

电力储能技术发展现状及走向分析

周喜超^{1,2}

(1.西安理工大学电气工程学院, 陕西 西安 710048; 2.国网综合能源服务集团有限公司, 北京 100050)

[摘 要] 储能是促进可再生能源利用、保证电网安全稳定运行的有效手段。据统计, 2019 年全球已投运储能项目(含物理储能、电化学储能以及熔融盐储热)累计装机规模达 183.1 GW, 同比增长 1.2%。储能技术按照能量转化机制可划分为物理储能、化学储能、其他储能等多种类型, 各有不同的适合应用领域。随着新能源发电的迅猛发展, 特高压电网的加快建设, 储能市场将会迎来快速增长。本文主要介绍了目前储能技术的发展现状, 以及在电力系统发、输、配、用等方面的应用情况, 并对未来储能技术的发展趋势进行了展望, 可为储能技术研究和工程实践提供参考。

[关 键 词] 储能技术; 可再生能源; 特高压电网; 电力系统; 安全稳定

[中图分类号] TK02; TM712 **[文献标识码]** A **[DOI 编号]** 10.19666/j.rlfd.202002027

[引用本文格式] 周喜超. 电力储能技术发展现状及走向分析[J]. 热力发电, 2020, 49(8): 7-12. ZHOU Xichao. Development status and trend analysis of electric energy storage technology[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8): 7-12.

Development status and trend analysis of electric energy storage technology

ZHOU Xichao^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. State Grid Integrated Energy Service Group Co., Ltd., Beijing 100050, China)

Abstract: Energy storage is an effective approach to achieve the absorption of renewable energy and ensure the safe and stable operation of the power grid. In 2019, the cumulative installed capacity of power storage projects (including physical energy storage, electrochemical energy storage, and molten salt heat storage) that have been put into operation worldwide reached 183.1 GW, a year-on-year increase of 1.2%. According to the energy conversion mechanism, energy storage technology can be divided into physical energy storage, chemical energy storage and other energy storage. Different energy storage technologies are applied in different fields. With the development of new energy technology, the energy storage market will usher in rapid growth. This article mainly introduces the current development of energy storage technology and its application in the four aspects of power system generation, distribution, transmission and use. Moreover, it prospects the development trend of energy storage technology in the future, which can provide a certain reference for technical research and engineering practice of energy storage.

Key words: energy storage technology, renewable energy, UHV power grid, power system, safe and stable

随着智能电网时代的到来, 储能技术的作用日益明显, 其应用范围已涉及发、输、配、用各个环节^[1-4]。电力储能不仅具有快速响应和双向调节的技术特点, 还具有环境适应性强、配置方式灵活且建设周期短等优势。预计到 2050 年, 我国能源革命将取得阶段性成果, 能源生产和终端消费环节新能源比重将超过“两个 50%”, 储能市场空间巨大。近三年来, 在技术进步、需求增长、政策支持等多

重因素共同影响下, 我国电力储能技术应用快速发展且已初具规模。在电源侧, 得益于能源局关于发电厂并网运行考核及补偿机制(以下简称“两个细则”)的补充完善, 以及调频辅助服务市场的加快推进, 全国多家发电企业已率先开展储能技术应用探索, 发挥储能技术平滑出力波动、跟踪调度计划指令、提升新能源消纳水平, 参与联合调频辅助服务等作用。在电网侧, 为应对新能源大发展和特高压

收稿日期: 2020-02-21

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5278991900ML)

Supported by: Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (5278991900ML)

第一作者简介: 周喜超(1982), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为新能源并网、储能系统集成等技术, 306292745@qq.com。

电网建设,亟需提高电网调节灵活性及稳定性,发挥储能技术调峰调频、系统备用、黑启动、改善电能质量等作用。在用户侧,主要通过峰谷价差下的“谷充峰放”模式,改善电力用户电费结构,发挥储能技术削峰填谷、需量管理、需求响应以及虚拟电厂等作用。

随着储能技术商业化的发展,储能项目规模会逐步增加,储能各应用市场领域将更加明晰^[5-6],但工程实践中也发现了一些问题,如储能工程设计、消防安全等缺少相关标准参考,储能电池选型、电站规划配置、系统集成缺少顶层设计和理论支撑,储能系统调控和运行维护缺少经验,储能电池荷电状态(SOC)标定误差较大,系统调控未实现系统性全局最优等。

本文重点介绍电力储能技术的发展现状,及其在电源、电网、用户等方面的应用情况,并对未来储能技术的发展趋势进行展望,可为后续储能技术研究和工程实践提供参考。

1 储能主要技术

传统储能技术以蓄水储能和电化学储能为主,随着国家对于储能产业的重视以及技术更新速度的加快、制造工艺的发展,多种新型储能技术已经在实际工程中得到应用,而且在电力系统各个环节发挥重要作用。储能技术按照其能量转换机制可分为3类:物理储能、化学储能和其他储能。各储能技术类型特性比较如表1所示。

表1 储能技术类型特性比较
Tab.1 Performance comparison between and among different energy storage technologies

储能	储能类型	寿命	优点	应用范围	响应时间	效率
物理储能	抽水储能	>30 a	技术成熟、成本较低、寿命长	广泛应用于调峰、调频和备用电源场景	分钟级	70%~75%
	压缩空气	30~40 a	寿命长、性能稳定	广泛应用于调峰、调频和备用电源场景	分钟级	50%~70%
化学储能	锂离子电池	5~10 a	能量密度大	辅助可再生能源备用、调峰、调频、容量备用	百毫秒级	85%~98%
	全钒液流电池	5~15 a	安全性好	调峰、调频、USP、电能质量调节	百毫秒级	75%~85%
	铅炭电池	3~8 a	性价比高、技术成熟	削峰填谷、容量备用	百毫秒级	70%~90%
其他储能	超级电容	>30 000 次	响应速度快、转换效率高	电能质量调节、USP、削峰等	毫秒级	70%~90%

抽水蓄能是电力系统中的“巨型电池”,电站在夜晚用电低谷时将所发出的电能转换成水的势能,在用电高峰时期或电能短缺时将势能转化成电能以保证负荷的运行。其特点是:技术相对成熟、使用寿命长、功率容量大,但其响应速度相对较慢,并且对于选址的要求也相对较高。

压缩空气储能主要部件包括压缩机、压缩空气存储器、燃烧室、膨胀机和电动机/发电机等^[7]。在储能过程中,空气从大气环境进入压缩机,被压缩成高压空气后储存在压缩空气存储器中;在能量释放过程中,压缩空气存储器中的高压空气首先进入燃烧室,与燃料混合燃烧,成为高温高压空气,接着进入膨胀机做功输出电能。其特点是:技术成熟、功率容量大、使用寿命长、效率高,但投资成本高,必须满足某些地质条件(压力密封洞穴)。

锂离子电池被认为是当下综合性能最好的电池体系,已在储能电站中得到广泛使用,并迅速发展成为新一代电源,用于信息通信、电动车和混合

动力车及航空航天等领域。其特点是:能量密度高、循环寿命长、体积小、质量轻,但成本较高、容量会缓慢衰退、不耐受过充过放。

全钒液流电池的储能介质是含有钒离子的水溶液^[8]。在溶液中,钒离子的价态可以变化,通过价态的变化可以使化学能和电能之间相互转化,实现储能系统充电和放电的相互转化。其特点是:使用寿命长、安全性高、容量大,但成本较高,受钒的价格变化影响较大。

铅炭电池是从传统的铅酸电池演进而来的电容型电池技术,在铅酸电池的负极中加入了活性炭,显著提高了铅酸电池的寿命。其特点是:成本低、安全、原料易得、可靠、产业化技术成熟,但能量密度较低。

超级电容可以满足多个领域要求,目前市场规模及应用领域在不断增长。其特点是:输出功率高、响应快速、免维护、寿命长、工作温度范围较宽,但如果使用不当会造成电解质泄漏。

2 储能技术发展现状

我国储能产业的战略布局最早追溯到 2005 年出台的《可再生能源发展指导目录》；2011 年储能被写入“十二五”规划纲要；2017 年国家能源局出台储能行业第 1 个指导性文件《关于促进储能技术与产业发展的指导意见》，指出要在“十三五”期间实现储能由研发示范向商业化初期过渡，“十四五”期间实现商业化初期向规模化发展转变。

储能技术发展至今，主要科研投入还是围绕在电化学储能领域，尤其是锂离子电池、铅炭电池和全钒液流电池等方面的研发和应用已处于国际先进水平。近年来，由美国、智利以及我国实施的 MW 级电化学储能示范工程数量近百项，表 2 列出了国内、外典型 MW 级电池储能电站。我国已发布储能技术相关国家标准 35 项、行业标准 9 项、企业标准 14 项、团体标准若干项。

表 2 国内、外典型 MW 级电池储能电站
Tab.2 The list of typical MW level energy storage power stations

安装地点	电池类型	储能规模	应用功能
美国加利福尼亚州	液流电池	2 5MW×3 h	风场和光伏电站削峰填谷
中国辽宁卧牛石风场	液流电池	5 MW×2 h	提升电网接纳可再生能源能力
智利安多法加斯大	锂离子电池	20 MW×0.33 h	电网调频及备用电源
智利阿塔卡马	锂离子电池	12 MW×0.33 h	电网调频及备用电源
中国张北风光储示范工程	锂离子电池	14 MW×4.5 h	平抑波动、矫正预测误差、削峰填谷改善风电电能质量
江苏镇江电网侧储能	锂离子电池	101 MW×2 h	调峰、调频、应急响应
青海鲁能多能互补	锂离子电池	60 MW×2 h	对风电、光伏进行优化和补偿，减少弃风弃光，平滑出力曲线，削峰填谷

3 储能技术应用情况

根据调查，截至 2019 年底，全球已投运储能项目累计装机规模为 183.1 GW，同比增长 1.2%；国内已投运储能项目累计装机规模为 32.3GW，占全球 18%。预计到 2020 年底，中国储能市场的累计投运项目装机规模将达到 45.2 GW，在此基础上，到 2024 年储能市场规模将扩大 3 倍。

2019 年，我国电化学储能技术取得了重要进展，累计装机规模为 1 592.7 MW（图 1），占全国储能规模总额的 4.9%，同比增长了 1.5%。从地域分布看，主要集中于新能源富集地区和负荷中心地区；从应用分布看，用户侧储能装机占比最大，占 51%，其次是电源侧辅助服务（占 24%）和电网侧（占 22%）。

由于我国的能源中心和电力负荷中心距离跨度大，电力系统一直遵循着大电网、大机组的发展方向，按照集中输配模式运行。随着可再生能源的飞速发展和特高压电网建设加速，社会对电能质量要求不断提高，储能技术应用前景非常广阔^[9]。在

电源侧、电网侧、用户侧及微电网各应用场景，储能发挥的功能及其对电力系统的作用各不相同。

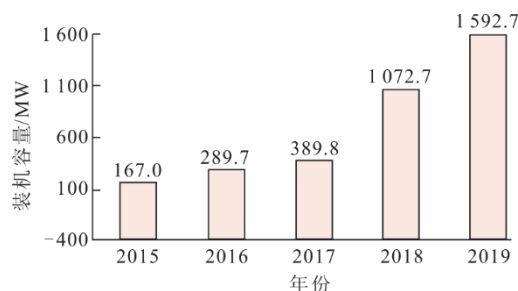


图 1 近年来我国电化学储能电站累计装机规模
Fig.1 The accumulative installation scale of electrochemical energy storage power station in China in recent years

2019 年 1 月，中国南方电网有限责任公司（南方电网）内部发布了《关于促进电化学储能发展的指导意见》，将储能作为推动发展、解决问题的重要手段。2019 年 2 月，国家电网有限公司（国家电网）印发了《关于促进电化学储能健康有序发展的指导意见》，文件厘定了国家电网各级公司发展储能的边界与重点。国家电网和南方电网相关政策对比如表 3 所示。

表 3 国家电网和南方电网相关政策对比
Tab.3 The relative policies on energy storage in State Grid Corporation of China and China Southern Power Grid

储能应用	国家电网	南方电网
电源侧	支持电源配置储能	鼓励电源侧配置储能
电网侧	将储能纳入电网规划并滚动调整	推进配电网储能发展、移动式储能应用、微电网储能应用及常规用户侧储能发展
用户侧	可参与电网需求响应、电量平衡和负荷特性改善，优先在电网调峰困难、改造升级成本较高的地区投资建设	推动完善电力市场机制，支持各类主体按照市场规则建设和运营储能系统

3.1 电源侧

储能传统发电领域主要是参与辅助调频服务,使电源发电更具有可控性^[9-12],在山西、内蒙古、山东、安徽等地应用较多。这些地区火电机组装机较多,水电较少,电源系统灵活性不足。这种场景下,需要配置功率型储能电池,响应速度快,实现与火电机组一体化调度,提升机组整体响应性能,增加机组设备的利用率^[13]。例如:山西晋能、同达等国内火电联合调频项目通常配置 9 MW/4.5 MW·h 容量,商业运营效果较为理想。

储能新能源领域主要是平滑出力波动、跟踪调度计划指令、提升新能源消纳水平。截至 2019 年 9 月底,中国光伏发电累计装机 1.9 亿 kW,风电累计装机 1.98 亿 kW,新能源装机占比已超过 20%,在电力系统中的地位悄然变化,正在向电能增量主力供应商过渡^[14-15]。光伏和风电出力具有很大的随机性、波动性和间歇性^[16],加装储能系统可以跟踪新能源发电计划出力,在出力较低时储能系统输出功率,保证负荷用电安全;在出力曲线尖峰时储能系统吸收功率,保证所输出的电能不被浪费^[17]。例如:国家风光储输示范一期项目配置 100 MW 风电/40 MW 光伏/20 MW 储能;青海格尔木时代光储联合发电项目配置 50 MW 光伏/15 MW 储能;辽宁卧牛石风电联合发电项目配置 50 MW 风电/5 MW 储能;青海格木多能互补项目配置 400 MW 风电/200 MW 光伏/50 MW 储能/50 MW 光热。

3.2 电网侧

储能在电网侧主要是发挥调峰调频辅助支撑、提供应急保障、确保安全稳定。2018 年以来,电网侧储能项目迅速发展,带动了电化学储能项目规模增长,中国首个百兆瓦电网侧储能电站集群,同时也是世界容量最大的电化学储能电站集群在江苏应运而生。同时,河南、湖南、甘肃、青海等省区的电网侧储能项目也逐步实施。南方电网于 2010 年建成 4 MW/16 MW·h 深圳宝清电池储能电站,成为中国首座兆瓦级调峰调频锂电池储能电站;河南电网已建成 100 MW/100 MW·h 电网侧储能电站;湖南长沙电池储能电站项目分为 2 期建设,一期规模为 60 MW/120 MW·h,已建成投运;辽宁大连 200 MW/800 MW·h 液流电池储能调峰电站是国家大型化学储能示范项目,一期 100 MW/400 MW·h 正在建设中。

在特高压电网中,储能是提供系统备用和应急

保障,确保电网安全运行的重要手段,必将加速发展,且可同时发挥多项作用。意大利 Terna 公司电网侧规模储能项目,通过对不同运行控制模式的切换,可同时承担一、二次调频,系统备用,减少电网阻塞,优化潮流分布等多重任务,最终起到提高电网运行稳定性作用。

在配电网中,储能可有效补充电力供应不足,治理配电网薄弱地区的“低电压”或分布式能源接入后引起的“高、低电压”问题,可同时解决季节性负荷、临时性用电、不具备条件增容扩建等配网供电问题,有效延缓配网新增投资。美国芝加哥电力利用可回收储能设备延缓变压器升级投资,属电网侧延缓输变电设施建设的典型应用。

3.3 用户侧

储能系统安装在负荷端可以保持电能质量,保证供电安全、稳定,减少电压波动对电能质量的影响。用户侧储能针对传统负荷可实施削峰填谷、需求响应和需量电费管理等。削峰填谷适用于高峰时段用电量大的用户,是目前最为普遍的商业化应用,通过“谷充峰放”降低用电成本;需求响应通过响应电网调度、帮助改变或推移用电负荷获取收益;需量管理通过削减用电尖峰,降低需量电费。江苏无锡星洲工业园储能系统项目(20 MW/160 MW·h)是全国最大容量商业运行用户侧储能,也是首个依照国网江苏省电力公司《客户侧储能系统并网管理规定》并网验收的项目。

用户侧储能还可与分布式可再生能源结合开展光储一体、充储一体应用。嘉定安亭充换储一体化电站项目,将电动汽车充电站、换电站、储能站和电池梯次利用等多功能进行融合。江苏车牛山岛能源综合利用微电网项目由储能设备及风、光、柴油机组成,是国内首个交直流混合智能型微电网。

然而,当前国内用户侧储能同样面临挑战:一是用户侧储能环境复杂,各类用户对储能的需求不尽相同,场地、安全等问题是推广用户侧储能项目的共性问题,加之相关标准尚不清晰,导致项目的可复制性低,非技术环节的降本难度大;二是电价的波动也影响了用户侧储能的收益水平,近 2 年工商业电价下调幅度达 20%,电价下降直接压缩了用户侧储能项目峰谷价差套利空间。

3.4 微电网

微电网作为未来电网的发展方向,在提高能源供应效率、降低损耗、提供高效便利的可再生能源

等方面具有重要作用。以储能为核心手段,可聚合可中断负荷、电动汽车等多种储能资源,协同分布式发电,构建虚拟电厂,参与需求侧响应和电力市场交易。微电网根据与大电网连接情况分为离网型微电网和并网型微电网。西藏尼玛县可再生能源局域网 1.2 MW/1.8 MW·h 工程是目前位于全球海拔最高、环境最恶劣地区的可再生能源局域网项目,整体由多种电池储能系统、柴油机及光伏组成。江苏连云港并、离网可切换储能项目,实现了用户负荷实时监测,可随时调节储能运行状态,保障用户供电可靠性。

储能应用于离网型微电网可提高分布式能源的稳定性,避免远距离传输给主电网造成传输压力及电力损耗^[18];能在夜间或分布式能源维修期间持续为主要负载提供部分电源,减少停电时间;储能系统可在微电网中分布式电源能量充足时进行存储,出现能量缺额时释放能量,保持内部能量平衡^[19-20]。

储能应用于并网型微电网可在大电网发生故障或者电能质量不能满足要求时,稳定电源的输出功率,调节输出的有功功率和无功功率,保证负荷安全稳定用电,同时有效解决电压骤降等电能质量问题。

3.5 需要关注的问题

储能在电源侧、电网侧、用户侧得到了广泛应用,国内外的典型示范相继涌现,取得了一系列进展,但还有诸多关键问题值得关注。对于电源侧储能,尤其是可再生能源发电,不仅需要考虑平抑风电/光伏的波动性、间歇性,还需要考虑充分利用间歇能源的广域自平滑特性,所以储能的布点位置就显得尤为重要。现有的研究以及示范工程考虑自平滑特性的偏少,直接导致储能容量配置偏大。对于电网侧储能,不仅需要考虑接受电网的统一调度,完成 AGC、AVC 等基本功能,还需要应对特高压线路紧急闭锁等故障应急处理,现有示范工程鲜有对二者进行统筹考虑。对于用户侧储能,既要完成削峰填谷这一主要功能,还要兼顾区域电网的需求响应;既要发挥各自个体的作用,还要兼顾汇聚效应这一典型应用。当前研究主要集中于前者,对后者研究较少。

4 结语与展望

大规模储能是国家战略,受国家各部委高度重视。国家层面关于储能方面的政策频出,近三年内五部委颁布的政策就有 20 余项,各级政府颁发的

配套政策累计达 50 余项,储能的战略地位被提到空前高度。储能技术日臻完善,在电源侧、电网侧、负荷侧都发挥了重要作用,大量的示范工程践行了其可行性和有效性,尤其是共享储能这一崭新商业模式的推广,为新能源发电厂提供弃风弃光电量的存储与释放,可有效缓解清洁能源高峰时段电力电量消纳困难,同时充分利用电网现有资源。多个国家已经把储能技术作为支撑智能电网和新能源发电的重要手段,开展了大量的储能示范工程项目,有效地推动了储能产业的发展。在国家清洁能源战略的引导下,随着储能成本的下降、技术的不断创新、商业模式的逐步丰富,储能产业必将快速发展。

综合考虑储能行业发展前景,对储能技术重点方向有以下建议:

1) 新材料技术的突破是储能技术进步的关键。随着材料技术的不断创新发展,储能技术在提高能量密度、延长使用寿命和降低成本等方面有望取得重要突破。

2) 储能技术仍将呈现百花齐放的格局,应根据不同行业、不同领域的需求,选择相适应的储能技术应用,以成本低、寿命长、高安全、易回收作为主要目标。

3) 储能项目顶层设计尤为关键,需要系统性研究电池选型、容量规划配置、系统集成、运行调控等关键问题,保障储能电站高效运转。

4) 随着储能技术的广泛应用,应重视各类型储能技术标准体系的建设,有效规范引导储能技术合理应用。

5) 从国家层面,各个执行层面应积极探索制定适合我国的电力市场交易机制与储能技术发展鼓励政策,促进新能源储能技术发展。

[参 考 文 献]

- [1] 陈大宇. 含电储能系统的新型辅助服务市场研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016: 21-28.
CHEN Dayu. Research on new auxiliary service market for electric energy storage system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016: 21-28.
- [2] 李建林, 王上行, 袁晓冬, 等. 江苏电网侧电池储能电站建设运行的启示[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 1.
LI Jianlin, WANG Shangxing, YUAN Xiaodong, et al. Enlightenment from construction and operation of battery energy storage station on grid side in Jiangsu power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 1.
- [3] 李建林, 田立亭, 来小康. 能源互联网背景下的电力储能技术展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 21.
LI Jianlin, TIAN Liting, LAI Xiaokang. Outlook of

- electrical energy storage technologies under energy internet background[J]. Power System Automation, 2015, 39(23): 21.
- [4] 李建林, 袁晓冬, 郁正纲, 等. 利用储能系统提升电网电能质量研究综述[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 15-24.
LI Jianlin, YUAN Xiaodong, YU Zhenggang, et al. Comments on power quality enhancement research for power grid by energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 15-24.
- [5] 陈永翀, 李爱晶, 刘丹丹, 等. 储能技术在能源互联网系统中应用与发展展望[J]. 电器与能效管理技术, 2015(24): 39.
CHEN Yongchong, LI Aijing, LIU Dandan, et al. Application and development of energy storage in energy internet system[J]. Low Voltage Apparatus, 2015(24): 39.
- [6] 徐少华, 李建林. 提高配电网分布式电源接纳能力的储能系统优化配置技术研究[J]. 电器与能效管理技术, 2017(13): 34-38.
XU Shaohua, LI Jianlin. Research of energy storage system's configuration technology to improve distribution network's renewable power adopt capacity[J]. Low Voltage Apparatus, 2017(13): 34-38.
- [7] 郭祚刚, 马溪原, 雷金勇, 等. 压缩空气储能示范进展及商业应用场景综述[J]. 南方能源建设, 2019(3): 17.
GUO Zuogang, MA Xiyuan, LEI Jinyong, et al. Review on demonstration progress and commercial application scenarios of compressed air energy storage system[J]. Southern Energy Construction, 2019(3): 17.
- [8] 张华民. 液流电池技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015: 56-67.
ZHANG Huamin. Flow battery technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015: 56-67.
- [9] 华光辉, 赫卫国, 赵大伟. 储能技术在坚强智能电网建设中的作用[J]. 供用电, 2010(4): 27-30.
HUA Guanghui, HE Weiguo, ZHAO Dawei. Role of Energy storage technologies in the construction of strong smart grid[J]. Distribution & Utilization, 2010(4): 27-30.
- [10] 牟春华, 兀鹏越, 孙钢虎, 等. 火电机组与储能系统联合自动发电控制调频技术及应用[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 29.
MU Chunhua, WU Pengyue, SUN Ganghu, et al. AGC frequency modulation technology and application for combination of thermal power unit and energy storage system[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 29.
- [11] 元博, 张运洲, 鲁刚, 等. 电力系统中储能发展前景及应用关键问题研究[J]. 中国电力, 2019, 52(3): 6-10.
YUAN Bo, ZHANG Yunzhou, LU Gang, et al. Research on key issues of energy storage development and application in power systems[J]. Electric Power, 2019, 52(3): 6-10.
- [12] 刘英军, 刘畅, 王伟, 等. 储能发展现状与趋势分析[J]. 中外能源, 2017(4): 80-88.
LIU Yingjun, LIU Chang, WANG Wei, et al. Analysis of development status and trend of energy storage technology[J]. Sino-Global Energy, 2017(4): 80-88.
- [13] 吴小刚. 配网储能系统的规划方法研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2015: 43-54.
WU Xiaogang. Research on the planning method of distribution network energy storage system[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2015: 43-54.
- [14] LI G D, LI G Y, ZHOU M. Model and application of renewable energy accommodation capacity calculation considering utilization level of inter-provincial tie-line[J]. Protection & Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 1-9.
- [15] CHAIBIY, ALLOUHI A, SALHIL M, et al. Annual performance analysis of different maximum power point tracking techniques used in photovoltaic systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 171-180.
- [16] 宁阳天, 李相俊, 董德华, 等. 储能系统平抑风光发电出力波动的研究方法综述[J]. 供用电, 2017(4): 2-11.
NING Yangtian, LI Xiangjun, DONG Dehua, et al. A review of the research methods of smoothing wind/PV power output with energy storage systems[J]. Distribution & Utilization, 2017(4): 2-11.
- [17] 曾琪. 基于动态博弈的车网互动策略研究[D]. 武汉: 华东交通大学, 2018: 35-47.
ZENG Qi. Research on interactive strategies of vehicle network based on dynamic game[D]. Wuhan: East China Jiaotong University, 2018: 35-47.
- [18] 赵文军. 离网型微电网能量管理系统的设计与实现[D]. 广州: 广东工业大学, 2019: 52-68.
ZHAO Wenjun. Design and realization of off-grid microgrid energy management system[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2019: 52-68.
- [19] 崔明勇, 王楚通, 王玉翠, 等. 独立模式下微网多能存储系统优化配置[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 30.
CUI Mingyong, WANG Chutong, WANG Yucui, et al. Optimal configuration of multi-energy storage system in standalone microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 30.
- [20] BADAL F R, DAS P, SARKER S K, et al. A survey on control issues in renewable energy integration and microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 87-111.

(责任编辑 李园)