

面向电力系统应用的储能技术/经济性分析研究

大规模新能源的高比例渗透给电力系统的安全、稳定和经济运行带来了诸多问题。储能技术是支撑新能源大规模开发和高效利用,提高电网安全性和灵活性,改善用电质量等的重要手段。基于储能可发挥的多种作用,提出了储能在电力系统中的两种应用模式。对电力系统中应用各类储能技术现状进行了调研,分析了目前储能规模化应用面临的挑战。重点研究了储能在削峰填谷应用场景下的技术需求、接入方式和配置方法,并根据典型案例中的经济性分析提出了现有市场机制下储能商业化应用所需的补贴政策建议。

叶季蕾 薛金花 陶 琼 王德顺 杨 波/中国电力科学研究院

0 引言

以“清洁替代”和“电能替代”为方向,加快能源结构从化石能源向清洁能源为主的根本改变,表明大规模新能源并网是未来电力系统发展的必然趋势。此外,电网负荷峰谷差随着电力需求的增长不断变大,用电尖峰日趋凸显。以江苏省为例,2015年全省用电日最大峰谷差超过2 000万kW,但占全省最高负荷95%以上尖峰负荷(约400万kW)持续时间仅占全年用电小时数的0.28%~0.86%。因此,电网的调峰需求不断上升是现代电力系统发展的另一个重要特征。近年来,储能技术的研究和应用受到了国内外的重视,在电力系统中的应用发展迅速。电力储能技术为实现电网可持续发展目标、解决电量供需不平衡

矛盾和提高供电可靠性问题提供了有效的解决方案,其应用前景可期。美国、德国和日本先后制定了一系列促进和支持储能技术发展的政策,如德国推出的面向家庭光伏储能系统的补贴新政;美国对储能用户给予的设备税收优惠政策;日本出台的家庭储能系统补助金政策等。在应用需求不断加大的背景下,2015年上半年,全球新增储能装机(不含抽水蓄能和压缩空气储能)容量为507.5 MW,其中投运装机容量为63.7 MW;在建装机容量为47.5 MW;规划装机容量为396.3 MW^[1]。我国政府也十分关注储能技术,将储能技术作为“十三五”能源发展中的重要环节,但目前尚未出台储能补贴政策和价格机制,导致国内的规模化建设动力不足,技术和经济上都需要加大支撑力度。

本文简要归纳了电力系统中储能可发挥的作用,提出了储能在电力系统中的两种应用模式。对电力系统中应用各类储能技术现状进行了调研和分析比较;重点介绍了储能在削峰填谷应用场景下的优化配置方法和运行模式,并根据经济性分析结果提出了现有市场机制下储能产业化发展所需的补贴政策建议。最后,从储能规模化应用面临的挑战和市场前景两方面作出了展望。

1 电力系统中储能技术的作用和需求

建立可持续发展的能源系统,推动以可再生能源和新能源发展为核心的能



叶季蕾/高级工程师

关键词/Keywords

储能·
电力系统·
削峰填谷·
政策·
补贴·

国网公司科技项目“适应全球能源互联网的规模化储能应用关键技术研究”,国网江苏省电力公司科技项目(J2017017),南京工业大学实验室开放基金项目(KL16-12)。

源变革正在进行。在能源变革的背景下，未来电网的重要性日益突出，如何实现大规模新能源的接入、传输和消纳，满足大量分布式能源的灵活接入，优化资源配置、提高能源综合利用效率，达到电网的安全、高效和灵活的运行目标，是当前行业十分关注的问题。

未来电网的发展除了应提升电网本身性能的技术需求，还受到一些其他先进技术的潜在影响。其中储能技术的发展和成熟应用对电网的发展具有重大意义，是影响未来电网发展模式的重要技术之一^[2]。

随着储能项目的建设和示范，在电网中可发挥的作用逐步得到验证，表1列出了一些国内外典型的储能应用示范工程和应用目标。针对目前出现的严重弃风弃光、配电网供电可靠性降低及负荷峰谷差逐渐增大等问题，运用不同时间尺度特性的储能技术，通过充放电的灵活调节，实现不同时间尺度下的功率/能量平衡，在电力系统中的发、输、配及用各个环节发挥具体作用，如图1所示。结合储能形式、技术特性多样化的特征，一旦形成规模化，将为电网的发展提供有力的技术支撑。

表1 国内外典型的储能应用示范工程

序号	项目名称和地点	规模	时间	应用目标
1	辽宁卧牛石风电场储能示范项目	5 MW/10 MW·h全钒液流电池	2013年2月并网	提高风电并网特性
2	Tehachapi风电场储能系统	8 MW/32 MW·h锂离子电池储能	2013年5月运行	提高风电场并网稳定性
3	国家风光储输示范工程	一期70 MW储能电站	一期2013年已投运，二期在建	风光储联合运行，实现跟踪计划、削峰填谷和调频
4	南加州爱迪生公司电网储能示范项目	3 MW/3.4 MW·h	2015年采购	提高配电网稳定性
5	Marengo调频储能电站项目，芝加哥	20 MW/10 MW·h	2016年建设	PJM市场实时调频
6	华电西藏尼玛县可再生能源局域网工程	12 MW·h锂离子电池，36 MW·h铅炭电池	2016年12月实现部分并网	光储柴（油）微网电站
7	亚利桑那科技大学园区内Iron Horse光储项目	10 MW	2017年上半年完工	配合2 MW光伏，提高光伏并网特性
8	山西同达电厂储能AGC调频	9 MW/4.478 MW·h	2017年3月开工建设	电力调频
9	Centria虚拟能源市场	1.08 MW·h液流电池储能系统	2017年建设	与并网光伏系统配合使用，参与多种电网服务
10	圣迭戈配电站液流电池示范项目	2 MW/8 MW·h液流电池储能系统	2017年3月投运	电网调频/调压和剩余电量管理
11	智能装备产业园艾科储能电站	0.75 MW/6 MW·h铅炭电池	一期于2017年3月投运	园区电费管理
12	无锡新加坡产业园	20 MW/160 MW·h铅炭电池	到目前已建9 MW	用户侧峰谷套利



图1 储能在电力系统中的应用示意图

1.1 提高大规模间歇式新能源并网可靠性

以风能、光伏为代表的间歇式新能源发电具有很大的波动性、不确定性，大规模并网将给系统的供电充裕性和安全稳定性带来新问题。此外，大规模风电并网造成电网薄弱地区的电压稳定和频率稳定问题，以及风电机组的低电压穿越能力都严重影响电网的安全运行。

改善间歇式新能源的出力特性，将其变为可控可调的电源，是提高并网可靠性的关键。储能具有快速的有功/无功吞吐能力，能在一定时间尺度上平滑风电、光伏出力的输出，降低风电波动对电网的冲击，改善系统的电压、频率稳定性，维持系统可靠运行。文献[3]提出在风电机组的直流母线上并联飞轮储能装置，可实现抑制风电机组输出功率的波动；文献[4]通过飞轮储能和风电机组的协调控制，在电网故障期间，利用飞轮储能的快速有功调节能力保持风电机组功率变换器的直流母线电压稳定，同时控制风电机组向电网发出一定的无功，帮助电网电压恢复，从而提高风电机组LVRT能力；文献[5]将超导储能用于并网风力发电系统，仿真结果表明，风力发电机的输出电压得到了极大的改善。

1.2 支撑电网安全、稳定和经济运行

电网负荷峰谷差逐步增大、大规模新能源并网导致电网调峰问题日益突出。充足的备用资源是应对各种不确定因素、保证系统可靠运行的基本手段。目前，我国的快速深度调峰资源主要依赖火电机组，但在大范围变负荷运行的情况下导致经济性、安全性和环保性显著下降^[5-7]。大容量储能系统具有快速响应特性，在负荷谷期充电峰期放电，实现发电和用电的时间解耦，既可独立用于调峰，也可与其他电源联合运行满足调峰的需求。通过储能减小负荷峰谷差，延缓甚至避免电网升级改造，同时可有效提升线路和变压器的负载水平，提高现有设备的利用率。

与传统的调频电源相比，储能具有输出功率控制准确度高、具有双倍额定功率的调节能力等技术优势。将储能设备与火电机组联合用于调

频，可以大大提升系统的稳定性，同时提高火电机组运行效率，大大降低排放。

1.3 提高配电网运行主动性和灵活性

大量分布式能源的接入、电动汽车的迅速发展和可控负荷增多都给配电网的协调优化运行带来了极大的挑战，尤其是高渗透分布式光伏电源的接入导致的电压水平升高、短路电流增大、供电可靠性降低及电能质量下降等问题尤其突出^[8-9]，配电网的主动管理和控制能力亟需提升。储能系统的快速功率调节以及兼具供蓄能力，可发挥：①有效抑制分布式能源功率波动，改善配电网供电电压质量，提升网络的电压水平；②削峰填谷，改善负荷特性，有效降低馈线的峰谷差；③通过充放电功率和能量的调节，赋予配电网灵活的功率调节能力，提升系统运行主动性。文献[10]研究了主动配电网中的储能系统优化配置方法，建立了多目标优化模型，采用改进PSO算法进行了求解和验证。结果表明，储能系统的合理分布及灵活控制有利于分布式能源灵活调节以及网络优化运行，从而发挥最大支撑作用。

1.4 改善用电质量，节省用电成本

储能系统安装在社区、家庭及工商业用户侧，可作为不间断电源，在停电时确保重要负荷供电，提高供电可靠性；可参与需求侧响应，根据不同的电价调整用电行为，降低用电成本；用户侧储能设备还可快速响应系统各种扰动，有效维持电压波动范围，提高用户电能质量。文献[11]提出一种基于需求侧响应的家用电池储能系统的调度策略，根据电价及配电网状态的变化，使得用户与配电网运营商的收益最大化，并在英国实际低压配电网中进行了验证。

2 面向电力系统应用的储能技术现状

从广义上看，适用于电力系统应用的储能技术包括物理储能、电化学储能、储氢和储热等。

2.1 物理储能

物理储能主要有抽水蓄能、压缩空气储能和飞轮储能。抽水蓄能是目前最成熟的储能技术，

具有容量大、寿命长和单位成本低的特点。目前世界抽水蓄能机组总装机容量超过1亿kW，日本、美国和中国的装机规模分别为2 627万kW、2 229万kW和2 153万kW^[12]。抽水蓄能电站主要用于电力系统的调峰填谷、调频、调相、紧急事故备用、黑启动和提供系统的备用容量，还可以提高火电站和核电站的运行效率，也能用于提高风能利用率和电网供电质量。但是，抽水蓄能电站的建设受地理条件约束，且建设工期长，总体投资大。

压缩空气储能按规模可分为大型、小型和微型三类。大型压缩空气储能单台机组规模为100 MW级，一般用作削峰填谷和平衡电力负荷，也可用于稳定可再生能源发电；小型压缩空气储能规模10 MW级，突破对储气洞穴的依赖，利用地上高压容器储存压缩空气，更适合城市供电系统，也可用于调节可再生能源电力的供应稳定性；微型压缩空气储能一般在几千瓦到几十千瓦，主要用于特殊领域的备用电源、偏远地区的微电网等。目前，已有两座大型压缩空气储能电站分别在德国Huntorf和美国McIntosh投入商业运行。日本于

2001年在上砂川町投入运行了2 MW的压缩空气储能示范项目^[13]。

飞轮储能具有效率高、响应速度快、建设周期短、占地面积小以及无污染等优点，适用于电网调频和改善电能质量，在电网侧、用户侧和发电侧正日益受到重视。澳大利亚的Coral Bay风电场通过飞轮储能平滑风电场的功率波动，稳定风电输出。飞轮储能能量密度低，自放电严重，只能适合短时间应用场合。

2.2 电化学储能

以钠硫电池、液流电池、锂离子电池和铅酸电池为代表的电化学储能技术发展迅速，在美国、日本和德国，电池储能系统在大规模可再生能源并网、分布式发电与微电网、调峰调频及工商业/居民用户侧等领域相继投运和商业化运行。各类电池储能系统的功率密度、能量密度、效率、寿命和经济成本指标存在很大差异，具体参数如表2所示。任何一种储能技术都不能完全满足所有的应用需求，应发挥不同储能技术的优势，以满足电网的多样化需求。

表2 各类电池储能的技术/成本参数^[14]

电池储能类型	能量密度/(W·h/kg)	功率密度/(W/kg)	效率(%)	寿命/年	成本/(美元/kW·h)
铅酸电池	30~50	75~300	80	3~15	70~420
锂离子电池	75~250	150~315	90	5~15	280~1 400
全钒液流电池	40~130	50~140	65	5~20	140~1 400
锌溴液流电池	60~80	50~150	60	5~15	140~980
钠硫电池	150~240	90~230	75	10~15	140~280

2.3 储氢

以氢气作为载体，通过制氢、储氢、输氢和用氢四个环节来实现对氢能的利用。利用多余的电能电解水是分布式制氢的主要技术，欧洲的Power-to-Gas和氢能示范岛屿项目中利用电解水制氢系统参与可再生能源的利用和消纳。储氢和输氢大多采用高压储罐进行储存和运输，管道输氢项目开展较少，固态储氢技术正在研发。燃料电池是氢能利用的主要方式，质子交换膜燃料电池在电力、热力和交通等领域广泛应用，发挥备用电源、提高可再生能源发电比例等作用。国内

外在氢能的利用上，从成本、效率和寿命等方面提升综合性能，使得利用可再生能源，安全、高效和大规模地利用氢气作为基础能源体系前景可观。

2.4 储热

热能存储指将暂时不需要的多余热力通过某种方式收集并储存起来，在需要时直接或转化成电能使用。热能存储可分为显热存储和潜热存储。显热存储通过使蓄热材料温度升高达到蓄热目的，一般采用水作为蓄热材料；潜热存储是利用蓄热材料发生相变蓄热，在光热发电中得到应

用。太阳能光热发电是一种重要的可再生能源的发电方式,而且有利于电力系统的正常运行。因为它可部分解决太阳能不能连续发电的问题,增加了可控性,对维持具有高渗透率可再生能源发电的智能电网运行有很大意义。

储能技术的大规模应用需从以下几个方面重点突破^[15]。

1) 新型储能材料的开发,大幅度提升能量密度、功率密度、转换效率和循环寿命,同时降低成本。

2) 储能系统的优化设计和管理技术,通过拓扑结构的优化一方面提升储能系统的寿命和充放电性能,另一方面灵活、高效地应对实际应用中的投切操作;采用高准确度的监测和控制技术,实现储能系统的优化运行和状态预测。

3) 不同应用场景中的储能系统规划方法和评估体系,通过储能技术与电网的相互作用机理分析,提出储能的选址定容配置方法;全面建立含储能技术指标和经济指标的评估体系,为储能的选型提供理论参考。

3 储能在电力系统中的应用模式

根据储能配置的功率等级、技术特点和具体的应用场景需求,其应用模式可分为集中式和分布式。

3.1 集中式应用

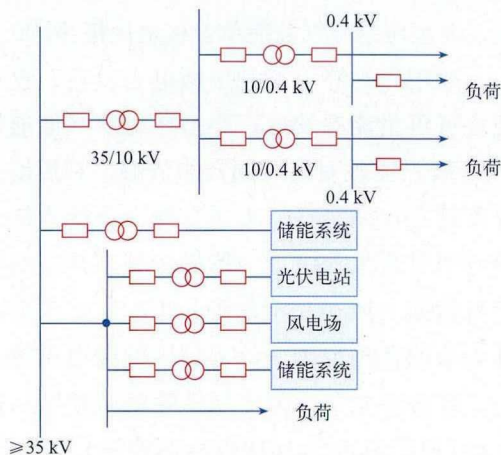
(1) 技术需求

集中式储能系统的功率从数兆瓦到数百兆瓦,持续放电时间为数小时以上,作为储能电站通过35 kV或110 kV母线接入,用于系统调峰调频,或与大型光伏电站或风电场配合使用,提高电网对新能源的接纳能力。集中式储能系统以大功率、长时间的供电场合为对象,一般为能量型储能系统。集中式储能主要有抽水蓄能、压缩空气储能等。

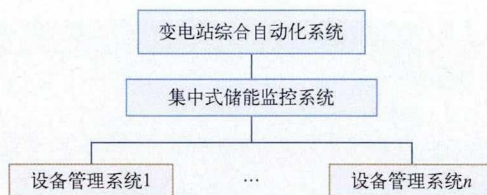
(2) 接入拓扑

图2给出了集中式储能系统接入电网的一次、二次拓扑。集中式储能系统可通过多组升压变压

器直接接入35 kV或以上电压等级母线,既能在大型新能源发电侧接入,也能独立接入,应综合考虑安装点的线路和变压器的容量。集中式储能系统的二次拓扑结构较简单,如图2b所示。变电站综合自动化系统根据电网的运行状态和实时需求向集中式储能监控系统下发功率需求指令;集中式储能监控系统接收指令后,根据所有储能系统设备上传的实时状态信息进行分配,向各个储能控制系统直接下发遥控信号。



(a) 集中式储能系统接入一次拓扑



(b) 集中式储能系统接入二次拓扑

图2 集中式储能系统接入一次、二次拓扑

(3) 主要功能

集中式储能系统可在大规模新能源电站和输电领域应用,可有效减少新能源发电输入电网引起的不稳定或实现可再生能源的电量转移、固化输出,也可用于电网削峰填谷、调频和事故备用等。根据其应用场合,应具备功率控制、黑启动、通信和保护功能。

3.2 分布式应用

(1) 技术需求

分布式储能系统的功率从几千瓦至几兆瓦不

等, 储能容量一般小于10 MW·h, 多接入中低压配电网或用户侧^[16]。分布式储能系统可以为功率型、能量型或复合型储能系统。前者适用于短时间对功率需求较高的场合, 如改善电能质量、提供功率支撑; 后者适合对能量需求较高的场合, 需要储能设备提供较长时间的电能支撑。分布式储能以电化学储能为代表, 如各类电池储能系统, 还包括飞轮储能、超级电容储能等。

(2) 接入拓扑

图3给出了分布式储能系统接入配电网的一次、二次拓扑。从图3中可以看到, 分布式储能系统可在10 kV或380 V接入, 既能和分布式电源相结合并联接入, 也能独立接入低压配电网。分布式储能系统的二次拓扑可分成两层结构, 即储能就地监控系统和综合调度系统。就地储能监控系统采集储能设备端遥测量、遥信量等重要信息, 同时与馈线终端系统进行信息交互; 储能综合调度系统接收电网的功率调度指令, 对一定区域内的各分布式储能系统进行集中监视、控制和管理, 同

时与变电站综合自动化系统交互信息, 通过优化分析后向就地储能监控系统下发遥控命令。

(3) 主要功能

分布式储能系统可在配用电系统中的各个环节应用, 能够有效提高系统的运行可靠性, 改善系统的电能质量, 提高配电网中可再生能源的接入能力, 增加电网和用户经济效益, 为智能配电网的发展提供有力支撑。与大规模、集中式的储能电站相比, 分布式储能系统对接入位置的环境、自然条件限制较少, 接入电网的方式更加灵活, 在配电网、微电网、分布式电源侧以及用户侧都可以发挥独特的作用。根据其应用场合, 应具备功率控制、有功/无功调度、黑启动、通信和保护功能。

4 削峰填谷场景中的储能应用技术及效益分析

4.1 用于削峰填谷的储能技术特性

用于削峰填谷的储能系统可接入不同电压等级, 有400 V用户侧、10 kV低压侧和35 kV中压侧。用户侧削峰填谷的储能系统功率等级约为数十至数百千瓦, 可持续放电时间为2~6 h; 低压电网中削峰填谷的储能系统, 功率等级约为1 MW, 可持续放电时间为2~6 h; 用于中压电网中削峰填谷的储能系统, 功率等级约为数兆瓦, 可持续放电时间为2~6 h, 存储时间可根据区域负荷的峰谷持续时间而定。

4.2 配置方法

在削峰填谷应用场景中, 储能的功率/容量配置应结合负荷峰谷差调节目标、峰谷电价时间段进行优化。首先根据典型日负荷定义日最大负荷峰谷差为 ΔP_L , 即日最大用电负荷 $P_{L,max}$ 与同日最小用电负荷 $P_{L,min}$ 之差, 即

$$\Delta P_L = P_{L,max} - P_{L,min} \quad (1)$$

根据所设置的峰谷差调节目标, 获取储能电池的放电起动功率 P_{max} 及充电起动功率 P_{min} , 如图4所示。当负荷高于放电起动功率时, 储能电池运行于放电状态; 当负荷低于充电起动功率时, 储

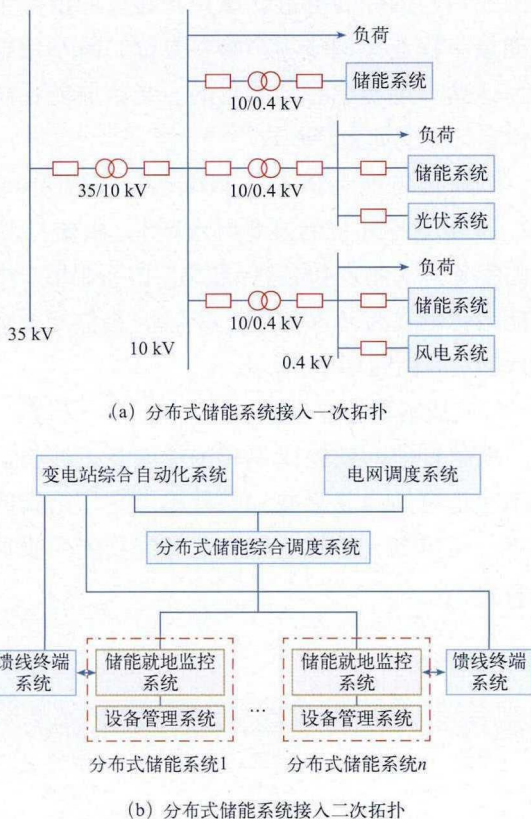


图3 分布式储能系统接入一次、二次拓扑

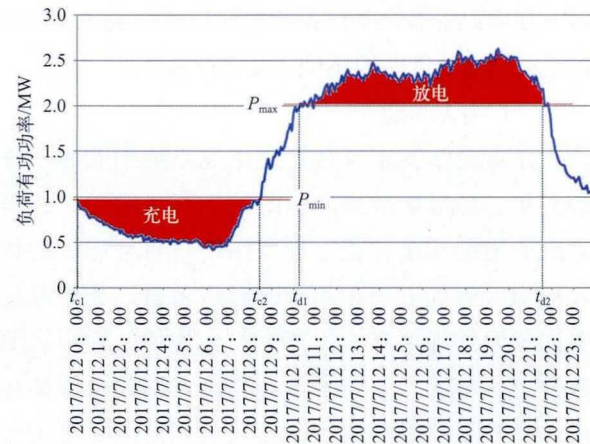


图4 削峰填谷下储能配置方法示意图

能电池运行于充电状态，从而起到移峰填谷，减小负荷峰谷差的作用。设储能充电功率为负，放电功率为正，可通过式（2）获取储能系统在一天内的充放电功率曲线

$$P_{ES} = \begin{cases} P_L - P_{\min} & P_L < P_{\min} \\ 0 & P_{\min} < P_L < P_{\max} \\ P_L - P_{\max} & P_L > P_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

式中， P_L 为负荷功率； $P_{\max}$ 为放电起动功率； $P_{\min}$ 为充电起动功率。

储能电池配置的容量应保证日充放电次数为一次，所配置的储能容量与负荷之间存在如下关系，即

$$\begin{cases} \frac{1}{\eta_d} \int_{t_{d1}}^{t_{d2}} (P_L - P_{\max}) dt + \eta_c \int_{t_{c1}}^{t_{c2}} (P_L - P_{\min}) dt = 0 \\ P_{ES} = \max(P_L - P_{\max}, P_{\min} - P_L) \\ E_{ES} = \frac{1}{\eta_d} \int_{t_{d1}}^{t_{d2}} (P_L - P_{\max}) dt = \eta_c \int_{t_{c1}}^{t_{c2}} (P_L - P_{\min}) dt \\ P_{L,\max} \geq P_{\max} \geq P_{\min} \geq P_{L,\min} \end{cases} \quad (3)$$

式中， P_{ES} 为储能系统额定功率； E_{ES} 为储能系统配置容量； η_d 为储能系统放电效率； η_c 为储能系统充电效率； $P_{L,\max}$ 为负荷峰值； $P_{L,\min}$ 为负荷谷值。

为保证储能功率不倒送，保证储能放电启动

功率大于储能充电启动功率。

4.3 案例分析

（1）大工业用户储能系统的配置

以江苏省一大工业用户为例，该用户负荷在10 kV电压等级接入，变压器容量为1 000 kV·A，工厂实行三班次制，且安装有100 kW的分布式光伏，实行自发自用、余电上网的运行模式。用户的典型日负荷和光伏发电特性曲线如图5所示。

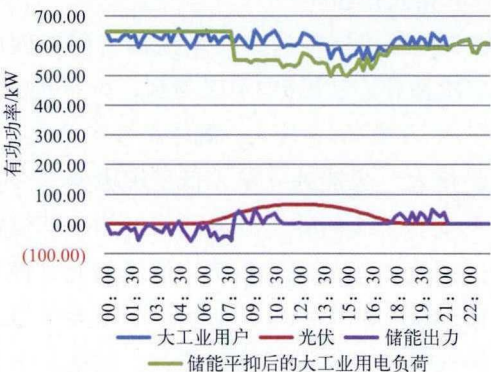


图5 储能平抑前后的负荷特性曲线

考虑上述负荷特性、光伏出力特点和江苏大工业用户的峰谷电价，该用户建设的储能系统应能最大程度地调节用户峰谷电价，减小用电成本，达到“削峰填谷”的目的。光伏储能系统的具体运行模式如表3所示。

以铁锂电池为例，其SOC运行范围为0.1～0.9，充电效率和放电效率均为90%，根据4.2中储能的配置方法和表4的运行方式，该工业用户中的储能最优配置为50 kW/200 kW·h，经储能削峰填谷后的负荷曲线如图5所示。

（2）成本和效益分析

根据目前的铁锂成本和削峰填谷下的收益，在不考虑电池容量衰减和贴现率等市场因素的调节下，可得到无补贴政策下的储能投资回收期，如表4所示。

表3 大工业用户光伏储能系统运行模式

时段	0：00～8：00	8：00～12：00	12：00～17：00	17：00～21：00	21：00～24：00
电价	谷电价	峰电价	平电价	峰电价	平电价
光伏运行方式	不发电	光伏发电<负载用电	光伏发电<负载用电	不发电	不发电
储能运行方式	充电	放电	待机	放电	待机

表4 大工业用户储能系统投资回收分析表

储能成本	储能收益	投资回收期
2 500元/kW·h × 200 kW·h = 50万元	0.78元/kW·h × 200 kW·h/天 × (0.9 - 0.1) × 365天/年 = 45 550元/年	11年

(3) 补贴建议

从上述现象分析，在该应用场合中大规模推广储能，还需相关的配套政策和补贴机制。参考美国、日本和德国发展光储系统的有关经验，建

议从投资成本、运行成本和需求响应补贴等多项措施上给予补贴，从而确保储能系统在寿命周期内收回成本，以5年为寿命周期，应给予的保障措

表5 特定应用下储能的补贴方法建议

铁锂电池储能成本	年节省用电成本	假设年需求响应奖励	年储能补贴需求	回收年限	单位功率补贴需求	单位能量补贴需求
/元	/元	/元	/元	/年	/(元/kW·年)	/(元/kW·h·年)
50万	45 550	1 000	53 450	5	1 069	267

考虑储能可纳入需求响应补贴范围，以每年可参与两次、每次奖励10元/kW计算，50 kW/200 kW·h的工业用户储能系统可获取的需求响应奖励为1 000元，假定储能能在5年内回收成本，需给予的补贴按功率计算为1 069元/kW·年，按能量计算为267元/kW·h·年。补贴方式可分为建设成本补贴、运行成本补贴或二者按比例补贴，可对不同补贴方式进行效果和风险评估。

可以看出，目前能够明确实现储能的盈利模式仍以削峰填谷为主，但由于成本、寿命的局限，现阶段仍需一定的政策和补贴支持。上述计算分析表明，对于大工业用户侧储能，可通过国家补贴建设成本、运行成本以及地方调整需求响应奖励结合的方式共同推进储能初期的发展。

5 储能规模化应用面临的挑战

作为推动智能电网建设的重要支撑技术环节之一，储能技术在可再生能源、微电网、智能配电和智能住宅等应用市场前景十分广阔。文献[17]通过对2050年发展情景的生产模拟，预期了不考虑全国区域间的联网约束下，储能容量需求将达5.6~7.8亿kW，电量需求达20~30亿kW·h。但储能的规模化应用仍然面临着技术和经济方面的严峻挑战。

5.1 技术方面

首先，应以储能自身的技术创新与突破为引

领，极大程度地提升各种储能技术的性能指标，开发大容量、长寿命、低成本及高安全新型化学储能技术和高效率、低成本物理储能技术；其次，重点研究储能在各种应用场景中的建模仿真和优化运行技术，为储能的示范应用做好理论支撑；然后通过多个项目试点开展示范应用和综合评估工作，以推进储能技术的产业化进程。与此同时，应重点开展电力储能标准体系研究，建立一套专业完整、严谨衔接、合理分级、透明开放和有序适用的电力储能标准体系，为我国电力储能研发、生产和应用提供坚强的标准支撑，进而推动电力储能技术及相关产业的发展。

5.2 经济性方面

现阶段，我国储能产业仍然面临政策缺失、成本过高、应用价值不明晰及参与电力市场的机制不健全等问题，在经济上也没有优势。未来应从两个方面着手考虑：一方面，需要提出包含用电主体、电力企业、科研人员、金融组织和社会组织多种社会力量参与的储能系统解决方案；另一方面，未来应制定明确的推动储能产业的市场机制和补贴政策，鼓励各种储能技术的研发和应用，建立可持续发展模式，实现商业化运营。

6 结束语

储能技术将在未来电力系统的各个环节发挥作用，能够为电力系统的安全、稳定和经济运行

提供更好的支撑,具有广阔的应用前景和应用价值。但储能技术的发展和推广应用除了应提升自身的性能指标、运行控制和管理技术外,仍然需要不同层面给予长期、积极、稳健的市场和政策支持,主要包括:积极保障可再生能源发展的目标,纳入电力系统整体规划,完善电价/补贴/税收等政策机制等,从而引导和扶持储能产业的健康发展。

参考文献

- [1] 储能产业研究白皮书2015 [R]. 中关村储能产业联盟, 2015.
- [2] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34 (29): 4999-5007.
- [3] Cimuca G O, Saudemont C, Robyns B, et al. Control and performance evaluation of a flywheel energy storage system associated to a variable-speed wind generator [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53 (4): 1074-1085.
- [4] 姚骏, 陈西寅, 夏先锋, 等. 含飞轮储能单元的永磁直驱风电系统低电压穿越控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (13): 38-44.
- [5] 陈星莺, 刘孟觉, 单渊达. 超导储能单元在并网型风力发电系统的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (12): 63-66.
- [6] 刘吉臻. 大规模新能源电力安全高效利用基础问题 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (16): 1-8.
- [7] 余欣梅, 熊信良, 吴耀武, 等. 电力系统调峰电源规划优化模型探讨及其应用 [J]. 中国电力, 2003, 36 (1): 48-51.
- [8] 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.
- [9] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (2): 10-14.
- [10] 尤毅, 刘东, 钟清, 等. 主动配电网储能系统的多目标优化配置 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38 (18): 46-52.
- [11] Zhimin Wang, Chenghong Gu, Furong Li, et al. Active demand response using shared energy storage for household energy management [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4 (4): 1888-1897.
- [12] 刘振亚. 全球能源互联网 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [13] 张新敬. 压缩空气储能系统若干问题的研究 [D]. 北京: 中国科学院热物理工程研究所, 2011.
- [14] Electrical Energy Storage White Paper [R]. IEC, 2011.
- [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.
- [16] 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): 1-9.
- [17] 白建华, 辛颂旭, 刘俊, 等. 中国实现高比例可再生能源发展路径研究 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35 (14): 3699-3705.

(收稿日期: 2017-04-06) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告