

基于全球能源互联网典型特征的 储能需求及配置分析

叶季蕾¹, 李斌¹, 张宇², 李明哲¹, 石博文¹, 王皓靖²

(1. 南京工业大学能源科学与工程学院, 江苏省 南京市 211816;

2. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海市 虹口区 200000)

Energy Storage Requirements and Configuration Analysis Based on Typical Characteristics of Global Energy Internet

YE Jilei¹, LI Bin¹, ZHANG Yu², LI Mingzhe¹, SHI Bowen¹, WANG Haojing²

(1. School of Energy Science and Engineering, Nanjing Technology University, Nanjing 211816, Jiangsu Province, China;

2. State Grid Shanghai Power Company Electric Power Research Institute, Hongkou District, Shanghai 200000, China)

摘要: 全球能源互联网的发展对长距离电力能量供需平衡、供应持续可靠性提出了更大的挑战。不同类型的储能技术是解决电力电量平衡的优选手段, 是全球能源互联网发展必不可少的组成部分。储能的需求和配置与具体应用场景的特征、应用目标紧密相关。通过文献调研和示范工程, 分析了全球能源互联网 3 种典型应用场景中储能技术的配置方法和性能需求, 从而给出了储能类型、储能配置的功率和放电时间范围建议。针对全球能源互联网的大规模清洁能源和远距离传输的特征, 提出了具体的储能接入拓扑, 为模拟储能接入全球能源互联网应用的功能验证提供了解决方案。

关键词: 全球能源互联网; 储能; 配置; 接入拓扑

ABSTRACT: The development of global energy internet (GEI) poses greater challenges to long-distance power energy supply and demand balance and sustainable supply reliability. Different types of energy storage technologies are the preferred means to solve the power and electricity balance, which are essential parts of GEI development. The requirements and configuring of energy storage are closely related to the characteristics and goals of specific application scenarios. Through literature research and demonstration projects, the configuration methods and performance requirements of energy storage technologies in three typical application scenarios of GEI were analyzed.

基金项目: 上海市 2020 年度“科技创新行动计划”技术标准项目(20DZ2205400)。

Project Supported by Technical Standard of Shanghai 2020 “Technology Innovation Action Plan” (20DZ2205400).

The suggestions on energy storage types, power of energy storage configuration and discharge time range suitable for different applications were given. Aiming at the characteristics of large-scale clean energy and long-distance transmission of the GEI, a specific energy storage access topology was proposed, which provided a solution for the functional verification of simulated energy storage access to GEI applications.

KEY WORDS: global energy internet; energy storage; configuration; access topology

0 引言

全球能源互联网的核心是能源清洁发展和能源全球配置^[1]。可再生能源接入比例将达 80%, 特高压输电将跨越不同时区, 地域长度可达 5000 km 以上, 全球能源互联网发展将面临着高比例可再生能源供电持续可靠性、跨时空能源生产与消费的功率匹配和能量平衡、跨洲互联电网运行方式突变及故障扰动下区域电网系统稳定性等诸多挑战。具体包括: 全球能源互联网能源基地可再生资源的随机性、间歇性可能导致的长时间尺度(天级)的电力缺乏, 进而造成负荷中心电力能量供需不平衡问题; 高比例风电、光伏等资源的短时功率波动对送、受端电网的频率和电压暂态稳定影响及功率匹配问题; 全球能源互联直流骨干输电系统换相失败暂态过程引发的电压波动及有功振

荡问题；区域负荷中心交直流混联电网故障造成瞬态、动态过程的潮流转移、线路阻塞及有功缺额等诸多问题。

储能技术种类多样、发展迅速，在电力系统中的多种应用功能已经得到了示范验证^[2-12]。抽水蓄能、电化学储能等规模化储能技术能够实现能量的存储与释放，将电力的生产和消费在时间上进行解耦，使传统的需实时平衡的“刚性”电力系统变得“柔性”，可以提高电网运行的安全性和灵活性，是发展全球能源互联网的重要技术支撑^[13-15]。以抽水蓄能、压缩空气储能为代表的大规模储能技术较为成熟，在可再生能源基地可解决数小时级的能量平衡及功率匹配问题，提高可再生能源消纳；各类电池储能可以灵活实现分钟级到小时级有功、无功动态响应，用于平抑可再生能源波动、提供输配线路的电压支撑；超级电容和超导磁储能可实现毫秒级的功率调节，用于短时间的功率支撑等；储热、储氢技术可实现超长时间的能量存储，满足数天以上时间尺度的能量调节，保障可再生能源基地电力缺乏时的电能持续可靠供应^[16]。

综上所述，储能技术将在全球能源互联网的应用中发挥至关重要的作用。本文首先从全球能源互联网的典型特征对储能的需求出发，分析储能的作用，提出适用于全球能源互联网典型场景的储能技术，调研总结大容量储能技术的发展现状；然后，根据全球能源互联网的典型场景案例，计算出储能的配置范围；最后，提出规模化储能在全球能源互联网场景中的典型接入方案。

1 全球能源互联网的典型特征及储能需求分析

1.1 超大规模可再生能源基地的接入对储能的需求

全球能源互联网中的超大规模可再生能源基地位于北极和赤道地区，网络结构相对薄弱，抗扰动能力较差，外送规模受到限制^[1]。一方面，由于可再生能源的短期波动和周期性变化引起的线路电压超限现象将逐步出现；另一方面机组设备容量不足、网架结构限制、风电反调峰作用等

因素将导致电网调峰面临很大的困难。

在风力发电、太阳能光伏发电等可再生能源基地，通过一定容量的储能装置，一方面可平滑可再生能源输出功率，减少短时功率波动对电网的频率和电压影响；另一方面，在可再生能源长时间电力缺乏时可以保障负荷中心的能量供应，大大提升了电网对超大规模可再生能源基地的适应性。

1.2 特高压交直流电网互联对储能的需求

全球能源互联网采用特高压直流作为输电通道，特高压直流故障后对送端电网和受端电网的暂态稳定性将产生重大影响^[17]。其中，送端电网直流故障后造成的暂态过电压问题易导致新能源机组大规模脱网，进而造成连锁事故；而受端电网将不得不切除大量负荷，可能造成严重的电网事故。

发生直流闭锁后，若无稳控措施，将发生频率越限和电压失稳，需要通过切机帮助系统恢复稳定。与切机手段相比，储能系统具有毫秒级大功率响应速度，动态特性好，将储能装置加入全球能源互联网输电系统中，对于系统的安全稳定运行有较好的辅助作用。

1.3 跨时空互补特性的区域负荷中心对储能的需求

全球能源互联网以电力为纽带，将可再生能源转化为电力进行全球范围内的共享互联，但全球范围内不同地区电力用户的负荷时间特性不同，且由于全球范围内不同地区拥有不同的季节和日照，不同地区电力用户的用电需求和可再生能源发电量也有差异。

通过合理地配置和布点，将储能安装在不同等级的负荷中心，可以提高可再生能源消纳能力，优化资源配置，也可以满足对于重要负荷的供电可靠性和电能质量要求，还可实现需求响应、用电管理和电能交易^[15]。

2 大容量储能技术特性及其发展现状

2.1 技术特性

用于表征储能技术的主要指标包括能量密度、存储时间、响应时间、能量效率、循环寿命、

自放电率 and 安全性。

表1给出了各类储能技术的主要性能指标^[18-26]。可以看出, 储氢的应用功率已达数十兆瓦, 抽水蓄能、压缩空气储能和储热的应用功率等级达到数百甚至数千兆瓦, 放电时间可以达到一天以上, 但抽水蓄能和压缩空气储能的能量密度较低, 安装位置受地理条件限制, 而储热和储氢的能量效率较低; 电化学储能总体具备响应迅速、能量效

率高、自放电率低、持续放电时间范围宽等特点, 且功率等级已经达到数十兆瓦, 同时具备不受地理条件限制、安全灵活等优势, 在调峰、负荷跟踪、提高新能源消纳等场景具有很大的应用空间。此外, 电化学储能毫秒级的响应特性使其在调频、提升电能质量等服务中具有不可替代的优势。但从电力系统应用需求来看, 锂离子电池储能的安全性和循环寿命是未来重点提升的性能指标。

表1 各类储能技术性能参数

Tab. 1 Performance status of energy storage technology

储能类型	能量密度/ (W·h/kg)	自放电率/ (%/d)	额定功率下 放电时间/h	循环寿命/次	能量效率/%	响应时间	安全性	功率等级/MW
抽水蓄能	0.5~1.5	—	1~24+	>15 000	65~80	分钟	高	数百~数千
压缩空气储能	30~60	—	1~24+	>10 000	41~75	数秒~数分钟	高	数个~数千
飞轮	10~30	100	0~0.01	10 ⁴ ~10 ⁷	80~90	<1 周波	高	0~数个
铅酸电池	30~50	<0.1	1~5	250~1 500(100%DOD)	70~80	<1/4 周波	高	0~数十
电化 磷酸铁锂电池	75~200	1	0.017~4+	2 000~2 500(100%DOD)	88	<1/4 周波	较高	0~数十
学储 三元锂离子电池	200~300	1	0.017~4+	3 500~4 500(100%DOD)	88	<1/4 周波	较低	0~数十
能 液流电池	10~30	小	2~12	>10 000(100%DOD)	60~75	<1/4 周波	高	0~数十
钠硫电池	150~240	—	4~8	2 500~4 500(100%DOD)	70~85	<1/4 周波	较低	0~数十
储热	80~200	0.05~1.00	1~24+	5~15	14~18	—	高	数十~数百
储氢	400~1 000	0	12+	1 000~10 000	35~40	<1/4 周波	较低	0~数十

注: “+”表示可超过; “DOD”指放电深度。

2.2 储能技术发展现状

2.2.1 全球储能技术发展现状

截至2019年12月底, 全球已投运储能项目累计装机规模为184.6GW, 同比增长1.9%。其中, 抽水蓄能累计装机规模依然最大, 为171.0GW, 占比92.6%; 电化学储能累计装机规模达9520.5MW, 同比增长43.7%, 累计占比5.2%, 较2018年同期增长1.5%^[27]。但近10年抽水蓄能的占比下降了近7%。

2019年, 全球新增投运的电化学储能装机规模达2895.1MW, 较2018年下降了21.7%。从投运地区来看, 全球新增电化学储能项目装机主要分布在49个国家和地区, 装机规模排名前5位的国家分别是中国、美国、英国、德国、澳大利亚, 其中中国新增装机规模达到636.9MW^[27]。从发展速度来看, 电化学储能保持快速增长, 其中锂离子电池是应用范围最广泛、发展潜力最大的储能技术。

从全球投运的电化学储能项目应用分布来

看, 用户侧领域占比最大, 为36.6%; 其次是辅助服务、集中式可再生能源并网、电网侧和电源侧, 占比分别为22.4%、2.2%、14.7%和4.1%, 总体上, 电化学储能由于其多重特性, 应用分布十分广泛。

2.2.2 中国储能技术发展现状

截至2019年年底, 中国投运储能项目累计装机规模达到32.4GW, 较2018年增长了3.6%, 占全球装机总规模的17.6%。其中, 电化学储能项目累计装机规模达到1709.6MW, 占全球电化学储能装机总规模的17.9%, 较2018年增长了59.4%^[27]。2019年, 中国已投运电化学储能项目的装机规模为636.9MW, 较2018年下降了6.7%, 这主要是由于我国电网侧储能建设不能纳入输配电价成本, 导致电网侧储能建设增速明显下降。

从技术路线来看, 我国不同类型储能累计装机分布如图1所示, 不同类型电池储能装机分布如图2所示。在已投运的电化学储能项目中, 锂离子电池装机功率占比最高, 达80.6%; 其次是

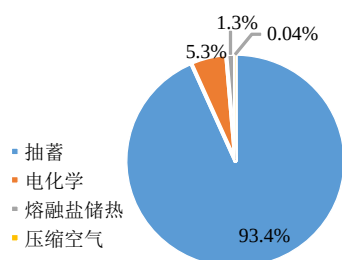


图1 我国不同类型储能累计装机分布图

Fig. 1 Accumulated installation distribution of different types of energy storage in China

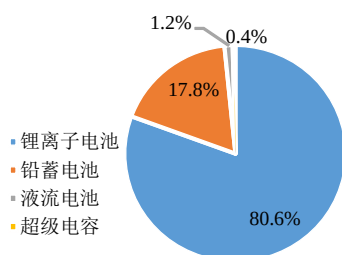


图2 我国不同类型电池储能装机分布图

Fig. 2 Installation distribution of different types of battery energy storage in China

铅蓄电池和液流电池,占比分别为17.8%和1.2%。2019年,在新增投运电化学储能项目中,锂离子电池新增投运规模为619.5MW,占比超过97%。

从应用场景来看,在我国已投运的电化学储能项目中,与全球分布类似,用户侧累计装机规模最大,达到802.3MW,占比46.9%;电网侧和集中式可再生能源并网分别占比20.2%和17.4%^[27]。从2019年新增投运的电化学储能应用分布(见图3)来看,用户侧领域新增装机规模最大,达到277.9MW,占比接近44%,辅助服务、电网侧和集中式可再生能源并网紧随其后。

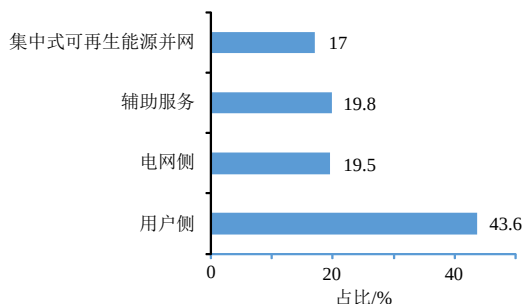


图3 2019年我国新增投运电化学储能在不同应用领域的分布

Fig. 3 Distribution of battery energy storage in different application fields in China

3 全球能源互联网典型场景下储能的配置需求

3.1 替代可再生能源电站长时间持续供电

大规模可再生能源集中并网的置信度对系统的备用容量规划有一定的参考价值。评估间歇式能源置信容量目的是从容量角度考虑间歇式能源电场的规划设计,从而既可保证系统供电可靠性,又可经济高效地大规模利用新能源。目前国内外对间歇式能源的置信容量评估方法大致分为2类^[28-30]:一类是从负荷侧考虑,保证新增电源接入前后系统的可靠性水平不变,新增电源能够多承载的负荷量;另一类是从发电侧考虑,在保证可靠性不变的前提下,新增电源能够替代的常规机组容量。本文旨在通过估算可再生能源发电基地等效为常规机组的容量,推算出采用储能系统替代可再生能源基地长时间持续供电所需配置的容量范围,因此从发电侧考虑采用基于有效载荷能力(effective load carrying capability, ELCC)的评估方法,其流程如图4所示。

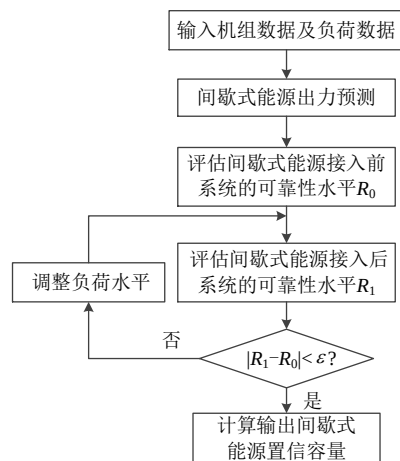


图4 间歇式能源置信容量评估流程

Fig. 4 Intermittent energy confidence capacity assessment process

我国规划到2020年,拟新建风电场总装机容量为7212MW。本文所模拟的2020年甘青电网的年峰值负荷为44899MW,外送功率为13500MW,电网包括369台常规发电机组,容量从2.5MW到1000MW不等,总装机容量为73223MW。本文采用基于Copula-ARMA的间歇式电源出力模拟,并将模型应用到西北实际电网中,基于ELCC

计算了甘肃、青海地区的风电场置信容量。表 2 给出了西北甘肃、青海地区各个新建风电场单独接入电网时的置信容量。

表 2 西北电网 2020 年规划新建风电场装机及其置信容量

Tab. 2 Installed capacity and confidence capacity of new wind power plants planned for 2020 in Northwest Power Grid

新建风电场	装机容量/MW	置信容量/MW	容量置信度/%
甘昌风 W1	501	93.310 1	18.62
甘昌风 W2	501	93.310 1	18.62
甘威风 W1	751.5	138.081 9	18.37
甘威风 W2	751.5	138.081 9	18.37
甘掖风 W1	751.5	76.002 1	10.11
甘掖风 W2	751.5	76.002 1	10.11
甘玉门 W1	801	83.480 4	10.42
青海风 W1	801	177.187 6	22.12
青海风 W2	801	177.187 6	22.12
青海风 W3	801	177.187 6	22.12

从表 2 可以看出,所选择的风电场的置信区间范围为 16%~22%,储能替代风电场的功率范围为 76~177 MW。对于数百兆瓦级容量的风电场,在替代长时间供电应用场景上,储能配置功率规模为百兆瓦级,持续供电 6~24 h。

3.2 特高压直流换相失败的功率支撑

大量工程实践^[31-32]证明,特高压直流输电发生的单回或多回直流换相失败对交流断面造成巨大冲击,严重时将导致直流系统闭锁,中断功率传输。换相失败会导致大幅度功率波动,虽然故障持续时间极短,但波动过程却为换相失败时间的 100~200 倍。换相失败发生时,送端电网直流功率无法传输,可能会造成瞬时大功率盈余,影响送端交流侧;受端则会发生大功率缺失。同时,故障及恢复期间,吸收大量无功,直接威胁电网安全。

本文基于示范工程的实际波形数据,通过分析不同情况下换相失败造成的有功和无功缺额,以及对应的换相恢复时间,从而确定该场景下储能配置的功率和放电时间范围。将储能配置在受端电网,配合同步调相机等调节手段,发挥有功和无功支撑的作用,一方面补充换相失败造成的大功率缺失,另一方面补充因换相失败而导致直流从系统吸收的大量无功缺失。

据文献[33]报道,华东电网某 500 kV 线路 C 相故障跳闸,重合不成功,造成近区某特高压直流连续 2 次换相失败,对送端特高压交流长南线产生约 1600 MW 的有功冲击。目前运行的三大特高压直流同送、受端,若满功率运行时同时发生一次换相失败,短时失去有功达 21.6 GW,可造成华北—华中电网的交流断面功率波动近 5 000 MW,严重时可能造成相关交流断面解列;在开关拒动、故障发生于快速保护动作死区或电网振荡等严重故障情况下,可能发生多回直流同时多次换相失败,造成送端电网失稳、多回直流相继闭锁,进而对受端电网产生严重影响。此外,直流故障过程中需吸收大量无功功率,相关数据表明,单一特高压直流换相失败,逆变侧从系统吸收的无功功率可能高达 4 000~5 000 MV·A;若多回直流同时换相失败,产生的无功功率冲击将更大。

从上述数据分析得到,特高压直流换相失败引起的有功功率缺额达数千兆瓦,持续时间数十到数百毫秒;无功缺额达数千兆伏安,持续时间数十毫秒。抽水蓄能技术相对成熟,功率规模可达数千兆瓦级,在电力系统中发挥调峰、调频、调相、紧急事故备用、黑启动等多重作用,但响应时间在分钟级,无法满足上述场景的响应时间要求。因此,建议与其他调节手段配合,配置百兆瓦级的储能系统,同时发挥功率和能量的作用,既可满足短时间功率缺额,又能满足重要负荷短时间供电的需求,配置时间为数十分钟。

3.3 基于跨时区负荷特性的可再生能源消纳能力提升

将可再生能源转化为电力进行全球范围内的共享互联,北极的风电以及中东、非洲等沙漠地区的光伏发电可以输送到各个地区的负荷中心。全球范围内不同地区的环境差异和时区差异,为储能技术提供了广阔的应用空间。将储能装置安装在跨区负荷中心落点,用于提高可再生能源消纳能力,优化资源配置。本文选取中国、美国和欧洲的典型日负荷特性曲线^[17],分析跨时区的负荷互补特性,结合大型可再生能源基地的输出到中国落点后的出力特性,分析用于提升不同可再生能源消纳能力的储能配置范围。

为便于分析,将不同国家的典型日负荷曲线统一处理成负荷率曲线,并将此负荷曲线作为三大区域电网的典型日负荷率曲线,如图5所示。可以看出,日负荷需求曲线比较相似,白天的负荷需求明显高于晚上。

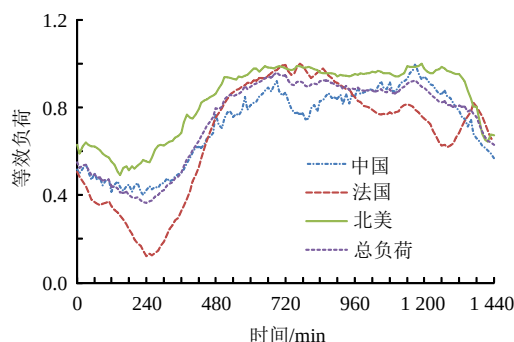


图5 不考虑时区的典型等效日负荷曲线

Fig. 5 Typical equivalent daily load curve without considering time zone

上述三大区域电网典型的日负荷曲线是以当地的实际时间为准,由于区域间存在时差,需要对日负荷曲线进行同步调整。假设不同区域电网的日负荷曲线是按日重复的,以零时区的一天作为绝对时间,对区域电网的日负荷曲线进行时间的同步调整,调整后的负荷需求曲线对位于不同时区的区域电网而言不是一天,而是24h的电力负荷需求曲线,如图6所示。可以看出,位于不同时区、日负荷曲线十分相像的三大区域电网,由于时差的原因,24h负荷需求差别很大,但同时也具有自然的互补性。

三大区域电网的互联,客观上通过时差可以减小负荷需求的波动,但对可再生能源的利用还可通过适当配置储能,在全球范围内实现可再生

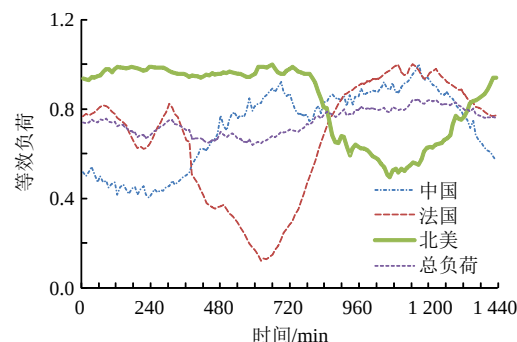


图6 以中国为绝对时区的典型等效日负荷曲线

Fig. 6 Typical equivalent daily load curve with China as absolute time zone

能源的空间转移,提高可再生能源的消纳能力。

图7给出了可再生能源基地的典型日发电曲线和考虑时差前后的区域总等效负荷曲线。通过积分求解,比较可再生能源日发电量和日负荷用电量,计算理论最大消纳能力;通过对净负荷曲线进行积分求解,获得实际消纳能力;设置一定的消纳能力提升目标,通过就地消纳率与可再生能源、负荷特性约束关系,结合充放控制,将可再生能源出力与负荷进行最优匹配,获取所需最小的储能充放电功率和容量。分别对考虑时差前后的日负荷曲线与可再生能源发电曲线进行匹配,通过上述方法计算出用于提升消纳能力的储能配置功率和容量,如表3所示。

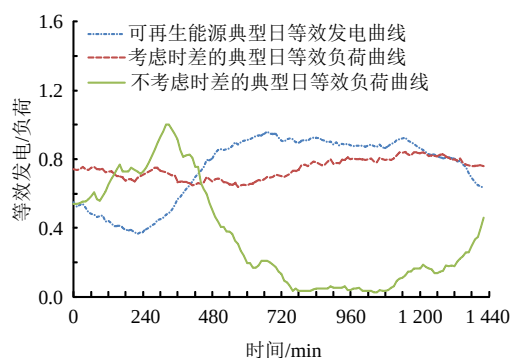


图7 可再生能源典型日等效发电曲线及等效负荷曲线

Fig. 7 Typical daily equivalent power generation curve and equivalent load curve of renewable energy

表3 用于提升可再生能源消纳的储能配置

Tab. 3 Energy storage configuration for improving renewable energy consumption

场景	理论最大 消纳能力/%	实际消纳 能力/%	储能配置(单位 可再生能源功率)
不考虑时差	47.1	36.4	0.52/1.91
考虑时差	99.6	89.4	0.334/1.800

可以看出,用于提升区域负荷侧对可再生能源消纳能力的储能装置,其规模与可再生能源发电规模和负荷特性紧密相关,功率可在数十到数百兆瓦级,放电时间应在4~6h。

3.4 3种典型应用场景对储能配置需求对比

根据全球能源互联网的特征,分析3类典型应用场景中储能配置的需求。通过文献和示范工程调研、估算等方法,对各应用场景进行量化分析,从而得到储能配置的规模和持续放电时间范围,如表4所示。

表 4 不同应用场景的储能应用需求

Tab. 4 Energy storage application requirements for different application scenarios

应用场景	储能规模/MW	放电时间	响应时间	适合的储能类型
替代大型可再生能源 基地长时间供电	数十~数百(结合 可再生能源基地规模)	数小时(结合负荷 供电要求)	分钟级	抽水蓄能、压缩空气储能、 电化学储能、储氢
减小特高压直流换相失败率	数百~数千(结合输电容量 和其他调节能力)	数百毫秒~数秒	毫秒级	电化学储能
提升负荷中心可再生能源消纳	数十~数百(结合可再生能源 发电和负荷特性)	4~6 h	分钟级	电化学储能为主

4 储能在全球能源互联网典型应用场景中的接入设计

由于储能的适用类型、接入的电压等级、控制模式有显著的差异，全球能源互联网中的储能接入方案有所不同。

4.1 可再生能源发电场站中储能接入方案

在可再生能源发电场站侧，储能可在风电场或光伏电站并网处集中接入，通过升压变压器接入高压侧母线(10 kV 或 35 kV)，用于减少发电场站预测误差，平抑发电波动，联合可再生能源电站参与电网自动发电量控制(automatic generation control, AGC)、自动电压控制(automatic voltage control, AVC)，如图 8 所示。

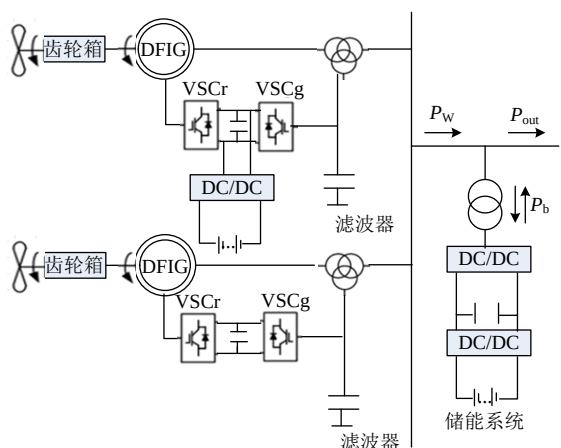


图 8 储能可在可再生能源场站集中并网接入

Fig. 8 Centralized grid connection of energy storage in renewable energy stations

4.2 区域电网应用场景中储能接入方案

区域电网应用中，储能用于调频、调峰、备用等辅助服务，对于抽水蓄能、压缩空气储能，其通过同步发电机并网，再通过升压变压器接入高压电网。对于电池储能、飞轮储能等单元容量

较小的储能技术，需要集成大规模储能接入高电压等级电网。图 9 给出了目前电池储能的主要并网拓扑。以一个 50 MW/100 MW h 的大规模电池储能系统为例，由 50 个 1 MW/2 MW h 的储能子系统构成。每个储能子系统中，2 套 1 MW h 的固定串并联电池组件分别经 2 台 500 kW 变流器转换为交流电压后进行汇集。每个储能子系统由一台升压变压器将交流低压变换为 10 kV/35 kV 接入高压汇集母线。在该并网拓扑中，由于多个单元储能在控制性能上的差异性和集中控制方式对通信的依赖，储能系统在控制精度、响应速度上受到一定限制。

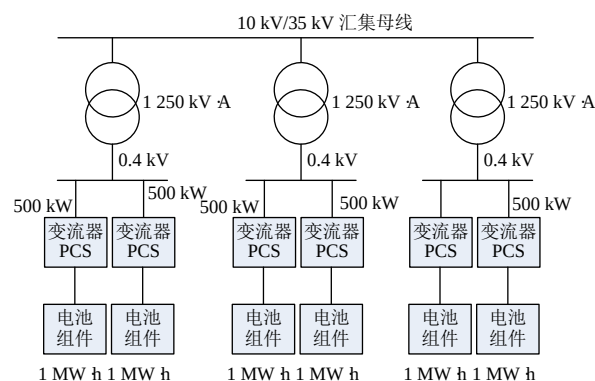


图 9 大规模电池储能并网接入方案

Fig. 9 Grid-connected scheme of large-scale battery energy storage

另一种并网拓扑如图 10 所示，将储能单元通过级联的电力电子电路并入高电压等级，其中的链式换流器包括 3 个单相换流链，每个换流链由 10~12 个换流模块交流侧链接构成。链式换流器可以将多个电池组件通过直流-交流-链接变换为 10 kV/35 kV，然后接入并网变压器，可以节省汇流用变压器。在链式换流器的接入方式下，储能系统可实现快速、精准的响应。

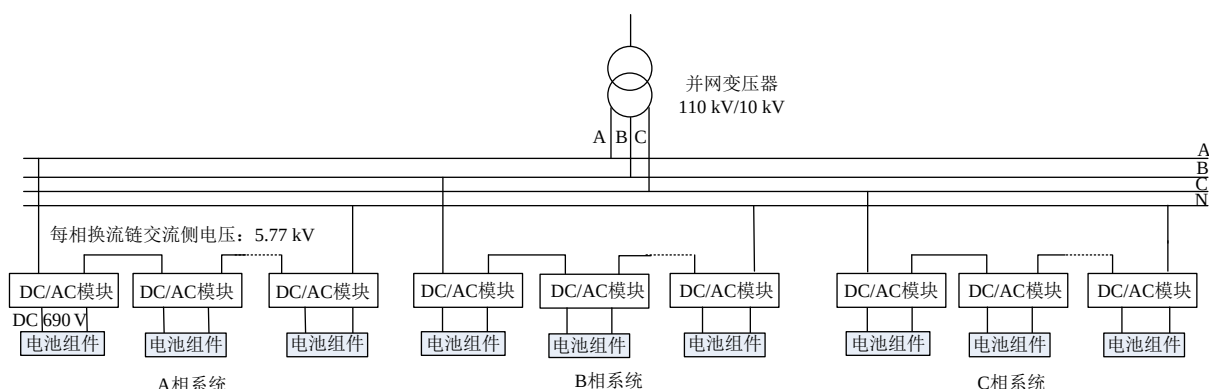


图10 链式换流器的交流接入

Fig. 10 AC access of a chain converter

4.3 跨区域传输应用场景中储能接入方案

由于系统缺乏阻尼，远距离高压交流输电线路可能出现低频振荡等现象。电池储能系统可对有功和无功同时进行调节，从而增强电力系统小干扰稳定性。如图11所示，将储能接入联络线的一侧，向系统提供正阻尼，可有效改善系统稳定性。此时，储能作为具有四象限调节能力的静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)接入，对于跨区域直流传输中换流站单极闭锁等故障可能引起的受端或送端系统功率突变，储能系统能提供快速的有功和无功支撑，帮助系统维持稳定。

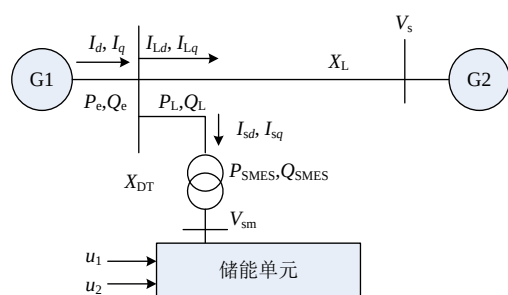


图11 储能接入区域联络线一侧

Fig. 11 Energy storage connected to one side of regional tie line

5 结论

从全球能源互联网特征出发，结合电力储能技术特性，提出替代可再生能源电站长时间供电、特高压直流换相失败的功率支撑以及提升负荷中心可再生能源消纳典型应用场景下储能配置分析方法，并提出了可再生能源发电场站、区域电网

及跨区域传输应用场景中的储能接入拓扑，主要结论如下：

1) 全球能源互联网对储能的技术需求可归纳为超大规模可再生能源基地接入、特高压交直流电网安全及区域负荷中心供电。不同类型的储能技术可解决不同时间尺度下的电力电量平衡，是全球能源互联网发展必不可少的部分。

2) 在替代可再生能源电站长时间供电应用场景，储能的配置功率等级达到数十~数百兆瓦，具体应结合可再生能源基地规模进行核算，响应时间为分钟级，适合的储能技术包括抽水蓄能、压缩空气储能、电化学储能等。

3) 在特高压直流换相失败的功率支撑场景，储能的配置功率高达数百~数千兆瓦，具体数值结合输电容量和其他调节能力确定，响应时间为毫秒级，适合的储能技术为电化学储能技术。

4) 在提升负荷中心可再生能源消纳能力场景，储能的配置功率为数十~数百兆瓦，具体结合可再生能源发电及负荷特性确定，适合的储能技术以电化学储能为主。

5) 电力储能技术类型多样，功率等级和持续放电时间已达到多种应用场景的需求，尤其是电化学储能技术在动态响应特性要求高的场景更是具有不可替代的优势，但其安全性和循环寿命仍是未来重点提升的性能指标。

参考文献

- [1] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015: 639-641.

- LIU Z Y. Global energy internet[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015: 639-641.
- [2] 王金星, 张少强, 张瀚文, 等. 燃煤电厂调峰调频储能技术的研究进展[J]. 华电技术, 2020, 42(4): 64-71.
- WANG J X, ZHANG S Q, ZHANG H W, et al. Progress on the peak load regulation, frequency regulation and energy storage technologies for coal-fired power plants[J]. Huadian Technology, 2020, 42(4): 64-71.
- [3] 罗庆, 张新燕, 罗晨, 等. 新能源发电中储能综合利用的优化评估[J]. 智慧电力, 2020, 48(9): 51-55.
- LUO Q, ZHANG X Y, LUO C, et al. Optimal evaluation of energy storage comprehensive utilization in new energy generation[J]. Smart Power, 2020, 48(9): 51-55.
- [4] 李佳曼, 万文军, 苏伟, 等. 大容量储能移动并网测试装置设计及试验[J]. 广东电力, 2020, 33(10): 9-15.
- LI J M, WANG W J, SU W, et al. Design and test of large-capacity energy storage mobile grid-connected test device[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(10): 9-15.
- [5] 王冰, 王楠, 田政, 等. 美国电化学储能产业政策分析及对我国储能产业发展的启示与建议[J]. 分布式能源, 2020, 5(3): 23-28.
- WANG B, WANG N, TIAN Z, et al. Policy analysis of electrochemical energy storage industry in united states and its enlightenment and suggestions for development of China's energy storage industry[J]. Distributed Energy, 2020, 5(3): 23-28.
- [6] 万德超, 孙树敏, 尹文泉. 基于 MRAS 的飞轮储能系统控制与应用[J]. 智慧电力, 2019, 47(6): 101-106.
- WAN D C, SUN S M, YIN W Q. Control and application of flywheel energy storage system based on MRAS[J]. Smart Power, 2019, 47(6): 101-106.
- [7] 葛维春, 刘闯, 王艺博. 电网大规模电储热单元优化调度模型研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(4): 32-37.
- GE W C, LIU C, WANG Y B. Optimal dispatching model of large scale thermal storage unit in power grid[J]. Smart Power, 2019, 47(4): 32-37.
- [8] 贾洋洋, 仲海涛, 张智晟. 含储氢装置的分布式能源系统的优化经济调度[J]. 广东电力, 2019, 32(11): 38-44.
- JIA Y Y, ZHONG H T, ZHANG Z S. Optimized economic dispatch of distributed energy system with hydrogen storage device[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(11): 38-44.
- [9] 王作家, 竺炜, 程志勇. 抽水蓄能发电对直流受端多态频率稳定的影响[J]. 发电技术, 2020, 41(4): 346-353.
- WANG Z J, ZHU W, CHENG Z Y. Influence of pumped storage power generation on multi-state frequency stability of DC receiver[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(4): 346-353.
- [10] 王威, 李润秋, 张鹭, 等. 计及多类型电储能的综合能源系统优化运行对比分析研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(2): 110-116.
- WANG W, LI R Q, ZHANG L, et al. Comparative analysis and research on optimal operation of the integrated energy system considering multi-type electrical storage[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2020, 36(2): 110-116.
- [11] 陈超, 刘海滨, 葛景, 等. 双馈变速抽蓄机组参与平抑风电功率波动研究[J]. 发电技术, 2020, 41(4): 452-460.
- CHEN C, LIU H B, GE J, et al. Wind power fluctuation suppression by doubly-fed variable-speed pumped storage unit[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(4): 452-460.
- [12] 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(5): 50-54.
- SHEN H M, YU X H. Economic analysis of distributed electrochemical energy storage on the user-side[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(5): 50-54.
- [13] 慈松, 李宏佳, 陈鑫, 等. 能源互联网重要基础支撑: 分布式储能技术的探索与实践[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(6): 762-773.
- CI S, LI H J, CHEN X, et al. The cornerstone of energy internet: research and practice of distributed energy storage technology[J]. Scientia Sinica Informationis, 2014, 44(6): 762-773.
- [14] 王松岑, 来小康, 程时杰. 大规模储能技术在电力系统中的应用前景分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 3-8.
- WANG S C, LAI X K, CHEN S J. An analysis of prospects for application of large-scale energy storage technology in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 3-8.
- [15] 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): 15-25.

- LI J L, TIAN L T, LAI X K. Outlook of electrical energy storage technologies under energy internet background[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 15-25.
- [16] 荆平, 徐桂芝, 赵波, 等. 面向全球能源互联网的大容量储能技术[J]. 智能电网, 2015, 3(6): 486-492.
- JING P, XU G Z, ZHAO B, et al. Large-scale energy storage technology for global energy internet[J]. Smart Grid, 2015, 3(6): 486-492.
- [17] 殷树刚, 苗培青, 拜克明, 等. 利用特高压输电技术提高全球能源使用效率[J]. 中国电力, 2010, 43(2): 1-5.
- YIN S G, MIAO P Q, BAI K M, et al. To improve utilization efficiency of global energy resources through UHV power transmission technology[J]. Electric Power, 2010, 43(2): 1-5.
- [18] CHEN H, CONG T N, YANG W, et al. Progress in electrical energy storage system: a critical review[J]. Progress in Natural Science, 2009, 19: 291-312.
- [19] ZHAO H, WU Q, HU S, et al. Review of energy storage system for wind power integration support[J]. Applied Energy, 2015, 137: 545-553.
- [20] 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: 302-314.
- [21] FAIAS S, SANTOS P, SOUSA J, et al. An overview on short and long-term response energy storage devices for power systems application[EB/OL]. (2018-08-29) [2020-09-01]. <http://www.icrepq.com/icrepq-08/327-faias.pdf>.
- [22] KALDELLIS J, ZAFIRAKIS D. Optimum energy storage techniques for the improvement of renewable energy sources-based electricity generation economic efficiency[J]. Energy, 2007, 32(12): 2295-2305.
- [23] DENHOLM P, KULCINSKI G L. Life cycle energy requirements and greenhouse gas emissions from large scale energy storage systems[J]. Energy Conversion Management, 2004, 45: 2153-2172.
- [24] SCHOENUNG S M. Characteristics and technologies for long-vs. short-term energy storage[EB/OL]. (2018-07-15)[2020-09-01]. <https://prod-ng.sandia.gov/techlib-noauth/access-control.cgi/2001/010765.pdf>.
- [25] RAHMAN M M, ONI A O, GEMECHU E, et al. Assessment of energy storage technologies: a review[J]. Energy Conversion Management, 2020, 223: 1-28.
- [26] 马守达, 杨锦成, 崔承刚, 等. 能源互联网储能技术应用研究[J]. 发电技术, 2018, 39(5): 412-418.
- MA S D, YANG J C, CUI C G, et al. Research on application of energy storage technology in energy internet[J]. Power Generation Technology, 2018, 39(5): 412-418.
- [27] 中关村储能产业技术联盟. 储能产业研究白皮书[Z]. 北京: 中关村储能产业技术联盟, 2020.
- China Energy Storage Alliance. Energy storage white paper[Z]. Beijing: Zhongguancun Energy Storage Industry Technology Alliance, 2020.
- [28] 张宁, 康重庆, 陈治坪, 等. 基于序列运算的风电可信容量计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 1-9.
- ZHANG N, KANG C Q, CHEN Z P, et al. Wind power credible capacity evaluation model based on sequence operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 1-9.
- [29] MOLINAS M, VAZQUEZ S, TAKAKU T, et al. Improvement of transient stability margin in power systems with integrated wind generation using a STATCOM: an experimental verification[C]//2005 International Conference on Future Power Systems. IEEE, 2006.
- [30] 高宁超. 风力发电容量可信度研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- GAO N C. Study on capacity credit of wind power generation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [31] 冯长有, 姚伟锋, 江叶峰, 等. 特高压直流运行风险评估技术研究及应用[J]. 智慧电力, 2020, 48(7): 30-37.
- FENG C Y, YAO W F, JIANG Y F, et al. Study and application of UHVDC operation risk evaluation[J]. Smart Power, 2020, 48(7): 30-37.
- [32] 马燕君, 李海锋, 王钢. 同塔双回高压直流输电线路单极接地故障引发换相失败研究[J]. 广东电力, 2019, 32(11): 86-95.
- MA Y J, LI H F, WANG G. Study on commutation failure caused by single pole to ground fault on double-circuit HVDC transmission lines of the same tower[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(11): 86-95.
- [33] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991.
- LI M J. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991.

收稿日期：2020-09-21。

作者简介：



叶季蕾

叶季蕾(1983)，女，博士，研究员级高工，主要从事电池储能系统特性分析、电力储能优化运行研究，yejilei@njtech.edu.cn；



李斌

李斌(1997)，男，硕士研究生，主要从事电动汽车储能优化运行研究，1449009859@qq.com；



张宇

张宇(1970)，男，教授级高工，主要研究方向为电池储能、电力系统分析，p3chang@qq.com；



李明哲

李明哲(1998)，男，硕士研究生，主要从事高渗透分布式可再生能源储能优化配置研究，lmz750399411@163.com；



石博文

石博文(1995)，男，硕士研究生，主要从事储能系统状态分析及故障诊断研究，335148975@qq.com；



王皓靖

王皓靖(1987)，女，硕士，高级工程师，研究方向为智能电网、分布式能源和微电网优化运行，haojingw@126.com。

(责任编辑 尚彩娟)