

考虑调频的储能规划与竞价策略综述

苏 烨¹, 石剑涛², 张江丰¹, 龚莉凌², 郭 烨², 沈欣炜²

(1. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014; 2. 清华大学深圳国际研究生院, 广东 深圳 518000)

摘要:在实现“双碳”目标的背景下,电力系统中不断增长的可再生能源并网比例带来了系统惯性下降的问题,其不确定性也提高了系统对灵活性资源的需求。储能资源提供的调频能为系统惯性与频率稳定提供支撑,同时能有效提高电力系统运行弹性,降低系统整体运行成本。基于此,从储能参与调频的角度出发,分别对考虑系统惯性与经济性的储能规划、储能电站的调频竞价策略、电动汽车的调频竞价策略三方面的研究现状进行了综述与归纳,最后总结展望了其中的关键性问题,以期考虑调频的储能规划与竞价策略问题提供参考。

关键词:调频;储能;规划;竞价策略;电动汽车;电力系统

中图分类号:TM 715

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202109013

0 引言

降低碳排放、抑制全球变暖已然成为人类社会的普遍共识。作为负责任的大国,中国正式提出“2030碳达峰,2060碳中和”的“双碳”目标。绿色低碳的能源系统转型与电力能源结构变革,是实现该战略目标的必经之路^[1]。国网浙江省电力有限公司基于能源互联网的理念^[2],率先提出了多元融合高弹性电网的具体实现路径^[3],提高电网中可再生能源比例,助力建设低碳转型下的弹性电力系统。

与此同时,风、光等多元新能源发电的不确定性和波动性给电网运行带来了巨大挑战^[4]。为了提升电力系统安全稳定运行能力,储能、电动汽车EV(Electric Vehicle)等清洁灵活性资源立足能源转型现状,可以充分发挥电网弹性,支撑可再生能源并网,如提供调峰、调频等辅助服务。调频辅助服务作为确保系统频率稳定性的主要方式之一,随着新能源占比的不断提高,其重要性在近年来不断凸显^[5]。调频服务一般可分为一次调频与二次调频:一次调频属于传统火电机组需要承担的义务,因此一次调频不会作为独立商品在市场中进行交易;二次调频往往作为市场化商品在调频市场中进行出清,且目前市场的主要参与者仍为火电机组。与火电资源相比,储能资源具备更快速的调节能力,其调频表现更优。在新能源占比不断提升的未来电网中,储能资源有望成为系统调频的重要来源,为系统的惯性与频率稳定性提供有力支撑的同时,提高电网运行弹性与灵活性,从而有效实现“双碳”目标。

为吸引具备优秀调频表现的储能资源,国内外众多电力市场在市场机制改革的不断推进下,其调频规则逐渐演变为基于调频表现的结算体系。2013年,美国联邦能源管理委员会颁布了755号文件,要求各个区域市场运营商在调频市场中考虑调频里程^[6]。此后,美国大部分区域电力市场建立了综合调频容量、调频里程和调频表现的结算机制^[7]。国内多数区域电力市场,如华北区域市场^[8]、南方区域市场^[9]、东北区域市场^[10]等,其监管单位依据“两个细则”文件对调频资源予以补偿。随着电力体制改革的不断深入,于2015年颁布的《中共中央国务院关于进一步深化电力体制改革的若干意见》(9号文)及电力体制改革配套文件推动了国内电力市场的迅速建设^[11]。由于调频辅助服务市场是现货市场的重要支撑,许多区域电力市场相继进行了调频市场的先期探索,如2020年印发的《浙江电力现货市场第二次结算试运行工作方案》,在调频市场中同时考虑了调频容量与调频里程,并通过性能归一化指标对储能资源的调频性能进行了评估,为性能优异的储能资源参与调频市场提供了动力^[12]。一个设计良好的调频市场能够为储能与EV用户提供可观的经济收益,鼓励储能所有者扩大储能规模,同时推动EV替代燃油汽车的进程,转变用户终端能源结构,从而有效降低碳排放。

目前,已有大量学者对储能参与调频的有关问题进行了深入研究,包括一些相关的综述:文献[13]从市场环境的角度综述了美国调频市场的设计框架与规则内容,并对中国调频市场的建设提出了建议;文献[14]进行了储能参与调频的必要性与可行性分析,同时对储能的仿真模型、调控方法和容量配置方法进行了综述;文献[15]综述了不同类型储能的调频参数特点,同时从不同市场政策规则的角度对储能参与调频进行了商业化分析。据了解,目前尚未有针对调频市场且综合考虑储能规划与运行优化策

收稿日期:2021-05-25; **修回日期:**2021-07-20

基金项目:国网浙江省电力有限公司科技项目(5211DD200003);
国家自然科学基金资助项目(52007123)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd.(5211DD200003) and the National Natural Science Foundation of China (52007123)

略的综述总结,同时缺乏对新型储能资源——EV参与调频相关策略的研究综述。基于此,本文首先从储能规划角度出发,对考虑调频的储能规划研究进行了总结;然后分别对传统储能资源和EV考虑调频的竞价策略进行了深入调研;最后总结了现阶段研究存在的问题,对未来的研究方向进行了展望。

1 考虑调频需求的储能资源规划

储能规划问题是开展储能有关研究与实际应用的基础。进行储能规划配置时,对储能参与调频进行考虑,可以极大地提高电力系统的运行灵活性。储能规划的关键问题是其核心电气参数的选择,如地址(即电网节点)、最大充放电功率与最大容量等。现阶段,考虑参与调频的储能规划研究可以分为以下2类:①基于储能参与调频对系统惯性与频率稳定性的支撑作用,对储能规划进行分析;②从经济性角度,对储能规划进行分析。

1.1 基于系统惯性与频率稳定性的储能规划

基于储能参与调频对系统惯性与频率稳定性的支撑作用,部分文献对储能规划问题进行了深入研究。文献[16]通过分析含储能的区域电网频率特性与储能快速调频下的时域频率响应特性,结合对储能控制模式的研究,确定储能参与调频时的动作深度,并根据动作深度形成储能容量配置方法。文献[17]考虑受风电出力波动影响的电网综合负荷,基于电网频率信号波动特性与给定的电网调频及储能电池运行要求约束,获得最佳的储能容量配置方案。文献[18]基于储能的选型理论和优化控制方法,分析储能参与一次与二次调频的过程,结合储能电池的倍率特性与控制方式,给出储能容量配置方法。针对高比例可再生能源并网带来的电网惯性下降问题,文献[19]指出储能参与调频可以为系统暂态频率稳定性提供支撑,同时能改善系统的一次调频与二次调频,并从系统可再生能源占比、系统暂态频率最低值等因素出发,提出储能容量配置方法。

1.2 基于经济性分析的储能规划

大量文献从经济性角度出发,在储能规划问题中针对预期成本与收益进行了相关研究,以实现储能的最优配置。储能规划时,其计算成本通常为储能全生命周期成本,一般包括投资成本、运行维护成本与退化成本等。在储能参与调频的背景下,储能用户的收益主要来源于参与电能量与调频市场获得的利润,包括利用峰谷电价套利,利用日前市场与实时市场差价套利,以及提供调频服务获取的调频市场收入。特别地,文献[20]在储能规划问题中考虑储能的环保效益,并指出储能能通过削峰填谷降低火电机组的发电量,由此降低的碳排放与环境污染成本就是其环境效益,并给出环境效益的计算方法。

考虑到调频的储能成本与效益分析,许多文献针对储能规划问题进行了详细分析。文献[21]分析了不同的储能建设成本、不同的电能量市场偏差考核惩罚价格对储能容量配置的影响,从而为储能电站的容量配置提供指导。文献[22]在考虑储能规划问题时,分别考虑了系统的总成本最小化与储能自身的利润最大化这2个不同的目标。文献[23]从储能投资者的角度建立了双层优化模型,在内层考虑了系统配置储能后的运行成本最小化问题,同时在外层考虑储能收益的最大化,包含了电能量市场收益、辅助服务市场收益以及储能的投资成本。与此同时,大部分的研究都从系统的角度出发,研究了储能规划问题。文献[24]在储能规划阶段将所有火电机组和储能电站的系统总成本作为模型目标,同时将系统初始频率变化率和扰动后系统频率最低点这2个系统指标作为模型约束,建立了储能规划模型。文献[25]将储能规划问题建模为双层问题,在上层问题中考虑所有典型日内系统总成本期望值最优的储能规划问题,在若干个下层问题中考虑每个典型日内的系统经济调度问题。同时,该文献提出了基于次梯度切平面的分布式计算方法,以提高储能规划问题的运算效率。

基于以上文献,图1从系统层面总结了基于经济性的考虑调频的储能规划问题模型。

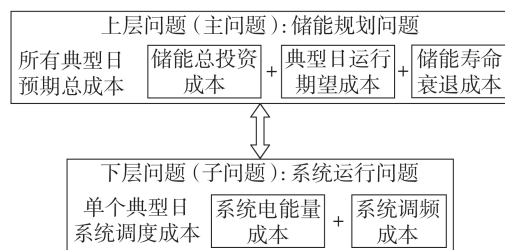


图1 考虑调频的储能规划模型

Fig.1 Energy storage planning model considering frequency regulation

综上,目前考虑储能参与调频的储能规划问题主要围绕以下2个方面进行研究:从物理角度,考虑储能参与调频对系统惯性与频率稳定性的支撑,确定储能规划方案;从经济性角度,考虑储能参与调频的储能规划成本与收益,确定储能规划方案。

2 储能参与调频的竞价策略

2.1 快速调频的储能资源特征

在能源转型、降低碳排放的过程中,新能源的大规模并网造成了电力系统的整体惯性下降以及不确定性的快速增长,最终导致调频市场的总需求容量增加。储能资源作为提供调频服务的重要资源,其快速响应特性使其能在短时间内实现精确有效调频^[26]。根据不同的类型,具备快速调节能力的储能

可分为蓄电池储能(BES)、飞轮储能(FES)、抽水蓄能(PHES)、超级电容器储能(SCES)等。能量转换差异本质上由储能类型决定,在物理层面主要表现为循环寿命、响应速度、能量密度、功率密度等特性,而在数学层面则主要体现在储能模型中的荷电状态动态方程上。当前国内外已有大量的储能电站投入了实际运行,其中应用场景包括新能源协同并网、提供调频辅助服务等,具体的典型储能电站项目及技术指标如表1所示。

在诸多储能技术中,包括铅酸、锂离子、钠硫和全钒液流等在内的BES技术,普遍具有能量密度高、功率密度低、循环寿命短的特点,适用于长时间连续放电应用场景。然而,大功率下频繁充放电会严重降低蓄电池寿命,因此BES适用于提供功率较小的辅助调频服务,文献[27]通过实验对此结论进行了验证。此外,FES采用动能形式存储电能,具有响应速度快、自放电高、循环寿命长、能量密度低、功率密度大的特点,现阶段主要用于提供电网一次调频服务^[28]。文献[29]分别对BES和FES进行了数学建模,研究了不同储能技术在不同调频合约下的期望收益。PHES是一种容量大、循环效率高、并网性能良好且竞争成本较低的蓄能技术。可逆水泵水轮机的集成提升了PHES的灵活性和响应性能,使其能够通过水泵和涡轮模式之间的快速切换提供调频等辅助服务。文献[30]评估了水泵水轮机的稳定性及其对PHES电站调频容量的影响;文献[31]研究了风电接入对PHES系统动态调节可靠性的影响;文献[32]则对含有PHES电站的风光供电系统进行了调研。与其他储能方式不同,SCES无需进行电能转换,而是直接通过静电场存储能量,并可实现高电流条件下的快速充放电,因此具有功率密度高、能量密度低、循环寿命长和响应速度快等特性。

2.2 储能调频的经济性运行

合理的经济收益是储能电站可持续性运营的基

础。文献[33]总结了在智能电网的不同应用场景下对储能技术进行经济性规划和效益评估的主要方法。目前,已有大量国内外学者针对不同类型储能电站的经济运行策略进行了深入研究。文献[34]深入研究了PHES技术,指出其可通过变速技术改变抽水模式从而参与调频市场,并对PHES有无变速器情境下的市场收益进行了对比。而BES作为当前理想的调频储能资源,因其具有较为成熟的技术储备,较多地应用于实际储能调频项目中,其中锂离子电池为兆瓦级储能应用场景的主流类型。

BES参与调频的优化目标函数通常为最小化储能资源的运行成本,其中需考虑BES的退化成本。电池退化问题是BES的储能资源经济性运营的关键问题,因为老化过程将不可逆地造成电池性能和寿命的衰减。文献[35]系统性地归纳了锂离子电池老化过程中的影响因素、内部机理、退化模式以及外部反应。文献[36]根据电池退化模型和循环充放电实验数据,优化了BES计及真实退化成本的运行策略,并对该储能系统的效益进行了评估。文献[37]详细建立了以统计特征为基础的锂离子电池容量退化模型,并提出了其参与调频市场的最优报价策略。文献[38]研究了电池退化对BES运营商在日前调频市场总收入的影响,并通过改进其竞价策略实现BES使用寿命期间的总收益最大化。在储能电站运行的最优控制问题中,考虑调频参与的边际运行成本通常与储能系统的当前决策变量和状态参数相关。文献[39]将计及电池退化的调频容量与调频里程的动态成本纳入市场决策模型中,通过等边际报价调度策略,实现了储能单元的实时功率最优分配。

2.3 调频市场环境 with 储能竞价策略

在当前的国内外电力市场环境下,调频市场是独立于电能量市场以外的一种辅助服务市场。根据不同的市场设计规则,调频产品类型以及结算机制在不同市场间存在差异^[40]。按照时间尺度划分,美

表1 全球典型储能电站项目及技术指标

Table 1 Projects and technical indexes of worldwide typical energy storage power plants

项目名称(国家)	储能类型	总容量 (能量/(MW·h)、 功率/MW)	应用场景
Moss Landing Energy Storage Facility(美国)	BES (锂离子)	1 200、300	世界最大的锂离子电池储能系统,第一阶段已与天然气电站相连;2022年,第二阶段将与核电站和大型太阳能电站相连
Bath County Pumped Storage Station(美国)	PHES	24 000、3 003	世界最大的PHES系统,作为储能资源参与PJM市场运行
Beacon New York Flywheel Energy Storage Plant(美国)	FES	5、20	利用FES的快速响应,参与NYISO市场提供调频辅助服务
黄河水电青海太阳能储能项目(中国)	BES	202.8、202.8	水、风、光、储多能互补的联合运行,提高电源侧的稳定性和灵活性,提升电网友好性,提高能源利用率
Huntorf CAES Plant(德国)	压缩空气储能	870、290	世界首个压缩空气储能电站,效率仅为40%左右,但因技术成本较低且对环境无害,未来将用于可再生能源协同并网
大连液流电池储能调峰电站(中国)	BES (全钒液流)	800、200	缓解大连乃至辽宁电网调峰压力,提高大连南部地区供电可靠性,加快风电并网,减少弃风场景

国MISO的调频市场可分为日前市场和实时市场。而在美国PJM市场中,调频服务仅在实时市场中进行出清。典型的调频市场环境和储能的市场地位见图2。根据时间差异,储能资源的市场竞价策略可分为日前市场竞价策略和实时市场竞价策略。文献[41]通过线性规划的方法,最大化储能电站在MISO日前市场通过能量套利和提供调频获得的总收益的期望值。文献[42]提出储能电站在电池寿命损耗模型下参与日前能量、调频和备用市场的联合最优报价策略。文献[43]基于调频表现补偿机制,提出BES电站的最优竞价策略和实时控制策略。

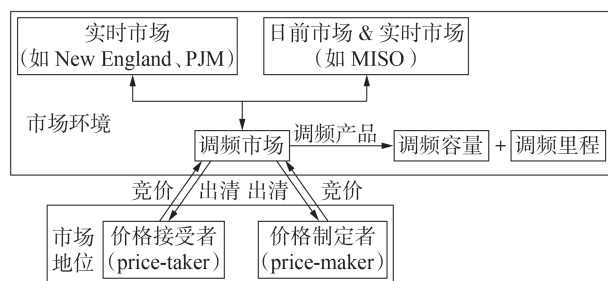


图2 储能参与调频市场竞价示意图

Fig.2 Schematic diagram of energy storage participating in bidding for frequency regulation market

根据储能电站的容量规模及其市场地位,储能资源竞价策略问题又可分为价格接受者(price-taker)策略和价格制定者(price-maker)策略。一般地,小规模储能电站会被建模为价格接受者,即其竞价策略不能影响市场的出清结果,因此可将其视为市场的自调度资源。基于该假设,大多数文献中的策略优化模型将市场出清价格视为模型外部输入的随机参数。文献[44]通过鲁棒优化建立了调频价格和调频信号的不确定性模型,并采用Benders分解降低了计算复杂度。文献[45]基于日前电价和实时电价的概率分布函数,建立了BES系统的最优竞价调度框架。相反地,因大规模储能电站具备市场力,其通常被建模为价格制定者,在大规模储能电站的策略优化模型中,市场出清价格被视为模型的内部量,由拉格朗日乘子表示。因此,大规模储能电站的市场收益更依赖于其竞价策略的制定。文献[46]通过双层模型提出了储能电站作为价格制定者参与能量市场和调频、备用市场的竞价策略,在上层问题中最大化储能电站运营收益,在下层问题中则从系统角度出发,最小化电网总成本,从而评估储能竞价决策对电力市场出清结果的影响。

2.4 多资源协同竞价策略

除了单独参与电力市场外,储能资源还可以与其他类型资源协同优化,从而获得多种资源的联合竞价策略。储能设备作为微电网中不可或缺的组成部分,能够有效提高系统惯性,提升电网稳定性。文

献[47]研究了在考虑新能源出力和市场价格的不确定性下,包含风电、光伏、微型燃气轮机和储能资源的微电网作为价格接受者,参与电能量、调频和备用市场的鲁棒联合投标策略。与此同时,在低碳的背景下,国内外大量文献研究了可再生发电资源与储能资源的协同竞价策略。文献[48]将风电、储能的协同运行问题建模为马尔科夫决策过程,提出了一种改进动态规划算法来处理竞价问题的随机性、非线性和离散性,有效提升了资源的联合收益。文献[49]首先对风电出力和市场价格的不确定性集进行建模,接着通过基于鲁棒模型预测控制的混合整数非线性规划获得了风电储能系统在实时能量市场和调频市场的最优竞价策略。

综上,本节从不同类型储能资源的快速调节特征出发,归纳分析了储能调频的经济性运行,并充分考虑市场环境、市场地位等因素,分别对储能资源单独参与调频市场、储能协同其他多种资源参与调频市场的竞价策略进行了综述。

3 EV参与调频的竞价策略

除了传统储能电站之外,新型储能资源——EV的不断增加,也为调频市场带来了新的活力。作为一种低碳与清洁技术,EV对传统燃油车的替代能有效改变用户终端的能源结构,降低碳排放。同时,EV提供的优质调频服务,能够为新能源的并网提供有力支撑。国务院于2020年11月印发的《新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)》中指出:到2025年时,EV的新车销量要达到总新车销量的20%;要加强EV与电网之间的互动,利用EV提高电网的调频能力^[50]。与此同时,EV电池所具备的快速调节能力,使其能够提供优质的调频服务,从而获得较高的调频收益^[51]。在政策引导与经济红利的双重引导之下,数量持续增长的EV将成为调频市场重要参与者。在此背景下,研究EV参与调频市场的投标策略,具有较高理论价值与现实意义。

3.1 单辆EV参与调频及其聚合

从单辆EV角度出发,文献[52]研究了参与调频时EV电池的退化成本,并建立其线性数学模型。文献[53]将EV充电过程视为马尔科夫决策过程,从而将调频市场中的EV竞价问题建模为动态随机规划问题。实际上,单辆EV由于所能提供的调频容量过小而不足以参加调频市场:据美国PJM调频市场规定,调频市场最低参与容量为0.1 MW。同时,EV需首先满足用户出行需求,其与电网的连接时间具有很强的随机性,单辆EV难以提供稳定的调频服务,因此可能面临高额市场惩罚。

为解决上述问题,文献[54]较早提出了电动汽车聚合商EVA(Electric Vehicle Aggregator)概念,由

EVA协同调度EV的充放电过程。EVA通过聚合所有EV的调频资源,作为一个整体参与调频市场,以争取在市场中拥有更强的议价能力。

3.2 EVA 竞价策略

大量文献对EVA在调频市场的竞价策略进行了研究。EV可根据参与电网调频时放电与否,分为单向汽车入网V2G(Vehicle-to-Grid)和双向V2G。其中,单向V2G因不涉及EV放电行为,因此对充电设施的要求更低,其可通过EV充电过程中功率的快速调节实现调频。文献[56]对比了EVA在同一市场环境下单向V2G和双向V2G的收益情况,仿真结果显示采用双向V2G将会获取更高收益,而采用单向V2G面临的市场风险更低。文献[57]提出了EVA可以采用模型预测控制方法确定每辆EV的充电过程与调频容量,并且分析了价格预测误差对调频市场投标策略的影响。文献[58]采用了两阶段随机优化模型:第一阶段模型中考虑了EV充电过程的不确定性,对EVA日前电能量市场和调频市场的投标策略进行优化;第二阶段模型中通过建立实时系统调度多场景,对市场实时价格的不确定性进行建模。文献[59]采用了模糊优化分析EVA在调频与备用市场的竞价策略,并通过自回归积分滑动平均模型对市场价格进行预测。文献[60]通过混合整数线性规划MILP(Mixed-Integer Linear Programming)模型得到了EVA与传统储能资源的调频联合投标策略,并采用条件风险价值CVaR(Conditional Value at Risk)指标对价格不确定性进行了风险管理。此外,文献[61]研究了EVA如何根据系统实时调频指令,协同调度不同的EV进行快速响应。

同时,部分文献研究了多EVA在调频市场的博弈竞价模型。文献[62]提出了多EVA的双层博弈模型:上层优化中,多EVA采用非合作博弈,通过多轮调整自身的投标策略,最终达到纳什均衡;下层优化中,每个EVA中的EV根据出清调频价格进行马尔科夫博弈,调整每台EV实际调频容量与充电过程。

综上,在EV调频市场投标策略的研究中,无论是单辆EV规划、EVA聚合竞价,还是多EVA博弈优化,该问题的实质在于EV用户、EVA和市场平台之间关系的建模优化,图3对三者的关系进行了简单描述,同时概括了本节中的竞价策略研究方法。

4 总结与展望

转变能源结构、用新能源逐步取代化石能源可以有效降低碳排放,推动“双碳”目标的实现。在新能源占比不断提升的多元融合高弹性电网中,为应对不确定性增加所带来的系统惯性下降、风险上升的挑战,需要充分挖掘储能、EV等低碳与清洁技术

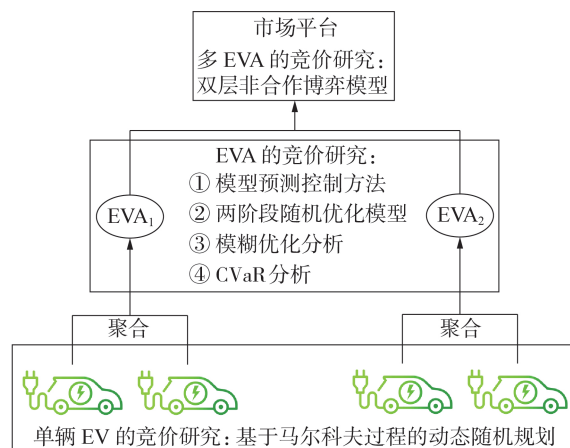


图3 EV参与调频的竞价策略

Fig.3 Bidding strategy of EV participating in frequency regulation

提供调频服务的潜力,支撑可再生能源的并网。因此,本文从面向调频的角度出发,从储能资源容量配置、储能电站投标策略、EV竞价策略3个方面逐一对储能参与调频进行了综述与归纳。基于本文的调研,针对目前存在的关键性问题,本文进行如下展望,期望能为其他研究学者提供参考。

针对调频参与的储能规划问题,未来的研究可聚焦于以下3个方面的内容。第一,储能规划的时间尺度较长,时间颗粒度粗,而计算储能预期收益时则需考虑时间尺度较短的储能运行问题。因此,需要建立合理的数学模型,解决时间尺度的匹配。第二,计算储能全寿命周期预期收益时,需处理海量数据。因此,需要运用分布式算法来提升模型运算速度,同时需要根据模型结构,分析应用分布式算法后的收敛性问题。笔者认为,未来的研究可以尝试更多新的分布式算法,如边际等效分解法^[63]、临界域探索法^[64]。第三,目前关于考虑调频的储能规划研究更多是从系统的角度出发。面对个体投资者增长的趋势,笔者认为,未来的储能规划研究应站在储能的个体角度,更多地聚焦于个体储能电站的经济收益优化问题。

针对储能电站在调频市场的投标策略问题,其主要难点在于出清优化时系统中存在大量随机变量,因此高效求解大规模多约束优化模型仍是未来研究中需探究的重点。同时,针对该竞价问题,其核心是储能电站运营者的收益最大化,应仔细研究以下3个方面的内容:一是不同类型储能设备的边际退化成本;二是所参与电力市场的设计规则及其结算机制;三是可考虑与其他分布式发电资源进行联合优化报价策略。笔者认为,储能电站提供调频辅助服务将成为一个低碳背景下的典型应用场景。由于调频合约出清的时间超前性,运营者应根据预测数据的不确定性模型选择合适的随机优化算法来构

建竞价策略,如鲁棒优化、两阶段随机优化等。同时,针对不同类型的储能设备以及不同状态参数的储能单元,运营者可通过设置中间协调层的方法确保调频出清量在实时调频信号下快速响应。

针对EV参与调频市场投标策略的问题,未来研究中可以深入探索以下2个方面的内容。第一,EV连接电网的不确定性建模,以及模型中不同置信度的设置对市场收益的影响。笔者认为,可以在研究中应用分布鲁棒机会约束优化模型^[65],同时对不确定性与不同置信度进行考虑。第二,实时调频信号下,EVA应如何根据出清调频容量,制定下属EV的充放电策略。笔者认为,由于EVA下的EV分属不同的用户主体,因此EVA需要考虑单个EV的隐私问题。为此,可以在模型中引入微分隐私的有关概念与方法^[66],对EV的隐私进行保护。

参考文献:

- [1] 方行明,何春丽,张蓓. 世界能源演进路径与中国能源结构的转型[J]. 政治经济学评论,2019,10(2):180-203.
FANG Xingming, HE Chunli, ZHANG Bei. Energy evolutionary path of the world and the energy structure transformation of China[J]. China Review of Political Economy, 2019, 10(2): 180-203.
- [2] 冯成,王毅,陈启鑫,等. 能源互联网下的数据中心能量管理综述[J]. 电力自动化设备,2020,40(7):1-9.
FENG Cheng, WANG Yi, CHEN Qixin, et al. Review of energy management for data centers in energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7): 1-9.
- [3] 徐俊杉. 浙江电力:以高弹性电网建设能源互联网“示范窗口”[J]. 中国电力,2020(10):59-60.
XU Junzhao. Zhejiang electric power: building a “demonstration window” for the energy internet with the construction of highly resilient grid[J]. China Electric Power, 2020(10): 59-60.
- [4] 鲍颜红,张金龙,江叶峰,等. 考虑新能源出力不确定性的可用输电能力在线评估方法[J]. 电力自动化设备,2020,40(4):71-76.
BAO Yanhong, ZHANG Jinlong, JIANG Yefeng, et al. Online assessment method of available transfer capacity considering uncertainties of renewable energy output[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4): 71-76.
- [5] 陈青,吴明兴,刘英琪,等. 面向风电市场化消纳的现货电能量-辅助服务联合运营机制[J]. 电力自动化设备,2021,41(3):179-188.
CHEN Qing, WU Mingxing, LIU Yingqi, et al. Joint operation mechanism of spot electric energy and auxiliary service for wind power market-oriented accommodation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 179-188.
- [6] MILLER R A, VENKATESH B, CHENG D. Overview of FERC order No.755 and proposed MISO implementation[C]//IEEE Power & Energy Society General Meeting. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2013: 1-5.
- [7] 陈中飞,荆朝霞,陈达鹏,等. 美国调频辅助服务市场的定价机制分析[J]. 电力系统自动化,2018,42(12):1-10.
CHEN Zhongfei, JING Zhaoxia, CHEN Dapeng, et al. Analysis on pricing mechanism in frequency regulation ancillary service market of United States[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(12): 1-10.
- [8] 国家能源局华北能源监管局. 关于印发华北区域并网发电厂“两个细则”(2019年修订版)的通知[EB/OL]. (2019-09-25)[2021-01-18]. http://hbj.nea.gov.cn/adminContent/initUploadedFile.do?uniqueURL=20190930/31921569775323114_12a-8ac39-2473-404f-865d-c7fbc66b960b.pdf.
- [9] 国家能源局南方能源监管局. 关于印发南方区域“两个细则”(2017版)的通知[EB/OL]. (2017-12-25)[2021-01-18]. http://120.31.132.37:8085/SCSERC_OUTER/temp/examples/upfileattch/70228872_wz_towaiwang.pdf.
- [10] 国家能源局东北能源监管局. 关于印发《东北区域发电厂并网运行管理实施细则》和《东北区域并网发电厂辅助服务管理实施细则》的通知[EB/OL]. (2020-12-23)[2021-01-18]. <http://dbj.nea.gov.cn/zfw/zcfg/202012/P020201223566341821184.pdf>.
- [11] 国家能源局. 关于印发电力体制改革配套文件的通知[EB/OL]. (2015-11-30)[2021-01-18]. http://www.nea.gov.cn/2015-11/30/c_134867851.htm.
- [12] 浙江省发展改革委员会. 关于印发《浙江电力现货市场第二次结算试运行工作方案》的通知[EB/OL]. (2020-05-09)[2021-01-18]. <http://fzggw.zj.gov.cn/module/download/downfile.jsp?classid=0&filename=9a9c76c0f9ea40e592fda494c1cd60fd.docx>.
- [13] 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.
CHEN Dayu, ZHANG Lizi, WANG Shu, et al. Development of energy storage in frequency regulation market to United States and its enlightenment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 9-13.
- [14] 李欣然,黄际元,陈远扬,等. 大规模储能电源参与电网调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(7):145-153.
LI Xinran, HUANG Jiyuan, CHEN Yuanfang, et al. Review on large-scale involvement of energy storage in power grid fast frequency regulation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 145-153.
- [15] 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.
SUN Bingying, YANG Shuili, LIU Zongqi, et al. Analysis on present application of megawatt scale energy storage in frequency regulation and its enlightenment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 8-16.
- [16] 黄际元,李欣然,曹一家,等. 考虑储能参与快速调频动作时机与深度的容量配置方法[J]. 电工技术学报,2015,30(12):454-464.
HUANG Jiyuan, LI Xinran, CAO Yijia, et al. Capacity allocation of energy storage system considering its action moment and output depth in rapid frequency regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 454-464.
- [17] 黄际元,李欣然,常敏,等. 考虑储能电池参与一次调频技术经济模型的容量配置方法[J]. 电工技术学报,2017,32(21):43-52.
HUANG Jiyuan, LI Xinran, CHANG Min, et al. Capacity allocation of BESS in primary frequency regulation considering its technical-economic model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(21): 43-52.
- [18] 黎淑娟. 储能电池参与电网快速调频的综合选型与优化配置[D]. 长沙:湖南大学,2018.
LI Shujuan. Selection and optimization of energy storage battery participates in power grid rapid frequency regulation[D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [19] 王彩霞,李琼慧,雷雪姣. 储能对大比例可再生能源接入电网的调频价值分析[J]. 中国电力,2016,49(10):148-152.
WANG Caixia, LI Qionghui, LEI Xuejiao. Methodology for analyzing the value of energy storage to power system frequency control in context of high shares of renewable energy[J]. Electric Power, 2016, 49(10): 148-152.

- [20] 汤杰,李欣然,黄际元,等. 以净效益最大为目标的储能电池参与二次调频的容量配置方法[J]. 电工技术学报,2019,34(5):77-86.
TANG Jie, LI Xinran, HUANG Jiyuan, et al. Capacity allocation of BESS in secondary frequency regulation with the goal of maximum net benefit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 77-86.
- [21] ANDRÉS G, ANDONI S, MILO A, et al. Sensitivity analysis of the storage system sizing for solar plants in energy and reserve markets[C]//International Conference on the European Energy Market. Lodz, Poland: IEEE, 2018: 1-5.
- [22] HAUNG Q, XU Y, COURCOUBETIS C. Financial incentives for joint storage planning and operation in energy and regulation markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 3326-3339.
- [23] 王良缘,江岳文,王杰. 考虑参与多市场交易的电网侧储能优化配置[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(11): 34-42.
WANG Liangyuan, JIANG Yuewen, WANG Jie. Optimization of grid-side energy storage considering multi-market transaction[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(11): 34-42.
- [24] YAN S, ZHENG Y, HILL D J. Frequency constrained optimal siting and sizing of energy storage[J]. IEEE Access, 2019(7): 91785-91798.
- [25] XU B, WANG Y, DVORKIN Y, et al. Scalable planning for energy storage in energy and reserve markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4515-4527.
- [26] 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.
MEI Jian, ZHANG Jie, LIU Shuangyu, et al. Development status of battery energy storage technology[J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(3): 75-81.
- [27] FURQUAN N, SUHAIL H, PRASHANT T, et al. Comparative review of energy storage systems, their roles, and impacts on future power systems[J]. IEEE Access, 2019(7): 4555-4585.
- [28] 孙春顺,王耀南,李欣然. 飞轮辅助的风力发电系统功率和频率综合控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(29): 111-116.
SUN Chunshun, WANG Yaonan, LI Xinran. Synthesized power and frequency control of wind power generation system assisted through flywheels[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(29): 111-116.
- [29] FOOLADIVANDA D, ROSENBERG C, GARG S. Energy storage and regulation: an analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(4): 1813-1823.
- [30] CAVAZZINI G, HOUELINE J B, PAVESI G, et al. Unstable behavior of pump-turbines and its effects on power regulation capacity of pumped-hydro energy storage plants[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 94(10): 399-409.
- [31] XU B, LI H, CAMPANA P E, et al. Dynamic regulation reliability of a pumped-storage power generating system: effects of wind power injection[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 222(6): 1-11.
- [32] JAVAD M S, MA T, JURASZ J, et al. Solar and wind power generation systems with pumped hydro storage: review and future perspectives[J]. Renewable Energy, 2020, 148(4): 176-192.
- [33] 王承民,孙伟卿,衣涛,等. 智能电网中储能技术应用规划及其效益评估方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 33-41.
WANG Chengmin, SUN Weiqin, YI Tao, et al. Review on energy storage application planning and benefit evaluation methods in smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 33-41.
- [34] CHAZSRRA M, PEREZ-DIAZ J I, GARCIA-GONZALEZ J. Optimal operation of variable speed pumped storage hydropower plants participating in secondary regulation reserve markets[C]//2014 11th International Conference on the European Energy Market (EEM). Krakow, Poland: IEEE, 2014: 1-5.
- [35] HAN Xuebing, LU Lanuang, ZHENG Yuejiu, et al. A review on the key issues of the lithium-ion battery degradation among the whole life cycle-science direct[J]. eTransportation, 2019, 1(8): 1-21.
- [36] FOGGO B, YU N. Improved battery storage valuation through degradation reduction[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 5721-5732.
- [37] LIU Jinqiang, HU Chao. Optimal bidding of Li-ion BESS in regulation markets considering capacity degradation[C]//2020 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC). Chicago, IL, USA: IEEE, 2020: 863-866.
- [38] DU Y, JAIN R, LUKIC S M. Effects of battery degradation on economic viability of energy storage systems participating in regulation markets[C]//2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Chicago, IL, USA: IEEE, 2017: 1-5.
- [39] 陈浩,贾燕冰,郑晋,等. 规模化储能调频辅助服务市场机制及调度策略研究[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 163-174.
CHEN Hao, JIA Yanbing, ZHENG Jin, et al. Research on market mechanism and scheduling strategy of frequency regulation auxiliary service of large-scale energy storage[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 163-174.
- [40] DANIEL F M, JUAN P D, IGNACIO G, et al. Fast frequency control ancillary services: an international review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 120(4): 1-17.
- [41] NGUYEN T A, BYRNE R H, ONCEPCION R J, et al. Maximizing revenue from electrical energy storage in MISO energy & frequency regulation markets[C]//2017 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Chicago, IL, USA: IEEE, 2016: 1-5.
- [42] HE G, CHEN Q, KANG C, et al. Optimal bidding strategy of battery storage in power markets considering performance-based regulation and battery cycle life[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(5): 2359-2367.
- [43] XU B, SHI Y, KIRSCHEN D S, et al. Optimal battery participation in frequency regulation markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6715-6725.
- [44] KAZEMI M, ZRREEIPOUR H. Long-term scheduling of battery storage systems in energy and regulation markets considering battery's lifespan[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6840-6849.
- [45] MOHSENIAN-RAD H. Optimal bidding, scheduling, and deployment of battery systems in California day-ahead energy market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 442-453.
- [46] REZA K, WU Meng. Optimal participation of price-maker battery energy storage systems in energy, reserve and pay as performance regulation markets[C]//2019 North American Power Symposium (NAPS). Wichita, KS, USA: IEEE, 2019: 1-6.
- [47] WANG J, ZHONG H, XIA Q, et al. Robust bidding strategy for microgrids in joint energy, reserve and regulation markets[C]//2017 IEEE PES General Meeting. Chicago, IL, USA: IEEE, 2017: 1-5.
- [48] 王浩浩,陈嘉俊,朱涛,等. 计及储能寿命与调频性能的风储联合投标模型及算法[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 208-217.
WANG Haohao, CHEN Jiajun, ZHU Tao, et al. Joint bidding model and algorithm of wind-storage system considering energy storage life and frequency regulation performance[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 208-217.
- [49] XIE Y, GUO W, WU Q, et al. Robust MPC-based bidding strategy for wind storage systems in real-time energy and regulation markets[J]. International Journal of Electrical Power &

- Energy Systems, 2021, 124(1):1-8.
- [50] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于印发新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)的通知[EB/OL]. (2020-11-02)[2021-01-18]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2020-11/02/content_5556716.htm.
- [51] 何晨颖, 耿天翔, 许晓慧, 等. 利用电动汽车可调度容量辅助电网调频研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22):134-140. HE Chenying, GENG Tianxiang, XU Xiaohui, et al. Research on grid frequency regulation using schedulable capacity of electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22):134-140.
- [52] MOJDEHI M N, GHOSH P, ARDAD M. Energy and cost minimization of bidirectional frequency regulation service by EV following FERC order 755[C]//Power & Energy Society General Meeting. Denver, CO, USA: IEEE, 2015:1-5.
- [53] DONADEE J, ILIC M D. Stochastic optimization of grid to vehicle frequency regulation capacity bids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2):1061-1069.
- [54] HAN S, HAN S, SEZAKI K. Development of an optimal vehicle-to-grid aggregator for frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(1):65-72.
- [55] SORTOMME E, EL-SHARKAWI M A. Optimal scheduling of vehicle-to-grid energy and ancillary services[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1):351-359.
- [56] SORTOMME E, EL-SHARKAWI M A. Optimal combined bidding of vehicle-to-grid ancillary services[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1):70-79.
- [57] WANG R, LI Y, WANG P, et al. Design of a V2G aggregator to optimize PHEV charging and frequency regulation control [C]//2013 IEEE International Conference on Smart Grid Communications. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2013:127-132.
- [58] BAE S, ZHANG H, WANG D, et al. Optimal bidding strategy for V2G regulation services under uncertainty[C]//2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PEGM). Chicago, IL, USA: IEEE, 2017:1-5.
- [59] KARFOPOULOS E L, PANOURGIAS K A, HATZIARGYRIOU N D. Distributed coordination of electric vehicles providing V2G regulation services[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4):2834-2846.
- [60] VATANDOUST B, AHMADIAN A, GOLKA M, et al. Risk-averse optimal bidding of electric vehicles and energy storage aggregator in day-ahead frequency regulation market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3):2036-2047.
- [61] KARFOPOULOS E L, PANOURGIAS K A, HATZIARGYRIOU N D. Distributed coordination of electric vehicles providing V2G regulation services[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4):2834-2846.
- [62] TAN J, WANG L. A game-theoretic framework for vehicle-to-grid frequency regulation considering smart charging mechanism [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5):2358-2369.
- [63] FENG Z, EUGENE L, TONGXIN Z, et al. A marginal equivalent decomposition method and its application to multi-area optimal power flow problems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1):53-61.
- [64] GUO Y, BOSE S, TONG L. On robust tie-line scheduling in multi-area power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4):4144-4154.
- [65] YANG L, XU Y, GU W, et al. Distributionally robust chance-constrained optimal power-gas flow under bidirectional interactions considering uncertain wind power[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2):1722-1735.
- [66] VLADIMIR D, FOPRETTO F, PASCAL V H, et al. Differentially private optimal power flow for distribution grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3):2186-2196.

作者简介:



苏 辉

苏 辉(1979—),男,湖南冷水江人,高级工程师,硕士,主要研究方向为控制理论与控制工程(E-mail:14244161@qq.com);
沈欣炜(1988—),男,福建龙岩人,研究科学家,博士,主要研究方向为主动配电网、综合能源系统和储能优化(E-mail:sxw.tbsi@sz.tsinghua.edu.cn)。

(编辑 李玮)

Review on planning and bidding strategy of energy storage considering frequency regulation

SU Ye¹, SHI Jiantao², ZHANG Jiangfeng¹, GONG Liling², GUO Ye², SHEN Xinwei²

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China;

2. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518000, China)

Abstract: Under the background of achieving “double carbon” goals, the increasing proportion of RESs (Renewable Energy Sources) integrated to power system leads to the system inertia decreasing, meanwhile, the uncertainty of RESs increases the demand of power system for flexible resources. The frequency regulation provided by energy storage can support the system inertia and frequency stability, as well as improve the operation elastic of power system effectively and decrease the system whole operating cost. On this basis, from the perspective of energy storage participating in frequency regulation, the research status from three aspects of the planning for energy storage considering system inertia and economy, the frequency regulation bidding strategy of energy storage stations, and the frequency regulation bidding strategy of electric vehicles are reviewed and concluded respectively. Finally, the key issues in current research are prospected, so that providing a reference for the issues of the planning of energy storage considering frequency regulation and bidding strategy.

Key words: frequency regulation; energy storage; planning; bidding strategy; electric vehicles; electric power systems