

计及光伏不确定性的分布式抽水蓄能选址 定容与优化调度

段力伟, 杨 超

(武汉工程大学电气信息学院, 湖北 武汉 430205)

摘要: 为平抑工业园区内分布式光伏大规模并网带来的冲击, 缓解源荷不平衡问题, 提出微型抽水蓄能电站与光伏系统的多能互补运行模式, 并在备选地址下对分布式抽水蓄能进行最优选址定容。首先, 利用 K-means 聚类算法结合 Kullback-Leibler(KL) 散度构建光伏特征场景下的不确定性集合。其次, 构建抽水蓄能的双层规划容量配置模型, 上层考虑抽水蓄能综合投资成本, 下层考虑综合运行成本及最小碳排放量, 并结合配电网分时电价机制, 对工业园区中典型场景下的可调负荷进行优化。再次, 采用改进后的粒子群优化算法求解模型上层, 下层采用 Cplex 商业优化包优化抽水蓄能的运行。最后, 利用改进的 IEEE33 节点测试系统进行仿真, 结果表明所提方法能够使系统获得更好的经济与环保效益。

关键词: 微型抽水蓄能电站; 不确定性; 双层规划; 容量配置; 可调负荷

Distributed pumped storage capacity configuration and optimal scheduling considering photovoltaic uncertainty

DUAN Liwei, YANG Chao

(School of Electrical Information, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China)

Abstract: In order to suppress the impact of large-scale grid-connected distributed photovoltaics in industrial parks and alleviate the adjustment of source-load imbalance, this paper proposes a multi-energy complementary operation mode of micro pumped storage power stations and photovoltaic systems, and optimizes the location and capacity of distributed pumped storage under alternative addresses. Firstly, the K-means clustering algorithm combined with Kullback-Leibler(KL) divergence is used to construct the uncertainty set in the photovoltaic feature scene. Secondly, a bi-level programming capacity allocation model for pumping and storage is constructed. The upper level considers the comprehensive investment cost of pumping and storage, and the lower level considers the comprehensive operation cost and the minimum carbon emission. Combined with the time-of-use electricity price characteristics of the distribution network, the adjustable load of typical scenarios in the industrial park is improved. Then, the improved particle swarm optimization algorithm is used to solve the upper layer of the model, and the lower layer uses the Cplex commercial optimization package to optimize the operation of pumping and storage. Finally, the improved IEEE33 node test system is used for simulation. The results show that the proposed method can make the system have better economic and environmental benefits.

Keywords: micro-pumped storage power station; uncertainty; bilevel programming; capacity configuration; variable load

0 引言

绿色低碳是能源发展的重要方向,“十四五”是能源转型的关键时期^[1]。太阳能作为一种清洁可再生能源,目前已广泛应用于分布式光伏系统。分布式光伏发电具有投资小、布局灵活和绿色环保等特点,参与配电网优化调度是未来发展的重点领域^[2]。然而,光伏发电具有高度随机性和间歇性,受天气、环境和太阳辐照度等多重不确定因素影响^[3],大规模并网会对电力系统的经济、安全和可靠性产生不利影响。因此,具有高容量的储能系统是应对光伏发电不确定性的有效手段^[4]。

目前,应用于电力系统中的储能技术包含物理储能和电化学储能^[5]。其中,物理储能中的抽水蓄能相比其他储能方式更加环保,具有能量储存和转换容量大、发电效率高、建设技术成熟、相对成本低、停运率低和供电质量高等特点^[6]。微型和中小型抽水蓄能电站具有布局灵活、投资少和见效快等优点,因此广泛应用于水利发电资源丰富的省市地区。其最大优点是作为绿色能源,能够积极响应“双碳”政策,且能够与目前工业园区大量装机的光伏发电系统互补,提升系统的调节能力。根据国家能源局最新发布的《抽水蓄能中长期发展规划(2021—2035)》,到2025年抽水蓄能投产总规模较“十三五”翻一番,达到6 200万kW以上,该规划也明确提出要因地制宜规划建设微型、中小型抽水蓄能电站^[7]。

考虑光伏-抽水蓄能在项目周期中的经济效益,合理有效的容量配置是该混合能源系统在电力市场中具备竞争力的关键^[8]。近年来,已有许多学者对混合能源发电系统容量配置问题进行研究。针对孤立微电网,文献[9]将抽水蓄能联合风/光为负荷供电,考虑了负荷响应参与度,结果显著降低了微电网投资成本。文献[10]考虑了在光伏不确定性因素,利用核密度估计法拟合储能的最大功率与容量,在不同置信水平下得出最优光储系统容量。文献[11]考虑了全生命周期的

碳排放量,通过多目标决策进行容量配置,综合考虑了消纳率与供电可靠性。文献[12]兼顾了投资、调节和收益等多种优化需求,为地方电网的抽水蓄能容量经济配置提供了参考。文献[13]以能源消纳为约束,考虑了多时间尺度迭代的配置模型,取得了较好的经济效益,但未考虑水库的容量优化。文献[14-16]基于配电网分时电价特性,根据粒子群优化算法求解综合日平均效益以确定最优容量,但未考虑可调负荷的优化。文献[17]构建了灵活性与综合安全评价指标,基于双层配置方法有效降低了网损和弃风、弃光率。

上述文献表明,混合能源发电系统容量配置技术较为成熟,但很少有研究考虑到光伏不确定性的影响。随着大量可调负荷在工业园区投入使用,源储荷三者的协同互动也受到间接影响。此外,微型抽水蓄能的研究尚处在起步阶段,抽水蓄能机组和水库的安装容量及选址问题也有待解决。因此,本文首先从光伏不确定性角度出发,利用K-means聚类算法结合KL散度构建光伏特征场景下的不确定性集合。然后构建上层为抽水蓄能综合投资成本、下层为综合运行成本的双层规划配置模型,以最优的水库和抽水蓄能机组容量以及最优选址为期望结果进行求解。启发式算法是求解强非线性问题的较好选择,而Cplex对线性规划问题求解效率高,因此本文上层采用线性递减惯性权重粒子群(Linearly Decreasing Inertia Weight, LDIW)优化算法,下层结合Cplex对模型进行求解。最后,利用改进的IEEE33节点测试系统进行仿真,结果表明所提方法能够使系统具有更好的经济与环保效益,并验证了模型及方法的可行有效。

1 工业园区配电网光伏-微型抽水蓄能-可变负荷联合运行系统模型

1.1 系统结构

含微型抽水蓄能系统的工业园区配电网结构如图1所示。电源包含分布式光伏与上级电网的购电,其他电源有分布式微型燃气轮机组。抽水

蓄能系统包含微型可逆式抽水蓄能水轮机组与上下水库；负荷部分包含园区的可调负荷与固定负荷，其他负荷包括居民负荷与商业负荷等。光伏所产生的直流电经逆变后供给负荷和抽水蓄能。在光伏供电不足时，可通过向上级电网购电、其他电源供电或调节可变负荷的工作时段来满足基本负荷需求。

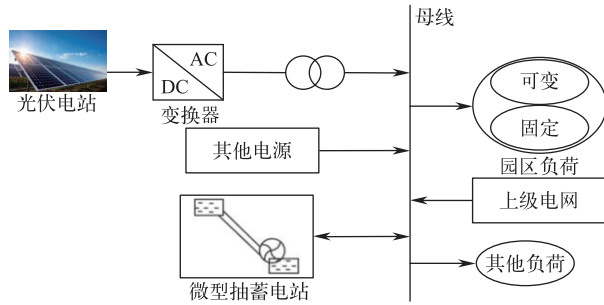


图1 工业园区配电网源储荷联合运行系统

Fig. 1 Source-storage-load combined operation system of distribution network in industrial park

1.2 光伏发电模型

光伏发电功率受到天气、温度等多重不确定性因素的影响，可采用随机不确定理论中的随机模糊理论进行处理。得到日前预测光照强度 S 和温度 T_c 下光伏出力计算的简化模型为^[18]

$$\begin{cases} \Delta T = T_c - T_{ref} \\ \Delta S = S - S_{ref} \\ P_{pv} = P_m \frac{S}{S_{ref}} (1 + a\Delta T) \ln(e + b\Delta S) (1 - c\Delta T) \end{cases} \quad (1)$$

式中， T_{ref} 为光照强度，取值为 25°C ； S_{ref} 为电池温度参考值，取值为 1 kW/m^2 ； P_m 为标准条件下，光伏阵列最大输出功率； P_{pv} 为光伏预测功率； a 、 b 、 c 为补偿系数，取值分别为 $0.0025/^\circ\text{C}$ 、 $-0.3\text{ m}^2/\text{kW}$ 、 $0.00288/^\circ\text{C}$ 。

1.3 抽水蓄能系统模型

抽水蓄能具有容量大、寿命长和环保性好等特点，但需要考虑地理环境和市场机制等约束条件^[19]。抽水蓄能电站多依湖泊、河流而建，故只考虑上水库的容量，其抽水和发电时的水量变化为

$$V_{cap}(t+1) = V_{cap}(t) + [Q_p(t) - Q_h(t)]\Delta t \quad (2)$$

$$Q_p(t) = \frac{3\,600 \times 1\,000 \eta_c \eta_w P_t^{ch}}{\rho g h} = K_c P_t^{ch} \quad (3)$$

$$Q_h(t) = \frac{3\,600 \times 1\,000 P_t^{dis}}{\eta_g \eta_w \rho g h} = K_h P_t^{dis} \quad (4)$$

式中， $V_{cap}(t)$ 为 t 时段末的水量体积； $Q_p(t)$ 、 $Q_h(t)$ 分别为抽水蓄能和放水发电时的水流速度； Δt 取值为 1 h ； η_c 、 η_w 、 η_g 分别为抽水、管道和发电的效率，取值分别为 85% 、 90% 和 95% ； P_t^{ch} 、 P_t^{dis} 为 t 时刻的抽水和发电功率，单位为 kW ； K_c 、 K_h 为抽水和发电工况下的流量功率比； $\rho = 1\,000\text{ kg/m}^3$ 为水的密度； $g = 9.81\text{ m/s}^2$ 为重力加速度； h 为水头高度，取 100 m 。

1.4 需求响应下可调负荷模型

根据需求侧响应方式的不同，可将负荷分为固定负荷、基于电价的可转移负荷和基于激励的可中断负荷三种^[20]。根据实际情况，可转移负荷和可中断负荷（即弹性负荷）占总负荷的 40% ，固定负荷（即刚性负荷）占总负荷的 60% 。负荷的转移与中断必然会引起用户的不适应，因此可以通过对负荷改变后用户的补偿进行成本建模，公式为

$$C_u = \sum_{t=1}^{24} p(t) L_a(t) + f_1 + f_2 \quad (5)$$

可转移负荷补偿成本 f_1 为

$$f_1 = C_o L_o(t) + C_i L_i(t) \quad (6)$$

$$\sum_{t=1}^{24} L_o(t) = \sum_{t=1}^{24} L_i(t) \quad (7)$$

$$L_o(t), L_i(t) \leq 0.12 L_e(t), L_o(t) L_i(t) = 0 \quad (8)$$

式中， $p(t)$ 为 t 时段下的电价； C_o 、 C_i 为转出、转入的负荷单位补偿费用，取值为 0.05 元/kW 和 0.03 元/kW ； $L_o(t)$ 、 $L_i(t)$ 为 t 时刻转出、转入的负荷值。式（7）表示转移的负荷前后应保持不变。式（8）表示 t 时刻的负荷转移量不超过弹性负荷 $L_e(t)$ 的 12% ，并且在同一时刻不能同时转入和转出。

根据供电可靠性，在负荷中断时造成的损失可分为三个等级，并对不同等级进行补偿的 f_2 为

$$f_2 = C_1 L_1(t) + C_2 L_2(t) + C_3 L_3(t) \quad (9)$$

$$\begin{cases} L_1(t) \leq 0.1 L_e(t) \\ L_2(t) \leq 0.08 L_e(t) \\ L_3(t) \leq 0.05 L_e(t) \end{cases} \quad (10)$$

$$L_e(t) - L_o(t) + L_i(t) - L_1(t) - L_2(t) - L_3(t) = L_a(t) \quad (11)$$

式中, C_1 、 C_2 、 C_3 为三个等级的补偿费用, 取值为0.15元/kW、0.2元/kW和0.4元/kW; $L_1(t)$ 、 $L_2(t)$ 、 $L_3(t)$ 为 t 时刻三个等级的中断负荷值; $L_a(t)$ 为 t 时刻改善后的负荷。式(10)为三个等级中断负荷在 t 时刻弹性负荷占比的约束; 式(11)为负荷功率平衡约束。

2 光伏不确定出力模型

2.1 光伏典型场景生成

光伏发电系统具有较强的不确定性, 受外部环境的影响, 其中太阳辐照度对光伏组件的影响最为显著^[21]。由于配置的储能系统会跟踪光伏系统的输出来补偿功率差异, 且在确定性工况下进行配置很可能会增加储能系统的运行成本, 因此储能系统的容量配置与光伏出力的不确定性强相关。

为得到光伏典型场景, 首先收集历史光伏辐照度与温度数据, 根据式(1), 采用K-means聚类算法进行场景聚类, 从而得到不同场景下的光伏出力数据及概率。

2.2 场景概率分布不确定集生成

传统K-means算法存在难以描述光伏不确定区间以及场景概率不准确的问题, 为得到光伏不确定集, 本文结合KL散度, 对真实场景概率分布和聚类得到的初始场景概率分布之间的误差进行约束, 以此构建特征场景概率分布的不确定集合 Ω , 即

$$\Omega = \begin{cases} \sum_{k=1}^K p_k \ln \frac{p_k}{p_k^0} \leq \zeta \\ \sum_{k=1}^K p_k = 1, p_k \in [0,1] \end{cases} \quad (12)$$

式中, K 为通过K-means聚类后的特征场景数; p_k 为场景 k 下的真实概率值; p_k^0 为通过K-means聚类后场景 k 下的初始概率; ζ 为初始概率分布和真实场景概率分布间的KL散度值, 可采用文献[24]中的方法计算。

3 双层优化配置模型及求解方法

3.1 双层优化配置模型

双层规划是一种具有主从递阶关系结构的模型, 相比单层的多目标方法, 双层规划可以对两个不同层次且相互矛盾的目标进行决策。上层主要在自身约束条件下, 将配置方案传递到下层; 下层对得到的方案进行运行模拟, 并将结果传递到上层, 从而对上层的决策起到指导作用。其双层规划模型结构如图2所示。

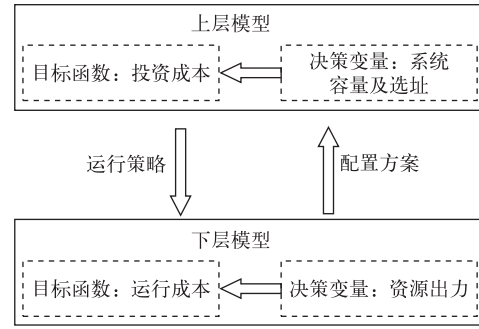


图2 双层规划模型结构图

Fig. 2 Bilevel programming model structure diagram

3.1.1 上层优化模型

上文已将光伏聚类为 K 个场景, 因此将抽水蓄能的综合投资成本按平均日进行折算, 与 K 个场景下的运行成本之和为上层目标函数。

(1) 目标函数

$$\min F = \sum_{k=1}^K p_k F_{\text{cost},k} + K F_{\text{ps}} \quad (13)$$

式中, $F_{\text{cost},k}$ 为场景 k 下的综合运行成本; F_{ps} 为折算后的抽水蓄能日均投资成本, 公式为

$$F_{\text{ps}} = \frac{C_{\text{cap}}^{\text{co}}}{365} \left(\sum_{n=1}^{T_a} \frac{C_{\text{om-ps}} P_{\text{ps}} + C_{\text{om-cap}} V_{\text{cap}}}{(1+r)^n} + C_{\text{cap}} V_{\text{cap}} \right) + \frac{C_{\text{ps}}^{\text{co}}}{365} \left(\frac{C_{\text{rep-ps}} P_{\text{ps}}}{(1+r)^x} + C_{\text{ps}} P_{\text{ps}} \right) \quad (14)$$

$$C_{\text{cap}}^{\text{co}} = \frac{r(1+r)^{T_a}}{(1+r)^{T_a} - 1} \quad C_{\text{ps}}^{\text{co}} = \frac{r(1+r)^x}{(1+r)^x - 1}$$

式中, $C_{\text{cap}}^{\text{co}}$ 和 $C_{\text{ps}}^{\text{co}}$ 为水库和抽水蓄能机组的年投资折算系数; T_a 为水库寿命周期, 设为50年; x 为抽水蓄能机组的寿命周期, 设为15年; r 为贴现

率, 设为0.08; P_{ps} 和 V_{cap} 分别为抽水蓄能机组装机容量和水库体积; C_{om_ps} 、 C_{om_cap} 分别为抽水蓄能机组和水库单位容量的运维成本; C_{ps} 、 C_{cap} 分别为抽水蓄能机组和水库单位容量的投资成本; C_{rep_ps} 为抽水蓄能机组的替换成本。

(2) 约束条件

$$\begin{cases} sz_{ps} \in \Omega_{ps} \\ 0 \leq P_{ps} \leq P_{ps,max} \\ 0 \leq V_{cap} \leq V_{cap,max} \end{cases} \quad (15)$$

式中, sz_{ps} 为抽水蓄能选址, 属于备选地址集合 Ω_{ps} ; $P_{ps,max}$ 、 $V_{cap,max}$ 分别为抽水蓄能机组和水库最大的装机容量。三者作为决策变量传递到下层。

3.1.2 下层优化模型

下层模型考虑了系统最小运行成本和最小碳排放量, 每个场景下通用具体数学模型如下。

(1) 目标函数

$$\begin{aligned} \min F_1 = & C_{pva} \sum_{t=1}^T P_{pva,t} + C_{pvy} \sum_{t=1}^T P_{pvy,t} + \\ & C_{loss} \sum_{t=1}^T \sum_{ij \in \Omega_L} l_{ij,t} r_{ij} + C_{psy} \sum_{t=1}^T (P_t^{dis} + P_t^{ch}) + \\ & \sum_{t=1}^T p(t) P_{grid,t} + \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^{N_G} (b_s P_{G,s,t}) \end{aligned} \quad (16)$$

式中, C_{pva} 为弃光惩罚系数; $P_{pva,t}$ 为 t 时刻弃光功率; C_{pvy} 为光伏运行成本系数; $P_{pvy,t}$ 为 t 时刻光伏的实际出力; C_{psy} 为抽水蓄能的运行成本系数; C_{loss} 为网损成本系数; $l_{ij,t}$ 为线路 ij 在 t 时刻电流的二次方; r_{ij} 为线路 ij 上的电阻; $P_{grid,t}$ 为 t 时刻购电功率; N_G 为微型燃气轮机的数量; b_s 为微型燃气轮机 s 的成本系数; $P_{G,s,t}$ 为微型燃气轮机 s 在 t 时刻下的出力。

现有一些研究采用全生命周期评价方法, 得到了光伏、抽水蓄能电站、火力发电和微型燃气轮机归一计量后的碳排放系数^[22-23]。以此构建碳排放量治理成本的最小计算式为

$$\begin{aligned} \min F_2 = & C_c \left(\sum_{t=1}^T P_{pv,t} R_{pv} + \sum_{t=1}^T P_{ps,t} R_{ps} + \right. \\ & \left. \sum_{t=1}^T P_{grid,t} R_G + \sum_{s=1}^{N_G} \sum_{t=1}^T P_{G,s,t} R_g \right) \end{aligned} \quad (17)$$

式中, R_{pv} 、 R_{ps} 、 R_G 、 R_g 分别为光伏发电、抽水蓄能电站运行、火力发电及微型燃气轮机发电的碳排放系数, 单位为 $kg/(kW \cdot h)$; C_c 为碳排放治理成本系数。

综上, 可以得到下层整体优化的目标函数为

$$\min \sum_{k=1}^K F_{cost,k} = \sum_{k=1}^K F_{1,k} + \sum_{k=1}^K F_{2,k} \quad (18)$$

式中, F_{cost} 为日综合成本; $F_{1,k}$ 和 $F_{2,k}$ 为场景 k 下的日运行成本和日碳排放治理成本。

(2) 约束条件

下层的约束条件主要为日运行约束, 首先采用混合整数二阶锥规划来对潮流约束进行处理, 基于Distflow的最优潮流模型为

$$\begin{cases} P_{j,t} = \sum_{k:j \rightarrow k} P_{jk,t} - \sum_{i:i \rightarrow j} (P_{ij,t} - r_{ij} l_{ij,t}) \\ Q_{j,t} = \sum_{k:j \rightarrow k} Q_{jk,t} - \sum_{i:i \rightarrow j} (Q_{ij,t} - x_{ij} l_{ij,t}) \\ U_{j,t} = U_{i,t} - 2(r_{ij} P_{ij,t} + x_{ij} Q_{ij,t}) + ((r_{ij})^2 + (x_{ij})^2) l_{ij} \end{cases} \quad (19)$$

$$\left\| \begin{matrix} 2P_{ij,t} \\ 2Q_{ij,t} \\ l_{ij,t} - U_{i,t} \end{matrix} \right\|_2 \leq l_{ij,t} + U_{i,t} \quad (20)$$

$$\begin{cases} P_{j,t} = P_{j,t}^{pv} + P_{j,t}^{grid} + P_{j,t}^G + P_{j,t}^{dis} - P_{j,t}^{ch} - P_{j,t}^{load} \\ Q_{j,t} = Q_{j,t}^{pv} + Q_{j,t}^{grid} + Q_{j,t}^G - Q_{j,t}^{load} \end{cases} \quad (21)$$

式中, $P_{j,t}$ 、 $Q_{j,t}$ 为 t 时刻节点 j 上有功和无功的注入功率; r_{ij} 和 x_{ij} 为线路 ij 上的电阻和电抗; $P_{ij,t}$ 、 $Q_{ij,t}$ 为线路 ij 在 t 时刻的有功和无功功率; $U_{j,t}$ 为节点 j 在 t 时刻的电压二次方。式(20)为二阶锥凸松弛; 式(21)为有功和无功功率平衡约束。

另外, 需要对各分布式资源出力进行约束, 公式为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{grid,t} \leq P_{grid,t}^{max} \\ 0 \leq P_{pv,t} \leq P_{pv,t}^{max} \\ P_{G,s,min} \leq P_{G,s,t} \leq P_{G,s,max} \\ Q_{G,s,min} \leq Q_{G,s,t} \leq Q_{G,s,max} \\ P_{G,s,t} - P_{G,s,t-1} \leq P_{G,s}^{up} \\ P_{G,s,t-1} - P_{G,s,t} \leq P_{G,s}^{down} \end{cases} \quad (22)$$

式中, $P_{grid,t}^{max}$ 为 t 时刻最大上级购电功率; $P_{pv,t}^{max}$ 为 t 时刻最大光伏出力值; $P_{G,s,max}$ 、 $P_{G,s,min}$ 分别为微型燃气轮机 s 出力的最大值和最小值; $P_{G,s}^{up}$ 、 $P_{G,s}^{down}$ 分别为微型燃气轮机 s 的上下爬坡功率。对于抽

水蓄能的约束为

$$\begin{cases} 0.1V_{\text{cap}} \leq V_{\text{cap},t} \leq V_{\text{cap}}, V_{\text{cap},0} = V_{\text{cap},T} = 0.5V_{\text{cap}} \\ 0 \leq P_t^{\text{dis}}, P_t^{\text{ch}} \leq P_{\text{ps}} \\ 0 \leq P_t^{\text{dis}} \leq \lambda_1 M, 0 \leq P_t^{\text{ch}} \leq \lambda_2 M \\ \lambda_1 + \lambda_2 \leq 1 \end{cases} \quad (23)$$

式中, $V_{\text{cap},t}$ 为 t 时刻的水库库容, 设定为初始与末尾时刻水库装机容量的一半, 即保证了水量的进出平衡; 为保证抽水蓄能抽水 and 发电不同时, 引入二进制变量 λ_1 和 λ_2 , 分别表示为抽水 and 发电的状态位; M 为 Big-M 法常数, 以此转化为线性约束。

3.2 基于改进粒子群算法结合 Cplex 求解

在利用改进粒子群算法求解上层模型时, 首先对配置方案中的参数 (如抽水蓄能选址、抽水蓄能和水库的装机容量) 基于实际情况确定各容量的上下限, 并随机生成满足其约束条件的粒子群。粒子调整速度和位置的公式为

$$\begin{aligned} v_{ij}(t+1) &= wv_{ij}(t) + c_1r_1[p_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2r_2[p_{gj}(t) - x_{ij}(t)] \\ x_{ij}(t+1) &= x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1), \quad j=1, \dots, d \end{aligned} \quad (24)$$

式中, i 为粒子数量; w 为惯性权重; c_1 、 c_2 分别为个体学习因子和种群学习因子; r_1 、 r_2 为 $0 \sim 1$ 的随机数; $p_{ij}(t)$ 为个体最优解; $p_{gj}(t)$ 为种群最优解; d 为问题的维数。

本文已将下层的非凸与非线性约束进行了转化, 即下层问题为线性凸规划问题, 故可采用 Cplex 进行求解。LDIW 算法结合 Cplex 求解双层规划模型的具体流程如图 3 所示。

4 算例分析

4.1 算例参数设置

在 Intel 酷睿 i5-8300H CPU 和 16 GB RAM 的仿真配置下, 用 MATLAB 2018b 实现模型搭建与求解。

本文采用改进的 IEEE33 节点系统作为算例, 其负荷数据来源于文献[25], 节点拓扑如图 4 所示。分布式光伏与微型燃气轮机的装机容量及详细调度参数见文献[26]。网损、弃光及碳排

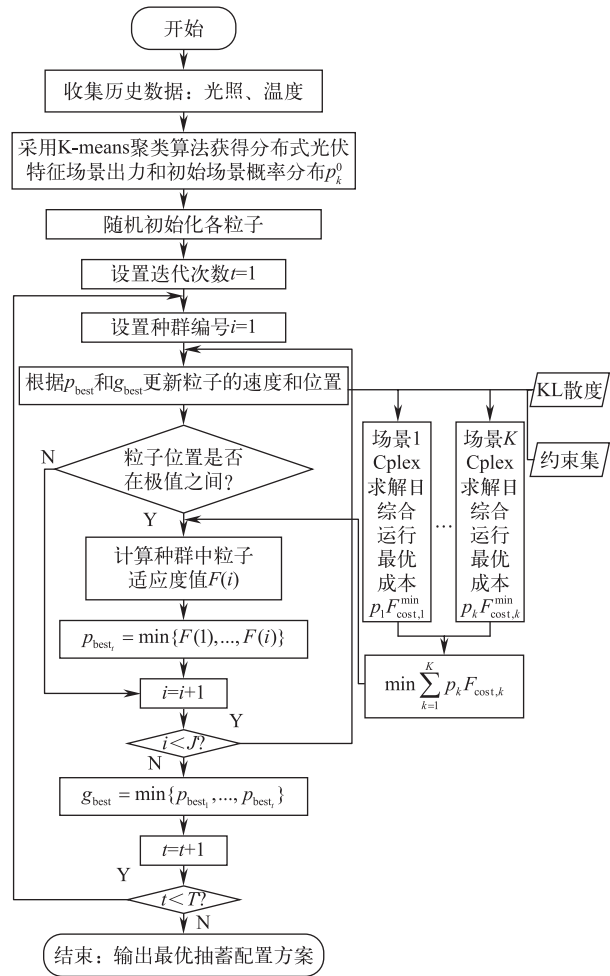


图 3 双层规划容量配置求解流程

Fig. 3 Bi-level programming capacity configuration solution process

放治理等成本系数可见文献[17]。根据 K-means 聚类后的四种光伏特征场景如图 5 所示。购电的分时电价见表 1, 抽水蓄能综合成本系数见表 2。

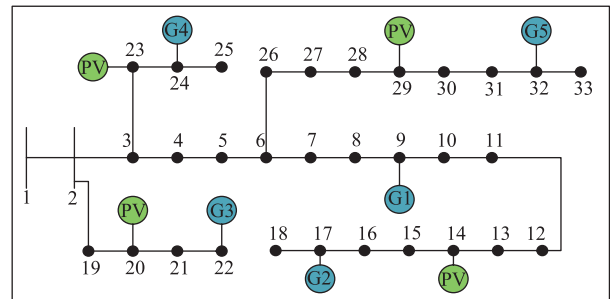


图 4 改进 IEEE33 节点拓扑图

Fig. 4 Improved IEEE33-node topology diagram

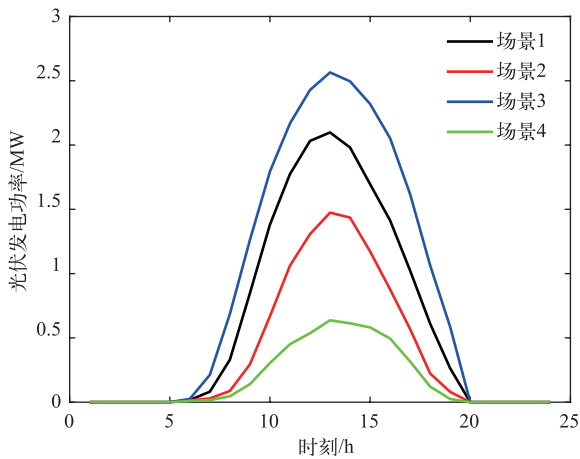


图5 典型场景下光伏出力

Fig. 5 Photovoltaic output in typical scenarios

表1 分时电价表

Tab. 1 Time-of-use electricity price table

单位: [元/(kW·h)]

时段	电价
谷 (23:00—7:00)	0.318 2
平 (7:00—9:00, 15:00—17:00, 21:00—22:00)	0.610 4
峰 (10:00—14:00, 18:00—20:00)	0.916 4

表2 抽水蓄能电站综合成本系数

Tab. 2 Comprehensive cost of pumped storage power station

成本	单价
水库建造成本/(元/m ³)	1 400
水库运维成本/[元/(m ³ /a)]	14
抽水蓄能机组投资成本/(元/kW)	2 100
抽水蓄能机组运维成本/[元/(kW/a)]	21
抽水蓄能机组替换成本/(元/kW)	2 100
抽水蓄能机组运行成本/(元/kW)	0.05

算法参数设置上层的问题维数 $d=6$,即考虑设置两处抽水储能的选址和定容。考虑到双层配置模型在求解速度上的局限性,因此LDIW算法的迭代次数和种群不宜设置过大,将迭代次数设为50次,种群大小为10。引入自适应学习因子与线性递进惯性权重的方法为

$$\begin{cases} c_1 = (0.5 - 2.5)m/M + 2.5 \\ c_2 = (2.5 - 0.5)m/M + 0.5 \\ w = w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min})m/M \end{cases} \quad (25)$$

式中, m 为当前迭代次数; M 为最大迭代次数;最大惯性系数 $w_{\max}$ 为0.9;最小惯性系数 $w_{\min}$ 为0.4;个体学习因子 c_1 随迭代次数增加而减小,以

防止过早收敛;群体学习因子 c_2 随迭代次数增加而增大,以加快后期收敛速度并提高准确度。而惯性权重的变化防止陷入局部最优解并加快算法收敛。

考虑到抽水蓄能的建设受到地形环境等因素影响,所以假定备选节点为15、16、30、31。设计以下规划方案:①无抽水储能;②在备选节点中只建设一处抽水蓄能电站;③在备选节点中建设两处抽水蓄能电站。

4.2 结果分析

考虑到需求侧响应不属于电网侧,可将其根据相应的谷峰电价策略单独优化负荷曲线,得到需求响应前后的某典型日负荷曲线对比如图6所示。从图6中可以看出,负荷根据谷峰电价机制进行了优化响应,将峰段负荷进行了转移和削减。

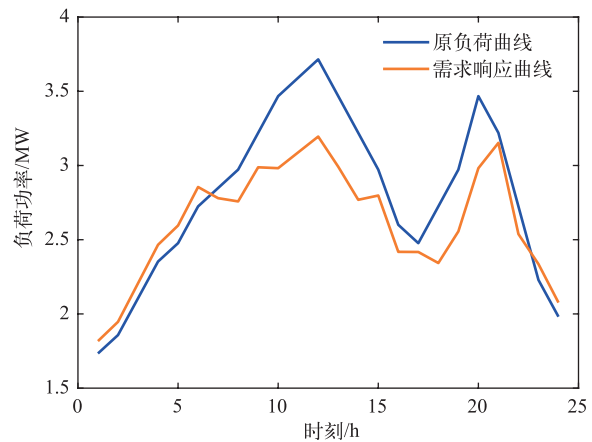


图6 典型日负荷需求响应

Fig. 6 Typical daily load demand response

将LDIW算法结合Cplex所给出的流程进行模型求解,规划方案采用方案③,所得到的算法迭代情况如图7所示。从收敛速度上看,算法在迭代次数为15次时,已经收敛到全局最优解,收敛性能良好。从稳定性上看,前15次迭代有较大波动,这是由于此时惯性权重较大,粒子运动的幅度大,导致在求解空间中出现振荡,但通过引入自适应的学习因子与惯性权重,不仅加快了收敛,也大大提升了稳定性,在15次迭代后曲线无波动现象。

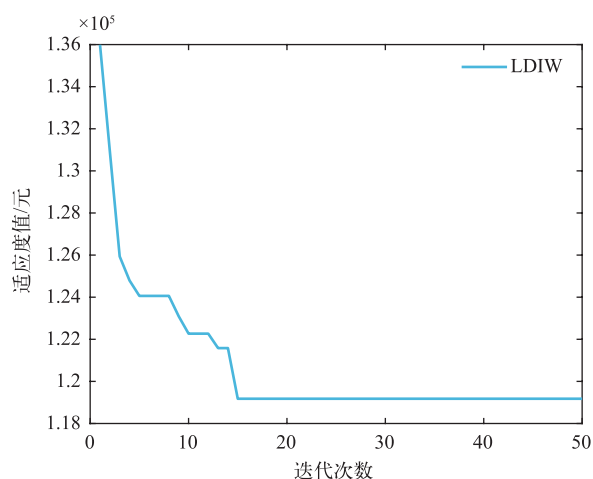


图7 算法迭代情况

Fig. 7 Algorithm iteration

表3给出了三种规划方案下抽水蓄能的最优选址定容结果，并对经济性和环保性进行了分析对比。首先，对比方案①与方案②可以看出，虽然安装抽水蓄能后网损有所增加，但下层整体成本和碳排放量有效减少，可见增加抽水蓄能具有经济性与环保效益。其次，安装分布式抽水蓄能，即将方案③与方案②进行对比，可以发现分布式抽水蓄能有着更少的网损成本，这表示减少了光伏的远程传输，实现了就地消纳。

表3 不同方案下最优选址定容及效益分析

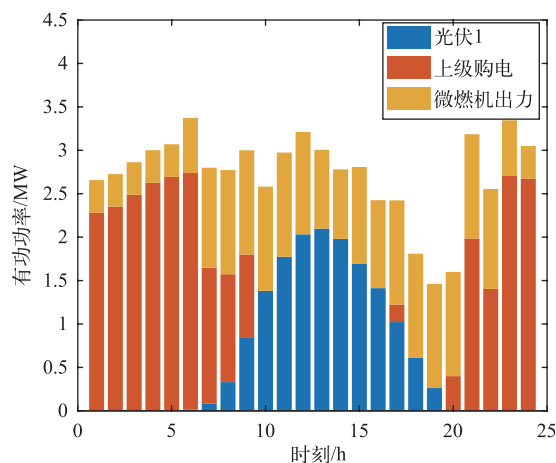
Tab. 3 Optimal location and capacity and benefit analysis under different schemes

配置方案	方案①	方案②	方案③
水库库容 /m ³	-	15 913	9 649、10 772
抽水蓄能装机容量 /kW	-	1 358	679、727
抽水蓄能选址节点	-	16	16、31
下层场景总成本 / 元	$1.193\ 7 \times 10^5$	$1.125\ 5 \times 10^5$	$1.112\ 1 \times 10^5$
下层总碳排放量 /kg	$2.244\ 0 \times 10^5$	$2.154\ 3 \times 10^5$	$2.140\ 5 \times 10^5$
网损场景总成本 / 元	$7.883\ 1 \times 10^2$	$1.667\ 2 \times 10^3$	$1.532\ 0 \times 10^3$

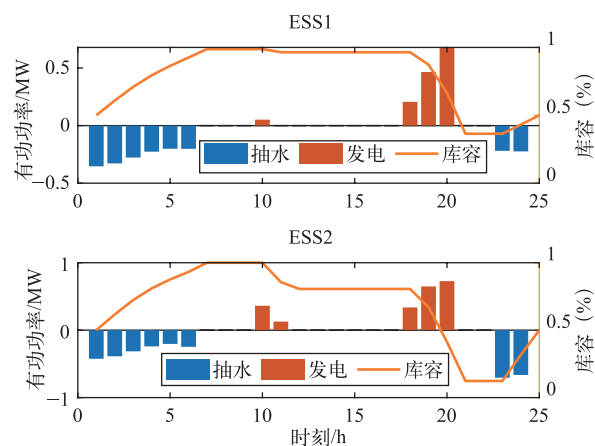
为了反映方案③最优选址定容配置下的系统运行效果，选择场景1光伏数据进行优化调度分析，其模拟结果如图8所示。

图8a和图8b分别为各分布式资源出力情况和两处分布式抽水蓄能调度结果。在该场景下，

电价低谷时段（即0:00—6:00时段），主要由上级电网进行供电，此时抽水蓄能电站蓄水储能。在光伏发电阶段，出力设定在6:00—19:00时段。在负荷与电价处于平段时（即5:00—9:00和15:00—17:00时段），此时抽水蓄能间接与光伏互补蓄能和发电。负荷与电价高峰时（即10:00—14:00和18:00—20:00时段），光伏与抽水蓄能全额出力。



(a) 分布式资源调度结果



(b) 抽蓄调度结果

图8 典型日下系统调度结果

Fig. 8 Typical daily system scheduling results

在下层运行决策模型优化中，虽然绝大多数用电负荷由上级电网提供，但通过增加抽水蓄能电站，在电价低谷期不仅接收光伏电站，而且可以从电网中购买电力，并且在电价高峰阶段放水发电，不仅丰富了系统的供电形式，还提升了系统的经济和环保效益，甚至可以直接取代传统的

微型燃气轮机。

5 结束语

本文以工业园区配电网中光伏抽水蓄能新能源发电技术为背景,从多时间尺度建立了分布式微型抽水蓄能的容量优化配置模型,并提出了求解方法。由此得到了以下结论:

1) 通过K-means聚类算法结合KL散度构建的光伏出力场景和概率不确定集,相比不考虑不确定性影响的随机优化,得到的配置结果更符合实际运行状态。

2) 对可调负荷采用需求响应策略,有助于各分布式资源发挥最大效益,并有效缓解了电网供电压力。

3) 利用LDIW算法结合Cplex对模型进行求解,得到了最优的选址定容规划方案。采用分布式抽水蓄能电站相互配合时,提升了系统的灵活性,同时使输电损失更小。从经济环保效益可以看出,微型抽水蓄能电站具有良好的发展前景。

本文仅考虑了分布式光伏与抽水蓄能的互补能源系统,缺乏对其他清洁能源(如风能、小水电等)的研究,在未来工作中还可以进一步结合电力市场机制来分析这些多能源混合系统的容量优化配置。

参考文献

- [1] 唐伟. “碳中和”背景下“十四五”能源电力发展趋势分析[J]. 油气与新能源, 2021, 33(2): 13-17.
- [2] 董强, 徐君, 方东平, 等. 基于光伏出力特性的分布式光储系统优化调度策略[J]. 综合智慧能源, 2024, 46(4): 17-23.
- [3] 赖昌伟, 黎静华, 陈博, 等. 光伏发电出力预测技术研究综述[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6): 1201-1217.
- [4] 孙伟卿, 裴亮, 向威, 等. 电力系统中储能的系统价值评估方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 47-55.
- [5] 元博, 张运洲, 鲁刚, 等. 电力系统中储能发展前景及应用关键问题研究[J]. 中国电力, 2019, 52(3): 1-8.
- [6] 刘宇宇. 基于抽水蓄能电站风光互补发电系统的优化调度[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [7] 房蒙, 陈艇, 孟克. 基于小水电站改造的微型抽水蓄能电站经济性分析[J]. 小水电, 2023(4): 27-29.
- [8] 罗仕华, 胡维昊, 黄琦, 等. 市场机制下光伏/小水电/抽水蓄能电站系统容量优化配置[J]. 电工技术学报, 2020, 35(13): 2792-2804.
- [9] 荆朝霞, 胡荣兴, 袁灼新, 等. 含风/光/抽水蓄能并计及负荷响应的海岛微网优化配置[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(1): 65-72, 116.
- [10] ZHU H, HOU R, JIANG T, et al. Research on energy storage capacity configuration for PV power plants using uncertainty analysis and its applications[J]. Global Energy Interconnection, 2021, 4(6): 608-618.
- [11] 刘忠, 张乐, 寇攀高, 等. 并网型风电-光伏-抽水蓄能-蓄电池系统容量优化配置[J]. 动力工程学报, 2023, 43(9): 1151-1159.
- [12] 姚俊伟, 汪萌, 赵红生, 等. 考虑成本回收的地方电网抽蓄容量优化配置[J]. 水电能源科学, 2022, 40(11): 208-211, 197.
- [13] 林俐, 李北晨, 孙勇, 等. 基于高比例新能源消纳的抽水蓄能容量多时间尺度迭代优化配置模型[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(1): 104-111.
- [14] 马汇海, 宋金鹏, 康家玉. 基于分时电价的用户侧光伏储能系统容量配置[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(31): 13387-13393.
- [15] 吴杰, 温晨阳, 李珊, 等. 基于分时电价的光伏-储能系统容量优化配置[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(1): 23-30.
- [16] 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.
- [17] 任智君, 郭红霞, 杨苹, 等. 含高比例可再生能源配电网灵活资源双层优化配置[J]. 太阳能学报, 2021, 42(9): 33-38.
- [18] 王坤. 考虑多重不确定性因素的光伏出力预测研

- 究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [19] 陈海生, 李泓, 徐玉杰, 等. 2023年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(5): 1359-1397.
- [20] 王艺, 王红蕾. 分时电价机制下居民用户需求侧对负荷响应研究[J]. 生产力研究, 2021(2): 121-126.
- [21] HAN Y, WANG N, MA M, et al. A PV power interval forecasting based on seasonal model and nonparametric estimation algorithm[J]. Solar Energy, 2019, 184: 515-526.
- [22] LUO W, KHOO Y S, KUNAR A, et al. A comparative life-cycle assessment of photovoltaic electricity generation in Singapore by multicrystalline silicon technologies[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2018, 174: 157-162.
- [23] ARSHAD F, LIN J, MANURKAR N, et al. Life cycle assessment of lithium-ion batteries: a critical review[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022, 180: 106164.
- [24] 龚禹生, 伍晓丽, 吴晋波, 等. 计及源-荷不确定性的主动配电网光储运行分布鲁棒机会约束优化方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2025, 37(2): 98-106.
- [25] 况静, 兰洲, 杨恺, 等. 含风光水多源互补电力系统的分布式抽蓄选址定容与优化调度[J]. 能源工程, 2022, 42(4): 21-27.
- [26] 刘公博, 颜文涛, 张文斌, 等. 含分布式电源的配电网动态无功优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 49-54.

作者简介

段力伟 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新型电力系统优化调度。

(收稿日期: 2024-11-24)