

# 考虑子模块特性的多站融合光储容量优化配置方法

王兴华<sup>1</sup>, 可思为<sup>2</sup>, 潘柏崇<sup>1</sup>, 雷翔胜<sup>1</sup>, 余梦泽<sup>1</sup>, 董萍<sup>2</sup>

(1. 广东电网有限责任公司电网规划研究中心, 广州 510080; 2. 华南理工大学电力学院, 广州 510640)

**摘要:** 随着“互联网+”建设的推进, 多站融合作为电力物联网建设的重要应用, 亟需研究其适用于不同地区的模块化配置方案。计及储能的全生命周期寿命衰减及多站融合运营商的经济性需求, 提出了一种考虑各功能子站运行特性的双层随机规划模型。首先, 根据需要融合的功能子站的运行特性进行建模, 确定正常运行下分布式电源的出力及负荷大小。其次, 考虑长期运行过程中的源荷不确定性, 根据各子模块特性采取相对应的不确定性表征和处理方法。采用双层随机优化模型对长时间尺度下的优化配置模型进行求解, 将全生命周期内的运行过程等效为典型运行场景的期望值。最后, 在220 kV的典型变电站场景下验证了该模型的有效性。

**关键词:** 多站融合; 源荷不确定性; 随机规划; 优化配置

## Optimal Configuration Method of PV-Storage Capacity of Multi-Station Integration Considering Submodule Characteristics

WANG Xinghua<sup>1</sup>, KE Siwei<sup>2</sup>, PAN Baichong<sup>1</sup>, LEI Xiangsheng<sup>1</sup>, YU Mengze<sup>1</sup>, DONG Ping<sup>2</sup>

(1. Grid Planning Research Center, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China; 2. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** With the promotion of "Internet +" construction, as an important application of power Internet of Things (IoT) construction, multi-station integration needs to study its modular configuration scheme suitable for different regions. Considering the life cycle attenuation of energy storage and the economic requirements of multi-station integration operators, this paper proposes a bilevel stochastic programming model considering the operation characteristics of each functional substation. Firstly, the output or load model under normal operation is determined according to the operation characteristics of functional substations that need to be fused. Secondly, considering the uncertainty of source load during long-term operation, the corresponding uncertainty characterization and processing method are adopted according to the load characteristics. The two-layer stochastic optimization model is used to solve the optimal configuration model in a long-time scale, and the operation results in the whole life cycle are equivalent to the expected values of several typical operation scenarios. Finally, the model is validated in a typical 220 kV substation scenario.

**Key words:** multi-station integration; source load uncertainty; stochastic programming; optimal configuration

## 0 引言

近年来, 在创新、协调、绿色、开放、共享的

发展背景下, 国家着力推进“互联网+”战略, 大力发展数字经济。国家电网将泛在电力物联网作为重要建设任务, 发展面向工业制造、城市信息化等方面创新业务。变电站作为传统电网的电能枢纽, 在电力物联网的建设中起到关键作用, 在信息物理系统的框架下, 变电站向综合能源枢纽转变。通过变电站、储能站、数据中心等关键资源的整合, 实现能量流、数据流、业务流的“三流合一”<sup>[1-2]</sup>。

基于现有的变电站框架内, 多站融合设计融合光伏站、储能站、电动汽车充电站、数据中心站、5G基站等多功能站点, 扩展变电站的业务范围。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(52077083); 广东省自然科学基金资助项目(2021A1515012073); 广东省自然科学基金海上风电联合基金资助项目(2022A1515240076); 广东电网有限责任公司重点科技项目(0300002022030103GH00032)。

**Foundation item:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (52077083); the Natural Science Foundation of Guangdong Province (2021A1515012073); the Guangdong Natural Science Foundation Offshore Wind Power Joint Fund (2022A1515240076); the Key Science and Technology Project of Guangdong Power Grid Co., Ltd. (0300002022030103GH00032).

到目前为止, 针对多站融合容量配置的研究还比较有限, 文献[3]提出一种考虑风光荷不确定性情况下的容量配置方法, 并采用量子引力搜索算法进行求解; 文献[4]利用机会约束规划的思想, 确立储能站的最佳配置策略; 文献[5]则着重考虑储能电池的寿命特性; 类似地, 文献[6-8]考虑了微网、光储充电站中储能电池的动态特性, 建立了储能的精细化模型。上述文献主要围绕储能站与光伏站进行建模, 将电动汽车充电站、数据中心站和 5 G 基站当作一个负荷整体, 缺乏了对负荷站单独的特性建模。

在类似的系统如综合能源站、光储充电站、智能微网中, 已有更加精细的建模方式。常用的电动汽车负荷预测模型基于已有的车辆调查数据, 并用概率曲线拟合电动汽车充电负荷的时间特性<sup>[10-12]</sup>, 该类预测方法缺陷明显, 无法针对单个地区充电站进行模拟。数据中心站与 5 G 基站能耗结构复杂, 参数众多。目前所采用的能耗模型依据构建方法可以分为加性模型、动态模型、回归模型、线性模型和功耗模型几类<sup>[9]</sup>, 各类模型在一些假设条件下都具有一定的准确性和应用价值, 但是目前在多站融合站的功能子站中没有应用到详细的能耗模型。

此外, 现有的多站融合设计没有与其他类似系统作出区分, 一方面, 没有凸显多站融合中不同功能子站的融合作用; 另一方面, 忽视了变电站作为多站融合建设基础的限制, 优化结果难以在变电站

中实现。

综上所述, 本文考虑多站融合典型架构下各功能子站的运行特性, 提出一种考虑长期运行过程中不确定性的双层随机规划模型, 解得多站融合典型场景下的最优光储配置容量。本文贡献如下。

1) 考虑包含数据中心站、5 G 基站、电动汽车充电站等在内的功能子站运行特性, 建立了多站融合容量配置模型。

2) 模型考虑储能站融合数据中心及 5 G 基站 UPS 备用电源, 利用闲置的 UPS 资源提高储能站的运行寿命与收益。

3) 双层随机规划模型中计及了储能的全生命周期寿命衰减以及源荷不确定性的影响, 并验证了其模型的有效性。

## 1 融合站结构及各子站模型

目前建设的多站融合项目多采用交流供电架构建设, 本文基于南方电网所采用的一种典型的交直流供电架构进行设计(如图 1 所示), 并充分利用变电站空闲面积实现电力枢纽向智能枢纽的转变。

### 1.1 电动汽车充电站负荷模型

对于有  $k$  个充电桩的充电站, 可采用  $M/G/k$  ( $M$  为泊松分布,  $G$  为正态分布,  $k$  为服务台数量) 排队模型来描述排队充电过程<sup>[13]</sup>。该模型是一种基于生灭模型的单队列, 如图 2 所示。

$M/G/k$  模型中的顾客输入过程服从参数为  $\lambda$  的

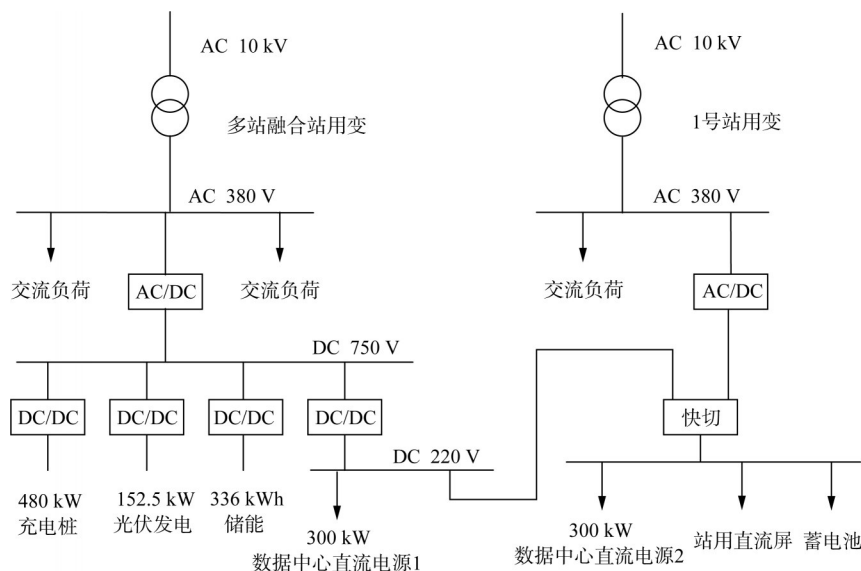


图 1 多站融合架构

Fig. 1 Multi-station integration architecture

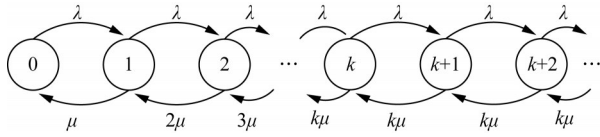


图2 排队系统状态转移图

Fig. 2 Queued system state transition diagram

泊松分布, 服务时间为正态分布<sup>[14]</sup>。

$$P(v_i) = \frac{(\lambda t)^i e^{-\lambda t}}{i!} \quad (1)$$

式中:  $P(\cdot)$  为事件发生的概率;  $v_i$  为  $t$  时段电动汽车到达的数量;  $\lambda$  为电动汽车的到达率。

相邻两辆电动汽车到达间隔时间服从指数分布:

$$f(t) = e^{-\lambda t} \quad (2)$$

考虑融合站所属环境, 可以通过统计或参考传统加油站的进站分布情况获取电站的平均充电负荷概率曲线, 采用泊松抽样与正态抽样对电动汽车进入充电桩过程进行模拟。广州市某地区的充电负荷概率曲线如图 3 所示。

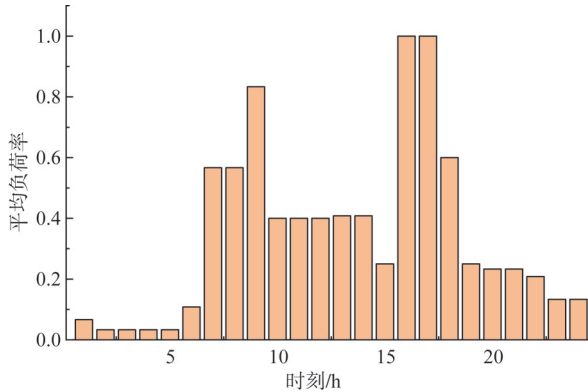


图3 电动汽车充电站平均到达概率曲线

Fig. 3 Average arrival probability curves for electric vehicles

## 1.2 储能站模型

### 1.2.1 储能容量衰减模型

储能电池的健康状态常用电池剩余容量与额定容量的比值表征, 一般情况下, 电池剩余容量到达 80% 以下时认为电池到达寿命终点, 需要更换电池。导致电池的容量衰减的因素有很多, 如运行温度、充放电深度、循环次数等。正常情况下, 储能站中会配备温控系统控制运行温度保持在预设温度左右, 因此通常忽略运行温度对电池容量衰减的影响, 仅考虑充放电深度与循环次数的影响。

高飞等人的研究<sup>[16]</sup>表明不同放电深度下的锂离

子电池健康状态可以用三次多项式进行拟合:

$$\delta = 1 + B_{\text{DOD}} \cdot m + C_{\text{DOD}} \cdot m^2 + D_{\text{DOD}} \cdot m^3 \quad (3)$$

$$\Delta\delta_{\text{DOD}} = B_{\text{DOD}} + 2 \cdot C_{\text{DOD}} \cdot m_{\text{DOD}} + 3 \cdot D_{\text{DOD}} \cdot m_{\text{DOD}}^2 \quad (4)$$

式中:  $B_{\text{DOD}}$ 、 $C_{\text{DOD}}$ 、 $D_{\text{DOD}}$  为与充电放电深度(depth of discharge, DOD)相关的参数;  $m$  为充放电数量;  $\delta$  为储能剩余可用容量,  $\Delta\delta_{\text{DOD}}$  为第  $m$  次充放的容量衰减值;  $m_{\text{DOD}}$  为第  $m$  次充放电后的等效在充放电深度为 DOD 时总充放电数量; 在正常衰减范围内, 式(3)所示函数单调, 可以使用当前的剩余容量  $\delta_m$  计算得到  $m_{\text{DOD}}$ 。不同充放电深度的函数示意图如图 4 所示。

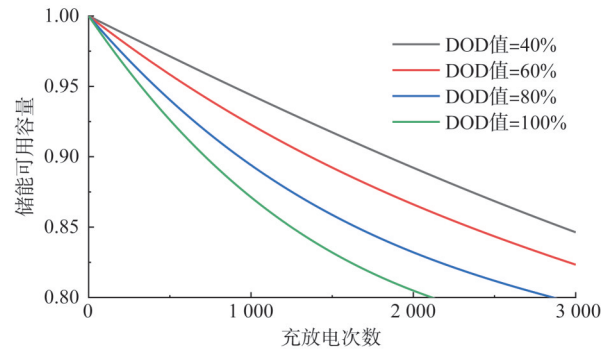


图4 电池健康状态曲线

Fig. 4 Battery health status

储能电池的健康状态及容量衰减情况用下列步骤进行计算。

1) 获取第  $n$  天储能充放电曲线, 使用雨流法计数计算储能在第  $n$  天的充放电次数及充放电深度。

2) 将充放电深度(DOD)按照(30%, 50%]、(50%, 70%]、(70%, 90%]、(90%, 100%] 4 个区间进行分类, 获得第  $n$  天的电池容量衰减参数值。

3) 计算每次充放电的容量衰减值, 可以得到第  $n$  天共充放电  $m$  次后的剩余容量为:

$$E_n^s = E_{\text{rated}}^s \cdot \sum_{i=1}^m (1 - \Delta\delta_i) \quad (5)$$

式中:  $E_n^s$  为第  $n$  天充放电的剩余可用容量;  $E_{\text{rated}}^s$  为储能电池额定容量, 后续将在模型内优化最佳储能容量。

### 1.2.2 储能运行模型

储能站在运行过程中需要遵循一定的物理约束, 包括以下几方面。

1) 荷电容量约束: 当储能站兼做数据中心及 5G 基站 UPS 备用电源时, 需要保障在极端情况下

数据中心与 5G 基站 1 h 的安全供电。并且, 为了延长储能站的循环寿命, 控制充放电深度小于 0.7。

$$\max [E_{\text{UPS}}^s, 0.3 \times E_{\text{rated}}^s] \leq E_t^s \leq E_{\text{rated}}^s \quad (6)$$

$$P_{\text{rated}}^s \geq P_{\text{UPS}}^s \quad (7)$$

式中:  $P_{\text{UPS}}^s$  与  $E_{\text{UPS}}^s$  分别为数据中心与 5G 基站的备用功率与容量需求, 备用功率需求按照数据中心与 5G 基站的最高负荷水平计算, 容量按照最大功率下的 1 h 稳定供电计算;  $P_{\text{rated}}^s$  为储能站的额定功率, 需要在模型中进行优化;  $E_t^s$  为运行日当天  $t$  时刻的储能站电量。

2) 电量耦合约束: 储能站当前时刻的电量与上一个时刻的电量和充放电功率相关, 为保证每个运行日的初始状态一致, 增加储能站始末电量约束。

$$E_t^s = E_{t-1}^s + P_t^{\text{s, ch}} \eta_{\text{ch}} - P_t^{\text{s, dch}} / \eta_{\text{dch}} \quad (8)$$

$$E_{24}^s = E_0^s \quad (9)$$

式中:  $E_0^s$  为储能站初始电量;  $E_t^s$  为时刻  $t$  的储能站容量;  $E_{24}^s$  为运行日结束时储能站容量;  $P_t^{\text{s, ch}}$  与  $P_t^{\text{s, dch}}$  分别为  $t$  时刻储能站的充、放电功率;  $\eta_{\text{ch}}$  与  $\eta_{\text{dch}}$  分别为储能电池充放电效率。

3) 储能充放电约束: 储能站最大充放电功率不应大于设置的额定功率, 且在同一时刻储能不能同时充电放电。

$$0 \leq P_t^{\text{s, ch}} \leq P_{\text{rated}}^s \times I_t^{\text{s, ch}} \quad (10)$$

$$0 \leq P_t^{\text{s, dch}} \leq P_{\text{rated}}^s \times I_t^{\text{s, dch}} \quad (11)$$

$$I_t^{\text{s, ch}} + I_t^{\text{s, dch}} \leq 1 \quad (12)$$

式中  $I_t^{\text{s, ch}}$  与  $I_t^{\text{s, dch}}$  分别为充、放电控制变量。

### 1.3 数据中心站模型

数据中心的能耗由以下几部分组成: IT 设备、制冷系统设备、供配电系统设备以及其他设备, 数据中心能耗构成如图 5 所示。

本文采用基于 CPU 利用率的线性模型对数据中

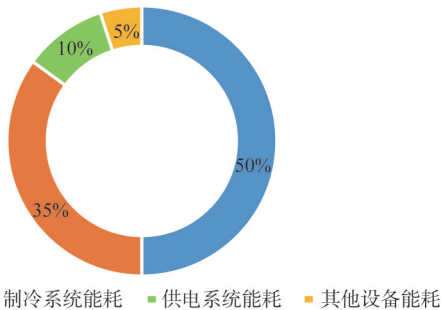


图 5 数据中心能耗结构图

Fig. 5 Data center energy consumption structure

心能耗进行建模。线性模型指数据中心总负荷与各影响因素之间呈线性关系, 且系数为技术参数的能耗模型。其中应用最广的技术参数是能源利用效率 (power usage effectiveness, PUE) 指标, 用以描述数据中心总能耗与 IT 设备能耗之间的关系。

$$P_t^{\text{IDC}} = P_t^{\text{IDC, nIT}} + P_t^{\text{IDC, IT}} \quad (13)$$

$$P_t^{\text{IDC, nIT}} = P_t^{\text{IDC, IT}} \cdot (\alpha_{\text{PUE}} - 1) \quad (14)$$

式中:  $P_t^{\text{IDC, IT}}$  为  $t$  时刻 IT 设备的能耗;  $P_t^{\text{IDC, nIT}}$  为  $t$  时刻非 IT 设备的能耗;  $P_t^{\text{IDC}}$  为  $t$  时刻数据中心总功耗;  $\alpha_{\text{PUE}}$  为数据中心的 PUE 值, 模型中设置为 1.5。

IT 设备总功率随 CPU 利用率的增长而线性增长, 增长范围介于空闲功率于峰值功率之间, 假定服务器 CPU 利用率与算力成正比例关系, 则服务器功耗与算力呈线性关系。数学模型如下。

$$P_t^{\text{IDC, IT}} = P_{\text{idle}}^{\text{IDC}} + (P_{\text{peak}}^{\text{IDC}} - P_{\text{idle}}^{\text{IDC}}) \cdot U_t \quad (15)$$

$$U_t = \frac{L_t}{M \cdot \mu} \leq 0.9 \quad (16)$$

式中:  $P_{\text{idle}}^{\text{IDC}}$  与  $P_{\text{peak}}^{\text{IDC}}$  分别为 IT 设备的静态功耗和峰值功耗;  $U_t$  为  $t$  时刻服务器利用率;  $M$  为数据中心的总服务器数量;  $\mu$  为单个服务器的服务率;  $L_t$  为  $t$  时刻到达的请求任务总量。

### 1.4 5G 基站模型

5G 基站由基站无线主设备包括大规模有源天线单元 (active antenna system, AAU) 和射频拉远单元 (radio remote unit, BBU)、基站空调和基站配套设施 3 部分组成, 如图 6 所示。

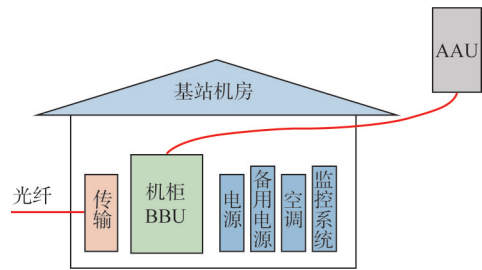


图 6 5G 基站示意图

Fig. 6 5G base station schematic diagram

正常运行时基站无线主设备的能耗表现为基线能耗和增量能耗之和。由文献[17]的研究可知, 基站的业务量对基站的功耗影响最大, 主设备的实时能耗近似与物理资源块 (physical resource block, PRB) 利用率呈线性关系, 数学模型如下。

$$P_t^{\text{5G}} = P_t^{\text{5G, incre}} + P_t^{\text{5G, base}} \quad (17)$$

$$P_t^{\text{5G, base}} = P_t^{\text{5G, AAU_base}} + P_t^{\text{5G, BBU_base}} \quad (18)$$

$$P_t^{5G, \text{inre}} = \frac{T_{\text{in}}^{\text{users}}}{T_{\text{max}}^{\text{users}}} \cdot (P_t^{5G, \text{AAU\_peak}} - P_t^{5G, \text{AAU\_base}}) \quad (19)$$

式中:  $P_t^{5G}$  为 5G 基站的总能耗, 包含增量能耗  $P_t^{5G, \text{inre}}$  与基线能耗  $P_t^{5G, \text{base}}$ ;  $P_t^{5G, \text{AAU\_base}}$  为 AAU 基础能耗;  $P_t^{5G, \text{BBU\_base}}$  为 BBU 的基础能耗; 增量能耗主要来自于 AAU 的发射功率;  $T_{\text{in}}^{\text{users}}$  为接入的用户数量;  $T_{\text{max}}^{\text{users}}$  为可接入的最大用户数量;  $P_t^{5G, \text{AAU\_peak}}$  为 AAU 的峰值功耗。

### 1.5 光伏模型

光伏组件的实际出力与当前的太阳辐射强度与环境温度相关:

$$P_t^{\text{PV}} = P_{\text{stc}}^{\text{PV}} \cdot \frac{I_t^{\text{PV}}}{I_{\text{stc}}^{\text{PV}}} \cdot [1 + R_T(T_t - T_{\text{stc}})] \quad (20)$$

式中:  $P_t^{\text{PV}}$  为  $t$  时刻光伏组件实际出力;  $P_{\text{stc}}^{\text{PV}}$  为标准条件下光伏板的出力;  $R_T$  为光伏板的温度系数;  $I_t^{\text{PV}}$  与  $T_t$  为  $t$  时刻实际的太阳辐射强度和实际温度;  $I_{\text{stc}}^{\text{PV}} = 1000 \text{ W/m}^2$  为标准条件下太阳辐射强度,  $T_{\text{stc}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  为标准条件下温度。

变电站内一般采用在变电站屋顶、停车站车棚顶部建设光伏模块。根据调查, 设置单块光伏组件面积为  $2.5 \text{ m}^2$ , 额定功率为  $400 \text{ W}$ 。以变电站内最大可铺设面积作为上限, 将光伏组件数量作为变量放入模型中进行优化:

$$P_{\text{stc}}^{\text{PV}} = N_{\text{PV}} \cdot A_{\text{PV}} \cdot \eta_{\text{PV}} \quad (21)$$

$$0 \leq N_{\text{PV}} \leq N_{\text{PV, max}} \quad (22)$$

式中:  $N_{\text{PV}}$  为光伏组件的数量;  $A_{\text{PV}}$  为单个光伏组件的峰值功率;  $\eta_{\text{PV}}$  为光伏组件的效率;  $N_{\text{PV, max}}$  为光伏组件最大可安装数量。

## 2 源荷不确定性的表征与处理

### 2.1 光伏与电动汽车充电负荷的不确定性表征与处理

光伏出力与地区、季节、时间相关性较大。本文采用场景削减法, 首先采用聚类算法对光伏全年历史数据进行处理, 得到该区域的光伏典型出力场景与对应的概率, 典型的出力场景如图 7 所示。

电动汽车的不确定性的表征与处理方式与光伏类似, 首先基于电动汽车 M/G/k 排队模型与区域的电动汽车充电概率曲线, 采用蒙特卡洛模拟运行日的电动汽车充电负荷, 接着采用场景削减获取典型场景如图 8 所示。

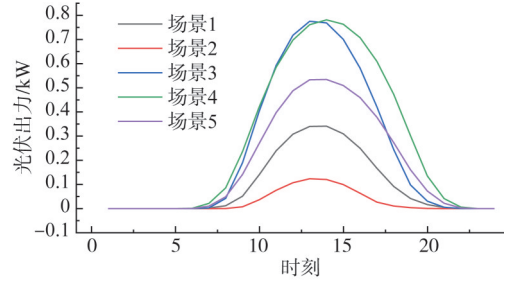


图 7 光伏典型场景

Fig. 7 Typical scenario of PV

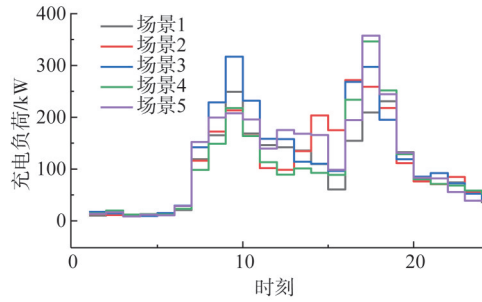


图 8 电动汽车充电站负荷典型场景

Fig. 8 Typical scenarios of EV charging station load

### 2.2 数据中心与 5G 基站的不确定性表征与处理

数据中心与 5G 基站的能耗与用户数据需求直接相关, 具有明显的时间特性。相较于电力调度时间间隔, 用户请求量的变化速率极快, 可预测性差。因此, 本文假定用户数据需求不确定量呈截断正态分布<sup>[28-30]</sup>, 数据中心与 5G 基站用户请求量的期望与上下限如图 9 所示。

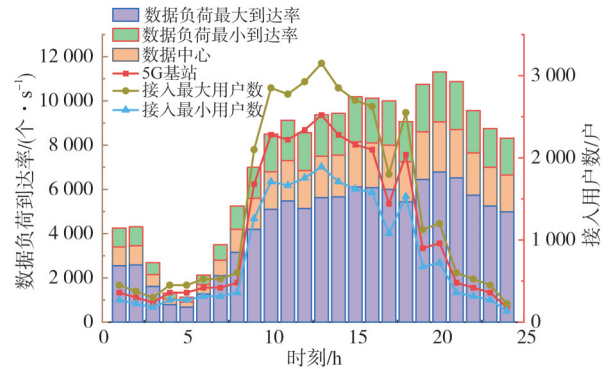


图 9 数据中心与 5G 基站需求范围

Fig. 9 5G base station and data center demand

根据式(13)~(19)的数据中心与 5G 基站能耗模型, 可以计算得到数据中心与 5G 基站运行日的能耗概率分布, 进而得到数据中心与 5G 基站运行日的能耗期望:

$$E(P_t^{\text{IDC}}) = M \cdot P_{\text{idle}}^{\text{IDC}} + \frac{E(L_t)}{\mu} \cdot (P_{\text{peak}}^{\text{IDC}} - P_{\text{idle}}^{\text{IDC}}) \cdot \alpha_{\text{PUE}} \quad (23)$$

$$E(P_t^{\text{5G}}) = \frac{E(T_{\text{in}}^{\text{users}})}{T_{\text{max}}^{\text{users}}} \cdot (P_t^{\text{5G, AAU\_peak}} - P_t^{\text{5G, AAU\_base}}) + P_t^{\text{5G, base}} \quad (24)$$

式中  $E(\cdot)$  为期望函数。

图 10 所示数据中心与 5G 基站的负荷期望值, 作为优化配置模型的用电负荷。

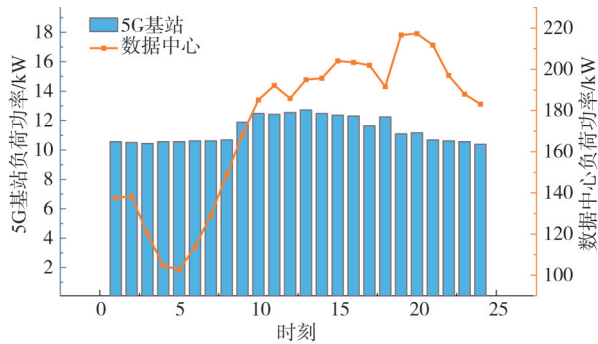


图 10 数据中心与 5G 基站负荷期望

Fig. 10 5G base station and data center load expectation

### 3 双层随机优化模型

在考虑不确定影响的情况下, 本文构建了双层随机优化模型对多站融合下光伏储能站的容量进行最优配置。

#### 3.1 外层模型

外层问题以融合站整体的年平均收益最大化为目标, 如式(25)所示。

$$\min f = C_{\text{build}} + C_{\text{maintenance}} + C_{\text{run}} \quad (25)$$

式中:  $C_{\text{build}}$  为投资建设成本;  $C_{\text{maintenance}}$  和  $C_{\text{run}}$  分别为维护成本与运行成本。

其中投资建设成本为:

$$C_{\text{build}} = C_{\text{build}}^{\text{PV}} + C_{\text{build}}^{\text{s}} \quad (26)$$

$$C_{\text{build}}^{\text{s}} = (E_{\text{rated}}^{\text{s}} \cdot p_{\text{capacity}}^{\text{s}} + P_{\text{rated}}^{\text{s}} \cdot p_{\text{power}}^{\text{s}}) \cdot \frac{i(1+i)^{N_1}}{(1+i)^{N_1} - 1} \quad (27)$$

$$C_{\text{build}}^{\text{PV}} = N_{\text{PV}} \cdot A_{\text{PV}} \cdot p_{\text{PV}} \cdot \frac{i(1+i)^{N_2}}{(1+i)^{N_2} - 1} \quad (28)$$

式中:  $C_{\text{build}}^{\text{s}}$  为储能站建设成本;  $C_{\text{build}}^{\text{PV}}$  为光伏建设成本;  $p_{\text{capacity}}^{\text{s}}$  为储能站容量成本;  $p_{\text{power}}^{\text{s}}$  为储能站功率成本;  $i$  为贴现率;  $p_{\text{PV}}$  为光伏模块的单价;  $N_1$  与  $N_2$  分别为储能站与光伏站的运行年限。

年维护成本与总建设费用相关:

$$C_{\text{maintenance}} = C_{\text{maintenance}}^{\text{PV}} + C_{\text{maintenance}}^{\text{s}} \quad (29)$$

$$C_{\text{maintenance}}^{\text{PV}} = k_{\text{PV}} \cdot C_{\text{build}}^{\text{PV}} \quad (30)$$

$$C_{\text{maintenance}}^{\text{s}} = k_{\text{s}} \cdot C_{\text{build}}^{\text{s}} \quad (31)$$

式中:  $C_{\text{maintenance}}^{\text{PV}}$  为光伏站的维护成本;  $C_{\text{maintenance}}^{\text{s}}$  为储能站的维护成本;  $k_{\text{PV}}$  与  $k_{\text{s}}$  均为维护成本系数, 分别取 0.005 与 0.01。

年运行成本与运行日内的运行情况相关, 如式(32)所示。

$$C_{\text{run}} = \sum_{n=1}^{N_1} C_n^{\text{run}} \cdot \frac{i(1+i)^{N_1}}{(1+i)^{N_1} - 1} \quad (32)$$

式中  $C_n^{\text{run}}$  为第  $n$  个运行日的运行成本。

外层问题的约束条件如下。

1) 光伏、储能站建设容量约束:

$$0 \leq N_{\text{PV}} \leq N_{\text{PV, max}} \quad (33)$$

$$0 \leq E_{\text{rated}}^{\text{s}} \leq E_{\text{max}}^{\text{s}} \quad (34)$$

$$0 \leq P_{\text{rated}}^{\text{s}} \leq P_{\text{max}}^{\text{s}} \quad (35)$$

式中:  $E_{\text{max}}^{\text{s}}$  为储能站最大建设容量;  $P_{\text{max}}^{\text{s}}$  为储能站最大建设功率。

2) 储能容量衰减约束: 储能站在运行过程中的容量衰减导致运行日中实际可用容量不断降低, 导致收益低于预期。储能容量约束根据运行日运行结果不断修正储能站可用容量, 并作为下一个运行日的参数输入。容量衰减计算如 1.2.1 步骤所示, 可简写为式(36)。

$$E_n^{\text{s}} = f(N, D_{\text{OD}}) \cdot E_{\text{rated}}^{\text{s}} \quad (36)$$

式中  $f(N, D_{\text{OD}})$  为储能容量衰减函数。

#### 3.2 内层模型

内层问题以融合站一天的最小运行成本为目标, 储能站的充放电功率  $P_t^{\text{s, ch}}$ 、 $P_t^{\text{s, dch}}$  作为决策变量。

$$\min C_n^{\text{run}} = \sum_t P_t^{\text{grid}} \cdot p_t^{\text{grid}} \quad (37)$$

式中:  $P_t^{\text{grid}}$  与  $p_t^{\text{grid}}$  为融合站在  $t$  时刻向电网购电电量与购电电价;  $T = \{1, 2, \dots, 24\}$  为 1 d 的调度时段。

约束条件包含功率平衡约束、倒送电约束、备用电压约束和储能安全运行约束。

1) 功率平衡约束为:

$$P_t^{\text{PV}} + P_t^{\text{s, dch}} + P_t^{\text{grid}} = P_t^{\text{IDC}} + P_t^{\text{5G}} + P_t^{\text{vehicle}} + P_t^{\text{s, ch}} \quad (38)$$

式中  $P_t^{\text{vehicle}}$  为电动充电站在  $t$  时刻的负荷。

2) 母线传输容量约束为:

$$0 \leq P_t^{\text{grid}} \leq P_{\text{grid}, \max} \quad (39)$$

式中  $P_{\text{grid}, \max}$  为母线最大传输容量。

3) UPS 备用电源容量、功率约束为:

$$E_{\text{UPS}}^s \geq P_{\text{IDC}, \max} \times T_{\text{IDC}} + P_{\text{5G}, \max} \times T_{\text{5G}} \quad (40)$$

$$P_{\text{UPS}}^s \geq P_{\text{IDC}, \max} + P_{\text{5G}, \max} \quad (41)$$

式中:  $P_{\text{IDC}, \max}$ 、 $T_{\text{IDC}}$  分别为数据中心的最大负荷与需要最小备用供电时间;  $P_{\text{5G}, \max}$ 、 $T_{\text{5G}}$  分别为 5G 基站最大负荷与最小备用供电时间;  $P_{\text{UPS}}^s$  为 UPS 最小备用功率。

在储能站所提供的服务中, UPS 备用电源服务的优先级最高, 在储能衰减计算中需要保持备用容量约束成立。当储能容量衰减到备用容量下限时, 储能站仅用于保障数据中心与 5G 基站的用电质量。

4) 各功能子站模型约束, 式(1)~(22)。

### 3.3 随机优化模型

考虑多站融合中源荷不确定性对运行成本的影响, 将原目标函数的外层目标函数改写为如下形式。

$$\min f = C_{\text{build}} + C_{\text{maintenance}} + E(\min C_{\text{run}}) \quad (42)$$

采用场景法对源荷的不确定性进行表征, 构建了具有不确定性参数的场景集  $S$ , 可以表示为式(43)的形式。

$$S = [P_{t,s}^{\text{PV}}, P_{t,s}^{\text{vehicle}}] \quad (43)$$

式中  $P_{t,s}^{\text{PV}}$  与  $P_{t,s}^{\text{vehicle}}$  分别为场景  $s$  下光伏与电动汽车的出力与负荷。

各不确定参数之间相互独立, 可以采用场景法将式(42)改写为如式(44)~(45)形式, 总运行成本的计算方式改为各场景下的运行成本乘以场景概率, 场景概率总和为 1。

$$\min f = C_{\text{build}} + C_{\text{maintenance}} + \sum_s \sum_n C_{n,s}^{\text{run}} \cdot \eta_s \cdot \frac{i(1+i)^{N_i}}{(1+i)^{N_i} - 1} \quad (44)$$

$$\sum_s \eta_s = 1 \quad (45)$$

式中:  $C_{n,s}^{\text{run}}$  为场景  $s$  的融合站运行成本;  $\eta_s$  为典型场景  $s$  出现的概率。

### 3.4 模型求解方法

由于内层模型为混合整数线性规划模型, 无法将下层问题转为 KKT 条件与上层问题合并, 因此外层采用遗传算法进行求解。

1) 在外层计算中, 采用遗传算法进行配置容量的寻优。采用改进 K-Means 聚类方法<sup>[27]</sup>对光伏、

充电站负荷、数据中心以及 5G 基站负荷进行场景削减, 获得代表性场景及其概率。计算不同场景下, 考虑储能寿命衰减的融合站总成本。内层函数所得到的最优解作为融合站的运行成本加入适应度函数中, 推动外层的寻优过程。

2) 在内层计算中, 采用混合整数线性规划对确定性场景进行最优调度。源荷出力确定的情况下, 融合站最优调度可以写为以储能动作作为决策变量、融合站安全稳定运行为约束的混合整数规划问题, 可以使用 CPLEX、GUROBI 等求解器进行求解。计算流程如图 11 所示。

## 4 算例分析

### 4.1 参数设置

用于计算的融合站参数设置如表 1 所示。

电池衰减参数参考文献[16]。遗传算法参数设置如表 2 所示。

电动汽车的电池容量约为 20~30 kWh, 融合站内设置 60 kW 的直流快充充电桩, 根据 60 % 的容量计算, 平均充电时间为 15 min, 将其设置为高斯分布的期望值。

5 G 基站参数包括一组基站主设备由一个 BBU 主控单元与 3 个 AAU 射频模块组成, 其中, BBU 典型功耗为 340 W, 接入 3 个扇区时功耗为 1 000 W; 单个 AAU 模块典型功耗为 800 W, 最大 1 200 W。

多站融合中储能站的储能蓄电池可用年限约 5~7 a, 光伏站规划年限为 15 a、其他站点规划年限均为 20 a, 因此双层优化模型按照 5 a 的运营期进行测算。

本文提出的优化配置模型采用 MATLAB2016 与 Gams 联合求解, 其中内层问题采用 Cplex 求解器进行计算, 其版本为 GAMS win64 24. 5. 3。

### 4.2 算例结果与分析

#### 4.2.1 结果展示

优化配置结果如表 3 所示。

从优化结果可以看出, 储能站配置容量为 350 kW × 3 h, 储能站仅配置保证数据中心与 5 G 基站 UPS 备用供电的最小功率, 总容量超出了 1 h 的备用供电需求, 这是由于储能变流器和电池管理系统带来的功率成本较高, 增加总容量会更有经济性。即使在最优配置下, 储能站的年平均收益投资

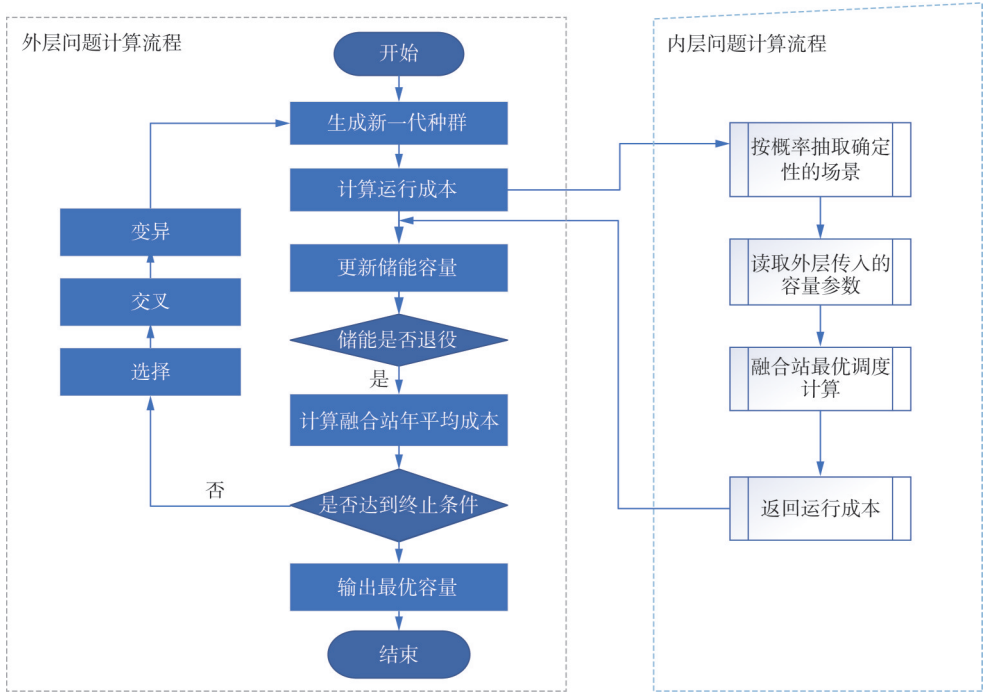


图 11 双层随机规划流程图

Fig. 11 Two-layer stochastic programming flowchart

表 1 功能模块参数

Tab. 1 Function module parameters

| 参数                                        | 数值    | 参数                                 | 数值    |
|-------------------------------------------|-------|------------------------------------|-------|
| 储能单位容量成本/<br>(元·kWh <sup>-1</sup> )       | 1 200 | 光伏站成本/<br>(元·kW <sup>-1</sup> )    | 3 500 |
| 储能变流器(PCS)单位<br>成本/(元·kW <sup>-1</sup> )  | 320   | 充电站容量/kW                           | 480   |
| 电池管理系统(BMS)单<br>位成本/(元·kW <sup>-1</sup> ) | 80    | 充电站充电费用/<br>(元·kWh <sup>-1</sup> ) | 1.5   |
| 数据中心容量/kW                                 | 300   | 5 G 基站容量/kW                        | 13.8  |

表 2 遗传算法参数

Tab. 2 Genetic algorithm parameters

| 参数       | 数值  |
|----------|-----|
| 个体数量     | 30  |
| 最大遗传代数   | 300 |
| 精英个体     | 5%  |
| 每代保留个体数量 | 80% |
| 变异概率     | 1%  |
| 交叉概率     | 0.8 |

比仅有 4.9%，相较于高昂的投资，仅考虑削峰填谷的模式收益较低。

优化得到的光伏站的配置容量达到了变电站可建设面积的约束边界，即光伏容量按照最大可建设

表 3 优化配置结果

Tab. 3 Optimization results

| 类型         | 数值    |
|------------|-------|
| 光伏装机容量/kW  | 360   |
| 储能容量/kWh   | 1 050 |
| 储能功率/kW    | 350   |
| 光伏年平均成本/万元 | 14.72 |
| 储能年平均成本/万元 | 21.04 |
| 储能年平均收益/万元 | 22.08 |

面积进行铺设。这是由于多站融合中存在数据中心与电动汽车充电站该类具有更大负荷的功能子站，且从数据中心的负荷需求与电动汽车充电站负荷的典型场景可以看出，光伏与负荷站的峰谷特性相近，光伏出力能够被数据中心、电动汽车充电站以及储能站很好的消纳，有着较好的经济效益。

上述得到的配置结果考虑了各功能子站间的融合特性，且均以模块的形式进行配置，具有一定的通用性。

4.2.2 算法有效性分析

外层问题求解的遗传算法迭代过程如图 12 所示。

由图 12 可知，最优适应度仅通过 7 次迭代就达到了最优值，并保持 50 代不变。且迭代过程中平

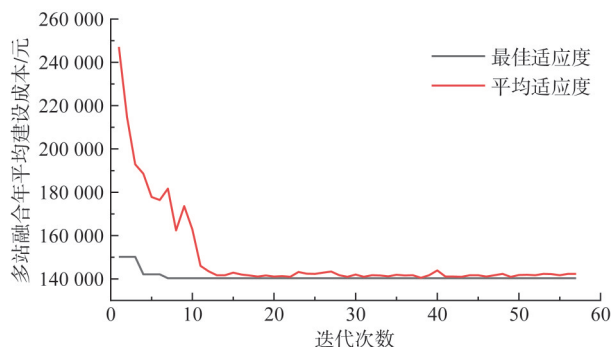


图 12 遗传算法迭代过程

Fig. 12 Iterative process of genetic algorithm

均适应度总体呈下降趋势，最终收敛于最优适应度，证明所得解为最优解。

#### 4.2.3 储能站融合数据中心及 5G 基站 UPS 备用电源效益分析

本文所提出模型考虑了储能站融合数据中心及 5G 基站 UPS 备用电源功能，为证明这种融合方式的在经济性与储能寿命上的优势，采用以下 4 个场景进行对比分析。

1) 场景 1: 本文方法，储能站融合数据中心与 5G 基站 UPS 功能，储能站容量由优化得到。

2) 场景 2: 数据中心与 5G 基站共同建设 UPS 备用电源，储能站容量由优化得到，最大充放电深度设置为 0.7。

3) 场景 3: 数据中心与 5G 基站共同建设 UPS 备用电源，储能站容量设置为 350 kW/700 kWh，储能站最大充放电深度设置为 1。

4) 场景 4: 数据中心与 5G 基站共同建设 UPS 备用电源，储能站容量设置为 350 kW/700 kWh，储能站最大充放电深度设置为 0.7。

其中数据中心站所需 300 kW/300 kWh 备用容量，5G 基站所需 13.8 kW/13.8 kWh 的备用容量，合计共建设 350 kW/350 kWh 的 UPS 备用电源，运行年限为 10 a，折算年平均建设成本 8.87 万元。各场景的计算结果如表 4 所示。

从表 4 所展示结果可知，场景 1 与 4 的总运行寿命均超过 5 a，年平均建设成本与运行收益按照 5 a 期计算，场景 3 的总运行寿命不足 4 a，年平均建设成本与运行收益按照 4 a 期计算。4 个场景中，仅有场景 1 中的储能站净收益大于 0，其余单独建设储能站的场景均未能实现自主盈利，这也印证了场景 2 中不建设储能站的优化结果。主要原因有两

表 4 储能场景计算结果

Tab. 4 Calculation result of energy storage scenario

| 场景   | 储能站总运行寿命/d | 储能站年平均建设成本/万元 | 储能站年平均运行收益/万元 | 储能站容量                |
|------|------------|---------------|---------------|----------------------|
| 场景 1 | 1 933      | 21.04         | 22.08         | 350 kW/<br>1 050 kWh |
| 场景 2 | 0          | 0             | 0             | 0 kW/<br>0 kWh       |
| 场景 3 | 1 266      | 30.64         | 21.51         | 350 kW/<br>700 kWh   |
| 场景 4 | 1 891      | 25.43         | 16.25         | 350 kW/<br>700 kWh   |

点：一是融合站内光伏可建设容量低，且出力峰值与负荷峰值时段重合度高，因此几乎不需要储能辅助消纳光伏；二是当前储能电池成本依然较高，仅依靠价差套利难以实现收支平衡。

场景 1 中由于 UPS 备用容量的存在，储能站实际可用于高发低储模式的可用容量仅为扩容的 700 kWh，与场景 3、4 的储能站容量一致。从表 4 的优化结果可知，储能站融合 UPS 备用电源后，能够有效的降低建设成本、提高储能站的运行寿命、增加储能站的收益。一方面，场景 1 中储能站在原有的 UPS 设备基础上进行扩容，有效的减少了 PCS、BMS 等设备成本；另一方面，场景 1 中储能站扩容的容量能够全部用于高发低储中，运行过程中充放电容量与场景 3 深充深放的容量一致，高发低储的收益较高；除此之外，场景 1 的储能站在运行过程中整体的充放电深度低于 70%，运行寿命接近场景 4 浅充浅放的效果，延长了储能站的运行寿命。

综上所述，储能站与数据中心及 5G 基站 UPS 备用电源融合的方式能够提升整体的经济效益，在不减少可用容量的情况下，降低了储能站整体的充放电深度，提高了储能站的运行寿命。

#### 4.2.4 变电站面积约束的作用

为了体现变电站面积约束的作用，对比 3 种场景如下。

- 1) 场景 1: 含光伏建设面积和弃光成本约束；
- 2) 场景 2: 不含光伏建设面积和弃光成本约束；
- 3) 场景 3: 含弃光成本约束，不含光伏建设面积约束。

对比结果如表 5 所示。

场景 2 中储能配置容量下降是由于大容量的光

表 5 光伏各场景计算结果

Tab. 5 Calculation results of PV scenarios

| 参数        | 场景 1  | 场景 2 | 场景 3  |
|-----------|-------|------|-------|
| 光伏装机容量/kW | 360   | 888  | 636   |
| 储能功率/kW   | 350   | 350  | 350   |
| 储能容量/kWh  | 1 050 | 700  | 1 050 |

伏可以在高电价时间段保证站内的用电, 因此储能的高发低储需求下降, 获得的收益减少。场景 3 为了减少弃光比例, 增加了弃光成本, 优化出的光伏容量小于场景 2, 对应需要建设面积为 3 975 m<sup>2</sup>, 超出 220 kV 变电站的最大可用面积。

由上述可知: 考虑到常规多站融合变电站可用屋顶面积不足以达到下列两种场景的容量, 光伏建设容量可以按照最大可建设容量进行配置。

#### 4.2.5 储能寿命衰减影响分析

储能全生命周期内的可用容量变化情况如图 13 所示。

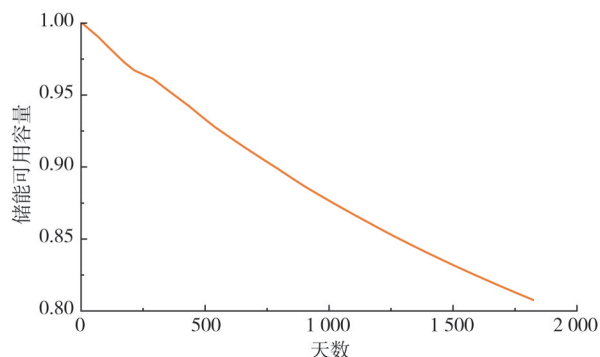


图 13 储能衰减过程

Fig. 13 Energy storage decay process

图 14 所示为储能健康时与储能接近退役时的单日荷电状态。

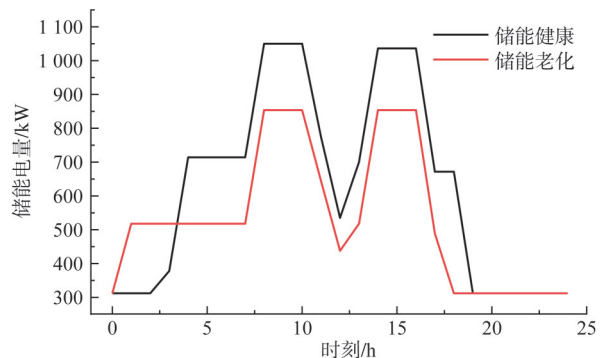


图 14 储能荷电状态

Fig. 14 SOC of energy storage

储能可在可用容量不同时所采用的最优策略会略有调整<sup>[31-32]</sup>, 但总体趋势类似, 为单日内两充两放, 充放电时间与分时电价的高峰低谷时期重合。从图 14 可用看出储能生命后期可用容量会大幅下降, 经济效益降低。

不考虑储能寿命衰减时优化得到的年平均成本为 25.18 万元每年, 误差高达 13.6%, 因此考虑储能的容量衰减情况是有必要的。

#### 4.2.6 灵敏度分析

由于目前较为高昂的储能成本, 仅用于削峰填谷的储能站的建设成本高昂, 整体盈利率很低, 相较于其他设施, 在经济方面不占有优势, 若建设更大规模的储能站需要考虑其他方面的商业应用。

因此针对储能的功率、容量成本进行灵敏度分析, 结果如图 15 所示。

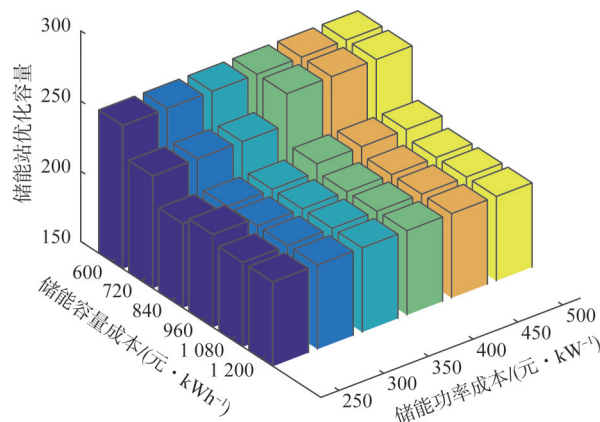


图 15 不同成本下储能优化容量

Fig. 15 Optimized capacities of energy storage under different costs

由图 15 可知, 随着储能成本的下降, 储能站最优配置的储能电池容量会逐步增加。但功率成本的降低则对增设储能容量没有明显贡献, 当储能功率成本降低时, 融合站会更倾向于增加储能功率, 储能站整体容量少量增加或不变。

## 5 结论

针对多站融合典型架构设计, 本文提出了一种基于随机规划的双层优化配置模型。对多站融合长期运行下的储能站的寿命衰减过程及源荷站的不确定性进行了分析与处理, 保证了多站融合经济性预测的准确性, 实现了典型场景下的多站融合光储容量的优化配置。通过算例验证得到了如下结论。

1)验证了双层随机规划模型的有效性,本模型具有一定的通用性并能较快的寻找到最优解。

2)通过融合数据中心UPS备用容量与储能站容量能够提高了数据中心与储能站的整体经济效益,并且融合后储能的充放电深度减低,进而提高了储能的循环寿命。

3)多站融合中光伏配置容量大小与变电站可供建设的面积强相关,实际建设方案中可以依照最大建设容量配置。

4)考虑到目前的储能更换成本持续下降的市场行情,通过灵敏度分析可以看出未来可以建设更大容量的储能站,即使是已建成的储能站也能以更低的成本更换蓄电池成本。

## 参考文献

- [1] 高正平,刘昊宇,李璇,等.从变电站到能源综合服务站:演化路径探讨[J].全球能源互联网,2021,4(4):411-423.  
GAO Zhengping, LIU Haoyu, LI Hu, et al. From substation to integrated energy service station: discussion on the evolutionary path[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(4): 411-423.
- [2] 崔恒志,杨斌,唐一铭,等.多站融合背景下综合性能能源枢纽的架构与方案设计[J].供用电,2020,37(8):16-20.  
CUI Hengzhi, YANG Bin, TANG Yiming, et al. Design of the architecture and project of comprehensive energy hub under the background of multi-station integration[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(8): 16-20.
- [3] 路晓敏,张明,邓星,等.考虑多重不确定性的多站融合容量优化配置方法[J].综合智慧能源,2022,44(1):31-38.  
LU Xiaomin, ZHANG Ming, DENG Xing, et al. Optimal capacity configuration for multi-station integration considering multiple uncertainties[J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(1): 31-38.
- [4] 张明,路晓敏,周航,等.考虑机会约束的多站融合储能配置与优化运行策略[J].广东电力,2022,35(2):66-73.  
ZHANG Ming, LU Xiaomin, ZHOU Hang, et al. Multi-station integrated energy storage configuration and optimal operation strategy based on chance constraint[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(2): 66-73.
- [5] 郑瑞春,王焕忠,李钦豪,等.计及储能寿命特性与健康状态的多站融合光伏储能优化配置[J].广东电力,2021,34(10):50-57.  
ZHENG Ruichun, WANG Huanzhong, LI Qinhao, et al. Optimal Configuration of Photovoltaic and Energy Storage in Multi-station Integration Scenario Considering Energy Storage Life Characteristics and Health Status[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(10): 50-57.
- [6] 桂强,史一炜,周云,等.考虑储能动态运行特性的充电站光储容量优化配置模型[J].电力建设,2021,42(5):90-99.  
GUI Qiang, SHI Yiwei, ZHOU Yun, et al. Optimal configuration model of photovoltaic and energy storage capacity of charging station considering battery dynamic characteristics[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(5): 90-99.
- [7] 孙运志,蒋德玉,张盛林,等.计及电池寿命损耗的多能源微网储能优化配置[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(5):128-133,144.  
SUN Yunzhi, JIANG Deyu, ZHANG Shenglin, et al. Optimal energy-storage configuration of multi-energy microgrid considering battery life degradation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(5): 128-133, 144.
- [8] 冯紫妍,许仪勋,汪凯琳,等.考虑寿命损耗的微网电池储能容量优化配置[J].电源学报,2024,22(1):101-109.  
FENG Ziyang, XU Yixun, WANG Kailin, et al. Optimal configuration of battery energy storage capacity of microgrid considering life loss[J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(1): 101-109.
- [9] 丁肇豪,曹雨洁,张素芳,等.能源互联网背景下数据中心与电力系统协同优化(一):数据中心能耗模型[J].中国电机工程学报,2022,42(9):3161-3177.  
DING Zhaohao, CAO Yujie, ZHANG Sufang, et al. Coordinated operation for data center and power system in the context of energy internet (I): energy demand management model of data center[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3161-3177.
- [10] 田立亭,史双龙,贾卓.电动汽车充电功率需求的统计学建模方法[J].电网技术,2010,34(11):126-130.  
TIAN Liting, SHI Shuanglong, JIA Zhuo. A statistical model for charging power demand of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 126-130.
- [11] 陆燕娟,潘庭龙,杨朝辉.计及电动汽车的社区微网储能容量配置[J].太阳能学报,2021,42(12):362-367.  
LU Yanjuan, PAN Tinglong, YANG Chaohui. Energy storage capacity configuration in community microgrid considering electric vehicles[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(12): 362-367.
- [12] 李科,皇甫霄文,李梦超,等.光-储一体电动汽车充电站储能规划[J].[1]李科,皇甫霄文,李梦超,等.光-储一体电动汽车充电站储能规划[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(8):82-93.  
LI Ke, HUANGFU Xiaowen, LI Mengchao, et al. Energy storage configuration of integrated pv-storage electric vehicle charging station[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(8): 82-93.
- [13] 方超明,张宇,王育飞,等.基于排队理论的储能式快充站容量优化配置[J].现代电力,2017,34(2):62-66.  
FANG Chaoming, ZHANG Yu, WANG Yufei, et al. Optimized capacity allocation of fast charging station with energy storage based on queuing theory[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(2): 62-66.
- [14] 张维戈,陈连福,黄彧,等.M/G/k排队模型在电动出租汽车充电站排队系统中的应用[J].电网技术,2015,39(3):724-729.  
ZHANG Weige, CHEN Lianfu, HUANG Yu, et al. Application of M/G/k queuing model in queuing system of electric taxi charging station[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 724-729.
- [15] 刘新萌,时荣超,吕风波,等.面向多站融合的储能容量优化配置模型及方法[J].供用电,2022,39(4):93-99.  
LIU Xinmeng, SHI Rongchao, LÜ Fengbo, et al. Model and method of optimal allocation of energy storage capacity for multi-station integration[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(4): 93-99.

- [16] 高飞, 杨凯, 惠东, 等. 储能用磷酸铁锂电池循环寿命的能量分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(5): 41-45.  
GAO Fei, YANG Kai, HUI Dong, et al. Cycle-life energy analysis of LiFePO<sub>4</sub> batteries for energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(5): 41-45.
- [17] 周孟戈, 谢松, 彭搏, 等. 计及5G基站负荷概率特性的配电网扩展规划方法[J]. 电工电能新技术, 2022, 41(1): 60-68.  
ZHOU Mengge, XIE Song, PENG Bo, et al. Expansion planning method of distribution network with 5G base stations considering probability characteristics of load[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2022, 41(1): 60-68.
- [18] 钱康, 苗安康, 周江山, 等. “双碳”背景下多站融合方案及关键技术研究[J]. 供用电, 2022, 39(9): 11-17, 34.  
QIAN Kang, MIAO Ankang, ZHOU Jiangshan, et al. Research on the fusion scheme and key technology of multi-station integration under the targets of carbon peak and carbon neutrality[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(9): 11-17, 34.
- [19] 曹希桓, 光储充一体化充电站配置优化方法研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021.
- [20] 张曦, 康重庆, 张宁, 等. 太阳能光伏发电的中长期随机特性分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(6): 6-13.  
ZHANG Xi, KANG Chongqing, ZHANG Ning, et al. Analysis of mid/long term random characteristics of photovoltaic power generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 6-13.
- [21] 孟超, 刘文亮, 杨琪, 等. “多站融合”背景下边缘数据中心运行优化研究[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(4): 49-55.  
MENG Chao, LIU Wenliang, YANG Qi, et al. Research on operation optimization of edge data center under the background of “multi-station integration”[J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(4): 49-55.
- [22] 马会萌, 李相俊, 贾学翠. 多站融合场景下的系统配置及协调运行策略[J]. 电力建设, 2021, 42(1): 96-104.  
MA Huimeng, LI Xianjun, JIA Xuecui. Capacity configuration and coordinated operation strategy in the multi-station integration scenario[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(1): 96-104.
- [23] 汤东升, 钟伟东, 慕小斌, 等. 基于鲁棒模型的多站融合场景下综合能源系统全局低碳策略[J]. 电测与仪表, 2022, 59(6): 113-121, 180.  
TANG Dongsheng, ZHONG Weidong, MU Xiaobin, et al. Global low carbon strategy of integrated energy system in multi-station integration based on robust model[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(6): 113-121, 180.
- [24] 李朝晖, 艾瑶瑶, 宋宁希, 等. 基于电池储能的光伏充电站经济性评估[J]. 电器与能效管理技术, 2018, 538(1): 33-38, 59.  
LI Zhaohui, AI Yaoyao, SONG Ningxi, et al. Economic evaluation of photovoltaic charging station based on battery energy storage[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2018, 538(1): 33-38, 59.
- [25] 刘新萌, 时荣超, 吕风波, 等. 基于变电站资源建设充换电(储能)站和数据中心站多功能优化配置方法[J]. 电气技术, 2021, 22(2): 1-5, 41.  
LIU Xinmeng, SHI Rongchao, LÜ Fengbo, et al. Multi-function optimal configuration method of building charging station and data center station based on substation resources[J]. Electrical Engineering, 2021, 22(2): 1-5, 41.
- [26] 周楠, 樊玮, 刘念, 等. 基于需求响应的光伏微网储能系统多目标容量优化配置[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1709-1716.  
ZHOU Nan, FAN Wei, LIU Nian, et al. Battery storage multi-objective optimization for capacity configuration of PV-based microgrid considering demand response[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1709-1716.
- [27] 赵书强, 要金铭, 李志伟. 基于改进K-means聚类法和SBR算法的风电场景缩减方法研究[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 3947-3954.  
ZHAO Shuqiang, YAO Jinming, LI Zhiwei. Wind power scenario reduction based on improved k-means clustering and SBR algorithm[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 3947-3954.
- [28] VAFAMEHR A, KHODAYAR E M, MANSHADI D S, et al. A framework for expansion planning of data centers in electricity and data networks under uncertainty[J]. IEEE Transaction on Smart Grid, 2019, 10(1).
- [29] NIU T, HU B, XIE K, et al. Spacial coordination between data centers and power system considering uncertainties of both source and load sides[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2021(124): 1-1.
- [30] 曾博, 刘一贤, 张卫翔, 等. 综合考虑内外生不确定性的绿色数据中心多域资源协同规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(12): 4732-4748.  
ZENG Bo, LIU Yixian, ZHUANG Weixiang, et al. A collaborative optimization approach for green data center multi-domain resource planning considering both endogenous and exogenous uncertainties[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(12): 4732-4748.
- [31] 朱继忠, 何晨可, 刘云, 等. 面向电动汽车高渗透率综合能源系统的换电模式综述与展望[J]. 南方电网技术, 2023, 17(10): 133-151.  
ZHU Jizhong, HE Chenke, LIU Yun, et al. Review and prospect of swapping pattern for integrated energy system with high penetration of electric vehicles[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(10): 133-151.
- [32] 李鲁阳, 陈龙翔, 陈磊, 等. 用于新能源一次调频的储能经济配置研究[J]. 中国电力, 2024, 57(7): 54-65.  
LI Luyang, CHEN Longxiang, CHEN Lei, et al. Research on economic configuration of energy storage for assisting new energy in primary frequency regulation[J]. Electric Power, 2024, 57(7): 54-65.

收稿日期: 2023-06-25; 网络首发日期: 2024-04-25

作者简介:

王兴华(1989), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为电力系统规划与建设, wangxh0603@163.com;

可思为(2000), 男, 硕士, 研究方向为电力系统优化与运行, 202221015015@mail.scut.edu.cn;

潘柏崇(1981), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电网输变电工程设计、建设, panbch@126.com。