

利用储能系统实现可再生能源微电网 灵活安全运行的研究综述

刘畅¹, 卓建坤^{1*}, 赵东明², 李水清¹, 陈景硕², 王金星¹, 姚强¹

- (1. 热科学与工程教育部重点实验室(清华大学), 北京市 海淀区 100084;
2. 中国华能集团有限公司, 北京市 西城区 100031)

A Review on the Utilization of Energy Storage System for the Flexible and Safe Operation of Renewable Energy Microgrids

LIU Chang¹, ZHUO Jiankun^{1*}, ZHAO Dongming², LI Shuiqing¹, CHEN Jingshuo², WANG Jinxing¹, YAO Qiang¹

- (1. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education (Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China; 2. China Huaneng CO., LTD., Xicheng District, Beijing 100031, China)

ABSTRACT: Energy storage is a key technology to protect the safe and stable operation of microgrids, and has become one of the important measures to promote commercial application of renewable energy microgrids. In this paper, after analyzing the technical characteristics of renewable energy microgrids, the role, classification, design optimization and application of energy storage systems in microgrids were thoroughly reviewed. The results show that a joint optimization method for energy storage and demand response can effectively improve the economy, reliability and comprehensive utilization of energy of microgrid. By comprehensively evaluating energy density, power density, response time and rated power, the applicability of different energy storage technologies in microgrid can be obtained. Energy storage technology has an important application prospect in the flexible operation of microgrid.

KEY WORDS: microgrid; safe and stable operation; energy storage; demand response; optimal configuration

摘要: 储能技术是保证微电网稳定运行的关键技术手段,也是推动可再生能源微电网技术广泛应用的重要措施之一。该文从可再生能源微电网技术特点出发,对储能系统在微电网中的作用、分类、设计优化方法和应用情况进行综述。研究表明,通过储能系统的优化配置和需求响应相结合的控制策略可有效提高微电网的经济性、可靠性以及能源的综合利用率。综合评估能量密度、功率密度、响应时间以及额定功率,

可获得不同储能技术在微电网中的适用性。储能技术在微电网的灵活调峰应用中具有重要的应用前景。

关键词: 微电网; 安全稳定运行; 储能; 需求响应; 优化配置

0 引言

近年来,随着来自能源消耗和环境治理两方面的压力不断增加,人类社会对能源系统的需求也在不断更新。控制电力成本,替换老化的基础设施,改善电力系统的灵活性和可靠性,减少二氧化碳排放、减缓大气环境变化,以及为偏远地区提供可靠的电力支持等越来越高的电力要求,意味着能源结构转型已成为能源革命的关键^[1-2]。因此,风能、太阳能等可再生能源将逐步替代化石能源,不断提高其在能源消费中的比例^[3-4]。然而,大规模部署具有多时间尺度间歇性的可再生能源不仅深刻地影响着电力系统的预测和调度准确性,还可能在与电网进行功率交换时引起运行安全和电能质量问题,进而导致传统配电网的集中式平衡机制无法接纳这些可再生能源^[5-7]。因此,对于因接入大容量可再生能源而产生局域波动和运行安全隐患的电力系统,急需一种既考虑到发电容量充裕度又考虑到发电灵活性的调控技术,以便于对间歇性可再生能源进行运行控制和能量管理^[8]。自进入21世纪以来,关于含有可再生能源的多能源互补一体化系统的研究呈指数上升趋势。微电网(microgrid)技术就是在这样的需求背景之下逐渐成型,最早于1999年由

基金项目: 国家重点研发计划项目(中美清洁能源联合研究中心-政府间国际科技创新合作重点专项)(2016YFE0102500)。

National Key R&D Program of China (CHINA-U.S. Clean Energy Research Center-Advanced Coal Technology Consortium(CERC-ACTC) program)(2016YFE0102500)。

美国电力可靠性技术解决方案协会(the consortium for electric reliability technology solutions, CERTS)对其思想进行了描述和总结,于2002年提出较为完整的定义^[9]。微电网被认为是促进分布式能源友好接入电网的一种有效技术手段,是多能互补集成优化的解决方案之一^[10-12]。

微电网从本质上改变了传统配电网单一电力潮流的拓扑结构,将连接在配电网等级的分布式电源与储能、负荷划分为一个小整体进行协同规划、设计、运行控制以及保护^[13-14],可以满足从大都市到偏远村落等不同区域的能源需求。国家能源局2015年发布的《关于推进新能源微电网示范项目建设的指导意见》中将新能源微电网作为可再生能源和分布式能源发展机制创新的重要方向,为新能源技术创造巨大的发展空间^[15]。

微电网是当前重要的研究热点之一,内容涉及微电网的结构设计、运行控制、电能质量、经济运营、仿真分析、示范工程等诸多研究方面^[16-20]。随着分布式能源、储能装置和直流负荷的逐步渗透并与现有交流电力系统建立深度结合,可以最大程度地满足能源就地消纳、负荷需求响应等个性化需要,使电网规划设计更具灵活性^[6]。储能技术的蓬勃发展对促进可再生能源消纳、提升电力系统灵活性能以及推动微电网技术的广泛应用均具有十分重要的意义。储能系统的使用,实现了与可再生能源发电机组的互补,保证其能够在较大的功率范围内工作,在并网和孤岛模式下维持系统的高效、稳定运行,减缓可再生能源间歇输出所引起的功率波动^[17-18]。为了进一步提高微电网系统的经济效益和环境效益^[19],储能系统的使用范围进一步扩展,如一种由太阳能光伏(PV)、聚光太阳能热(CSP)以及蓄热系统(TES)构成的混合能源微电网,在超过500kW规模的社区内经济性可与大型商业化混合电站相媲美, TES与PV和CSP之间可形成具有易管理性的优势互补,减少或消除单纯使用蓄电池所带来的成本问题。

因此,本文将结合微电网与储能技术的优势与特点,对近年来国内外通过储能技术实现可再生能源微电网安全运行所取得的进展进行系统性的介绍和讨论,并针对储能技术在微电网系统中存在的问题以及未来研究方向进行综合分析展望。

1 储能系统在微电网中的作用

1.1 可再生能源微电网技术特点

微电网实质上是一种配电方法,是由分布式电

源、储能系统、能量转换装置、相关负荷、监控和保护装置等汇集而成的小型发电系统,它能够实现自我控制和管理,以能源的优化利用为导向,依据实际运行环境和经济要求对这些组成单元进行灵活调度、控制并使用,同时也是智能电网的重要组成部分^[21-25]。

图1为可再生能源微电网的组成以及与外部公用电网之间的结构关系图。微电网中的分布式电源可以是风、光、水力、生物质、热电联产、燃料电池等发电系统,一般以可再生能源为主、多种能源协同互补。由于微电网秉承靠近用户侧的构造理念,容量规模通常相对较小。微电网能够独立于公用电网,根据本地供电需求提供自主电力或者以其他形式(如冷、热和天然气等)供给能源。微电网也可以为公用电网提供单点连接,即微电网与公用电网之间可以进行能量交换,电压等级视应用情况而定。然而,微电网的电压和容量等级现如今并没有标准规范,常见微电网的容量规模和电压等级可划分为以下几类^[26-27]: 1) 单用户级微电网,应用于单幢建筑物,容量小于2MW,电压为0.4kV; 2) 多用户级微电网,应用于包含了多种建筑物或多样负荷的区域,容量在2~5MW之间,电压为0.4kV或10kV; 3) 馈线级微电网,适用于公共设施或政府机构,容量约5~10MW,电压等级为10kV; 4) 变电站等级微电网,适用于变电站供电的区域,设计容量可达10MW以上。根据我国配电网发展实际情况,电压一般在35kV及以下,系统容量原则上不大于20MW^[28]。此外,日本学者拓展了美国CERTS协会对微电网的定义范围,将传统电源的独立电力系统也纳入了微电网的研究范畴之内,如日本三菱公司在对微电网进行规模分类时,考虑了发

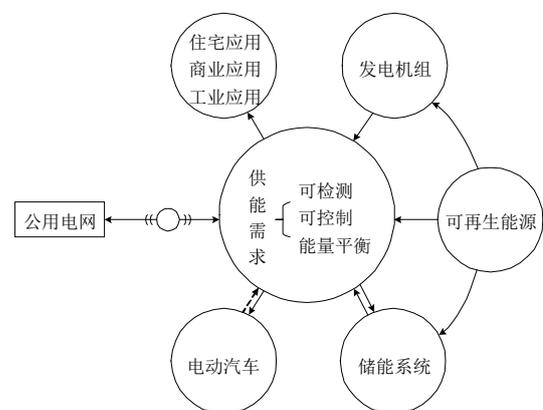


图1 可再生能源微电网组成及公用电网结构关系图
Fig. 1 Topological structure of a microgrid with renewable energy, and access method to a utility grid

电容量为 1000MW 级别的以石油和煤为燃料的工业区应用电力系统^[29]。

20 年来，人们对微电网技术的研究逐步深入，并围绕微电网的控制、保护、经济性以及储能优化配置等关键技术进行展开。随着新能源技术产业的高速发展、可再生能源渗透比例的逐年攀升以及互联网+和工业 4.0 等概念的推进，对微电网的优化控制提出了更高的要求，未来的微电网系统还应具备适应新设备接入和系统扩展的能力，这意味着系统的通用性、鲁棒性以及智能化水平也还需要得到不断的升级^[30-31]。微电网的保护策略与传统配电网的保护策略有着极大的不同，典型表现在^[32]：1) 潮流存在双向流通；2) 微电网在并网和孤岛运行 2 种工作模式下，短路电流存在较大差异；3) 微电网的容量和惯性相对较小，且含有分布式电源，需要更短的切除故障时间；4) 微电网的拓扑结构会根据微电网内的运行控制和能量管理需求而发生变化。因此，如何在传统配电网的保护技术基础之上进行改造、优化和升级，使之具有更高度的故障识别技术、更可靠的通信网络、更高速的信息传输速率，是微电网保护研究的关键内容。此外，也要考虑发电机和负荷的容量、发电机类型、运行方式以及设计结构等可变因素对微电网保护所产生的影响。经济效益是微电网在设计、建设和运行过程中都必须考虑的问题之一，也是评估微电网发展可行性的关键指标之一。为了保证微电网的供电可靠性，需要相应地提高系统设备的安全性、稳定性和准确性，而这又意味着经济成本投入的提高。所以，微电网待解决的经济效益问题主要集中在系统的优化配置和经济性调度上^[33]。

1.2 储能技术对可再生能源微电网的作用

由于微电网受到系统内可再生能源的随机性、间歇性、不确定性的影响，以及系统在出现故障时通常需要切断与电网之间的连接，这些都势必导致了微电网需要通过合理的规划储能系统与可再生能源之间的集成利用，以实现提高系统的供电可靠性的目的。储能系统在微电网的运行方面所贡献的功能包括^[34-36]：1) 维持微电网运行的稳定。当微电网中间歇性能源存在电能质量问题或检测到电网故障时，储能设备可以为用户提供短时备用能量，使机组出力与预测值相匹配，使具有间歇性的能源可作为可调度能源运行；2) 参与调频。确保可再生能源微电网的能量输出与需求之间达到平衡；3) 参与调峰。当微电网中分布式能源的总出

力大于负荷需求时，储能系统可以对富余的能量进行储存，避免能量的浪费；当微电网中分布式能源的总出力小于负荷需求时，储能系统可将储存的能量释放出来，消除或改善能量短缺的状况，提高微电网的供电能力，起到系统调峰的作用。除此之外，储能系统的优化配置，尤其是规模尺寸设计，对于微电网系统的建设投资与长期运营也具有重要的影响，合理的储能尺寸设计能够有效改善微电网系统的运营成本^[37]。图 2 所示为储能系统对可再生能源微电网整体运行的作用关系示意图，其中配置储能设备时直接供电曲线指的是公用电网与可再生能源机组输出功率直接用于供电的部分。

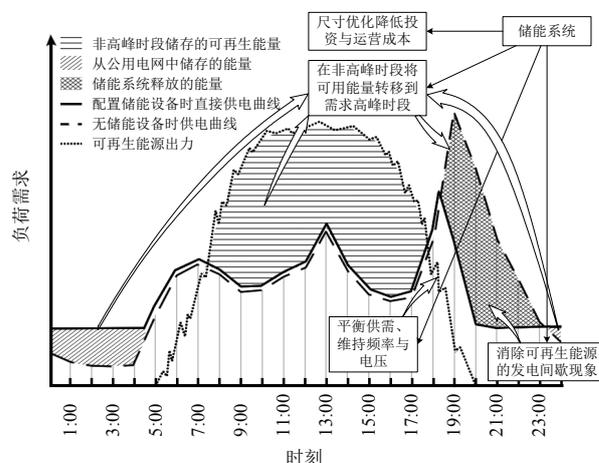


图 2 储能系统对微电网整体灵活运行的平衡作用
Fig. 2 Key roles of energy storage systems on the flexible operation of the microgrid

随着微电网中受控设备数量的逐步增多，在实现微电网“灵活、可靠、可接入、经济”运行的设计和策略研究过程中，储能技术的优化配置从中起到了核心纽带作用，它在不同程度上联结了公用电网、分布式能源、用户侧以及系统的整体设计。通过综合考虑各项设备以及储能技术的特性，选择存储类型、寿命、经济效益、环境效益以及容量相匹配的储能装置，并将其体现在微电网的运行优化目标和约束条件上，有助于实现系统的准确灵活控制，提高可再生能源的利用率和微电网的整体运行效率。

1.3 微电网中储能技术的应用现状

随着微电网技术的不断发展，微电网的结构组成和应用目的是多样化的，因此具有不同效用的储能设备被灵活地运用其中。近年来，欧洲、北美、拉美、非洲以及包括我国在内的东亚地区均开展了微电网的相关示范工程研究，其中美国居于领先地位，约占全球微电网数量的 50%^[38]；欧洲和日本也

是开展微电网研究和示范工作较早的地区,欧洲于2005年提出了“Smart Power Networks”的概念,针对分布式能源的集成、微电网接入、配电网的协调与控制等内容开展了重点研究,相继建成了一批微电网示范工程;而日本则着重于解决能源供给多样化、减少污染以及提升电力在自然灾害下的可靠性等方面的研究。在我国,微电网示范项目主要应

用于城市园区、边远地区以及海岛等地区^[23],依托于863计划立项了近十个微电网方面的研究课题;“十三五”期间,依靠各项国家政策和标准的发布与实施,28个新能源微电网示范项目获批。截至2018年7月,全国已有9个新能源微电网示范项目投入运营,另有8个项目在建^[39]。

表1为微电网与储能系统结合的典型项目情

表1 含有储能系统的已建及在建微电网项目

Tab. 1 Existing and under construction microgrid projects that are equipped with energy storage system

项目 No.	项目/位置/机构	储能设备	电源组成	储能系统实现功能				储能设备 储能容量 量级/(kW·h)	规模	相同/相似 类型微电网 (参考文献)	
				能量 平衡	调峰 调频	电网 可靠	清洁能 源利用 低碳				
1	Mannheim-Wallstadt/ 德国/欧洲 FP6 ^[40]	飞轮储能	热电联产、光伏、 燃料电池	√	√	√	√	1.2kW	居民 生态庄园	[40]	
2	Milford 微电网/美国/ 施耐德电气 ^[41]	蓄电池	光伏、燃气轮机、 柴油发电机	√	√	√		30kW	示范项目	[42]	
3	Baikampady Mangalore 微电 网/印度/SELCO 基金会 ^[43]	蓄电池	光伏	√		√	√	200Ah×8	社区 示范项目	[44-46]	
4	微电网中试装置/韩国/韩 国电子技术研究所 ^[47]	蓄电池	光伏、风电、风-光混 合系统、柴油发电机	√	√		√	10	中试装置	[48-53]	
5	集成微电网试验系统/ 中国浙江/浙江省电力 试验研究院 ^[54]	蓄电池、 飞轮储能	风电、光伏、双馈感 应发电机、柴油发电 机	√	√	√	√	100	试验项目	—	
6	天津大学微电网试验台/ 中国天津/天津大学 ^[55]	全钒液流电池、飞轮 储能、超级电容、压 缩空气储能	光伏、风电、质子 交换膜燃料电池、 冷热电联合循环	√	√	√	√	100	试验平台	—	
7	Santa Rita 监狱微电网/San Francisco/美国能源部 ^[56]	锂电池	光伏、燃料电池、柴 油发电机	√		√		1000	大型 示范项目	[57-59]	
8	Hachinoe 项目/日本青森县 八户市/日本新能源产业技术 综合开发机构 ^[40]	铅酸蓄电池	生物质(树木)沼气发 动机、光伏、风电、 燃木锅炉、燃气锅炉	√		√		100	市政 示范项目	[40]	
9	Lolland Hydrogen Community/ 丹麦/Lolland 市政府、IRD 燃料电池公司以及波罗的 海解决方案公司 ^[60]	储氢	热电联产、燃料电池				√	√	25m ³	社区 示范项目	—
10	SPIDERS/美国/美国国防部、 能源部、国土安全部 ^[61]	双向电动 汽车充电器	光伏、柴油发电机	√		√	√	—	军方 示范项目	—	
11	仙台微电网示范工程/日本 仙台/日本新能源产业技术 综合开发机构 ^[62]	天然气 (储存或输送)	燃气轮机、 燃料电池、光伏	√		√		— (天然 气管道)	示范项目	[58,63]	
12	TB-MMEG/中国合肥/ 合肥工业大学 ^[64]	电池组、超级电容器	光伏、风电、燃料电 池、模拟火电、 模拟水电	√	√	√	√	—	实验平台	—	
13	LABEIN's Commercial feeder/ 西班牙 Derio ^[65]	飞轮储能、超级 电容、蓄电池	光伏、风电、柴油发 电机、微型燃气轮机	√	√	√		10	中试装置	[66]	
14	天津生态城动漫公园/中国天 津/中国政府 ^[67]	蓄电池、蓄热蓄冷、 电动汽车充电器	冷热电联产、光伏、 地源热泵	√		√	√	√	10-100	示范项目	—
15	El Hierro 微电网/ 西班牙/ABB ^[68]	抽水蓄能	风电、水电、 柴油发电机	√			√	581 Mm ³	岛屿示范 项目	—	

况，发展趋势具有以下几个特点：1) 微电网仍处于研发-示范项目阶段；2) 储能技术在微电网示范项目中还没有得到 100%的覆盖率，具有较大的上升空间；3) 微电网示范项目中可再生能源部分的设计主要以风能、太阳能光伏和水电为主，其他多种可再生资源的优化整合还未进入示范阶段；4) 微电网示范项目中传统能源部分主要依靠热电联产机组和柴油发电机，其中柴油发电机作为微电网的紧急备用电源；5) 微电网项目中储能设备大多采用蓄电池，其中又以铅酸蓄电池和锂电池为主要被选类型，其他储能系统的相关理论研究尽管已有很多，但在项目建设方面被采用的还很少。

2 储能系统及其容量优化方法

2.1 储能技术分类

储能技术作为微电网的一个重要的功能单元可以有效地解决可再生能源高比例应用时对电网带来的负面影响，不仅可以用来削减或者消除发电和需求之间的不匹配，解决需求预测的不确定性，

对微电网的安全性运行具有重要意义，还为移峰填谷提供了必要的手段，在微电网中具有极大的应用空间。主要应用于可再生能源系统的能量存储装置，按照储能形式分为化学储能(如储氢、储甲烷)、电化学储能(如液流电池、铅酸电池、锂离子电池)、机械储能(如抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能)、电磁储能(如超级电容、超导磁储能)以及蓄热(如熔盐蓄热、导热油蓄热)等^[69-75]。从功能方面还可将储能装置分为能量型储能和功率型储能，能量型储能以蓄电池和压缩空气等储能装置为代表，功率型储能以超级电容和超导磁储能装置为代表^[75-76]。能量型储能装置具有较高的能量密度，可进行较大容量的能量存储，但放电时间相对比较长，且循环寿命相对较短；功率型储能装置则可在功率密度和响应速度方面具有较好的表现，同时具有相对较长的循环寿命^[77]。将 2 种在功能上形成互补的储能装置组成混合储能系统，由此获得更优良的运行性能和经济效益，也是储能技术的研究方向之一^[78]。表 2 综

表 2 储能系统技术特点及发展现状

Tab. 2 Technical characteristics and the current situations of energy storage systems

储能技术	超级电容	超导磁储能	飞轮储能	抽水蓄能	压缩空气储能	蓄热	铅酸蓄电池	锂离子	钠硫电池	液流电池	氢气	甲烷
分类	存储	功率型储能				能量型储能						
储存时间	s-min				hr-weeks			weeks-month				
容量范围	Wh-kWh		MW-h-GWh			kW-h-GWh			MW-h-TWh			
能量密度 (Wh/l)	10-30 ^[70]	0.2-2.5 ^[71] , ~6 ^[70]	20-80 ^[72]	0.27-1.5 ^[73] , 0.5-1.5 ^[74] , 1-2 ^[70]	3-12 ^[75] , 30-60 ^[76]	80-120, 120-200, 200-500 ^[77]	50-100 ^[78]	200-500 ^[79]	150-300, 200-350 ^[80]	16-60 ^[81] , 20-70 ^[82]	500-3000 ^[83]	2000-7200 ^[84] , 1500-4000 ^[85]
功率密度 (W/l)	2.5-15 ^[86] , 15000-50000 ^[70] , 100000+ ^[79]	1000-5000 ^[87]	1000-2000 ^[72] , 5000-15000 ^[88]	0.5-1.5 ^[74]	0.5-2 ^[75]	80-120 ^[89]	10-400 ^[81]	1500-10000 ^[79]	120-160 ^[79] , 140-180 ^[80]	0.5-25 ^[79]	—	—
循环效率/%	65-75 ^[81] , 77-83 ^[70] , 84-95 ^[82] , 90-97 ^[88]	80-90 ^[89] , 95-98 ^[82]	80-95 ^[72]	65-85 ^[74] , 87 ^[70]	60-70 ^[75] , 75-95 ^[76]	30-60 ^[89] , 50-90, 75-100 ^[77]	63-90 ^[83]	75-90 ^[81] , 90-97 ^[79]	68-75 ^[80] , 70-90 ^[79]	60-85 ^[79]	30-50, 60-80 ^[79]	40-60, 25-35 ^[79]
响应时间量级	ms ^[79]	ms ^[79]	ms-s ^[79]	min ^[79]	min ^[79]	—	ms ^[79]	ms ^[79]	ms ^[79]	ms ^[79]	s-min ^[79]	min ^[79]
寿命(年)	15-20 ^[79] , 20+ ^[85]	15-20 ^[79] , 20+ ^[85] , 50000+ cycles ^[81]	15-20 ^[79] , 20000+ cycles ^[81]	30-60 ^[79] , ~80 ^[70]	40 ^[81] , 20-60 ^[85]	5-40 ^[85]	5-15 ^[79]	5-20 ^[79] , 3500 cycles ^[81]	10-15 ^[79] , 2000 cycles ^[81]	5-15 ^[79] , 15-20 ^[81]	5-15 ^[79] , 20-30 ^[79]	5-15 ^[79] , 30 ^[79]
单位能量成本 (\$/kWh)	250-350 ^[81] , 300-2000 ^[79]	1000-10000 ^[79]	380-2500 ^[81] , 1000-5000 ^[79]	5-100 ^[79] , 500-1500 ^[81]	2-200 ^[79] , 72-240 ^[88] , 100-350 ^[81]	0.1-10, 8-100 ^[79] , 3-50 ^[85]	200-400 ^[79] , 150-1300 ^[81]	600-2500 ^[79] , 273 ^[87]	300-500 ^[79]	120-1000 ^[79] , 150-1300 ^[81]	1-10 ^[79] , 800-1200 ^[81]	1-10 ^[79]
单位功率成本 (\$/kW)	100-360 ^[79]	200-350 ^[79]	250-350 ^[79]	600-2000 ^[79] , 2500-4300 ^[81]	400-2000 ^[79]	1000-3000, 3400-4500, 6000-15000 ^[79]	300-600 ^[79]	1200-4000 ^[79]	1000-3000 ^[79]	600-1500 ^[85] , 330-2500 ^[79]	1900-6300 ^[79]	3500-5000 ^[79]
运维成本	5-6 \$/kW/yr ^[88]	8-26 \$/kW/yr ^[88]	20 \$/kW/yr ^[79] , 7.5-8 \$/kW/yr ^[88]	13.3 \$/kW ^[89] , 高 ^[88]	2-4 \$/kW/yr ^[88] , 19-25 \$/kW/yr ^[89]	很低 ^[88] , 0.005 \$/kWh ^[90]	50 \$/kW/yr ^[79]	0.46 \$/kW ^[85]	80 \$/kW/yr ^[79]	70 \$/kW/yr ^[79]	—	—
发展阶段	示范-商业前 ^[79]	示范-商业前 ^[79]	商业 ^[79]	成熟 ^[79]	研发-示范, 商业 ^[79]	研发-商业 ^[79] , 研发-成熟 ^[79]	成熟 ^[79]	商业 ^[79]	商业 ^[79]	示范-商业 ^[79]	研发-商业前 ^[79]	研发-示范 ^[79]

述归纳了不同储能系统的技术特点及发展现状,目前多数储能系统的技术经济性还需得到进一步的提高,因此与达到全面商业化推广这一目标之间还有一定的距离。

2.2 储能系统容量优化方法

2.2.1 容量规划

储能系统的容量对微电网的整体经济性和运行安全性都具有很大影响,需要在微电网规划设计阶段进行优化设计。因为过小的储能系统无法实现微电网电能质量和整体运行性能的提升,而过大的储能系统则对微电网施加更高的投资和维护成本^[92]。微电网系统中电源种类、数量及结构具有多样性,设备功能也不尽相同,且负载既可以是电负载,也可以是热负载,因此储能系统的容量规划与微电网的运行策略密切相关,运行策略决定了微电网系统内分布式单元的运行时序和启停时长,进而影响着储能系统的储存和释放能量行为。

1) 运行策略。

微电网具有并网和离网2种网络拓扑,并且不同供能需求的微电网运行策略也将有所差异。

① 并网型微电网运行策略。

在并网模式下的微电网通常采取可再生能源优先发电(或提供其他形式的能量)给用户,当可再生能源无法满足用户的负荷需求时,再根据实际情况选择利用公用电网、备用电源(如燃机、柴油机等)或储能设备来为用户进行能量补给;当新能源能量产生剩余时,也将根据微电网的实际情况选择向公用电网进行售电或者向储能设备进行储能^[93-94]。如,当微电网内可再生能源机组由于气象因素无法满足用户的负荷需求时,启动储能设备来平衡微电网内的能量供需,若储能设备也无法满足用户的用能需求时,再通过向公用电网购买电力进行补偿供电^[95]。在文献^[96]中所提到的并网型微电网系统中,储能设备的充放电行为取决于当时的电价情况,当电价较低时,微电网内的缺口电力从公用电网购买获得,冗余的电量则通过储能设备储存起来;当电价较高时,匮乏的电力通过储能设备放电获得,而可再生能源冗余的电量可出售给公用电网。当微电网内还有冷、热需求时,则可能还存在储冷和储热设备,其启停原则与蓄电相类似,即能量富余时进行存储,能量匮乏时进行释能。对于冷热电联产系统,电能和冷/热能通常存在相互耦合的关系,储冷/热装置能够对其之间的解耦以及提升微电网系统内灵活性具有积极作用^[97]。

② 离网型微电网运行策略。

在离网模式下,可再生能源微电网的电力负荷主要由可再生能源提供,但由于系统内没有公用电网作为备用支撑,则通常会导致对储能装置的容量需求相对更大,运行策略上着重考虑系统的安全性和可靠性^[98-99]。

以负荷跟随策略为例^[100],在可再生能源总输出功率不能满足负荷需求时,功率缺额由储能系统释放能量提供;当可再生能源出力大于负荷需求时,多余的能量通过储能系统进行储存。当储能系统所储存容量也无法满足负荷需求时,才启用备用电源。整个系统的联合出力可以满足对计划出力的实时跟随。在需要综合考虑能源系统响应特性时,混合储能系统的应用满足了功率和响应时间的需求^[101],当系统中电源设备的输出功率与计划出力之间存在差值时,首先判断差值的正负,当差值为正表示电源设备出力富余,需要储能设备进行充电,此时富余电量优先储存在功率型储能设备当中,功率型储能充满却仍有电量富余时,再储存在能量型储能设备中;当差值为负表示电源设备无法满足负荷需求,需要储能设备进行放电,利用功率型储能设备的可用容量进行快速的供电,并随着放电时间的延长逐渐切换到能量型储能设备的供电模式,之后功率型储能停止工作。在独立自治微电网的运行控制中,储能系统和备用发电机组的运行控制还需要考虑气象的季节性变化,例如 Flinders 岛在春夏季时,负荷需求因可再生资源情况较好由可再生能源与储能设备提供,柴油发电机以低功率运行;从秋季至冬季,可再生能源出力逐渐降低,大部分负荷需求由柴油发电机提供^[102]。当风、柴油、储能微电网以及相同或相似类型微电网中以柴油发电机作为主电源时,系统将优先启用柴油发电机来弥补风电(或其他可再生能源)以满足功率需求,储能系统将在柴油发电机也无法满足输出需要时,启动并参与功率调节,该情况下的储能系统容量相对较小^[103]。

2) 储能系统的充放电运行过程。

① 功率缺额。

功率缺额即为微电网系统中电源设备的输出功率与负荷需求之间的差值,其大小决定了储能系统的运行情况^[104]。因此,功率缺额可表述如下:

$$\Delta P(t) = \sum_{i=1}^n [P_i(t)] - P_{\text{ref}}(t), \quad n < m \quad (1)$$

式中 $P_i(t)$ 为微电网内分布式电源 i 在 t 时刻的输出功率, $P_{\text{ref}}(t)$ 表示微电网在 t 时刻的负荷需求。当 $\Delta P(t) > 0$ 时, 储能系统考虑是否储存能量; 当 $\Delta P(t) < 0$ 时, 储能系统考虑是否释放能量。

② 储能系统充、放电荷电状态(以蓄电池为例)^[105]。

充电:

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \frac{P_{\text{ES}}(t) \cdot \eta_c \cdot \Delta t}{E_{\text{ES}}(t-1)} \quad (2)$$

放电:

$$SOC(t) = SOC(t-1) - \frac{P_{\text{ES}}(t) \cdot \Delta t}{\eta_d \cdot E_{\text{ES}}(t-1)} \quad (3)$$

式中: $P_{\text{ES}}(t)$ 为储能系统在 t 时刻的运行(充放电)功率; $SOC(t)$ 为 t 时刻储能系统的荷电状态; Δt 为充电(或放电)时间; η_c 为储能系统储能效率; η_d 为储能系统释放能量效率。需要注意的是这里没有考虑储能设备的自放电率。

③ 储能容量。

系统中电源设备的输出功率与计划出力之间的差值 $\Delta P(t)$ 决定了储能系统的充、放电运行模式, $\Delta P(t)$ 与坐标轴之间所围成的面积记为参数 $\Delta E(t)$, 其正负分别表示储能系统处于充电状态和放电状态。在时间区间 T 内, 储能系统需要储存(或释放)的电量总量为 $E(T)$, $E(T)$ 的表达式为:

$$E(T) = \int_t^{t+T} \Delta E(t) dt \quad (4)$$

储存的能量形式除了电之外还包括储冷/热和储气, 其中冷/热和气体储量可分别根据使用情况进行功率到体积的换算。

2.2.2 目标函数

考虑到储能系统对微电网运行的经济性和可靠性的影响, 以及在改善可再生能源利用率方面的积极作用, 储能系统的优化配置目标一般可分为经济性目标、可靠性目标和能源利用率目标等^[27,106-111], 见图 3。

在已有研究中, 经济性常作为储能系统容量优化的单一优化目标, 以投资及运行成本最小化或运营效益最大化为优化目标建立数学模型^[107-108]。文献[109]中选取微电网运行成本最小化作为优化目标, 基于可再生能源孤立微电网开展了优化调度研究, 并通过数值分析评估了优化框架的有效性。文献[110]中以等效供电成本最小作为优化目标, 提出了一种遵循储能单元荷电状态日前计划的微电网能量优化调度方法, 有效将微电网的日供电成本降

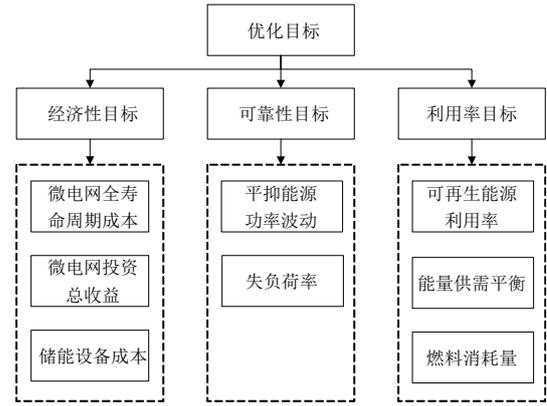


图 3 储能系统的优化目标

低了 30% 以上。此外, 一些研究也通过多目标来进行微电网系统中的容量优化。文献[111]在对微电网储能系统进行优化配置的过程中, 同时关注了微电网的投资成本、可再生能源功率波动平抑情况和能量供需平衡情况。文献[48]在微电网的储能系统优化设计过程中兼顾了柴油发电机运行成本最小化、可再生能源利用率最大化和储能系统使用寿命最大化 3 个优化目标。还可以根据能源利用要求同时建立环境排放最小或能源利用率最大等目标函数^[112-113]。

在储能系统的容量优化过程中, 根据微电网的实际结构、分布式能源能量补偿需求的不同, 模型中优化目标和运行策略会产生一定的差异, 进而影响优化的结果。

系统的投资及运营成本最小化是当前储能系统设计优化的主要目标之一, 该优化目标包括前期建设投资成本 C_1 和后期微电网运营成本 C_2 两个主要部分, 其中前期建设投资包括微电网系统内各分布式单元的建设与采购成本, 储能装置容量规模的大小将影响这一部分成本, 旨在通过该优化目标寻找储能装置的最佳设计尺寸; 后期运营则包括微电网系统内各组成部分的运行和维护成本、燃料成本、装置替换成本、环境补偿成本、微电网与公用电网之间的交易成本、以及当系统内出现欠电或弃电时的惩罚成本, 微电网通过对该部分成本进行优化来实现储能及其他分布式设备在调度期间内提供可控负载, 并能够符合运行约束^[114-115]。

目标函数:

$$\min C = \min(C_1 + C_2) \quad (5)$$

式中:

$$C_1 = C_{\text{INI}} \quad (6)$$

$$C_2 = C_{\text{OM}} + C_{\text{FUEL}} + C_{\text{REP}} + C_{\text{EM}} + C_{\text{GRID}} + C_{\text{PEN}} \quad (7)$$

C_{INI} 表示初始成本; C_{OM} 、 C_{FUEL} 、 C_{REP} 、 C_{EM} 、 C_{GRID} 和 C_{PEN} 则分别表示微电网的运维成本、燃料成本、

替换成本、环境补偿成本、与公用电网的交易成本以及惩罚成本, 计算式分别为:

$$C_{\text{INI}} = \sum_{i=1}^N C_i^{\text{ini}} \quad (8)$$

$$C_{\text{OM}} = \sum_{i=1}^N C_i^{\text{om}} \quad (9)$$

$$C_{\text{FUEL}} = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot F_i \quad (10)$$

$$C_{\text{REP}} = \sum_{i=1}^N \beta_{i,t} \cdot R_i \quad (11)$$

$$C_{\text{EM}} = \sum_{j=0}^M \mu_j \cdot C_j^{\text{em}} \quad (12)$$

$$C_{\text{GRID}} = \sum_{k=0}^Q \gamma_k \cdot E_k^{\text{grid}} \quad (13)$$

$$C_{\text{PEN}} = \sum_{k=0}^Q \lambda_k \cdot E_k^{\text{pen}} \quad (14)$$

式中: N 表示微电网中设备数量; C_i^{ini} 、 C_i^{om} 分别为设备 i 的初始成本和运维成本; α_i 和 F_i 分别表示设备 i 使用的燃料单价和燃料用量; $\beta_{i,t}$ 和 R_i 分别表示设备 i 需要更换时当时的市价和运营时间范围内需要更换的次数; M 代表污染物的数量, μ_j 和 C_j^{em} 分别代表污染物 j 的排放量和排放惩罚金额或治理成本; Q 代表时段的数量情况, γ_k 、 E_k^{grid} 、 λ_k 和 E_k^{pen} 则分别代表时段 j 内电网的交易价格、微电网与电网交易的电量、欠电或弃电的单位惩罚金额以及欠电或弃电量。

根据微电网系统运行场景的不同, 目标函数中各项的取值与计算方法也将不同, 例如微电网为自治微网时, 与公用电网之间不存在电力交易, 此时 C_{GRID} 项可取值为零。在已有的优化研究中, 时间尺度的选择范围较宽, 包括一天、一年以及全寿命周期, 时间尺度的选择主要根据负荷特点、发电构成以及系统寿命等影响因素进行综合考核。文献[116]中选择调度周期内的系统总发电成本最小化作为优化目标, 其中调度周期设为一天(24h); 文献[117]中选择年运营成本最小化作为优化目标; 文献[101]中选择微电网全寿命周期作为系统优化目标的时间尺度。优化时间尺度也将影响着目标函数中各部分成本的计算。

2.2.3 约束条件

1) 分布式能源系统输出功率约束:

$$P_{i,\min} \leq P_i(t) \leq P_{i,\max} \quad (15)$$

式中 $P_{i,\max}$ 和 $P_{i,\min}$ 分别为分布式电源 i 输出容量的

上下限。

2) 储能系统充放电功率约束:

$$P_{c,\min} \leq P_{\text{ES}}(t) \leq P_{c,\max} \quad (16)$$

$$P_{d,\min} \leq P_{\text{ES}}(t) \leq P_{d,\max} \quad (17)$$

式中 $P_{c,\max}$ 、 $P_{c,\min}$ 、 $P_{d,\max}$ 和 $P_{d,\min}$ 分别为储能系统的充、放电功率上下限。

3) 储能系统充放电容量约束:

$$E_{\text{ES},\min} \leq E_{\text{ES}}(t) \leq E_{\text{ES},\max} \quad (18)$$

式中: $E_{\text{ES}}(t)$ 为 t 时刻储能系统所储存的能量; $E_{\text{ES},\max}$ 和 $E_{\text{ES},\min}$ 分别为储能系统所储存能量的上下限。

4) 设备出力变化约束^[118]:

$$|P_i(t+1) - P_i(t)| \leq PR_{i,\max} \quad (19)$$

式中 $PR_{i,\max}$ 为设备 i 在相邻时刻内输出功率的最大变化量。

2.2.4 优化算法

在分布式能源系统及其储能单元容量的优化过程中, 常见的优化算法包括粒子群优化算法^[119-120] (particle swarm optimization, PSO)、遗传算法^[95,106] (genetic algorithm, GA)、改进型非支配排序遗传算法 (nondominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)^[121]等, 按照算例的实际情况以及算法的自身特点可进行算法的选择。其中, 粒子群优化算法结构简单、收敛速度快且易实现、智能化, 计算过程中能够根据多维约束条件通过迭代来寻求最优解, 已被广泛应用于求解电力系统的负荷经济分配、电网规划等优化问题当中。

3 储能系统和负荷需求响应联合优化

3.1 负荷需求响应在微电网中的应用

在微电网中, 由于负荷曲线与可再生能源出力曲线在时序上的较大差异, 以及考虑到某些可控机组和储能设备的响应速率、寿命限制、应用成本等影响因素, 使得仅仅依靠发电侧来确保微电网系统安全、稳定运行的经济性和可实施性相对较差^[122]。因此, 除了在供电侧引入储能系统来解决系统的安全稳定运行之外, 在需求端通过需求响应(demand response, DR)来引导和改变用户侧的固有电力消费模式, 从而使得用户的用能行为和消费习惯尽可能地贴近可再生能源的出力, 其中有一定比例的负载被认为在某段时间范围内是灵活或可转移的^[123]。根据美国能源部于 2005 年制定的能源政策, 需求响应是通过诸如财务激励或教育等方法, 促使用户改变对能源的需求的一种服务机制^[124]。实

际上是指利用负荷侧参与电力调整,将高峰期的负荷转移到低谷期,形成供需两侧的互相适应,促使微电网的运行更可靠、更高效,同时兼具更低的经济成本,是电力系统需求侧管理的重要衍生物。若将储能系统与需求响应结合起来予以充分利用,可达到进一步优化微电网的用能模式的目的。

目前,参与微电网运行优化的需求响应机制主要有 2 种,一种是根据用户对各个时段电价的差异来主动增加或减少负荷,以获取一定的用电经济性,被称作价格型需求响应(price-based demand response);另外一种则是根据用户对负荷转移激励的响应程度来调整负荷的大小,以赚取相应的负荷转移补偿,被称作激励型需求响应(incentive-based demand response)。价格型需求响应机制中所遵循的电价制定机制主要分为 3 种,分别是分时电价(time of use pricing, TOU)、实时电价(real time pricing, RTP)和尖峰电价(critical peak pricing, CPP)。其中分时电价是较为常见的一种电价策略,主要是在用电高峰时段适当提高电价,在低谷时段适当降低电价,以降低负荷峰谷之间的差值来达到削峰填谷的作用;实时电价会根据当前的供电成本进行更新,用户在一定的提前时间段里可获取由信息采集系统所反馈的电价信息;尖峰电价是分时电价和实时电价相结合的一种机制,在供电尖峰时期采用尖峰电价,在非尖峰时期则按分时电价机制进行电价的制定^[104]。激励型需求响应策略通常以用户与需求响应实施机构签订合同的形式来执行,在合同中约定需求响应的相关内容,包括削减用电负荷大小、核算标准、响应持续时间、合同期内的最大响应次数等,以及提前通知用户执行响应措施的时间、补偿或电价折扣标准、违约惩罚措施等。激励型需求响应政策包括直接负荷控制(direct load control)、可中断负荷(interruptible load)、需求侧竞价(demand side bidding)、紧急需求响应(emergency demand response)、容量市场(capacity market)和辅助服务等(ancillary services market)^[125]。

国内外针对价格型需求响应和激励型需求响应均已开展了较为深入的研究。文献[122]从微电网的经济性角度出发,提出并建立了一种动态分时电价机制,分析了价格型需求响应特性对微电网经济效益和优化配置的影响。通过仿真分析证明了价格型需求响应能够有效促进可再生能源发电消纳,优化储能设备的容量配置,使微电网的经济效益得到更进一步的提高。文献[126]提出了一种新的控制算

法,用于联合微电网的需求响应和热舒适度优化,在配备储能设备和可再生能源的前提下,即使在可再生能源的间歇性行为面前,仍确保可再生能源和储能设备得到了更充分地利用。在储能设备规模有限的情况下,文献[127]中考虑了采用需求响应的方式来实现含有可再生能源的独立电力系统的灵活性运行,消费者可根据价格与响应之间所构成的弹性关系对负荷需求转移做出决策,进而改进由于季节性用能高峰和可再生能源难以跟随负荷曲线而引发的调峰难度提高、调峰成本增加等问题,研究结果还可证明,需求响应可以在极端天气有效地减少系统的调峰成本。文献[128]中以用户收益率最大为目标,提出了实施激励型需求响应的微电网负荷削减策略,并通过求解用户实际负荷削减量和频率、概率、电力电量 3 类可靠性指标,评估激励型需求响应对微电网运行可靠性的影响,结果表明激励型需求响应能够有效实现配电网的削峰填谷目的,改善配电网运行可靠性指标。这里需要注意的是,储能系统的配备是实施激励型需求响应微电网负荷削减策略的条件之一。

3.2 储能系统和负荷需求响应联合优化策略

从需求响应的工作特点可以看出,其对应于负荷的处理方式倾向于从市场的角度,实现的前提是电力市场的开放性和实时价格的可实现性。采用需求响应的调控策略对微电网进行优化,可在一定程度上释放储能设备的工作压力,提高微电网中可再生能源渗透率以及微电网系统的经济性^[124]。本文以实时电价的需求响应机制为例,针对联合优化方法进行介绍。

首先,假设微电网已经配备了相关的智能电网技术,具备实现需求响应计划所必须的基础设施,如具有波动和不确定特性的可再生能源机组、储能设备、需求响应服务器、需求响应运行管理系统、需求响应聚合系统以及响应负载等,主要可实现对负荷需求和需求响应事件进行发布、监测、聚合、调度等工作环节^[129]。

其次,除了负荷曲线、环境参数以及机组实际出力数据等输入参数之外,还需要充分考虑如何合理制定电价的定价策略以及微电网运营单位与公用电网、用户、政府补贴之间的交易结算关系。

实时电价模式的需求响应是将用户高价时段的负荷转移到低价时段,最大化地减少用能成本^[130]。联合优化机制下, t 时刻的负荷情况为

$$P_{\text{load}}(t) = P_{s,\text{out}}(t) + P_{s,\text{in}}(t) \quad (20)$$

式中 $P_{\text{load}}(t)$ 、 $P_{s,\text{in}}(t)$ 和 $P_{s,\text{out}}(t)$ 分别代表 t 时刻的负荷、负荷转入功率和负荷转出功率。

在考虑需求响应的联合优化过程中, 优化模型的建立仍可以微电网经济成本最小化为目标函数, 也可采用多目标函数。结合 2.2 节中所介绍的微电网储能容量优化, 形成单优化目标的储能系统和负荷需求响应联合优化方法, 在微电网容量优化的基础之上, 还需满足以下 2 个关键约束条件:

1) 负荷转移约束:

$$\int_t^{t+T} P_s(t) dt \leq \int_t^{t+T} P_{s,\text{max}}(t) dt \quad (21)$$

式(21)表示 T 时间段内实际负荷转移量不能超过系统所允许的最大负荷转移量。式中 $P_s(t)$ 表示 t 时刻的负荷转移功率大小; $P_{s,\text{max}}(t)$ 表示系统允许的最大负荷转移功率。

2) 负荷转移总量约束:

$$\int_t^{t+\phi} P_{s,\text{in}}(t) dt = \int_t^{t+\phi} P_{s,\text{out}}(t) dt \quad (22)$$

式(22)在时间周期 ϕ 内, 总的负荷转入量与总的负荷转出量保持一致。

4 储能技术在微电网中的应用性评价

储能装置的优化配置将对系统电能质量、经济可行性和环境影响等方面均产生重要影响, 因此本文根据储能对可再生能源微电网负荷响应、安全运行及经济性等影响, 分析并综述了不同储能技术、技术指标的应用性评价。

图 4 给出了不同类型储能技术的功率密度与能量密度对比情况。在储能设备的选型过程中, 储能设备的大小是影响建设用地、建设成本等方面的重要因素。对于某一确定的能量需求, 储能系统的功率和能量密度越大, 系统的体积就越小。因此在图 4 中偏右上角的储能技术更适用于空间有限并且需要高能量输出的应用系统, 如图所示锂离子电池、钠硫电池、飞轮储能以及蓄热等储能技术具有这样的特点, 其中锂离子电池在功率密度和能量密度这两方面均具有显著的优势, 这意味着锂离子电池在便携式储能应用上具有巨大的潜力。相比于锂离子电池和钠硫电池, 铅酸蓄电池和液流电池的功率密度都偏低, 基本上属于专用的能量型储能电池。铅酸蓄电池是工业化最早的二次电池, 至今在市场上仍然占据有重要的地位, 除了其具有价格低廉、安全性高以及技术成熟等特点之外, 还与其近

年来的技术革新与发展密切相关, 例如通过对铅酸电池进行改性而获得的铅炭电池(也称铅碳电池)^[131-132]。铅炭电池结合了铅酸电池和超级电容器的优点, 在能量密度、功率密度以及寿命方面都有了显著的改进, 同时由于材料来源广泛、回收率高, 具有较好的应用前景。液流电池与传统电池不同, 电化学反应简单, 运行安全性能较高, 是一种发展历史较短的商业化能量存储电池。得益于液流电池特殊电池结构, 其能量和功率的定义参数是相互独立的, 使得液流电池在能量和功率方面的设计非常灵活, 能够满足特定能量和功率的设计要求^[133]。

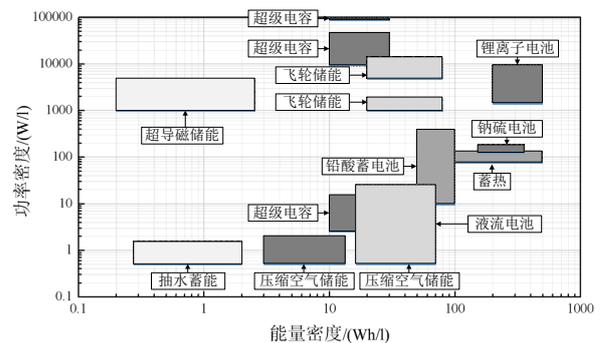


图 4 储能技术的功率与能量密度图

Fig. 4 Power and energy density map of energy storage technologies

抽水蓄能技术尽管已在国内外实现了广泛的商业化应用, 但由于其自身功率密度和能量密度均不高的技术特性以及传统抽水蓄能系统受到地理条件的限制, 通常是以高水头化、大容量化和高转速化为技术的发展方向, 主要应用于位置固定且需要大规模储能的电网系统, 在规模较小的微电网系统中竞争力相对较弱。近年来, 随着可再生能源渗透率和环境保护需求的日益提高, 具有创新性的小型抽水蓄能技术逐步成为抽水蓄电行业的发展出路, 尤其是小型海水抽水蓄能系统成为在海岛地区和靠近负荷中心的沿海地区具有发展前景的储能系统, 其相关技术研究目前尚处于起步阶段^[134]。超级电容和超导磁储能属于具有高功率密度的储能技术, 但能量密度相对较低, 是适合于短时高输出应用的功率型储能技术。

图 5 所示为各储能技术的成本与储存容量的对比情况。图中有相当一部分的储能技术尤其是电储存技术的能量成本仍处于较高的水平, 锂离子电池、铅酸电池以及钠硫电池成本均在 150\$/kWh 以上, 在作为能量型储能进行大规模使用时, 必将导致在应用过程中成本偏高的结果。因此在未来的相关技术研发过程中, 应该以进一步提高电存储的技

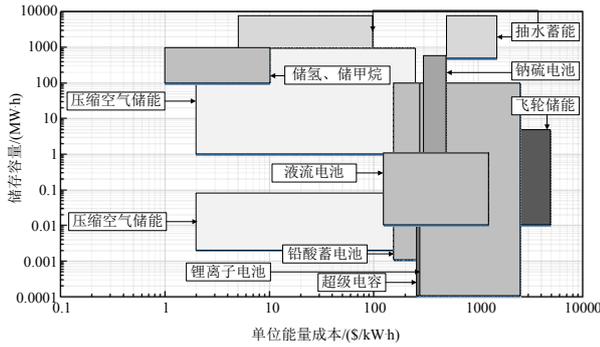


图 5 储能技术的成本与储存容量图

Fig. 5 Map of capital cost and energy capacity for different energy storage technologies

术经济性为主要研究方向。在可再生能源微电网系统中，从目前的技术发展情况来看，压缩空气储能、储氢和储甲烷技术具有相对较好的经济性。其中，储氢、储甲烷虽适用于大规模储能，但由于具有较低的成本，在小规模、分布式灵活应用方面还有很大的研究空间和潜力。

图 6 所示为主要储能技术的额定容量及其响应特性，其中锂电池、抽水蓄能、压缩空气储能、储氢以及储甲烷都具有较宽的装机范围，并且可以以较高的功率进行能量的输出；然而抽水蓄能、压缩空气储能、储氢以及储甲烷的响应时间都在分钟级左右，对于要求响应速率较快、短时频繁启停的微电网系统在上还存在一定的困难，此时应选择如超级电容、超导磁储能、铅酸蓄电池、锂电池、钠硫电池以及液流电池等储能技术。

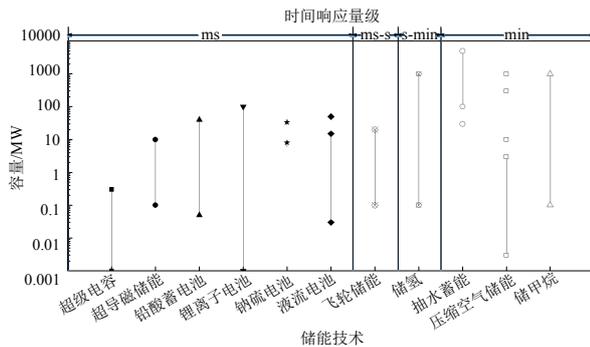


图 6 储能技术的额定容量和响应时间对照图

Fig. 6 Variation range of rated capacity and response time of different energy storage technologies

5 结论与展望

随着可再生能源和储能技术的发展，微电网的结构组成日益复杂且多元。如何实现微电网的可靠与稳定运行是当前能源结构转型与智慧能源领域的重点研究内容之一。先进储能技术在微电网项目中的灵活应用对于提高能源利用效率、促进能源改革具有重要意义，也是微电网技术发展中重点关注

的关键技术之一。本文根据储能技术特点和微电网的多能互补技术优势进行综述，介绍了微电网运行策略和容量配置设计中储能系统的优化方法，并在此基础上对储能技术在微电网中的应用性进行评价和展望。

储能技术在实现微电网稳定安全运行中所发挥的作用归纳并展望如下：

1) 配置有储能系统的微电网系统协调性更高，能够解决系统中能量需求与预测之间存在的不匹配问题以及由于可再生能源引发的机组出力不确定性问题，同时储能系统也为移峰填谷提供了必要的技术手段。然而过大的储能系统将导致微电网的经济性下降，过小将导致微电网系统的整体运行性能的下降。因此，寻求储能系统容量的优化配置是实现微电网技术优势最大化的重要研究方向。通过储能系统的优化配置和需求响应相结合的控制策略将进一步有效提高微电网的经济性、可靠性以及能源的综合利用率。

2) 目前微电网仍处在研发-示范阶段，储能技术在微电网项目中的应用覆盖率也还没有达到 100%，储能技术在微电网中的灵活应用还具有很大的上升空间，同时，储能技术在微电网灵活调峰、促进微电网向商业化-成熟阶段转变具有重要的作用。部分已示范的微电网项目，采用的储能设备主要是铅酸蓄电池和锂电池，其他类型的储能技术在项目实践方面被采用的还很少，因此通过实验或示范项目针对各种储能技术的运行特性进行验证和不断加强储能技术的优化研发，无论对储能技术本身，对微电网的发展，或是对能源结构的转型均能起到积极推进作用。

3) 蓄电池、飞轮储能以及蓄热等储能技术具有较高的能量密度和功率密度的特点，因此适用于空间有限并且需要高能量输出的微电网，其中以锂离子电池表现最为突出，可在分布式、小型化储能应用上发挥巨大作用。目前电储存技术的成本仍处于较高水平，尤其在作为能量型储能设备进行大规模使用时，必将突显其在经济性方面的劣势。因此，如何提高储能设备的技术经济性将在大规模推广储能技术的应用方面具有十分重要的意义。储氢、储甲烷具有相对较低的成本，但规模目前普遍较大，未来可以在扩大应用规模范围、提升应用灵活性、提高响应速率方面开展一些研究工作。对于要求储能系统启停频繁、响应快的微电网系统，可选择并发展如超级电容、超导磁储能、铅酸电池、锂

电池、钠硫电池以及液流电池等储能技术。

随着可再生能源的迅猛发展,可再生能源微电网的应用将会给储能系统提供广阔的市场空间,而储能系统能否在微电网中大规模应用,则取决于新型、新兴储能技术的研发与突破,继续寻找具有优良性能且低耗量、低成本的储能材料,提高储能技术的能量密度、功率密度、循环寿命以及快速响应等能力,是新型储能的发展方向。

参考文献

- [1] Hirsch A, Parag Y, Guerrero J. Microgrids: a review of technologies, key drivers, and outstanding issues[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 90: 402-411.
- [2] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(7): 1893-1904.
Zhou Xiaoxin, Chen Shuyong, Lu Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(7): 1893-1904(in Chinese).
- [3] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(29): 4999-5008.
Zhou Xiaoxin, Lu Zongxiang, Liu Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(29): 4999-5008(in Chinese).
- [4] Ren Guorui, Liu Jinfu, Wan Jie, et al. Overview of wind power intermittency: impacts, measurements, and mitigation solutions[J]. *Applied Energy*, 2017, 204: 47-65.
- [5] 赵波, 包侃侃, 徐志成, 等. 考虑需求侧响应的光储并网型微电网优化配置[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(21): 5465-5474.
Zhao Bo, Bao Kankan, Xu Zhicheng, et al. Optimal sizing for grid-connected PV-and-storage microgrid considering demand response[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(21): 5465-5474(in Chinese).
- [6] 戴志辉, 陈冰研. 基于实时电价机制的微网多时间尺度能量管理研究[J]. *华北电力大学学报*, 2018, 45(2): 24-31, 74.
Dai Zhihui, Chen Bingyan. Research on multi-time scale energy management of micro-grid based on real-time pricing mechanism[J]. *Journal of North China Electric Power University*, 2018, 45(2): 24-31, 74(in Chinese).
- [7] 慕小斌, 陈国良, 孙丽兵, 等. 微网电能质量新特性及其治理方案综述[J]. *电源技术*, 2015, 39(9): 2041-2044.
Mu Xiaobin, Chen Guoliang, Sun Libing, et al. New features of microgrid power quality and review of its treatment measurement[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2015, 39(9): 2041-2044(in Chinese).
- [8] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(1): 57-70.
Yang Xinfafa, Su Jian, Lü Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(1): 57-70(in Chinese).
- [9] 张丹, 王杰. 国内微电网项目建设及发展趋势研究[J]. *电网技术*, 2016, 40(2): 451-458.
Zhang Dan, Wang Jie. Research on construction and development trend of micro-grid in China[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(2): 451-458(in Chinese).
- [10] 支娜, 肖曦, 田培根, 等. 微网群控制技术研究与展望[J]. *电力自动化设备*, 2016, 36(4): 107-115.
Zhi Na, Xiao Xi, Tian Peigen, et al. Research and prospect of multi-microgrid control strategies[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2016, 36(4): 107-115(in Chinese).
- [11] 陈永杰, 王斌, 彭涛. 基于分布式发电的微电网并网运行控制策略[J]. *电子测试*, 2017(14): 48-50.
Chen Yongjie, Wang Bin, Peng Tao. Microgrid operational control strategy under grid-connected mode[J]. *Electronic Test*, 2017(14): 48-50(in Chinese).
- [12] 杨潇, 王楠, 胡文平, 等. 含分布式电源、储能系统和地源热泵的微电网实验平台研究与开发[J]. *大众用电*, 2015(S2): 242-244.
Yang Xiao, Wang Nan, Hu Wenping, et al. Research and development of the experiment platform for a microgrid with distributed generation, energy storage system and ground-source heat pump[J]. *Popular Utilization of Electricity*, 2015(S2): 242-244(in Chinese).
- [13] 程军照, 李澍森, 冯宇, 等. 发达国家微网政策及其对中国的借鉴意义[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(1): 64-68.
Cheng Junzhao, Li Shusen, Feng Yu, et al. Policies on microgrid in developed countries and implications for China[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(1): 64-68(in Chinese).
- [14] 别朝红, 林雁翎. “微网规划与设计”国际标准研究[J]. *标准科学*, 2017(12): 172-177.
Bie Zhaohong, Lin Yanling. Research on international standards for microgrid planning and design[J]. *Standard Science*, 2017(12): 172-177(in Chinese).
- [15] 国家能源局. 国家能源局文件: 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[EB/OL]. 北京: 国家能源局, 2015[2019-05-16]. http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201507/t20150722_1949.htm.
National Energy Administration. Document issued by the National Energy Administration: Guideline from National

- Energy Administration on promoting the construction of new energy microgrid demonstration projects[EB/OL]. Beijing : National Energy Administration 2015 [2019-05-16] . http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201507/t20150722_1949.htm (in Chinese).
- [16] 郭雅娟, 陈锦铭, 何红玉, 等. 交直流混合微电网接入分布式新能源的关键技术研究综述[J]. 电力建设, 2017, 38(3): 9-18.
Guo Yajuan, Chen Jinming, He Hongyu, et al. A review on AC/DC hybrid microgrid key technology containing distributed new energy[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(3): 9-18(in Chinese).
- [17] Monesha S, Kumar S G, Rivera M. Microgrid energy management and control : technical Review[C]// Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Automatica. Curico, Chile: IEEE, 2016.
- [18] Dragičević T, Lu Xiaonan, Vasquez J C, et al. DC microgrids—part I: a review of control strategies and stabilization techniques[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7): 4876-4891.
- [19] Xue Mengya, Xie Jun, Chen Fei, et al. Review on multi-objective joint economic dispatching of microgrid in power system[J]. Procedia Computer Science, 2018, 130: 1152-1157.
- [20] Aguilar-Jiménez J A, Velázquez N, Acuña A, et al. Techno-economic analysis of a hybrid PV-CSP system with thermal energy storage applied to isolated microgrids [J]. Solar Energy, 2018, 174: 55-65.
- [21] 刘剑青, 黄文焘, 邰能灵, 等. 微电网运维调控操作方案与应用研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(10): 1-7.
Liu Jianqing, Huang Wentao, Tai Nengling, et al. Research and application of operation and regulation manipulating scheme for microgrids[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(10): 1-7(in Chinese).
- [22] 林凯骏, 吴俊勇, 郝亮亮, 等. 基于非合作博弈的冷热电联供微能源网运行策略优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(6): 25-32.
Lin Kaijun, Wu Junyong, Hao Liangliang, et al. Optimization of operation strategy for micro-energy grid with CCHP systems based on non-cooperative game[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 25-32(in Chinese).
- [23] 李越嘉, 杨莹, 常国祥. 微电网技术在中国的研究应用现状和前景展望[J]. 中国电力, 2016, 49(S1): 154-158, 165.
Li Yuejia, Yang Ying, Chang Guoxiang. Present situation of research and application on microgrid technology and its prospects in China[J]. Electric Power, 2016, 49(S1): 154-158, 165(in Chinese).
- [24] 王成山. 微电网分析与仿真理论[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 1-3.
Wang Chengshan. Analysis and simulation theory of microgrids[M]. Beijing: Science Press, 2013: 1-3(in Chinese).
- [25] Romankiewicz J, Qu Min, Marnay C, et al. International microgrid assessment : governance , incentives , and experience(IMAGINE)[R]. Berkeley, USA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013.
- [26] Bose S, Liu Y, Bahei-Eldin K, et al. Tieline controls in microgrid applications[C]//Proceedings of 2007 IREP Symposium on Bulk Power System Dynamics and Control-VII. Revitalizing Operational Reliability . Charleston, USA: IEEE, 2007: 1-3.
- [27] 孙建龙. 微电网若干工程关键技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
Sun Jianlong. Research on several key engineering technologies in microgrid[D] . Nanjing : Southeast University, 2016(in Chinese).
- [28] 国家发展改革委, 国家能源局. 推进并网型微电网建设试行办法[EB/OL]. 北京: 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2017[2019-05-16]. <http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201707/W020170724332830451364.pdf>.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. The trial measures for promoting the construction of grid-connected microgrids[EB/OL]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2017[2019-05-16](in Chinese). <http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201707/W020170724332830451364.pdf>.
- [29] 鲁宗相, 王彩霞, 闵勇, 等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 100-107.
Lu Zongxiang, Wang Caixia, Min Yong, et al. Overview on microgrid research[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 100-107(in Chinese).
- [30] Rodriguez-Diaz E, Vasquez J C, Guerrero J M. Intelligent DC homes in future sustainable energy systems: when efficiency and intelligence work together[J] . IEEE Consumer Electronics Magazine, 2016, 5(1): 74-80.
- [31] Serna-Suárez I D, Ordóñez-Plata G, Carrillo-Cacedo G, et al. Microgrid's energy management systems: a survey [C]//Proceedings of the 12th International Conference on the European Energy Market. Lisbon, Portugal: IEEE, 2015: 1-6.
- [32] 周龙, 齐智平. 微电网保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 147-154.
Zhou Long, Qi Zhiping. A review of the research on microgrid protection development[J]. Power System Protection and Control , 2015, 43(13) : 147-154(in Chinese).
- [33] 郭宁, 白银娟, 李基康. 并网型微电网优化调度及经济性分析[J]. 供用电, 2018, 35(4): 68-74.

- Guo Ning, Bai Yinjuan, Li Jikang. Optimal scheduling and economic analysis of grid-connected microgrid[J]. *Distribution & Utilization*, 2018, 35(4): 68-74(in Chinese).
- [34] Robert F C, Gopalan S. Low cost, highly reliable rural electrification through a combination of grid extension and local renewable energy generation[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2018, 42: 344-354.
- [35] Vadana P, Rajinikandh, Kottayil S K. Dynamic energy management on a hydro-powered smart microgrid[C]// *Proceedings of the International Conference on Soft Computing Systems*. New Delhi: Springer, 2016: 627-635.
- [36] Hartmann B, Dan A. Cooperation of a grid-connected wind farm and an energy storage unit—demonstration of a simulation tool[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2012, 3(1): 49-56.
- [37] Kalavani F, Mohammadi-Ivatloo B, Karimi A, et al. Stochastic optimal sizing of integrated cryogenic energy storage and air liquefaction unit in microgrid[J]. *Renewable Energy*, 2019, 136: 15-22.
- [38] 王成山, 周越. 微电网示范工程综述[J]. *供用电*, 2015(1): 16-21.
Wang Chengshan, Zhou Yue. Review on the demonstration projects of microgrid[J]. *Distribution & Utilization*, 2015(1): 16-21(in Chinese).
- [39] 国家能源局. 李福龙: 上半年能源行业取得包括新旧动能转换加快在内的几方面新成效[EB/OL]. 北京: 国家能源局, 2018[2019-05-16]. http://www.nea.gov.cn/2018-07/30/c_137356647.htm.
National Energy Administration. Li Fulong: Energy industry made new progress in several areas in the first half of this year, including the accelerated transformation of power[EB/OL]. Beijing: National Energy Administration, 2018[2019-05-16](in Chinese). http://www.nea.gov.cn/2018-07/30/c_137356647.htm.
- [40] Obara S, Morel J. Clean energy microgrids[M]. London, United Kingdom: Institution of Engineering and Technology, 2017: 259-279.
- [41] Microgrid Projects. Milford microgrid[EB/OL]. USA: Microgrid Media, 2017[2019-05-16]. <http://microgridprojects.com/microgrid/milford-microgrid/>.
- [42] Microgrid Projects. Burlington DC microgrid[EB/OL]. USA: Microgrid Media, 2017[2019-05-16]. <http://microgridprojects.com/microgrid/baikampady-mangalore-microgrid/>.
- [43] Microgrid Projects. Baikampady mangalore microgrid[EB/OL]. USA: Microgrid Media, 2017[2019-05-16]. <http://microgridprojects.com/microgrid/baikampady-mangalore-microgrid/>.
- [44] Microgrid Projects. Neelakantarayanagaddi village microgrid[EB/OL]. USA: Microgrid Media, 2017[2019-05-16]. <http://microgridprojects.com/microgrid/neelakantarayanagaddi-village-microgrid/>.
- [45] Microgrid Projects. Mendare village karnataka microgrid[EB/OL]. USA: Microgrid Media, 2017[2019-05-16]. <http://microgridprojects.com/microgrid/mendare-village-karnataka-microgrid/>.
- [46] Microgrid Projects. Kalkeri sangeet vidyalaya DC microgrid[EB/OL]. USA: Microgrid Media, 2017[2019-05-16]. <http://microgridprojects.com/microgrid/kalkeri-sangeet-vidyalaya-dc-microgrid/>.
- [47] Kim J Y, Jeon J H, Kim S K, et al. Cooperative control strategy of energy storage system and microsourses for stabilizing the microgrid during islanded operation[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, 25(12): 3037-3048.
- [48] 赵波, 张雪松, 李鹏, 等. 储能系统在东福山岛独立型微电网中的优化设计 and 应用[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(1): 161-167.
Zhao Bo, Zhang Xuesong, Li Peng, et al. Optimal design and application of energy storage system in Dongfushan island stand-alone microgrid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(1): 161-167(in Chinese).
- [49] 周伟. 微电网控制策略与保护配置的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
Zhou Wei. Research on microgrid's control strategy and protection configuration[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013(in Chinese).
- [50] López-González A, Domenech B, Ferrer-Martí L. Sustainability and design assessment of rural hybrid microgrids in Venezuela[J]. *Energy*, 2018, 159: 229-242.
- [51] Berkeley Lab. Huatacondo[EB/OL]. Berkeley, CA, USA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2019[2019-05-16]. <https://building-microgrid.lbl.gov/huatacondo>.
- [52] Berkeley Lab. Kythnos island[EB/OL]. Berkeley, CA, USA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2019[2019-05-16]. <https://building-microgrid.lbl.gov/kythnos-island>.
- [53] 施琳, 罗毅, 施念, 等. 高渗透率风电-储能孤立电网控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(16): 78-85.
Shi Lin, Luo Yi, Shi Nian, et al. A control strategy of isolated grid with high penetration of wind and energy storage systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(16): 78-85(in Chinese).
- [54] Zhao Bo, Zhang Xuesong, Chen Jian. Integrated microgrid laboratory system[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27(4): 2175-2185.
- [55] Wang Chengshan, Yang Xianshen, Wu Zhen, et al. A

- highly integrated and reconfigurable microgrid testbed with hybrid distributed energy sources[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 451-459.
- [56] Marnay C, DeForest N, Lai J. A green prison: the Santa Rita Jail campus microgrid[C]//Proceedings of 2012 IEEE Power and Energy Society general Meeting. San Diego, USA: IEEE, 2012.
- [57] Berkeley Lab. Hangzhou dianzi university [EB/OL]. Berkeley, CA, USA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2019[2019-05-16]. <https://building-microgrid.lbl.gov/hangzhou-dianzi-university>.
- [58] Burger A. Eight projects proposed in round 4 of the Connecticut microgrid grant program[EB/OL]. Westborough, MA, USA: Microgrid Knowledge, 2018[2019-05-16]. <https://microgridknowledge.com/microgrid-grant-connecticut/>.
- [59] Microgrid Projects. New York affordable housing microgrid[EB/OL]. USA: Microgrid Media, 2017[2019-05-16]. <http://microgridprojects.com/microgrid/new-york-affordable-housing-microgrid/>.
- [60] Iskov H. Lolland case study: Micro CHP with integrated electrolyser and gas storage 2005-2007[R]. Denmark: Danish Gas Technology Centre, 2009.
- [61] Naval Facilities Engineering Command. Smart power infrastructure demonstration for energy reliability and security(SPIDERS)[R]. USA: Naval Facilities Engineering Command, 2015.
- [62] 王晨晨, 杜秋平. 日本仙台微电网示范工程在地震中的运行情况[J]. 华北电力技术, 2013(8): 56-60.
Wang Chenchen, Du Qiuping. Operation of micro-grid in Sendai during earthquake[J]. North China Electric Power, 2013(8): 56-60(in Chinese).
- [63] Microgrid Projects. Islas secas island microgrid[EB/OL]. USA: Microgrid Media, 2017[2019-05-16]. <http://microgridprojects.com/microgrid/islas-secas-island-microgrid/>.
- [64] Mao Meiqin, Ding Ming, Su Jianhui, et al. Testbed for microgrid with multi-energy generators[C]//Proceedings of 2008 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Niagara Falls, USA: IEEE, 2008.
- [65] Microgrids. LABEIN's commercial feeder[EB/OL]. Luxembourg: Community Research and Development Information Service, 2010[2019-05-16]. <http://www.microgrids.eu/index.php?page=kythnos&id=1>.
- [66] Microgrid Projects. Tecnalia microgrid[EB/OL]. USA: Microgrid Media, 2017[2019-05-16]. <http://microgridprojects.com/microgrid/tecnalia-microgrid/>.
- [67] Yu Jiancheng, Marnay C, Jin Ming, et al. Review of microgrid development in the United States and China and lessons learned for China[J]. Energy Procedia, 2018, 145: 217-222.
- [68] Microgrid Projects. El hierro microgrid[EB/OL]. USA: Microgrid Media, 2017[2019-05-16]. <http://microgridprojects.com/microgrid/el-hierro-microgrid/>.
- [69] Vazquez S, Lukic S M, Galvan E, et al. Energy storage systems for transport and grid application[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(12): 3881-3895.
- [70] Luo Xing, Wang Jihong, Dooner M, et al. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation[J]. Applied Energy, 2015, 137: 511-536.
- [71] Aneke M, Wang M. Energy storage technologies and real life applications - A state of the art review[J]. Applied Energy, 2016, 179: 350-377.
- [72] Sciacovelli A, Vecchi A, Ding Y. Liquid air energy storage (LAES) with packed bed cold thermal storage - From component to system level performance through dynamic modelling[J]. Applied Energy, 2017, 190: 84-98.
- [73] Locatelli G, Invernizzi D C, Mancini M. Investment and risk appraisal in energy storage systems: a real options approach[J]. Energy, 2016, 104: 114-131.
- [74] Rutqvist J, Kim H M, Ryu D W, et al. Modeling of coupled thermodynamic and geomechanical performance of underground compressed air energy storage in lined rock caverns[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 52: 71-81.
- [75] Faisal M, Hannan M A, Ker P J, et al. Review of energy storage system technologies in microgrid applications: issues and challenges[J]. IEEE Access, 2018, 6: 35143-35164.
- [76] Bocklisch T. Hybrid energy storage approach for renewable energy applications[J]. Journal of Energy Storage, 2016, 8: 311-319.
- [77] 钟国彬, 白云洁, 曾杰, 等. 计及储能寿命的微电网混合储能容量优化配置[J]. 广东电力, 2018, 31(7): 8-15.
Zhong Guobin, Bai Yunjie, Zeng Jie, et al. Optimization configuration of hybrid energy storage capacity of microgrid considering energy storage life[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(7): 8-15(in Chinese).
- [78] 王钊. 微电网混合储能系统协调控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
Wang Yi. Research on synergistic control strategy of microgrid hybrid energy storage system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016(in Chinese).
- [79] Gallo A B, Simões-Moreira J R, Costa H K M, et al. Energy storage in the energy transition context: a technology review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 65: 800-822.
- [80] Chen Haisheng, Cong T N, Yang Wei, et al. Progress in

- electrical energy storage system: a critical review[J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(3): 291-312.
- [81] Fathima A H, Palanisamy K. Optimization in microgrids with hybrid energy systems - A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 45: 431-446.
- [82] Smith S C, Sen P K, Kroposki B. Advancement of energy storage devices and applications in electrical power system[C]//*Proceedings of the 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*. Pittsburgh, USA: IEEE, 2008.
- [83] Beaudin M, Zareipour H, Schellenberglabe A, et al. Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: an updated review[J]. *Energy for Sustainable Development*, 2010, 14(4): 302-314.
- [84] Rastler D. Electricity energy storage technology options: a white paper primer on applications, costs, and options [R]. USA: Electric Power Research Institute, 2010.
- [85] Kousksou T, Bruel P, Jamil A, et al. Energy storage: applications and challenges[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2014, 120: 59-80.
- [86] National Renewable Energy Laboratory. Energy storage: possibilities for expanding electric grid flexibility [R]. USA: National Renewable Energy Laboratory, 2016.
- [87] Curry C. Lithium-ion battery costs and market: Squeezed margins seek technology improvements & new business models[R]. USA: Bloomberg New Energy Finance, 2017.
- [88] Nazir H, Batool M, Osorio F J B, et al. Recent developments in phase change materials for energy storage applications: a review[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 129: 491-523.
- [89] Carnegie R, Gotham D, Nderitu D, et al. Utility Scale energy storage systems: benefits, applications, and technologies[R]. West Lafayette, IN, USA: Purdue University, 2013.
- [90] Kapila S, Oni A O, Kumar A. The development of techno-economic models for large-scale energy storage systems[J]. *Energy*, 2017, 140: 656-672.
- [91] Zheng Yingying, Jenkins B M, Kornbluth K, et al. Optimal design and operating strategies for a biomass-fueled combined heat and power system with energy storage[J]. *Energy*, 2018, 155: 620-629.
- [92] Bahramirad S, Reder W, Khodaei A. Reliability-constrained optimal sizing of energy storage system in a microgrid[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, 3(4): 2056-2062.
- [93] Wang Luhao, Li Qiqiang, Ding Ran, et al. Integrated scheduling of energy supply and demand in microgrids under uncertainty: a robust multi-objective optimization approach[J]. *Energy*, 2017, 130: 1-14.
- [94] 孙佳星, 王培宇, 胡兴媛, 等. 并网型微电网优化调度及经济性分析[J]. *东北电力技术*, 2018, 39(9): 32-35, 43.
Sun Jiaxing, Wang Peiyu, Hu Xingyuan, et al. Research on improved genetic algorithm for micro-grid grid-connected multi-objective optimization scheduling[J]. *Northeast Electric Power Technology*, 2018, 39(9): 32-35, 43(in Chinese).
- [95] Zhang Shirong, Tang Yuling. Optimal schedule of grid-connected residential PV generation systems with battery storages under time-of-use and step tariffs[J]. *Journal of Energy Storage*, 2019, 23: 175-182.
- [96] Li Zhengmao, Xu Yan. Dynamic dispatch of grid-connected multi-energy microgrids considering opportunity profit[C]//*Proceedings of 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting*. Chicago, USA: IEEE, 2017.
- [97] Li Zhengmao, Xu Yan. Optimal coordinated energy dispatch of a multi-energy microgrid in grid-connected and islanded modes[J]. *Applied Energy*, 2018, 210: 974-986.
- [98] 田星星, 李征, 李利明. 计及微电网并离网两种工况的储能容量优化配置[J]. *电源学报*, 2018, 16(4): 62-70.
Tian Xingxing, Li Zheng, Li Liming. Optimal capacity allocation of energy storages in microgrid considering grid-connected and off-grid operating conditions[J]. *Journal of Power Supply*, 2018, 16(4): 62-70(in Chinese).
- [99] 何力, 吕红芳. 考虑经济性的多微电网优化调度研究[J]. *发电技术*, 2018, 39(5): 397-404.
He Li, Lü Hongfang. Research on optimal dispatching of multi-microgrid considering economy[J]. *Power Generation Technology*, 2018, 39(5): 397-404(in Chinese).
- [100] 王小蕾, 顾佳, 周佳威. 风储联合系统的储能容量优化配置[J]. *浙江电力*, 2018, 37(9): 14-17.
Wang Xiaolei, Gu Jia, Zhou Jiawei. Optimal capacity configuration of cogeneration system of wind power and energy storage[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2018, 37(9): 14-17(in Chinese).
- [101] Liu Zifa, Chen Yixiao, Zhuo Ranqun, et al. Energy storage capacity optimization for autonomy microgrid considering CHP and EV scheduling[J]. *Applied Energy*, 2018, 210: 1113-1125.
- [102] El-Bidairi K S, Nguyen H D, Jayasing S D G, et al. A hybrid energy management and battery size optimization for standalone microgrids: a case study for Flinders Island, Australia[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 175: 192-212.
- [103] 郭力, 王成山, 杨其国, 等. 江苏大丰风柴储海水淡化独立微电网系统[J]. *供用电*, 2015(1): 22-27.

- Guo Li, Wang Chengshan, Yang Qiguo, et al. The independent microgrid with wind power, diesel generator and energy storage system in Dafeng, Jiangsu province [J]. *Distribution & Utilization*, 2015(1): 22-27(in Chinese).
- [104] 甘阳. 考虑需求响应的独立微电网多目标优化配置研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.
- Gan Yang. Research on multi-objective optimal sizing of stand-alone microgrid considering demand response[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018(in Chinese).
- [105] 赵晶晶, 徐传琳, 吕雪, 等. 微电网一次调频备用容量与储能优化配置方法[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(15): 4324-4332.
- Zhao Jingjing, Xu Chuanlin, Lü Xue, et al. Optimization of micro-grid primary frequency regulation reserve capacity and energy storage system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(15): 4324-4332(in Chinese).
- [106] 吴亚帆. 微电网混合储能容量多目标优化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- Wu Yafan. Research on multi-objective optimization of hybrid energy storage capacity of microgrid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018(in Chinese).
- [107] Hajiaghahi S, Salemnia A, Hamzeh M. Hybrid energy storage system for microgrids applications: a review[J]. *Journal of Energy Storage*, 2019, 21: 543-570.
- [108] 李姚旺, 苗世洪, 刘君瑶, 等. 考虑需求响应不确定性的光伏微电网储能系统优化配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(20): 69-77.
- Li Yaowang, Miao Shihong, Liu Junyao, et al. Optimal allocation of energy storage system in PV micro grid considering uncertainty of demand response[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(20): 69-77(in Chinese).
- [109] Ghasemi A, Enayatzare M. Optimal energy management of a renewable-based isolated microgrid with pumped-storage unit and demand response[J]. *Renewable Energy*, 2018, 123: 460-474.
- [110] 孟晓丽, 牛焕娜, 贾东梨, 等. 基于储能 Soc 日前计划的微电网实时能量优化调度方法[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(8): 155-161.
- Meng Xiaoli, Niu Huanna, Jia Dongli, et al. Real-time energy optimal dispatch for microgrid based on day-ahead scheduling of charge state[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(8): 155-161(in Chinese).
- [111] 胡仕灿. 微电网复合储能容量配置的多目标优化[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- Hu Shican. Multi-objective optimization of the configuration of micro grid composite energy storage capacity[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018(in Chinese).
- [112] 张晴晴, 吴倩, 李盛伟, 等. 计及不同需求响应群体的新能源并网系统优化调度[J]. *电力建设*, 2018, 39(7): 107-114.
- Zhang Qingqing, Wu Qian, Li Shengwei, et al. Optimal scheduling of new energy integration considering different demand response groups[J]. *Electric Power Construction*, 2018, 39(7): 107-114(in Chinese).
- [113] Aghajani G R, Shayanfar H A, Shayeghi H. Demand side management in a smart micro-grid in the presence of renewable generation and demand response[J]. *Energy*, 2017, 126: 622-637.
- [114] Yan Bing, Luh P B, Warner G, et al. Operation and design optimization of microgrids with renewables[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2017, 14(2): 573-585.
- [115] Nazari A, Keypour R. A two-stage stochastic model for energy storage planning in a microgrid incorporating bilateral contracts and demand response program[J]. *Journal of Energy Storage*, 2019, 21: 281-294.
- [116] 马艺玮. 独立微电网分布式电源优化配置与协调控制[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- Ma Yiwei. Optimal sizing and coordinated control of distributed generation units in islanded microgrid[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015(in Chinese).
- [117] Murugaperumal K, Raj P A D V. Energy storage based MG connected system for optimal management of energy: an ANFMDA technique[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(16): 7996-8010.
- [118] Husein M, Chung I P. Optimal design and financial feasibility of a university campus microgrid considering renewable energy incentives[J]. *Applied Energy*, 2018, 225: 273-289.
- [119] Zolfaghari M, Ghaffarzadeh N, Ardakani A J. Optimal sizing of battery energy storage systems in off-grid micro grids using convex optimization[J]. *Journal of Energy Storage*, 2019, 23: 44-56.
- [120] Hossain A, Pota H R, Squartini S, et al. Modified PSO algorithm for real-time energy management in grid-connected microgrids[J]. *Renewable Energy*, 2019, 136: 746-757.
- [121] Fang Ruiming. Multi-objective optimized operation of integrated energy system with hydrogen storage[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44: 29409-29417.
- [122] 张有兵, 任帅杰, 杨晓东, 等. 考虑价格型需求响应的独立型微电网优化配置[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(7): 55-62.
- Zhang Youbing, Ren Shuaijie, Yang Xiaodong, et al.

- Optimal configuration considering price-based demand response for stand-alone microgrid[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(7): 55-62(in Chinese).
- [123] Neves D, Pina A, Silva C A. Comparison of different demand response optimization goals on an isolated microgrid[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2018, 30: 209-215.
- [124] U.S. Department of Energy. Energy policy act of 2005[EB/OL]. USA: U.S. Department of Energy, 2005 [2019-05-16]. <https://www.energy.gov/downloads/energy-policy-act-2005>.
- [125] Khan A A, Razzaq S, Khan A, et al. HEMSs and enabled demand response in electricity market: an overview[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 42: 773-785.
- [126] Korkas C D, Baldi S, Michailidis I, et al. Occupancy-based demand response and thermal comfort optimization in microgrids with renewable energy sources and energy storage[J]. *Applied Energy*, 2016, 163: 93-104.
- [127] Dietrich K, Latorre J M, Olmos L, et al. Demand response in an isolated system with high wind integration [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27(1): 20-29.
- [128] 周保荣, 黄廷城, 张勇军. 计及激励型需求响应的微电网可靠性分析[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(13): 70-78.
Zhou Baorong, Huang Tingcheng, Zhang Yongjun. Reliability analysis on microgrid considering incentive demand response[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(13): 70-78(in Chinese).
- [129] 陈冉, 杨超, 沈冰, 等. 基于微电网的需求响应优化策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(11): 124-130.
Chen Ran, Yang Chao, Shen Bing, et al. Micro-grid based demand response optimization policy[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(11): 124-130(in Chinese).
- [130] Alipour M, Zare K, Seyedi H, et al. Real-time price-based demand response model for combined heat and power systems[J]. *Energy*, 2019, 168: 1119-1127.
- [131] Lach J, Wróbel K, Wróbel J, et al. Applications of carbon in lead-acid batteries: a review[J]. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2019, 23(3): 693-705.
- [132] 王洪, 林雄武, 袁永明, 等. 对未来铅酸蓄电池的需求分析及预期[J]. *电源技术*, 2016, 40(4): 935-937.
Wang Hong, Lin Xiongwu, Yuan Yongming, et al. Demand analysis and forecast for future lead-acid battery [J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2016, 40(4): 935-937(in Chinese).
- [133] 董全峰, 张华民, 金明钢, 等. 液流电池研究进展[J]. *电化学*, 2005, 11(3): 237-243.
Dong Quanfeng, Zhang Huamin, Jin Minggang, et al. Research progresses in a flow redox battery[J]. *Electrochemistry*, 2005, 11(3): 237-243(in Chinese).
- [134] 谭雅倩, 周学志, 徐玉杰, 等. 海水抽水蓄能技术发展现状及应用前景[J]. *储能科学与技术*, 2017, 6(1): 35-42.
Tan Yaqian, Zhou Xuezhi, Xu Yujie, et al. Seawater pumped hydro energy storage: review and perspectives[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2017, 6(1): 35-42(in Chinese).



刘畅

收稿日期: 2019-02-15。

作者简介:

刘畅(1989), 女, 工学博士, 主要从事可再生能源多能互补系统及储能技术的研究, liuchang_2017@sina.cn;

*通信作者: 卓建坤(1975), 男, 副研究员, 从事生物质能及多能互补技术研究, zhuojk@tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 乔宝榆)

A Review on the Utilization of Energy Storage System for the Flexible and Safe Operation of Renewable Energy Microgrids

LIU Chang¹, ZHUO Jiankun^{1*}, ZHAO Dongming², LI Shuiqing¹, CHEN Jingshuo², WANG Jinxing¹, YAO Qiang¹
 (1. Tsinghua University; 2. China Huaneng Co., Ltd.)

KEY WORDS: microgrid; safe and stable operation; energy storage; demand response; optimal configuration

Energy storage is a key technology to protect the safe and stable operation of microgrids, and has become one of the important measures to promote commercial application of renewable energy microgrids.

In order to master the skills of utilizing energy storage system (ESS) for the implementation of renewable energy microgrid, the technical characteristics of renewable energy microgrid and the roles of the ESS in microgrids are analyzed, respectively. The ESS can improve the reliability and flexibility of the microgrid and mitigate the threats to the whole system which are caused by the intermittent nature of the renewable energy system (RES). In addition, the optimization of the energy storage size will contribute to reducing the investment cost and operating cost of the microgrid. The key roles of ESS on the flexible operation of the microgrid are summarized in Fig. 1 (Fig. 1 can be seen in the section 1.2 of the paper).

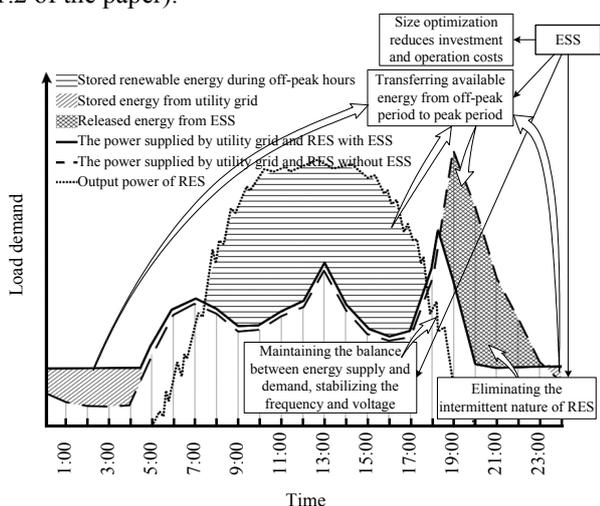


Fig. 1 Key roles of energy storage systems on the flexible operation of the microgrid

The applications, classification and development status of different ESSs in microgrid are also reviewed; at present, the technical economy of most energy storage technologies needs to be further improved.

The capacity of the ESS has a great impact on the overall economy and operational safety of the microgrid.

Under this context, the relationship between ESS’s capacity and control strategies in both connected and disconnected operation modes of microgrid is introduced. Then, considering its positive effect on the utilization of renewable energy, the optimum design of ESS’s capacity can be performed based on single objective or multiple objectives, which generally include economy, reliability and energy utilization objectives. Taking the minimum of the investment and operating costs for instance, the objective function is given:

$$\min C = \min(C_1 + C_2) \quad (1)$$

where

$$C_1 = C_{INI} \quad (2)$$

$$C_2 = C_{OM} + C_{FUEL} + C_{REP} + C_{EM} + C_{GRID} + C_{PEN} \quad (3)$$

According to the different operating scenarios, the values and the calculation methods of each item will be different. In addition, a joint optimization method for energy storage and demand response is described, which can effectively improve the economy, reliability and comprehensive utilization of energy of microgrid.

By comprehensively evaluating the energy density, the power density, the response time and the rated power, the applicability of different energy storage technologies in microgrid can be obtained. Energy storage technology has an important application prospect in the flexible operation of microgrid.

The present review suggests that the application of renewable energy microgrid can provide a broad market for energy storage technologies. The development of large scale energy storage system applied in microgrid will be promoted by the breakthrough of new and emerging materials and technologies. To ensure better performance of renewable energy microgrid, this study also reveals that the low cost, high energy density, high power density, long life and quick response ability are the future development direction of energy storage technology.