

电力系统储能应用场景研究综述

裴春兴¹, 王 蓝², 王聪聪¹, 戴朝华²

(1. 中车唐山机车车辆有限公司, 河北 唐山 064000; 2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 611756)

摘要: 可再生能源利用和智能电网是电力系统发展的终极目标, 而储能技术是实现目标的必要保障和手段。首先, 分别对电磁储能、机械储能和化学储能三种储能技术进行了介绍, 对比了相应的技术参数, 分析了各自特点和适应场合; 然后, 从电源侧、电网侧和用户侧分析了储能的典型应用场景, 阐述了储能能在电力系统移峰填谷、可再生能源平滑并网、电力调频、可再生能源消纳及改善电能质量等方面的技术性能要求; 最后, 从技术体系、匹配方法和全寿命周期评估等方面进行了展望。

关键词: 电力系统; 储能; 场景; 可再生能源

Survey of application scenarios of energy storage in power system

PEI Chunxing¹, WANG Lan², WANG Congcong¹, DAI Chaohua²

(1. CRRC Tangshan Co., Ltd., Tangshan 064000, China; 2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: Renewable energy utilization and smart grid is the ultimate goal of power system development, and energy storage technology is the necessary guarantee to achieve the goal. Firstly, according to the existing energy storage technologies, electromagnetic energy storage, mechanical energy storage and chemical energy storage are introduced respectively, and the corresponding technical parameters are compared, and their respective characteristics and application occasions are analyzed; then, from the power supply side, grid side and user side, the typical application scenarios of energy storage are analyzed, and the technical performance requirements of energy storages are elaborated in terms of the peak load shifting and valley filling of power system, smooth grid connection of renewable energy, power frequency regulation, renewable energy consumption and improvement of power quality are expounded. Finally, the prospect of technology system, matching method and life cycle assessment is presented.

Key words: power systems; energy storage; scenario; renewable energy

随着经济社会和电力技术的持续发展, 智能电网概念被提出并成为当下电力系统的发展趋势, 但也面临可再生能源消纳和系统灵活性资源不足的挑战。储能是一种将电能灵活转换为其他能源并进行合理利用的重要技术, 是保证智能电

网实现的必备条件, 解决了能源生产和使用的空间不匹配、时间不同步问题, 使电能的时间和空间上的运用更具灵活性, 创造了能源共享的基础条件^[1]。

根据电压/功率等级和运行场景的不同, 储

能系统可分为集中式和分布式^[2]。集中式储能功率等级高,一般为数兆瓦到数百兆瓦不等,接入35 kV或110 kV母线及以上系统,应用于充放电时间长、功率能量需求大的场景,主要采用能量型储能,常见类型为压缩空气储能和抽水蓄能两种。分布式储能功率等级相对较小,一般接入中低压配电网,功率范围从数千瓦到数兆瓦。基于能量存放外部特征的不同,可将分布式储能划分为能量型和功率型两种。功率密度高是功率型储能的主要优势,适用于改善电能质量^[3-4]、平抑可再生能源及负荷波动等短时间内高功率需求的场景,主要包括超级电容、钛酸锂电池、超导磁储能和飞轮等;能量型储能系统能量存储密度大,适用于峰荷管理等对功率要求不高但要求能量较大、放电持续时间长的场景,主要包括压缩空气储能、化学电池储能等^[5-6]。在实际应用中,储能往往面对多种服务需求,单一储能技术无法满足,可同时配置功率型和能量型储能,实现源网荷多端接入,充分发挥不同储能的优势与潜力。

1 储能技术

从能量储存形式角度,储能技术可分为电磁储能、机械储能和化学储能等。

1.1 电磁储能

(1) 电容储能

电容是最直接的一种储能方式^[7],由通过电介质绝缘层隔开的两块金属板组成。电容充电速度远快于传统电池,但其能量密度太低,大容量储能需要面积过大的电介质,经济成本高且应用不便。

(2) 超级电容器储能

超级电容器通过两个固体导体之间的电解质溶液来储存能量,因此具有更高的介电常数,拥有大电容。其主要问题是自放电率高,放电持续时间短,但在电压跌落或瞬时干扰时可以提供支撑,改善供电质量,适合高功率、低能量应用场景。

(3) 超导磁储能

超导磁储能以电磁能形式储能,通过超导材料线圈转换。基于超导体几乎无电阻的特性,其损耗极低,效率超过95%。同时具有响应快、寿命长等特点。可用于提高输电能力和系统容量,改善供电质量,维持运行稳定性等,但推广应用还受高成本、超导临界温度及对环境的影响等因素制约。

1.2 机械储能

(1) 飞轮储能

飞轮储能利用飞轮角动量存储能量,充电时电动机驱动飞轮,放电时飞轮带动发电机发电,储存能量取决于飞轮尺寸、质量和速度,而额定功率则取决于电动机和发电机。飞轮储能维护少且寿命长,高达数百万次循环充放电,适于改善电能质量、提供无功支持和旋转备用等的大功率、短时间场景。

(2) 抽水储能

抽水储能是目前应用最广泛、最大规模的储能形式,储能时将电能转换为水的势能进行储存,释能时将势能通过水轮机再转换为电能,具有容量大、周期长、效率高及性价比优的特点,适合调频调峰、紧急事故备用等场景,但对场地环境要求过高。

(3) 压缩空气储能

压缩空气储能利用电能将空气压缩至密闭空间,再利用被压缩空气推动汽轮机转换成电能,分为传统型、带储热装置型和液气型等形式。具有储存期较长、容量大、成本低和效率高等特点,效率为70%~89%,额定功率为50~300 MW,但同样对场地环境要求较高。

1.3 化学储能

化学储能利用电能与化学能之间的转换进行电能存储和释放。具有良好的环境适应能力和快速响应能力,自身待机损耗低,具有较高的能效(60%~95%)。但由于功率容量小、维护成本高、循环寿命短和放电能力有限等特点,故应用规模较小。目前已商用或示范的电池储能技术主

要包括铅蓄电池、锂离子电池、镍镉电池、钠硫电池和液流电池等^[8]。

(1) 铅蓄电池

铅蓄电池目前应用于储能工程主要包括铅酸电池和铅炭电池两种。铅酸电池是最古老、应用最广泛的可充电电化学装置，技术相对较成熟，但受限于循环寿命短、功率/能量密度低等缺点，应用十分有限。铅炭电池是在传统铅酸电池基础上对负极材料进行电容式改进^[9]，结合铅酸电池和超级电容器两者的优势，使铅炭电池充放电速度更快，比容量也有一定增长。

(2) 锂离子电池

锂离子电池利用锂离子在正负极之间移动进行充放电，拥有相较于其他电池更高的工作电压和能量密度，是当前主流发展方向，但其成本较高，限制了大规模的应用。目前电力应用能量型主要为磷酸铁锂、功率型主要为钛酸锂。

(3) 镍镉电池

镍镉电池内阻小，放电时电压水平变化小，维护要求低，耐过充放能力强，具有较高的经济性。常用于电动工具、便携式设备和应急照明等，但其存在严重的“记忆效应”，导致服役寿命缩短。

(4) 钠硫电池

钠硫电池是以金属钠和硫为正负极，陶瓷管为电解质的二次电池^[10]，通过钠与硫的化学反应

进行电能储存，具有容量大、体积小和效率高等特性，在电力储能中可应用于可再生能源发电、峰荷管理和应急电源等场景。但钠硫电池对工作温度要求较高（高温350℃），不仅需要通过附加设备进行供热，还会对电池的性能造成一定的影响。

(5) 全钒液流电池

全钒液流电池通过正负极不同价态钒离子的氧化还原反应将电能储存在电解液中，输出功率由电池堆大小决定，设计选址灵活，可应用于提高电能质量、不间断电源、调峰、提高供电安全性以及可与可再生能源系统的整合等方面。

在电池储能技术特性方面，受产业规模、系统成本、能量及功率特性、服役特性和可回收性等综合影响，目前锂离子电池优势突出，铅炭电池、全钒液流电池及梯次利用锂电池特定场景下具备竞争力^[11-12]。

衡量一种储能技术最基本的指标主要包含以下几个部分：①能量存储容量；②能量转换效率；③自放电率；④持续放电时间；⑤服役年限；⑥响应速度；⑦功率密度；⑧能量密度。不同储能技术的相关指标见表1^[5,13]。

由表1可知，储能技术各具特色，参数指标值的不同决定了储能技术的适用范围。抽水储能、压缩空气储能容量和功率大，自放电率小，适用于规模在100 MW以上且需要长时间输出供

表1 储能技术参数对比

Tab. 1 Comparison of technical parameters of energy storage technology

储能技术	额定功率	转换效率 (%)	自放电率 (%)	持续放电时间	循环次数或服役年限	响应速度	功率密度 / (W/kg)	能量密度 / (W·h/kg)
超级电容器	1 kW ~ 1 000 kW	95	20 ~ 40	1 ms ~ 1 h	30 年	毫秒级	3 000	0.05 ~ 5
超导磁储能	10 kW ~ 20 MW	95	10 ~ 15	1 ms ~ 8 s	30 年	毫秒级	500 ~ 2 000	0.5 ~ 5
飞轮储能	5 kW ~ 5 MW	85 ~ 90	100%	30 s ~ 15 min	百万次	毫秒级	400 ~ 1 600	5 ~ 130
抽水储能	100 ~ 2 000 MW	70 ~ 85	极小	6 ~ 12 h	> 50 年	分钟级	-	0.5 ~ 1.5
压缩空气储能	100 ~ 300 MW	70 ~ 89	小	1 ~ 24 h	30 ~ 50 年	分钟级	-	30 ~ 60
铅蓄电池	1 kW ~ 50 MW	80 ~ 90	0.1 ~ 0.3	数秒~数小时	500 ~ 1 000 次	秒级	75 ~ 300	30 ~ 50
锂离子电池	1 kW ~ 10 MW	80 ~ 95	0.1 ~ 0.3	30 min ~ 8 h	3 000 ~ 15 000 次	秒级	150 ~ 315	75 ~ 250
镍镉电池	0 ~ 40 MW	80 ~ 90	0.2 ~ 0.6	数秒~数小时	2 000 ~ 2 500	秒级	150 ~ 300	50 ~ 75
钠硫电池	1 kW ~ 10 MW	75 ~ 86	20	数秒~数小时	2 500 次	秒级	90 ~ 230	150 ~ 240
全钒液流电池	10 ~ 100 kW	70 ~ 85	小	数秒~数小时	12 000 次	秒级	15 ~ 30	15 ~ 75

电的情景，可用于长时间的能量存储和大规模的能量管理；超级电容器、超导磁储能和飞轮的响应时间为毫秒级，具有响应速度快、功率密度高的特点，但存在自放电率偏高、能量存储时间短的缺点，适用于反应迅速且对供电时间要求小的场景，可用于改善系统电能质量，应对瞬时电压降、闪变抑制等；电池类储能技术具有相对快速的响应速度且放电时间较长，更适合于负荷调节、桥接电源等。不同技术的转换效率、功率密度和能量密度等也各不相同，针对不同的应用场景和需求应选择不同的储能技术，在必要时还可以同时采用多种储能技术，以满足复杂多方面的储能需求，也可有效解决可再生能源大规模并网所带来的问题。

2 储能典型应用场景

储能技术已逐渐应用于可再生能源平滑并网、峰荷管理、调频以及电能质量改善等场景^[1,14]。按照接入方式归属方不同，可分为电源侧储能、电网侧储能和用户侧储能^[15]。

2.1 电源侧储能

(1) 可再生能源平滑出力与自我消纳

光电、风电等可再生能源发电受外部因素影响大，出力具有随机性、间歇性和波动性等特点，并网规模过大时不利于电网的稳定运行，对电网调度运行与控制造成一定的影响。目前主要采用弃光（弃风）的方式以达到维持电网稳定运行的目的，但高比例的弃光（弃风）将会造成能源的浪费，还会限制可再生能源渗透率的提升。利用储能与可再生能源发电系统联合运行，可有效平滑发电出力曲线，使随机变化的输出转变为相对稳定的功率输出。储能技术使可再生能源变得可控可调，有利于满足并网的各项技术要求，促进光伏发电及风电可靠安全并网，从而达到可再生能源自我消纳的目的^[16]，也可进一步促进可再生能源的大规模开发利用。

现有研究成果表明储能应用于平抑波动场景时其配置容量无须太大，可将研究重点集中于储能的配置方法，例如文献[17-20]分别研究了

超导储能、飞轮储能、电池储能和混合储能的配置方法。文献[21]中提出一种平抑输出功率波动的风光并网联合控制策略，但未考虑储能全寿命周期的经济性，未来也可以将其作为重点研究方向。

(2) 调频调峰

火电机组作为传统电网调频的主要方式，调频性能及质量无法满足系统稳定性要求，不利于电能质量的提高。针对火电机组响应时滞长的问题，在电源侧应用储能进行辅助调频，通过改善储能充放电策略，达到调频效果，改善电网稳定性^[22]，适用于火电装机容量较大的省份。

目前调频研究多集中于电池储能参与调频运行优化策略的研究，通过发挥储能在调节准确度、响应时间和调节速率方面的优势，与火电机组联合运行优化机组自动发电控制（Automatic Generation Control, AGC）综合调频性能指标^[23]，优化电池储能控制器参数也是参与调频的一种途径^[24]。安装在电源侧的电池储能系统还具有四象限调节能力，可灵活调整有功功率和无功功率的输入输出^[25-26]，以增强发电侧频率和电压调节能力。储能在传统电源和可再生能源中均有调频应用，文献[27]针对传统电源发电侧提出一种利用电池储能系统进行辅助调频的方法，并通过现场测试验证了此方法对提升传统火力发电机组AGC性能的有效性；在可再生能源发电侧，文献[28]以提升在不同风速下风力发电机组并网过程的整体频率调制性能为目的，提出基于限转矩控制的新型惯量控制方法。

储能装置不同工况下可扮演不同的角色参与系统调峰，在负荷低谷时吸收电能充电；在高峰时输出电能放电。为充分发挥有限储能的调峰作用，还可与常规手段协同调峰，从而减小储能调峰的需求容量^[29]，提高电网运行的安全裕度和经济效益。

2.2 电网侧储能

储能装置在电网侧的应用主要安装在输配电侧，在调频调峰、备用容量、缓解线路阻塞和维持电网稳定运行等领域中发挥重要价值。

(1) 调频调峰

电网灵活性的提升需同时提高电网的调频和调峰能力,储能以其反应灵敏的特性在调频领域的应用逐步规模化,可以有效提高电网抗干扰能力^[30]。通过电网侧接入的电池储能系统,参与频率异常主电网的控制,实现电网频率稳定的目的^[30-31]。储能技术不同,一次调频效果也有所差别,超级电容器是具有较好调频效果的常用一次调频储能设备^[32];而锂离子电池一般为传统发电机组提供一次调频服务^[33],文献[34-35]基于电池储能一次调频特性的关键影响因素分析,研究了配电侧储能的调频特性。

可再生能源发电的电源一般主要分布在重负荷区,对本就缺少足够调峰电源的电网提出了更大挑战,迫切需要更强的调峰能力;而可再生能源接入所导致的渗透率提升,也给电网的调峰带来了更大的压力,大大增加了电网调峰的难度。利用储能进行调峰,可大幅减小配电容量,节省电力装备的建设投资,并减少增容费用。

为满足调峰需求,文献[36]提出了一种基于边际负荷值的储能电站充放电运行状态控制方案。针对两级式并网储能系统,文献[37]提出了基于并网点电压补偿的调峰控制策略。在调峰储能选型方面,微中型超导磁储能系统^[38]和混合储能系统^[39]在电网辅助调峰上均具有较好的应用效果。

(2) 备用容量、提高传输能力

国内外学者研究储能应用于备用容量场景的文献较少。文献[40]提出在微电网孤岛运行时储能可协同柴油机、风电机组作为备用容量参与一次调频。文献[41]将储能作为消纳风电的重要手段,建立了含压缩空气储能电力系统日前-日内协调调度模型,在制订压缩空气储能系统最优运行计划的同时,也制定了最优旋转备用容量承担方案。

可再生能源的大规模并网可能引起传输线过载,可将阻塞的电能储存到储能设备,在线路负荷小于容量时再释放电能。储能技术可以替代传统的电网升级增建措施,以较小的储能装机容量

达到提高电网的输配电能力的目的,从而延长原有设备的使用寿命,降低电网改造投资成本。

对于给定系统,可综合考虑发电、输电和储能的耦合作用机制,开展发输储协同扩容规划^[42]或变电站扩容和储能容量配置的协调规划^[43],从而优化系统实时调控能力与传输能力。

(3) 电网稳定运行

电网正常运行时,储能装置可通过支撑母线电压改善系统稳定性^[44],还可提供无功功率支持,参与输电线路的电压调节,增强光电、风电系统的低电压穿越能力^[45]。

电力系统发生短路故障、冲击性负荷波动和可再生能源并网等情况时,会出现电压波动、闪变的电能质量问题,通过协调控制可再生能源与储能装置,快速排除故障,恢复供电。储能对电网的补偿效果更优于传统的静止无功补偿器和静止同步补偿装置等补偿设备^[46],还可充当备用电源及黑启动电源,为电力系统提供紧急的有功、无功支撑,维持电网的稳定、安全运行。可再生能源并网可能会引起电网潮流大小、方向的不确定,电压暂降将导致电压在短时间内突然下降,从而导致电能质量问题,严重时将造成用电设备停止工作,可通过风-储联合系统^[47]等来抑制电压波动。

为提高系统运行可靠性,维持电网稳定运行,文献[48]对含储能的配电网进行了故障恢复策略优化以提升电网抵抗自然灾害的能力,含有储能的黑启动优化方案及最佳控制策略充当微电网应急电源,优化恢复路径,以及实现微电网互联^[49]等也是重要的研究方向。

2.3 用户侧储能

用户侧储能应用主要为需求侧响应和峰谷价差套利^[50]。需求响应是指利用价格或其他激励机制使电力用户作出响应,改变负荷特性以满足电力系统运行要求。用户在电网负荷较小时利用储能充电,在负荷较大时利用储能进行供电,达到降低电网负荷的目的,有助于提高用户负荷调控能力和供电可靠性,具有削峰填谷、需求响应和应急供电等功能。电网负荷峰谷电价相异,在满

足需求侧响应的同时还可达到价差套利的目的。

文献[51]针对钠硫电池和飞轮储能系统在纽约市场上的应用，指出储能装置在能源套利应用方面具有很强的经济前景，并提出可行的套利方案。文献[52]中建立计算储能系统经济收益的数学模型，以实例分析储能系统的经济效益。

针对前述所提到的应用场景，可根据应用功能将其归纳为以下七种典型应用场景，不同典型应用场景的储能选型及性能要求见表2。

表 2 典型应用场景储能类型及性能要求
Tab. 2 Energy storage types and performance requirements in typical application scenarios

应用场景	储能类型		性能要求			
	功率型	能量型	响应时间	容量	功率	放电时长
平抑波动	√		超短期、短期			1 s ~ 30 min
参与调频	√		超短期、短期	大		15 min ~ 2 h
峰荷管理		√	中长期	大	大	2 ~ 6 h
备用容量	√		短期、中长期			≥ 15 min
提高传输能力		√	中长期	大	大	2 h ~ 4 h
改善电能质量	√		超短期、短期			1 s ~ 30 min
提升运行稳定性	√	√	超短期、短期	大		≥ 15 min

3 结束语

随着可再生能源的大规模并网，发、输、配、用各环节时空匹配难度日渐加剧，储能技术成为当前电网发展的焦点之一。本文在综述了现有储能技术的同时，分析了储能技术的典型应用场景。在储能技术多样化和应用场景多元化的今天，有以下几个方面需要加以考虑。

1) 亟需构建功率型和能量型储能技术体系，梳理储能技术的功率、能量、寿命和成本等指标特性，分析各储能技术间、储能与可再生能源间及其与各典型场景间的互补性和适应性，形成完善的相关技术标准。

2) 在兼顾投资成本约束、场景空间约束和电网运行约束的前提下，研究储能的匹配和协调方法，从准入容量、接入位置和接入电压等级等多方面考虑接入原则，同时兼顾分散/集群接入

方式、分布式/集中控制策略及功率/信号的双向传输。

3) 基于经济性分析，研究包括功率容量成本、运行维护费用和节能环保效益等在内的多种性能指标，进一步分析储能接入带来的建设-使用-回收全寿命周期成本，结合储能的利用价值从经济、社会和环保方面计算储能的收益，确定储能全寿命周期评估的效益指标及评估方法。

参考文献

[1] 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(4): 167-177.

[2] 叶季蕾. 储能的集中式/分布式应用[J]. 电气应用, 2017, 36(11): 15-16.

[3] 袁智勇, 雷金勇, 于力, 等. 基于半正定规划的低压不对称配电网储能优化方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(2): 140-145.

[4] TABART Q, VECHIU I, ETXEBERRIA A, et al. Hybrid energy storage system microgrids integration for power quality improvement using four-leg three-level NPC Inverter and second-order sliding mode control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(1): 424-435.

[5] 王成山, 武震, 李鹏. 分布式电能存储技术的应用前景与挑战[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 1-8.

[6] 王明, 辛子健, 陈济良. 分布式储能在电力系统中的应用及现状分析[J]. 华东科技: 综合, 2019, 1(10): 288-288.

[7] 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(3): 291-312.

[8] 梅简, 张杰, 刘双宇, 等. 电池储能技术发展现状[J]. 浙江电力, 2020, 39(3): 75-81.

[9] 王浩, 刘峥, 李海莹. 铅碳电池研究进展[J]. 电源技术, 2018, 42(12): 1936-1939.

[10] HALL P J, BAIN E J. Energy-storage technologies

- and electricity generation[J]. Energy Policy, 2008, 36(12): 4352-4355.
- [11] 潘福荣, 张建赞, 周子旺, 等. 用户侧电池储能系统的成本效益及投资风险分析[J]. 浙江电力, 2019, 38(5): 43-49.
- [12] 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, 30(12): 4-8.
- [13] 陈伟, 石晶, 任丽, 等. 微网中的多元复合储能技术[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 112-115.
- [14] 刘坚. 储能技术经济性现状及商业化运行障碍[J]. 中国能源, 2017, 39(7): 36-40.
- [15] 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(5): 3-10.
- [16] 徐国栋, 程浩忠, 马紫峰, 等. 用于平滑风电出力的储能系统运行与配置综述[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3470-3479.
- [17] ZHOU F, JOOS G, ABBEY C, et al. Use of large capacity SMES to improve the power quality and stability of wind farms[C]// Power Engineering Society General Meeting. IEEE, 2004: 2025-2030.
- [18] CARDENAS R, PENA R, ASHER G, et al. Power smoothing in wind generation systems using a senseless vector controlled induction machine driving a flywheel[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(1): 206-216.
- [19] 张新松, 顾菊平, 袁越, 等. 基于电池储能系统的风功率波动平抑策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4752-4760.
- [20] 王海波, 杨秀, 张美霞. 平抑光伏系统波动的混合储能控制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2452-2458.
- [21] LI X, HUI D, LAI X. Battery energy storage station (BESS)-based smoothing control of photovoltaic (PV) and wind power generation fluctuations[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(2): 464-473.
- [22] 陈丽娟, 姜宇轩, 汪春. 改善电厂调频性能的储能策略研究和容量配置[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 52-59.
- [23] 李飞. 储能系统辅助火电机组调频的建模及控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [24] WU L, GAO W, CUI Z, et al. A novel frequency regulation strategy with the application of energy storage system for large scale wind power integration[C]. Proceedings of the Seventh Annual Green Technologies Conference (GreenTech), IEEE: New Orleans, United states, 2015.
- [25] 高明杰, 惠东, 高宗和, 等. 国家风光储输示范工程介绍及其典型运行模式分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 59-64.
- [26] 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.
- [27] XIE X, GUO Y, WANG B, et al. Improving AGC performance of coal-fueled thermal generators using multi-MW scale BESS: a practical application[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 1769-1777.
- [28] 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 Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(3): 1330-1343.
- [29] 黎静华, 汪赛. 兼顾技术性和经济性的储能辅助调峰组合方案优化[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 44-50, 150.
- [30] 孙冰莹, 杨水丽, 刘宗歧, 等. 国内外兆瓦级储能调频示范应用现状分析与启示[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 8-16, 38.
- [31] 陈大宇, 张粒子, 王澍, 等. 储能在美国调频市场中的发展及启示[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 9-13.
- [32] HUANG J Y, LI X R, ZHOU T T, et al. Optimal capacity allocation for supercapacitor energy storage system in power grid primary frequency regulation[J]. Advanced Materials Research, 2015, 1662-8985(1070-1072): 407-417.

- [33] STROE D I, KNAP V, SWIRRCAYNSKI M J, et al. Suggested operation grid-connected lithium-ion battery energy storage system for primary frequency regulation: lifetime perspective[C]. Proceedings of Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE: Montreal, Canada, 2015: 1105-1111.
- [34] 李欣然, 黄际元, 李培强, 等. 考虑电池储能仿真模型的一次调频特性评估[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2135-2141.
- [35] JIN T H, MO C, SHIN K Y, et al. Real-time dynamic simulation of korean power grid for frequency regulation control by MW battery energy storage system[J]. Journal of Sustainable Development of Energy, 2016, 4(4): 392-407.
- [36] 尚璿, 邵能灵, 刘琦, 等. 采用区间控制的蓄电池储能电站调峰运行控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 221-229.
- [37] 朴政国, 张明. 微型光伏储能系统的并网调峰控制研究[J]. 电气工程学报, 2017, 12(3): 41-47.
- [38] 张秀彬, 张颖璐. 超导磁能与电网调峰[J]. 上海交通大学学报, 1996, 30(12): 97-102.
- [39] ZHAO P, WANG J, DAI Y. Capacity allocation of a hybrid energy storage system for power system peak shaving at high wind power penetration level[J]. Renewable Energy, 2015, 75(C): 541-549.
- [40] 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, 4572.
- [41] 李姚旺, 苗世洪, 罗星, 等. 含压缩空气储能电力系统日前-日内协调调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2849-2860.
- [42] 董文杰. 面向可再生能源并网的发输储电力系统协调扩容规划模型[J]. 陕西电力, 2014, 42(9): 24-27.
- [43] 李振文, 颜伟, 刘伟良, 等. 变电站扩容和电池储能系统容量配置的协调规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013(15): 89-96.
- [44] 毋炳鑫, 谢卫华, 叶红恩. 交直流混合微电网直流母线电压稳定控制技术[J]. 中国电力, 2017, 50(1): 62-66.
- [45] 任永峰, 彭伟, 刘海涛, 等. 基于钒电池-超级电容混合储能技术的永磁同步风电机组低电压穿越能力提升研究[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3016-3023.
- [46] VIRULKAR V B, AWARE M V. Voltage flicker mitigation using STATCOM and ESS[C]//2008 Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference. IEEE, 2008: 1-7.
- [47] AMMAR M, JOOS G. A short-term energy storage system for voltage quality improvement in distributed wind power[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(4): 997-1007.
- [48] LI J, MA X Y, LIU C C, et al. Distribution system restoration with microgrids using spanning tree search[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6): 3021-3029.
- [49] 段力铭. 配电网故障情况下微电网互联的协调控制方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [50] 刘畅, 徐玉杰, 张静, 等. 储能经济性研究进展[J]. 储能科学与技术, 2017, 6(5): 1084-1093.
- [51] RAHUL W, JAY A, RICK M. Economics of electric energy storage for energy arbitrage and regulation in New York[J]. Energy Policy, 2007, 35(4): 2558-2568.
- [52] 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.

作者简介

裴春兴(1982—), 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为轨道交通车辆前瞻共性技术。

戴朝华(1973—), 博士, 副教授、博士生导师, 主要研究方向为轨道交通新能源、能源互联网规划与运行优化。