

储能电站设计准则及其典型案例

李建林¹, 谭宇良¹, 王含²

(1. 北京市变频技术工程研究中心(北方工业大学), 北京市石景山区 100144;

2. 国家电投集团科学技术研究院有限公司, 北京市昌平区 102200)

Design criteria of energy storage power plants and typical case studies

LI Jianlin¹, TAN Yuliang¹, WANG Han²

(1. Inverter Technologies Engineering Research Center of Beijing (North China University of Technology), Shijingshan District, Beijing 100144, China; 2. State Power Investment Corporation Research Institute, Changping District, Beijing 102200, China)

摘要: 青海、甘肃等地储能电站相继投运, 为我国储能电站的发展提供了宝贵的实践经验, 但储能电站建设缺乏统一的设计规范和准则。首先介绍储能系统在电站中所起的作用; 进而对储能电站设计、电池选型测试以及接入电网等方面的标准进行梳理; 通过对我国典型的储能电站示范应用的内部储能系统结构进行介绍; 得出电站在建设过程中需要遵循的设计准则; 最后讨论了未来储能电站在建设方面所需要注意的问题。

关键词: 储能电站; 系统结构; 示范应用; 储能标准

Abstract: At present energy storage power stations distributed in northwestern provinces in China were put into operation one after another and it provided valuable practical experiences for the development of energy storage power stations. However, there was short of uniform design specifications and criteria for the construction of energy storage power stations. For this reason, the roles that the energy storage power system could play in the power station were presented, and then both standards and technical specifications for the design of energy storage power station, the guide of model choice and testing of the battery and the grid-connection of the energy storage power station were sorted and analyzed. By means of introducing and demonstrating the internal energy storage structure applied in typical energy storage power station in China, the design criterion

to be followed in the construction of energy storage power station in the future were obtained, and the issues to be pay special attention were discussed.

Keywords: energy storage power station; system structure; demonstration application; energy storage standard

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0177

0 引言

张北风-光-储基地顺利投运十余年以来, 相继涌现了辽宁卧牛石风-储电站; 青海格尔木光-储电站; 某地风-储-蓄热锅炉电站; 山西/广东等地火-储联合电调频电站等电源侧储能电站; 江苏、河南、湖南以及福建百 MW 级电网侧储能电站; 江苏百 MW 级用户侧储能电站; 近年来又出现了青海共享储能模式。这一系列有益的尝试, 为储能电站的健康有序发展奠定了坚实基础^[1-4]。

储能电站通过对电能快速存储和释放, 不仅可以参与系统调峰调频, 平抑新能源波动, 降低弃风弃光率, 而且在提升电网紧急控制能力, 延缓电网建设及升级改造等方面也有显著作用。随着国家储能政策的逐步完善实施, 储能电站日益成为现代电力系统的一种新型功能综合体和独立运营的经济实体, 商业模式也日益清晰、发展前景逐步明朗^[5-7]。

由于储能技术的发展, 储能电站的顶层设计规划、运行控制、安全、电网调度等诸多方面就显得尤为重要, 储能电站的建设亟需一套设计准则来规范行业发展, 本文总结了储能电站中储能技术的作用, 列举了储能电站在接入电网、消防等方面的标准, 对山西、辽宁、甘肃等地典型储

基金项目: 国家自然科学基金项目(51777197); 国网公司科技项目“面向新能源经济运行的储能系统建模仿真与优化配置技术研究”(5278991900ML)

National Natural Science Foundation of China (51777197); State Grid Corporation's science and technology project "Research on Modeling, Simulation and Optimization of Energy Storage System for New Energy Economy" (5278991900ML)

能电站内部结构、运维进行分析,得出相关结论并对储能电站的建设给出相应的建议,希望对今后储能电站的建设提供一定的参考。

1 储能技术在风储发电站中的作用

近年来随着储能技术的发展,可再生能源配置储能已经成为趋势,“十四五”时期,电网调峰需求进一步增大,可再生能源将作为常规电源予以考核和约束,配置一定比例的储能成为主要的调节手段,西藏、青海、湖南、山东等省份陆续出台政策,对按比例配置储能的可再生能源场站给与优先并网、增加发电小时数等激励政策。以风电为例,储能技术在风力发电中的主要作用有平抑风电波动、减小弃风率、跟踪风电计划出力等等。

1.1 平抑风电波动

根据标准《风电场接入电力系统技术规定》,风电并网的有功变化率和风电场的装机容量有关,如表1所示,风电场功率波动会超出并网要求,为了满足风电并网标准,需要采用储能来平抑短时间尺度(1~10 min)风电功率波动。

由图1锂离子风电场的输出功率监控可以看出,加入电池储能系统后可以使风电并网功率的分钟级最大有功功率变化量减小,抑制风电功率的波动。实时检测风力发电情况,对风力发电的

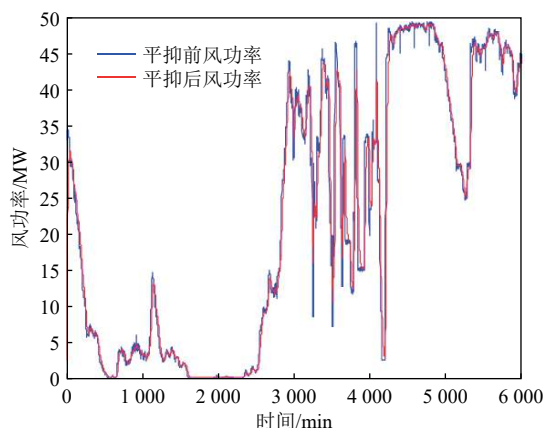


图1 平抑风电波动示意图

Fig. 1 Before and after the stabilizing wind power fluctuation

表1 我国风电并网标准有功变化率要求

Table 1 Requirements for active power change rate of my country's wind power grid connection standard

风电场装机容量/MW	10min最大变化量/MW	1min最大变化量/MW
<30	10	3
30~150	装机容量/3	装机容量/10
>150	100	30

瞬时冲击进行补充,降低风力发电对电网的冲击影响[8-9]。

平滑风力功率输出控制框图见图2。风力发电与储能进行互补,储能监控系统内的自动平滑

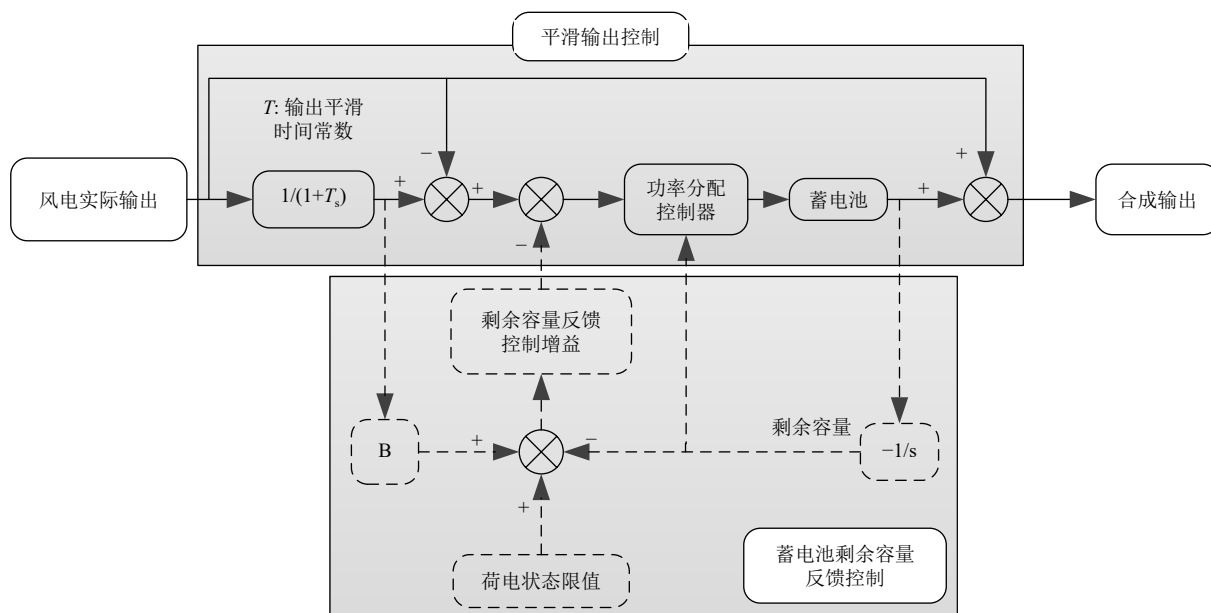


图2 平滑风力功率输出控制框图

Fig. 2 Control block diagram of smoothing wind power output

程序根据运行要求，按照设置好的平滑范围控制储能机组吞吐风力发电功率，将多时间尺度平滑风力发电出力波动控制在规定范围内。因此风力发电经过储能控制平滑后波动率大大降低^[10-11]。

1.2 减小弃风率

如图 3 所示， P_2 是限发功率， $P_1 - P_2$ 是储能功率，在风电场限发情况下，风电场发电功率达到 P_2 ，风电场所发电量无法上网，本地消纳能力不足，储能系统在能量管理系统的调控下，与风电场的 AGC 系统配合，储能系统储电，避免风能限发的损失，风电场不限发情况下，储能系统放电，提高风电场发电量增加风电场收益。

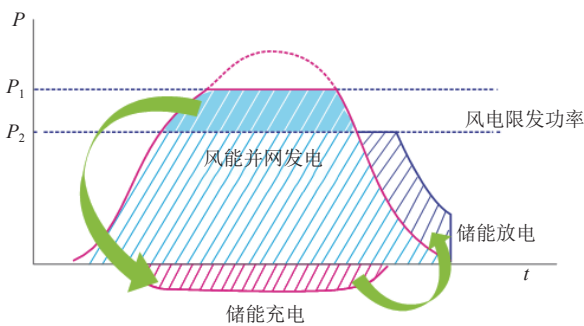


图 3 减小弃风率示意图

Fig. 3 Diagram of reducing wind curtailment rate

1.3 跟踪计划出力

如图 4 所示，新能源发电系统具有不确定性，出力情况随着天气等外界因素变化而变化，加入储能系统后，根据当地天气情况进行电站的发电量预测，一般情况下，风储联合发电可运行在跟踪调度计划曲线的模式下，使风电由一个出力波动的电源转化为出力确定的电源，实现风储联合发电和常规电源一样，完成计划的发电工作^[12-14]。

在电场限发情况下，储能系统在能量管理系

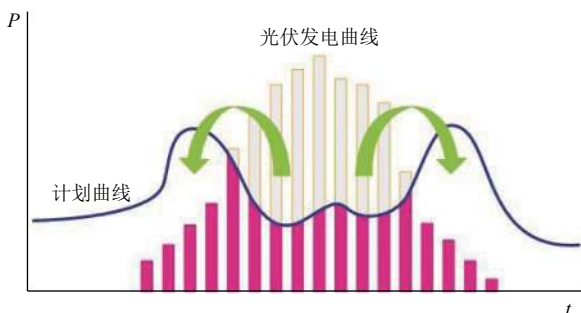


图 4 跟踪计划出力示意图

Fig. 4 Diagram of tracking planned output

统的调控下，与电场的自动发电系统（Automatic Generation Control AGC）系统配合，储能系统储电，避免限发造成的损失，增加电场收益，根据发电预测情况以及蓄电池荷电状态（State of charge SOC）情况，调整蓄电池的充电功率，尽量保证蓄电池以稳定的电流充电，延长蓄电池寿命^[15]。由于储能电站对新能源具有消纳作用，所以储能电站的建设就显得至关重要，需要按照国家以及行业标准来规范。

2 储能电站建设相关标准

2.1 储能电站设计标准

近年来随着工业的发展，储能技术在电网中的作用也越来越明显，储能电站的设计和运行就显得尤为重要，储能电站设计上主要着重 3 个方面。成本：如何优化布线，提高设备的转换效率，降低用电损耗来降低度电成本；寿命：如何设计提高电站的使用寿命；运维：占地面积大小，电池等设备庞大，监控信息多杂，如何才能提高运维的管理水平^[16-17]。部分储能电站设计标准见表 2。

表 2 电站设计标准

Table 2 Power plant design standards

序号	标准号/序列号	标准名称	进度
1	GB/T 32574-2016	抽水蓄能电站检修导则	发布
2	GB/T 51048-2014	电化学储能电站设计规范	发布
3	DL/T 1815-2018	电化学储能电站设备可靠性评价规程	发布
4	NB/T 42090-2016	电化学储能电站监控系统测试规范	发布
5	DL/T 1816-2018	电化学储能电站标识系统编码导则	发布
6	DL/T 1870-2018	电力系统网源协调技术规范	发布

2.2 储能电站电池选型及测试标准

目前我国应用最多的是电化学储能，而电化学储能的重中之重是电池，电池的好坏以及管理影响着储能电站的运行和发展，储能系统使用的电池主要有能量型电池与功率型电池，因为其特性不同，所以应用场景也不相同^[18]。电池管理系统（Battery Management System BMS）是电池与用户之间的纽带，主要就是为了能够提高电池的利用率，防止电池出现过度充电和过度放电，根据电压、电流、温度等指标可以推测出电池的 SOC 状态，预防储能电池发生故障。由此可以看

出, 储能电池的运行状态以及寿命影响着储能电站的使用寿命, 国家近年来对储能电池尤为重视, 颁布政策、制定标准保证储能电池在出厂检测以及运行时不会发生意外事故, 部分储能电池标准如表3。

2.3 储能电站接入电网标准

当电网出现大功率缺额, 有功支撑能力不足时, 需配置储能, 电网侧储能的主要作用是提升电网安全稳定水平, 以提高电力系统整体经济性为目标, 按照统一规划、有序建设的原则进行合理配置, 在某些峰谷差较大的电网中, 尖峰负荷数值较大, 但持续时间较短, 电源和电网的利用效率降低。储能可提高尖峰负荷时段的电网供电能力, 减少为满足尖峰负荷而新增的电网和电源投资。在储能接入电网或者配电网的时候, 无论是分布式储能还是其余形式的储能需要一定的规范让电网可以有效、安全的运行。表4为部分储

能系统接入电网需遵循的标准。

3 典型储能示范工程

3.1 山西朔州老千山风场储能项目

该电场位于山西省右玉县老千山, 发电场内加装锂电池储能系统, 储能系统通过升压变压器进行统一升压后接入风电场 35 kV 母线, 储能系统的作用主要是平滑风电场出力波动。10 MW 储能系统安装于电厂东侧, 每个集装箱规模为 1 MW/1 MWh, 每两个储能系统间隔 2.2 m。400 V 升 35 kV 变压器安装在集装箱北侧, 两个集装箱共用一个变压器, 单个变压器规格为 2 MW。

采用的集装箱储能系统是模块化 1 MW/1 MWh 集装箱, 每个储能集装箱内布局图如图 5 所示, 储能集装箱的主要组成部分为: 电池系统、电池管理系统、过程控制系统 (Process Control

表 3 电池测试标准

Table 3 Battery testing standard

序号	标准号/序列号	标准名称	进度
1	GB/T 36280-2018	电力储能用铅酸电池	发布
2	GB/T 36276-2018	电力储能用锂离子电池	发布
3	GB/T 34131-2017	电化学储能电站用锂离子电池管理系统技术规范	发布
4	GB/T 22473-2008	储能用铅酸电池	发布
5	T/CEC 176-2018	大型电化学储能电站电池监控数据管理规范	发布
6	T/CEC 172-2018	电力储能用锂离子电池安全要求及试验方法	发布
7	T/CEC 169-2018	电力储能用锂离子电池内短路测试方法	发布
8	T/CEC 171-2018	电力储能用锂离子电池循环寿命要求及快速检测试验方法	发布
9	T/CEC 170-2018	电力储能用锂离子电池烟爆炸试验方法	发布
10	NB/T 42091-2016	电力储能用锂离子电池技术规范	发布

表 4 接入电网标准

Table 4 Standards for access to the power grid

序号	标准号/序列号	标准名称	进度
1	GB/T 36547-2018	电化学储能系统接入电网技术规定	发布
2	GB/T 36548-2018	电化学储能系统接入电网测试规范	发布
3	T/CEC 173-2018	分布式储能接入配电网设计规范	征求意见
4	NB/T 33015-2014	电化学储能系统接入配电网技术规定	发布
5	NB/T 33014-2014	电化学储能系统接入配电网运行控制规范	发布
6	NB/T 33016-2014	电化学储能系统接入配电网测试规程	发布
7	Q/GDW 564-2010	储能系统接入配电网技术规定	发布
8	Q/GDW 676-2011	储能系统接入配电网测试规范	发布
9	Q/GDW 696-2011	储能系统接入电网运行控制规范	发布
10	Q/GDW 697-2011	储能系统接入配电网监控系统功能规范	发布

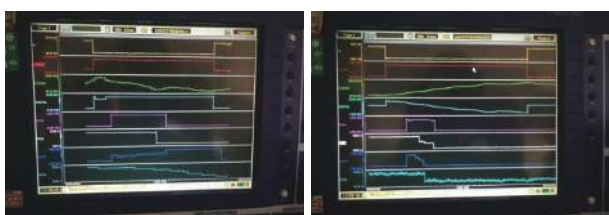


图7 老千山风电场加装储能平滑输出对比图

Fig. 7 Comparison chart of adding energy storage device in Laoqianshan wind farm to smooth output the power output

由10套40呎箱式储能电池（锂电池系统、电池控制柜）、5套20呎中压箱式储能逆变器（集成储能逆变器、升压变、高压环网柜）、1套20呎箱式成套开关柜（集成成套开关柜、直流屏）、1套20呎箱式主控监控系统组成。

10 MW 储能系统分为5个2 MW 储能单元，每个2 MW 储能单元是有2台1 MW 储能子单元组成，每个4 MWh 储能电池先通过电池柜汇流后，接到1 MW 储能逆变器直流侧，1 MW 进行

逆变后，2台1 MW 储能逆变器交流直并后，通过2.2 MVA 双绕组变压器进行隔离升压，升到6.3 kV，电气接线图如图8所示。

储能锂电池系统以模组（Module）和开关机（Switch Gear）为基本单元，系统的BMS系统分3级管理，分别为模组BMS(Module BMS)、机架BMS (Rack BMS)、系统BMS(System BMS)，Module BMS 能够控制风扇的转速和单体电芯的电压均衡性，Rack BMS 能够显示电池充放电时容量、健康状态。控制继电器开关和盘级单元电压的均衡性，System BMS 能够实时对电池剩余容量、健康状况进行预估。箱式储能电池系统由10套4018 kWh 锂电池集装箱系统组成，每套锂电池集装箱容量为4018 kWh，含储能电池组、电池控制柜、温控系统、自动消防系统、压力排风口及箱体等。集装箱内部实物及外部效果图如图9所示。

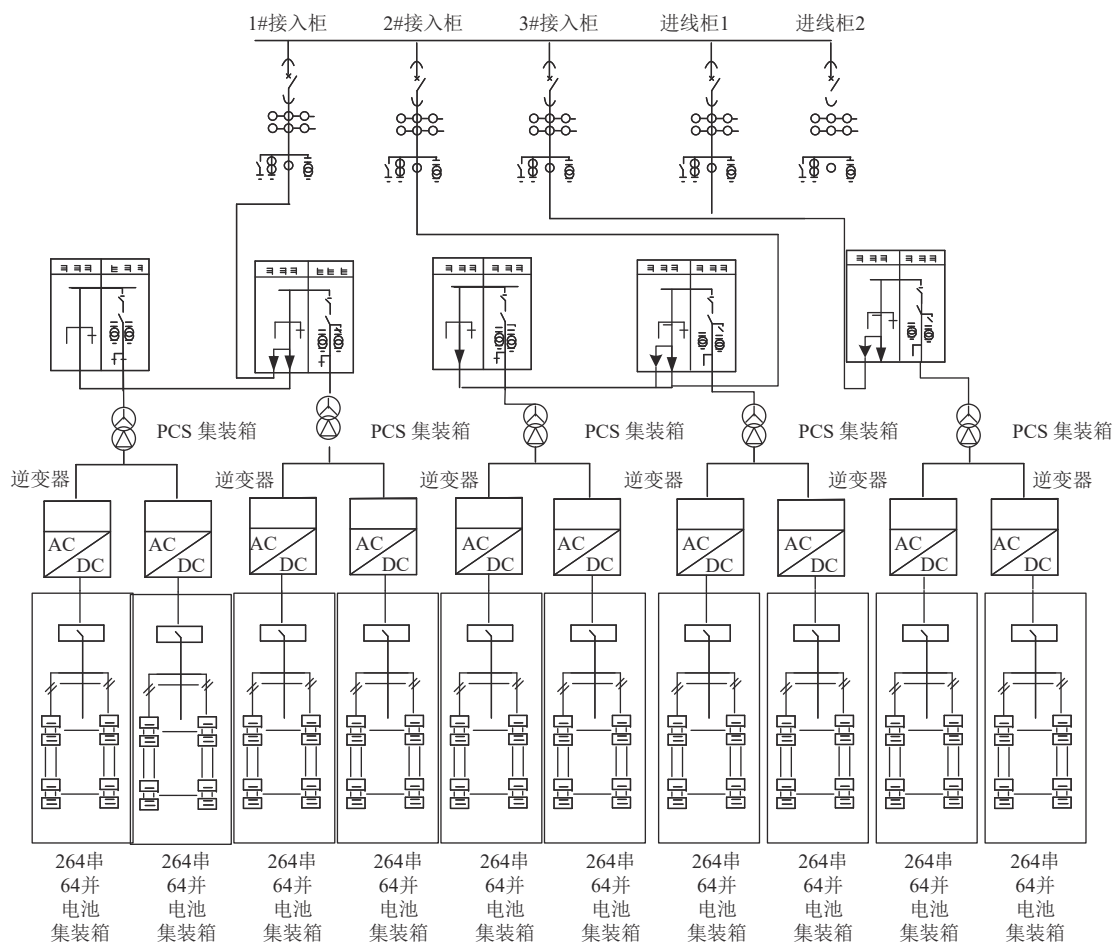


图8 电气接线示意图

Fig. 8 Diagram of electrical wiring



图 9 锂电池集装箱外观以及内部实物图
Fig. 9 Appearance of lithium battery container and internal physical drawing

为了保证储能调峰系统安全可靠、高效、长寿命运行，本项目的储能逆变器选用功率为 1 MW。该型号储能逆变器具有跟踪精度高，响应时间短、调节速率快，电源范围宽、转换效率高等优点^[19]。基于储能电站上层能量管理系统可实现包括平滑风电功率输出、跟踪发电计划出力及提高预测精度等功能。

该箱式储能系统的设计满足国际、国内标准，该项目指定的《箱式储能系统成品调试规范》中引用和参考了 GB 51048-2014 电化学储能电站设计规范、Q/GDW 564-2010 储能系统接入配电网技术规定、GB/T 36276-2018 电力储能用锂离子电池等国内关于储能系统的标准。储能调频系统防雷接地严格按照 GB50343-2012《建筑物电子信息系统防雷技术规范》、GB50057-2010《建筑物防雷设计规范》执行，保证储能系统的安全性。

3.3 辽宁卧牛石风电场液流电池储能项目

辽宁卧牛石风电场液流电池储能示范电站建成于 2012 年底，49.5 MW 风电场配备 10% 比例储能系统（5 MW），储能装置容量按 5 MW×2 h 配置，是当时世界上规模最大的液流电池储能电站。具有完整功能的储能型风电场的储能系统包括储能装置（包括电池系统和电池能量管理系统 BMS）、电网接入系统（或称 PCS，能量转换系统，包括变压器）、中央控制系统、风功率预测系统、能量管理系统、电网自动调度接口、环境控制单元等部分。储能装置建设在风电场升压站内。本项目及其配套并网工程，静态总投资 6955 万元。

卧牛石储能系统用于跟踪计划发电（储能）、平滑风电功率输出，还具备暂态有功出力紧急响应、暂态电压紧急支撑功能。其接线图如图 10 所示。

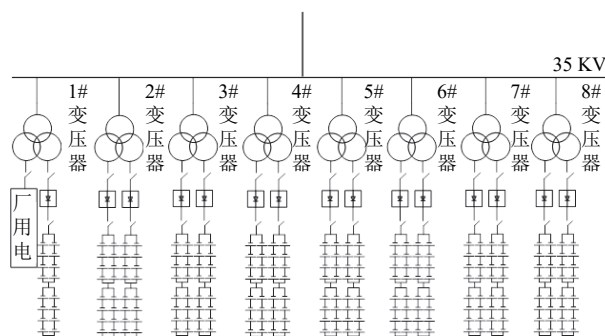


图 10 储能系统一次接线示意图
Fig. 10 Schematic diagram of primary connection of energy storage system

电池储能系统是由储能电池组、电池管理系统（BMS）、储能逆变器、升压变压器和就地监控系统及储能电站监控系统等设备组成。储能系统采用全钒液流电池，由 15 个 352 kW×2 h 全钒液流电池单元系统组成，每个 352 kW×2 h 全钒液流电池单元系统是由 2 个 176 kW×2 h 全钒液流电池系统组成，如图 11 所示。单个 176 kW×2 h 全钒液流电池系统包括 1 个正极电解液储罐、1 个负极电解液储罐、8 个电池模块（每个电池模块的功率为 22 kW，8 个电池模块 4 串 2 并），每个 176 kW×2 h 电池系统在液体管路上各自独立，在电路上实现耦合连接。

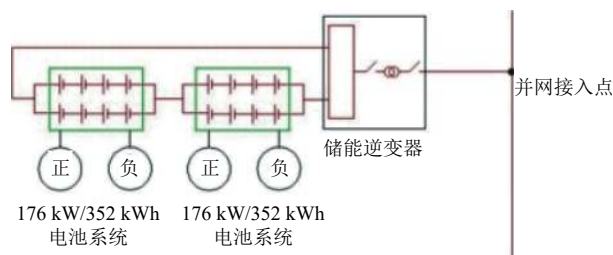


图 11 储能单元 352 kW×2 h 组成示意图
Fig. 11 Composition of energy storage unit 352 kW × 2 h

基于上层的能量管理系统，可以实现储能系统跟踪计划出力，实验结果下图 12 所示，加入电池储能系统之后，风电并网功率可以较好地跟踪调度的限电功率指令，提高风电跟踪计划出力能力。跟踪计划出力的最大跟踪误差为 3.812 MW。

3.4 甘肃酒泉“电网友好型新能源发电”示范项目

甘肃酒泉风电基地的风能开发利用主要集中在玉门、瓜州、马鬃山三个区域内，整个酒泉风电群距离兰州负荷中心的平均距离约为 1000 km。甘肃酒泉瓜州干河口示范风电场由鲁能公司建设，

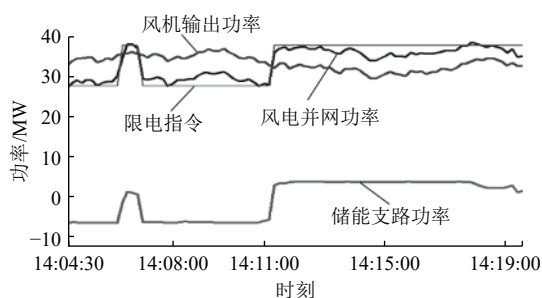


图 12 储能系统跟踪出力示意图

Fig. 12 Sketch map of tracking output of energy storage system

分为南、北两个风电场，共包含 32 台 3 MW 华锐 SL3000 双馈风电机组。

每 8 台风电机组经一路 35 kV 架空线路汇集至干北 330 kV 升压站 3#主变压器的 E 段 35 kV 母线。示范风电场经 E1、E2、E3、E4 四路馈线接入 35 kV 母线，系统接线示意图如图 13 所示。

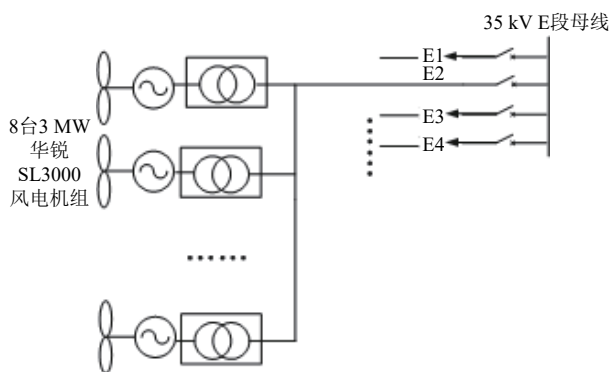


图 13 系统接线示意图

Fig. 13 System wiring diagram

1 MW/1 MWh 箱式锂离子电池储能系统经低压双分裂绕组变压器并入 35 kV 馈线。系统包含 2 台 500 kVA DC/AC 变流器 (PCS)，每台 PCS 带 3 个电池簇，每簇电池由 19 个电池组串联而成；2 个 3.2 V 125 Ah 的锂离子电池单体并联后成为 1 个电池模块，12 个模块串联成组为 1 个电池组。每簇电池成组后直流额定电压 768 V，工作范围为 600 V 至 876 V。

图 14 为储能系统箱体，采用玻璃钢、新型恒温材料以及通风阻沙系统替代传统空调系统对储能系统进行热管理，舱内包括动力配电箱、消防系统、监控系统、温控系统。适用于示范地区高温、高寒、强风、多沙的环境。

3 MW 双馈机组，转子侧由 2×750 kW 背靠背变频器并网，300 kW 超级电容储能也由两组独立



图 14 1 MW/1 MWh 箱式锂离子电池储能系统示意图

Fig. 14 1 MW/1 MWh box-type lithium-ion battery energy storage system

的超级电容储能经 150 kW DC-DC 变流器分别并入变频器直流母线。每组超级电容器由 18 个 48V 模块串联。超级电容储能与机组变频器均安装于机舱内部。

示范风电场接入的 330 kV 升压站安装了 1 MW/1 MWh 的锂离子电池储能系统，用于提高风电场功率调节能力和暂态支撑能力^[20]。300 kW 超级电容储能系统。用于验证电池储能和超级电容储能在风电场稳态功率控制和暂态支撑中的作用。

4 储能电站设计准则

随着储能技术的不断发展以及储能市场的逐步释放，百 MW 级、GW 级电化学储能电站在电源侧、电网侧相继投运，为可再生能源基地的电力品质改性、特高压线路的远距离输送、电力紧急响应提供了有力保障，必将引发我国电力供应体系一场划时代的革命^[21-22]。通过对典型储能电站以及储能政策、标准的梳理，得到启示如下：

1) 电化学储能电站按照功能区域划分基本模块，各基本模块统一技术标准，并且设计的方案应该通用化，可以覆盖各种类型的储能电站，电站的通用技术、设计规范、技术导则以及接入电站的规范应一体化考虑。

2) 核心装备应更加工业化，最大限度实现工厂内规模生产、集成调试、标准配送，现场施工更加机械化，提高工程质量。

3) 电池舱通道宽度预留 1 m 以上，保证运维空间，PCS、主变均布置于户内，可保证运维检修不受天气影响，小储能电站应采用一级增压系统，减少能耗，电站内采用低能耗设备，减少场地内变压器数量，有效减少占地面积。

4) 采用三级防护系统, 最大程度保证储能电站安全性, BMS、EMS 系统实时监控电池状态和储能电站系统状态作为一级防护, 合理设计防火分区作为二级防护电池舱内设置灭火装置, 电池舱外设置水消防系统, 共同作为储能电站灭火的最后一道防线。分别设置大、中、小三层防火单元, 保证储能电站防火防爆、安全稳定的运行。

5 建议

储能 5 大类 17 项经典功能, 衍生出了种类繁多的金融产品, 逐步还原其商品属性, 不同的应用场景、不同的功能定位、不同的投资主体、不同的运营模式, 对其设计提出了新的挑战, 为此, 对电化学储能电站的设计准则及细则进行梳理就显得尤为必要了, 结合储能电站的设计, 给出如下建议:

1) 储能电站的容量配置、布局等应通过专业软件计算, 储能电站的功能应该多元, 确保电站的多方位收益和基本功能, 电站的海量信息应及时收集并上传, 为电站的运行稳定提供保障。

2) 电池首选磷酸铁锂电池, 模组采用模块化设计, 储能变流器的选用应以提高效率、节约电站成本为主, 监控系统接入容量及数据存储容量支持扩展。

3) 储能电站宜具备虚拟同步发电机功能, 使储能电站具有常规火电厂同样外特性并配置高安全特性、完备控制策略的多级防护体系, 具备实际工程经验。

参考文献

- [1] 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 (in Chinese).
- [2] 袁小明, 程时杰, 文劲宇. 储能技术在解决大规模风电并网问题中的应用前景分析 [J]. *电力系统自动化*, 2013(01): 20 - 24.
YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, WEN Jinyu. Application prospect analysis of energy storage technology in solving large-scale wind power grid connection problem [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013(01): 20 - 24 (in Chinese).
- [3] 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 (in Chinese).
- [4] 俞恩科, 陈梁金. 大规模电力储能技术的特性与比较 [J]. *浙江电力*, 2011(12): 8 - 12.
YU Enke, CHEN Liangjin. Characteristics and comparison of large-scale power storage technology [J]. *Zhejiang Electric Power*, 2011(12): 8 - 12 (in Chinese).
- [5] 李建林, 马会萌, 田春光, 等. 基于区间层次分析法的电化学储能选型方案 [J]. *高电压技术*, 2016, 42(9): 2707 - 2714.
LI Jianlin, MA Huimeng, TIAN Chunguang, *et al.* Selection scheme of electrochemical energy storage based on interval analytic hierarchy process method [J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(9): 2707 - 2714 (in Chinese).
- [6] 熊雄, 杨仁刚, 叶林, 等. 电力需求侧大规模储能系统经济性评估 [J]. *电工技术学报*, 2013, 28(9): 224 - 230.
XIONG Xiong, YANG Rengang, YE Lin, *et al.* Economic evaluation of large-scale energy storage system on electricity demand side [J]. *Electrical Engineering magazine*, 2013, 28(9): 224 - 230 (in Chinese).
- [7] 舒彤, 何斌. 电化学储能应用现状及对策研究 [J]. *中国电力企业管理*, 2019(19): 56 - 60.
SHU Tong, HE Bin. Application status and countermeasures of electrochemical energy storage [J]. *China Electric Power Enterprise Management*, 2019(19): 56 - 60 (in Chinese).
- [8] 耿坤龙. 计及不确定性的风光储联合调度优化及效益评估 [D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- [9] 赵健, 王奕凡, 谢桦, 等. 高渗透率可再生能源接入系统中储能应用综述 [J]. *中国电力*, 2019, 52(04): 167 - 177.
ZHAO Jian, WANG YiFan, XIE Hua, *et al.* Summary of energy storage application in high permeability renewable energy access system [J]. *Electric Power*, 2019, 52(04): 167 - 177 (in Chinese).
- [10] Gengyin Li, Guodong Li and Ming Zhou. Comprehensive evaluation model of wind power accommodation ability based on macroscopic and microscopic indicat-

- ors [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 215–226.
- [11] 孙辉, 刘鑫, 贲驰, 等. 含风储一体化电站的电力系统多目标风险调度模型 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(5): 94–101.
SUN Hui, LIU Xin, BEN Chi, *et al.* Multi-objective risk scheduling model of power system containing power station with integrated wind power and energy storage [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5): 94–101 (in Chinese).
- [12] 杨婷婷, 李相俊, 齐磊, 等. 基于机会约束规划的储能系统跟踪光伏发电计划出力控制方法 [J]. 电力建设, 2016, 37(08): 115–121.
YANG Tingting, LI Xiangjun, QI Lei, *et al.* Opportunity constrained programming-based energy storage system tracking photovoltaic power generation plan output control method [J]. Electric Power Construction, 2016, 37(08): 115–121 (in Chinese).
- [13] 闫鹤鸣, 李相俊, 麻秀范, 等. 基于超短期风电预测功率的储能系统跟踪风电计划出力控制方法 [J]. 电网技术, 2015, 39(02): 432–439.
YAN Heming, LI Xiangjun, MA Xiufan, *et al.* Energy storage system tracking wind power plan output control method based on ultra-short-term wind power forecasting power [J]. Power System Technology, 2015, 39(02): 432–439 (in Chinese).
- [14] 戚永志, 刘玉田. 风光储联合系统输出功率滚动优化与实时控制 [J]. 电工技术学报, 2014, 29(08): 265–273.
QI Yongzhi, LIU Yutian. Rolling optimization and real-time control of output power of wind-solar storage system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(08): 265–273 (in Chinese).
- [15] 靳文涛, 李蓓, 谢志佳. 电池储能系统在跟踪风电计划出力中的需求分析 [J]. 储能科学与技术, 2013, 2(03): 294–299.
JIN Wentao, LI Bei, XIE Zhijia. Demand analysis of battery energy storage system in tracking wind power plan output [J]. Energy Storage Science and Technology, 2013, 2(03): 294–299 (in Chinese).
- [16] 伍俊, 鲁宗相, 乔颖, 等. 考虑储能动态充放电效率特性的风储电站运行优化 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11): 41–47.
WU Jun, LU Zongxiang, QIAO Ying, *et al.* Optimal operation of wind farm with hybrid storage devices considering efficiency characteristics of dynamic charging and discharging [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 41–47 (in Chinese).
- [17] 靳文涛, 徐少华, 张德隆, 等. 并网光伏电站 MW 级电池储能系统应用及响应时间测试 [J]. 高电压技术, 2017, 43(07): 2425–2432.
JIN Wentao, XU Shaohua, ZHANG Delong, *et al.* Application and response time test of mw-level battery energy storage system used in PV power station [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(07): 2425–2432 (in Chinese).
- [18] 沈汉铭, 俞夏欢. 用户侧分布式电化学储能的经济性分析 [J]. 浙江电力, 2019, 38(05): 53–57.
SHEN Hanming, YU Xiaohuan. Economic analysis of user-side distributed electrochemical energy storage [J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(05): 53–57 (in Chinese).
- [19] 徐谦, 孙轶恺, 刘亮东, 等. 储能电站功能及典型应用场景分析 [J]. 浙江电力, 2019, 38(05): 6–13.
XU Qian, SUN Yikai, LIU Dongliang, *et al.* Review of function and typical application scenario analysis for energy storage station [J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(05): 6–13 (in Chinese).
- [20] 刘皓明, 陆丹, 杨波, 等. 可平抑高渗透分布式光伏发电功率波动的储能电站调度策略 [J]. 高电压技术, 2015, 041(010): 3213–3223.
LIU Haoming, LU Dan, YANG Bo, *et al.* Dispatch strategy of energy storage station to smooth power fluctuations of high penetration photovoltaic generation [J]. High Voltage Engineering, 2015, 041(010): 3213–3223 (in Chinese).
- [21] 倪驰昊, 刘学智. 光伏储能系统的电池容量配置及经济性分析 [J]. 浙江电力, 2019, 38(01): 4–13.
NI Chihao, LIU Xuezhi. Battery capacity allocation and economic analysis of photovoltaic energy storage system [J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(01): 4–13 (in Chinese).
- [22] 李彬, 凌艳. 电力物资供应链大数据分析管控体系建设研究 [J]. 科技与创新, 2019(21): 102–103+107.
LI Bin, LING Yan. Research on the construction of big data analysis and management system for power material supply Chain [J]. Science and Technology, 2019(21): 102–103+107 (in Chinese).

收稿日期: 2020-04-24

作者简介:

李建林 (1976), 男, 通信作者, 博士, 教授, 主要从事大规模储能技术研究, E-mail: dkyjl@163.com;

谭宇良 (1997), 男, 硕士研究生, 主要从事大规模储能技术研究, E-mail: 89641895@qq.com;

王含 (1983), 女, 博士, 教授级高工, 主要从事新能源发电、储能技术研究, E-mail: 1175924@qq.com.