第 50 卷 第 1 期：30-42 高电压技术 Vol.50, No.1: 30-42
2024 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230203

新型电力系统下分布式储能应用场景与优化配置

李建林[1]，姜冶蓉[1]，马速良[1]，崔宜琳[1]，郭霄宇[2]
（1. 北京未来电化学储能系统集成技术创新中心(北方工业大学)，北京 100144;
2. 北京和瑞储能科技有限公司，北京 102209）

摘　要：随着分布式能源的大量接入，电力系统面临如何减弱新能源并网引起波动的挑战。合理配置分布式储能能够有效平抑波动，提高电能质量，因此需要对分布式储能配置问题进行深入研究。该文首先研究并归纳了分布式储能的发展现状，其次从新型电力系统下分布式储能的优点入手，通过分析电源侧、电网侧以及用户侧等不同的应用场景，建立了完善的分布式储能合理配置流程，然后分别从优化模型的搭建和优化方法的选择 2 方面展开研究，汇总了常用的目标函数和约束条件，论述了典型优化算法的适用性，最后根据目前分布式储能配置的研究现状，指出了目前优化过程中需要改进的问题。

关键词：新型电力系统；分布式能源；分布式储能；优化配置；智能优化算法

Application Scenarios and Optimal Configuration of Distributed Energy Storage Under the New Power System

LI Jianlin[1], JIANG Yerong[1], MA Suliang[1], CUI Yilin[1], GUO Xiaoyu[2]
(1. Beijing Future Technology Innovation Centre for Electrochemical Energy Storage System Integration, North China University of Technology, Beijing 100144, China; 2. Beijing HE Energy Storage Technology Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: The biggest difference between the new power system and the traditional power system lies in the proportion of new energy generation. With the large amount of distributed energy access, the structure of the power system becomes more complex, the contained elements show a diversified trend, and the operation state has flexible changes. At the same time, the power system also faces the challenge of how to reduce the fluctuation caused by the grid connection of new energy. The reasonable allocation of distributed energy storage can effectively smooth the fluctuation, improve the power quality and the overall stability of the power grid, and also improve the consumption rate of new energy, therefore, it is necessary to conduct in-depth research on the allocation of distributed energy storage. We firstly investigate and summarize the development status of distributed energy storage. Then, starting with the advantages of distributed energy storage under the new power system, we establish a sound rational configuration process of distributed energy storage by analyzing different application scenarios on the power supply side, the power grid side and the user side, and then perform research on the establishment of optimization model and the selection of optimization methods. Moreover, the common objective functions and constraints are summarized, and the applicability of typical optimization algorithms is discussed. Finally, according to the current research status of distributed energy storage configuration, the problems that need to be improved in the optimization process are pointed out.

Key words: new power system; distributed energy resources; distributed energy storage; optimize configuration; intelligent optimization algorithms

0　引言

分布式可再生能源发电是基于风、光等新能源的分布式发电，具有建设周期短、应用场景多、环境负效应低、技术成熟度高等优势，发展前景广阔[1]。2022 年前 3 季度，分布式光伏新增装机超过全国光伏新增装机的 2/3，成为装机增长最快的可再生能源发电类型，这意味着“分布式光伏整县推进”模式在全国范围内铺开，高比例清洁能源占比逐步提高，分布式配储能的应用前景逐渐体现[2]，因此分布式储能的规划部署作为分布式储能工程合理性应用的前提至关重要。

基金资助项目：国家自然基金(52277211)；国家电投集团科学技术研究院项目(126005JX0120220055)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52277211), Project of Science and Technology Research Institute of State Power Investment Corporation(126005JX0120220055).

为实现 2021 年 4 月国家能源局发布的《关于加快推动新型储能发展的指导意见(征求意见稿)》中“储能装机 3000 万 kW”目标，各省份纷纷出台相应政策，对不同项目的储能配比做出相应规定，具体见附录 A 表 A1。通过汇总表对比可以看出：(1)各省份储能储能装机配比均在 10%以上，充电时长均在 2 h 以上；(2)规范的项目多为集中式储能容量配比，对于分布式储能容量配比规定较少，缺乏对其系统性研究；(3)政策中关于储能容量配比还未能根据储能具体应用场景细化。

相较于集中式储能，分布式储能可减少集中储能电站的线路损耗和投资压力，但也具有分散布局、可控性差等特点。合理规划分布式储能，不但可以促进新能源的消纳，降低弃风弃光率，还可以通过“削峰填谷”来降低配电网的容量，减少投资资源[3]。围绕分布式储能规划的问题，国内外专家学者开展了大量研究，已获得阶段性成果，目前主要侧重于不同场景的数学建模和规划优化方法等方面。对此，本文从新型电力系统下分布式储能的特点入手，围绕分布式储能的应用场景建立了分布式储能优化配置的研究框架，旨在对新型电力系统下分布式储能的配置方法进行详细梳理，对新型电力系统的优化具有重要意义。首先研究了分布式储能的物理架构，对其典型应用场景进行了归纳总结，基于对不同指标以及不同目标函数的考虑，归纳分布式储能容量配置的不同，旨在对分布式储能的容量规划配置做系统的归纳以及对改进其配置方法做合理的展望。

1 分布式储能应用场景及配置流程

规划配置分布式储能系统，需要从分析储能在不同应用场景下发挥的关键作用和服务典型应用场景下的分布式储能容量配置流程设计 2 个方面出发，满足分布式储能容量配置合理性与科学性要求。

1.1 分布式储能的应用场景

根据分布式储能在电力系统中的安装位置，其应用场景可分为发电侧、电网侧以及用户侧，如图 1 所示。在发电侧，分布式储能可参与可再生能源并网、减少弃风弃光、负荷跟踪、系统调频等应用场景；在电网侧，可参与辅助电力调峰、备用容量、缓解电网阻塞、延缓输配电设备扩容、无功支持、辅助动态运行等应用场景；在用户侧，分布式储能可用于峰谷价差套利、容量费用管理、提升电能质量、提升供电可靠性等应用场景，下面对不同场景下分布式储能的不同应用进行归纳分析，以找到各场景下储能的合理容量配置方法。

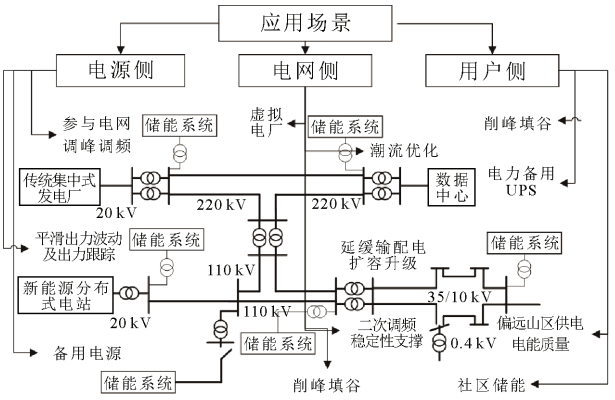


图 1 分布式储能应用场景

Fig.1 Application scenario of distributed energy storage

1.1.1 发电侧

1）可再生能源并网

由于可再生能源具有波动性、间歇性、不可预测性等特点，可再生能源并网消纳会对电力系统稳定运行造成一定的冲击，需要加装分布式储能辅助可再生能源并网。标准《Q/GDW 11994—2019 电化学储能规划技术导则》中规定了发电侧电化学储能容量配置相关原则，如“当风光电场有功功率出力波动超出一定限值时，可以根据其有功功率和持续时间来配置储能容量”，为分布式储能的容量配置问题提供技术性支持。

2）减少弃风弃光

通过加装分布式储能的方式存储可再生能源弃电量，转移到其他时段并网，可再生能源发电特性以及用户用电负荷特性使得此类应用运行频次较高，每年在 300 次以上。对此，文献[4-5]都从提升新能源消纳出发，提出一种内层为考虑新能源及分布式储能运行特性，外层为综合考虑经济性的双层优化配置模型，有效减少新能源弃风弃光电量。

3）负荷跟踪

由于电力系统的负荷是时刻变化的，负荷跟踪是指通过调整分布式储能系统分别在峰值和低谷时发电和充电，从而很好地与系统变化的负荷相匹配，以此提升系统响应速度，使其更快达到平稳状态。文献[6]主要考虑响应负荷的灵活性方面，提出了一种同时考虑光伏出力最小化运行费用以及功率波动最大的出力场景的双层规划优化模型。

4）系统调频

随着可再生能源大量并网，其波动性和随机性

会在短时间内冲击电力系统的能量平衡，而传统火电调频速度慢，不能及时平抑波动。而分布式储能用于调频辅助服务的响应速度快，是很好的调频资源。2022 年 6 月 8 号国家发改委发布了《关于进一步推动新型储能参与电力市场和调度运用的通知》进一步明确了电力辅助的相关细则以及健全市场价格机制，尤其在电力调频方面，此项政策的发布通过充分挖掘供需两侧的可灵活调节性，来提升电力系统的综合调节能力。

1.1.2 电网侧

1）电力辅助调峰

配电网侧储能装置一般安装在变电站附近，可通过在用电负荷低谷期吸收电能、用电负荷高峰期释放电能来缓解用电峰谷差大导致电力供需的矛盾。文献[7]提出一种应用于调峰场景下分布式储能容量配置的方法，利用此种方法可有效降低寻址配容难度，大大提升优化效率。

2）缓解电网阻塞

当输送电线路负荷超过线路容量时，可以将无法输送的电能储存到储能设备中，等到线路负荷小于线路容量时，储能系统再向线路放电。2021 年 4 月 20 日，由中关村储能产业技术联盟主持编制的团体标准《电力储能项目经济评价导则》批准发布，标准对储能参与不同场景服务收益进行了具体分析，包含对缓解电网阻塞所获得的收益分析。

3）延缓输配电设备扩容

由于对传统输配电线路扩容会产生较高的经济费用，当一年之内大部分时间段用电负荷都小于或者接近于额定负荷时，可以通过加装分布式储能来应对高峰时间段电网侧电能容量不足的情况[8]，从而缓解扩大电网建设的投资压力。为提升配电网设备利用率，文献[9]设计了一种基于灵敏度分析的分布式储能选址定容数学模型，通过此种优化规划模型可利用分布式储能来替代传统配电网投资。

4）无功支持

无功功率的不足或过剩都会影响供电质量，甚至缩短用电设备寿命。通过在输配电线路上加装分布式储能可以吸收或注入无功功率来调节输电电压，维持输配电线路的稳定运行。无功支持属于典型的功率型应用，其作用时间较短，但调用频次很高。文献[10]针对降低配电网网损的应用场景，探讨了分布式储能作用节点原则以及容量配置的方法。

1.1.3 用户侧

1）峰谷价差套利

峰谷价差套利，即用户可在电价低的时段购入电量并利用储能装置存储起来，在电价高峰时段使用存储起来的电量，从而可减少高价电的购入，利用峰谷电价差获取相应的收益。2021 年 7 月，国家发改委发布《关于进一步完善分时电价机制》的通知，进一步完善峰谷价差机制，旨在促进用户侧储能的发展。

2）容量费用管理

我国大工业企业实行两部制电价，除了电量缴纳电度电费之外，还需要缴纳基本电费，此方面费用主要取决于变压器用电功率最大值，而通过加装分布式储能系统，可利用用电低谷时段储能、用电高峰期放电来替代部分电网供电，从而降低容量管理费用。

3）提升电能质量

由于配电网中存在多种不同性质负荷，使得用户获得的电能会存在电压、电流畸变或频率偏差等问题，利用储能可有效解决系统内电压升高、频率波动等问题[11]。此应用场景属于功率型应用，一般要求响应时间在毫秒级。文献[12]考虑了经济性与电压质量两方面，对分布式储能容量配置进行了优化。

4）提升供电可靠性

在一些对供电可靠性要求较高的用户端，通常加装分布式储能系统作为不间断电源，可保证在发生停电故障时，储能系统可以毫秒级速度做出响应，保证供电的可靠性。在一些未设置储能装置的地区，可通过移动电源来保障其供电可靠性。

1.2 分布式储能容量配置流程

分布式储能容量配置需要综合考虑应用场景用户与市场需求的分析，建立起适合该应用情况下的容量配置数学模型，具体容量配置流程见图 2。

从流程图可以看出：(1)分布式储能容量配置需要根据应用场景以及市场与用户需求得出储能容量配置的目标函数；(2)根据配电网运行要求以及储能自身条件确定该模型的运行约束条件；(3)对设计的数学模型，选取合理的算法对目标函数进行求解。因此，本文接下来就目前对不同目标函数的研究进行归纳总结与分析。

2 分布式储能数学建模

经济性是储能配置过程中必须要考虑的因素，

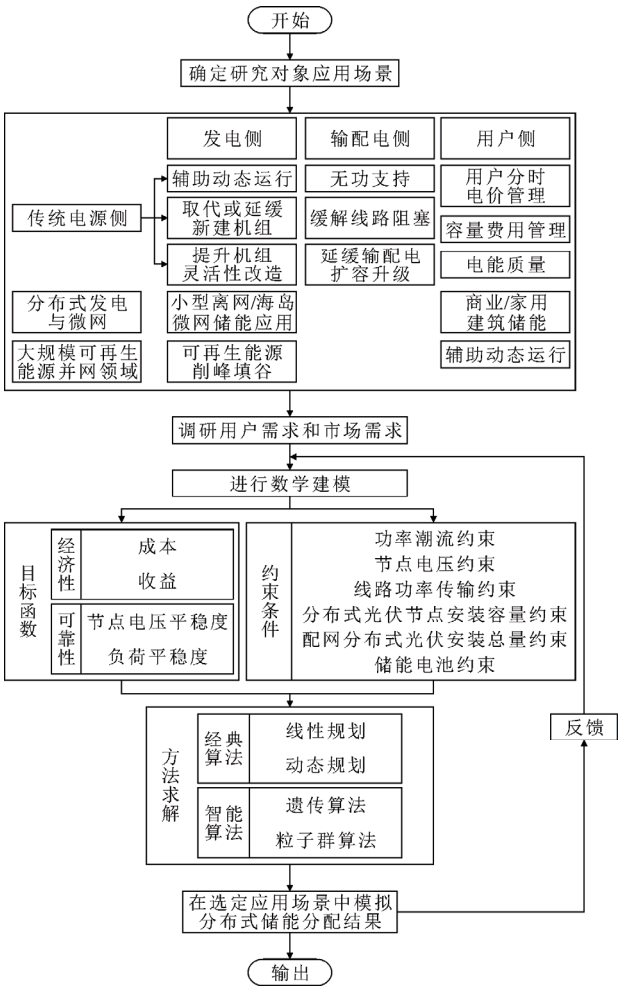


图 2　分布式储能容量配置流程

Fig.2　Distributed energy storage capacity configuration process

而可靠性贯穿于新型电力系统的各个部分，它保证了分布式储能的持续出力能力以及抵御电网波动的能力，因此研究分布式储能优化配置的经济性和可靠性具有重要意义，下面将分别对其进行深入研究。

2.1　经济性

目前，分布式储能存在投资成本较高、投资回收期较长等问题，对此，行业内专家学者对分布式储能各类应用场景的经济性问题开展了相关研究。针对优化应用于电源侧的储能容量配置，其经济性主要体现在新能源消纳以及碳收益方面[13]。文献[14]提出一种改进功率差协调控制策略约束的综合碳收益储能配置模型，对光伏电站的新能源消纳和辅助调峰起到了优化作用，提高了储能参与新能源消纳的效率。文献[15]对应用于分布式光伏电站的储能进行配置优化，以分布式储能系统的投资和运行成本为优化目标，提出一种多个分布式电源配置储能的双层优化模型方法，为分布式储能选点布局提供了有效途径。文献[6]针对源网荷储协同优化运行场景，提出一种考虑源网荷储系统内总成本最小的双层优化模型，该模型同时综合考虑系统内总电力平衡、系统弃风弃光率约束、可再生能源渗透率等因素，不仅考虑到分布式储能资源，也考虑到了电力区域内其他发电资源资源，求解出该区域内分布式储能的最优规划方案。

对于配电网侧，其经济性主要体现在降低网损收益、削峰填谷、配电网新能源消纳等方面。文献[16]针对配电网削峰填谷、降低网损的场景，提出了一种修正储能容量的方法，以配电网总成本最低为优化目标，使得储能容量与寿命达到较好的配合，具有更优的经济性。在提高配电网新能源消纳率方面，文献[17]提出一种以储能系统日运行收益为目标函数、综合考虑潮流计算约束的配电网储能优化配置方法，有效提高了配电网新能源消纳率。

对于用户侧，目前储能的经济收益主要体现在峰谷套利、需量管理、需求响应、应急供电等应用场景中，且其经济性受政策影响，因此，合理地制定相关政策能引导用户侧合理配储。文献[18]提出一种针对大工业用户参与 4 种辅助服务场景的储能配置方法，同时结合了电价政策，优化了储能参与辅助服务收益架构，对政策规划有指导性意见。文献[19]针对大工业用户的两部制电价定价准则，提出一种考虑最大需量减少带来的储能收益以及低储高发带来的收益的储能容量配置模型，激励大工业用户合理配储。

通过对以上文献进行研究，总结出分布式储能优化配置的经济性指标，如下所示，表 1 为对相关指标的归纳。

系统投资成本为：

$$C_{\mathrm{inv}}=\sum_{g\in G}(Y_{\mathrm{p},g}(C_{\mathrm{pi},g}+C_{\mathrm{pom},g})) \tag{1}$$

式中：g 为区域内的各种发电技术；G 为发电技术集合(包括储能)；$Y_{\mathrm{p},g}$ 为 g 的规划新增放电(或发电)功率容量；$C_{\mathrm{pi},g}$、$C_{\mathrm{pom},g}$ 分别为 g 的放电、充电功率容量单位投资成本。

系统运行成本为：

$$C_{\mathrm{om}}=\sum_{t\in T}(\sum_{g\in G}(x_{\mathrm{inj},g}(c_{\mathrm{po},g}+c_{\mathrm{f},g})))+\sum_{g\in G}(x_{\mathrm{wit},g}c_{\mathrm{po},g}) \tag{2}$$

式中：t 代表 1 h；T 为一年内各小时的集合；$c_{\mathrm{po},g}$ 为 g 的单位变动运行成本；$c_{\mathrm{f},g}$ 为 g 的单位燃料成本(除

火电和核电外均为 0)；$x_{\mathrm{inj},g}$、$x_{\mathrm{wit},g}$ 分别为 g 在 t 小时段的发电功率和充电功率。

（1）机组启停成本 C_{sta}

$$C_{\mathrm{sta}}=\sum_{t\in T}\left(\sum_{g\in H}\left(x_{\mathrm{start},g}c_{\mathrm{start},g}\right)\right) \tag{3}$$

式中：H 为火电技术(含核电)的集合；$x_{\mathrm{start},g}$ 为 g 在 t 小时段的启动机组数；$c_{\mathrm{start},g}$ 为 g 的单位机组启动成本。

（2）排放成本 C_{emi}

$$C_{\mathrm{emi}}=c_{\mathrm{emi}}\int_0^T P_{\mathrm{Fire},t}\mathrm{d}t \tag{4}$$

式中：c_{emi} 表示在规划周期 T 内火电单位发电量的排放成本；$P_{\mathrm{Fire},t}$ 表示火电发电功率。

（3）储能初始投资成本 C_{in}

$$C_{\mathrm{in}}=c_{\mathrm{ei}}E_{\mathrm{N}}+c_{\mathrm{pi}}P_{\mathrm{N}} \tag{5}$$

式中：c_{ei}、c_{pi} 分别表示储能电池单位容量和单位功率初始投资成本；E_{N}、P_{N} 分别表示储能电池额定容量和额定功率。

（4）储能年更换成本 C_{p}

$$C_{\mathrm{p}}=c_{\mathrm{ep}}E_{\mathrm{N}}+c_{\mathrm{pp}}P_{\mathrm{N}} \tag{6}$$

式中：c_{ep}、c_{pp} 分别表示储能电池单位容量和单位功率置换成本。

（5）储能年运维成本 C_{om}

$$C_{\mathrm{om}}=c_{\mathrm{eom}}E_{\mathrm{N}}+c_{\mathrm{pom}}P_{\mathrm{N}} \tag{7}$$

式中：c_{eom}、c_{pom} 分别表示储能电池单位容量和单位功率运维成本。

（6）储能报废处理成本 C_{et}

$$C_{\mathrm{et}}=c_{\mathrm{et_p}}P_{\mathrm{N}}(1+i)^{-T}+\sum_{j=1}^{n+1}c_{\mathrm{et_e}}E_{\mathrm{N}}(1+i)^{-\frac{jT}{n+1}} \tag{8}$$

式中：$c_{\mathrm{et_p}}$、$c_{\mathrm{et_e}}$ 分别表示储能电池单位容量和单位功率报废处理成本。

（7）储能年度电电费成本 c_{ess}

$$c_{\mathrm{ess}}=\frac{c_{\mathrm{in}}+c_{\mathrm{p}}+c_{\mathrm{om}}}{\mu P_{\mathrm{N}}H_{\mathrm{N}}} \tag{9}$$

式中：μ 表示储能电站转换效率；H_{N} 表示储能电站年利用小时数。

（8）能量市场中的收益 $S_{\mathrm{e},\omega}$

$$S_{\mathrm{e},\omega}=\sum_{t=1}^{T}(P_{\mathrm{dis},\omega}-P_{\mathrm{cha},\omega})\Delta t\alpha_{\mathrm{price},t} \tag{10}$$

式中：$P_{\mathrm{dis},\omega}$、$P_{\mathrm{cha},\omega}$ 分别为第 ω 个场景下储能设备在 t 时段的放电功率和充电功率；T 为优化周期；$\alpha_{\mathrm{price},t}$ 为 t 时段能量市场电价。

（9）调峰辅助服务市场收益 $S_{\mathrm{peak},\omega}$

$$S_{\mathrm{peak},\omega}=\sum_{t=1}^{T_{\mathrm{v}}}P_{\mathrm{v},\omega}\Delta t\alpha_{\mathrm{sub}} \tag{11}$$

式中：$P_{\mathrm{v},\omega}$ 为第 ω 个场景下储能 t 时段参与调峰时的充电功率；α_{sub} 为储能参与调峰补偿价格；T_{v} 为系统调峰时间段。

（10）调频辅助服务市场收益 $S_{\mathrm{f},\omega}$

$$S_{\mathrm{f},\omega}=\sum_{t=1}^{T}(\alpha_{\mathrm{cap,t}}+\alpha_{\mathrm{per,t}})P_{\mathrm{t},\omega} \tag{12}$$

式中：$\alpha_{\mathrm{cap,t}}$ 和 $\alpha_{\mathrm{per},t}$ 分别为 t 时段的储能调频容量补偿价格和里程补偿价格；m 为储能参与调频的平均调用里程系数；$P_{\mathrm{t},\omega}$ 为第 ω 个场景下 t 时段储能参与调频的申报容量。

（11）碳交易收益 $S_{\mathrm{c_sell}}$

$$S_{\mathrm{c_sell}}=c_{\mathrm{c_sell}}\sum_{t=1}^{T}\gamma_{\mathrm{ess}}c_{\mathrm{t}}(1+i)^{-t} \tag{13}$$

式中：$c_{\mathrm{c_sell}}$ 为碳交易单位价格；γ_{ess} 为单位电量碳排放配额；c_{t} 为储能全生命周期第 t 年的上网电量。

（12）调高可再生能源消纳收益 S_{re}

$$S_{\mathrm{re}}=p_{\mathrm{re}}E_{\mathrm{out}} \tag{14}$$

式中：p_{re} 为可再生能源上网电价；E_{out} 为储能减少可再生能源弃电量。

（13）储能系统延缓电网升级收益 S_{y}

$$S_{\mathrm{y}}=C_{\mathrm{d}}\left(1-\frac{1}{\mathrm{e}^{\rho t}}\right) \tag{15}$$

式中：C_{d} 表示电网扩建所需投资；ρ 表示折现率；t 表示延缓时间。

从分布式储能的优化配置经济性研究现状中可以得出：(1)政策为分布式储能提供效益保障，合理制定电价机制以及补贴政策是实现储能商业价值的重要因素；(2)目标函数的设立大多包含投资成本及运维成本，体现出目前成本高昂问题依旧是提高储能容量配置经济性的限制因素，因此如何降低配置成本是储能行业发展的重点；(3)约束条件的确定与储能应用场景相关，在用户侧，通常要考虑储能自身约束，比如储能充放电约束、荷电状态约束等；在电源侧，还需要考虑传统火电机组、新能源电站的出力约束；在配电网侧，还需要考虑电力系统潮流约束、节点电压约束等。

2.2 可靠性

新型电力系统中可再生能源发电占比越来越大，大量新能源并网以及电力电子器件的接入会给

表 1　分布式储能容量配置经济性指标

Table 1　Distributed energy storage capacity allocation economic indicators

类别	指标	定义	计算式
成本	系统投资成本 C_{inv}	电力区域内系统新增投资成本	式(1)
	系统运行成本 C_{om}	一年运行时间内，电力区域内各种发电技术运行成本	式(2)
	机组启停成本 C_{sta}	系统内火电机组(含核电)年启动成本	式(3)
	排放成本 C_{emi}	燃煤或燃气的火力发电产生的排放污染物成本	式(4)
	储能初始投资成本 C_{in}	储能初建成本	式(5)
	储能年更换成本 C_{p}	项目周期内，储能更换成本	式(6)
	储能年运维成本 C_{om}	储能设备在其全生命周期内维护其正常运行的成本	式(7)
	储能报废处理成本 C_{et}	储能设备在其使用寿命耗尽时，为使其不污染环境而投入的成本	式(8)
	储能年度电电费成本 c_{ess}	对项目生命周期内的成本和发电量先进行平准化	式(9)
收益	能量市场中的收益 $S_{e,\omega}$	储能在应用场景 ω 中获得的净收益	式(10)
	补贴收益 调峰辅助服务市场收益 $S_{peak,\omega}$	按照调峰补贴收益规则，对参与调峰的储能，根据储能发电量与调峰时间，对储能设备进行补贴	式(11)
	补贴收益 调频辅助服务市场收益 $S_{f,\omega}$	根据调频补贴规则，储能参与调频辅助服务市场的收益，包括调频容量收益和调频里程补偿	式(12)
	碳交易收益 S_{c_sell}	企业将剩余的碳排放配额出售获得的收益	式(13)
	调高可再生能源消纳收益 S_{re}	可再生能源上网电价与减少弃电电量乘积	式(14)
	储能系统延缓电网升级收益 S_{y}	配电网中通过配置储能系统延缓电网升级所获得的收益	式(15)

电网带来较大冲击，配电网中包含了很多一级负荷、二级负荷，需要越来越高的电能质量，同时在负荷高峰期，部分负荷可能会因系统输配电能力有限而失去供电。

为减少新型电力系统中的重要用户因电网故障或负荷停电造成的经济损失，通过配置一定容量的分布式储能作为应急电源或不间断电源，能有效提高系统可靠性。除此之外，储能系统因其本身特性可以高效快速地控制有功和无功，提升系统响应扰动的能力，调整频率与电压到标准值，还能补偿负荷波动，提高系统运行的稳定性[20]，因此研究分布式储能配置的可靠性指标是提升新型电力系统稳定性的重要方向。

文献[21]搭建了一种考虑多种可靠性目标为优化条件，同时综合最优负荷削减、储能充放电策略、储能经济性的储能配置模型，在有限资金内，提升配电网可靠性，验证了配电网分布式储能带来的效益。文献[22]提出了一种考虑主动配电网脆弱性评估，综合脆弱性评价指标的分布式储能规划方法，以经济效益和削峰填谷效率为内外层目标，在确保收益和系统可靠性的同时极大改善了配电网脆弱性问题。文献[23]针对偏远地区配电网的储能规划难题，运用机会约束规划，得到了一种适用于大部分常见故障场景的储能选址-定容方案，同时避免了因个别极端场景引起的过度投资，有效提升了配电系统可靠性。文献[24]针对风火储联合系统中，风电场输出功率的不稳定性，提出一种以风电场火电替代容量和负荷供应容量为优化目标的储能容量配置模型，同时设置储能参数约束，兼顾了联合系统的经济性和可靠性。文献[25]采用无源配电网可靠性计算方法，提出一种同时兼顾经济性与可靠性的储能配置模型，可以根据后续储能设计要求，改变可靠性与经济性的权重占比，从而适用于不同的应用场景。通过以上分析，本文整理出相关可靠性指标，如下。

（1）系统平均停电频率

$$E_{a}=\frac{\sum_{y=1}^{Y}\sum_{i=1}^{N_d}N_i b_{i,y}}{Y\sum_{i=1}^{N_d}N_i} \tag{16}$$

式中：y 为第 1—Y 个仿真年；N_d 为系统节点数；N_i 为节点 i 的用户数；$b_{i,y}$ 为第 y 年中节点 i 的停电次数。Y 为总仿真年数。

（2）系统平均停电持续时间

$$E_{b}=\frac{\sum_{y=1}^{Y}\sum_{i=1}^{N_d}N_i U_{i,y}}{Y\sum_{i=1}^{N_d}N_i} \tag{17}$$

式中：$U_{i,y}$ 为第 y 年中节点 i 的停电时间。

（3）系统平均供电可靠率

$$E_{\mathrm{c}}=1-\frac{\sum_{y=1}^{Y}\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{d}}}N_iU_{i,y}}{8760Y\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{d}}}N_i} \tag{18}$$

（4）系统电力不足期望值

$$E_{\mathrm{d}}=\frac{\sum_{y=1}^{Y}\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{d}}}L_{i,y}}{Y} \tag{19}$$

式中：$L_{i,y}$为第 y 年中节点 i 的停电负荷量。

（5）基尼系数

$$G=\left(1-\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(2n+1-2i)D_i\right)\frac{n+1}{n} \tag{20}$$

式中：n 为分组总数；D_i 为各组节点效能从低到高排序的效能占全局效能的比重。

（6）效能基尼系数变化率

$$R_k=\frac{G_0-G_k}{G_0} \tag{21}$$

式中：G_0 为初始节点效能的基尼系数；G_k 为移除节点 k 后，网络节点效能的基尼系数。

（7）电力不足时间概率

$$L=\sum_k p_kt_k \tag{22}$$

式中：p_k 为系统发生停运容量时的概率；t_k 为系统发生停运容量的时长。

（8）电力不足时间期望

$$E_{\mathrm{f}}=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n_i}p(X\geq(C_i-L_{ij})) \tag{23}$$

式中：m 为一年中的时间段数；n_i 为第 i 个时间段中的天数；L_{ij} 为第 i 个时间段内第 j 天的峰值负荷；C_i 为第 i 个时间段内系统安装容量。

（9）电量不足时间期望

$$E_{\mathrm{p}}=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n_i}\sum_{K=1}^{24}\sum_{X=C_i-L_{ijk}}^{C_i}(X-(C_i-L_{ijk}))P_{ijk}(X) \tag{24}$$

式中：P_{ijk} 为第 i 个时间段内第 j 天第 K 小时停运容量大于 X 概率；L_{ijk} 为第 i 个时间段内第 j 天第 K 小时的小时负荷。

从分布式储能的优化配置可靠性研究现状中可以得出：(1)以优化新型电力系统可靠性为目标所建立的储能容量配置模型通常包含经济性约束条件；(2)模型往往不以单一可靠性指标为目标函数，因为仅优化单一指标不能保证电力系统达到稳定，例如，电力不足时间概率仅能确定电力系统的停电时间概率，不能确定停电量的大小，因此，往往设置多个可靠性指标联合考虑的优化目标函数；(3)多目标函数之间分清主次，根据具体应用场景合理确定各个优化目标的权重值。

3 优化算法

在根据分布式储能的应用场景选取合适的目标函数以及约束条件后，需要对建立好的储能配置模型进行求解，才能得到储能配置参数，完成储能配置过程，选取合适的优化算法也是储能能否实现优化配置的重要一环。

3.1 经典优化算法

3.1.1 线性规划

线性规划是在一组线性约束条件的限制下，求一线性目标函数最大或最小的问题。而在求解储能容量配置问题时，其目标函数及约束条件往往是非线性的，因此需要将非线性的目标函数及约束条件进行线性化才能求解[26]。文献[27]搭建了储能系统的机会约束规划模型，以系统成本最低为目标，以新能源消纳率满足规定为机会约束，由于机会约束为非线性，在此利用条件风险价值理论，将约束条件转换为线性，再利用线性规划进行求解。文献[28]中，对于内层目标函数的处理也用到了线性化，再利用 CPLEX 处理器进行线性规划处理。文献[29]提出了双层储能容量配置模型，灵活地避开了线性化过程，其上下层优化目标的求解可分别使用线性规划，减少了计算工作量，提高结果的准确度。

通过以上文献可知，线性规划为传统数学优化算法，有计算准确的优点，但其计算工作量较大，且大部分问题需要进行线性化才能求解，有很大的局限性，利用线性规划求解储能容量配置问题的难点往往在于线性模型的搭建，以及灵活运行多种方法对非线性约束条件进行线性化处理。

3.1.2 动态规划

动态规划是通过将大问题拆分成小问题，同时明确各问题之间的逻辑关系，进而以递推的方式去解决问题。在求解储能容量配置模型优化问题中，将目标函数中的优化变量拆解为子变量，按子变量的逻辑关系逐一求解，例如文献[30]中，将以减少配电网运营商的购电费用为优化目标拆解为规划储能在各个季节的优化配置问题，前一个季节的优化结果为后一季节的优化求解提供有用信息，逐一求解，通过决策保留那些有可能达到最优的局部解，

依次完成四季的储能优化配置问题，最后可以得到初始目标函数的最优解。

分布式储能的动态配置通过动态地调节配电网的潮流分布，可有效降低配电网网损成本，由于网内负荷的季节性变化是储能配置发生变化的主要影响因素，而动态规划模型相对于静态规划模型的优点是能够得到全局最优解，因此，储能动态配置比固定配置更具有经济性，且能利用优化目标与子目标之间的逻辑关系，减少冗余计算过程，提高优化效率。其缺点在于：没有固定的求解模型，依赖决策者提供最优判断，同时没有维数限制，对求解的空间需求大。

3.2 智能优化算法

3.2.1 遗传算法

遗传算法(genetic algorithm, GA)其本质是一种具有并行性、全局性、自适应寻优特点的方法，能在寻优过程中自动搜集可行域内的有效信息，并自适应地控制搜索过程以求得近似最优解。在应用于储能容量配置的过程中，其主要求解流程如图 3 所示，主要步骤有：确定储能容量配置参数集，对所需参数进行二进制编码，确定初始储能容量配置种群，根据储能各应用场景下的目标函数对其进行适应度评价，对参数进行选择交叉变异产生新一代种群直到迭代次数满足所设置要求。算法求解结束，可以得到所要求的储能容量配置的参数。

遗传算法为全局优化算法，其对于求解多目标函数、混合非线性问题有其显著的优点，但其求得的优化解一般不为最优解，一般为最优解附近的取值，在收敛性以及求解速度方面都存在局限性。对此，国内外专家学者对遗传算法应用在分布式储能规划问题上展开研究，表 2 归纳了遗传算法求解的目标函数、改进之处以及目前在应用方面的侧重点[31-36]。分析表 2 可以看出，目前应用遗传算法来解决分布式储能规划的选址定容问题，其评价指标主要考虑储能容量配置的经济性方面或者以经济性为主体的多目标函数，目前改进的方向主要有：(1)与其他智能算法相结合，通过算法之间的嵌入来改善遗传算法的收敛性以及收敛速度；(2)改进遗传算法中的选择、交叉以及变异因子，使其更科学，更具适用性；(3)在使用遗传算法优化前，对种群个体适应度进行排序，选取适用度高的个体做初代种群。

3.2.2 群智能优化算法

群智能算法源于自然群体通过合作方式觅食的行为研究，每个具有经验和智慧的个体通过相互作用机制形成强大的群体性智慧，以此解决复杂的问题，目前常见的应用在分布式储能容量配置领域中的群智能优化算法有：蚁群算法、粒子群算法、菌群算法、蛙跳算法、狼群算法、鲸鱼算法等。其中，粒子群算法(particle swarm optimization，PSO)因为容易、精度高、收敛快等优点，被广泛应用于储能容量配置等方面。

粒子群算法的核心思想是利用群体中个体对信息的共享，使得整个群体的运动在问题求解空间中产生从无序到有序的演化过程，从而获得问题的最优解，粒子群算法中两大核心公式为速度更新公式与位置更新公式，即：

$$v_i^t = \omega v_i^{t-1} + c_1 r_1 (p_i^{t-1} - x_i^{t-1}) + c_2 r_2 (g_b^{t-1} - x_i^{t-1}) \quad (25)$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t \quad (26)$$

式中：v 为速度；x 为位置；ω 为惯性因子；c_1、c_2 为学习因子；p 为个体最优位置；g 为全局；r_1、r_2 为[0,1]的随机数；下标 t 为迭代次数，i 为粒子编号。

粒子群算法应用在分布式储能容量配置方面，其主要的流程如图 4 所示，首先需要确定区域配电网的各项参数，确定储能应用场景，选取储能配置

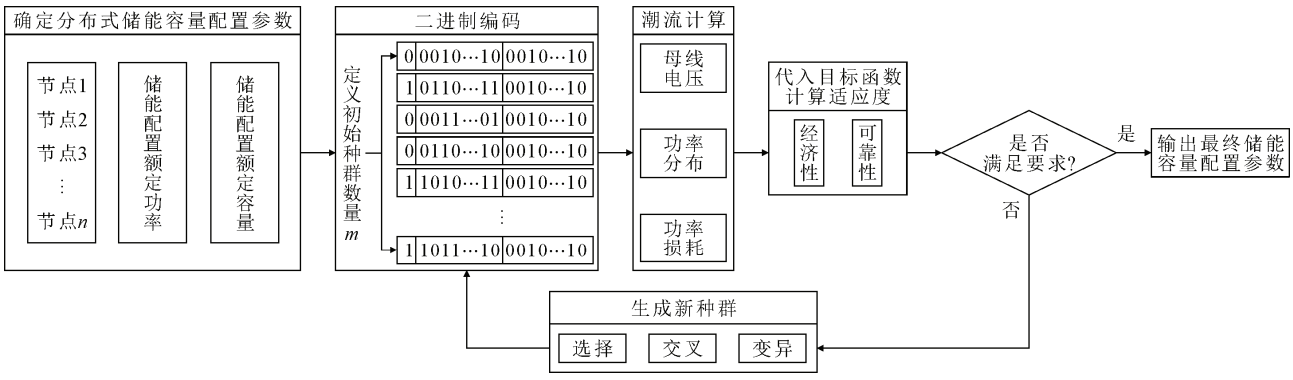


图 3 遗传算法流程图

Fig.3 Flow chart of genetic algorithm

表 2 改进遗传算法分析

Table 2 Improved genetic algorithm analysis

文献	目标函数	改进之处	点评
文献[31]	储能电池全寿命周期内的总成本	运用多种群并行优化搜索，交叉、变异概率计算式为：$\begin{cases} p_c = p_{co} + cf_{rand}(G,1) \\ p_m = p_{mo} + mf_{rand}(G,1) \end{cases}$ 式中：p_{co}、p_{mo} 分别为初始交叉、变异概率；G 为种群的数目；c、m 分别为交叉、变异的区间长度；f_{rand} 为随机生成函数	应用多种群遗传算法，多种群并行优化搜索，种群之间通过移民算子相互联系，提高求解速度和收敛性
文献[32]	微源配置数目约束内生成容量初始值	运用自适应改进遗传算法，交叉、变异概率计算式为：$P_a = \begin{cases} P_{a,max} - \dfrac{P_{a,max} - P_{a,min}}{M} i, & F_1 > F_{avg} \\ P_{a,max}, & F_1 \le F_{avg} \end{cases}$ $P_b = \begin{cases} P_{b,max} - \dfrac{P_{b,max} - P_{b,min}}{M} i, & F_1 > F_{avg} \\ P_{b,min}, & F_1 \le F_{avg} \end{cases}$ 式中：P_a、P_b 分别为自适应遗传算法的交叉概率、变异概率；M 为最大迭代次数；F_1、F_{avg} 分别为种群的最优适应度值、平均适应度值	通过改进遗传算法参数，加快了收敛速度，提高了收敛精度
文献[33]	储能电池全寿命周期内的总成本最低	将遗传算法与模拟退火算法相结合，接受概率函数表达式为：$P = e^{\frac{f_1 - f_2}{A^m T_0^m}}$ 式中：P 为模拟退火算法首阶段后接受新个体概率；f_1、f_2 分别为退火前、后种群个体适应度；T_0 为退火初始温度；A 为降温系数；m 为退火次数	加入模拟退火算法能有效改进传统遗传算法易陷入全局最优的缺点，更具全局性
文献[34]	充电站日净收益最高以及峰谷差率最低	改进模拟二进制交叉表达式为：$X_{1,i+1} = \dfrac{\lambda_{1,i}}{\lambda_{1,i} + \lambda_{2,i}}(1+\beta)X_{1,i} + \dfrac{\lambda_{2,i}}{\lambda_{1,i} + \lambda_{2,i}}(1-\beta)X_{2,i}$ $X_{2,i+1} = \dfrac{\lambda_{1,i}}{\lambda_{1,i} + \lambda_{2,i}}(1-\beta)X_{1,i} + \dfrac{\lambda_{2,i}}{\lambda_{1,i} + \lambda_{2,i}}(1+\beta)X_{1,i}$ 式中：$X_{1,i+1}$、$X_{2,i+1}$ 为后生成个体；$X_{1,i}$、$X_{2,i}$ 为上一代个体；β 为[0,1]的随机数	通过添加拥挤距离以及排序层级来作为改进上一代个体的加权因子，使得后生成个体能更好地保留优秀基因结果
文献[35]	储能容量配置成本最低以及负荷缺电率最小	采用 NSGA-Ⅱ非支配遗传算法，在进行遗传算法之前，对种群内个体适应度排序，得出非劣解，在该解集内找出拥挤度值最好，形成父代种群	可以有效提高遗传算法初代种群适应度，得到更接近最优解的结果
文献[36]	全寿命周期内总成本最低和总碳排放最低	将遗传算法中的变异因子用禁忌搜索算法来替代	禁忌搜索具有很强的领域寻优能力，将其嵌入遗传算法内，可以使结果接近最优解

参数作初始化粒子群，初始化粒子位置向量和速度向量，计算粒子的目标函数值，种群速度主要受惯性权重和学习因子参数影响，学习因子影响多维度寻优效率，惯性权重大小与全局搜索能力正相关，ω 取值较大时有利于全局搜索，使得 PSO 算法收敛速度更快；ω 取值较小时则更有利于局部搜索，使得 PSO 算法收敛精度更高。

PSO 算法有迭代简单、利用群体智能进行优化等优点，广泛应用于新型电力系统中分布式储能容量优化配置中。文献[22]以储能容量为变量，削峰填谷效果最优为目标，实现对分布式储能容量的寻优。文献[37]以有功网损降低最大为优化目标，利用粒子群算法求解分布式储能的选址与容量规划问题。但随着优化过程的推进，惯性权重会越来越小，容易陷入局部最优解，且优化速度有待提升。

鉴于 PSO 算法的局限性，需要对其进行改进，下面就国内外相关学者在此方面研究作相关论述。文献[28]以优化目标为储能系统的地点选择和容量配置，设置学习因子为固定值，运用动态调整惯性权重来影响迭代前后期的搜索能力，提高了粒子群算法收敛速度，使寻优结果更准确。文献[38]运用反向搜索前期寻优和变异交叉策略后期寻优改进的粒子群算法，在优化前期对当前最优粒子运用反向学习策略，该策略能考虑当前最优解和反向解，更快逼近全局最优解；在优化后期进行变异、交叉处理，从而筛选出最优粒子。文献[39]将模拟退火的思想运用在传统粒子群算法中，使得寻优过程中，有一定概率暂时保留住劣质粒子，进而使得改进后的粒子群算法更具全局性。文献[40]以粒子当前位置与种群最优位置的差值为依据来改变惯性权重的取值，使得优化过程能兼顾全局性与局部搜索。文献[41]的惯性权重是通过引入 Sigmoid 函数来建立的，由于该函数在一定范围内敏感度较高，在此范围内惯性权重可以对细微变化感知明显，优化效率

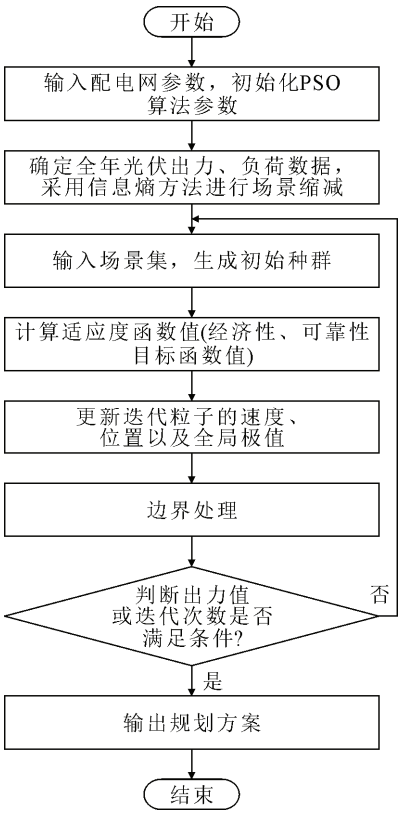


图 4　PSO 优化算法流程图

Fig.4　Flow chart of PSO optimization algorithm

更高，同时为了防止寻优过程陷入局部最优情况，引入了混沌粒子进行调节。文献[42]将量子力学与传统粒子群算法相结合，因其中粒子只包含位置信息，减少了控制参数，使其更具全局寻优能力，提高优化效率。文献[43]将学习因子变为时变学习因子，使其成线性变化，增强后期学习能力，同时引入压缩因子增强全局搜索能力，提升优化效率。

分布式储能优化配置的应用场景很多，针对不同应用场景下的求解需要选择合理的算法，各类算法具有各自的优缺点，需要在此基础上进行改进，使之更好地对问题进行求解，目前主要应用的智能算法，如遗传算法和粒子群算法，依然有计算量大、易落入局部最优等缺点，对此类算法进行改进并使之在储能优化配置问题中有更好的收敛性与效率是目前的研究重点。

4　结论

新型电力系统中新能源占比越来越大，给电网稳定性和电能质量带来很多问题和挑战，通过合理规划分布式储能，不仅可以促进新能源的消纳，还可以提升电网稳定持续供电能力。本文针对分布式储能的优化配置问题展开深入研究，根据分布式储能的不同应用场景，构建了完善的优化配置模型，同时从模型搭建和优化算法选择 2 方面进行研究归纳，得到以下结论：

1）通过对分布式储能系统经济性方面目标函数的研究，得出目前存在的储能成本较高、投资回报期长等问题，需要相关部门制定相应政策进行引导调节，例如在建造分布式储能初期给予投资方一定比例的奖励以降低投资成本，在电网调度中优先调用已投运的分布式储能以减短投资回报期。

2）现有的分布式储能优化配置模型一般从经济性和可靠性 2 方面选取目标函数，且优化目标一般较为单一，下一步应考虑加入其他方面的优化目标，例如环保性和能源利用率等，并考虑将其转化为经济性、可靠性 2 方面的目标函数；此外，对于多目标优化中各目标函数的权重应根据具体场景进行合理分配。

3）随着分布式储能优化配置的研究更加深入，会出现更多类型的优化指标，因此不仅要完善目标函数体系，还要对现有的优化算法进行改进，提高方法精确度和适用性，使得优化结果具有更高的可信度。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献　References

[1] 李相俊，官亦标，胡　娟，等. 我国储能示范工程领域十年(2012—2022)回顾[J]. 储能科学与技术，2022，11(9)：2702-2712.
LI Xiangjun, GUAN Yibiao, HU Juan, et al. Review of energy storage application in China from 2012 to 2022[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(9): 2702-2712.

[2] 李建林，郭兆东，马速良，等. 新型电力系统下“源网荷储”架构与评估体系综述[J]. 高电压技术，2022，48(11)：4330-4341.
LI Jianlin, GUO Zhaodong, MA Suliang, et al. Overview of the “source-grid-load-storage” architecture and evaluation system under the new power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4330-4341.

[3] 王　强，冉　鹏. 孤网储能系统电流均分与直流母线电压稳定的控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报，2023，35(6)：132-140.
WANG Qiang, RAN Peng. Control strategy for current equalization of energy storage systems and voltage stability of DC bus in isolated microgrid[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(6): 132-140.

[4] 招景明，苏洁莹，潘　峰，等. 考虑光伏波动的有源配电网分布式储能双目标优化规划[J]. 可再生能源，2022，40(11)：1546-1553.
ZHAO Jingming, SU Jieying, PAN Feng, et al. Dual objective optimization planning of distributed energy storage for active distribution network considering photovoltaic fluctuations[J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(11): 1546-1553.

[5] 刘　锴，李　超，胡资鹏，等. 基于用户侧效益最大化的储能系统优化配置研究[J]. 光源与照明，2023(5)：177-179.
LIU Kai, LI Chao, HU Zipeng, et al. Research on optimal allocation of energy storage system based on maximizing user-side benefits[J]. Light Source & Lighting, 2023(5): 177-179.

[6] 魏　旭，刘　东，高　飞，等. 双碳目标下考虑源网荷储协同优化

运行的新型电力系统发电规划[J]. 电网技术，2023，47(9)：3648-3658.
WEI Xu, LIU Dong, GAO Fei, et al. Generation expansion planning of new power system considering collaborative optimal operation of source-grid-load-storage under carbon peaking and carbon neutrality[J]. Power System Technology, 2023, 47(9): 3648-3658.

[7] 张光儒，任浩栋，马振祺，等. 提升配电网承载力和调节能力的整县分布式光伏储能配置方法[J]. 电气技术，2022，23(11)：49-55，61.
ZHANG Guangru, REN Haodong, MA Zhenqi, et al. County-wide distributed photovoltaic energy storage configuration method to improve the carrying capacity and regulation capacity of distribution network[J]. Electrical Engineering, 2022, 23(11): 49-55, 61.

[8] 赵冬梅，徐辰宇，陶　然，等. 多元分布式储能在新型电力系统配电侧的灵活调控研究综述[J]. 中国电机工程学报，2023，43(5)：1776-1798.
ZHAO Dongmei, XU Chenyu, TAO Ran, et al. Review on flexible regulation of multiple distributed energy storage in distribution side of new power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1776-1798.

[9] 邓诗语，刘文霞，刘　畅，等. 考虑双重不确定及综合效能的配电网储能规划决策方法[J]. 储能科学与技术，2022，11(1)：164-175.
DENG Shiyu, LIU Wenxia, LIU Chang, et al. Decision method of distribution network energy storage planning considering double uncertainty and comprehensive efficiency[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(1): 164-175.

[10] 任锐焕. 智能配电网中分布式储能布局优化配置研究[J]. 电气应用，2021，40(4)：31-35.
REN Ruihuan. Optimal configuration of distributed energy storage layout in smart distribution network[J]. Electrotechnical Application, 2021, 40(4): 31-35.

[11] 李建林，谭宇良，王　含，等. 配网及光储微网储能系统配置优化策略[J]. 高电压技术，2022，48(5)：1893-1902.
LI Jianlin, TAN Yuliang, WANG Han, et al. Research on configuration optimization of energy storage system in distribution network and optical storage microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1893-1902.

[12] 王一飞，董新伟，杨　飞，等. 基于配电网电压质量的分布式储能系统优化配置研究[J]. 热力发电，2020，49(8)：126-133.
WANG Yifei, DONG Xinwei, YANG Fei, et al. Optimal configuration of distributed energy storage system based on voltage quality of distribution network[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8): 126-133.

[13] 韩　莹，于三川，李荦一，等. 计及阶梯式碳交易的风光氢储微电网低碳经济配置方法[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2523-2533.
HAN Ying, YU Sanchuan, LI Luoyi, et al. Low-carbon and economic configuration method for solar hydrogen storage microgrid including stepped carbon trading[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2523-2533.

[14] 赵　璐，巩晋通，李园林，等. 考虑碳效益和辅助调峰的光伏电站储能配置方法[J]. 武汉大学学报(工学版)，2023，56(1)：80-88.
ZHAO Lu, GONG Jintong, LI Yuanlin, et al. Energy storage configuration method of photovoltaic power station considering carbon benefits and auxiliary peak shaving[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2023, 56(1): 80-88.

[15] 彭　伟，郑连清，郑天文. 分布式光伏储能系统的优化配置方法[J]. 四川电力技术，2022，45(1)：45-49，94.
PENG Wei, ZHENG Lianqing, ZHENG Tianwen. Optimal configuration method of distributed photovoltaic energy storage system[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2022, 45(1): 45-49, 94.

[16] 肖　峻，张泽群，梁海深. 配电网络公共储能位置与容量的优化方法[J]. 电力系统自动化，2015，39(19)：54-60，67.
XIAO Jun, ZHANG Zequn, LIANG Haishen. Optimal method for placement and capacity of energy storage in distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 54-60, 67.

[17] 张　昊. 提高配电网新能源消纳比例的分布式储能系统优化配置方法[J]. 电气应用，2022，41(3)：56-63.
ZHANG Hao. Optimized configuration method of distributed energy storage for improving renewable energy accomodation in distribution network[J]. Electrotechnical Application, 2022, 41(3): 56-63.

[18] 尚博阳，许　寅，王　颖，等. 参与辅助服务的用户侧储能优化配置及经济分析[J]. 中国电力，2023，56(2)：164-170，178.
SHANG Boyang, XU Yin, WANG Ying, et al. Optimal configuration and economic analysis of user-side energy storage participating in auxiliary services[J]. Electric Power, 2023, 56(2): 164-170, 178.

[19] 高广帅，李新国，曾海燕，等. 基于分段削峰的用户侧储能容量优化配置启发式方法[J]. 电工电能新技术，2023，42(1)：70-78.
GAO Guangshuai, LI Xinguo, ZENG Haiyan, et al. Segment-by-segment power peak clipping based heuristic method for optimal sizing of energy storage systems on the user-side[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(1): 70-78.

[20] 高　松，黄　河，李　妍，等. 适应随机序贯决策的分布式储能优化规划方法[J]. 高电压技术，2022，48(11)：4385-4392.
GAO Song, HUANG He, LI Yan, et al. Optimization programming method for distributed energy storage suitable for stochastic sequential decision-making[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4385-4392.

[21] 杨　帆，张　章，徐　晶，等. 面向可靠性提升的配电网分布式储能规划[J]. 电力电容器与无功补偿，2022，43(1)：188-196.
YANG Fan, ZHANG Zhang, XU Jing, et al. Distributed energy storage planning of distribution network for reliability improvement[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(1): 188-196.

[22] 朱佩雪，郭　倩，李灵至，等. 考虑主动配电网脆弱性的分布式储能配置[J/OL]. 电测与仪表，2022：1-8[2023-02-15]. http：//kns. cnki. net/kcms/detail/23.1202. TH. 20221019.1512.014. html.
ZHU Peixue, GUO Qian, LI Lingzhi, et al. Distributed energy storage configuration considering the vulnerability of active distribution network[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022: 1-8[2023-02-15]. http: //kns. cnki. net/kcms/detail/23.1202. TH. 20221019.1512.014. html.

[23] 刘志宏，赵杰行，薛鹏飞，等. 面向偏远地区供电可靠性提升的配网储能电站机会约束规划方法[J]. 电网与清洁能源，2021，37(8)：128-138.
LIU Zhihong, ZHAO Jiexing, XUE Pengfei, et al. Chance constrained planning of distribution-level energy storage stations for improving power supply reliability in remote areas[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(8): 128-138.

[24] 陆秋瑜，马千里，魏　韡，等. 基于置信容量的风场配套储能容量优化配置[J]. 电工技术学报，2022，37(23)：5901-5910.
LU Qiuyu, MA Qianli, WEI Wei, et al. Optimal configuration of energy storage parameters based on confidence capacity of wind farms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(23): 5901-5910.

[25] 侯美倩，牛启帆，邢　洁，等. 计及可靠性的含源配电网储能系统的优化配置[J]. 储能科学与技术，2023，12(2)：504-514.
HOU Meiqian, NIU Qifan, XING Jie, et al. Optimal configuration of energy storage system in active distribution network with the consideration of reliability[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(2): 504-514.

[26] 刘　沆，赵海彭，文　明，等. 考虑负荷灵活分配的综合能源系统站-网-荷协同规划方法[J]. 高电压技术，2023，49(1)：118-127.
LIU Hang, ZHAO Haipeng, WEN Ming, et al. Station-grid-load collaborative planning method for integrated energy system considering flexible distribution of load[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 118-127.

[27] 谢毓广，李金中，王　川，等. 考虑消纳水平的新能源配套储能和输电通道容量协调优化配置[J]. 电力自动化设备，2023，43(7)：51-57，72.
XIE Yuguang, LI Jinzhong, WANG Chuan, et al. Coordinated optimal capacity configuration of energy storage equipped by new energy and transmission lines considering consumption level[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(7): 51-57, 72.

[28] 朱志莹，郭　杰，于国强，等. 风光接入下储能系统双层优化模型[J]. 太阳能学报，2022，43(10)：443-451.

ZHU Zhiying, GUO Jie, YU Guoqiang, et al. Bi-layer optimization model for energy storage[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(10): 443-451.

[29] 檀勤良，单子婧，丁毅宏，等. 考虑蓄电池与电制氢的多能源微网灵活性资源配置双层优化模型[J]. 电力建设，2023，44(2)：38-49.
TAN Qinliang, SHAN Zijing, DING Yihong, et al. Bi-level optimal configuration for flexible resources of multi-energy microgrid considering storage battery and P2H[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(2): 38-49.

[30] 尚龙龙，魏碧桧，王 伟，等. 主动配电网储能动态配置规划方法[J]. 电力系统保护与控制，2020，48(17)：84-92.
SHANG Longlong, WEI Bihui, WANG Wei, et al. A planning method of dynamic energy storage configuration in an active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17): 84-92.

[31] 丰俊杰，曾平良，李亚楼，等. 考虑充放电策略对储能寿命影响的新型分布式储能优化配置研究[J/OL]. 电测与仪表，2021：1-8[2023-02-16]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210601.0942.002. html.
FENG Junjie, ZENG Pingliang, LI Yalou, et al. Research on optimal configuration of new distributed energy storage considering the impact of charge and discharge strategy on energy storage life[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021: 1-8[2023-02-16]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/23.1202. TH. 20210601.0942.002. html.

[32] 王 鹏，邓祥力，汪凯琳. 考虑风机及光伏机组三状态的微电网混合储能双层容量配置模型[J]. 现代电力，2023，40(3)：323-331.
WANG Peng, DENG Xiangli, WANG Kailin. Double-layer capacity configuration method of hybrid energy storage in microgrid considering three states of wind turbines and photovoltaic units[J]. Modern Electric Power, 2023, 40(3): 323-331.

[33] 李 涛，许 苑，陈 健，等. 计及全寿命成本和收益的微电网储能优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报，2020，32(3)：46-51，58.
LI Tao, XU Yuan, CHEN Jian, et al. Optimal configuration of energy storage for microgrid considering life cycle cost-benefit[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(3): 46-51, 58.

[34] 何 阳，张 宇，王育飞，等. 考虑负荷优化的电动汽车光伏充电站储能容量配置[J]. 现代电力，2019，36(5)：76-81.
HE Yang, ZHANG Yu, WANG Yufei, et al. Energy storage capacity configuration of PV-integrated EV charging station considering load optimization[J]. Modern Electric Power, 2019, 36(5): 76-81.

[35] 谢丽蓉，侯培浩，包洪印，等. 基于弃风利用的塔筒电梯储能系统优化配置[J]. 太阳能学报，2019，40(6)：1709-1714.
XIE Lirong, HOU Peihao, BAO Hongyin, et al. Optimal allocation for energy storage system of tower elevator based on abandoned wind[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2019, 40(6): 1709-1714.

[36] 王永利，向 皓，郭 璐，等. 面向多能互补的分布式光伏与电氢混合储能规划优化研究[J/OL]. 电网技术，2023：1-13[2023-02-16]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.2156.
WANG Yongli, XIANG Hao, GUO Lu, et al. Research on planning optimization of distributed photovoltaic and electro-hydrogen hybrid energy storage for multi-energy complementarity[J/OL]. Power System Technology: 1-13[2023-02-16]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst. 2022.2156.

[37] 郜 宁，张慧媛，王子琪，等. 区域电网分布式储能选址定容规划[J]. 高压电器，2020，56(8)：52-58.
GAO Ning, ZHANG Huiyuan, WANG Ziqi, et al. Planning for site selection and capacity determination of distributed energy storage in regional power grid[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8): 52-58.

[38] 李 聪，秦立军. 基于改进粒子群算法的混合储能独立调频的容量优化研究[J]. 太阳能学报，2023，44(1)：426-434.
LI Cong, QIN Lijun. Sizing optimization for hybrid energy storage system independently participating in regulation market using improved particle swarm optimization[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(1): 426-434.

[39] 杜 鹏，米增强，贾雨龙，等. 基于网损灵敏度方差的配电网分布式储能位置与容量优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制，2019，47(6)：103-109.
DU Peng, MI Zengqiang, JIA Yulong, et al. Optimal placement and capacity of distributed energy storage in distribution system based on the sensitivity variance of network loss[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 103-109.

[40] 张 冲，荣 娜. 基于改进粒子群算法的新能源侧储能容量配置[J]. 电网与清洁能源，2022，38(10)：98-105.
ZHANG Chong, RONG Na. Energy storage capacity allocation of renewable energy side based on improved particle swarm optimization[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(10): 98-105.

[41] 崔明勇，杨林林，杨少华，等. 基于需求侧响应的水风互补微电网容量优化配置[J]. 电工电能新技术，2022，41(2)：21-34.
CUI Mingyong, YANG Linlin, YANG Shaohua, et al. Optimal configuration of hydro-wind complementary micro-grid considering demand-side response[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2022, 41(2): 21-34.

[42] 韩子颜，王守相，赵倩宇，等. 计及分时电价的 5G 基站光储系统容量优化配置方法[J]. 中国电力，2022，55(9)：8-15.
HAN Ziyan, WANG Shouxiang, ZHAO Qianyu, et al. A capacity optimization configuration method for photovoltaic and energy storage system of 5G base station considering time-of-use electricity price[J]. Electric Power, 2022, 55(9): 8-15.

[43] 盛浩云，杨 静，张国平，等. 基于改进 PSO 算法的微能源网优化配置研究[J]. 电网与清洁能源，2021，37(8)：23-31.
SHENG Haoyun, YANG Jing, ZHANG Guoping, et al. Optimal configuration of micro energy network based on improved PSO algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(8): 23-31.



李建林
1976—，男，博士，教授，博导
主要从事大规模储能技术方面的研究
E-mail: dkyljl@163.com

LI Jianlin
Ph.D., Professor



姜冶蓉(通信作者)
1999—，女，硕士生
主要从事大规模储能技术方面的研究
E-mail: w1536950085@163.com

JIANG Yerong
Corresponding author



马速良
1988—，男，博士，助理研究员
主要从事大规模储能技术方面的研究
E-mail: msl13811581885@ncut.edu.cn

MA Suliang
Ph.D.

收稿日期 2023-02-20 修回日期 2023-05-24 编辑 程子丰

附表 A

表 A1　各省储能配比政策汇总表

Table A1　Summary table of energy storage ratio policies of each province

省份	项目	政策	储能比例	充电时间/h
青海	水电、新能源、储能项目	《青海省关于支持储能产业措施(试行)的通知》	≥10%	≥2
山东	分布式光伏项目	《胶州市整市分布式光伏开发工作指导意见》	15%	≥2
海南	集中式光伏发电平价上网项目	《关于开展 2021 年度海南省集中式光伏发电平价上网项目工作的通知》	10%	—
新疆	光伏发电和储能设施项目	《关于组织阿克苏地区 2021 年光伏发电项目》	≥10%	≥2
江西	光伏项目	《江西省能源局关于做好 2021 年新增光伏发电项目竞争工作的通知》	≥10%	≥1
福建	集中式光伏项目	《关于因地制宜开展集中式光伏试点工作的通知》	≥10%	—
甘肃	光伏项目	《嘉峪关市“十四五”第一批光伏发电项目竞争性配置公告》	≥20%	≥2
天津	风电、光伏项目	《2021-2022 年风电、光伏发电项目开发建设和 2021 年保障性并网有关事项的通知》	光伏：10%； 风电：15%	—
湖北	源网荷储、多能互补项目	《湖北省 2021 年新能源项目建设工作方案(征求意见稿)》	10%	≥2
陕西	风电、光伏项目	《关于促进可再生能源高质量发展的意见(征求意见稿)》	陕北、关中新增 10 万千瓦(含)以上集中式风电、光伏发电项目：≥10%； 榆林地区：≥20%	≥2
宁夏	光伏项目	《2022 年光伏发电项目竞争性配置方案》	≥10%	≥2
辽宁	光伏项目	《2022 年光伏发电示范项目建设方案(征求意见稿)》	15%	≥3
安徽	风电、光伏项目	《关于征求 2022 年第一批次光伏发电和风电项目并网规模竞争性配置方案意见的函》	≥5%	≥2
内蒙古	新能源项目	《关于征求工业园区可再生能源替代、全额自发自用两类市场化并网新能源项目实施细则意见建议的公告》	≥15%	≥4
山西	风电、光伏项目	《2021 年风电、光伏发电开发建设竞争性配置工作方案》	风电：10%； 光伏：10%~15%	—
广西	陆上风电、光伏项目	《2021 年市场化并网陆上风电、光伏发电及多能互补一体化项目建设方案的通知》	陆上风电：20%； 光伏：15%	≥2
湖南	风电、集中式光伏项目	《关于加快推动湖南省电化学储能发展的实施意见》	风电：≥15%； 集中式光伏：≥5%	≥2
浙江	非户用分布式光伏电站	《关于柯桥区整区屋顶分布式光伏开发试点实施方案的公示》	10%	≥2
上海	海上风电项目	《杭州湾海上风电项目竞争配置工作方案》	调峰能力 200 万千瓦及以上：≥10%； 调峰能力 100 万千瓦及以上：≥15%； 其他：≥20%	≥4
贵州	新能源项目	《关于推动煤电新能源一体化发展的工作措施(征求意见稿)》	≥10%	≥2