

# 电化学储能在新能源发电侧的应用分析

张宝锋, 童 博, 冯仰敏, 刘庆元, 赵 勇  
(西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

[摘 要] 随着我国可再生能源发电装机容量不断增加, 以及新能源发电配置定量储能的政策陆续出台, 电化学储能发展呈现爆发式增长趋势。本文首先从电化学储能电池本体技术、储能系统集成技术、储能系统运行控制策略 3 个方面阐述了电化学储能技术的发展现状和特点; 然后基于已实施的新能源储能项目典型案例, 分析了当前新能源发电侧储能的应用方向、实现功能及技术特点, 并提出了储能在新能源发电侧的主要应用功能和技术研究趋势; 最后对储能技术在未来新能源发电侧的应用前景和发展趋势进行了展望, 指出了 4 个方向。

[关 键 词] 电化学储能; 新能源; 风力发电; 光伏发电; 发电侧; 辅助服务

[中图分类号] TM61; TK02 [文献标识码] A [DOI 编号] 10.19666/j.rlfid.202004120

[引用本文格式] 张宝锋, 童博, 冯仰敏, 等. 电化学储能在新能源发电侧的应用分析[J]. 热力发电, 2020, 49(8): 13-18.  
ZHANG Baofeng, TONG Bo, FENG Yangmin, et al. Application analysis of electrochemical energy storage technology in new energy power generation side[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8): 13-18.

## Application analysis of electrochemical energy storage technology in new energy power generation side

ZHANG Baofeng, TONG Bo, FENG Yangmin, LIU Qingyuan, ZHAO Yong  
(Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

**Abstract:** With the continuous increase of the installed capacity of renewable energy power generation in China, and the formulation of policies about allocating certain scale energy storage system for new energy power generation, the development of the electrochemical energy storage exhibits an explosive growth trend. In this paper, the current situation and characteristics of electrochemical energy storage technology are described from three aspects: the electrochemical energy storage battery technology, the energy storage system integration technology, and the operation control strategy of energy storage system. Based on the typical demonstration projects of new energy equipping energy storage system that have been implemented, the application direction, implementation function and technical characteristics of energy storage in the field of new energy power generation side are analyzed. Furthermore, the main application functions and technology research trend of energy storage in new energy generation side are proposed. Finally, the prospect and development trend of energy storage technology in the new energy generation side in the future are prospected, four directions are given.

**Key words:** electrochemical energy storage, new energy, wind power generation, photovoltaic power generation, power generation side, ancillary services

随着国家环境保护力度的不断加强, 我国可再生能源发电装机规模迅速扩大。据国家能源局统计数据, 截止到 2019 年底: 全国风电累计装机容量 2.1 亿 kW, 其中陆上风电累计装机 2.04 亿 kW、海上风电累计装机 593 万 kW, 风电装机容量占全部发电装机容量的 10.4%; 全国新增光伏发电装机容量

3 011 万 kW, 其中集中式光伏新增装机 1 791 万 kW、分布式光伏新增装机 1 220 万 kW, 光伏发电累计装机容量达到 20 430 万 kW, 同比增长 17.3%。可再生能源发电装机容量占比逐渐攀升, 但新能源发电受风、光自然资源因素变化影响, 存在预测难、控制难、调度难的问题, 大规模并网对电网电能质

收稿日期: 2020-04-29

基金项目: 西安热工研究院有限公司研究开发基金项目(TM-18-TYK18)

Supported by: Research and Development Fund of Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd. (TM-18-TYK18)

第一作者简介: 张宝锋(1977), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为新能源设备及储能技术应用, zhangbaofeng@tpri.com.cn.

量和暂态稳定性存在影响。同时,我国能源结构正在逐步转型,需应对持续增容的风力发电、光伏发电对电力系统及电网稳定运行带来的挑战。

飞速发展的储能技术为解决以上问题提供了可行性。储能技术可以在电力系统的发、输、配、用各环节发挥相应作用,增加电力输送环节的柔性特性,使电能具备时间和空间转移能力,对于保障电网安全、改善电能质量、提高可再生能源比例、提高能源利用效率具有重要意义。本文主要对电化学储能在新能源发电侧的应用展开分析。

## 1 电化学储能技术

电化学储能是目前各类储能技术中除抽水蓄能外,应用最广、发展最快、产业基础最好的储能技术。该技术并非新兴技术,但其与新能源的结合应用是亟待发展的领域。

### 1.1 电化学储能电池技术

电化学储能电池种类繁多,应基于具体应用场景和功能需求,根据各电池技术的特点及对优缺点进行综合比较来选择适当的技术。供选择的主要技术特征包括:能量密度、功率密度、响应时间(ms, s, min)、储能效率(充放电效率)、设备寿命(或充放电次数、循环寿命,年)、技术成熟度、自放电、经济因素(投资成本、运行和维护费用)、安全和环境方面等。

从目前电化学储能技术在我国的应用看,锂离子电池和铅酸电池占绝对比重,其余液流电池、钠硫电池有小部分使用<sup>[1]</sup>。从应用领域分析,锂离子电池主要应用于可再生能源并网储能、辅助服务领域。自2018年以来,大批电网侧、发电侧电化学储能项目陆续建成并投运<sup>[2]</sup>。锂离子电池的种类较多,主流锂离子电池技术参数对比见表1<sup>[3-4]</sup>。

表1 主流锂离子电池技术参数  
Tab.1 The technical parameters of main lithium-ion battery

项目	磷酸铁锂电池	锰酸锂电池	钴酸锂电池	三元锂(镍钴锰酸锂)电池	钛酸锂电池
比能量(W·h·kg <sup>-1</sup> )	130~160	130~180	180~260	180~240	50~80
充电(倍率)	1C, 最大4C	0.7~1C, 最大3C	0.7~1C, 1C以上会缩短寿命	0.7~1C, 1C以上会缩短寿命	典型1C, 最大5C
放电(倍率)	1C, 可实现2.5C	1C	1C	1C, 可实现2C	可达10C
循环性/次	2 000~6 000	500~2 000	500~1 000	800~2 000	>10 000
热失控	270℃, 充满非常安全	250℃, 高负荷促进热失控	150℃, 满充易带来热失控	210℃, 高负荷促进热失控	相对最安全的 锂电池
环保性	无毒	无毒	钴有毒	镍、钴有毒	无毒
适应领域	大规模储能	大规模储能	传统3C产品	大规模储能	大规模储能

磷酸铁锂电池具有良好的结构稳定和热稳定性,高温循环性能优异,经过改进的电池容量可达165 mAh/g<sup>[5]</sup>,因此应用广泛,但是磷酸铁锂生产技术要求高,批量生产一致性差;锰酸锂电池高温容量衰减严重,充放电过程结构不稳定,影响其广泛使用;钴酸锂电池因为抗过充电安全性能差,限制了使用场合;三元材料集中了复合型材料各自的优点,组合性能优于单个化合物,在充放电过程中可保持稳定的层状结构,容量更高,但其能量密度相对增大,带来热失控问题,给应用带来安全隐患;钛酸锂电池电子导电性差、价格高,无法实现大规模应用。

除锂离子电池之外,钠硫电池、液流电池在发电侧也有少量应用。钠硫电池比能量高(理论上可达760 W·h/kg,是铅酸电池的3~4倍)、功率密度大

(充放电效率可达100%<sup>[3]</sup>),但在使用中需防止钠与硫直接反应带来的剧烈放热问题。从经济性和安全性考虑,钠硫电池不适合大规模用于电力储能。液流电池种类较多,常见的如全钒氧化还原液流电池、锌-溴液流电池、锌-氧(空气)液流电池等。液流电池安全性高,可实现全充全放,寿命长,其功率取决于单体电池的面积、层数及电堆的串并联数,容量取决于电解液体积和活性材料的浓度,具有功率和容量两者相互独立的特点,较适合电力调峰场景应用等<sup>[6]</sup>。

其余如铅酸电池虽有价格优势,但能量密度小、功率特性差、寿命较短,铅酸电池经负极材料引入碳材料形成铅碳电池,虽提升了原有材料的性能,但能量密度低,其综合性能还无法满足大规模新能源发电侧储能应用。

### 1.2 储能系统集成技术

针对具体应用，储能系统的集成技术和方式也比较重要，决定了储能系统整体的使用效率和功能体现，主要涉及电池成组技术、电化学储能变流器系统技术以及相应的系统拓扑结构，同时储能电池的运行需要电池管理系统的技术支持。

1) 电池成组导致寿命问题。由于电池的不一致性客观存在，需要做到成组电池容量、内阻、充放电特性趋于一致，在集成后通过均衡策略尽可能实现性能均匀，整体表现良好特性，有利于电池寿命延长。

2) 温度控制问题。温度对电池的容量甚至寿命、安全影响明显。在电池成组中考虑冷却方式、散热结构、隔热方式、风道设计等相关热管理技术。

3) 电气安全问题。电池系统是一个高能量体，通过较合理的串、并联连接方式实现分流分压，防止局部产生电气安全事故。

4) 电化学储能变流器是储能与交流电网连接的枢纽。根据不同的规模等级，其应用场景有所区别。新能源发电侧一般需用 MW 级电化学储能，所以大功率大容量储能变流器的研究是当前趋势。

5) 系统拓扑结构是对具体的应用场景，基于以上技术的综合应用，包括直流/交流充放、电压选择、功率/电流分配、优化布置等，组成能量流、信息流（控制信息、状态信息）合理的系统结构，达到高效、安全、稳定的电能交换。

6) 电池管理系统实现对电池系统的高效管理。包括对电池剩余电量（SOC）的准确估算，健康状态、故障状态的管理，同时基于数据处理实现能效分析，其中对剩余电量（SOC）的精确计算、高精度数据采集和处理、状态管理方法是研究热点。

### 1.3 发电侧储能系统运行控制策略

能量管理系统是不同能量与多种信息管理的融合。针对大规模新能源发电侧并网领域，考虑新能源测辅助服务要求、经济性、系统可靠性和安全性等目标和制约条件，研究基于不同目的趋向的新能源与电化学储能系统联合运行控制策略是目前的方向。比如以新能源发电的出力波动率作为约束条件，联合考虑发电计划出力偏差，同时结合可再生能源功率预测技术，基于储能容量限定，依据实时电价等因素构建系统最优性能指标运行模式，通过控制策略进行有效协调，在最大程度跟踪发电出力计划的同时实现储能电池的最优运行，有利延长储能电池在役寿命<sup>[7]</sup>，实现储能设备利用率最大化。基于特定区域负荷，通过风光储系统的联合控制策略最大化利用风光资源、平滑稳定功率<sup>[8]</sup>。

## 2 电化学储能在新能源发电侧的应用现状

由于新能源的发电特性对电网的安全稳定产生了不可忽视的影响，电网公司对新能源的并网指标提出了严格要求。此外，为弥补新能源最大功率点跟踪（MPPT）模式带来的问题而加装的集中式无功补偿装置，给新能源的投资运行带来了挑战<sup>[4]</sup>，需摸索电化学储能与新能源发电新的结合模式。

在实际应用中，电化学储能一般分为功率型和容量型。功率型应用有快速响应能力要求，如快速参与调频/调压辅助服务、快速平抑功率，对持续时间要求不高；容量型应用则要求具有较长的放电时间，需要在一定时间段内有较大电容量的支持。

近年来，我国在新能源发电侧配置储能可以分 2 个阶段。第一阶段为示范工程阶段，部分项目案例见表 2。

表 2 部分新能源发电侧储能示范项目  
Tab.2 Some demonstration projects of energy storage at the new energy power generation side

项目	储能规模	储能技术类型	备注
国家风光储输示范工程	33 MW/95.5 MW·h	锂电池 24 MW/66 MW·h 铅酸电池 2 MW/12 MW·h 钛酸锂电池 1 MW/0.5 MW·h 液流电池 2 MW/8 MW·h 超级电容	电池倍率不高，平抑出力，跟踪计划 调峰填谷 调频/调压
国家能源集团卧牛石风电储能	5 MW/10 MW·h	钒液流电池	0.5C
国家能源集团北镇储能型式风电场	8 MW/14 MW·h	磷酸铁锂 5 MW/10 MW·h 钒液流电池 2 MW/4 MW·h 超级电容 1 MW/33 kW·h	0.5C（电池） 3C（电容）
华能青海格尔木光伏储能电站项目	15 MW/18 MW·h	磷酸铁锂	1C 平抑出力，调峰、调频，解决弃光电能

从示范项目来看：储能系统的放电以低倍率 0.5C、1C 为主，主要为容量型应用，参与平滑出力、跟踪计划、参与调峰，少数采用高倍率尝试参与调频/调压；主流采用了磷酸铁锂电池，尝试液流电池应用。从电池功率配置分析，示范储能项目基本不具备调频能力。可见，锂离子电池或液流电池被公认为该应用领域的主要电池技术，当前方向为非调频的容量型功能，其中磷酸铁锂电池市场占比较高。另外，超级电容功率响应快，属于功率型，在快速调频服务领域已有案例尝试。

第二阶段为新能源新建项目配置定量储能项目。截至目前，部分省份已明确发布关于风光配储能相关政策文件（表 3）。如青海省要求新建风场配置 10% 容量储能，新疆维吾尔自治区鼓励光伏配置 10 MW/10 MW·h 容量储能，湖南省通知新建风电场配置 20% 容量储能，安徽省通知风电配套 20% 储能容量。目前国内已有报道的风电配套储能项目近 20 例。从储能规模来看，近期项目中风电配置储能的比例从 10%、20% 到 25% 不等，储能时长为 1~2 h，仅采用全钒液流电池储能项目的储能时间为 4 h。

表 3 部分省份新能源发电侧储能政策  
Tab.3 The energy storage policies about new energy generation in some provinces

省份	文件	要求或建议
青海	《青海省 2017 年度风电开发建设方案》	建设规模的 10% 配套储能装置
河南	《关于组织开展 2020 年风电、光伏发电项目建设的通知》	优先支持配置储能的新增平价项目，配置比例达 30%
湖南	《关于发布全省 2020—2021 年度新能源消纳预警结果的通知》	配置比例 20%
内蒙古	《2020 年光伏发电项目竞争配置方案》	优先支持光伏+储能项目建设，光伏电站储能容量不低于 5%、储能时长在 1 h 以上
新疆	《关于做好 2020 年风电、光伏发电项目建设有关工作的通知（征求意见稿）》	要求充电功率 1 万 kW 以上，持续充放电 2 h 以上
江西	《江西省新能源产业高质量跨越式发展行动方案(2020—2023 年)》	支持锂电池、钒电池等二次电池
安徽	《安徽省实施长江三角洲区域一体化发展规划纲要行动计划》	配置功率容量 20%，持续充放电 1 h
江苏	《关于进一步促进新能源并网消纳有关意见的通知》	鼓励配置一定比例的储能设施，支持储能参与电力辅助服务市场

从目前各省针对新能源配置储能的要求和实际项目实施结果看，电池主体配置 1C 倍率，储能时长为 1 h，少数采用 0.5C 倍率，选择了安全性相对高、成本压力小、容量型的电池，主要实现平滑出力、跟踪计划、参与调峰等服务功能。基于目前的电池技术和成本投入，以及新能源储能联合调频/调压技术问题，新能源储能联合调频有待进一步研究，同时也需要配套相应激励政策。

新能源发电侧配置储能需要根据不同区域电网能源结构有所区别，比如风力发电、光伏发电比例大，导致其他发电如火电调峰压力大，相对储能配置比例要高，同时需兼顾平衡成本，促进新能源健康发展。

### 3 电化学储能在新能源发电侧的应用分析

可再生能源发电具有随机性、间歇性、波动性，为了增强可再生能源发电的可调度性，提升其并网能力，一般配置电化学储能时，针对光伏发电以容量型应用为主，对风电以功率型应用为主。配置电

化学储能主要存在以下几种功能服务和应用方向<sup>[9]</sup>，实际项目中一般为几种功能的综合应用。

#### 1) 确保输出连续稳定

通过平抑出力，在风电/光伏随环境资源状况变化或设备性能不稳定导致功率波动时，储能系统进行快速充放以调整功率，实现平滑稳定功率。需要根据区域功率波动实际特性，合理选取储能类型、功率、容量以及相应控制策略<sup>[10]</sup>。

风电/光伏电站出力的功率预测值可信度低，通过配置一定容量的储能系统可使新能源电站根据计划的出力曲线或调度指令，通过控制储能电池的充放电过程，对不同时间尺度的出力计划跟踪控制策略进行有效协调，使实际功率输出尽可能接近计划出力曲线。同时，储能系统有助于提升短时功率预测的精确率和合格率，进一步减少短时功率预测偏差大导致的被考核<sup>[11]</sup>。针对风力发电输出功率的强波动性以及微电网混合储能系统的容量优化，采用混合储能容量多级优化配置方法，分阶段分解混合储能功率，同时根据分解结果对混合储能容量进行配置<sup>[12]</sup>。有研究提出基于小波包分解原风电输出

功率,通过储能能量管理协调控制策略实现协调平滑输出功率<sup>[13]</sup>。

#### 2) 参与电源调频/调压辅助服务

电池储能系统在发电侧提升新能源电能输出调节能力,能够灵活地调整有功、无功的输入和输出<sup>[14]</sup>,因而对于增强发电侧频率和电压调节能力、改善并网电能质量具有重要意义。

通过储能系统与风力发电机之间的协调控制可提升风力发电并网过程的暂态频率响应特性<sup>[15]</sup>,利用储能装置无功及电压快速调节功能可实现在接入网无功功率就地补偿,解决可再生能源发电带来的电压波动等问题<sup>[16]</sup>。考虑一次调频具有尖峰特性,通过风电转子惯量释放和储能稳态支撑的联合协调控制策略(其中一次调频中短时尖峰功率由风力发电承担,调频中所需要的稳态功率由储能系统承担),实现以最小储能功率配置的风力发电主动支撑电网调频目标。

#### 3) 确保电能质量

通过储能系统快速调节,可防止负载波动、电压下跌和其他外界干扰引起的电网波动对系统造成大的影响,保证电力输出的品质和可靠性。储能系统不仅能保证系统的稳定可靠,还是解决诸如电压脉冲、涌流、电压跌落和瞬时供电中断等动态电能质量问题的有效途径。

#### 4) 削峰填谷

根据系统负荷的峰谷特性,在负荷低谷期储存多余的电能,同时配合电网调度,还可以从电网吸收功率和能量(作为网内备用容量);在负荷高峰期释放电池中储存的能量,从而减少电网负荷的峰谷差,降低电网供电负担,一定程度上还能使新能源发电在负荷高峰期出力更稳定。可利用风力发电和光伏发电的特性互补,通过风光储联合系统调度模型,将系统低谷时段负调峰能力极限作为目标,在最低储能容量需求下,满足系统稳定性实现新能源的最大可消纳能力。

另外,可实现弃风、弃光回收利用功能,在限电情况下一定程度挽回业主损失电量和效益。但由于储能成本原因,以及弃风弃光现象的动态变化,不建议将利用储能回用弃电作为新能源发电侧的主要发展方向。

## 4 研究展望

随着新能源装机容量的增加及定量配置储能

政策的出台,未来储能在新能源发电侧的应用范围和规模将进一步扩大,功能也将更加丰富,但电化学储能仍存在较多问题亟待解决,如电池生产成本较高、存在安全隐患、缺少储能应用有效激励、与新能源的高度融合技术等问题。因此,为满足储能系统在新能源发电侧的快速健康发展需求,建议从以下4个方面开展研究。

1) 当前电池本体技术来源于动力电池,需研发适合新能源发电侧大容量、大功率应用的储能技术,在降低储能系统、设备制造与应用成本的同时,针对既定应用场景的适应性进行深层次优化研究。开发高转换效率、长寿命、高安全性能、MW级大容量、成本适宜的新型电化学储能电池产品是趋势。

2) 未来新能源发电侧配置储能功能趋于多项综合服务,所以需要具备功率型和容量型综合性能的电池。一方面可通过对电池本体进行研发实现;另一方面可利用2种储能技术的性能互补研究,实现综合功能,如采用超级电容与容量型蓄电池的混合储能,可以实现功率和容量的综合功能<sup>[17]</sup>。

3) 在电池匹配的基础上,开展风电与储能的调频/调压高度融合,特性互补。研究具有针对性、精细化的控制策略,实现储能的精准控制和应用。

4) 进行储能系统的综合评价技术和方法研究。从安全性、电性能、场景适应性以及经济性方面进行四维评价,结合检测技术、评价指标的研究,实现储能系统的综合评价。

### [参考文献]

- [1] 中国能源研究会储能委员会,中关村储能产业技术联盟. 储能产业研究白皮书 2019 [EB/OL]. (2019-05-18) [2020-04-25]. <http://www.cnesa.org/index/inform>. China Energy Research Association Energy Storage Committee, Zhongguancun Energy Storage Industry Technology Alliance. White paper on energy storage industry research 2019 [EB/OL]. (2019-05-18) [2020-04-25]. <http://www.cnesa.org/index/inform>.
- [2] 王宁,刘晓峰,陈泽华. 锂离子电池寿命预测综述[J]. 电器与能效管理技术, 2018(11): 1-13. WANG Ning, LIU Xiaofeng, CHEN Zehua. Survey on lithium-ion battery life estimation[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2018(11): 1-13.
- [3] 丁玉龙, 来小康, 陈海生. 储能技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018: 11-13. DING Yulong, LAI Xiaokang, CHEN Haisheng. Energy storage technology and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2018: 11-13.
- [4] 张文建, 崔青汝, 李志强, 等. 电化学储能发电侧的应用[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(1): 287-295. ZHANG Wenjian, CUI Qingru, LI Zhiqiang, et al. Application of electrochemical energy storage in power

- generation[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(1): 287-295.
- [5] 堵莎莎, 袁金丽, 张亚, 等. 几种锂电池正极材料的发展与比较[J]. 当代化工研究, 2018(11): 58-59.  
DU Shasha, YUAN Jinli, ZHANG Ya, et al. Development and comparison of several cathode materials for lithium battery[J]. Modern Chemical Research, 2018(11): 58-59.
- [6] 邓一凡. 液流电池储能系统应用与展望[J]. 船电技术, 2017, 37(12): 33-38.  
DENG Yifan. Application and prospect of energy storage on flow-battery[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2017, 37(12): 33-38.
- [7] WEI Q L, SHI G, SONG R Z, et al. Adaptive dynamic programming-based optimal control scheme for energy storage systems with solar renewable energy[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7): 5468-5478.
- [8] 张明理, 王璐, 徐建源, 等. 风光储联合发电系统复合控制策略研究[J]. 高压电器, 2018, 54(1): 64-72.  
ZHANG Mingli, WANG Lu, XU Jianyuan, et al. Research on compound control strategy of wind/PV/storage[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(1): 64-72.
- [9] 李相俊, 王上行, 惠东. 电池储能系统运行控制与应用方法综述及展望[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3315-3325.  
LI Xiangjun, WANG Shangxing, HUI Dong. Summary and prospect of operation control and application method for battery energy storage systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3315-3325.
- [10] 汪海蛟, 江全元. 应用于平抑风电功率波动的储能系统控制与配置综述[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(19): 126-135.  
WANG Haijiao, JIANG Quanyuan. An overview of control and configuration of energy storage system used for wind power fluctuation mitigation[J]. Power System Technology, 2014, 38(19): 126-135.
- [11] 李娜, 白恺, 柳玉, 等. 用于提升风电场短期功率预测准确率的储能系统出力控制策略[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(1): 100-107.  
LI Na, BAI Kai, LIU Yu, et al. The energy storage system output control strategy to improve the short term wind power forecasting accuracy rate[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(1): 100-107.
- [12] 冯磊, 杨淑连, 徐达, 等. 考虑风电输出功率波动性的混合储能容量多级优化配置[J]. 热力发电, 2019, 48(10): 44-50.  
FENG Lei, YANG Shulian, XU Da, et al. Multistage optimal capacity configuration of hybrid energy storage considering wind power fluctuation[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(10): 44-50.
- [13] 张保明, 陈洁, 付菊霞, 等. 基于小波包混合储能系统的有功功率波动控制策略[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(3): 75-80.  
ZHANG Baoming, CHEN Jie, FU Juxia, et al. Control strategy of wind power fluctuation based on wavelet packet hybrid energy storage system[J]. Motor and Control Applications, 2020, 47(3): 75-80.
- [14] 胡娟, 杨水丽, 侯朝勇, 等. 规模化储能技术典型示范应用的现状分析与启示[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 879-885.  
HU Juan, YANG Shuili, HOU Zhaoyong, et al. Present condition analysis on typical demonstration application of large-scale energy storage technology and its enlightenment[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 879-885.
- [15] WU Z P, GAO D W, ZHANG H G, et al. Coordinated control strategy of battery energy storage system and PMSG-WTG to enhance system frequency regulation capability[J]. IEEE Transaction on Sustainable Energy, 2017, 8(3): 1330-1343.
- [16] 徐明, 李相俊, 贾学翠, 等. 规模化电池储能系统的无功功率控制策略研究[J]. 可再生能源, 2013, 31(7): 81-88.  
XU Ming, LI Xiangjun, JIA Xuecui, et al. Research on reactive power control strategy for large-scale battery energy storage systems[J]. Renewable Energy Resources, 2013, 31(7): 81-88.
- [17] 邓海华. 蓄电池与超级电容混合储能的稳压控制器设计[D]. 南宁: 广西大学, 2018: 2-6.  
DENG Haihua. Design of hybrid energy storage controller for battery and ultracapacitor[D]. Nanning: Guangxi University, 2018: 2-6.

(责任编辑 李园)