

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191172

基于改进多目标粒子群算法的微电网储能优化配置

陆立民¹, 褚国伟¹, 张涛², 杨志超²

(1. 国网江苏省电力有限公司常州供电分公司, 江苏 常州 213003; 2. 南京工程学院, 江苏 南京 211167)

摘要: 储能参与微电网的优化运行能有效解决可再生能源大规模并网所引起的系统安全稳定问题。基于双层规划理论建立以负荷波动、系统成本以及储能 SOC 偏差为目标的储能优化配置模型, 提出一种改进的多目标粒子群算法求解该模型。依据最优相似度来指导惯性权重的取值, 适时引入交叉变异操作, 在保证算法收敛性的同时, 提高其跳出局部最优解的能力。为保证 pareto 解集的全局性和均匀性, 提出了一种多迭代方向 pareto 解集动态更新策略。最终基于信息熵确立权重, 采用 TOPSIS 法选取最优方案。通过修改的 IEEE-33 节点系统进行算例分析, 验证了该算法在求解微电网储能优化配置问题上的有效性和优越性。

关键词: 微电网; 储能; 双层规划; 多目标粒子群算法; 多迭代方向

Optimal configuration of energy storage in a microgrid based on improved multi-objective particle swarm optimization

LU Limin¹, CHU Guowei¹, ZHANG Tao², YANG Zhichao²

(1. Changzhou Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Changzhou 213003, China;

2. Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: The energy storage participation in the optimal operation of the microgrid can effectively solve the problem of system security and stability caused by large-scale grid connection of renewable energy. Based on bi-level programming theory, an energy storage optimization configuration model with load fluctuation, system cost and energy storage SOC deviation is established. An improved multi-objective particle swarm optimization algorithm is proposed to solve the model. According to the optimal similarity, the value of inertia weight is guided, and the cross-mutation operation is introduced in time to improve the convergence of the algorithm and improve the ability to jump out of the local optimal solution. To ensure the globality and uniformity of the Pareto solution set, a strategy for dynamically updating the set based on multiple iteration directions is proposed. Finally, the weight is established based on information entropy, and the optimal scheme is selected by the TOPSIS method. The modified IEEE-33 node system is used to analyze the effectiveness and superiority of the proposed algorithm in solving the optimal configuration of microgrid energy storage.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51707089) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China “Key Technologies and Empirical Research on Electricity-cored Multi-energy Complementary Integrated Power Conversion Equipment”.

Key words: microgrid; energy storage; bi-level programming (BLP); multi-objective particle swarm optimization algorithm; multiple iteration direction

0 引言

近年来, 随着电源结构改革, 高渗透率可再生

能源的大规模并网, 其间歇性和波动性特征对微电网安全稳定运行造成冲击, 在影响电能质量的同时增加了微电网优化运行的难度^[1-5]。

储能作为微电网的重要组成部分, 具有响应速度快、便于控制以及双向调节等特点, 能够精确地对电力系统能量进行调度^[6-11]。文献[12]基于负荷预测研究了储能参与调峰的控制策略。文献[13-14]提

基金项目: 国家自然科学基金项目(51707089); 国家电网有限公司科技项目“以电为核心多能互补集成功率变换装备关键技术及实证研究”

出储能协调火电机组调频,改善了其动态调频性能。文献[15]将储能应用于配电网电压调控,提升了电力系统的电能质量。以上文献分别从调峰、调频以及调压角度对储能在电力系统中的应用进行阐述,但均未考虑储能的成本问题。由于储能的投资和运维成本相对高昂,限制了其在电力系统中的发展,因此,对储能进行优化配置研究具有重要意义^[16-17]。

目前,国内外学者针对储能系统的优化配置进行了相关研究。文献[18]运用序贯蒙特卡洛模拟法研究储能容量及最大充放电功率对系统可靠性指标的影响,建立储能成本收益评价模型,但未对储能的布局进行研究。文献[19]根据储能的运行特性,提出一种基于综合损耗灵敏度的序次配置策略,简化了储能布局的复杂性,但未考虑系统网架结构对于综合损耗灵敏度的影响。文献[20]计及典型日内储能充放电的能量平衡,将储能系统容量作为第一优化目标,但却忽略了储能的能量约束。上述文献建立了储能单层优化配置模型,将储能的规划与运行综合考虑,增加了决策变量的维度,且模型结构不够清晰。

针对储能单层优化配置模型所存在的问题,部分学者尝试将不同时间尺度的规划与运行问题进行分层研究,建立储能双层优化配置模型。文献[21]同时考虑了规划与运行的相互关系,建立储能系统综合优化模型,为后期储能在电力系统中的应用提供了理论基础。文献[22]建立了一种提升电能质量的储能双层优化配置模型,但在处理上层多目标问题上,采用层次分析法将多目标问题转化为单目标问题,缺乏一定的客观性。文献[23]研究了计及需求响应不确定性的储能优化配置模型,但未考虑储能 SOC 均衡,不利于系统安全持续运行。

微电网储能的优化配置是一个混合整数非线性规划问题(MINLP),常见的求解算法有常规寻优法、软件求解法和智能算法。粒子群算法是智能算法中应用较为广泛的一类算法,其无需对目标函数和约束条件进行数值分析,但其随机搜索特点使得收敛速度较慢,容易陷入局部最优,在多目标问题的求解上还存在均匀性、全局性和鲁棒性较差的问题。文献[24]在全局外部档案更新过程中引入冗余集策略并将离散量整数化,一定程度上提高了局部寻优能力和收敛速度,但其取整方法对目标函数优化的影响程度有待商榷。文献[25]提出一种基于全局拥挤距离择优的多目标粒子群算法,很好地实现了算法的全局性,但没有对算法的均匀性进行研究。

本文鉴于上述研究,在微电网系统中加入储能装置,建立以节点负荷波动、系统成本以及储能

SOC 偏差为目标的储能优化配置模型。为优化模型架构,将储能的优化配置模型进行分层构建,并采用改进的多目标粒子群算法求解该模型,主要针对惯性权重缺乏粒子指导以及算法全局性和均匀性相对较差,对该算法中“惯性权重调整”和“Pareto 解集更新”这两个方面进行了改进,提出了依据最优相似度的惯性权重自适应调整策略以及基于多迭代方向的 Pareto 解集动态更新策略。最后通过算例仿真,对比储能双层优化配置模型与单层优化配置模型以及改进多目标粒子群法与传统粒子群法,验证所提模型以及算法的优越性。

1 双层决策模型

双层决策模型是一种具有两层递阶结构的系统决策模型,其内外层有各自的优化目标和约束条件,内层模型求解基于外层决策变量的确立,同时外层的优化目标又依赖于内层模型的最优解。其数学模型如下所示。

外层决策模型

$$\begin{cases} \min_x F(x, y) \\ \text{s.t. } G(x, y) \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

内层决策模型

$$\begin{cases} \min_y f(x, y) \\ \text{s.t. } g(x, y) \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: y 、 x 分别为内外层决策变量; f 、 F 分别为内外层优化目标; g 、 G 分别为内外层约束条件。

2 储能双层优化配置模型

微电网中可再生能源发电和负荷的时序性,增加了系统的负荷波动,严重影响了系统安全稳定运行。大量研究表明,储能有效地解决了上述问题^[26],但由于其装机成本和运维成本相对高昂,对储能进行优化配置时,还应考虑经济性问题。综上所述,本文选取负荷波动、系统成本以及储能 SOC 偏差作为微电网储能选址定容的优化目标,并基于双层规划理论构建储能优化配置模型。

2.1 外层模型: 储能的选址定容

2.1.1 目标函数

1) 负荷波动

由于风电、光伏等可再生能源大规模并网,其出力特性加剧了系统负荷波动,对发电机组、电网及用户产生不利的影 响。储能系统具有快速的有功功率调节能力,能有效平抑系统负荷波动,其公式如式(3)所示。

$$f_1 = \sum_{t=1}^T (P_G(t) - \overline{P_G})^2 \quad (3)$$

式中: $P_G(t)$ 为发电机在 t 时刻的有功出力; $\overline{P_G}$ 为典型日内发电机有功出力平均值。

2) 系统成本

本文研究的是在已有的微电网系统中加入储能装置, 所以在此不计储能之外装置的投资成本, 只考虑储能系统的投资成本、运行维护成本以及系统的日发电成本^[27]。为便于研究, 将以上不同时间维度的成本转化成典型日成本, 其公式如下所示。

$$f_2 = C_{\text{ESS}} + C_{\text{OM}} + C_{\text{GEN}} \quad (4)$$

$$C_{\text{ESS}} = C_R \sum_{i=1}^{n_{\text{ESS}}} (\alpha_i E_{\text{SOC},i} + \beta_i P_{\text{ESS},i}) \quad (5)$$

$$C_{\text{GEN}} = \sum_{t=1}^T a P_G^2(t) + b P_G(t) + c \quad (6)$$

其中,

$$C_R = \frac{r(1+r)^y}{365[(1+r)^y - 1]} \quad (7)$$

式中: C_{ESS} 、 C_{OM} 、 C_{GEN} 分别为储能系统日投资成本、运维成本和发电成本, 其中储能系统年运行维护成本取 5 万元/MWh^[28]; r 为折现率; y 为储能系统使用年限; n_{ESS} 为储能个数; α_i 、 β_i 分别为第 i 个储能单位容量和功率成本, 其值根据美国能源部可再生能源实验室发布的锂电池储能系统成本报告给出; $E_{\text{SOC},i}$ 为第 i 个储能容量; a 、 b 、 c 为火电机组发电的成本系数; $P_G(t)$ 为火电机组在 t 时刻的有功出力。

3) 储能 SOC 偏差

储能充放电功率受容量的限制, 为了使系统能够持续稳定运行, 需要对储能的荷电状态的偏差量进行优化, 其公式如式(8)所示。

$$f_3 = \frac{1}{n_{\text{ESS}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{ESS}}} \left| \frac{\sum_{t=1}^T P_{\text{ESS},i}(t)}{E_{\text{SOC},i}(t)} \right| \quad (8)$$

式中: n_{ESS} 为储能的安装个数; $P_{\text{ESS},i}(t)$ 为 t 时刻第 i 个储能的有功功率; $E_{\text{SOC},i}(t)$ 为 t 时刻第 i 个储能的电量。

2.1.2 约束条件

1) 潮流平衡约束

$$\begin{cases} P_i(t) = V_i(t) \sum_{j \in i} V_j(t) (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i(t) = V_i(t) \sum_{j \in i} V_j(t) (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $P_i(t)$ 、 $Q_i(t)$ 分别为节点注入的有功和无功功

率; $V_i(t)$ 为 t 时刻 i 节点电压。

2) 发电机组约束

$$\begin{cases} P_G^{\min} \leq P_G(t) \leq P_G^{\max} \\ Q_G^{\min} \leq Q_G(t) \leq Q_G^{\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中: P_G^{\max} 、 P_G^{\min} 、 Q_G^{\max} 、 Q_G^{\min} 分别为发电机组有功、无功出力上下限; $Q_G(t)$ 为 t 时刻发电机组无功出力。

3) 节点电压约束

$$V_{\min} \leq V_i(t) \leq V_{\max} \quad (11)$$

式中, V_{\max} 、 V_{\min} 分别节点电压的上下限。

2.2 内层模型: 系统的优化运行

2.2.1 目标函数

内层模型实质是储能和发电机组优化运行问题, 本文为最大程度地平抑负荷波动, 将负荷波动 f_1 作为内层优化目标。

2.2.2 约束条件

1) 功率平衡约束

$$\begin{aligned} P_G(t) + \sum_{i=1}^{n_{\text{wt}}} P_{\text{wt},i}(t) + \sum_{i=1}^{n_{\text{pv}}} P_{\text{pv},i}(t) + \\ \sum_{i=1}^{n_{\text{ESS}}} P_{\text{ESS},i}(t) - P_{\text{load}}(t) = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

式中: n_{wt} 、 n_{pv} 分别为风电、光伏的安装个数; $P_{\text{wt},i}(t)$ 、 $P_{\text{pv},i}(t)$ 分别为 t 时刻第 i 个风电、光伏的有功出力; $P_{\text{load}}(t)$ 为 t 时刻总负荷。

2) 发电机组约束

$$P_G^{\min} \leq P_G(t) \leq P_G^{\max} \quad (13)$$

3) 储能约束

$$\begin{cases} P_{\text{ESS},i}^{\min} \leq P_{\text{ESS},i}(t) \leq P_{\text{ESS},i}^{\max} \\ \text{if } P_{\text{ESS},i}(t) \leq 0, \\ E_{\text{SOC},i}(t+1) = E_{\text{SOC},i}(t) - P_{\text{SOC},i}(t) \eta_{\text{ch},i} \Delta t \\ \text{if } P_{\text{ESS},i}(t) > 0, \\ E_{\text{SOC},i}(t+1) = E_{\text{SOC},i}(t) - P_{\text{ESS},i}(t) \Delta t / \eta_{\text{dis},i} \\ E_{\text{SOC},i}^{\max} \times 20\% \leq E_{\text{SOC},i}(t+1) \leq E_{\text{SOC},i}^{\max} \times 90\% \end{cases} \quad (14)$$

式中: $P_{\text{ESS},i}^{\min}$ 、 $P_{\text{ESS},i}^{\max}$ 分别为第 i 个储能充放电功率的最小值和最大值; $\eta_{\text{ch},i}$ 、 $\eta_{\text{dis},i}$ 分别为第 i 个储能充、放电效率; Δt 为储能充、放电时长。

3 改进的多目标粒子群算法

微电网储能的优化配置是一个混合整数非线性规划问题(MINLP), 本文选择多目标粒子群算法求解该模型, 并主要针对惯性权重取值和 Pareto 解集更新进行改进。

3.1 自适应惯性权重

针对常用的惯性权重通常随迭代次数按线性或非线性递减取值, 在迭代的过程中缺乏粒子对它的指导, 提出了一种基于最优相似度的惯性权重自适应调整策略: 每次迭代, 根据当前粒子与最优粒子之间的相似度动态调整惯性权重的大小。当相似度较大时表示该粒子接近种群最优粒子, 此时应该适时减小惯性权重的取值, 并且在最优相似度大于某值时, 引入交叉变异操作^[29], 从而在增强局部寻优能力的同时, 提高粒子跳出局部最优的能力; 当相似度较小时表示该粒子远离种群最优粒子, 此时应该适时增加惯性权重的取值, 从而提高全局搜索的能力。

在进行最优相似度计算前, 需对粒子的位置参数进行无量纲化处理。计原矩阵 $\mathbf{X}=[X_1, X_2, \dots, X_d]$, 标准化矩阵 $\mathbf{Y}=[Y_1, Y_2, \dots, Y_d]$, 即 $\mathbf{Y}=[Z_1; Z_2; \dots; Z_n]$, 处理方法如式(15)所示。

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min X_j}{\max X_j - \min X_j} \quad (15)$$

式中: d 、 n 分别为种群粒子维度和个数; Y_d 、 Z_n 分别为 \mathbf{Y} 矩阵的列向量和行向量; x_{ij} 、 y_{ij} 分别为 \mathbf{X} 、 \mathbf{Y} 中的元素。

$$\cos_i = \frac{Z_i \cdot \mathbf{g}\mathbf{x}'}{|Z_i| \cdot |\mathbf{g}\mathbf{x}'|} \quad (16)$$

式中: $\mathbf{g}\mathbf{x}'$ 为经过无量纲化处理的最优粒子位置参数; \cos_i 为粒子 i 与最优粒子之间的余弦值, 值域为 $[0, 1]$, 值越大说明两者相似度越高。

根据惯性权重自适应调整策略, 拟定其变化曲线如式(17)所示。图 1 为惯性权重曲线图。

$$w_i = \frac{2(w_{\text{up}} - w_{\text{down}})}{1 + e^{6(\cos_i - 1)}} + (2w_{\text{down}} - w_{\text{up}}) \quad (17)$$

式中: w_i 为第 i 个粒子的惯性权重; w_{up} 、 w_{down} 分别为惯性权重的上下限。

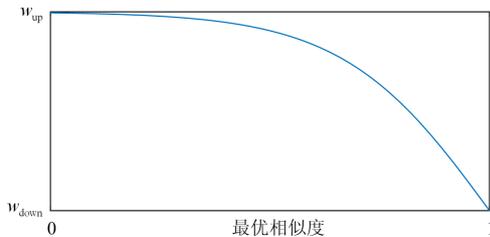


图 1 惯性权重曲线图

Fig. 1 Curve of inertia weight

3.2 Pareto 解集更新策略

拥挤距离择优策略在 Pareto 解集更新上应用广

泛, 而传统拥挤距离的交互信息只局限于相邻粒子之间^[30], 虽简化了计算过程, 但 Pareto 解集的全局性和均匀性相对较差。为增强 Pareto 解集的全局性和均匀性, 本文提出多迭代方向 Pareto 解集动态更新策略, 如图 2 所示: 判断 Pareto 解集是否超出规模, 如果是, 每次删除极小粒距向量组中值最小的两个粒子(即图中红色标点)中任意一个, 如此动态调整, 直至 Pareto 解集符合规模; 将极小粒距向量组和极大粒距向量组值最大的各两个粒子(即图中黄色标点和绿色标点)作为最优粒子, 以此多迭代方向来更新 Pareto 解集。

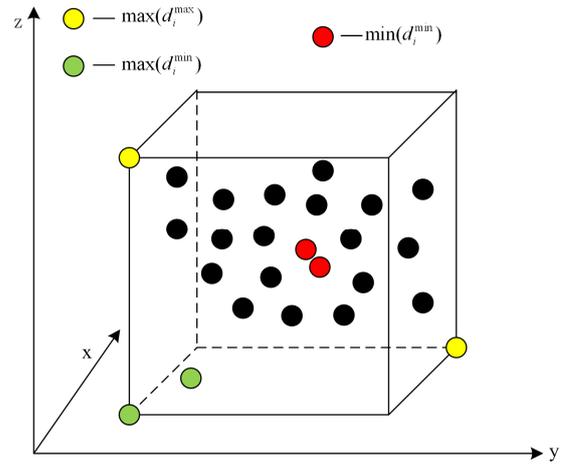


图 2 Pareto 解集更新策略图

Fig. 2 Pareto solution set update strategy diagram

在进行 Pareto 解集更新之前, 需对各粒子的适应度值进行无量纲化处理^[31], 从而定义和计算极小粒距向量组和极大粒距向量组。

$$f'_{ik} = \frac{f_k^{\max} - f_{ik}}{f_k^{\max} - f_k^{\min}}, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (18)$$

$$\begin{cases} d_i^{\min} = \min \left(\sqrt{\sum_{k=1}^m (f'_{ik} - f'_{jk})^2} \right), & i \neq j \\ d_i^{\max} = \max \left(\sqrt{\sum_{k=1}^m (f'_{ik} - f'_{jk})^2} \right), & i \neq j \end{cases} \quad (19)$$

式中: n 为 Pareto 解集规模数; f_{ik} 、 f'_{ik} 分别为粒子 i 第 k 个实际的目标函数值和规范化后的目标函数值; f_k^{\min} 、 f_k^{\max} 分别为第 k 个目标函数绝对正负理想解; d_i^{\min} 、 d_i^{\max} 分别为极小粒距向量组和极大粒距向量组第 i 个元素。

3.3 最优方案选取策略

最优方案的选取是一种多属性决策问题, 本文

采用基于信息熵确立权重的 TOPSIS 法选取最优方案^[32]:

- 1) 按式(18)对目标函数进行无量纲化处理。
- 2) 求各指标权重。

$$E_k = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n P_{ik} \ln P_{ik} \quad (20)$$

$$\lambda_k = \frac{1 - E_k}{m - \sum_{i=1}^n E_i} \quad (21)$$

其中,

$$P_{ik} = \frac{f'_{ik}}{\sum_{i=1}^n f'_{ik}} \quad (22)$$

式中: E_k 为第 k 个属性的信息熵; λ_k 为第 k 个属性的权重。

- 3) 计算距离尺度和贴合度。

$$\begin{cases} S_i^+ = \sqrt{\sum_{k=1}^m (\lambda_k f'_{ik} - \lambda_k f'_{k+})^2} \\ S_i^- = \sqrt{\sum_{k=1}^m (\lambda_k f'_{ik} - \lambda_k f'_{k-})^2} \end{cases} \quad (23)$$

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad (24)$$

式中: S_i^+ 、 S_i^- 分别为粒子 i 的正、负理想距离; C_i 为粒子 i 的贴合度, 其值越大越优。

本文基于双层规划理论建立了微电网储能优化配置模型, 并通过改进的多目标粒子群算法对该模型进行求解, 流程图如图 3 所示。

- 1) 设置迭代次数 K_{\max} , 初始化 $K = 1$;
- 2) 初始化储能系统的安装位置和容量;
- 3) 设 $a = 1:N$, N 为储能选址定容方案数;
- 4) 初始化风电、光伏、储能的有功、无功出力;
- 5) 输入微电网参数及风电、光伏和负荷的数据;
- 6) 根据内层的优化问题及约束条件, 求解出储能系统的最优出力;
- 7) 判断 a 是否等于 N , 如果是, 执行下一步, 反之, 跳转到第 4) 步;
- 8) 计及内层优化出力, 求解外层优化模型;
- 9) $K = K + 1$, 判断 K 是否大于 K_{\max} , 如果是, 执行下一步, 反之, 跳转到第 3) 步;
- 10) 采用最优粒子选取策略确立储能接入电网的最佳方案。

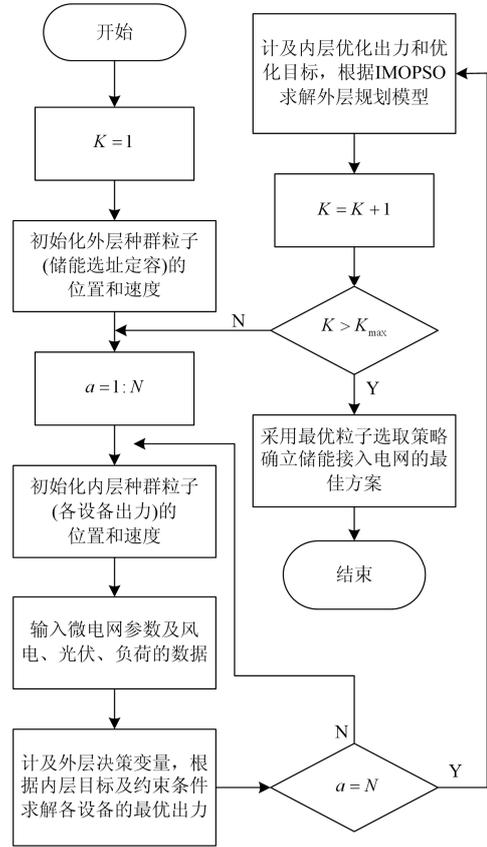


图 3 微电网储能双层优化配置求解流程图

Fig. 3 Flowchart of energy storage double layer optimization configuration for microgrid

4 算例分析

本文采用修改的 IEEE-33 节点微电网系统对算例进行分析, 其拓扑结构如图 4 所示。基准功率为 10 MVA, 基准电压为 10 kV, 典型日负荷曲线如图 5 所示。采用 Matlab2016a 对算法程序进行编写, 并调用 matpower 工具箱进行潮流计算。仿真计算机处理器为 intel core i7-7700HQ, 主频为 2.8 GHz, 内存为 8 GB。

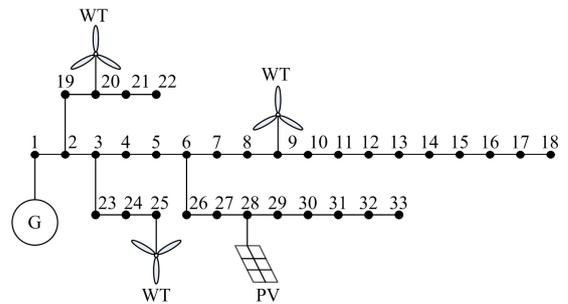


图 4 IEEE-33 节点微电网系统

Fig. 4 IEEE-33 node microgrid system

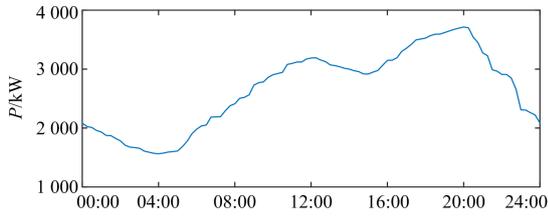


图5 典型日负荷曲线

Fig. 5 Typical daily curve of load

为验证所提模型及算法的优越性, 本文将从以下五种情况进行算例仿真:

场景 1 不接储能;

场景 2 接入储能, 采用经典多目标粒子群算法对储能单层优化配置模型进行求解;

场景 3 接入储能, 采用改进多目标粒子群算法对储能单层优化配置模型进行求解;

场景 4 接入储能, 采用经典多目标粒子群算法对储能双层优化配置模型进行求解。

场景 5 接入储能, 采用改进多目标粒子群算法对储能双层优化配置模型进行求解。

由于篇幅原因, 本文将储能的接入个数设置为 2, 对以上场景进行对比分析, 仿真参数设置如表 1 所示。

表1 仿真参数设置

Table 1 Values assigned to the simulation parameters

参数类型	单层模型	双层模型	
		内层	外层
种群个数	100	100	50
迭代次数	100	100	100
最大惯性权重	0.9	0.9	0.9
最小惯性权重	0.4	0.4	0.4
最优相似度阈值	—	0.98	—
Pareto 解集规模	200	—	200

表2 不同场景的优化结果

Table 2 Optimization results of different scenarios

场景	储能接入位置	储能接入容量/MWh	f_1 /p.u.	f_2 /p.u.	f_3 /p.u.
1	—	—	5.857	1.078	—
2	14	0.969	5.442	1.301	0.008
	18	0.687			
3	20	0.760	5.390	1.301	0.003
	24	0.800			
4	12	0.886	4.599	1.388	0.027
	21	0.811			
5	10	0.863	4.548	1.380	0.017
	20	0.902			

由表 2 可以看出, 接入储能在实现风电、光伏全额消纳的同时, 能有效地平抑负荷波动。其中单层模型负荷波动的平均值为 5.416, 平均削减量约为 8%, 而将负荷波动作为内层优化目标的双层模型负荷波动的平均值为 4.574, 平均削减量约为 22%。此外, 对比场景 2 和场景 3 以及场景 4 和场景 5, 可以看出, 采用改进多目标粒子群算法求解出的优化目标值均优于经典粒子群算法。

为了对算法的性能进行定量分析, 本文提出采用极小粒距标准差及等效粒子数来表示种群粒子的均匀性及全局性, 公式如下所示。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i^{\min} - d_{\text{ave}}^{\min})^2} \quad (25)$$

$$S = \frac{d_{\text{ave}}^{\max}}{d_{\text{ave}}^{\min}} \quad (26)$$

其中,

$$\begin{cases} d_{\text{ave}}^{\min} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^{\min} \\ d_{\text{ave}}^{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^{\max} \end{cases} \quad (27)$$

式中: σ 、 S 分别为极小粒距标准差和等效粒子数; d_{ave}^{\max} 、 d_{ave}^{\min} 分别为极大粒距平均值和极小粒距平均值。

由图 6、图 7 可以看出, 场景 4 和场景 5 相较于场景 2 和场景 3 具有更好的均匀性和全局性, 原因在于双层模型实现了模型架构优化, 其外层决策变量维度相比于单层模型决策变量成指数倍缩减, 使得 Pareto 解能够最大程度地遍布整个解集空间; 同时, 本文将均匀性指标达到稳态时的迭代次数作为算法收敛性的判定依据, 并定义其稳态状态, 即为从起始迭代次数到最大迭代次数中均匀性指标的最大值和最小值的偏差量低于其最小值的 50%, 通过数据分析得出: 场景 2、3、4、5 均匀性指标达到稳态时的迭代次数分别为 92、63、30 和 9, 即场景 5 所用模型和算法要优于场景 4、场景 3 以及场景 2; 而算法的鲁棒性可以通过均匀性指标的标准差进行比较, 其在不同起始迭代次数的标准差变化曲线如图 8 所示, 从图中可以看出: 总体上场景 5 的鲁棒性要优于场景 4、场景 3 和场景 2, 但在起始迭代次数小于 6 时出现场景 4 的鲁棒性优于场景 5 的情况, 其原因在于场景 4 和场景 5 的鲁棒性差异相对较小, 且均匀性指标的数值也相对较小, 而由于迭代总次数取值相对较小, 使得前期的均匀性指标的数值对鲁棒性的影响较大, 从而出现了场景 4 的鲁棒性优于场景 5 的情况。随着起始迭代次数向后推移, 可

以发现场景 5 的鲁棒性要优于场景 4、场景 3 和场景 2。

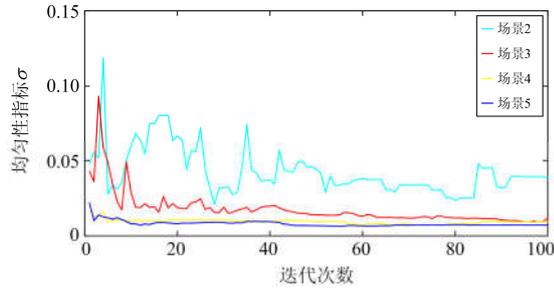


图 6 均匀性指标随迭代次数变化曲线

Fig. 6 Curve of the uniformity index as a function of the number of iterations

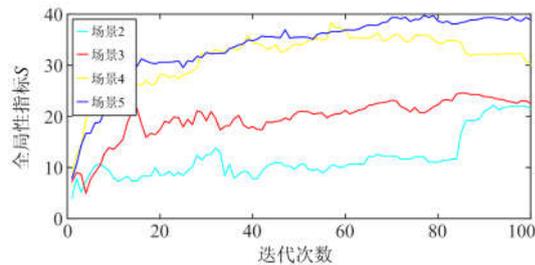


图 7 全局性指标随迭代次数变化曲线

Fig. 7 Curve of the global index as a function of number of iterations

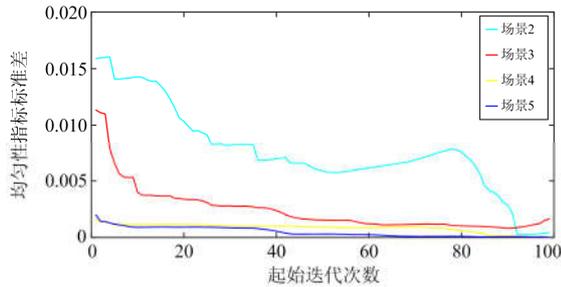


图 8 鲁棒性判定曲线图

Fig. 8 Curve of the robustness judgment

5 结论

本文针对新能源消纳及微电网安全稳定问题，提出储能参与系统优化运行方案。建立储能双层优化配置模型，并采用改进的多目标粒子群算法对该模型进行求解。通过多场景对比分析得出以下结论：

1) 在配置模型上，本文将系统负荷波动作为内层优化目标，负荷波动的平均削减量约为 22%，而单层模型负荷波动的平均削减量仅为 8%，双层模型能更好地实现储能对负荷波动的平抑作用。此外，双层模型通过对模型架构的优化，提高了解集的分佈性。

2) 在求解算法上，通过最优相似度自适应调整惯性权重，并引入交叉、变异操作，增强了算法的收敛性和鲁棒性；通过多迭代方向 Pareto 解集动态更新策略，在保证均匀性的同时，提高了算法的全局性。

参考文献

[1] 肖云鹏, 王锡凡, 王秀丽, 等. 面向高比例可再生能源的电力市场研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 663-674.
XIAO Yunpeng, WANG Xifan, WANG Xiuli, et al. Review on electricity market towards high proportion of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 663-674.

[2] 边晓燕, 姜莹, 赵耀, 等. 高渗透率可再生能源微电网的风柴荷协调调频策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 102-109, 209-214.
BIAN Xiaoyan, JIANG Ying, ZHAO Yao, et al. Coordinated frequency regulation strategy of wind, diesel and load for microgrid with high-penetration renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 102-109, 209-214.

[3] TELUKUNTA V, PRADHAN J, AGRAWAL A, et al. Protection challenges under bulk penetration of renewable energy resources in power systems: a review[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(4): 365-379.

[4] 牟春华, 居文平, 黄嘉骊, 等. 火电机组灵活性运行技术综述与展望[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 1-7.
MU Chunhua, JU Wenping, HUANG Jiasi, et al. Review and prospect of technologies of enhancing the flexibility of thermal power units[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 1-7.

[5] 钟迪, 李启明, 周贤, 等. 多能互补能源综合利用关键技术研究现状及发展趋势[J]. 热力发电, 2018, 47(2): 1-5, 55.
ZHONG Di, LI Qiming, ZHOU Xian, et al. Research status and development trends for key technologies of multi-energy complementary comprehensive utilization system[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(2): 1-5, 55.

[6] 张继元, 舒杰, 宁佳, 等. 考虑 SOC 自均衡的光储独立微电网协调控制[J]. 电工技术学报, 2018, 33(增刊2): 527-537.
ZHANG Jiyuan, SHU Jie, NING Jia, et al. Coordinated control for PV/storage hybrid islanded microgrid considering SOC balancing[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(S2): 527-537.

- [7] LI Yunwei, NEJABATKHAH F. Overview of control, integration and energy management of microgrids[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2014, 2(3): 212-222.
- [8] 凌婵惠, 郑常宝, 胡存刚, 等. 考虑储能充放电效益的孤岛微电网经济优化模型[J]. *中国电力*, 2019, 52(6): 111-120.
LING Chanhui, ZHENG Changbao, HU Cungang, et al. Real-time economic optimization method for microgrid considering energy storage charge and discharge benefits[J]. *Electric Power*, 2019, 52(6): 111-120.
- [9] 康慨, 邓少平, 张超, 等. 考虑联络线功率稳定的微电网鲁棒经济调度模型[J]. *中国电力*, 2019, 52(6): 60-67.
KANG Kai, DENG Shaoping, ZHANG Chao, et al. Robust economic dispatch model of interconnected microgrid considering tie line power stability[J]. *Electric Power*, 2019, 52(6): 60-67.
- [10] 应飞祥, 姜燕波, 何民, 等. 含风储系统的电力系统可靠性评估进展与展望[J]. *智慧电力*, 2019, 47(2): 1-8, 42.
YING Feixiang, JIANG Yanbo, HE Min, et al. Progress and prospect of reliability assessment of power system with wind farm and energy storage system[J]. *Smart Power*, 2019, 47(2): 1-8, 42.
- [11] 张祥, 周博文. 微网储能系统的模糊控制策略研究[J]. *智慧电力*, 2018, 46(4): 16-21.
ZHANG Xiang, ZHOU Bowen. Study on fuzzy control strategy based on micro-grid energy storage system[J]. *Smart Power*, 2018, 46(4): 16-21.
- [12] 王晓东, 苗宜之, 卢爽瑄, 等. 基于 SCM-ANFIS 负荷预测的储能电站调峰控制策略[J]. *太阳能学报*, 2018, 39(6): 1651-1657.
WANG Xiaodong, MIAO Yizhi, LU Shixuan, et al. Peak regulation control strategy of energy storage power station based on SCM-ANFIS load forecast[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2018, 39(6): 1651-1657.
- [13] XIE Xiaorong, GUO Yonghong, WANG Bin, et al. Improving AGC performance of coal-fueled thermal generators using multi-MW scale BESS: a practical application[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 9(3): 1769-1777.
- [14] 崔红芬, 杨波, 蒋叶, 等. 基于模糊控制和 SOC 自恢复储能参与二次调频控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(22): 89-97.
CUI Hongfen, YANG Bo, JIANG Ye, et al. Strategy based on fuzzy control and self adaptive modification of SOC involved in secondary frequency regulation with battery energy storage[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(22): 89-97.
- [15] WANG Lei, LIANG D H, CROSSLAND A F, et al. Coordination of multiple energy storage units in a low-voltage distribution network[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 6(6): 2906-2918.
- [16] YANG Peng, NEHORAI A. Joint optimization of hybrid energy storage and generation capacity with renewable energy[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, 5(4): 1566-1574.
- [17] 刘舒, 李正力, 王翼, 等. 含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(3): 78-84.
LIU Shu, LI Zhengli, WANG Yi, et al. Optimal capacity allocation of energy storage in micro-grid with distributed generation[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(3): 78-84.
- [18] 李振坤, 李一骄, 张代红, 等. 储能设备对有源配电网供电可靠性的影响分析及优化配置[J]. *电网技术*, 2018, 42(11): 3676-3683.
LI Zhenkun, LI Yijiao, ZHANG Daihong, et al. Influence analysis of energy storage device on reliability of distribution network and its optimal allocation[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(11): 3676-3683.
- [19] 苏向敬, 陈思利, 米阳, 等. 分布式电池储能含高比例可再生能源不平衡配电网中的序次优化配置[J]. *电网技术*, 2019, 43(10): 3698-3707.
SU Xiangjing, CHEN Sili, MI Yang, et al. Sequential and optimal placement of distributed battery energy storage systems within unbalanced balanced distribution networks hosting high renewable penetrations[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(10): 3698-3707.
- [20] WANG Deshun, ZHAO Yumeng, TAO Qiong, et al. Research on planning and configuration of multi-objective energy storage system solved by improved ant colony algorithm[C] // 2018 IEEE China International Conference on Electricity Distribution (CICED), September 17-19, 2018, Tianjin, China: 2279-2283.
- [21] 郑乐, 胡伟, 陆秋瑜, 等. 储能系统用于提高风电接入的规划和运行综合优化模型[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(16): 2533-2543.
ZHENG Le, HU Wei, LU Qiuyu, et al. Research on planning and operation model for energy storage system to optimize wind power integration[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(16): 2533-2543.
- [22] 陈厚合, 刘丽娜, 姜涛, 等. 提升配电网电压质量的分布式储能经济优化配置方法[J]. *电网技术*, 2018, 42(7): 2127-2135.
CHEN Houhe, LIU Lina, JIANG Tao, et al. Optimal

- economic configuration of distributed energy storage systems for improving voltage quality in distribution network[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2127-2135.
- [23] 李姚旺, 苗世洪, 刘君瑶, 等. 考虑需求响应不确定性的光伏微电网储能系统优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 69-77.
LI Yaowang, MIAO Shihong, LIU Junyao, et al. Optimal allocation of energy storage system in PV micro grid considering uncertainty of demand response[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 69-77.
- [24] 李晓利, 高金峰. 用于配电网多目标无功优化的改进粒子群优化算法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1): 106-111.
LI Xiaoli, GAO Jinfeng. Improved particle swarm optimization algorithm for multi-objective reactive power optimization of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 106-111.
- [25] ZHANG Jing, LI Huanqin. A global-crowding-distance based multi-objective particle swarm optimization algorithm[C]//2014 IEEE 10th International Conference on Computational Intelligence and Security, November 15-16, 2014, Kunming, China: 1-6.
- [26] KONG Xiangyu, BAI Linquan, HU Qinran, et al. Day-ahead optimal scheduling method for grid-connected microgrid based on energy storage control strategy[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(4): 648-658.
- [27] 程庭莉, 陈民铀, 罗欢. 含可再生能源发电的配网储能多目标优化配置方法[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2808-2815.
CHENG Tingli, CHEN Minyou, LUO Huan. Multi-objective allocation of energy storage in distribution network penetrated with renewable energy generation[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2808-2815.
- [28] 肖峻, 张泽群, 张磐, 等. 用于优化微网联络线功率的混合储能容量优化方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(12): 19-26.
XIAO Jun, ZHANG Zequn, ZHANG Pan, et al. A capacity optimization method of hybrid energy storage system for optimizing tie-line power in microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12): 19-26.
- [29] 吴小刚, 刘宗歧, 田立亭, 等. 基于改进多目标粒子群算法的配电网储能选址定容[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3405-3411.
WU Xiaogang, LIU Zongqi, TIAN Liting, et al. Energy storage device locating and sizing for distribution network based on improved multi-objective particle swarm optimizer[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3405-3411.
- [30] COELLO C, PULIDO G, LECHUGA M. Handling multiple objectives with particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 256-279.
- [31] 邱晓燕, 赵劲帅, 史光耀, 等. 基于HSMOPSO算法的微电网经济与环保协同优化方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1223-1230.
QIU Xiaoyan, ZHAO Jinshuai, SHI Guangyao, et al. Collaborative optimization method of economic and environment in microgrid based on HSMOPSO[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1223-1230.
- [32] 李中豪, 张沛超, 马军, 等. 采用动态赋权的风储协调多目标优化控制方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 94-99, 206.
LI Zhonghao, ZHANG Peichao, MA Jun, et al. Dynamic weighted multi-objective optimization method for coordinated control of wind power and battery energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 94-99, 206.

收稿日期: 2019-09-26; 修回日期: 2020-01-02

作者简介:

陆立民(1970—), 男, 高级工程师, 研究方向为新能源与电力系统规划、运行与管理技术; E-mail: 1069971378@qq.com

褚国伟(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为智能电网运行与控制; E-mail: 54261475@qq.com

张涛(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为新能源与智能电网; E-mail: 2380078599@qq.com

(编辑 张爱琴)