

计及电-碳耦合与协同自治的配电网储能优化配置策略

崔佳璇, 延肖何, 刘念

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 随着双碳目标的提出, 储能是促进分布式光伏就地平衡消纳、降低配电网碳排放的重要方式, 但是传统储能配置方案通常只考虑电力电量平衡, 如何综合考虑电碳特性对储能的优化配置提出了更高的要求。首先, 通过引入节点净负荷碳流率指标, 对配电网进行集群划分, 提出了一种基于电气距离和净负荷碳流率的配电网集群划分方法, 提高了配电网管理的效率和碳排放管理的精准度。在集群划分的基础上进一步提出了一种计及配电网碳排放成本的储能配置方法, 综合考虑碳排放成本和网损成本以及储能配置的经济性成本与收益, 建立了储能碳平衡机制, 量化了储能内部含碳量变化对配电网的影响, 避免了二氧化碳排入或排出储能设备。最后, 通过在安徽省某地配电网进行的算例仿真验证结果显示, 所提方法与未配置储能系统相比配电网碳排放总量减少了 11.12 %。

关键词: 电化学储能; 集群划分; 碳减排; 储能配置

Optimal Allocation Strategy of Energy Storage in Distribution Networks Taking into Account Electricity-Carbon Coupling and Cooperative Autonomy

CUI Jiaxuan, YAN Xiaohe, LIU Nian

(School of Electrical and Electronic Engineering North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: With the proposal of dual-carbon target, energy storage is an important way to promote distributed PV local balanced consumption and reduce carbon emissions from the distribution network, but the traditional energy storage configuration scheme usually only considers the electric power balance, and how to comprehensively consider the electric-carbon characteristics puts forward higher requirements for the optimal configuration of energy storage. Firstly, a cluster division method based on electrical distance and net load carbon flow rate is proposed by introducing the node net load carbon flow rate index for cluster division of distribution networks, which improves the efficiency of distribution network management and the accuracy of carbon emission management. On the basis of the cluster classification, an energy storage allocation method that takes into account the carbon emission cost of the distribution network is further proposed, which takes into account the carbon emission cost and network loss cost, as well as the economic cost and benefit of energy storage allocation, establishes a carbon balance mechanism for energy storage, quantifies the impact of the change of the carbon content within the energy storage on the distribution network, and avoids carbon dioxide emissions into or out of the energy storage equipment. Finally, the results of an arithmetic simulation in a distribution network in Anhui province show that the proposed method reduces the total carbon emissions of the distribution network by 11.12 % compared to the unconfigured energy storage system.

Key words: electrochemical energy storage; cluster division; carbon reduction; energy storage allocation

0 引言

根据国际能源署(IEA)的数据,全球电力碳排放量在 2024 年达到了约 378 亿 t 二氧化碳当量,较 2023 年增加 4.0 亿 t。配电网作为电力输送的最后一环,其运行效率和碳排放水平直接影响整个电力系统的低碳化发展。作为一种灵活性调节资源,储能的合理有效配置能够提高电网的能源利用效率^[1]、降低碳排放^[2-3]。然而,如何计及电碳协同方式,通过优化配置储能系统实现配电网碳排放的降低,是当前亟待解决的关键问题。

储能配置是一个混合整数非线性规划问题^[4],求解维度随着配电网规模的增大而增长。为了更高效地对配电网储能优化配置,可以在储能配置前对配电网进行集群划分。集群划分的指标主要包含结构性指标和功能性指标^[5-6]。结构性指标一般主要考虑的是电气距离指标,以确保划分后同一集群内的节点拓扑相连^[7-11],并且可以在一定程度上优化电能传输路径,减少网损。而功能性指标主要考虑的是负荷特征和可再生能源的分布,以便更加精准地反映各区域的实际运行条件。常见的功能性指标一般以提升集群内部的电压调节能力或源荷平衡度为主要目标。例如,通过结合光伏发电的不确定性,建立综合考虑区域电压调节能力的指标体系^[7-8],优化集群划分,来提升电网在高光伏渗透情况下的适应能力。此外,通过结合多断面源荷特征匹配的划分策略,可以管理并解决高比例分布式光伏接入带来的电压波动问题,从而减少电压违例与网络损耗^[9-10]。通过引入供需平衡度指标的划分策略,也可以避免集群内部供过于求,致使电价过低的极端情况发生^[11]。功能性指标为储能配置前的集群划分提供了更为全面的依据,有助于实现配电网的高效运行。但现有的集群划分研究较少考虑配电网的电碳协同特性指标,导致集群划分体系与结果缺乏对区域碳排放属性的映射。

在计及碳排放因素的储能建模方面,通常将储能视为零碳排放元件或不考虑储能碳排放强度的变化过程^[12-13]。但是,储能的碳排放强度会随着其内部含碳量的增加而增加,不能将其视作定值。文献^[14-16]提出了“附碳密度”、“储能碳势”的概念,以表征储能含碳量的变化。由于配电网系统内的可再生能源资源和负荷存在季节波动特性,因此,储

能系统应在一个固定的季节周期内达到碳排放的平衡,以避免外部碳排放量富集在储能,或储能对配电网造成额外碳排放。

现有储能配置策略通常以提升经济性和电网稳定性、可靠性^[17-23]为核心目标。在经济性方面,储能的优化配置旨在通过降低储能投资和配电网运营成本,实现最大化的经济效益。通常情况下,除经济性以外的目标有两类处理方式:一类是将其他目标转化为经济性目标进行优化配置求解^[24-25],另一类则是通过特定的目标函数处理方式,例如: ε -约束法^[26]等,来降低多个目标函数耦合带来的求解难度。但是,目前对于储能系统降低配电网碳排放的效益相关研究较少,储能系统的合理选址和定容也是配电网低碳化的重要方法和环节。储能系统可以通过动态调节配电网,在源侧高碳排放时段减少对高碳排放电源的依赖,从而降低整体碳排放。在储能配置原则方面,现有方法主要考虑电力电量平衡,较少考虑碳排放对储能配置的影响。在计算速度方面,现有方法主要通过逐点遍历的方式对储能进行定容选址,对于配电网配储存在计算速度慢的难点。因此,需要更加全面地兼顾不同区域和负荷碳排放特性的差异,提出一种储能优化配置方法,以确保在保证经济效益的同时,有效降低碳排放。

为了能全面反映配电网的运行特性和碳排放特征,本文提出了一种基于电气距离和净负荷碳流率^[27]配电网集群划分方法,通过引入节点净负荷碳流率指标,对集群划分进行优化。进一步地提出了一种面向降低配电网碳排放的储能系统的选址和容量配置方法,实现了更精准的碳排放管理。通过综合考虑碳排放成本和网损成本以及对储能内部含碳量变化的精准刻画,构建了储能季节始末碳平衡约束,有效限制了储能内部的碳富集,使得不同规模的储能系统能够在不同负荷碳流率区域内发挥最大效益。

1 考虑电气距离与净负荷碳流率的配电网集群划分方法

配电网集群划分是指将整个配电网划分为相对独立的小型子系统或集群的过程^[28-29]。不仅可以避免电能跨区域、长距离传输,减少功率损耗,还可以缩小优化控制空间、促进新能源和储能的就地消纳。每个集群内部的节点具有较短的电气距离,

能够有效减少电力传输损耗。同时,考虑每个节点的净负荷碳流率,将配电网节点划分为不同强度的负荷碳流率区域,以实现更精准的碳排放管理和能源优化。因此,本文建立了基于电气距离、节点净负荷碳流率的集群划分指标体系对配电网进行集群划分。

1.1 电气距离指标

电气距离指标是集群划分的重要结构性指标,表示节点间的电气耦合程度^[30],用以确保集群划分后集群内部节点拓扑相连,在提高电力系统稳定性、优化电力调度、故障隔离与恢复以及分布式能源接入等方面具有重要作用。对于复杂网络中的分区问题,可以通过模块度来衡量分区质量^[31],并将其扩展到加权网络的分区中。模块度函数的定义如下。

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_i \sum_j \left[A_{ij} - \frac{\sum_j A_{ij} \sum_i A_{ij}}{\sum_i \sum_j A_{ij}} \right] \delta(i, j) \quad (1)$$

式中: A_{ij} 为连接节点 i 和节点 j 之间的边的权重; k_i 为所有连接到节点 i 的边的权重之和; k_j 为所有连接到节点 j 的边的权重之和; m 为网络中所有边的权重之和; 当节点 i 与节点 j 处于同一集群时, $\delta(i, j) = 1$; 当节点 i 与节点 j 处于不同集群时, $\delta(i, j) = 0$ 。

首先,定义单点功率 k 对线路 l 的影响为:

$$D_{lk} = (x_{ak} - x_{bk}) / x_l \quad (2)$$

式中: a 和 b 分别为支路 l 的两端点; x_{ak} 为配电网节点阻抗矩阵中第 a 行第 k 列元素; x_{bk} 为第 b 行第 k 列元素; x_l 为支路 l 的电抗。

基于单点功率 k 对线路 l 的影响,构造节点边权矩阵中各元素为:

$$L_{ij} = \sqrt{\sum_{u=1}^{N-1} (D_{ui} - D_{uj})^2} \quad (3)$$

式中: $N-1$ 为网络中的支路数量; u 为网络中的支路; i, j 分别为网络中的节点,其中 i, j 之间有一条支路连接。

$$A_{ij} = 1/L_{ij} \quad (4)$$

式中,当 $i = j$ 时, $A_{ij} = 0$ 。 A_{ij} 的值越大表明 i, j 的电气连接越紧密。

1.2 节点净负荷碳流率指标

为了实现更精准的碳排放管理和能源优化及资

源配置,本文在原有模块度函数的基础上,引入节点净负荷碳流率指标^[32]。

首先根据配电网潮流计算结果进行节点日平均负荷碳流率的计算:根据配电网正常运行辐射状特征及考虑到分布式电源的渗入,为方便求解,本文采用 Distflow 潮流方程并进行二阶锥松弛后求解计算,调整后的 Distflow 潮流方程为:

$$P_{DG,i} + \sum_{k,i \in N} (P_{ki} - r_{ki} l_{ki}) = P_{L,i} + \sum_{i,j \in N} P_{ij} \quad (5)$$

$$Q_{DG,i} + \sum_{k,i \in N} (Q_{ki} - x_{ki} l_{ki}) = Q_{L,i} + \sum_{i,j \in N} Q_{ij} \quad (6)$$

$$U_j^2 - U_i^2 = (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) l_{ij} - 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}) \quad (7)$$

$$l_{ij} \geq \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2} \quad (8)$$

$$l_{ij} = I_{ij}^2 \quad (9)$$

式中: N 为配电网系统节点数量; 节点 i 为节点 j 的父节点(潮流从父节点流向子节点); DG 为分布式电源, $P_{DG,i}$ 和 $Q_{DG,i}$ 分别为节点 i 处分布式电源发出的有功功率和无功功率; $P_{L,i}$ 和 $Q_{L,i}$ 分别为节点 i 处的有功负荷和无功负荷; U_i 和 U_j 分别为节点 i 和节点 j 的电压; P_{ki} 和 Q_{ki} 分别为支路 ki 上从节点 k 流出的有功和无功功率, $(P_{ki} - r_{ki} l_{ki})$ 和 $(Q_{ki} - x_{ki} l_{ki})$ 分别为支路 ki 上注入节点 i 的有功和无功功率; P_{ij} 和 Q_{ij} 分别为支路 ij 上从节点 i 流出的有功和无功功率; l_{ij} 和 I_{ij} 分别为支路 ij 电流的平方和支路电流。

定义 $\mathbf{P}_{E,t}$ 为根据潮流计算结果所生成的 t 时段的支路潮流分布矩阵, 为 $N \times N$ 阶矩阵, 其中的元素表征每个时段两个节点之间的功率流动数值及方向, 若在 t 时段有: P_{ij} 为支路 ij 的正向有功潮流, 则, 该矩阵的对角元素全部为 0; 第 i 行第 j 列元素 $P_{E,t,ij} = P_{ij}$, 第 j 行第 i 列元素 $P_{E,t,ji} = 0$, 该矩阵的对角元素全部为 0; K 为系统机组数量, 在配电网进行优化的过程中, 把主网接入节点处视为接入了一个机组, 接入分布式电源的节点也视为机组接入节点, 因此, $\mathbf{P}_{G,t}$ 为 t 时段的机组注入分布矩阵, 为 $K \times N$ 阶矩阵; $\mathbf{P}_{L,t}$ 为 t 时段的负荷分布矩阵, 为 $N \times N$ 阶矩阵; 根据支路潮流分布矩阵和机组注入分布矩阵生成 t 时段的节点有功功率通量矩阵 $\mathbf{P}_{Node,t}$, $\mathbf{P}_{Z,t} = [\mathbf{P}_{E,t}, \mathbf{P}_{G,t}]$, ξ_{nb+K} 为 $1 \times (N+K)$ 阶行向量, 向量中所有元素均为 1, 节点有功功率通量矩阵为 $\mathbf{P}_{Node,t} = \text{diag}(\xi_{nb+K} \mathbf{P}_{Z,t})$; 发电机组的碳排放

强度矩阵为 $E_{G,t}$, 为 $K \times 1$ 阶矩阵, $E_{G,t} = [e_{g1,t}, e_{g2,t}, \dots, e_{gK,t}]^T$, $e_{gK,t}$ 为机组 K 在 t 时段的碳排放强度, 主网的碳排放强度随着时间的变化而变化。

每个时段节点碳势 $E_{Node,t}$ 的计算公式为:

$$E_{N,t} = (P_{Node,t} - P_{E,t}^T)^{-1} P_{G,t}^T E_{G,t} \quad (10)$$

定义 $P_{RE,t}$ 为 t 时段的所有节点的可再生能源注入分布矩阵, $P_{RE,i,t}$ 为其中的第 i 行元素。因此, 节点 i 在 t 时段的净负荷碳流率为:

$$R_{L,i,t} = (P_{L,i,t} - P_{RE,i,t}) \cdot E_{Node,i,t} \quad (11)$$

式中 $P_{L,i,t}$ 为节点 i 在 t 时段的有功功率负荷。

节点 i 一日内的平均净负荷碳流率为:

$$\overline{R_{L,i}} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T R_{L,i,t} \quad (12)$$

式中 $T = 24$ 。

集群 n 内节点的总平均净负荷碳流率为:

$$R_{L,n} = \sum_{i \in n} \overline{R_{L,i}} \quad (13)$$

模型的具体约束条件如下。

1) 支路潮流约束

$$\begin{cases} P_{ij-\min} \leq P_{ij}(t) \leq P_{ij-\max} \\ Q_{ij-\min} \leq Q_{ij}(t) \leq Q_{ij-\max} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $P_{ij}(t)$ 和 $Q_{ij}(t)$ 分别为支路 ij 在 t 时段从节点 i 流出的有功和无功功率; $P_{ij-\min}$ 和 $Q_{ij-\min}$ 分别为支路 ij 的有功和无功潮流下限; $P_{ij-\max}$ 和 $Q_{ij-\max}$ 分别为支路 ij 的有功和无功潮流上限。

2) 节点电压约束

$$U_{i-\min} \leq U_i(t) \leq U_{i-\max} \quad (15)$$

式中: $U_i(t)$ 为节点 i 在 t 时段的电压幅值; $U_{i-\min}$ 为节点 i 的电压下限; $U_{i-\max}$ 为节点 i 的电压上限。配电网的节点电压不应高于电压等级的 1.05 倍, 不应低于电压等级的 0.95 倍。

3) 支路电流约束

$$I_{ij-\min} \leq I_{ij}(t) \leq I_{ij-\max} \quad (16)$$

式中: $I_{ij}(t)$ 为支路 ij 在 t 时段的电流值; $I_{ij-\min}$ 为支路 ij 的电流下限; $I_{ij-\max}$ 为支路 ij 的电流上限。

4) 节点功率平衡约束

根据配电网中的分布式电源和储能渗入情况, 有功功率平衡约束的表达式为:

$$P_{\sup,i}(t) + (P_{ki,t} - r_{ki} l_{ki,t}) = P_{\text{con},i}(t) + \sum_{i,j \in N} P_{ij,t} \quad (17)$$

$$P_{\sup,i}(t) = P_{\text{wt},i,t} + P_{\text{pv},i,t} + P_{\text{ess},i,t}^{\text{dis}} \quad (18)$$

$$P_{\text{con},i}(t) = P_{L,i,t} + P_{\text{ess},i,t}^{\text{cha}} \quad (19)$$

$$(Q_{ki,t} - x_{ki} l_{ki,t}) = Q_{L,i,t} + \sum_{i,j \in N} Q_{ij,t} \quad (20)$$

式中: $P_{\sup,i}(t)$ 和 $P_{\text{con},i}(t)$ 分别为节点 i 在 t 时段的供给功率和消耗功率; $P_{\text{wt},i,t}$ 为分布式风电为节点 i 在 t 时段的有功功率出力; $P_{\text{pv},i,t}$ 为分布式光伏为节点 i 在 t 时段的有功功率出力; $P_{\text{ess},i,t}^{\text{dis}}$ 为节点 i 的储能设备在 t 时段的放电功率; $P_{\text{ess},i,t}^{\text{cha}}$ 为节点 i 的储能设备在 t 时段的充电功率; $l_{ki,t}$ 为支路 ki 在时段 t 的电流平方值; $P_{ki,t}$ 和 $Q_{ki,t}$ 分别为支路 ki 在 t 时段的有功和无功功率, 节点 k 为节点 i 的父节点 (k 不包含配电网支路末端节点), 节点 i 为节点 j 的父节点; $Q_{L,i,t}$ 为节点 i 在 t 时段的无功负荷。

1.3 基于 Louvain 算法的配电网集群划分

本文采用 Louvain 算法对配电网集群划分进行求解, 其优化目标为整个集群的模块度函数达到最大值^[33]。

为了将配电网划分为负荷碳流率大小不同的集群, 本文对模块度指标进行了改进, 在原有权重的基础上加入新的元素 B_{ij} , B_{ij} 值越大, 表明两个节点之间的负荷碳流率越接近。

$$B_{ij} = 1 / \left(1 + \left| \overline{R_{L,i}} - \overline{R_{L,j}} \right| \right) \quad (21)$$

因此, 在更新模块度定义后, 式(1)~(4)变化为:

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_i \sum_j \left[(A_{ij} + B_{ij}) - \frac{k_i k_j}{2m} \right] \delta(i, j) \quad (22)$$

$$k_i = \sum_j A_{ij} + B_{ij} \quad (23)$$

$$k_j = \sum_i A_{ij} + B_{ij} \quad (24)$$

$$m = \left(\sum_i \sum_j (A_{ij} + B_{ij}) \right) / 2 \quad (25)$$

基于 Louvain 算法, 首先将网络中所有节点各自划分为一个社区, 此时社区数目等于节点数量。而后选择任意一个节点与其相邻的节点合并, 并将其分别归并至相邻节点的社区中, 计算并记录归并结束后的网络模块度变化量, 该节点选择变化量为正且最大的相邻节点社区加入, 以此类推, 继续进行归并、计算、比较和最终归并, 直至 Q 值达到满足条件范围内的最大值为止。

最终, 配电网将被划分为高、中、低不同类负荷碳流率区, 可以根据集群划分结果, 参照不同集

群的碳排放情况,进行储能配置。

2 计及电碳协同的储能配置方法

配电网在运行的过程中产生的碳排放通常来自火电机组、微型燃气轮机机组等。本文在考虑了配电网配置储能的经济性成本与收益的基础上,进一步将碳排放相关因素纳入,考虑了储能与配电网之间的能碳交互,建立目标函数:

$$\min F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 - F_5 - F_6 \quad (26)$$

式中: F 为配电网的日均投资成本及收益; F_1 为一日之内配电网由主网输送电能产生的碳排放成本; F_2 为一日网损成本; F_3 为储能的日均配置成本; F_4 为储能的日均维护成本; F_5 为储能的一日峰谷套利收益; F_6 为储能的日均退役回收收益。

2.1 配电网总碳排放成本模型

配电网总碳排放量包含负荷节点、网损及流入储能的碳量产生的碳排放。在只含有分布式风电、光伏的配电网系统中,配电网所承担的碳排放成本一般源自于主网购得的电能,根据主网时序碳势曲线,可以得出配电网的碳排放量及碳排放成本,如式(27)所示。

$$F_1 = \lambda_{\text{CO}_2} \sum_{t=1}^T P_{G,m,t} e_{m,t} \Delta t \quad (27)$$

式中: λ_{CO_2} 为单位碳排放量的碳税; T 为时段数量; $P_{G,m,t}$ 为 t 时段配电网从主网的购电功率; $e_{m,t}$ 为 t 时段主网碳势; Δt 为时段时长。 $\sum_{t=1}^T P_{G,m,t} e_{m,t} \Delta t$ 为 Δt 时间内配电网所产生的碳排放量。

2.2 配电网网损成本模型

由 Distflow 潮流模型,计算出配电网一日之内的网损成本。

$$F_2 = c_{e,t} \sum_{i=1}^T \sum_{j \in N} I_{ij,t}^2 r_{ij} \Delta t \quad (28)$$

式中: $c_{e,t}$ 为典型日 t 时段的电价; r_{ij} 为支路 $i-j$ 的电阻。

2.3 配电网储能选址定容模型

根据集群划分的结果,在每一个集群内部分别进行储能的配置。在进行储能配置的过程中,投资层面主要考虑了分布式储能的容量成本、功率成本以及设备维护成本;收益层面主要考虑了储能的退役回收收益及峰谷套利收益。

2.3.1 储能建设维护成本与收益

储能系统的建设成本与收益是评估其经济可行性的重要因素。储能系统在全寿命周期下的等值日均投资成本的计算公式如下。

$$F_3 = \frac{1}{365} \cdot \sum_{i \in S_{\text{ess}}} \frac{\gamma(1+\gamma)^{y_{\text{ess}}}}{(1+\gamma)^{y_{\text{ess}}} - 1} (C_e E_{\text{ess},i} + C_p P_{\text{ess},i}) \quad (29)$$

$$\mu_{\text{ess},i} E_{\text{ess},\min} \leq E_{\text{ess},i} \leq \mu_{\text{ess},i} E_{\text{ess},\max} \quad (30)$$

$$\mu_{\text{ess},i} P_{\text{ess},\min} \leq P_{\text{ess},i} \leq \mu_{\text{ess},i} P_{\text{ess},\max} \quad (31)$$

式中: γ 为贴现率; y_{ess} 为储能装置的寿命; $E_{\text{ess},i}$ 和 $P_{\text{ess},i}$ 分别为第 i 个储能装置的额定容量和额定功率; S_{ess} 为储能的安装地点集合; C_e 和 C_p 分别为储能单位容量和单位功率的投资成本; $E_{\text{ess},\min}$ 和 $E_{\text{ess},\max}$ 分别为储能配置的容量下限和上限; $P_{\text{ess},\min}$ 和 $P_{\text{ess},\max}$ 分别为储能配置的功率下限和上限; $\mu_{\text{ess},i}$ 为 0-1 变量,当该变量值为 0 时表明节点 i 不配置储能,当该变量值为 1 时表明节点 i 配置储能。

在储能运行过程中,根据维护需求,设置储能设备的日均维护成本为:

$$F_4 = \frac{1}{365} \cdot \sum_{i \in S_{\text{ess}}} u_{\text{re}} (C_e E_{\text{ess},i} + C_p P_{\text{ess},i}) \quad (32)$$

式中 u_{re} 为储能的年均维护成本系数。

在收益方面,本文主要考虑了储能系统的峰谷套利收益。储能系统通过在电价较低的时段充电、在电价较高的时段放电,实现电力套利。储能系统在一日之内的峰谷套利收益表达式为:

$$F_5 = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T c_{e,t} P_{\text{ess},i,t}^{\text{dis}} \Delta t - \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T c_{e,t} P_{\text{ess},i,t}^{\text{cha}} \Delta t \quad (33)$$

式中: $P_{\text{ess},i,t}^{\text{dis}}$ 为储能系统 i 在 t 时段的放电功率; $P_{\text{ess},i,t}^{\text{cha}}$ 为储能系统 i 在 t 时段的充电功率; n 为配电网划分集群数量。

此外,本文还考虑了储能系统的退役回收收益^[34],根据储能的配置成本和回收系数,可得出储能的日均退役回收收益表达式为:

$$F_6 = \frac{1}{365} \cdot \sum_{i \in S_{\text{ess}}} \mu \frac{\gamma(1+\gamma)^{y_{\text{ess}}}}{(1+\gamma)^{y_{\text{ess}}} - 1} (C_e E_{\text{ess},i} + C_p P_{\text{ess},i}) \quad (34)$$

式中 μ 为储能的退役回收系数,在本文中取 5%。

2.3.2 储能优化配置模型

储能配置需要受到潮流约束、配电网网络特性、储能本身的特性及集群功率不倒送等约束,具

体约束条件如下。

1) 储能特性约束

$$u_{ess,i,t}^{\text{dis}} + u_{ess,i,t}^{\text{cha}} \leq 1 \quad (35)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{ess,i,t}^{\text{dis}} \leq u_{ess,i,t}^{\text{dis}} P_{i,\max}^{\text{dis}} \\ 0 \leq P_{ess,i,t}^{\text{cha}} \leq u_{ess,i,t}^{\text{cha}} P_{i,\max}^{\text{cha}} \end{cases} \quad (36)$$

$$E_{i,t} - E_{i,t-1} = \left(P_{ess,i,t}^{\text{cha}} \eta^{\text{cha}} - \frac{P_{ess,i,t}^{\text{dis}}}{\eta^{\text{dis}}} \right) \Delta t \quad (37)$$

$$E_{i,0} = E_{i,24} \quad (38)$$

$$S_{\text{oC } i, \min} \leq \frac{E_{i,t}}{E_i} \leq S_{\text{oC } i, \max} \quad (39)$$

式(35)中: $u_{ess,i,t}^{\text{dis}}$ 与 $u_{ess,i,t}^{\text{cha}}$ 为两个 0-1 二进制变量, 分别表示节点 i 处储能设备在时段 t 的充放电状态。当 $u_{ess,i,t}^{\text{dis}} = 0$ 、 $u_{ess,i,t}^{\text{cha}} = 1$ 时, 表示该时段节点 i 处储能设备处于充电状态; 当 $u_{ess,i,t}^{\text{dis}} = 1$ 、 $u_{ess,i,t}^{\text{cha}} = 0$ 时, 表示该时段节点 i 处储能设备处于放电状态; 二者都为 0 则表示储能设备在此时段处于静置状态。式(36)中: $P_{i,\max}^{\text{dis}}$ 与 $P_{i,\max}^{\text{cha}}$ 分别为节点 i 处储能设备的放电和充电功率上限, 放电与充电功率的下限都设置为 0。式(37)中: $E_{i,t}$ 为 t 时段结束时节点 i 处储能设备的电量; $E_{i,t-1}$ 为上一时段结束时节点 i 处储能设备的剩余电量; η^{cha} 和 η^{dis} 分别为储能电池的充电效率和放电效率。式(38)中: $E_{i,0}$ 为上一运行日结束时(即待决策运行日开始时)的储能电量; $E_{i,24}$ 为该运行日结束时的储能电量。式(39)中: 放电深度不宜过深以保护电池, $S_{\text{oC } i, \max}$ 与 $S_{\text{oC } i, \min}$ 分别为节点 i 处储能设备的荷电率上下限, 储能设备的荷电率在健康范围内波动可以最大程度延长电池寿命。

2) 储能安全性能约束

频繁充放电会对储能造成不可逆损伤, 因此应当对储能充放电次数加以限制以确保储能安全稳定运行。储能系统日等效充放电次数应满足如下约束。

$$\sum_{t=1}^{24} P_{ess,i,t}^{\text{dis}} / E_{ess,i} \leq N_i \quad (40)$$

$$\sum_{t=1}^{24} P_{ess,i,t}^{\text{cha}} / E_{ess,i} \leq N_i \quad (41)$$

式中 N_i 为节点 i 处储能设备在寿命周期内一日循环充放电次数。

3) 集群功率约束

$$\sum_{i \in c_{\text{cluster}}} P_{L,i,t} - \left(\sum_{i \in c_{\text{cluster}}} P_{ess,i,t}^{\text{dis}} - \sum_{i \in c_{\text{cluster}}} P_{ess,i,t}^{\text{cha}} \right) \geq 0 \quad (42)$$

式中 c_{cluster} 为集群数量。

为防止储能功率跨集群交换或向上级电网倒送功率, 造成更多的网损, 因此储能充放电功率还需满足集群功率约束。

2.4 储能碳平衡机制

在储能的充放电过程中, 储能的电量随时间变化, 储能内部的含碳量随之发生动态变化。与节点碳势类似, 本文将表征储能碳排放强度的物理量定义为储能碳势。储能系统 i 从 $t-1$ 时段到 t 时段的内部含碳量变化及在 t 时刻储能碳势的定义为:

$$\Delta C_{t,t-1} = C_{ess,i,t-1} + \left(E_{N,i,t} P_{ess,i,t}^{\text{cha}} \eta^{\text{cha}} - E_{ess,i,t-1} P_{ess,i,t}^{\text{dis}} / \eta^{\text{dis}} \right) \Delta t \quad (43)$$

$$E_{ess,i,t} = \frac{C_{ess,i,t-1} + \left(E_{N,i,t} P_{ess,i,t}^{\text{cha}} \eta^{\text{cha}} - E_{ess,i,t-1} P_{ess,i,t}^{\text{dis}} / \eta^{\text{dis}} \right) \Delta t}{E_{i,t-1} + \left(P_{ess,i,t}^{\text{cha}} \eta^{\text{cha}} - P_{ess,i,t}^{\text{dis}} / \eta^{\text{dis}} \right) \Delta t} \quad (44)$$

式中: $C_{ess,i,t-1}$ 为节点 i 储能设备在 $t-1$ 时刻的含碳量; $E_{ess,i,t}$ 为节点 i 储能设备在 t 时刻的碳势。当储能充电时, 流入储能的碳量由节点碳势和储能充电量共同决定; 当储能放电时, 流出储能的碳量由储能碳势和储能放电量共同决定。

由于新能源出力和负荷特性四季分明, 致使配电网碳排放特性以四季为周期随着季节更替而变换, 储能内部的含碳量变化也发生更迭。为了避免配电网运行所降低的碳排放量都流入储能设备, 出现“虚假降碳”这一现象, 也为了防止储能内部二氧化碳流出造成碳流追溯困难, 本文引入储能季节碳平衡机制。储能季节碳平衡约束如下所示。

$$C_{ess,i,0} = C_{ess,i,n} \quad (45)$$

式中 $C_{ess,i,0}$ 和 $C_{ess,i,n}$ 分别为储能系统 i 在周期起始时刻和终止时刻的含碳量。

3 典型场景生成与削减

为了降低可再生能源出力的不确定性^[35], 在储能配置过程中, 需要进行典型风光场景的生成与削减。本文采用蒙特卡洛抽样方法进行典型光伏场景生成, 而后采用基于概率距离的快速前代技术进行场景削减^[36], 具体建模过程如下。

光伏出力的不确定性源于太阳辐照度的变化, 通常假设太阳辐照度变化服从 Beta 分布, 其概率密度函数为:

$$f(s_i; \alpha, \beta) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} s_i^{\alpha-1} (1 - s_i)^{\beta-1} \quad (46)$$

式中: s_i 为 t 时段的太阳辐照度; α 和 β 为 Beta 分布的形状参数。由太阳辐照度可以得出光伏的最大可输出功率:

$$P_{pv, t, \max} = s_i A_{pv} \eta_{pv} \quad (47)$$

式中: $P_{pv, t, \max}$ 为光伏的实际最大可输出功率; A_{pv} 和 η_{pv} 分别为辐射面积和光电转换效率。

选取多日逐小时太阳辐照度数据, 拟合出服从 Beta 分布的太阳辐射度概率密度曲线。而后从概率分布模型中随机采样获得太阳辐照度数据, 利用式 (47) 转化为功率数据, 随机生成大量光伏发电典型出力场景。

而后, 采用基于概率距离的快速前代技术进行场景削减。具体步骤如下。

- 1) 利用蒙特卡洛抽样的方法随机生成 M 个光伏发电场景;
- 2) 计算所有场景中每对场景之间的几何距离;
- 3) 筛选出与其他剩余场景距离之和最小的场景 k ;
- 4) 找出其他场景中场景 k 几何距离最小的场景 r ;
- 5) 把场景 k 出现的概率叠加到场景 r 上, 而后删除场景 r ;
- 6) 此时剩余 N 个场景, 若 N 大于最终需要的场景数目, 则返回步骤 2), 否则结束循环, 输出最终场景。

4 算例分析

为了验证本文所提方法的可行性和有效性, 本文基于我国安徽省某实地 10 kV 配电网系统进行仿真验证计算。其中 1、23 号节点为变压器节点, 碳势相同。系统共有 40 个节点、39 条支路, 8、12、15 和 39 号节点用户自装有光伏, 在满足自身消纳的条件下, 采取余电上网的模式运营。算例中的负荷数据采用当地春、夏、秋、冬典型日的 24 h 负荷数据。0—7 时及 22—24 时平时电价为 0.7 元/kWh, 7—11 时及 18—22 时峰时电价为 1.2 元/kWh, 11—18 时谷时电价为 0.4 元/kWh; 碳税价格为 0.108 元/kgCO₂; 储能的容量成本为 120 万元/MWh, 功率成本为 100 万元/MW^[37]; 折现率按照 7 % 计算; 储能

的可利用循环次数为 7 300 次, 折合寿命周期约为 10 a^[38]; 初始荷电状态为 50 %, 储能充放电效率为 95 %, 荷电状态上下限分别为 85 % 和 20 %; 3 台储能设备的初始碳势设为 0.3 kgCO₂/kWh, 并要求在四季典型日末与初始时刻保持平衡。配电网的具体拓扑结构及算例所用到的主网碳势如图 1—2 所示。

在未配置储能的场景下, 该配电系统 4 个连续典型日的网损成本为 5 219.77 元, 碳排放成本为 4 118.98 元。

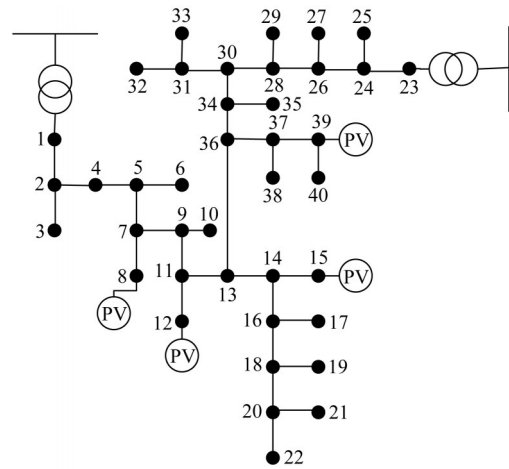


图 1 安徽省某地配电网拓扑图

Fig. 1 Topology diagram of distribution network in Anhui province

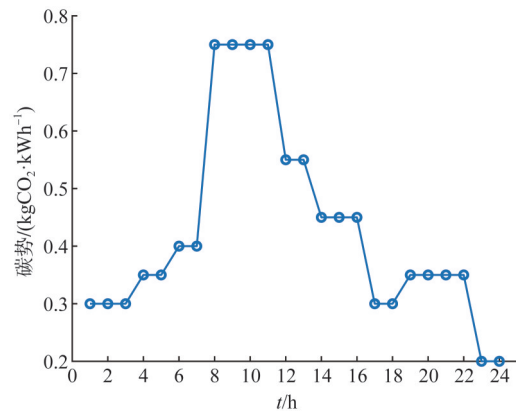


图 2 主网碳势

Fig. 2 Carbon potential of main network

4.1 场景生成与削减结果

考虑到光伏出力的不确定性, 以 8 号节点接入光伏为例, 将大量不同季节场景削减至 4 个, 作为连续典型日进行仿真计算, 四季典型日具体光伏出力曲线如图 3 所示。

其他光伏节点典型场景获取步骤与 8 号节点

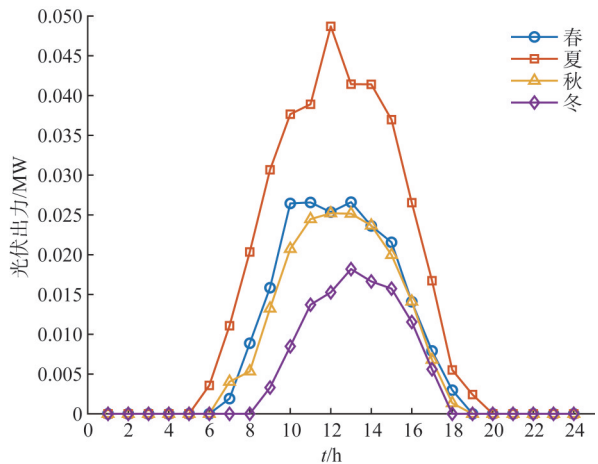


图3 8号节点四季典型日的光伏出力

Fig. 3 Photovoltaic outputs of node 8 on typical day in all seasons

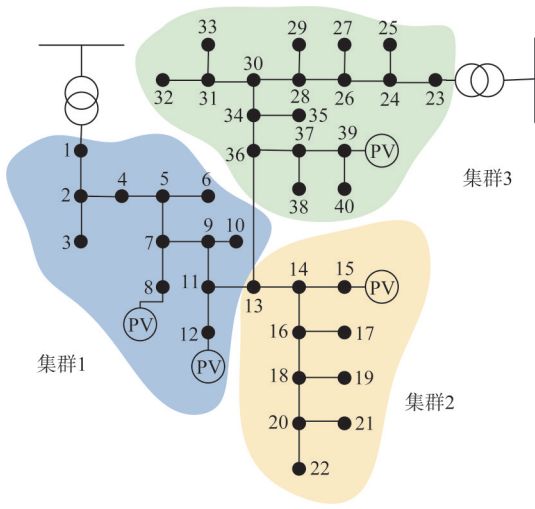


图4 综合考虑电碳特性的集群划分结果

Fig. 4 Results of cluster classification with integrated consideration of electric-carbon properties

相同。

4.2 基于 Louvain 算法与电碳特性指标的配电网集群划分结果

按照本文所提出的包含节点日平均净负荷碳流率的模块度指标体系, 配电网的集群划分结果如图4所示:

40 节点的配电网按照拓扑相连性和节点4个季节典型日的平均净负荷碳流率被划分为3个集群。集群1包含1—12号节点, 总平均负荷碳流率为100.24 kgCO₂/h; 集群2包含13—22号节点, 总平均负荷碳流率为216.58 kgCO₂/h; 集群3包含23—40号节点, 总平均负荷碳流率为47.41 kgCO₂/h。由此可得: 集群2为高碳排区, 集群1为中碳排区, 集群3为低碳排区。其中, 集群2对于降低碳排放量的需求最高, 需要容量/功率较大的储能系统对其运行进行动态调节, 在集群内负荷碳流率较高时, 确保有该集群内储能有足够的动态调节集群内碳排放量, 避免储能长距离送电产生较高的成本和损耗。

4.3 传统储能配置场景下配电网碳排放结果分析

根据算例仿真结果, 在传统储能配置的场景下(即目标函数不考虑碳排放成本), 该配电系统4个连续典型日的网损成本为4 240.94元, 碳排放成本为3 877.66元。

其中, 3台储能的接入节点位置及容量/功率分别为: 节点12配置1.47 MWh/0.37 MW的储能系统1; 节点22配置2.61 MWh/0.65 MW的储能系统2; 节点40配置0.75 MWh/0.19 MW的储能系统3。

2; 节点40配置0.75 MWh/0.19 MW的储能系统3。

4.4 本文方法下配电网储能配置及碳排放结果分析

根据本文所提方法, 在不同区域内进行储能的选址与优化配置, 储能的配置位置、容量和功率如表1和图5所示。

表1 储能接入位置

Tab. 1 Energy storage access location

储能编号	接入节点
1	12
2	22
3	40

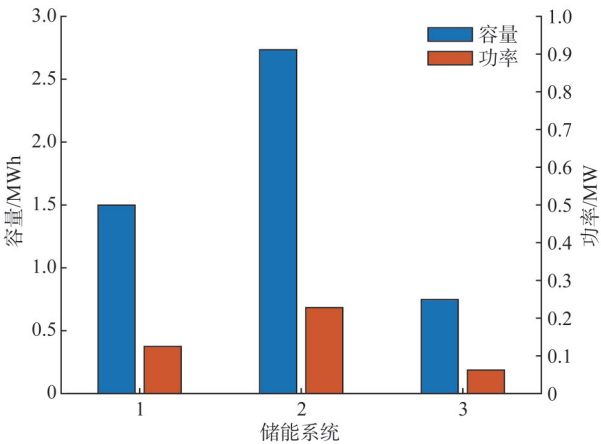


图5 储能配置容量和功率

Fig. 5 Energy storage configuration capacities and powers

如表 1 及图 5 所示, 分别在节点 12、22、40 配置不同容量/功率的储能系统, 节点 12 配置 1.50 MWh/0.37 MW 的储能系统 1; 节点 22 配置 2.73 MWh/0.68 MW 的储能系统 2; 节点 40 配置 0.75 MWh/0.19 MW 的储能系统 3。3 个储能系统的充放电功率曲线如图 7 所示, 呈现出在主网碳势较低时候充电、碳势较高时候放电的规律, 起到了动态调节配电网系统碳排放量的作用。在配置储能系统之后, 总碳排放成本降低为 3 661.10 元, 网损成本降低为 4 222.98 元。3 个储能系统的总计 4 日的等值配置成本为 11 269.29 元, 等值维护成本为 791.51 元, 峰谷套利收益为 14 079.64 元。在储能充电过程中, 二氧化碳随着电能存储在储能中富集; 而在储能放电过程中, 储能内部原有的二氧化碳排出储能设备, 如若不对储能内部的含碳量加以限制, 将会造成二氧化碳排放轨迹追溯不清, 使得配电网产生的碳排放富集在储能内部, 并未做到实际意义上的配电网降碳, 引发“虚假降碳”的现象; 或引起储能内部二氧化碳排出, 碳排放难以追溯。3 台储能内部含碳量变化如图 6 所示, 其四季典型日始末保持平衡。

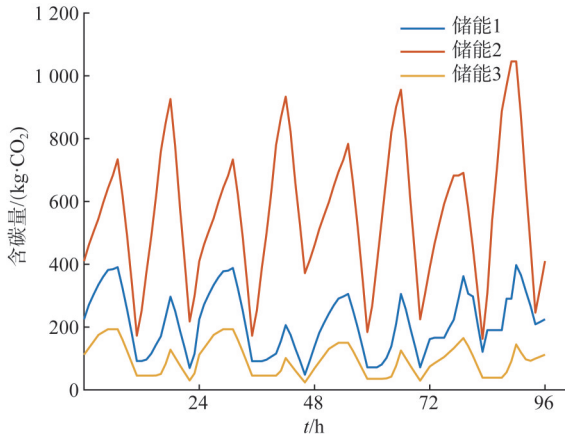


图6 储能内部含碳量变化

Fig. 6 Change in carbon content within energy storage

对比未配置储能系统场景, 配电网典型日内碳排放成本降低了 11.12 %, 网损成本降低了 19.10 %。

对比传统储能配置场景, 本文所提“规划+运行”的配置方法可以在保证峰谷套利收益的同时, 进一步发挥储能设备对主网碳势“低储高放”的能力。配电网典型日内碳排放成本降低了 5.58 %, 网损成本相差不大。四季典型日充放电功率对比结果如图 7—8 所示。表 2 为 3 种场景下配电网运行成本与收益对比结果。

网损成本相差不大。四季典型日充放电功率对比结果如图 7—8 所示。表 2 为 3 种场景下配电网运行成本与收益对比结果。

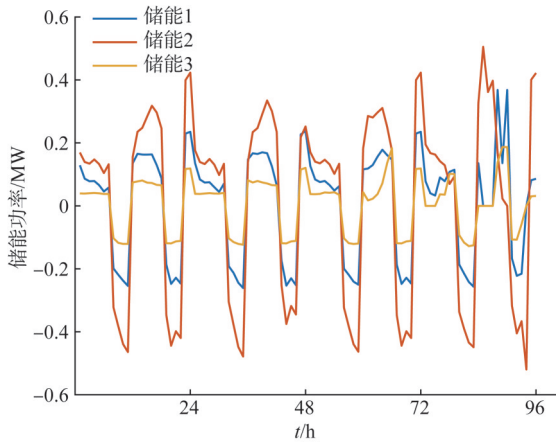


图7 传统方法下储能系统的时序充放电功率

Fig. 7 Time-series charging and discharging power of energy storage systems under conventional method

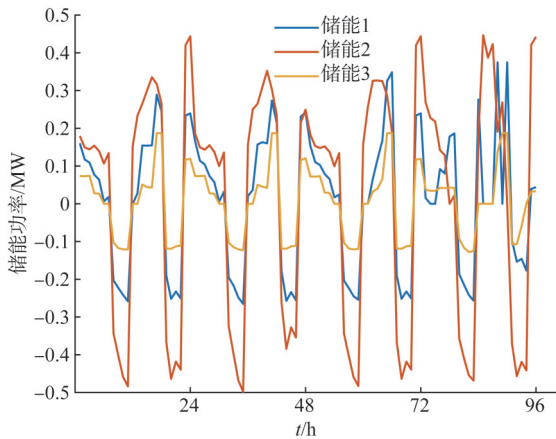


图8 本文方法下储能系统的时序充放电功率

Fig. 8 Time-series charging and discharging power of the energy storage system under the method of this paper

表 2 3 种场景下配电网运行成本与收益对比

Tab. 2 Comparison of distribution network operation costs and benefits under three scenarios

参数	未配置储能	传统储能配置	本文方法
总碳排放成本	4 118.98	3 877.66	3 661.10
网损成本	5 219.77	4 240.94	4 222.98
储能的等值配置成本		10 917.47	11 269.29
储能的等值维护成本		766.80	791.51
储能的峰谷套利收益		13 667.23	14 079.64
储能的退役回收收益		545.87	563.46
总等值成本	9 338.75	5 589.78	5 301.78

4.5 储能配置求解时间分析

采用两种场景进行求解时间的对比,场景1为1 439.44 s,场景2为1 330.67 s。场景1:直接对安徽省某地配电网进行储能配置,配置数目为3台;场景2:见本文4.4节。

相较于不划分集群,选址问题中搜索域大小由9 880个减少到2 160个,划分集群后的储能优化配置求解时间缩短了7.56%,集群划分有效缩小了解域,加快了储能配置的求解速度。

5 结论

本文在低碳经济视角下探讨了配电网储能选址与定容策略的优化问题,结论如下。

1)通过综合考虑电气距离和节点净负荷碳流率指标,改进了模块度函数,利用Louvain算法实现了集群的高效划分,实现了负荷碳排放的分区管理,提升了储能配置的求解效率。

2)构建了配电网包含碳排放、网损成本的模型,优化了储能的选址与定容,降低了配电网的碳排放成本。

3)本文通过建立储能季节碳平衡机制,使得储能碳势在4个季节典型日始末保持平衡,有效降低了储能内部的碳富集,避免了“虚假降碳”现象的发生。

本文的方法在实现配电网低碳化、提升系统的经济性和环保效益方面具有显著优势。未来,将进一步考虑集群的互济能力,进一步拓展电-碳协同的适用范围,对配电网储能进行更高效的优化配置。

参考文献

- [1] 檀勤良,贺嘉明,王一,等.计及灵活性资源协同的调峰储能两阶段分布鲁棒配置优化[J/OL].南方电网技术,1-12[2025-03-28].<https://link.cnki.net/urlid/44.1643.TK.20250328.1131.005>.
- [2] TAN Qingliang, HE Jiaming, WANG Yi, et al. Two-stage distributionally robust configuration optimization of peak shaving energy storage considering the coordination of flexible resources[J/OL].Southern Power System Technology: 1-12[2025-03-28].<https://link.cnki.net/urlid/44.1643.TK.20250328.1131.005>.
- [3] 李军徽,张嘉辉,李翠萍,等.参与调峰的储能系统配置方案及经济性分析[J].电工技术学报,2021,36(19):4148-4160.
- [4] LI Junhui, ZHANG Jiahui, LI Cuiping, et al. Configuration scheme and economic analysis of energy storage system participating in grid peak shaving[J].Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(19): 4148-4160.
- [5] 刁涵彬,李培强,吕小秀,等.考虑多元储能差异性的区域综合能源系统储能协同优化配置[J].电工技术学报,2021,36(1):151-165.
- [6] DIAO Hanbin, LI Peiqiang, LÜ Xiaoxiu, et al. Coordinated optimal allocation of energy storage in regional integrated energy system considering the diversity of multi-energy storage[J].Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(1): 151-165.
- [7] 郭自文,王子鉴,黄纯,等.考虑源荷储功率协调和不确定性的配电网集群划分方法[J/OL].电网技术,1-13[2024-10-23].<https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1579>.
- [8] GUO Ziwen, WANG Zijian, HUANG Chun, et al. A distribution network clustering method considering source-load-storage power coordination and uncertainty[J/OL].Power System Technology: 1-13[2024-10-23].<https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1579>.
- [9] 王晶晶,姚良忠,刘科研,等.面向区域自治的配电网动态区域划分方法[J].电网技术,2024,48(11):4699-4709.
- [10] WANG Jingjing, YAO Liangzhong, LIU Keyan, et al. A dynamic zoning method for distribution networks towards regional autonomy[J].Power System Technology, 2024, 48(11): 4699-4709.
- [11] CHAI Y Y, GUO L, WANG C S, et al. Network partition and voltage coordination control for distribution networks with high penetration of distributed PV units[J].IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3396-3407.
- [12] MENG L Z C, YANG X Y, ZHU J, et al. Network partition and distributed voltage coordination control strategy of active distribution network system considering photovoltaic uncertainty[J].Applied Energy, 2024, 362(5): 122846.
- [13] 彭琦,欧阳森,张晋铭,等.考虑多断面源荷特征匹配的高比例分布式光伏接入配电网的集群划分方法[J].南方电网技术,2025,19(4):161-172,184.
- [14] PENG Qi, OUYANG Sen, ZHANG Jinming, et al. A cluster division method for high percentage distributed photovoltaic access to distribution grid considering multi-section source-load feature matching[J].Southern Power System Technology, 2025, 19(4): 161-172,184.
- [15] LUO C, WU H B, ZHOU Y Y, et al. Network partition-based hierarchical decentralised voltage control for distribution networks with distributed PV systems[J].International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 130(9): 106929.
- [16] 曹华珍,徐蔚,张军,等.基于集群划分的点对点交易与共享储能协同规划运行[J].电力自动化设备,2025,45(5):31-39.
- [17] CAO Huazhen, XU Wei, ZHANG Jun, et al. Cooperative planning and operation of peer-to-peer transaction and shared energy storage based on cluster partitioning[J].Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(5): 31-39.

- [12] 刘同和, 吴佳哲, 李向前, 等. 考虑风光消纳和碳减排的配电网混合储能优化配置研究[J]. 国外电子测量技术, 2024, 43(9): 121 – 129.
LIU Tonghe, WU Jiazhe, LI Xiangqian, et al. Research on optimal allocation of hybrid energy storage in distribution network considering landscape absorption and carbon emission reduction [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2024, 43(9): 121 – 129.
- [13] 潘超, 范官博, 王锦鹏, 等. 灵活性资源参与的电热综合能源系统低碳优化[J]. 电工技术学报, 2023, 38(6): 1633 – 1647.
PAN Chao, FAN Gongbo, WANG Jinpeng, et al. Low-carbon optimization of electric and heating integrated energy system with flexible resource participation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(6): 1633 – 1647.
- [14] 严金伟, 谭露, 刘念, 等. 基于碳流追溯的多微电网系统电碳耦合交易方法[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 39 – 53.
YAN Jinwei, TAN Lu, LIU Nian, et al. Electricity-carbon coupling trading for multi-microgrids system based on carbon flow tracing [J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 39 – 53.
- [15] 刘丽军, 胡鑫, 林锟, 等. 计及碳排放分摊的配电网分布式低碳调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(24): 9594 – 9607.
LIU Lijun, HU Xin, LIN Kun, et al. Distributed low carbon dispatch for distribution networks with carbon emission sharing [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(24): 9594 – 9607.
- [16] WANG Yunqi, QIU Jing, TAO Yuechuan. Optimal power scheduling using data-driven carbon emission flow modelling for carbon intensity control [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(4): 2894 – 2905.
- [17] 杨白洁, 刘洪, 葛少云, 等. 基于分布鲁棒机会约束的高韧性配电网多类型储能配置[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(7): 45 – 53.
YANG Baijie, LIU Hong, GE Shaoyun, et al. Configuration of multi-type energy storage system in high resilience distribution network based on distributionally robust chance constraints [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(7): 45 – 53.
- [18] 孙英聪, 陈来军, 李笑竹, 等. 考虑资源相关性的新能源场站群集中式共享储能优化配置[J]. 太阳能学报, 2024, 45(7): 2 – 9.
SUN Yingcong, CHEN Laijun, LI Xiaozhu, et al. Optimal allocation of centralized shared energy storage for renewable energy station clusters with consideration of resource correlation [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(7): 2 – 9.
- [19] CHEN L, JIANG Y Q, ZHENG S C, et al. A Two-layer optimal configuration approach of energy storage systems for resilience enhancement of active distribution networks [J]. Applied Energy, 2023, 350(9): 121720.
- [20] CHEN L, LIU W X, SHI Q X, et al. Prospect theory-based optimal configuration of modular mobile battery energy storage in distribution network considering disaster scenarios [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 142(11): 108215.
- [21] 温春雪, 赵天赐, 于赓, 等. 基于改进粒子群算法的储能优化配置[J]. 电气技术, 2022, 23(10): 1 – 9, 58.
WEN Chunxue, ZHAO Tianci, YU Geng, et al. Optimization configuration of energy storage based on the improved particle swarm optimization [J]. Electrical Engineering, 2022, 23(10): 1 – 9, 58.
- [22] 宋梦, 林固静, 高赐威, 等. 考虑多重不确定性的广义共享储能优化配置方法[J]. 电工技术学报, 2025, 40(5): 1521 – 1539.
SONG Meng, LIN Gujing, GAO Ciwei, et al. A generalized shared energy storage optimization configuration method considering multiple uncertainties [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(5): 1521 – 1539.
- [23] 陈艳波, 刘宇翔, 田昊欣, 等. 基于广义目标级联法的多牵引变电站光伏-储能协同规划配置[J]. 电工技术学报, 2024, 39(15): 4599 – 4612.
CHEN Yanbo, LIU Yuxiang, TIAN Haoxin, et al. Collaborative planning and configuration of photovoltaic and energy storage in multiple traction substations based on generalized analytical target cascading method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(15): 4599 – 4612.
- [24] 江友华, 刘弘毅, 叶尚兴, 等. 考虑电压质量及灵活性的高比例新能源配电网储能-无功优化配置[J]. 电力建设, 2023, 44(9): 68 – 79.
JIANG Youhua, LIU Hongyi, YE Shangxing, et al. Optimal allocation of energy storage-reactive power for high percentage new energy distribution networks considering voltage quality and flexibility [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(9): 68 – 79.
- [25] 张海波, 马伸铜, 程鑫, 等. 保证重要负荷不间断供电的配电网储能规划方法[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 259 – 268.
ZHANG Haibo, MA Shentong, CHENG Xin, et al. Distribution network energy storage planning ensuring uninterrupted power supply for critical loads [J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 259 – 268.
- [26] 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.
- [27] 周天睿, 康重庆, 徐乾耀, 等. 电力系统碳排放流分析理论初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 38 – 43, 85.
ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qian Yao, et al. Preliminary theoretical investigation on power system carbon emission flow [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 38 – 43, 85.
- [28] 王磊, 张帆, 寇凌峰, 等. 基于 Fast Unfolding 聚类算法的规模化分布式光伏电源集群划分[J]. 太阳能学报, 2021, 42(10): 29 – 34.
WANG Lei, ZHANG Fan, KOU Lingfeng, et al. Large-scale distributed PV cluster division based on Fast Unfolding clustering algorithm [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(10): 29 – 34.
- [29] LI PAN, HAN ZHANG, ZHAO SHANSHAN, et al. An optimal allocation method for power distribution network partitions based on improved spectral clustering algorithm [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 123(8): 106497.
- [30] 毕锐, 刘先放, 丁明, 等. 以提高消纳能力为目标的可再生能源发电集群划分方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6583 – 6592.
BI Rui, LIU Xianfang, DING Ming, et al. Renewable energy

- generation cluster partition method aiming at improving accommodation capacity [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39 (22): 6583 – 6592.
- [31] BLONDEL V D, GUILLAUME J L, LAMBIOTTE R, et al. Fast unfolding of communities in large networks [J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2008 (10): 10008 – 10017.
- [32] 欧阳斌, 马瑞, 朱文广, 等. 计及碳减排分摊的配电网分布式储能集群配置方法 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(22): 8897 – 8908.
- OUYANG Bin, MA Rui, ZHU Wenguang, et al. Distributed energy storage cluster configuration method of distribution network considering carbon emission reduction allocation [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(22): 8897 – 8908.
- [33] 赵季红, 孙天鹭, 曲桦, 等. 一种改进社区检测算法的 SDN 控制器部署策略 [J]. 计算机工程, 2020, 46(11): 207 – 213.
- ZHAO Jihong, SUN Tianao, QU Hua, et al. An SDN controller deployment strategy for improved community detection algorithm [J]. Computer Engineering, 2020, 46 (11): 207 – 213.
- [34] 王春玲, 董萍, 可思为, 等. 应对大规模海风接入的电网侧储能两阶段选址定容随机规划方法 [J]. 高电压技术, 2025, 51 (4): 1696 – 1707.
- WANG Chunling, DONG Ping, KE Siwei, et al. Two-stage siting and capacity-setting stochastic planning methodology for grid-side energy storage for large-scale ocean wind access [J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(4): 1696 – 1707.
- [35] 彭星皓, 李艳婷. 基于时空协方差函数的风能场景生成方法与应用 [J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(12): 1531 – 1542.
- PENG Xinhao, LI Yanting. Wind power scenario generation method and application based on spatiotemporal covariance function [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2023, 57 (12): 1531 – 1542.
- [36] 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, June 23 – 26, 2003, Bologna, Italy. New York: IEEE, 2003: 3 – 7.
- [37] 冯梦圆, 文书礼, 时珊珊, 等. 满足新型电力系统调峰调频需求的储能优化配置及运行研究综述 [J/OL]. 上海交通大学学报, 1 – 32 [2024 – 07 – 25]. <https://xuebao.sjtu.edu.cn/CN/10.16183/j.cnki.jsjtu.2024.128>.
- FENG Mengyuan, WEN Shuli, SHI Shanshan, et al. A review of optimal allocation and operation of energy storage system for peak shaving and frequency regulation in new type power systems [J/OL]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1 – 32 [2024 – 07 – 25]. <https://xuebao.sjtu.edu.cn/CN/10.16183/j.cnki.jsjtu.2024.128>.
- [38] 彭琦, 欧阳森, 谢运祥. 考虑边际效益最优的含分布式光伏配电网储能双层优化配置 [J/OL]. 南方电网技术, 1 – 11 [2024 – 10 – 23]. <https://link.cnki.net/urlid/44.1643.tk.20241022.1038.006>.
- PENG Qi, OUYANG Sen, XIE Yunxiang. Considering optimal marginal benefit of distributed photovoltaic distribution network energy storage Two-layer optimal configuration [J/OL]. Southern Power System Technology, 1 – 11 [2024 – 10 – 23]. <https://link.cnki.net/urlid/44.1643.tk.20241022.1038.006>.

收稿日期: 2025-06-16; 网络首发日期: 2025-10-10

作者简介:

崔佳璇(1999), 女, 硕士研究生, 研究方向配电网储能优化配置, cuijiaxuan0920@163.com;

延肖何(1991), 男, 通信作者, 副教授, 硕士生导师, 博士, 研究方向为储能调控、配置, x.yan@ncepu.edu.cn;

刘念(1981), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为综合能源系统、智能配用电, nianliu@ncepu.edu.cn。

广 告

电网仿真重点实验室 封二
南网知识星球 封三

直流输电全国重点实验室 A1
南方电网电力科技股份有限公司 A2