

用于缓解电网调峰压力的储能系统规划方法综述

徐国栋¹,程浩忠¹,马紫峰²,范松丽¹,方斯頓¹,马则良³

(1. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院,上海 200240;2. 上海交通大学 化学化工学院,上海 200240;
3. 国家电网公司华东分部,上海 200120)

摘要: 随着风电、光伏渗透率逐渐增大,风电、光伏给电网运行带来了诸多挑战,其中调峰问题尤为突出。在能源互联网的推动下,利用储能系统缓解电网调峰压力正受到越来越多的关注。首先总结了适用于电网调峰的大容量储能技术的研究现状,随后以储能系统接入电网方式为切入点,分别对集中式与分布式接入方式的储能系统规划方法进行研究和归纳,然后评述了规划模型的求解算法。最后,探讨了未来待研究的关键科学问题。

关键词: 大容量储能技术;集中式接入;分布式接入;调峰;规划方法;储能

中图分类号: TM 715

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.08.001

0 引言

在能源危机与环境污染的双重压力下,以风电、光伏为代表的可再生能源快速发展。随着风电、光伏渗透率逐渐增大,风电、光伏在为电网输送大量清洁电能的同时,给电网运行带来了诸多挑战,其中调峰问题尤为突出^[1-2]。这一方面是由于风电、光伏出力的不确定性导致电网备用需求增加;另一方面在于风电出力的反调峰特性以及光伏出力与高峰负荷的不匹配性,导致电网净负荷峰谷差增大。电网调峰压力增大,不仅降低了电网运行的经济性,也降低了电力设备的利用率,造成了极大的社会资源浪费。因此,研究缓解电网调峰压力的方法具有重要的现实意义。

目前,缓解电网调峰压力的方法主要有燃气和水电等调峰电源建设、燃煤机组灵活性改造及储能系统建设等^[3]。在能源互联网的推动下,以大规模电池储能为代表的新型储能技术得以快速发展,利用储能系统缓解电网调峰压力正受到越来越多的关注。现阶段,适用于电网调峰的大容量储能技术主要包括抽水蓄能、压缩空气储能及电池储能^[4]。

储能系统接入电网的方式包括集中式与分布式接入 2 种:集中式接入是指储能系统以电站的形式接入输电网,参与大规模能源生产和输送的协调调度,适宜的储能技术主要包括抽水蓄能、压缩空气储能及电池储能(多在 10 MW 及以上),例如天荒坪抽水蓄能电站、张北风光储输示范项目等;分布式接入是指储能系统接入配电网,仅对本地的能源生产与消耗进行优化,适宜的储能技术主要包括电池储能(多在 10 MW 以下),例如深圳宝清储能电站、浙江鹿西

岛微电网示范项目等。2 种接入方式下,因调度运行范围、市场模式等因素的差异,储能系统规划方法存在显著不同。

鉴于此,本文首先总结适用于电网调峰的大容量储能技术的研究现状,随后以储能系统接入电网方式为切入点,分别对集中式与分布式接入方式的储能系统规划方法进行研究和归纳,指出目前研究的优势和不足,然后评述规划模型的求解算法。最后,探讨未来待研究的关键科学问题。

1 大容量储能技术

现阶段,适用于电网调峰的大容量储能技术主要包括抽水蓄能、压缩空气储能及电池储能,现分别介绍如下。

1.1 抽水蓄能

抽水蓄能利用电能把下水库的水抽至上水库,以势能的形式存储,需要时再从上水库放水至下水库进行发电。由于水资源极易蒸发、泵水耗费功率高等因素,其能量转换效率仅在 75% 左右。截至 2016 年,全球抽水蓄能装机容量为 183.3 GW,占全球总装机容量的比例约为 3%^[5];我国抽水蓄能装机容量为 26.69 GW,占全国总装机容量的比例为 1.6%^[6]。

按水流情况,抽水蓄能可分为 3 类:

a. 纯抽水蓄能, 上水库没有天然径流来源,抽水与发电的水量循环使用,两者水量相等,仅需补充蒸发和渗漏损失;

b. 混合式抽水蓄能, 上水库有天然径流来源,既可利用天然径流发电,又可利用由下水库抽蓄的水量发电;

c. 调水式抽水蓄能, 从位于一条河流的下水库抽水至上水库,再由上水库向另一条河流的下水库放水发电,其可将水量从前一条河流调至后一条河流。

抽水蓄能正逐渐向大容量、高环境适应性发展。

收稿日期:2017-04-09;修回日期:2017-07-10

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2014CB239703)

Project supported by the National Basic Research Program of China(973 Program)(2014CB239703)

目前,美国已建立了世界上装机容量最大的抽水蓄能电站,装机容量高达 3 003 MW^[7]。除此之外,抽水蓄能水库逐渐向淹没矿井、地下洞穴及海洋发展。美国、日本等国正积极推进海水抽水蓄能技术,日本已拥有世界上唯一商业化运行的海水抽水蓄能电站^[8-9]。

1.2 压缩空气储能

压缩空气储能利用电能驱动压缩机压缩空气,将电能转化为机械能,最后转化为空气的内能存储。在需要时,释放空气的内能,使其转化为电能。由于存在较多的辅助设备,例如压缩机、膨胀机等,其能量转换效率较低,仅在 60% 左右。目前,全球已有 2 座大规模压缩空气储能电站投入商业运行,分别为德国 Huntorf 电站(压缩功率为 60 MW,发电功率为 290 MW)和美国 McIntosh 电站(压缩功率为 50 MW,发电功率为 110 MW)^[10]。我国对压缩空气储能的研究开始得较晚,大多集中在理论和小型实验层面。中国科学院理化技术研究所、清华大学及中国电力科学研究院等单位于 2014 年成功研制了“500 kW 非补燃压缩空气储能发电示范系统”^[11]。

根据压缩空气储能存储容量的不同,其可分为 3 类:

- a. 大型压缩空气储能,单机容量为 100 MW;
- b. 小型压缩空气储能,单机容量为 10 MW;
- c. 微型压缩空气储能,单机容量为 10 kW。

根据压缩空气储能绝热方式的差异,其可分为 2 类:

- a. 非绝热压缩空气储能,典型代表为德国 Huntorf 电站、美国 McIntosh 电站;
- b. 带绝热压缩空气储能^[12]。

压缩空气储能正逐渐向高环境适应性及不使用燃料、无尾气排放等方面发展。日本、意大利等国正探索将废弃矿井的混凝土坑道、多孔岩石洞穴作为压缩空气储能的存储容器^[13-14]。除此之外,带绝热压缩空气储能是一种实现不使用燃料、无尾气排放的重要技术。但在绝热环境下,如何收集以及存储热量

是一个重大课题。

1.3 电池储能

电池储能由众多电化学单元经串并联构成,每个电化学单元均包含正极、负极及电解液,各单元通过正负极的氧化还原反应充放电,实现电能和化学能的相互转化。目前,电池储能投资成本高昂,仍无法实现商业化应用,但世界各国兴建了众多储能示范项目,以促进其发展。根据美国能源部信息中心项目库的不完全统计,截至 2016 年,全球已宣布、在建及运行的电池储能示范项目有 842 项,装机规模达 2 300 MW。美国示范项目的数量、装机规模分别为 394 项、706.9 MW,均处于世界领先地位;中国的示范项目数量、装机规模分别为 62 项、264.4 MW,分别处于世界第 2、3 位^[5]。

电池储能种类繁多,主要包括铅酸电池储能、锂电池储能、钠硫电池储能及液流电池储能。上述电池储能的典型特性指标如表 1 所示^[15-16],典型示范项目如表 2 所示^[16-19]。

电池储能的发展趋势为:铅酸电池储能,采用新型材料提高循环次数、深度放电能力等;锂电池储能,采用新型材料降低成本、减小防过热保护电路复杂性等;钠硫电池储能,减小或消除高温运行限制等;液流电池储能,研究高渗透性及耐久性隔膜,低成本、高效与可靠电极等。

2 集中式接入方式下的储能系统规划方法

集中式接入方式下,储能系统可以提供备用,减小输电堵塞,实现“削峰填谷”,进行广域能量管理,提高系统运行经济性。

不同的研究侧重于从不同的方面进行规划,所以目标函数各异。文献[20-25]以规划期内系统运行成本与储能投资总成本最小为目标,如式(1)所示。

$$\begin{aligned} \min C_{e,tot} &= C_{e,sys} + C_{b,inv} + C_{b,om} + C_{b,rep} \\ C_{e,sys} &= C_{e,fu} + C_{e,ud} + C_{e,om} + C_{e,cw} + C_{e,cp} + \cdots \end{aligned}$$

(1)

其中, $C_{e,tot}$ 为集中式接入方式下规划期内系统运行

表 1 电池储能的典型特性指标

Table 1 Typical characteristic parameters of battery energy storage systems

电池储能	额定功率/MW	功率密度/(W·kg ⁻¹)	能量密度/(W·h·kg ⁻¹)	循环次数	服役寿命/a	自放电率/(%·月 ⁻¹)	循环效率/%
铅酸电池储能	0~40	75~300	25~50	200~1 800	3~10	4~50	70~80
锂电池储能	0~50	150~2 000	75~200	1 000~10 000	5~15	<2	90~97
钠硫电池储能	0~35	90~230	130~150	2 500~4 000	10~15	0	75~90
液流电池储能	0~50	50~170	10~40	>12 000	5~10	0	75~85

表 2 电池储能的典型示范项目

Table 2 Typical demonstration projects of battery energy storage systems

电池储能	国际示范项目	国内示范项目
铅酸电池储能	美国加州 Chino 项目(10 MW/40 MW·h)	浙江鹿西岛微电网示范项目(2 MW/4 MW·h)
锂电池储能	日本仙台变电站项目(40 MW/20 MW·h)	河北张北风光储输示范一期项目(14 MW/63 MW·h)
钠硫电池储能	德国 Graciosa Island 项目(3 MW/18 MW·h)	上海崇明智能电网综合示范项目(0.2 MW/1 MW·h)
液流电池储能	美国犹他太平洋电力公司项目(0.25 MW/2 MW·h)	辽宁卧牛石风电场项目(5 MW/10 MW·h)

成本与储能投资总成本; $C_{c,sys}$ 为系统运行成本; $C_{b,inv}$ 、 $C_{b,om}$ 、 $C_{b,rep}$ 分别为储能投资成本、运行维护成本、替换成本; $C_{c,fu}$ 、 $C_{c,ud}$ 分别为机组燃料成本、启停成本,机组类型主要包括燃煤、燃油及燃气机组; $C_{c,om}$ 为机组运行维护成本,机组类型主要包括燃煤、燃油、燃气、水电、核电、风电及光伏机组等; $C_{c,cw}$ 、 $C_{c,cp}$ 分别为弃风、弃光惩罚成本。

文献[20-25]的研究均基于机组组合模型,以期准确模拟系统运行,提高储能规划方案的合理性。文献[20]构建了考虑安全约束的机组组合模型,采用先确定负荷高峰与低谷时段机组开机状态,再确定机组出力计划的两阶段方法求解,通过对储能离散容量进行仿真分析,最终确定储能最优配置容量。文献[21]建立了储能选址定容双层规划模型,外层模型以规划期内系统运行成本与储能投资总成本最小为目标,内层模型以典型日系统运行成本最小为目标;基于对偶理论,将双层规划模型转化为线性混合整数规划模型,选用 CPLEX 求解。文献[22]同样建立了储能选址定容双层规划模型,但外层模型额外计及了系统网络损耗成本,内层模型仍以典型日系统运行成本最小为目标;然后,提出一种数值优化算法进行求解,外层模型采用遗传算法求解,内层模型使用 CPLEX 求解。文献[23]构建了考虑机组燃料成本、启停成本、环境成本及运行维护成本的机组组合模型,并以蒙西电网为例,针对抽水蓄能与电热锅炉的离散容量进行仿真分析,确定不同抽水蓄能容量下的电热锅炉最优配置容量。文献[20-23]均基于确定性的风电历史数据,忽略了风电出力不确定性对储能效益评价的影响,存在效益评价风险。鉴于此,文献[24]提出了储能两阶段鲁棒规划模型,该模型以包含机组燃料成本、储能投资成本、弃风惩罚成本及切负荷惩罚成本的综合成本最小为目标,采用列生成算法求解。文献[25]构建了储能随机规划方法。该方法采用场景树模型模拟风电出力的随机性,建立了不同典型日下系统期望运行成本的平均值最小模型,选取 Benders 分解算法进行求解。

文献[26-30]以规划期内储能净收益最大为目标,如式(2)所示。

$$\begin{aligned} \max R_{c,b} &= E_{c,b} - C_{b,inv} - C_{b,om} - C_{b,rep} \\ E_{c,b} &= B_{c,ta} + B_{c,au} + B_{c,rw} + B_{c,rp} + \dots \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $R_{c,b}$ 为集中式接入方式下规划期内储能净收益; $E_{c,b}$ 为储能收益; $B_{c,ta}$ 、 $B_{c,au}$ 、 $B_{c,rw}$ 、 $B_{c,rp}$ 分别为储能分时电价收益、辅助服务收益、弃风减小收益及弃光减小收益。

文献[26-30]研究的重点在于分析与量化储能收益。文献[26]考虑了储能分时电价收益、弃风减小

收益及环境收益,建立了净收益最大优化模型,分析了储能单位投资成本、寿命对其最优配置容量的影响。文献[27]在考虑储能分时电价收益、弃风减小收益及二氧化碳排放减小收益的情况下,将储能净收益表示为储能额定功率的一元函数,并根据最优性条件,确定储能最优配置功率、容量。文献[28]计及了储能分时电价收益、弃风减小收益及环境收益,建立了通过置信度量化评价风险的储能综合效益评估模型,采用混合智能算法求解,可给出不同置信度下储能最优配置功率、容量。文献[29]在考虑储能分时电价收益、弃风减小收益的基础上,进一步计及了机组燃料成本减小收益,针对储能离散容量,采用 CPLEX 求解。文献[26-29]均只考虑了因电网向下调峰容量不足产生的弃风,未计及因线路传输容量限制引发的弃风,影响了弃风减小收益的准确性。鉴于此,文献[30]提出了综合考虑电网向下调峰容量不足及线路传输容量限制影响的储能选址定容双层规划模型,采用改进帝国竞争算法求解。

除此之外,有的文献以储能配置功率最小为目标^[31-32]、以风能利用率最大为目标^[33]等。文献[31]针对风电、负荷出力的不确定性,建立了以储能配置功率最小为目标,包含正、负旋转备用机会约束的储能规划模型,基于 p-有效点理论解析求解机会约束,确定储能最优配置功率。文献[32]将风电功率的随机性定量描述为出力均值和波动上下限,建立了考虑线路传输容量约束的储能鲁棒规划模型,采用鲁棒线性优化方法求解,获取满足风电功率全部接纳要求的储能最小配置功率及最优布点方案。文献[33]建立了储能双层规划模型,外层模型以风能利用率最大为目标,内层模型以各时段社会成本期望值最小为目标;然后,提出了一种数值优化算法进行求解,外层模型采用遗传算法求解,内层模型利用概率最优潮流求解。

以上文献的约束条件主要包括:功率平衡约束,常规机组出力、爬坡速率约束,储能充放电功率、电量约束,风电、光伏出力约束等。而求解算法各异:文献[20,23,29]采用枚举法对储能待选方案进行仿真分析,文献[22,28,30,33]采用智能优化算法进行模型求解,文献[21,24-25,27,31-32]采用数学优化算法进行模型求解。

目前的研究中,储能投资主体多为电网公司或者风电光伏运营商。实际上,储能参与调峰后,其产生的效益是多方面的。在此背景下,量化各方(常规机组运营商、风电光伏运营商、电网公司等)获得的收益,探索储能投资主体多元化及投资成本分摊机制,是储能投资成本高昂背景下,促进其发展的有益尝试。其中,建立包含静态、暂态等多方面收益的储能

综合效益评价体系是上述研究的基础。

3 分布式接入方式下的储能系统规划方法

分布式接入方式下,储能多采用选址不受限的电池储能,其主要用于减小配电网运行成本、促进风电光伏消纳及延缓电网升级改造等。

与集中式接入方式类似,分布式接入方式下储能规划目标也主要包括 2 类,分别为系统运行成本与储能投资总成本最小、储能净收益最大。但是,2 种接入方式下储能的成本、收益构成存在一定差异。

文献[34-40]以规划期内系统运行成本与储能投资成本最小为目标,如式(3)所示。

$$\begin{aligned} \min C_{d,tot} &= C_{d,sys} + C_{b,inv} + C_{b,om} + C_{b,rep} \\ C_{d,sys} &= C_{d,fu} + C_{d,ul} + C_{d,om} + C_{d,rel} + C_{d,rei} + \dots \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $C_{d,tot}$ 为分布式接入方式下规划期内系统运行成本与储能投资总成本; $C_{d,sys}$ 为系统运行成本; $C_{d,fu}$ 、 $C_{d,ul}$ 分别为可控型分布式电源的燃料成本、启停成本,电源类型主要包括柴油发电机、微型燃气轮机及燃料电池等; $C_{d,om}$ 为分布式电源的运行维护成本,电源类型除了上述可控型分布式电源外,还包括风电、光伏等不可控型分布式电源; $C_{d,rel}$ 、 $C_{d,rei}$ 分别为可靠性成本、电网升级改造成本。

文献[34]提出了可实现分布式电源所有者及配电网公司收益最大化的储能选址定容规划方法。该方法首先确定年弃风功率序列,然后以最大弃风功率作为储能额定功率、日内最大弃风量作为储能额定容量,随后构建了以配电网公司年购电成本最小为目标的储能选址定容规划模型,其中分布式储能的功率、容量分别等于第二步确定的储能额定功率、容量。文献[35]提出了缓解电价波动运行风险的储能运行策略,随后构建了以配电网公司年综合成本最小为目标的储能容量规划模型,采用模糊粒子群优化算法求解。然而,文献[34-35]均未考虑风电、负荷出力的不确定性,影响了储能规划方案的合理性。文献[36]建立了储能随机规划模型。该模型以储能日投资成本、日运行维护成本及配电网日期望运行成本之和最小为目标,采用机会约束保证风能利用率,通过嵌套蒙特卡洛模拟的差分进化算法求解。文献[37]提出了以规划期内储能投资成本、运行维护成本、替换成本与配电网购电成本、可靠性成本之和最小为目标的储能选址定容规划模型,通过概率潮流计及风电、负荷出力的不确定性,综合采用粒子群优化算法与禁忌搜索算法求解。文献[38]建立了以规划期内储能投资成本、运行维护成本及配电网虚拟期望运行成本之和最小为目标的储能选址定容规划模型,并基于配电网辐射状运行特性,将交流最优潮流问题转化为混合整数二阶锥规划问题

求解。需注意的是,文献[34-38]均基于风电、光伏及负荷时序模型求解储能规划方案,而文献[39-40]提出了基于非时序风电、负荷概率模型的储能规划方法,开拓了求解思路。文献[39]通过风电、负荷离散状态及其概率表征两者的不确定性,构建了规划期内储能投资成本、运行维护成本、替换成本、网络损耗成本及电网升级改造成本之和的最小模型,采用遗传算法求解。文献[40]在文献[39]的基础上,进一步量化了可靠性成本,采用遗传算法求解。

文献[41-45]以规划期内储能净收益最大为目标,如式(4)所示。

$$\begin{aligned} \max R_{d,b} &= E_{d,b} - C_{b,inv} - C_{b,om} - C_{b,rep} \\ E_{d,b} &= B_{d,ta} + B_{d,sl} + B_{d,rel} + B_{d,del} + \dots \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $R_{d,b}$ 为分布式接入方式下规划期内储能净收益; $E_{d,b}$ 为储能收益; $B_{d,ta}$ 、 $B_{d,sl}$ 、 $B_{d,rel}$ 、 $B_{d,del}$ 分别为储能分时电价收益、网络损耗成本减小收益、可靠性收益及延缓电网升级改造收益。

文献[41]在考虑燃气轮机成本减小收益、负荷转移收益、有载调压变压器及阶跃电压调整器运行成本减小收益的情况下,构建了储能净收益最大模型,采用枚举法确定储能最优配置容量。文献[42]构建了考虑储能分时电价收益、网络损耗成本减小收益、备用收益、可靠性收益、延缓电网升级改造收益的价值评估模型,采用结合混合罚函数的粒子群优化算法求解。文献[43]考虑了储能分时电价收益、政府补贴收益、电能转换费用收益及延缓电网升级改造收益,建立了储能寿命周期内净收益最大模型,综合采用差分进化算法和内点法求解。文献[44]首先推导得出了延缓电网升级改造收益的近似表达式,随后构建了进一步考虑储能分时电价收益、投资成本的净收益最大模型,采用 CPLEX 求解。然而,文献[42-44]均无法计及储能配置节点对延缓电网升级改造收益的影响。鉴于此,文献[45]采用规划仿真软件 RNMs,计算包含与不包含储能 2 种场景的配电网扩展规划成本,将两者之差作为储能延缓电网升级改造收益,并构建了进一步考虑储能分时电价收益、投资成本的成本效益分析模型,分析了不同容量储能在城市配电网、乡村配电网及城乡配电网的盈亏平衡成本。

除此之外,有的文献以配电网公司净收益最大为目标^[46]、以储能投资成本最小为目标^[47]、以微电网总成本最小为目标^[48]及多个目标联合优化^[49]等。文献[46]提出了储能双层规划模型,外层模型以配电网公司净收益最大为目标确定储能配置容量与节点,内层模型计算最优潮流与调整储能容量。文献[47]构建了两阶段储能规划模型,两阶段分别为规划阶段与控制阶段。在规划阶段,确定 1 h 时间尺度

下满足弃风控制指标要求的储能最小配置功率、容量;在控制阶段,依据规划阶段得到的储能配置功率、容量及储能运行策略,计算1 min时间尺度下实际弃风量,并调整弃风控制指标。规划阶段与控制阶段迭代求解,直至确定1 min时间尺度下满足弃风控制指标要求的储能最小配置功率、容量。文献[48]建立了以规划期内总成本最小为目标的微电网随机容量扩展规划模型,确定规划期内各年的柴油发电机、风电机组及储能最优配置容量。文献[49]提出了考虑最大尖峰电压波动最小、日尖峰视在功率均方根值最小及储能综合成本最小的多目标规划模型,并将多目标问题转化为单目标问题,采用序列二次规划算法求解。

以上文献的约束条件主要包括:功率平衡约束,储能充放电功率、电量约束,线路电流约束,节点电压约束等。与集中式接入方式类似,分布式接入方式下模型求解算法也主要包括枚举法^[41,45]、智能优化算法^[35-37,39-40,42-43,46]及数学优化算法^[38,44,49]3类。

目前的研究中,虽然已有量化储能可靠性收益、延缓电网升级改造收益的方法,但仍存在一定不足。具体而言,当确定储能可靠性收益时,已有研究均未考虑配电网重构的影响;在量化储能延缓电网升级改造收益时,已有研究鲜有计及电网升级改造项目期内储能替换成本及储能单位投资成本变化的影响。除此之外,储能规划研究多聚焦于储能近期规划,而其中远期规划却少有涉及。在风电、光伏及负荷的增长方式与出力不确定性的背景下,储能多阶段随机规划方法研究是未来需关注的内容。

4 算法总结

由于储能系统接入电网方式、投资主体等方面的差异,用于缓解电网调峰压力的储能系统规划模型在单目标/多目标、单阶段/多阶段、线性/非线性、连续/非连续等方面存在显著不同,因而求解算法各异。现阶段,求解算法主要包括枚举法、智能优化算法与数学优化算法3类。其中,智能优化算法与数学优化算法为应用的重点。

a. 枚举法。

枚举法调用运行优化模型对有限数量的储能待选方案进行仿真分析,从中选取储能最优配置方案^[20,23,29,41,45]。枚举法原理简单,易于实现,但储能最终方案的优劣与待选方案的数量密切相关;若待选方案过少,难以保证最终方案的最优性;待选方案过多,仿真时间会显著增加。该方法适用于运行仿真时间长的储能规划问题,例如:文献[20]针对任一储能待选方案进行全年时段间隔1 h的机组组合运行模拟,以期准确获取系统运行成本;文献[45]针对给定

容量储能系统,采用规划仿真软件 RNMS,进行规划期40 a的配电网扩展规划,确定接入储能系统后的配电网升级改造成本。

b. 智能优化算法。

智能优化算法的基本思想都是来自对某种自然规律的模仿,主要包括遗传算法^[22,33,39-40,46]、粒子群优化算法^[28,35,37,42]、差分进化算法^[36,43]及帝国竞争算法^[30]等。智能优化算法对目标函数、约束条件及数据质量的要求较为宽松,兼容性好,易于嵌套复杂运行子问题,但一般而言都不能保证收敛到最优解。该方法多用于储能双层、多目标及多阶段规划模型求解,例如:文献[22]针对储能双层规划模型,提出一种数值优化算法求解,外层模型采用遗传算法求解,内层模型使用 CPLEX 求解;文献[46]采用遗传算法求解外层模型,并同样采用遗传算法求解内层模型中储能容量调节子问题。

c. 数学优化算法。

数学优化算法基于严谨数学理论,主要包括线性规划法^[31-32,44]、线性混合整数规划法^[21,24-25]、非线性规划法^[27,49]及混合整数二阶锥规划法^[38]等。该方法理论上可保证解的最优性,但一般对目标函数和约束条件的表达式有着比较严格的要求,适应性受到限制。目前,已有 CPLEX、GUROBI 等成熟商业计算软件^[50],数学优化算法的应用难点逐步变为模型转化,例如:文献[21]与文献[38]分别将原问题转化为线性混合整数规划问题及混合整数二阶锥规划问题,随后分别调用 CPLEX、GUROBI 求解。

5 研究展望

目前,虽然针对用于缓解电网调峰压力的储能系统规划方法研究取得了若干成果,但仍存在许多不足。综上所述,凝练出关键科学问题如下。

a. 考虑多能源系统耦合的多类型储能系统协调规划是未来研究的难点。能源互联网背景下,电力系统与天然气网络、热力网络等其他系统的耦合性逐渐增强,电力储能将不再局限于实现电能双向转换的设备,还包含电能与其他能量形式的单向存储与转换设备^[51]。以蓄电池储能、太阳能热发电及储氢为代表的新型储能技术,为缓解电网调峰压力,促进风电光伏消纳,提供了新的思路。但是,现阶段还没有综合考虑多能流网络约束的多类型储能系统协调规划研究。其中,大规模综合能源系统的多能流高效求解方法是上述研究的关键。

b. 市场环境下电池储能博弈规划模型是未来研究的另一难点。随着调峰、调频等市场逐步向储能系统放开,电池储能收益会逐渐增加^[52],而随着技术进步与规模化应用,电池储能成本会逐渐下降。另外,

相较抽水蓄能、压缩空气储能,电池储能初始成本较小,投资准入门槛较低。在此背景下,电池储能必将吸引社会资本的关注,其投资主体也将呈现多元化趋势。不同投资主体既可采用完全竞争的非合作博弈模式,又可通过与其他参与者组成联盟进行合作博弈,而恰当的合作博弈,可以使博弈参与者均获得最佳收益^[53]。鉴于博弈各方所掌握的某些信息是不对称和不公开的,研究电池储能的不完全信息博弈规划模型及高效完备的博弈均衡求解算法是未来需关注的内容。

c. 特高压大规模接入下储能系统规划模型是未来研究的重点。建设特高压线路是解决我国能源供需发展不平衡的重要举措。截至2016年,我国已投运的特高压交流线路包括长治—荆门、淮南—上海、浙江—福建及锡盟—济南4条,已投运的特高压直流线路包括向家坝—上海、锦屏—苏南、哈密南—郑州、溪洛渡—金华、楚雄—广东及普洱—广东6条^[54-55]。特高压线路显著缓解了受端电网的用电压力,但由于其目前仅按给定功率计划曲线运行,增大了受端电网的调峰压力。此外,特高压交流穿越无功以及特高压直流在节假日负荷低谷期间向交流电网输送大量容性无功等问题,也增大了受端电网的调度运行难度^[56-57]。因此,综合考虑特高压线路有功、无功特性的储能系统规划模型是未来待研究的重要内容。

d. 微电网群中电池储能的多阶段规划模型是未来研究的另一重点。微电网群是多个微电网互联组成的群落系统,其规划设计既需满足各微电网内部稳定运行,又可实现各微电网间能量互济^[58]。文献^[59]提出了一种考虑离网运行时间和系统极端条件下满足系统期望稳定运行时间指标要求的微电网群多元复合储能系统容量配置方法,但该方法仅从技术角度给出了规划目标年的储能配置方案。在整个规划期内,以电池储能全寿命周期成本最小为目标,综合考虑子微电网独立运行和系统协调运行要求的电池储能多阶段规划模型还有待研究。

e. 需求响应背景下储能系统规划模型是未来研究的重要内容。需求响应是缓解电网调峰压力的有效手段,也是促进风电光伏消纳的有力支撑,其主要包括基于价格的需求响应和基于激励的需求响应^[60]。然而,由于需求响应的执行效果需更多的关注用户参与度以及各种外界因素对于用户响应能力和意愿性的影响,需求响应具有较大的不确定性^[61]。此外,大量的需求响应也增大了电网调度运行难度。因此,考虑需求响应不确定性的储能系统规划模型及高效求解算法是未来研究需重点关注的问题。

f. 电池储能寿命估计是其功率容量配置研究的

关键。现有研究多基于储能最大循环次数曲线估计电池储能寿命。需注意的是,储能最大循环次数是给定测试条件(环境温度、储能充放电速率等)下的实验值,但储能实际运行条件并非如此,因而带来了估计误差。另外,现有研究估计储能寿命时均未考虑储能容量损耗的影响。随着储能循环次数的增加,部分储能(铅酸电池储能、锂电池储能等)的最大存储容量逐渐减小,储能放电深度发生改变,也会带来估计误差^[62]。因此,建立综合考虑环境温度、储能充放电速率、放电深度及容量损耗影响的储能寿命估计方法是未来待研究的重要内容。其中,电池储能的最大的存储容量衰减模型是上述研究的关键。

6 结论

储能系统凭借能量存储与功率双向流动特性,既可实现“削峰填谷”,也可提供备用等辅助服务,是缓解电网调峰压力、促进风电光伏消纳的重要方法。基于此,本文针对现阶段适用于电网调峰的抽水蓄能、压缩空气储能及电池储能的研究现状进行总结,随后以储能系统接入电网方式为切入点,分别对集中式与分布式接入方式的储能系统规划方法进行研究 and 归纳,指出目前研究的优势和不足,然后评述规划模型的求解算法。最后,从多能源系统、电力市场、特高压、微电网群、需求侧响应及电池储能寿命估计等6个方面,探讨未来待研究的关键科学问题。

随着储能投资成本的下降及储能政策的进一步完善,利用储能系统缓解电网调峰压力将会受到越来越多的关注,而储能系统规划方法研究的进步也必将推动储能系统的快速健康发展。

参考文献:

- [1] 张丽英,叶廷路,辛耀中,等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报,2010,30(25):1-9.
ZHANG Liying, YE Tinglu, XIN Yaozhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 1-9.
- [2] 朱凌志,陈宁,韩华玲. 风电消纳关键问题及应对措施分析[J]. 电力系统及其自动化,2011,35(22):29-34.
ZHU Lingzhi, CHEN Ning, HAN Hualing. Key problems and solutions of wind power accommodation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 29-34.
- [3] 舒印彪,张智刚,郭建波,等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):1-8.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-8.
- [4] 许守平,李相俊,惠东. 大规模储能系统发展现状及示范应用综述[J]. 电网与清洁能源,2013,29(8):94-100.
XU Shouping, LI Xiangjun, HUI Dong. A survey of the development and demonstration application of large-scale energy storage [J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(8): 94-100.

- [5] Office of Electricity Delivery & Energy Reliability. DOE global energy storage database [EB/OL]. (2016-08-16) [2017-04-09]. <http://www.energystorageexchange.org/projects>.
- [6] 中电联规划发展部. 2016年全国电力工业统计快报数据一览表 [EB/OL]. (2017-01-20) [2017-04-09]. <http://www.cec.org.cn/guihuayutongji/tongjixinxi/nianrushuju/2017-01-20/164007.html>.
- [7] Dominion Energy. Bath county pumped storage station [EB/OL]. (2005-05-14) [2017-04-09]. <https://www.dom.com/about/stations/hydro/bath-county-pumped-storage-station.jsp>.
- [8] PICKARD F W. The history, present state, and future prospects of underground pumped hydro for massive energy storage [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2012, 100(2): 473-483.
- [9] FUJIHARA T, IMANO H, OSHIMA K. Development of pump turbine for seawater pumped-storage power plant [J]. *Hitachi Review*, 1998, 47(5): 199-202.
- [10] 张新敬, 陈海生, 刘金超, 等. 压缩空气储能技术研究进展 [J]. *储能科学与技术*, 2012, 1(1): 26-40.
- ZHANG Xinjing, CHEN Haisheng, LIU Jinchao, et al. Research progress in compressed air energy storage system: a review [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2012, 1(1): 26-40.
- [11] 薛小代, 梅生伟, 林其友, 等. 面向能源互联网的非补燃压缩空气储能及应用前景初探 [J]. *电网技术*, 2016, 40(1): 164-171.
- XUE Xiaodai, MEI Shengwei, LIN Qiyu, et al. Energy internet oriented non-supplementary fired compressed air energy storage and prospective of application [J]. *Power System Technology*, 2016, 40(1): 164-171.
- [12] 肖定垚, 王承民, 衣涛, 等. 压缩空气储能 (CAES) 系统综述 [J]. *电网与清洁能源*, 2014, 30(1): 75-80.
- XIAO Dingyao, WANG Chengmin, YI Tao, et al. Review of compressed air energy storage system [J]. *Power System and Clean Energy*, 2014, 30(1): 75-80.
- [13] SUCCAR S, WILLIAMS R H. Compressed air energy storage: theory, resources, and applications for wind power [R]. [S.l.]: Princeton Environmental Institute, 2008.
- [14] RUTQVIST J, KIM H, RYU D, et al. Modeling of coupled thermodynamic and geomechanical performance of underground compressed air energy storage in lined rock caverns [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 52: 71-81.
- [15] 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.
- [16] LUO X, WANG J, DOONER M, et al. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation [J]. *Applied Energy*, 2015, 137: 511-536.
- [17] 国家 863 课题鹿西岛并网型微网示范工程成功送电 [EB/OL]. (2014-01-24) [2017-04-09]. <http://www.cec.org.cn/zdlhuiyuandongtai/dianwang/2014-01-24/116078.html>.
- [18] 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.
- GAO Mingjie, HUI Dong, GAO Zonghe, et al. Presentation of national wind/photovoltaic/energy storage and transmission demonstration project and analysis of typical operation modes [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(1): 59-64.
- [19] 刘宗浩, 张华民, 高素军, 等. 风场配套用全球最大全钒液流电池储能系统 [J]. *储能科学与技术*, 2014, 3(1): 71-77.
- LIU Zonghao, ZHANG Huamin, GAO Sujun, et al. The world's largest all-vanadium redox flow battery energy storage system for a wind farm [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2014, 3(1): 71-77.
- [20] ZHANG N, KANG C, KIRSCHEN S K, et al. Planning pumped storage capacity for wind power integration [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2013, 4(2): 393-401.
- [21] DVORKIN Y, FERNANDEZ-BLANCO R, KIRSCHEN D S, et al. Ensuring profitability of energy storage [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(1): 611-623.
- [22] 郑乐, 胡伟, 陆秋瑜, 等. 储能系统用于提高风电接入的规划和运行综合优化模型 [J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(16): 2533-2543.
- ZHENG Le, HU Wei, LU Qiuyu, et al. Research on planning and operation model for energy storage system to optimize wind power integration [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(16): 2533-2543.
- [23] ZHANG N, LU X, MCELROY M B, et al. Reducing curtailment of wind electricity in China by employing electric boilers for heat and pumped hydro for energy storage [J]. *Applied Energy*, 2016, 184: 987-994.
- [24] JABR R A, DZAFIC I, PAL B C. Robust optimization of storage investment on transmission networks [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30(1): 531-539.
- [25] XIONG P, SINGH C. Optimal planning of storage in power systems integrated with wind power generation [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2016, 7(1): 232-240.
- [26] 严干贵, 冯晓东, 李军徽, 等. 用于松弛调峰瓶颈的储能系统容量配置方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(28): 27-35.
- YAN Gangui, FENG Xiaodong, LI Junhui, et al. Optimization of energy storage system capacity for relaxing peak load regulation bottlenecks [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(28): 27-35.
- [27] WANG S Y, YU J L. Optimal sizing of the CAES system in a power system with high wind power penetration [J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2012, 37(1): 117-125.
- [28] 徐国栋, 程浩忠, 马则良, 等. 考虑电网调峰能力限制的风储联合系统概率综合效益评价方法 [J]. *电网技术*, 2015, 39(10): 2731-2738.
- XU Guodong, CHENG Haozhong, MA Zeliang, et al. A method to evaluate probabilistic comprehensive benefits of joint wind power and storage system considering constraints of peak load regulation capacity [J]. *Power System Technology*, 2015, 39(10): 2731-2738.
- [29] XU G, CHENG H, FANG S, et al. Optimal configuration of battery energy storage system for peak-load regulation [C]//IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Brisbane, Australia: IEEE, 2015: 1-5.
- [30] 徐国栋, 程浩忠, 方斯頓, 等. 用于提高风电场运行效益的电池储能配置优化模型 [J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(5): 62-69.
- XU Guodong, CHENG Haozhong, FANG Sidun, et al. An optimization model of battery energy storage system configuration to improve benefits of wind farms [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(5): 62-69.
- [31] 黎静华, 文劲宇, 程时杰, 等. 基于 p-有效点理论的含大规模风电电力系统最小储能功率配置方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2013,

- 33(13):45-52.
- LI Jinghua, WEN Jinyu, CHENG Shijie, et al. Method of minimum energy storage power allocation for electric power systems with large-scale wind power based-on p-efficient point theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13):45-52.
- [32] 韩杏宁, 黎嘉明, 文劲宇, 等. 含多风电场的电力系统储能鲁棒优化配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9):2120-2127.
- HAN Xingning, LI Jiaming, WEN Jinyu, et al. Optimization for robust energy storage allocation in power system with multiple wind farms integrated [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9):2120-2127.
- [33] GHOFrani M, ARABALI A, ETEZADI-AMOLI M, et al. A framework for optimal placement of energy storage units within a power system with high wind penetration [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(2):434-442.
- [34] ATWA Y M, EL-SAADANY E F. Optimal allocation of ESS in distribution systems with a high penetration of wind energy [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(4):1815-1822.
- [35] ZHENG Y, DONG Z Y, LUO F J, et al. Optimal allocation of energy storage system for risk mitigation of DISCOs with high renewable penetrations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1):212-220.
- [36] ZHANG Y, DONG Z Y, LUO F, et al. Optimal allocation of battery energy storage systems in distribution networks with high wind power penetration [J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(8):1105-1113.
- [37] SEDGHI M, AHMADIAN A, ALIAKBAR-GOLKAR M. Optimal storage planning in active distribution network considering uncertainty of wind power distributed generation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1):304-316.
- [38] NICK M, CHERKAOUI R, PAOLONE M. Optimal allocation of dispersed energy storage systems in active distribution networks for energy balance and grid support [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5):2300-2310.
- [39] AWAD A S A, EL-FOULY T H M, SALAMA M M A. Optimal ESS allocation for load management application [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1):327-336.
- [40] AWAD A S A, EL-FOULY T H M, SALAMA M M A. Optimal ESS allocation for benefit maximization in distribution networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 8(4):1668-1678.
- [41] YANG Y, LI H, AICHHORN A, et al. Sizing strategy of distributed battery storage system with high penetration of photovoltaic for voltage regulation and peak load shaving [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2):982-991.
- [42] 颜志敏, 王承民, 郑健, 等. 配电网中蓄电池储能系统的价值评估模型 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2):57-61.
- YAN Zhimin, WANG Chengmin, ZHENG Jian, et al. Value assessment model of battery energy storage system in distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2):57-61.
- [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. Life cycle cost based optimal configuration of battery energy storage system in distribution network [J]. Power System Technology, 2015, 39(1):264-270.
- [44] DEEBA S R, SHARMA R, SAHA T K, et al. Evaluation of technical and financial benefits of battery-based energy storage systems in distribution networks [J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(8):1149-1160.
- [45] MATEO C, RESESES J, RODRIGUEZ-CALVO A, et al. Cost-benefit analysis of battery storage in medium-voltage distribution networks [J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2016, 10(3):815-821.
- [46] XIAO J, ZHANG Z, BAI L, et al. Determination of the optimal installation site and capacity of battery energy storage system in distribution network integrated with distributed generation [J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2016, 10(3):601-607.
- [47] ALNASER S W, OCHOA L F. Optimal sizing and control of energy storage in wind power-rich distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3):2004-2013.
- [48] HAJIPOUR E, BOZORG M, FOTUHI-FIRUZABAD M. Stochastic capacity expansion planning of remote microgrids with wind farms and energy storage [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(2):491-498.
- [49] TANT J, GETH F, SIX D, et al. Multiobjective battery storage to improve PV integration in residential distribution grids [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1):182-191.
- [50] 洪绍云, 程浩忠, 曾平良, 等. 输电网扩展优化规划研究综述 [J]. 电网技术, 2016, 40(10):3102-3107.
- HONG Shaoyun, CHENG Haozhong, ZENG Pingliang, et al. Review of transmission network expansion optimization planning [J]. Power System Technology, 2016, 40(10):3102-3107.
- [51] 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 Jianlin, TIAN Liting, LAI Xiaokang. Outlook of electrical energy storage technologies under energy internet background [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23):15-25.
- [52] 陈天宇, 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.
- CHEN Dayu, ZHANG Lizi, WANG Shu, et al. Development of energy storage in frequency regulation market of United States and its enlightenment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1):9-13.
- [53] 卢强, 陈来军, 梅生伟. 博弈论在电力系统中典型应用及若干展望 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29):5009-5017.
- LU Qiang, CHEN Laijun, MEI Shengwei. Typical applications and prospects of game theory in power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29):5009-5017.
- [54] 电网头条. 国家电网 18 个获得核准的特高压工程一览 [EB/OL]. (2016-08-23) [2017-04-09]. <http://www.chinapower.com.cn/smartgrid/20160823/48866.html>.
- [55] 中国南方电网公司. 中国南方电网西电东送概况 [EB/OL]. (2017-01-06) [2017-04-09]. http://www.ehv.csg.cn/xdds/gk/201309/t20130920_391.html.
- [56] 张勇军, 李钦豪, 刘轩. 特高压交流电网的无功电压控制 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5):159-167.
- ZHANG Yongjun, LI Qin hao, LIU Xuan. Reactive power and voltage control in UHVAC power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5):159-167.
- [57] MIAO Y, CHENG H. An optimal reactive power control strategy for UHV AC/DC hybrid system in East China Grid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1):392-399.
- [58] 支娜, 肖曦, 田培根, 等. 微网群控制技术研究现状与展望 [J].

- 电力自动化设备,2016,36(4):107-115.
- ZHI Na,XIAO Xi,TIAN Peigen,et al. Research and prospect of multi-microgrid control strategies[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(4):107-115.
- [59] 田培根,肖曦,丁若星,等. 自治型微电网群多元复合储能系统容量配置方法[J]. 电力系统自动化,2013,37(1):168-173.
- TIAN Peigen,XIAO Xi,DING Ruoxing,et al. A capacity configuring method of composite energy storage system in autonomous multi-microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(1):168-173.
- [60] 张钦,王锡凡,王博学,等. 电力市场下需求响应研究综述[J]. 电力系统自动化,2008,32(3):97-106.
- ZHANG Qin,WANG Xifan,WANG Jianxue,et al. Survey of demand response research in deregulated electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(3):97-106.
- [61] 王蓓蓓. 面向智能电网的用户需求响应特性和能力研究综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(22):3654-3663.
- WANG Beibei. Research on consumers' response characteristics and ability under smart grid:a literatures survey[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(22):3654-3663.
- [62] NGUYEN T A,CROW M L. Stochastic optimization of renewable-based microgrid operation incorporating battery operating cost [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2016,31(3):2289-2296.

作者简介:



徐国栋

徐国栋(1990—),男,山东淄博人,博士研究生,主要研究方向为用于促进新能源接入的储能系统规划(E-mail:limoon2012@sjtu.edu.cn);

程浩忠(1962—),男,浙江金华人,教授,博士,主要研究方向为电力系统规划、安全经济运行、电压稳定、电能质量。

Overview of ESS planning methods for alleviating peak-shaving pressure of grid

XU Guodong¹,CHENG Haozhong¹,MA Zifeng²,FAN Songli¹,FANG Sidun¹,MA Zeliang³

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering,Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240,China;2. School of Chemistry and Chemical Engineering,Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240,China;3. East China Grid Company Limited,Shanghai 200120,China)

Abstract: With the gradual increase of their penetration rates,the wind power and photovoltaic power have brought many challenges to the operation of power grid,especially its peak-shaving. Under the impetus of energy internet,more and more attentions are paid to alleviating the peak-shaving pressure by ESS(Energy Storage System). The research status of large-capacity energy storage technologies suitable for peak-shaving is summarized;with the ESS connecting mode as the breakthrough point,the ESS planning methods for centralized and distributed connecting modes are studied and induced respectively;the solvers of planning models are reviewed;and the key scientific topics for future research are discussed.

Key words: large-capacity energy storage technology; centralized connecting mode; distributed connecting mode; peak-shaving; planning methods; energy storage