

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190447

分布式储能的典型应用场景及运营模式分析

寇凌峰¹, 张颖¹, 季宇¹, 吴鸣¹, 熊雄¹, 胡转娣¹, 孟锦鹏², 向月²

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 传统电网的结构和运行模式在新电改及互联网+的形势下发生了剧变, 分布式储能作为电网中重要的能量调节环节迎来了新的发展契机, 因此有必要对其典型应用场景及运营模式进行深入分析。首先对分布式储能的典型特性进行总结, 展示了分布式储能在电力系统中的接入方式。其次对分布式储能的应用场景进行划分, 分析了五种分布式储能的典型应用场景及其利用价值。并在典型应用场景基础上提出了配电网分布式储能的评价指标体系, 可有效评价其运行效益。最后, 分析了分布式储能现存及未来可能的运营模式, 并对进一步研究进行了展望。
关键词: 分布式储能; 典型特性; 应用场景; 评价指标; 运营模式

Typical application scenario and operation mode analysis of distributed energy storage

KOU Lingfeng¹, ZHANG Ying¹, JI Yu¹, WU Ming¹, XIONG Xiong¹, HU Zhuandi¹, MENG Jinpeng², XIANG Yue²

(1. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China;

2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The structure and operation mode of traditional power grid have undergone drastic changes under the situation of new electric change plan and Internet +. Distributed energy storage as a major energy regulation link in the power grid has ushered in a new development opportunity. Therefore, it is necessary to make a thorough analysis of its typical application scenarios and operation mode. Firstly, the typical characteristics of distributed energy storage are summarized, and the access mode of distributed energy storage in power system is demonstrated. Secondly, the application scenarios of distributed energy storage are divided. Five typical application scenarios of distributed energy storage and their utilization value are analyzed. Based on the typical application scenarios, an evaluation index system of distributed energy storage in distribution network is proposed, which can effectively evaluate its operation benefits. Finally, the existing and possible future operation modes of distributed energy storage are analyzed, and further research is prospected.

This work is supported by Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China (No. PD71-18-011) "Research and Application of Distribution Network Flexibility Lifting Technology based on Distributed/Mobile Energy Storage".

Key words: distributed energy storage; typical characteristics; application scenarios; evaluation index; operation mode

0 引言

近年来, 随着能源结构巨大变革与可再生能源发电技术的广泛应用, 高渗透率分布式可再生能源发电和电能替代负荷规模化接入配电网, 使传统电网的结构和运行模式发生巨大改变^[1]。

随着现代电网技术的发展, 储能技术在电力系

统中的应用越来越广泛, 储能是电能与其他能源进行灵活转换、综合利用的重要设备, 它解决了能源生产和消费的不同步问题, 使能源在时间和空间上具有可平移性, 创造了能源共享的基础条件^[2]。利用分布式储能分散布置、充放灵活的特点, 可以有效地解决配电网中能量流的不确定与无序问题^[3]。为此, 有必要深入分析分布式储能的典型应用场景, 并对其运行效益进行研究, 对其运营模式进行探索和展望^[4]。

不同的分布式储能技术有其不同的适用场合, 在各种应用场景中发挥其各自作用, 在不同的应用

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目资助 (PD71-18-011) "基于分布式/移动储能的配电网灵活性提升技术研究及应用"

场景中配置适合的储能可以最大限度地发挥其作用，也是最高效经济的方案。随着可再生能源发电接入电网的比例越来越高，分布式储能技术将在电网、用户端、发电端发挥重要的甚至是不可替代的作用，这将成为分布式储能发展应用的新机遇^[5]。

本文首先分析了分布式储能的典型特性，对分布式储能的接入方式进行了说明，介绍了国家对于储能系统接入配电网的技术规定。接着概括和总结了国内外在分布式储能应用场景划分方面的研究成果，并针对每种应用场景介绍了其对应的效益评价指标。最后，对分布式储能的运营模式进行了分析，在新电改及“互联网+”的背景下，对分布式储能在电力市场中的运营策略进行了分析和展望。

1 分布式储能的典型特性

传统能源使用模式主要以化石能源为主，能量集中供应、集中输送，供能与用能垂直一体化，这种模式已不具备可持续性，并且无法有效满足国家

新兴战略产业对能源供给的需求^[6]。加上分布式电源大量接入，改变了传统的用能模式，使电能与其他能源之间的联系和转换更加紧密，同时促进了多种可再生能源的高效利用，为了适应这种趋势，使分布式能源高效利用、就地消纳，分布式储能响应时代需求应运而生并承担着越来越重要的作用。

分布式储能区别于集中式储能而逐渐发展起来，国内外学者对其典型特性已经做了大量研究^[1-9]，目前已有多种类型的分布式储能得到了较为广泛的应用，按照其工作类型可以分为机械储能、电化学储能、电磁储能、热储能与移动储能五种，由于电能可以转换为机械能、化学能、电磁能等形式进行存储，因此，分布式储能按照原理的不同又可继续细分为更多的类型。机械储能包括抽水蓄能、压缩空气储能和飞轮储能等；电化学储能包括铅酸、锂离子、钠硫电池等；电磁储能包括超导、超级电容储能等，对其主要典型特性的归纳总结如表 1 所示。

表 1 分布式储能技术典型特性总结

Table 1 Summary of typical characteristics of distributed energy storage technology

储能类型	典型额定功率	持续放电时间	响应速度	放电深度	循环寿命	体积功率密度	特点	主要应用	功率成本/(元/kW)	
机械储能	抽水蓄能	100~2 000 MW	数小时	s~min	较低	>15 000	规模大，可靠经济，寿命长，响应快，依赖地理环境	提高供电可靠性，削峰填谷和延缓电网升级改造	3 600~12 000	
	压缩空气	10~300 MW	数小时	s~min	—	>10 000	规模大，响应慢，效率低，依赖地理环境	削峰填谷，提高供电可靠性	3 000~4 000	
	飞轮储能	5 kW~5 MW	数分钟	1~20 ms	较低	50 000	5 000	充放电功率大，寿命长，环境适应能力强	提高供电可靠性，调峰调频、UPS (不间断电源)	1 500~10 000
电化学储能	铅酸电池	1 kW~50 MW	数小时	20 ms	低	2 500~3 000	35~50	成本低，可靠性和灵活性高，寿命短	提高供电可靠性，频率控制，备用	500~1 000
	钠硫电池	1 kW~10 MW	数小时	20 ms~s	较高	1 500~3 000	120~160	成本高，响应快，效率高，运行安全性较差	削峰填谷，提高供电可靠性，UPS	5 000~7 000
	锂电池	1 kW~10 MW	数小时	20 ms~s	较高	2 000~3 000	1 300~10 000	成本高，功率密度高，响应快，放电时间长	提高供电可靠性，备用，UPS	3 200~8 000
电磁储能	超导储能	10 kW~10 MW	数秒	1~5 ms	较高	100 000	2 600	响应快，效率高，容量大，成本高	提高供电可靠性，UPS	1 200~1 800
	超级电容	10 kW~1.5 MW	数小时	min	较高	10 000~100 000	40 000~120 000	响应快，效率高，容量小，寿命长	提高供电可靠性，平滑功率	600~1 800
热储能	1 kW~300 MW	数小时	s~min	较高	>10 000	—	成本低，储能密度低，寿命长，技术更新快	消纳可再生能源，削峰填谷，热电联供	500~4 000	
移动储能	5~100 kW(每辆)	数小时	min	较高	2 000~3 000	100~200	成本高，响应快，容量大，灵活性高	提高供电可靠性，消纳可再生能源	3 000~5 000	

由表 1 可以看出, 目前, 分布式储能技术普遍存在成本较高的问题。同时, 系统的充放电效率、使用寿命、功率和功率密度等指标尚有待提高。

分布式储能虽然成本较高, 但它也有着接入位置灵活的明显优点, 目前在中低压配电网、分布式电源及用户侧均得到了广泛应用。国内外对于分布式储能接入电力系统的方式以及对配电网的影响方面有广泛的研究^[7-14]。分布式储能在电力系统中的接入方式按照归属方的不同存在多种情况, 比较典型的三种接入方式如图 1 所示。

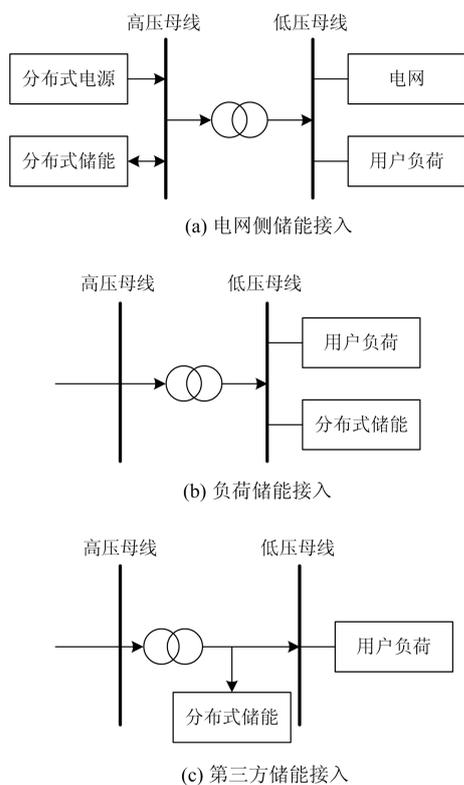


图 1 分布式储能接入方式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of distributed energy storage access

图 1 展示了储能从不同主体侧接入的典型方式, 也体现了储能本身配置的主体, 来自于电网公司、负荷本身或者第三方企业, 无论何种接入方式, 储能系统的接入与运行都应遵守相关的国家标准、行业标准和企业标准。《储能系统接入配电网技术规定 Q/GDW564-2010》在储能系统接入配电网的多个方面都做了相关的技术规定。其中包括不同的储能容量所对应的配电网接入点电压等级不同; 在储能系统与公共电网的连接点处应采用安全可靠的断路器等, 储能系统接入配电网后在公共连接点处的电能质量需要格外关注, 网络参数波动应满足国家相关标准的要求^[15]。

在接入方式确定的情况下, 文献[16]研究了储能系统接入对配电网运行状态及网络参数的影响, 分析了多种情形下接入不同容量的储能设备时, 对配电网线路节点电压和网络损耗可能存在的影响。文献[17]分析了澳大利亚的某个低压配电网, 当在居民屋顶接入光伏后, 会导致系统电压异常波动, 研究表明在并网时接入蓄电池储能设备, 并以荷电状态(State of Charge, SOC)为反馈时, 可以极大改善光伏带来的电压波动问题。为了克服储能接入时固定串并联技术的刚性问题, 文献[18]提出一种动态可重构电池网络技术, 将单个电池通过电力电子设备阵列接入电池网络, 并利用能量信息化技术实现电池网络的重构控制。

虽然以目前的技术接入配电网的分布式储能功率、容量相对较小, 但是通过实施削峰填谷, 参与需求响应, 分布式储能系统可以缓解电网调峰压力、提高电网运行稳定性、延缓和减少电网投资, 缓解高峰时段供电需求, 其作用已不容小觑, 并将在未来的现代电网系统中发挥越来越重要的作用, 因此有必要深入研究并分析分布式储能的典型应用场景问题。

2 分布式储能的典型应用场景

分布式储能的运行状态与其应用场景紧密相关, 当前关于应用场景的研究多与储能的优化配置建模相结合, 根据环境条件、储能的输出特性、配置方法等对储能的应用场景加以区分。如文献[19]分析了储能在电力系统中的若干应用模式, 讨论了储能的集中式应用与分布式应用的技术要求、接入方案和主要功能。文献[20]分析了蓄电池的特性, 并根据蓄电池储能系统的作用建立了系统运行约束, 考虑了后备电源、抑制风光输出功率波动和重要负荷的全后备三种场景。根据控制主体和对电网影响侧重点的不同, 本文将分布式储能系统分为提高供电可靠性、削峰填谷、消纳可再生能源、延缓电网升级改造以及热电联供五个基本的应用场景, 并针对每个应用场景展开具体分析。

2.1 提高供电可靠性

现代配电系统由于承载了诸多重要负荷, 对电能质量的要求越来越高, 另外, 大量可再生能源发电与电力电子设备等的非线性特性、谐波干扰、启停冲击会对电网带来较大冲击, 提升供电可靠性是分布式储能的首要任务^[21]。

正常运行状态下的电力系统, 在负荷高峰时期, 由于发电系统出力有限以及线路传输能力限制, 有可能会在某些地点发生输电阻塞, 造成部分负荷失

去供电。并且,在新电改与“互联网+”的背景下,能源互联网快速发展,各类可再生能源发电凭借自身优势在电力系统中占据的比例不断提升,但是与此同时,文献[22]认为风力、光伏等可再生能源发电也具有明显的波动性和不稳定性特点,对于电网平稳运行会造成一定的负面影响。

在提高供电可靠性的场景下,分布式储能系统既可以利用自身储存的电能为部分负荷供电,也可以减少可再生能源发电对电力系统的冲击,降低负荷缺电可能性^[23]。对于配电网线路而言,配置分布式储能能够在发生停电时对自身实现紧急供电,很好地保障了自身的紧急用电需求。对于社会而言,通过分布式储能可以更好地保护人民群众的基本利益,在正常供电中断时最小化经济及政治损失^[24]。在一些未安装储能系统的地区或者某一地区临时性负荷增长要求保证供电时,文献[25]提出利用移动式储能如应急电源车来保障供电质量,移动式储能优势在于灵活性较强,但通常供电能力有限。

2.2 削峰填谷

随着现代技术经济的发展,电网负荷峰谷差逐渐增大,同时可再生能源发电应用日益广泛,在电网中渗透率提高,使得电网的调峰压力越来越重^[26]。由于储能初期投资较大,资本回收期较长,过去很少将储能系统应用于电力系统的削峰填谷。但是随着新电改放开售电侧市场,各个售电方的竞争使得不同区域、不同时刻的电价差不断增大,储能在完成削峰填谷目标的同时,可以利用其低电价时刻充电与高电价时刻放电进行套利,加上国家对于储能的补贴机制,其效益大大增加,资本回收期缩短,扩大了储能的应用范围和削峰填谷的应用效果。

利用分布式储能进行削峰填谷,实现了负荷的时空平移,可以松弛电网的调峰压力,缓解电网在负荷高峰时的阻塞情况。文献[27]认为电池储能的优点包括建设地点灵活、建设周期短、充放电效率高,很适合用于调节电力系统峰谷差,相比于其他类型储能,其优势更为明显。

此外,利用分布式储能装置在电价较低时存储电能,在电价较高时释放电能,可以从中间赚取一定的经济价值。在新电改环境下的电力市场中,对于额定功率和额定容量确定的储能系统,相关的效益评估研究均针对运营商的主要收益展开。未来随着我国第三产业用电比重不断提升,峰谷电价差有进一步拉大空间,为储能平抑负荷峰谷差营造更大的应用空间。文献[28-29]在主要考虑削峰填谷收益的情况下,优化目标设置为收益最大,分别设计了10 MWh/70 MWh的钒电池和钠硫电池分布式储能

电站优化模型,分析得到储能系统的优化运行策略,然后根据储能系统的总投资额计算年收益率,从结论来看,收益效果比较可观。

2.3 消纳可再生能源

由国家发改委、国家能源局印发的《清洁能源消纳行动计划(2018-2020年)》^[30]可知,2018年我国在清洁能源消纳方面进步显著,并对2019年至2020年清洁能源消纳指标提出了要求,到2020年更是要求风电及太阳能电源等的利用率达到95%及以上,这显然是一个较为艰巨的任务。

分布式风电、光伏等可再生能源发电具有随机、波动的特征,可能会对配电网运行控制产生冲击^[31]。利用分布式储能的灵活调节特点可以提高系统对分布式电源的接纳能力。文献[32]采用动态规划的方法对储能电站负荷波动问题进行优化研究,综合考虑储能电站剩余电量及SOC等因素,相对人工智能算法,操作更加简单准确,对储能功率的优化及提升分布式电源的接纳能力起到了一定的借鉴意义。

提升可再生能源接纳能力的同时,分布式储能也为可再生能源创造了更安全、可靠并网供电的条件。如文献[33]分析了日本一个风电场与蓄电池储能电站的运行情况,结果表明该储能电站的作用不仅包括平滑风电场输出波动,还使整个系统的功率输出情况符合电网的调度指令。由此实现了可再生能源的进一步消纳,为完成可再生能源消纳指标提供了良好的技术保障。未来光伏、风电等波动性可再生能源的占比还将不断提升,可再生能源发展或将成为储能长期发展最重要的驱动力。但目前储能平准化成本相对可再生能源发电仍然较高,储能单纯依赖可再生能源消纳的经济性不足,国内单纯服务于可再生能源消纳的储能项目仍处于示范阶段。

2.4 延缓电网升级改造

在目前的电力市场环境下,电网公司不仅需要提供安全稳定的电能,还应尽可能降低自身运行维护和改造升级等成本,为用户提供高性价比的电能^[34]。电力系统静态安全约束要求电网中任一元件故障退出后系统仍能稳定运行,其他元件均不越限。为了完成这一任务,电网的断面传输容量需预留暂态稳定极限,因此断面容量小于线路热稳极限之和,而储能系统的存在可以实现在线路故障时快速充电,吸收转子加速能量,提高暂态稳定性,进而提高断面传输容量。储能在这一过程中提高了系统N-1安全校核能力,提高了断面传输容量,从而达到延缓投资的目的。

当某一线路或变电站负荷超过其额定容量时,则需要对电网进行升级或者改造,传统的措施主要

是升级或者改造变电站和配电线路容量。但是随着分布式储能技术的发展和储能设备单位成本的下降, 分布式储能在配电网中应用越来越广泛, 可以替代传统的电网升级改造措施, 以延缓投资, 节约成本。文献[27]认为在配电网中应用蓄电池储能系统可以有效减少配电网扩容费用, 延缓电网升级和改造。除了考虑储能系统的投资成本问题外, 文献[35]综合考虑了储能应用多方面问题, 提出以成熟的技术规范及运行经验来判断电网升级改造的必要性。

2.5 热电联供

热能是除电能之外的另一种高效清洁能源。热电联供是主要应用在用户端的高效综合能源系统, 可以有效解决区域能源供应问题, 热电联供系统不仅节能环保, 而且还可以提高供能质量, 充分利用现有资源, 提高能源利用率。文献[36]利用了集成于商业建筑内部墙体上的相变材料作为热储能系统, 研究分析了储能系统的工作模式、容量建设, 并根据季节和温度的变化进行场景划分, 建立了电-热联合调度模型, 达到能源消纳、削峰填谷的目标。热电联供系统的建设重点和难点在于电、热储能联合调节特性研究方面, 对于两种能源的协同控制一直是研究的热点。对于电-热储能联合系统的研究, 文献[37]分析了电-热联合微网系统的整体结构, 以热泵的运行特性为基础建立了电-热综合能源系统, 提出了一种电-热协同控制策略。文献[38]综合考虑了电、冷、热三种储能类型, 建立了联合优化调度模型, 计算得到了不同场景下多种能源的综合调度结果。

3 分布式储能效益评价指标

分布式储能对电网运行发挥着重要作用, 对于其效益评价指标的研究有助于科学、系统、全面地认识分布式储能的效益, 指导分布式发电站的建设和改造, 具有重要的研究价值和实际作用。文献[39]提出储能系统的价值与机组燃料价格、火电机组启动成本、风电穿透水平、储能系统规模等因素有关。而文献[40]合理依据经济学中边际成本等于边际收益时总效益最大的原理, 制定了实时经济调度方案来配置储能。

现阶段, 储能效益评价的研究主要在储能投资收益的评估, 因此本文通过分别构建其成本分析指标和收益分析指标来综合分析分布式储能的效益, 评价其利用价值^[41]。

3.1 成本分析指标

3.1.1 初始投资成本

初始投资成本是指分布式储能系统工程建设之

初投入的资本总额, 这部分资本通常主要用于设备的购置, 包括蓄电池储能电源、飞轮等基础设施, 以及配套辅助设施的购置资金。另外储能设备部分元件需要报废处理时对其进行回收也需要投入资金。固定资产投资成本是由储能系统的 P_{\max} 所决定的功率部分和 E_{\max} 所决定的容量部分组成。功率部分通常取决于并网功率转换系统^[42]。

$$C_1 = (k_p \times P_{\max} + k_E \times E_{\max}) \quad (1)$$

式中: k_p 为单位功率投资成本, 元/kW; k_E 为单位容量投资成本, 元/kW·h。

3.1.2 运行维护成本

运行维护成本是指储能系统在总寿命期内由于设备损耗、老化或运行参数达到报废标准后需保养维修或重新更换而产生的成本投入, 其固定部分同样由储能系统的额定功率和额定容量组成, 而可变部分由储能系统年充放电电量决定。通常可将运行维护成本的容量部分等效为初始投资成本中的容量部分, 即整体更换储能设备。而可变部分是指为保障储能系统在寿命期内正常运行而动态投入的资金, 由于动态参数有所变化, 需要每一年单独计算, 通常包括储能系统的安装、调试、人力、检修等费用。储能设备的年运行维护费用与其运行状况有关, 可表示为

$$C_2 = \sum_{k=1}^n (C_{rp} P_{\max} + C_{re} E_{\max}) + \sum_{t=1}^T C_d [W_c(t) + W_d(t)] \quad (2)$$

式中: C_{rp} 为单位功率运行维护成本; C_{re} 为单位容量运行维护成本; C_d 为单位电量动态成本; $W_c(t)$ 和 $W_d(t)$ 分别为储能系统的年充电电量和年放电电量。

另外值得注意的是, 使用全寿命周期模型^[43]来评价分布式储能的经济性特征通常是非常有效的。比如文献[44]针对用户侧电池储能的经济性进行研究, 建立了综合计算储能的全寿命周期成本模型, 研究降低储能成本的方法, 并提出了用户侧电池储能的优化投资策略。

3.2 收益分析指标

3.2.1 低储高发收益

随着电网的发展, 系统负荷波峰波谷差异逐渐增大, 因此引入了分时电价的概念。基于分时电价政策的实施, 鼓励储能设备在负荷波谷, 即电价低时选择充电, 在负荷波峰, 即电价高时选择放电, 同时可以使具有储能设备的电网、企业利用分时电价政策营利, 储能系统由此获得的收益数学模型^[45]可表示为

$$W_1 = \sum_{i=1}^{365} \sum_{i=1}^{24} (P_i^{\text{discharge}} - P_i^{\text{charge}}) P_i \quad (3)$$

式中: W_1 为储能系统的低储高发收益, 元; $P_i^{\text{discharge}}$ 、 P_i^{charge} 分别表示储能系统在第 i 时间段内的放电、充电功率; P_i 为 i 时间段内的实时上网电价。

3.2.2 容量收益

分布式储能是调节电网负荷峰谷差的有效措施。负荷高峰时段, 它可以发电提供功率输出, 担任电网高峰容量; 用电低谷时段, 则可用电吸收低谷时多余的电量用来蓄能, 减少负荷峰谷差。分布式储能系统可以弥补系统的工作容量和备用容量, 从而减少传统火电装机容量, 节省电力系统的投资和运行费用, 由此产生的经济效益称为容量效益。储能系统的应用可以提升接纳可再生能源出力的能力, 减少弃光、弃风量。用 W_2 表示可再生能源的发电收益增加值, 表示为

$$W_2 = E_{\text{res}} \cdot p_i = \sum_{i=1}^{365} \sum_{i=1}^{24} E_i^{\text{res}} \cdot p_i \quad (4)$$

式中: E_{res} 表示年增加的分布式并网发电量; E_i^{res} 表示在 i 时间段内增加的可再生能源发电上网电量。

3.2.3 环境收益

分布式储能系统参与电网调峰过程中具备环境效益, 燃煤火电机组不仅在运行过程中消耗大量化石燃料, 同时也会向环境排放大量污染物, 对环境非常不友好。分布式储能系统的应用可以改善这一问题, 从而带来可观的环境效益^[46]。大量研究表明, 煤炭发电产生的环境污染物主要有 SO_2 、 NO_x 、 CO 、 CO_2 和烟尘等, 以 SO_2 和 NO_x 的排放量为例, 文献^[47]给出了其计算方法。

(1) SO_2 日排放量

燃煤的成分中含硫, 经过燃烧产生硫化物, 其主要成分为 SO_2 , 日排放量计算如式(5)所示。

$$Q_{\text{SO}_2}(d) = \frac{32}{16} b_{\text{yx}} S_{\text{ar}} \lambda_{\text{SO}_2} (1 - \eta_{\text{SO}_2}) W_{\text{tgd}}(d) \quad (5)$$

式中: b_{yx} 为被替代的火电机组的单位供电煤耗; S_{ar} 为燃煤的含硫质量分数; λ_{SO_2} 为燃煤生成 SO_2 的比例; η_{SO_2} 为脱硫装置的效率; $W_{\text{tgd}}(d)$ 为第 d 天的储能对清洁能源的日调峰充电电量, 即无储能投入时的浪费电量。

(2) NO_x 日排放量

氮氧化物的主要成分是 NO 和 NO_x , 在实际燃烧过程中, 燃煤成分中的氮并不完全转化为 NO_x , 转化的氮和燃料中全部氮之比用 λ_N 表示。

$$Q_{\text{NO}_x}(d) = \frac{30.8}{14} b_{\text{yx}} N_N \frac{\lambda_N}{m_N} (1 - \eta_N) W_{\text{tgd}}(d) \quad (6)$$

式中: N_N 为燃煤中氮的质量分数; m_N 为燃料氮生成的 NO_x 占全部 NO_x 排放量之比; η_N 为脱氮设备的效率。

将储能系统的环境收益定义为储能系统代替燃煤火电机组参与电力系统调峰时, 减少污染物、温室气体排放所产生的收益^[48]。

$$W_3 = \sum_{i=1}^n V_{ei} \times Q_i + I \quad (7)$$

式中: W_3 为储能系统的环境收益, 元; V_{ei} 为第 i 项污染物的环境价值, 元/kg; n 为污染物总数; Q_i 为第 i 项污染物的排放量, kg; I 为脱硫装置和烟尘过滤装置的投资成本年值。此外, 文献^[49]使用多目标优化方法评估分散社区中长期(储氢)和短期(电池和热)储能系统的潜力, 以最大限度地降低成本和减少 CO_2 排放, 对于未来分布式储能的环保性提升具有指导意义。

以上效益评价指标主要关注的是经济效益方面, 但实际上针对不同应用场景既有共同的指标也有侧重的指标, 有些时候需要考虑多方面因素而不能以经济性为唯一评判标准。以提高供电可靠性场景为例, 分布式储能技术可以降低负荷缺电率, 可以作为系统备用电源, 甚至实现黑启动的功能, 而此时它为电力系统带来的收益则很难用经济性指标来衡量。因此, 在不同的应用场景下, 需要根据实际需求来综合评价分布式储能的效益, 将经济性指标以外的评价因素融合进效益评价体系, 以此制定合理高效的储能配置策略。

4 分布式储能的运营模式

随着新电改的推进, 分布式储能市场的各个主体之间联系愈加紧密。对于不同市场主体来说, 储能设备厂商、用户、第三方等可以通力合作, 充分调动各自的技术、资本优势以及市场经验, 利用分布式储能以及相应的充放电策略获得不同方面的效益, 满足主体各自的需求, 同时引导储能系统探索更新的商业模式, 形成适用于中国市场的商业化运营模式。

4.1 独立投资模式

独立投资模式主要指的是大型工商业用户自费配置储能系统, 用户出资一次性买断设备, 在这种模式下, 用户可以采用低储高发的方式减少自身电费支出。相较于常规发电机组, 储能在辅助服务领域优势明显, 能够以毫秒级的速度为电网提供调峰

调频、紧急支撑、黑启动等多种服务。根据电力市场价格机制,如峰谷分时电价、可中断电价等,用户可以自行设定储能系统运行模式,储能设备可由用户自行维护,或由储能设备厂商提供售后运维服务。对于某些配备有分布式电源,如光伏发电装置的用户,还可以利用储能系统最大程度上消纳分布式电源发电^[50]。电力市场环境下,不同用户之间也可以利用储能系统进行电能交易,某些用户将自身拥有的储能电量交易给同一区域内的其他用户,不仅可以获得利润,也间接减轻了电网压力。独立投资模式适用于储能投资收益率较高的场景,由于现阶段电池储能系统度电成本较高、国内现行峰谷价差有限,储能的推广应用仍需相关补贴政策支持。随着储能技术水平提升、成本降低以及相关政策和电价机制的完善,储能将逐渐具备规模化推广应用的条件。

4.2 联合投资模式

电网作为电力系统中的重要组成部分,是最具实力也最需要配置储能系统的主体。在目前储能成本居高不下的背景下,用户有储能购置需求,但受制于储能高昂的成本通常难以承担,同时电网需要出售设备回笼资金,采用电网与用户共同投资的模式可以分散用户投资压力和电网的销售压力,并且在该模式下,电网的参与可为设备维护、废旧设备回收提供技术背景,储能系统应用于联合投资模式中,可以在负荷低谷时期充电,在负荷高峰时期放电,从而达到削峰填谷的目的,进而可以延缓电网投资^[51]。横向对比不同应用场景,发电侧储能一般用于可再生能源发电平滑输出或者火电与储能机组联合调频,用户侧储能一般用于峰谷电价差套利和提高电能质量。在这些情况下,储能所发挥的价值都相对单一。但是如果储能电站能够建设在输配电环节中,电网就可以根据自己的多重需要充分使用储能电站,电化学储能的价值就能最大限度地发挥出来。电网作为储能的运营方,将某些时刻多余的电能存储在分布式储能中,并在需要时通过电网线路输送给用户,不仅节约了成本,还可以赚取利润。

4.3 租赁模式

在新电改的背景下,储能设备厂商、售电公司或第三方(如专业投资公司)获得了更大的发展空间,其中售电公司是储能市场主体中社会资本的代表。售电公司作为电网与用户的中间商,可以利用储能系统低储高发套利,也可以将储能设备租赁给用户,负责储能设备的购置和维护,用户支付租赁费用,储能设备的运营过程由用户安排,储能设备厂商、售电公司或第三方不参与,以此来跟踪其代

理用户负荷,减少负荷预测误差。在能源交易的过程中,售电公司利用储能将电网输送来的电能以某种形式(例如电池)储存起来,然后与用户进行交易,这种租赁模式是当前电力市场逐渐流行起来的一种模式,由售电公司充当电网与用户之间的媒介,相对更加高效、更加便捷。而且对于用户来说,租赁或者分期付款方式可以消除初期投资成本过大的障碍,降低储能设备应用门槛,有利于促进储能设备规模化发展。

4.4 共享模式

在独立投资模式下,用户通常需要长期贷款,不利于储能系统的快速推广应用。共享模式是指通过公开发布募集项目资金进行融资,购置储能设备,可采用将设备租赁给用户、自主运营或第三方运营等不同的模式。该模式借鉴了共享经济概念,通过签订协议,分布式储能或集中式储能业主除让储能设备为自身服务外,也可以将储能设备让渡给第三方,允许储能设备接受统一调度,为系统提供辅助服务并收取容量费用,在目前储能成本较高、投资回收期较长的背景下是值得探讨的商业模式。

综上,短期内储能应用的商业模式将存在用户独立投资、用户和电网联合投资、用户租赁、共享等多种模式共存,随着储能成本下降、政策激励等外部条件的作用,储能商业运营模式将逐步演化得越来越完善。

当前电力市场发展变化很快,关于分布式储能运营模式的研究也日新月异。文献[52]以低储高发套利最大为目标,对法国电网中的压缩空气储能系统进行仿真,并在不同的商业模式下对其运行效益进行了比较。文献[53]分析了不同运营模式下,用户侧储能系统的容量和相关辅助服务的成本,建立了在不同商业运营模式下的综合效益评价模型。文献[54]分析了工业型用户侧微电网的多样性,提出了相应的运营模式,为其规模化发展提供了发展路径参考。现今政策大力提倡整合各个主体下的多类型分布式储能设备^[55],尽可能更多地利用社会闲置储能设备,建立统一的储能设备数据库,并进行集中管控,规范运营。推动目前利用率比较低的储能设备发挥效用,建设储能系统云平台,科学管理、有序利用,鼓励能量自由交易,推动建立新时代高效有序的分布式储能运营模式。

5 总结与展望

本文对分布式储能的典型应用场景和运营模式进行了较为全面的综述,首先介绍了分布式储能的典型特性及其在电力系统中的接入方式。接着将分

布式储能技术在电力系统中的五大应用场景分为提高供电可靠性、削峰填谷、消纳可再生能源、延缓电网升级改造以及热电联供。在众多应用场景下,结合新电改背景进行了研究分析,在典型应用场景基础之上给出了配电网分布式储能的评价指标,对于科学、系统、全面地认识分布式储能的效益具有重要作用。最后,分析了分布式储能的多种运营模式,为分布式储能市场的规模化发展提供了运营模式参考。

未来对于分布式储能的研究可以侧重于新电改背景下配电网分布式储能运营模式的分析,研究分布式储能参与电力市场的方式,确定各个主体之间的利益结算关系。另外,分析不同电价政策、补贴机制、服务模式下储能的资本回收期,确定不同运营模式的适用范围和边界条件。针对不同应用场景与多元负荷需求,分析分布式储能接入后配电网对不同类型用户的服务方式和收费模式,探索不同应用场景下适用的分布式储能运营策略。

参考文献

[1] 李建林, 马会萌, 惠东. 储能技术融合分布式可再生能源的现状与发展趋势[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 1-10.
LI Jianlin, MA Huimeng, HUI Dong. Current situation and development trend of energy storage technology integrating distributed renewable energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 1-10.

[2] 艾欣, 周树鹏, 赵阅群. 基于场景分析的含可中断负荷的优化调度模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(增刊 1): 25-31.
AI Xin, ZHOU Shupeng, ZHAO Yuequn. Research on optimal scheduling model with interruptible load based on scene analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(S1): 25-31.

[3] 阮博, 俞德华, 李斯吾. 基于一致性的微网分布式能量管理调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 23-28.
RUAN Bo, YU Dehua, LI Siwu. Consistency-based distributed energy management scheduling strategy for microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 23-28.

[4] 赵波, 王成山, 张雪松. 海岛独立型微电网储能类型选择与商业运营模式探讨[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4): 21-27.
ZHAO Bo, WANG Chengshan, ZHANG Xuesong. Island independent microgrid energy storage type selection and business operation model[J]. Automation of Electric

Power Systems, 2013, 37(4): 21-27.

[5] 李建林, 袁晓冬, 郁正纲. 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): 15-25.
LI Jianlin, YUAN Xiaodong, YU Zhenggang. A review on improving power quality of power grid by energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 15-25.

[6] CARPINELLI G, CELLI G, MOCCI S, et al. Optimal integration of distributed energy storage devices in smart grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 985-995.

[7] 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.
CHEN Wei, SHI Jing, REN Li, et al. Multi-component composite energy storage technology in microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 112-115.

[8] 王成山, 于波, 肖峻, 等. 平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 1-8.
WANG Chengshan, YU Bo, XIAO Jun, et al. Capacity optimization method for energy storage system with smooth output of renewable energy generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 1-8.

[9] 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.
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Application prospects and challenges of distributed energy storage technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 1-8.

[10] 王树东, 杜巍, 林莉, 等. 基于合作博弈的需求侧响应下光储微电网优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 129-137.
WANG Shudong, DU Wei, LIN Li, et al. Optimal allocation of optical storage microgrid based on demand side response of cooperative game[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 129-137.

[11] TOLEDO O M, FILHO D O. Distributed photovoltaic generation and energy storage systems: a review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(1): 506-511.

[12] 别朝红, 王锡凡. 抽水蓄能电站主接线的可靠性综合评估[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(9): 9-14.
BIE Chaohong, WANG Xifan. Comprehensive reliability assessment of main connection of pumped storage power station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9): 9-14.

- [13] WANG Chengshan, LI Xialin, GUO Li, et al. A seamless operation mode transition control strategy for a microgrid based on master-slave control[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2012, 55(6): 1644-1654.
- [14] 李建林, 马会萌, 袁晓冬, 等. 规模化分布式储能的关键应用技术研究综述[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 289-299.
LI Jianlin, MA Huimeng, YUAN Xiaodong, et al. A review of key application technologies of large-scale distributed energy storage[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 289-299.
- [15] 储能系统接入配电网技术规定: Q/GDW 564—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
Technical regulations for energy storage system access to distribution network: Q/GDW 564—2010[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- [16] 刘舒, 刘斌, 王承民, 等. 储能电站的接入对配电网运行状态影响分析[J]. 电子技术应用, 2015(增刊): 282-285.
LIU Shu, LIU Bin, WANG Chengmin, et al. Analysis of the influence of access of energy storage power station on the operation status of distribution network[J]. Application of Electronic Technique, 2015(S): 282-285.
- [17] ALAM M J E, MUTTAQI K M, SUTANTO D. Mitigation of rooftop solar PV impacts and evening peak support by managing available capacity of distributed energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 3874-3884.
- [18] 慈松. 能量信息化和互联网化管控技术及其在分布式电池储能系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3643-3648.
CI Song. Energy informatization and internet-based management and control technology and its application in distributed battery energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3643-3648.
- [19] 叶季蕾. 储能的集中式/分布式应用[J]. 电气应用, 2017(11): 19-20.
YE Jilei. Centralized/distributed application of energy storage[J]. Electrical Applications, 2017(11): 19-20.
- [20] 潘华, 邓长虹, 吴之奎, 等. 基于多应用场景独立微电网储能系统优化配置[J]. 电源技术, 2016, 40(6): 1269-1272.
PAN Hua, DENG Changhong, WU Zhikui, et al. Optimal configuration of stand-alone microgrid energy storage system based on multi-application scenarios[J]. Power Technology, 2016, 40(6): 1269-1272.
- [21] 李蕊. 储能在电力系统中的作用与运营模式[J]. 电力建设, 2016, 37(8): 2-7.
LI Rui. The role and operation mode of energy storage in power system[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(8): 2-7.
- [22] CAI C, CHENG S, JIANG B, et al. Optimal operation of microgrid composed of small hydropower and photovoltaic generation with energy storage based on multiple scenarios technique[C] // 2015 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, Changsha, China: 2185-2190.
- [23] 杨毅, 刘洁, 于建成, 等. 分布式储能优化配置影响因素的评价方法研究[J]. 现代电子技术, 2015(2): 152-157.
YANG Yi, LIU Jie, YU Jiancheng, et al. Research on evaluation methods of influencing factors of distributed energy storage optimization configuration[J]. Modern Electronic Technology, 2015(2): 152-157.
- [24] 李志伟, 赵书强, 刘应梅. 电动汽车分布式储能控制策略及应用[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 442-450.
LI Zhiwei, ZHAO Shuqiang, LIU Yingmei. Distributed energy storage control strategy and application for electric vehicles[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 442-450.
- [25] 鲍谚, 姜久春, 张维戈, 等. 电动汽车移动储能系统模型及控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(22): 36-43.
BAO Yan, JIANG Jiucun, ZHANG Weige, et al. Model and control strategy of mobile energy storage system for electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 36-43.
- [26] 杨海晶, 贾学翠, 高东学, 等. 分布式储能在电力系统的应用及现状分析[J]. 电器与能效管理技术, 2018(3): 47-52.
YANG Haijing, JIA Xuecui, GAO Dongxue, et al. Application and status analysis of distributed energy storage in power system[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2018(3): 47-52.
- [27] OUDALOV A, CHARTOUNI D, OHLER C, et al. Value analysis of battery energy storage applications in power systems[C] // 2016 IEEE Power System Conference and Exposition, October 29 - November 1, 2006, Atlanta, GA, USA: 2206-2211.
- [28] MOGHADDAM I G, SAEIDIAN A. Self scheduling program for a VRB energy storage in a competitive electricity market[C] // 2010 IEEE International Conference on Power System Technology, October 24-28, 2010, Hangzhou, China.
- [29] KAZEMPOUR S J, MOGHADDAM M P. Economic

- viability of NaS battery plant in a competitive electricity market[C] // 2009 International Conference on Clean Electrical Power, June 9-11, 2009, Capri, Italy.
- [30] 国家能源局综合司关于征求《清洁能源消纳行动计划(2018-2020年)(征求意见稿)》意见的函[J]. 电力设备管理, 2018, 20(5): 20-23.
- Letter from the General Department of the State Energy Administration on the Inquiry for Opinions on the Clean Energy Disposal Action Plan (2018-2020) (Draft for Opinions)[J]. Power Equipment Management, 2018, 20(5): 20-23.
- [31] 贾成真, 王灵梅, 孟恩隆, 等. 基于风电场集中储能的风储柔性控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 30-37.
- JIA Chengzhen, WANG Lingmei, MENG Enlong, et al. Research on flexible control strategy of wind storage based on centralized energy storage in wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 30-37.
- [32] GAUL A J, HANDSCHIN E, HOFFMANN W, et al. Establishing a rule base for a hybrid ES/XPS approach to load management[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(1): 86-93.
- [33] LEMOFOUET S, RUFER A. A hybrid energy storage system based on compressed air and supercapacitors with maximum efficiency point tracking (MEPT)[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(4): 1105-1115.
- [34] SARDI J, MITHULANANTHAN N, GALLAGHER M, et al. Multiple community energy storage planning in distribution networks using a cost-benefit analysis[J]. Applied Energy, 2017, 190: 453-463.
- [35] 李静. 含间歇性能源的分布式电网优化配置理论与方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- LI Jing. Research on theory and method of distributed grid optimization configuration with intermittent energy[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [36] 魏繁荣, 林湘宁, 陈乐, 等. 基于建筑相变材料储能的微网综合能源消纳系统[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 792-804.
- WEI Fanrong, LIN Xiangning, CHEN Le, et al. Microgrid integrated energy consumption system based on energy storage of building phase change materials[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 792-804.
- [37] 施金晓, 黄文焘, 邵能灵, 等. 电-热联合微网中分布式可再生能源功率波动平抑策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 537-546.
- SHI Jinxiao, HUANG Wentao, TAI Nengling, et al. Power fluctuation-dissipation strategy for distributed renewable energy in electro-thermal combined micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 537-546.
- [38] 马腾飞, 吴俊勇, 郝亮亮, 等. 基于能源集线器的微能源网能量流建模及优化运行分析[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 179-186.
- MA Tengfei, WU Junyong, HAO Liangliang, et al. Energy flow modeling and optimization operation analysis of micro energy network based on energy hub[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 179-186.
- [39] DING Jie, XU Yujie, CHEN Haisheng, et al. Value and economic estimation model for grid-scale energy storage in monopoly power markets[J]. Applied Energy, 2019, 240: 986-1002.
- [40] 吕晨旭. 基于储能成本收益评估的小型光储系统实时经济运行方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 144-151.
- LÜ Chenxu. Real-time economic operation method of small optical storage system based on cost-benefit evaluation of energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 144-151.
- [41] 孙威. 能源互联网 储能系统商业运行模式及典型案例分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [42] 修晓青, 李建林, 惠东. 用于电网削峰填谷的储能系统容量配置及经济性评估[J]. 电力建设, 2013, 34(2): 1-5.
- XIU Xiaoqing, LI Jianlin, HUI Dong. Capacity allocation and economic evaluation of energy storage system for peak shaving and valley filling in power grid[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(2): 1-5.
- [43] 向育鹏, 卫志农, 孙国强, 等. 基于全寿命周期成本的配电网蓄电池储能系统的优化配置[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 264-270.
- XIANG Yupeng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Optimal allocation of distribution network battery energy storage system based on life cycle cost[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 264-270.
- [44] 薛金花, 叶季蕾, 陶琼, 等. 采用全寿命周期成本模型的用户侧电池储能经济可行性研究[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2471-2476.
- XUE Jinhua, YE Jile, TAO Qiong, et al. Economic feasibility study of user side battery energy storage using full life cycle cost model[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2471-2476.
- [45] 韩晓娟, 田春光, 张浩, 等. 用于削峰填谷的电池储能系统经济价值评估方法[J]. 太阳能学报, 2014, 35(9): 1634-1638.
- HAN Xiaojuan, TIAN Chunguang, ZHANG Hao, et al. Evaluation method of economic value of battery energy

- storage system for peak filling and valley filling[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2014, 35(9): 1634-1638.
- [46] 颜志敏, 王承民, 衣涛, 等. 储能应用规划和效益评估的研究综述[J]. *华东电力*, 2013, 41(8): 1732-1740.
YAN Zhimin, WANG Chengmin, YI Tao, et al. Review of research on energy storage application planning and benefit assessment[J]. *East China Electric Power*, 2013, 41(8): 1732-1740.
- [47] 王明. 风储联合应用中储能的需求评估方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
WANG Ming. Research on the demand assessment method of storage energy in the combined application of wind storage and storage[D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [48] 黄莹灿, 李梦, 王燕楠, 等. 风电节能减排环境经济效益分析[J]. *中国市场*, 2014(24): 135-139.
HUANG Yingcan, LI Meng, WANG Yannan, et al. Analysis of environmental benefits of energy saving and emission reduction of wind power[J]. *China Market*, 2014(24): 135-139.
- [49] MURRAY P, OREHOUNIG K, GROSSPIETSCH D, et al. A comparison of storage systems in neighbourhood decentralized energy system applications from 2015 to 2050[J]. *Applied Energy*, 2018, 231: 1285-1306.
- [50] 王海燕, 同向前, 路峤. 基于需求侧响应和储能电量预估的微网运行调度策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(19): 86-93.
WANG Haiyan, TONG Xiangqian, LU Qiao. Microgrid operation and dispatching strategy based on demand side response and energy storage capacity prediction[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(19): 86-93.
- [51] 雷琪. 含光伏发电配电网中分层储能的能量管理平台设计及综合评估研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
LEI Qi. Design and comprehensive evaluation of energy management platform for layered energy storage in photovoltaic power distribution network[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [52] XIAN H, RAPHAEL L, ANDREI N, et al. Compressed air energy storage multi-stream value assessment on the French energy market[C] // 2011 IEEE Trondheim Power Tech, June 19-23, 2011, Trondheim, Norway.
- [53] 李蕊. 基于不同商业运营模式的分布式电源/微电网综合效益评价方法[J]. *电网技术*, 2017, 41(6): 1748-1758.
LI Rui. Distributed benefit/microgrid comprehensive benefit evaluation method based on different business operation models[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(6): 1748-1758.
- [54] 田兵, 喻磊, 雷金勇, 等. 工业型用户侧微电网储能运行方式与微电网的运营模式[J]. *南方电网技术*, 2016, 10(8): 48-55.
TIAN Bing, YU Lei, LEI Jinyong, et al. Industrial-type user-side microgrid energy storage operation mode and microgrid operation mode[J]. *Southern Power System Technology*, 2016, 10(8): 48-55.
- [55] 国家发展改革委, 国家能源局, 工业和信息化部. 关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见[J]. *城市燃气*, 2016(4): 4-9.
National Development and Reform Commission, State Energy Bureau, Ministry of Industry and Information Technology. Guidance on promoting the development of "Internet +" smart energy[J]. *Urban Gas*, 2016(4): 4-9.

收稿日期: 2019-04-23; 修回日期: 2019-08-25

作者简介:

寇凌峰(1985—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为分布式发电与微电网规划设计; E-mail: koulingfeng@epri.sgcc.com.cn

张颖(1994—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为分布式发电与配电网运行优化技术; E-mail: zhangying@epri.sgcc.com.cn

季宇(1982—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为微电网优化、电力系统运行与控制技术。E-mail: jiyu@epri.sgcc.com.cn

(编辑 许威)