



新能源侧储能配置技术研究综述

李相俊, 马会萌, 姜倩

(新能源与储能运行控制国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京 100192)

摘要: 构建以新能源为主体的新型电力系统, 是能源电力行业服务碳达峰、碳中和的重要责任和使命。电网对于新能源的要求逐渐从“友好并网”提升至“友好并网+主动支撑”, 新能源侧标配储能成为大势所趋。储能配置是储能应用领域的前端工作, 目前储能成本仍然较高, 如何实现最优的储能配置是首要需解决的问题。综述并归纳了目前国内外在新能源侧储能应用场景、配置方法及预评估等方面的研究进展, 提出了新能源侧储能配置有待进一步考虑的问题, 并对未来的研究方向进行了展望。

关键词: 新能源侧; 储能系统; 配置方法; 求解算法; 预评估方法

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202109032

0 引言

2020年9月联合国大会上, 国家主席习近平作出了碳排放2030年前达到峰值、2060年前实现碳中和的国际承诺, 以可再生能源为主体的绿色、低碳、清洁能源体系建设是中国乃至全世界的能源战略选择。近年来, 中国新能源规模化快速发展, 截至2020年底, 全国新能源发电累计装机达5.34亿kW, 占全国发电总装机的24.3%。可以预见“十四五”及以后, 中国新能源仍将保持高速发展态势。

新能源发电具有随机波动性、间歇性, 且相较于同步发电机, 不具备阻尼特性。新能源机组的渗透率不断增加, 给电力系统的安全稳定运行带来了严峻挑战^[1]。储能系统具有能量时移^[2]、快速响应及灵活布置等特点, 是促进新能源消纳、提升新能源主动支撑能力的重要技术手段。近年来, 新能源侧配置储能逐渐成为研究热点^[3-5]。目前, 已有超过20个省份从消纳和一次调频角度发文鼓励新能源场站配置储能。伴随“碳达峰 碳中和”的提出, 能源转型的进一步推进, “新能源+储能”将成为新能源发展的主流模式。

收稿日期: 2021-09-06; 修回日期: 2021-11-30。

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(兼顾消纳水平提升与主动支撑电网的新能源电站储能配置关键技术研究, SGJBDK00 ZDJS2100034)。

储能配置是储能应用环节的前期工作。新能源侧的储能配置是以涵盖新能源机组、电站、基地、新能源高比例接入省级电网或区域电网为应用背景, 面向特定应用场景, 以“新能源+储能”达到特定的技术指标或技术经济综合指标为应用目标, 在明确储能系统的控制策略或运行边界下, 开展的储能系统容量优化配置工作。

目前, 国内外在新能源侧储能配置领域已获得许多有价值的阶段性成果。储能配置主要明确应用场景、技术需求分析、应用模式、各应用模式下的技术性目标和经济性目标、技术类型、储能系统的控制策略或运行边界、优化配置模型及求解, 最后通过对储能配置效果进行预评估形成配置工作的闭环。

在技术需求分析阶段, 需要基于应用场景的考核要求、业主要求, 结合政策环境和电力市场环境考虑储能项目的收益途径, 并收集能够描述储能应用场景的历史运行数据或规划数据。

在搭建储能优化配置模型阶段, 基于前述基础数据收资和储能控制策略或运行边界的确定, 提取储能应用的典型工况或构建典型场景集, 以全寿命周期收益最大、项目投资成本最低、储能容量最小等目标中的一个或多个作为优化目标, 在考虑典型工况下储能设备的寿命衰减特性基础上, 搭建储能优化配置模型。如果应用工况需要储能兼具小时级充放电、频繁充放电状态切换、快速功率响应等能力, 采用多种储能技术联合应



用，从提升储能技术对场景需求的响应程度和项目的全寿命周期投资经济性来讲均是有效的技术手段。

在储能优化配置模型的求解阶段，主流的做法是选择适用的智能求解算法或改进的智能求解算法进行求解，或者首先通过对模型做线性化处理或凸化处理，经过处理后的模型，可以直接调用商业求解器进行求解。在储能配置效果的预评估阶段，可采用时序生产模拟方法在年度长时间尺度上评估储能配置比例在促进新能源消纳方面的作用，或搭建控制策略模型，输入基础数据样本，通过仿真储能系统的运行过程评估储能的应用效果，还可以采用经济性评估方法对储能项目的投资经济性进行评估。

本文就目前国内外在各环节的详细进展进行总结分析，以期为该领域的研究人员开展更深入的研究提供理论基础。

1 “新能源+储能”的应用场景

新能源侧的储能技术需求，大多来自新能源电站并网运行规定、电力系统安全稳定导则等相关管理规定^[6-8]。储能的应用场景主要包含机组、电站、省级电网、区域电网 4 个层面，如图 1 所示。

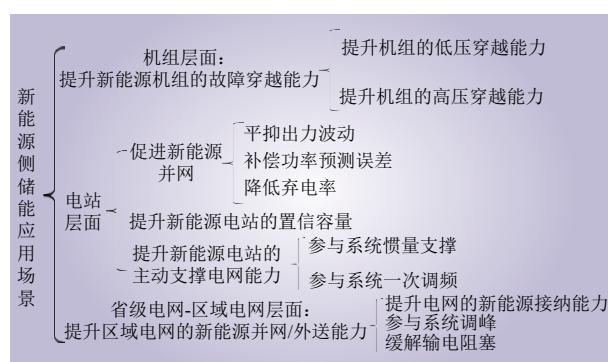


图 1 新能源侧储能应用场景分类

Fig. 1 Classification of energy storage application scenarios on the renewable energy side

1.1 提升新能源机组的故障穿越能力

储能提升新能源故障穿越能力方面主要用于提升机组的高、低电压穿越能力。文献[9-11]基于新能源机组故障穿越要求，对故障前后系统能量变化进行分析，通过仿真不同深度电压跌落故障，研究直流母线侧超级电容器的容量需求。文献[12]提出了用于评价双馈风电系统低电压穿

越能力的并网点电压偏移量指标，再结合经济成本，求解最严重故障情形下的储能配置容量。文献[13-14]以单台风机并网为例，通过仿真对比了超导储能-限流系统与电池储能、静止同步补偿器等装置在提高风电低电压穿越能力方面的性能和经济性。文献[15-16]指出储能系统也可以提升新能源电站的高压穿越能力。

1.2 促进新能源电站并网

以新能源电站或基地为单位配置储能，是在源侧促进新能源并网消纳的主要应用场景，主要通过平抑新能源出力波动、补偿功率预测误差、降低弃电率等应用，提升新能源的并网友好性。

文献[17-21]针对平抑新能源电站出力波动开展储能配置研究，提出通过离散傅立叶变换^[17]、一阶低通滤波、卡尔曼滤波^[18]等算法分析历史数据，结合出力波动率、波动频段^[19]与爬坡能力^[20]等技术指标计算储能容量。在此基础上，文献[22]考虑了电池储能运行状态，如充放电功率平缓、可持续工作性最佳等。文献[23]综合考虑新能源波动平抑效果与补偿预测误差，采用多维分析法开展储能容量优化配置。

文献[24-27]针对储能补偿新能源功率预测误差场景展开储能配置研究。文献[24]考虑了风电功率预测误差和储能系统的荷电状态分布。文献[25]依据风电功率预测标准，为提升风储联合跟踪计划出力精度且控制成本，采用截止正态分布法确定储能配置容量。文献[26]首先利用风电场功率预测误差的标准偏差对风电场出力计划进行优化，然后在跟踪计划允许的误差带宽内，计算储能系统的最优时序出力曲线，在考虑充放电效率、荷电状态等基础上确定储能容量。

文献[28-30]研究降低新能源弃电率模式下的储能配置。文献[28]以全寿命周期内储能净现值最大为优化目标，综合考虑了储能的全寿命周期投资、售电收入、弃电率等约束。文献[29]首先开展光储出力特性分析及储能系统工况特征提取，提出应用工况对储能设备的需求期望值。文献[30]综合考虑风功率的不确定性和弃电率限制，研究储能配置方案。

在上述研究基础上，有学者计及经济性因素，开展多目标储能优化配置。以电池储能为例，结合储能系统寿命损耗^[31-32]、全生命周期成



本、储能年综合费用^[33]等方面建立经济性分析模型。文献[34]计及新能源弃电成本，建立储能投资与风能损失的成本-效益模型。文献[35]针对中国三北地区冬季热电联产机组“以热定电”运行模式造成弃风严重的问题，研究以混合储能解决弃风问题，提出了一种兼顾储能经济效益和功率优化分配的双层优化模型。文献[36]针对“新能源+储能”替代同步发电机开展精细化时序仿真，量化评估新能源配置储能替代火电的经济性。文献[37]建立了混合储能系统与风电功率平滑度间的关联模型，并综合考虑储能系统的技术和经济性能。

与常规电力设备相对固定的使用寿命不同，电池储能的使用寿命与其充放电深度、频次等工况过程量密切相关。因此，在配置储能方案时，考虑具体应用工况下储能的充放电深度、充放电频次的概率统计结果对全寿命周期内储能投资评估的影响非常必要^[38-39]。

针对电池储能深充深放及高频充放电带来的寿命快速损耗问题，通过采用混合储能提升储能投资的经济性^[40-46]。一般采用频段分解算法，如一阶低通滤波、小波、小波包、经验模态分解等^[40]，对混合储能系统的功率进行分配。采用经验模态分解、小波、小波包分解法计算储能系统额定容量^[42-44, 46]。

在新能源电站内配置储能，提升新能源的可调可控性是储能在新能源侧应用研究最多的一个技术方向，一般以新能源电站效益最大化为目标，综合考虑储能应用的技术效果与经济收益。

1.3 提升新能源电站的置信容量

国内外学者采用置信容量来评价新能源发电对系统容量充裕度的贡献^[47-48]。目前中国新能源发展的重大问题在于，新能源仅作为能够提供一定电量价值的替补能源，如何评估新能源的容量价值以及提高其在电网中电力平衡方面的作用是新能源发展突破瓶颈的关键^[49]。而在新能源电站内合理配置储能系统，可有效提升“新能源+储能”的置信容量。

在Wisconsin东南部电网，通过为100 MW光伏电站配置35 MW/100 MW·h储能系统，将光伏电站夏季的有效负荷承载能力由49%提升至65%^[50]，证明了储能改善光伏电站置信容量方

面的技术有效性。文献[51]以提升风电场置信容量为例，通过后验式置信容量评估方法，就不同容量储能对风电系统置信容量的提升效果进行灵敏度分析，从而给决策者提供储能配置依据。文献[49]采用类似方法，通过调整储能配置容量，对风储系统的置信容量进行评估，通过试数法找到合理的储能配置方案。文献[52-53]以满足电力平衡需求为目标，确定所需风光储发电系统的整体置信容量与常规机组容量，计及自然资源的随机波动，并考虑常规机组的随机停运，借助蒙特卡罗仿真计算达到等置信容量所需的风光储机组组合，并通过风光储容量优化模型，选出使全生命周期总投资成本最优的风、光、储容量配置。

1.4 提升新能源电站的主动支撑电网能力

随着低惯量、弱支撑的新能源机组在电网中的比例不断增加，系统转动惯量大幅降低，关键运行指标（频率、电压）的支撑和调节能力逐步下降，系统安全稳定运行面临巨大风险。文献[54-56]研究了参与系统惯量支撑的储能容量配置问题。文献[54]提出可参考系统频率变化时转子能量的变化情况配置储能。文献[55]以使风电场具备类似于传统机组的惯量支撑能力为目标，提出基于非参数核密度估计的储能容量配置方法。文献[56]提出了基于简化的系统频率响应模型的储能容量优化计算方法。文献[57-58]研究了参与系统惯量支撑和一次调频的储能容量配置问题。文献[57]提出依据系统理想动态频率特性，例如惯量系数、下垂系数等配置储能的方法。文献[58]提出一种根据新能源电站历史输出功率数据，通过设置置信水平确定储能容量的方法。储能系统在提升新能源主动支撑电网能力方面的研究主要集中在参与惯量支撑和一次调频。因为储能不是实现新能源电站主动支撑电网能力的唯一手段，所以技术效果和经济性均是储能配置需着重考虑的因素。

1.5 提升区域电网的新能源并网/外送能力

文献[59]分析了新能源并网对系统调峰的影响，构建了协调风电有功功率与负荷波动的储能充放电控制策略，并在此基础上考虑风储合成出力指标，以储能容量最小为目标，构建了基于时序仿真原理的储能容量优化配置模型。文献[60]建立了双层网储联合规划模型，外层考虑系统稳定指标和运行指标，决策变量为储能的配置地点



和最优配置功率，内层是考虑机组组合的输电网扩容模型。文献[61]采用双层决策模型，建立了储能提高区域电网风电接入的规划和运行优化模型，同时在规划和运行两个时间尺度下考虑储能优化的差异性。文献[62]充分考虑储能系统的运行特性，以线路、储能等效年投资成本、年弃风成本最小化为目标，面向提高风电接纳能力，建立了储能与输电网联合规划模型。文献[63]以储能辅助调峰为场景，提出兼顾经济性和灵活性的储能辅助调峰优化配置方法。

从以上文献可知，储能的新能源侧的配置技术研究，在纵向深度上涵盖保证机组不脱网-促进新能源友好并网-提升新能源主动支撑能力，呈现出随新能源占比增长，电网对新能源发电的技术要求不断演化，储能的应用功能逐步升级的发展趋势。

最早的应用场景，如提升新能源电站运行安全性、促进新能源并网等已较为成熟，储能配置方法已实现工程化应用，而后续出现的应用场景，还有待进一步深入研究，尤其是提升新能源电站的主动支撑电网能力，是伴随新能源从补充电源向主力电源过渡过程中发展起来的新的应用需求。

在不同场景下，储能的应用模式较多，还存在多个模式联合应用的情况，储能配置模型需要综合考虑技术性与经济性。技术性包括“新能源+储能”联合出力满足场景考核要求、储能系统连续可靠运行；经济性包括在全寿命周期时间尺度上的计算储能系统的投资成本与收益。

2 储能配置方法

2.1 配置模型

风光资源具有短时间尺度、日、季、年等不同时间尺度的波动性，均将影响新能源侧对于储能的功率支撑能力、容量支撑能力的需求。新能源侧储能配置需要兼顾单个或多个应用场景下的技术指标和经济指标，需要考虑新能源出力特征及时空互补特性，考虑不同储能技术的动态响应特性及互补特性，有的场景还需要涵盖新能源预测误差、调度计划不确定性等多重不确定因素。如何保证储能配置结果的工程适用性，是一个涵盖多时间尺度多目标多约束的复杂问题。

多种规划理论、方法被用于新能源领域的储

能配置，目前主流的储能配置方法可分为基于时序运行仿真的配置方法、确定性配置方法、不确定性配置方法，如图2所示。

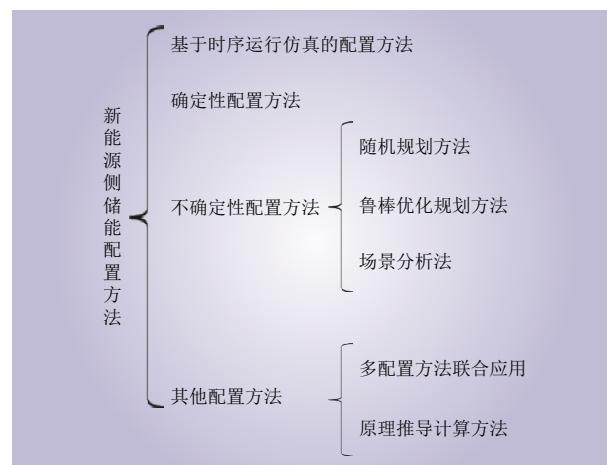


图 2 主要的新能源侧储能配置方法归纳
Fig. 2 Summary of main energy storage configuration methods on the renewable energy side

2.1.1 基于时序运行仿真的配置方法

文献[17-20, 36, 40-45, 64]均采用基于时序运行仿真的配置方法，开展追求技术目标的单目标配置。基于时序运行仿真的配置方法，首先需要获取新能源电站的历史运行数据，另据储能应用场景不同，如在补偿新能源预测误差场景下，还需要对应时段的功率预测数据等，根据应用场景明确“新能源+储能”联合输出技术指标，制定储能系统充放电控制策略，在考虑充放电效率、SOC运行范围、电量平衡等约束条件下，仿真计算出储能系统的时序功率需求数据，在考虑置信区间或权衡储能投资和应用效果后，基于时序功率需求数据样本，计算储能系统的额定功率和额定容量。

2.1.2 确定性配置方法

确定性配置方法[37, 45, 59, 61, 65]是建立在对数据样本进行确定性假设的基础上，基于典型时段的新能源历史运行数据、调度数据、网侧数据等，以储能系统的额定功率、额定容量，有时还包含储能系统的接入位置作为决策变量，建立技术性或技术/经济联合优化模型，再对应选择适用的智能求解算法，计算得到储能优化配置方案。

2.1.3 不确定性配置方法

新能源出力、功率预测、电网消纳能力等方



面的不确定性带来了储能需求的不确定性，针对这些不确定性，不确定性规划理论被用来解决储能配置问题，不确定性规划包括随机规划、模糊规划、鲁棒优化等方法。其中随机规划和鲁棒优化被较多地应用于新能源侧的储能配置问题。

通过在新能源电站配置储能使“新能源+储能”完全可控既不经济也不现实，机会约束规划是将传统优化中完全满足约束软化为满足约束条件的概率高于某一置信水平的优化方法^[66]。文献[67-68]基于机会约束模型开展区域电网的储能配置研究，置信水平体现了符合机会约束的最小概率与管理者的风险承担水平。

场景分析法是将连续的随机变量的概率分布模型转化为离散场景的集合，用尽量少的场景逼近原随机变量的分布，并在各场景下求解原问题，从而将随机优化问题转化为确定性优化问题^[63, 69-72]，简化对随机优化问题的求解。文献[51]针对储能配置过程中需要考虑负荷和风电出力的随机性，采用随机场景生成和削减方法构建了多个涵盖负荷和风电随机性的典型年场景。文献[21]结合多场景随机规划与基于序贯蒙特卡罗的运行模拟，采用考虑风电出力和负荷典型场景集的随机规划模型，计算风电场的储能配置容量。文献[73-75]分别基于场景树、机会约束方法融合风电出力的不确定性，以提升系统的灵活性为目标，研究了大电网中储能的最优投资方案。

文献[76]基于鲁棒优化理论构建可再生电源出力的不确定性场景集，在分时电价下以储能系统全寿命周期成本、系统总发电成本、联络线功率波动最小等为目标，开展储能优化规划。文献[77]采用不确定性集合刻画负荷需求和风电出力的随机特征，在极端场景下建立了自适应 min-max-min 鲁棒规划模型，并基于此开展储能和输电网结构的优化研究。

在已获得大量数据样本的基础上，采用聚类算法抽取典型场景集，是提升计算速度，并保证储能配置涵盖充足不确定性特征的常用方法。文献[62]同时考虑风电与负荷的时序性、风电波动性及与负荷的相关性，采用改进 K-means 聚类对风电与负荷数据进行分析，对数据样本进行聚类，得到一组全年负荷与风电典型时序场景集。文献[78]基于云模型理论将储能充放电功率的概

率分布分解成若干个正态云模型的叠加，基于 K-means 聚类算法从储能运行曲线中提取典型充放电工况曲线，将其作为基础数据输入储能容量优化模型。

2.1.4 其他配置方法

文献[37, 59]将时序运行仿真与确定性配置方法联合使用，文献[79-80]采用概率分布鲁棒联合机会约束规划模型描述储能配置问题，文献[79]综合考虑了含风电的电力系统鲁棒备用规划与调度问题。

文献[54-56]以提升新能源电站惯量支撑能力和参与系统一次调频为应用场景，参照常规机组的一次调频技术原理，以保证新能源电站并网前后系统的等效惯量和一次调频能力不变为应用目标，基于能量守恒原理，通过公式推导计算储能需求。

2.2 求解算法

储能优化配置的决策变量往往为连续变量，追求单目标或多目标，约束条件一般包括线性约束、非线性约束、等式约束、不等式约束等，建立的配置模型往往为多目标、非线性数学模型，常规寻优算法计算复杂，计算速度和收敛性均达不到要求^[61]。为了解决这个问题，多采用遗传算法^[37, 40, 61]、粒子群优化算法^[39]、飞蛾扑火算法^[75]、模拟退火等智能算法及其改进算法。智能算法可以有效求解非线性优化问题，但可能存在个体单一、易早熟或陷入局部最优等缺点，如果基于的数据样本较大，还存在求解时间过长，甚至难以求解的问题。为解决这些问题，将目标函数、约束条件线性化处理^[60]，将多目标问题转化为单目标问题均是有效的解决办法。

另外，为获得全局最优解，同时保证在可接受时间内获得结果，在储能配置模型搭建后，可首先检验模型是否为凸函数，若不是，可采用多种近似、松弛手段实现凸化，使之转化为凸函数，或松弛部分约束条件，实现新的可行域包含原可行域，并为凸集。一般来说，大多数凸优化问题都可以直接调用商业求解器来求解。文献[75]通过将鲁棒规划模型拆解为主模型和从模型，使得非凸问题转变为可直接使用 CPLEX 求解的线性规划问题。文献[77]首先将基于鲁棒联合机会约束建立的非凸模型转化为半定规划问题，采用



SDPT3 求解器可有效求解。

从以上综述可知，基于时序运行仿真的配置方法和确定性配置方法的计算结果高度基于所采用的离散数据样本，而新能源发电的不确定性、新能源功率预测的不准确性、调度计划的不确定性等造成储能配置问题包含多重不确定性因素，采用确定性数据样本会造成储能配置结果对于工况适用的局限性。所以，采用确定配置方法时，数据样本适宜采用覆盖 8 760 h 的年度时序数据，以尽可能多地涵盖不同气象条件、不同电网消纳能力下储能的不确定性工况特征。

新能源侧的储能配置是包含多重不确定性的决策问题，如何处理其不确定性是保证配置结果工程适用性的核心，目前研究主要涉及的方法有采用机会约束软化约束边界、采用场景分析法构建离散场景集合将随机优化问题转化为确定性优化问题、采用聚类算法抽取典型场景等，主要思路是首先将不确定性问题转化为确定性问题，然后再进行求解。

在优化求解方面，多种智能算法被用于求解储能优化配置问题，将非线性问题线性化处理、多目标问题转换为单目标问题、非凸问题凸优化等均是有效的简化求解过程的方法。

3 储能配置的预评估方法

在计算得到储能配置结果后，分析新能源侧储能投运后的运行效果和投资经济性是对储能配置结果的预检验，也是闭环配置环节的重要步骤。

目前储能应用主要是促进新能源消纳，生产模拟和经济性评估是对储能应用效果和投资经济性的预评估主流的方法。

在采用时序生产模拟和随机生产模拟^[81-83]评估储能对于促进新能源消纳作用方面，文献[82]提出了基于随机生产模拟改进新能源消纳能力评估方法，为评估储能年度/跨年度长时间尺度上促进新能源消纳的能力提供了快速计算方法。文献[83]针对多端柔性直流电网，提出一种基于时序生产模拟仿真的运行经济性评估方法，评估不同新能源和抽蓄配置方案下，张北柔直电网的运行经济性，为工程建设决策提供重要依据。

在储能项目的经济性评估方面，文献[84]指

出储能经济性评估需预判储能设备的使用寿命、预期现金流等，而储能设备的使用寿命与设备的技术特性、应用工况等因素强相关。文献[85]分析了储能系统投资成本的敏感性。文献[86]构建了负荷侧、风电侧的储能价值估算模型，对比分析了储能装置由负荷侧转移到风电侧的经济性问题。文献[87]指出基于折旧法计算损耗成本会低估储能的运行费用，将导致储能容量配置偏大，而定量计算储能的损耗成本，将会使得储能的配置结果更符合实际需求。文献[88]介绍了几个典型的储能经济性评价工具，包括储能效益评估软件、基于储能平准化成本的经济测算软件、储能经济测算指数。文献[89]提出在促进可再生能源消纳领域，储能的作用包括增加收入、提高电网稳定性、降低成本、节能减排，储能应用带来的效益包括直接效益和间接效益。文献[90]开展了风储联合应用的经济、社会、环境效益综合分析，提出储能参与风电消纳可降低弃风率、促进节能减排、提高风力发电的综合经济性，并且可以产生吸引投资、提升地区生产总值、带动交通及技术发展等社会价值。文献[91]构建了基于外部性理论的储能系统综合价值测算模型，包括储能系统自身价值，储能系统给发电企业、电网公司、电力用户、环境带来的外部价值，并以储能系统接入光伏电站为例，分别从投资者、社会整体效益角度，研究储能系统应用在可再生能源发电侧的经济性，并进行了盈亏平衡分析，经济性分析结果显示储能系统的外部性收益占年收益比例较大。文献[92]提出了储能系统全寿命周期成本分析方法，全面考虑了电源装机、节能减排等方面的综合效益，包括通过减少脱网考核、限光时段考核、有功功率控制子站投运率考核产生的收益和增加上网电量带来的收益。

从以上综述来看，在得到新能源侧储能初步配置结果后，采用生产模拟方法评估储能应用效果，采用经济性分析方法评估储能的投资收益，均是有效的储能配置效果预评估手段。并且通过预评估储能应用效果，还可以反馈迭代优化储能配置过程，提升储能配置结果的工程适用性。

特别需要注意的是，在开展储能配置经济性分析时需对包括储能运行效果、市场环境、储能的运营模式及收益构成、储能运行工况、全寿命



周期成本与衰减过程、系统残值等边界条件全面考虑，如果在预评估阶段，对于上述因素考虑不全面，可能导致对于项目投资回报的预估出现偏差。

4 新能源侧储能配置方法研究展望

限于储能的技术发展水平和成本水平，目前储能的应用主要面向4个服务纬度和时间尺度：毫秒、秒级暂态稳定问题（主动支撑电网能力）、数分钟级系统可调节能力差（促进新能源消纳）、小时级区域调峰能力不足（参与系统调峰）、更长时间的通道外送潜力未完全发挥（缓解输电阻塞）。通过对现有新能源侧储能配置技术的归纳与分析，认为现有技术尚有如下不足：（1）储能应用场景设定较为单一，在储能成本仍然较高的情况下，不能保证项目的投资经济性；（2）无法支持以全年为周期，兼顾长期消纳和短时主动支撑的储能需求分析；（3）没有考虑风储、光储、风光储多场景的差异化需求；（4）目前的研究都集中在数个小时时间尺度内，尚未在更长时间尺度上探讨储能的应用问题。

伴随双碳目标的提出，新能源将继续规模化快速发展，新能源消纳压力将越来越大。同时多种储能技术快速迭代和成本持续下降，从技术供给侧到需求侧双向将推动新能源侧储能应用需求进一步演化。对新能源侧储能配置方法进行如下展望。

（1）在新能源高占比的新背景下，系统将无法承受规模化新能源对于系统灵活性调节资源的过度占用，新能源与常规电源共担系统安全稳定运行责任和义务是未来的技术发展趋势，需要开展兼顾消纳与主动支撑电网的储能配置方法研究。在兼顾消纳与主动支撑电网场景下，储能将面向移峰填谷+功率预测补偿24 h持续，惯量、频率、电压支撑需求随机高频出现的复杂过程，需要储能同时具备毫秒级的响应速度、小时级的持续充放电能力，同时在充放电状态频繁切换工况下具备较长的使用寿命，才能保证项目的投资经济性，需要开展混合储能对于复杂储能工况的匹配研究和容量优化配置；

（2）中国新能源发展过程中由地域、资源禀赋、负荷、网架结构等形成了多样化差异化发展

形态，需要开展考虑差异化发展背景的储能配置方法研究；

（3）结合源网荷发展趋势，研究新能源侧在电站层、区域电网层应用储能的联合配置方法；

（4）伴随储能成本下降和新能源侧对储能技术需求的演化，新能源侧储能应用的时间尺度将从日内扩展至周、月、跨季节乃至更长时间和具备空间运输能力的储能形式，如新能源电解水制氢等，储能需求具有超大容量、超长时间尺度等特征，需要开展考虑长时间、大容量、跨季节调峰的储能需求及兼顾多时间尺度的储能配置方法研究；

（5）探讨双碳、新型电力系统发展背景下的新能源侧储能技术需求，考虑碳排指标，开展计及经济效益、社会效益、环境效益等综合效益的储能配置方法研究；

（6）随着储能的发展以及市场行为驱动，将催生出众多新模式新业态，结合储能领域政策机制的变化形势，需要开展适应新业态的储能配置方法研究。

5 结论

本文从新能源侧储能应用需求出发，介绍了包含提升新能源电站运行安全性、促进新能源并网、提升新能源电站的主动支撑电网能力等储能应用场景及在各场景下国内外的储能配置方法研究现状。然后，从方法论角度出发，从数学模型及模型求解角度归纳总结了目前常用的多种储能配置方法，包括基于时序运行仿真的配置方法、确定性配置方法、不确定性配置方法等，并探讨了各种配置方法使用过程中的注意事项或适用范围，并在优化求解算法部分介绍了不同配置模型适用的求解算法及有效的简化处理方法。最后，从中国新能源继续规模化快速发展的背景出发，对储能配置技术的后续研究方向进行了展望。

参考文献：

- [1] 应益强,王正风,吴旭,等.计及新能源随机特性的电网深度调峰多目标策略[J].电力系统保护与控制,2020,48(6): 34–42.
- YING Yiqiang, WANG Zhengfeng, WU Xu,*et al.* Multi-objective strategy for deep peak shaving of power grid considering uncertainty



- of new energy[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(6): 34–42.
- [2] BARTON J P, INFIELD D G. Energy storage and its use with intermittent renewable energy[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2004, 19(2): 441–448.
- [3] ZHAO H R, WU Q W, HU S J, et al. Review of energy storage system for wind power integration support[J]. *Applied Energy*, 2015, 137: 545–553.
- [4] YANG Y Q, BREMNER S, MENICTAS C, et al. Battery energy storage system size determination in renewable energy systems: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 91: 109–125.
- [5] 席星璇, 熊敏鹏, 袁家海. 风电场发电侧配置储能系统的经济性研究 [J]. 智慧电力, 2020, 48(11): 16–21, 47.
XI Xingxuan, XIONG Minpeng, YUAN Jiahai. Economy analysis of energy storage system in wind farm generation side[J]. *Smart Power*, 2020, 48(11): 16–21, 47.
- [6] 国家能源局华北监管局. 华北区域并网发电厂辅助服务管理实施细则和并网运行管理实施细则: 华北监能市场〔2019〕254号[R]. 2019.
- [7] 国家能源局. 电力系统网源协调技术规范: DL/T 1870—2018[S]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
- [8] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电力系统安全稳定导则: GB 38755—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [9] 刘巨, 姚伟, 侯云鹤, 等. 一种储能改善低电压穿越期间风电场注入电流特性的致稳策略 [J]. *电工技术学报*, 2016, 31(14): 93–103.
LIU Ju, YAO Wei, HOU Yunhe, et al. Stability control for improving the characteristic of wind farm injection current during low voltage ride-through using energy storage system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(14): 93–103.
- [10] 朱鑫, 晁勤, 邱先智, 等. 永磁直驱风力机低电压运行储能容量取值研究 [J]. *电网与清洁能源*, 2015, 31(3): 106–112.
ZHU Xin, CHAO Qin, QIU Xianzhi, et al. Research on energy storage capacity allocation for low voltage operation of the permanent magnetic synchronous generator[J]. *Power System and Clean Energy*, 2015, 31(3): 106–112.
- [11] 田利, 张阳, 李德鑫. 提升低电压穿越能力的功率型储能系统容量配置及控制策略 [J]. *电力建设*, 2016, 37(8): 84–89.
TIAN Li, ZHANG Yang, LI Dexin. Power-type storage system capacity configuration and control strategy for enhancing LVRT ability[J]. *Electric Power Construction*, 2016, 37(8): 84–89.
- [12] 王树军, 刘健, 赵国良, 等. 用于提高双馈风力机低电压穿越能力的超级电容储能容量配置及控制策略研究 [J]. *电器与能效管理技术*, 2019(9): 65–70.
WANG Shujun, LIU Jian, ZHAO Guoliang, et al. Research on the sizing and control scheme of super capacitor system for LVRT of double-fed wind generator[J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2019(9): 65–70.
- [13] KARAIPOOM T, NGAMROO I. Optimal superconducting coil integrated into DFIG wind turbine for fault ride through capability enhancement and output power fluctuation suppression[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2015, 6(1): 28–42.
- [14] NGAMROO I. Improving FRT capability and alleviating output power of DFIG wind turbine by SMES-FCL[C]/2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD). Shanghai, China: IEEE, 2015: 155–156.
- [15] 肖彭璠. 海上双馈风电机组高电压穿越策略研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
XIAO Pengyao. The research of high voltage ride through strategy of offshore DFIG-based wind turbine[D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [16] 刘金虹, 张辉, 李洁, 等. SMES 用于双馈发电机故障穿越的研究 [J]. *电工技术学报*, 2015, 30(22): 199–205.
LIU Jinhong, ZHANG Hui, LI Jie, et al. Application of SMES to improve fault voltage ride through capability of doubly fed induction generator[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(22): 199–205.
- [17] 苏小林, 谭逸雪, 阎晓霞, 等. 提高风电并网系统低电压穿越能力的 SMES-FCL 容量优化 [J]. *南方电网技术*, 2018, 12(8): 30–36.
SU Xiaolin, TAN Yixue, YAN Xiaoxia, et al. SMES-FCL capacity optimization for improving LVRT ability of wind farm integrated system[J]. *Southern Power System Technology*, 2018, 12(8): 30–36.
- [18] 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. Sizing of energy storage systems for output smoothing of renewable energy systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(16): 1–8.
- [19] LI X. Fuzzy adaptive Kalman filter for wind power output smoothing with battery energy storage system[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2012, 6(5): 340–347.
- [20] 魏远, 张欢畅, 黄正勇, 等. 面向风电光伏并网的储能容量配置频谱分析方法 [J]. *南方电网技术*, 2019, 13(3): 12–17, 32.
WEI Yuan, ZHANG Huanchang, HUANG Zhengyong, et al.



- Spectrum analysis method of energy storage capacity configuration used for grid-connected wind power and photovoltaic power[J]. *Southern Power System Technology*, 2019, 13(3): 12–17,32.
- [21] KARGARIAN A, HUG G. Optimal sizing of energy storage systems: a combination of hourly and intra-hour time perspectives[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2016, 10(3): 594–600.
- [22] 吴玮坪, 胡泽春, 宋永华. 结合随机规划和序贯蒙特卡洛模拟的风电场储能优化配置方法 [J]. *电网技术*, 2018, 42(4): 1055–1062.
WU Weiping, HU Zechun, SONG Yonghua. Optimal sizing of energy storage system for wind farms combining stochastic programming and sequential Monte Carlo simulation[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(4): 1055–1062.
- [23] 赵书强, 刘大正, 谢宇琪, 等. 基于相关机会目标规划的风光储联合发电系统储能调度策略 [J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(14): 30–36,53.
ZHAO Shuqiang, LIU Dazheng, XIE Yuqi, et al. Scheduling strategy of energy storage in wind-solar-battery hybrid power system based on dependent-chance goal programming[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(14): 30–36,53.
- [24] 石涛, 张斌, 晁勤, 等. 兼顾平抑风电波动和补偿预测误差的混合储能容量经济配比与优化控制 [J]. *电网技术*, 2016, 40(2): 477–483.
SHI Tao, ZHANG Bin, CHAO Qin, et al. Economic storage ratio and optimal control of hybrid energy capacity combining stabilized wind power fluctuations with compensated predictive errors[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(2): 477–483.
- [25] BLUDSZUWEIT H, DOMÍNGUEZ J A. Probabilistic energy storage sizing for reducing wind power forecast uncertainty[J]. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 2010, 1(8): 1153–1157.
- [26] 杨水丽, 李建林, 惠东, 等. 用于跟踪风电场计划出力的电池储能系统容量优化配置 [J]. *电网技术*, 2014, 38(6): 1485–1491.
YANG Shuili, LI Jianlin, HUI Dong, et al. Optimal capacity configuration of battery energy storage system to track planned output of wind farm[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(6): 1485–1491.
- [27] 杨青斌, 袁铁江, 吐尔逊·伊不拉音, 等. 基于风电场出力计划的储能系统容量优化 [J]. *可再生能源*, 2013, 31(11): 43–47.
YANG Qingbin, YUAN Tiejiang, TUERXUN Yibulayin, et al. The storage system capacity optimization based on output plan of wind power[J]. *Renewable Energy Resources*, 2013, 31(11): 43–47.
- [28] 靳文涛, 李蓓, 谢志佳. 电池储能系统在跟踪风电计划出力中的需求分析 [J]. *储能科学与技术*, 2013, 2(3): 294–299.
JIN Wentao, LI Bei, XIE Zhijia. An analysis for the need of a battery energy storage system in tracking wind power schedule output[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2013, 2(3): 294–299.
- [29] 孙培锋, 冯云岗, 卢海勇, 等. 新能源发电工程储能系统容量/功率优化配置 [J]. *上海节能*, 2021(1): 98–103.
SUN Peifeng, FENG Yungang, LU Haiyong, et al. Capacity and power optimization method of energy storage device in new energy power generation project[J]. *Shanghai Energy Conservation*, 2021(1): 98–103.
- [30] 李德鑫, 王佳蕊, 张家郡. 降低弃光率的光伏储能系统需求研究 [J]. *电器与能效管理技术*, 2020(10): 36–40,63.
LI Dexin, WANG Jiarui, ZHANG Jiajun. Research on demand of photovoltaic energy storage system for reducing abandonment rate[J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2020(10): 36–40,63.
- [31] 李军徽, 付英男, 李翠萍, 等. 提升风电消纳的储热电混合储能系统经济优化配置 [J]. *电网技术*, 2020, 44(12): 4547–4557.
LI Junhui, FU Yingnan, LI Cuiping, et al. Economic optimal configuration of hybrid energy storage system for improving wind power consumption[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(12): 4547–4557.
- [32] MOGHADDAM I N, CHOWDHURY B H, MOHAJERYAMI S. Predictive operation and optimal sizing of battery energy storage with high wind energy penetration[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(8): 6686–6695.
- [33] NGUYEN C L, LEE H H, CHUN T W. Cost-optimized battery capacity and short-term power dispatch control for wind farm[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2015, 51(1): 595–606.
- [34] ZHAO Q, WU K N, KHAMBADKONE A M. Optimal sizing of energy storage for PV power ramp rate regulation[C]/2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Milwaukee, WI, USA: IEEE, 2016: 1–6.
- [35] 杨立滨, 曹阳, 魏輝, 等. 计及风电不确定性和弃风率约束的风电场储能容量配置方法 [J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(16): 45–52.
YANG Libin, CAO Yang, WEI Wei, et al. Configuration method of energy storage for wind farms considering wind power uncertainty and wind curtailment constraint[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(16): 45–52.
- [36] 叶瑞丽, 郭志忠, 刘瑞叶, 等. 基于风电功率预测误差分析的风电场储能容量优化方法 [J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(16): 28–34.
YE Ruili, GUO Zhizhong, LIU Ruiye, et al. A method for designing optimal energy storage system based on analysis of wind power forecast error[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(16): 28–34.



- [37] 任大伟, 金晨, 侯金鸣, 等. 基于时序运行模拟的新能源配置储能替代火电规划模型 [J]. 中国电力, 2021, 54(7): 18–26.
REN Dawei, JIN Chen, HOU Jinming, et al. Research on the planning model and method of renewable energy with energy storage replacing thermal power based on refined time series operation simulation[J]. Electric Power, 2021, 54(7): 18–26.
- [38] 张坤, 毛承雄, 谢俊文, 等. 风电场复合储能系统容量配置的优化设计 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 79–87, 13.
ZHANG Kun, MAO Chengxiong, XIE Junwen, et al. Optimal design of hybrid energy storage system capacity for wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 79–87, 13.
- [39] 马会萌, 李蓓, 李建林, 等. 面向经济评估的电池储能系统工况特征量嵌入性研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 70–77.
MA Huimeng, LI Bei, LI Jianlin, et al. Embedded research on working condition characteristics of battery energy storage system for economic evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 70–77.
- [40] 栗然, 党磊, 周鸿鹄, 等. 基于费用效率法的风电场混合储能容量优化配置 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 55–62.
LI Ran, DANG Lei, ZHOU Honghu, et al. Capacity optimization disposition of hybrid energy storage in wind field based on cost efficiency model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 55–62.
- [41] 马速良, 马会萌, 蒋小平, 等. 基于 Bloch 球面的量子遗传算法的混合储能系统容量配置 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 592–599.
MA Suliang, MA Huimeng, JIANG Xiaoping, et al. Capacity configuration of the hybrid energy storage system based on Bloch spherical quantum genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 592–599.
- [42] WANG X Y, YUE M, MULJADI E, et al. Probabilistic approach for power capacity specification of wind energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(2): 1215–1224.
- [43] 韩晓娟, 田春光, 程成, 等. 基于经验模态分解的混合储能系统功率分配方法 [J]. 太阳能学报, 2014, 35(10): 1889–1896.
HAN Xiaojuan, TIAN Chuguang, CHENG Cheng, et al. Power allocation method of hybrid energy storage system based on empirical mode decomposition[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2014, 35(10): 1889–1896.
- [44] 马速良, 蒋小平, 马会萌, 等. 平抑风电波动的混合储能系统的容量配置 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 108–114.
MA Suliang, JIANG Xiaoping, MA Huimeng, et al. Capacity configuration of the hybrid energy storage system for wind power smoothing[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 108–114.
- [45] 吴振威, 蒋小平, 马会萌, 等. 用于混合储能平抑光伏波动的小波包—模糊控制 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 317–324.
WU Zhenwei, JIANG Xiaoping, MA Huimeng, et al. Wavelet packet-fuzzy control of hybrid energy storage systems for PV power smoothing[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 317–324.
- [46] 张晴, 李欣然, 杨明, 等. 净效益最大的平抑风电功率波动的混合储能容量配置方法 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 40–48.
ZHANG Qing, LI Xinran, YANG Ming, et al. Capacity determination of hybrid energy storage system for smoothing wind power fluctuations with maximum net benefit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 40–48.
- [47] JIANG Q Y, HONG H S. Wavelet-based capacity configuration and coordinated control of hybrid energy storage system for smoothing out wind power fluctuations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1363–1372.
- [48] MADAENI S H, SIOSHANSI R, DENHOLM P. Estimating the capacity value of concentrating solar power plants with thermal energy storage: a case study of the southwestern United States[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1205–1215.
- [49] BILLINTON R, KARKI R, GAO Y, et al. Adequacy assessment considerations in wind integrated power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2297–2305.
- [50] 吴驰. 捆绑储能的间歇式能源置信容量评估 [D]. 南京: 东南大学, 2015.
WU Chi. Capacity assessment of intermittent energy considering energy storage[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [51] ESMALI A, NASIRI A. A case study on improving ELCC by utilization of energy storage with solar PV[C]//2009 35 th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics. Porto, Portugal. IEEE, 2009: 3957–3962.
- [52] 蔡霁霖. 考虑间歇式能源容量价值的储能规划关键技术研究 [D]. 南京: 东南大学, 2019.
CAI Jilin. Study on energy storage sizing considering the capacity credit of intermittent energy resources[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [53] 何俊, 邓长虹, 徐秋实, 等. 基于等可信容量的风光储电源优化配置方法 [J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3317–3324.
HE Jun, DENG Changhong, XU Qiushi, et al. Optimal configuration of distributed generation system containing wind PV battery power



- sources based on equivalent credible capacity theory[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3317–3324.
- [54] 何俊, 邓长虹, 徐秋实, 等. 风光储联合发电系统的可信容量及互补效益评估 [J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3030–3036.
HE Jun, DENG Changhong, XU Qiushi, et al. Assessment on capacity credit and complementary benefit of power generation system integrated with wind farm, energy storage system and photovoltaic system[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3030–3036.
- [55] 刘巨, 姚伟, 文劲宇, 等. 一种基于储能技术的风电场虚拟惯量补偿策略 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1596–1605.
LIU Ju, YAO Wei, WEN Jinyu, et al. A wind farm virtual inertia compensation strategy based on energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1596–1605.
- [56] 苗福丰, 唐西胜, 齐智平. 储能参与风电场惯性响应的容量配置方法 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20): 6–11,83.
MIAO Fufeng, TANG Xisheng, QI Zhiping. Capacity configuration method for wind power plant inertia response considering energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 6–11,83.
- [57] YE H, TANG Y N, LIU Y, et al. Transient frequency response model-based energy storage optimum size in power systems[C]//2017 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI). Beijing, China. IEEE, 2017: 65–71.
- [58] KNAP V, CHAUDHARY S K, STROE D I, et al. Sizing of an energy storage system for grid inertial response and primary frequency reserve[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3447–3456.
- [59] 杨丘帆, 王琛淇, 魏俊红, 等. 提升电网惯性与一次调频性能的储能容量配置方法 [J]. 电力建设, 2020, 41(10): 116–124.
YANG Qiufan, WANG Chenqi, WEI Junhong, et al. Capacity allocation of energy storage system for improving grid inertia and primary frequency regulation[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(10): 116–124.
- [60] 袁铁江, 车勇, 孙谊斌, 等. 基于时序仿真和GA的风储系统储能容量优化配比 [J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2122–2130.
YUAN Tiejiang, CHE Yong, SUN Yiqian, et al. Optimized proportion of energy storage capacity in wind-storage system based on timing simulation and GA algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2122–2130.
- [61] 方朝雄, 吴晓升, 江岳文. 考虑暂态稳定性的网储多目标双层优化 [J]. 电力建设, 2020, 41(7): 58–66.
FANG Chaoxiong, WU Xiaosheng, JIANG Yuewen. Research on multi-objective bi-level optimization of network-storage considering transient stability[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(7): 58–66.
- [62] 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.
- [63] 黄英, 刘宝柱, 王坤宇, 等. 考虑风电接纳能力的储输联合规划 [J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1480–1489.
HUANG Ying, LIU Baozhu, WANG Kunyu, et al. Joint planning of energy storage and transmission network considering wind power accommodation capability[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1480–1489.
- [64] 孙伟卿, 宋赫, 秦艳辉, 等. 考虑灵活性供需不确定性的储能优化配置 [J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4486–4497.
SUN Weiqing, SONG He, QIN Yanhui, et al. Energy storage system optimal allocation considering flexibility supply and demand uncertainty[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4486–4497.
- [65] 刘永前, 梁超, 阎洁, 等. 风-光电站中储能系统混合最优配置及其经济性研究 [J]. 中国电力, 2020, 53(12): 143–150.
LIU Yongqian, LIANG Chao, YAN Jie, et al. Optimal configuration and economic study of hybrid energy storage system in wind and solar power plant[J]. Electric Power, 2020, 53(12): 143–150.
- [66] 马会萌, 李蓓, 李建林, 等. 适用于集中式可再生能源的储容配置敏感因素分析 [J]. 电网技术, 2014, 38(2): 328–334.
MA Huimeng, LI Bei, LI Jianlin, et al. Analysis on factors sensitive to capacity configuration of battery energy storage system suitable for centralized renewable energy sources[J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 328–334.
- [67] 谢石骁, 杨莉, 李丽娜. 基于机会约束规划的混合储能优化配置方法 [J]. 电网技术, 2012, 36(5): 79–84.
XIE Shixiao, YANG Li, LI Lina. A chance constrained programming based optimal configuration method of hybrid energy storage system[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 79–84.
- [68] 孟源, 樊小朝, 史瑞静, 等. 基于机会约束及N-1安全约束的风光联合储能系统选址定容优化 [J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1886–1893.
MENG Yuan, FAN Xiaochao, SHI Ruijing, et al. Optimization of location and capacity for wind-solar-energy storage combined system based on chance constraints and N-1 security constraints[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1886–1893.



- [69] 李昀昊, 王建学, 曹晓宇, 等. 面向风电场-储能-输电网联合规划的机会约束 IGDT 模型 [J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3715–3724.
- LI Yunhao, WANG Jianxue, CAO Xiaoyu, et al. A chance-constrained IGDT model for joint planning of wind farm, energy storage and transmission[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3715–3724.
- [70] HEITSCH H, RÖMISCH W. Scenario reduction algorithms in stochastic programming[J]. Computational Optimization and Applications, 2003, 24(2/3): 187–206.
- [71] DUPAČOVÁ J, GRÖWE-KUSKA N, RÖMISCH W. Scenario reduction in stochastic programming[J]. Mathematical Programming, 2003, 95(3): 493–511.
- [72] GROWE-KUSKA N, HEITSCH H, ROMISCH W. Scenario reduction and scenario tree construction for power management problems[C]//2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings. Bologna, Italy: IEEE, 2003: 7 pp. Vol. 3.
- [73] QIU T, XU B L, WANG Y S, et al. Stochastic multistage coplanning of transmission expansion and energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1): 643–651.
- [74] 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.
- [75] LI Y H, WANG J X, GU C J, et al. Investment optimization of grid-scale energy storage for supporting different wind power utilization levels[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(6): 1721–1734.
- [76] 李笑竹, 王维庆, 王海云, 等. 基于鲁棒优化的风光储联合发电系统储能配置策略 [J]. 太阳能学报, 2020, 41(8): 67–78.
- LI Xiaozhu, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Energy storage allocation strategy of wind-solar-storage combined system based on robust optimization[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41(8): 67–78.
- [77] 叶健民, 蔡京陶, 王若愚, 等. 考虑风电场接入的输电网与储能扩展鲁棒规划 [J]. 南方电网技术, 2019, 13(3): 25–32.
- YE Jianmin, CAI Jingtao, WANG Ruoyu, et al. Expansion robust planning of transmission network and energy storage considering wind farm integration[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(3): 25–32.
- [78] 戴雷思, 叶承晋, 傅旭华, 等. 考虑概率分布约束的含高渗透率风电电力系统储能鲁棒优化方法 [J]. 电网技术, 2017, 41(3): 769–777.
- DAI Leisi, YE Chengjin, FU Xuhua, et al. Distributional robust joint chance constrained optimal capacity installment of energy storage in power system with high penetration of wind power[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 769–777.
- [79] 吴杰, 丁明, 张晶晶. 基于云模型和 k-means 聚类的风电场储能容量优化配置方法 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(24): 67–73.
- WU Jie, DING Ming, ZHANG Jingjing. Capacity configuration method of energy storage system for wind farm based on cloud model and k-means clustering[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(24): 67–73.
- [80] BIAN Q Y, XIN H H, WANG Z, et al. Distributionally robust solution to the reserve scheduling problem with partial information of wind power[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2822–2823.
- [81] ZYMLER S, KUHN D, RUSTEM B. Distributionally robust joint chance constraints with second-order moment information[J]. Mathematical Programming, 2013, 137(1/2): 167–198.
- [82] 廖庆龙, 谢开贵, 胡博. 含风电和储能电力系统的时序随机生产模拟 [J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2769–2776.
- LIAO Qinglong, XIE Kaigui, HU Bo. Sequential probabilistic production simulation of power systems with wind power and energy storage[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2769–2776.
- [83] 刘纯, 屈姬贤, 石文辉. 基于随机生产模拟的新能源消纳能力评估方法 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3134–3144.
- LIU Chun, QU Jixian, SHI Wenhui. Evaluating method of ability of accommodating renewable energy based on probabilistic production simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3134–3144.
- [84] 李湃, 王伟胜, 刘纯, 等. 张北柔性直流电网工程新能源与抽蓄电站配置方案运行经济性评估 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7206–7214,7447.
- LI Pai, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Economic assessment of Zhangbei VSC-based DC grid planning scheme with integration of renewable energy and pumped-hydro storage power station[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7206–7214,7447.
- [85] 李建林, 修晓青, 吕项羽, 等. 储能系统容量优化配置及全寿命周期经济性评估研究综述 [J]. 电源学报, 2018, 16(4): 1–13.
- LI Jianlin, XIU Xiaoqing, LYU Xiangyu, et al. Review on capacity optimization configuration and life cycle economic evaluation method for energy storage system[J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(4): 1–13.
- [86] 赵会茹, 陆昊, 张士营, 等. 计及外部性的储能系统价值测算及经济性评估 [J]. 技术经济, 2020, 39(10): 19–26,53.
- ZHAO Huiru, LU Hao, ZHANG Shiying, et al. Value measurement and economic evaluation of energy storage system considering



- externality[J]. *Journal of Technology Economics*, 2020, 39(10): 19–26,53.
- [87] 于童, 张萍. 基于全寿命周期理论的储能降低光伏电站弃光率的经济性分析 [J]. 山西电力, 2019(4): 1–6.
YU Tong, ZHANG Ping. Economic analysis of reducing photovoltaic power plant abandoned electricity by energy storage based on life cycle theory[J]. Shanxi Electric Power, 2019(4): 1–6.
- [88] 高峰, 黄晓东, 戎晓波, 等. 储能电站综合效益评价体系设计研究 [J]. 电源技术, 2016, 40(3): 638–641.
GAO Feng, HUANG Xiaodong, RONG Xiaobo, et al. Design of holistic benefit system of energy storage[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2016, 40(3): 638–641.
- [89] 徐岩, 何宸, 付超, 等. 多种调度模式下的光储电站经济性最优储能容量配置分析 [J]. 太阳能学报, 2019, 40(6): 1632–1640.
XU Yan, HE Chen, FU Chao, et al. Analysis of energy storage capacity allocation considering optimal economy of pv & battery cogeneration system under different scheduling modes[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2019, 40(6): 1632–1640.
- [90] 苏伟, 钟国彬, 徐凯琪, 等. 储能技术经济性评估方法综述 [J]. 广东电力, 2019, 32(1): 29–35.
SU Wei, ZHONG Guobin, XU Kaiqi, et al. Review of evaluation method for economy of energy storage technology[J]. *Guangdong Electric Power*, 2019, 32(1): 29–35.
- [91] 范森. 风电和储能联合运行的多维效应分析模型研究 [D]. 北京: 华北电力大学 (北京), 2019.
FAN Miao. Research on multidimensional effect analysis model of wind power consumption with energy storage participation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [92] 曾鸣, 陈利民, 王良, 等. 输电约束条件下基于风电并网的储能系统价值分析 [J]. 华东电力, 2013, 41(12): 2578–2583.
ZENG Ming, CHEN Limin, WANG Liang, et al. Value analysis of energy storage system based on grid-connected wind power under transmission constraints[J]. *East China Electric Power*, 2013, 41(12): 2578–2583.

作者简介:

李相俊 (1979—), 男, 博士, 高级工程师 (教授级), 从事大规模储能技术、新能源与分布式发电、电力系统运行与控制技术研究, E-mail: li_xiangjun@126.com;

马会萌 (1985—), 女, 通信作者, 硕士, 工程师, 从事储能优化规划与协调控制技术研究, E-mail: mahuimeng@epri.sgcc.com.cn;

姜倩 (1996—), 女, 硕士研究生, 从事新能源侧储能应用技术研究, E-mail: m18730267592@163.com。

(责任编辑 许晓艳)

Review of Energy Storage Configuration Technology on Renewable Energy Side

LI Xiangjun, MA Huimeng, JIANG Qian

(State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems
(China Electric Power Research Institute), Beijing 100192, China)

Abstract: Building a new power system with renewable energy as the main body is an important responsibility and mission of the energy and power industry to serve carbon peak and carbon neutrality. The requirements of the power grid for renewable energy have been gradually upgraded from “friendly grid connection” to “friendly grid connection + active support”. It has become a general trend to install energy storage systems on the renewable energy side. Energy storage configuration is the front-end work in the field of energy storage application, but the cost of energy storage is still high. Therefore, the primary task is to find ways to achieve the optimal energy storage configuration. This paper reviews and summarizes the research progress of application scenarios, configuration methods, and pre-assessment methods of energy storage in the field of renewable energy both at home and abroad. Moreover, issues that need to be further considered in the energy storage configuration on the renewable energy side are proposed, and future research directions are predicted.

This work is supported by the Science and Technology Project of SGCC (Research on Key Technologies of Energy Storage Configuration in New Energy Power Station Considering the Improvement of Consumption Level and Active Support of Power Grid, No.SGJBDK00 ZDJS2100034).

Keywords: renewable energy side; energy storage system; configuration method; solution algorithm; pre-assessment method