了储能单元的成本模型,采用智能算法对储能系统的功率和容量进行优化计算。另外,考虑风光输出功率以及常规机组停运的随机性,建立了系统等可信容量模型,采用蒙特卡洛模拟法求解具有等可信度的风光储容量组合,并从中选出全寿命周期成本最小的风光储组合。此外,部分学者考虑了储能放电深度对其寿命的影响,通过雨流计数法计算储能系统的循环寿命,在此基础上建立了混合储能系统经济成本模型,通过启发式算法求解使得成本最小的滤波常数,进而确定电池储能和超级电容器的容量。

1.3.4 微网控制策略

微网中一般包含着运行特性差异显著的各种各样的分布式电源和储能系统,这些设备通过电力电子装置和电气接口连接到电网的交流母线上与大电网并网运行,又或者在一定条件下主动或被迫离网孤岛运行,但是无论微网运行于何种运行模式下,都需要合理的选择控制策略对微网进行控制,从而保证微网安全可靠的运行。在并网运行时,微网必须在不影响主网运行的前提下保证自身的安全稳定运行,并且为主网提供电压/频率支撑等辅助操作;当微网从并网运行状态转换为孤岛运行状态时,控制系统必须保证微网内部电压和频率支撑,供给或吸收微网出力和负荷之间的暂态功率差额,保证微网自身的安全稳定运行;当微网从孤岛模式转换为并网模式时,控制系统还需要保证微网与大电网的同步连接。

为实现以上控制功能,微电网中的控制研究一般集中在微网单元级控制和微电网系统级控制两个方面。

1.3.4.1 单元级控制

微网中的各分布式单元一般通过电力电子接口逆变器接入电网,目前针对逆变器的控制方法主要有3种,即恒功率控制(PQ control)、恒频恒压控制(U/f control)和下垂控制(Droop control)。

(1) 恒功率控制(PQ control)一般应用于并网运行的分布式电源中,恒功率控制的实质是将有功功率和无功功率解耦后分别进行控制,采用恒功率控制的结果是保证分布式电源输出的有功和无功功率等于其指令参考功率,即当并网逆变器所连接的交流母线的频率和电压幅值在允许阈值内变化时,分布式电源输出的有功和无功功率维持不变。

(2) 恒压恒频控制(U/f control)多应用于处于孤岛运行状态的微电网分布式电源,应用恒压恒频控制可以保证不论分布式电源的出力如何变化,交流母线上的电压和频率保持不变,从而为微网运行提供电压和频率支撑,保证系统的稳定运行。

(3) 下垂控制(Droop control)是模拟发电机组功频静特性的一种控制方法,下垂控制是典型的对等控制,在下垂控制中不需要各分布式发电单元间进行通信就能够实现均衡的负荷功率分配,下垂控制通过模拟与传统发电机相似的有功-频率($P-f$)、无功-电压($Q-U$)之间的下垂特性实现。微网处于孤岛模式运行时,应用下垂控制能够实现有功和无功功率在微网各分布式发电电源间的均衡分配,并且保证微网系统运行中电压



和频率稳定。当微网需要恢复与主网并联运行时,各分布式电源的接口逆变器采用下垂控制可以实现微网与主网的同步,减小由孤岛状态转移到并网状态引起的冲击电流,实现微网孤岛与并网的无缝切换。

1.3.4.2 系统级控制

从整体控制架构上,微网的系统级控制方案主要包括主从控制、对等控制和分层控制3种。

(1) 主从控制一般是指选择恒压恒频控制的分布式单元作为上层主控单元,为微网运行提供电压频率支撑,选择采用恒功率控制的分布式电源作为下层从控单元,主从控制的主要缺点是微网中的主控单元容量会限制整个系统的容量,导致系统扩容障碍;并且从控单元过多地依赖主控制单元,容易降低微网系统可靠性。

(2) 对等控制是指微网系统中的各分布式电源的地位相同,不分主从,采用对等控制的各分布式单元一般应用下垂控制策略,这样可以保证在微网运行切换时不改变各分布式电源的控制方法,保证微源的即插即用,对等控制的优点是扩容方便,可以免去各分布式电源间的通信设备,造价成本低,更易于实现负荷的均衡分配;缺点是微网系统并网时容易因电压不同步问题对电网产生大的冲击,并且系统的抗干扰能力较差。

(3) 分层控制是将一些控制权限分配给微网中各组成单元、各组成单元在微网中央控制器的控制下自治运行的协调控制方法,分层控制能够适应微网分布广、约束多和灵活多变等特征;分层控制是众多方法中较为先进的微网控制方式,通常应用于对供电电能质量要求较高的微网中。

1.3.5 微网能量管理策略

微网与常规电力网络存在较大的区别,其运行方式、采用的能源政策、网络中分布式单元类型和渗透率、负荷特性和并网约束都不同于常规网络。微网系统能量管理的主要目标是在确保微网运行稳定性和经济性的基础上,对微网内部的能量管理进行优化。一方面,要尽可能多且有效地利用可再生分布式能源、减少燃料的使用、保护环境;另一方面,要考虑合理的减少储能单元的出力负担,避免频繁充放电,提高其使用寿命。因此,微网的能量管理系统搭建需综合考虑不同分布式电源的运行成本、实时电价和负荷类型等多方面因素。微网能量管理问题属于多目标、带约束优化问题。其优化的目标一般包括降低经济费用、减少环境污染、负荷优化管理和最大化向配电网输送电能等;约束条件一般包含微网运行状态约束、微网功率平衡约束、微网运行稳定性约束等。当前,在优化算法研究中,主要涉及非线性约束条件的制订和分布式发电设备控制变量的整定等几个方面。

近年来,伴随着智能控制技术的蓬勃发展,基于粒子群算法、遗传算法和蚁群算法的一系列智能优化算法均被扩展应用到微网能量管理之中并取得了较好的效果。因此,制订有效、合理的微网能量管理策略,设计高效、可靠的微网能量管理系统,对保证微网的安全可靠运行具有十分重要的意义。

微网能量管理系统的主要功能包括:采集微网系统本地负荷和可再生能源的预测信息、能源信息、基于实时监控采集的电网信息。通过信息采集与反馈实现电网、分布式电源、储能系统和本地负载间的最优功率匹配;实现各种分布式发电设备在多中工作模