

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180985

含风光储能源-储-荷规划与运行调控策略

葛维春¹, 滕健伊², 潘超², 王顺江¹, 高凯¹

(1. 国网辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳 110004; 2. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 源-荷随机波动性及储能电池并网容量是影响分布式电源渗透率的主要原因。综合考虑稳定性、经济性及环保性因素, 建立源-储-荷多目标优化模型。利用概率潮流模拟风光出力的不确定性, 并采用基于拉丁超立方采样的蒙特卡罗方法进行计算。针对该模型的多目标多约束求解问题, 采用改进花授粉算法进行优化。通过引入授粉加速度因子及遗传自适应因子改善其搜索效率及寻优能力。通过仿真得到源-储-荷多目标优化规划与运行调控策略, 根据优化结果建立电压累计评价指标。结果验证了多目标数学模型及所提方法的正确性及可行性。

关键词: 分布式电源; 储能电池; 优化运行调控; 花授粉算法; 拉丁超立方

Operation regulation strategy of source-storage-load with wind energy storage energy

GE Weichun¹, TENG Jianyi², PAN Chao², WANG Shunjiang¹, GAO Kai¹

(1. State Grid Liaoning Province Electric Power Company, Shenyang 110004, China;

2. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: The permeability of distributed generations is mainly affected by source-load random volatility and grid-connected capacity of energy storage battery. A multi-objective optimal model which considers the technology, economy and environmental protection of source-storage-load is established. Probabilistic power flow is used to simulate the uncertainty of wind force, and the Monte Carlo method based on Latin hypercube sampling is used to calculate the uncertainty. In order to solve the multi-objective and multi-constraint problem of the model, the improved flower pollination algorithm is adopted to optimize the model. The efficiency and the ability of searching for optimization are improved by introducing the pollination acceleration factor and genetic adaptive factor. The multi-objective optimal planning and operation regulation strategy of source-storage-load is obtained by simulation. The accumulative evaluation index of voltage is established according to the optimal result. The results show that the multi-objective mathematical model and the proposed method are correct and feasible.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377017) and Science and Technology Project of State Grid Liaoning Electric Power Company Ltd. (No. 2018YF-21).

Key words: distributed generation; energy storage battery; optimal operation regulation; flower pollination algorithm; Latin hypercube sampling

0 引言

风、光等分布式电源(Distributed Generation, DG)以其清洁、高效的并网运行, 有效解决了传统化石能源日益减少的问题^[1]。随着 DG 渗透率增大, 源荷侧供需失衡所带来的波动性及不确定性将导致弃风、弃光情况逐渐恶化, 甚至造成系统运行失稳^[2]。

储能电池(Energy Storage Battery, ESB)接入智能配电网后具有削峰填谷、提高电能质量等优点^[3], 合理调控 ESB 容量能够有效改善上述现象。因此, 针对源-储-荷规划与运行调控策略问题, 文献[4]考虑了负荷波动等影响对 ESB 进行优化。文献[5]分析了 ESB 并网对配电网的影响, 建立了多目标优化模型进行求解, 但未考虑时序性 DG 与 ESB 之间的协调作用。文献[6]考虑了并网用户与电网公司的最大利润进行配电网优化配置, 但经济性分析中只包含 ESB 投资效益, 忽略了 DG 效益对配电网的影响。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51377017); 国网辽宁省电力有限公司科技项目(2018YF-21)

同时, 源-储-荷多目标协调优化属于多维度、非线性问题, 传统算法难以求解^[7]。针对该问题, 文献[8]利用蒙特卡洛法评估电动汽车并网可靠性, 在计算精度上具有一定优势, 但方法采样时间过长。文献[9]采用半不变量法对含风、光的 DG 配电系统进行概率潮流计算, 尽管方法计算简单, 但精度不高。文献[10]考虑了 DG 利用率、网损及用户满意度三方面建立多目标优化数学模型, 采用改进粒子群算法求解, 计算时间较短但全局搜索能力较差。文献[11]考虑了风、光时序性, 采用拉丁超立方方法 (Latin Hypercube Sampling, LHS) 进行时序性处理, 并结合改进模拟退火粒子群算法优化求解。已有研究表明^[12], 拉丁超立方采样法与智能算法相结合能够有效解决源-储-荷多目标优化运行问题, 其中传统花授粉算法 (Flower Pollination Algorithm, FPA) 在参数设置、算法实现等方面具有优势, 但还存在收敛速度慢、易陷入局部寻优等缺点。

本文针对源-储-荷多目标优化规划与运行调控问题考虑第一类电压稳定指标、DG 及 ESB 并网收益及污染排放等三方面指标因素, 建立多目标优化数学模型。采用自适应及加速度因子改进 FPA, 并将 LHS 采样嵌入 FPA 中, 提出基于改进 FPA-LHS 采样的源-储-荷多目标优化方法。对 PG&E-69 节点配电网进行仿真计算, 考虑经济性分析源-储-荷规划与运行调控对配电网的影响, 在此基础上, 综合考虑安全、经济及环境得到多目标优化结果, 并对比分析不同方法的优化性能, 然后根据结果建立电压累计概率评价指标, 结果证明本文所提模型及算法的合理性和有效性。

1 源-储-荷优化数学模型

1.1 风电出力概率模型

大部分地区风速均近似服从两参数 Weibull 分布^[13], 其概率模型可表示为

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (1)$$

式中: v 表示实时风速; k 表示形状参数; c 表示尺度参数。

风机 (Wind Turbine, WT) 实际出力 P_w 受风速变化影响, 其出力概率模型可表示为

$$P_w = \begin{cases} 0 & v < v_{pi} \text{ or } v > v_{po} \\ \frac{P_r(v - v_{pi})}{v_r - v_{pi}} & v_{pi} \leq v \leq v_r \\ P_r & v_r \leq v \leq v_{po} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_r 表示风机额定功率; v_{pi} 、 v_{po} 分别表示切入、

切除风速; v_r 表示额定风速。将 WT 日出力根据风速分为 24 个不同场景, 对应每个场景下 WT 有功功率及场景概率计算见文献[14]。

1.2 光伏出力概率模型

在一定时间段内, 光照强度变化近似服从 Beta 分布^[13], 其概率模型可表示为

$$f(l) = \frac{\Gamma(\varphi + \delta)}{\Gamma(\varphi)\Gamma(\delta)} \left(\frac{l}{l_{max}}\right)^{\varphi-1} \left(1 - \frac{l}{l_{max}}\right)^{\delta-1} \quad (3)$$

式中: l 表示光照强度; φ 、 δ 均表示形状参数; Γ 表示 Gamma 函数。

光伏 (Photovoltaic, PV) 实际出力受光照强度变化影响, 其出力概率模型为

$$P_i(t) = P_{ste} \frac{l(t)}{l_{ste}} \left[1 + \theta(G(t) - G_{ste})\right] \quad (4)$$

式中: $P_i(t)$ 表示光照强度在第 t 时刻的输出功率; $G(t)$ 表示 PV 发电系统在第 t 时刻的表面温度; θ 表示温度系数; l_{ste} 、 G_{ste} 和 P_{ste} 分别表示标准测试环境下的光照强度、PV 发电系统温度和最大输出功率。将 PV 日出力按照光照强度分为 24 个不同场景, 对应每个场景下的 PV 有功功率输出及光照强度概率计算见文献[15]。

1.3 储能电池充放电概率模型

ESB 为具有效率高、容量大等特点的钠硫电池, 由其原理^[16]分析可知, 在 t 时刻的功率差值可表示为

$$\Delta P_{ESB}(t) = P_{load}(t) - \sum_{y=1}^{N_{DG}} P_{DG_y}(t) \quad (5)$$

式中: $\Delta P_{ESB}(t)$ 表示第 t 时刻源-荷供需差值; $P_{load}(t)$ 表示第 t 时刻的负荷需求量; P_{DG_y} 表示第 t 时刻第 y 类 DG 的输出功率。

若 $\Delta P_{ESB}(t)$ 大于 0, 储能处于放电状态; 若 $\Delta P_{ESB}(t)$ 小于 0, 储能处于充电状态, 相应第 t 时刻存储能量可表示为

$$E_{ESB}(t) = \begin{cases} E_{ESB}(t-1) - \Delta P(t-1) \times 1 & \Delta P(t-1) \geq 0 \\ E_{ESB}(t-1) - \zeta \Delta P(t-1) \times 1 & \Delta P(t-1) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $E_{ESB}(t)$ 表示 ESB 在第 t 时刻的存储能量; ζ 表示 ESB 充电效率, 取值范围为 [0.7, 0.9]^[17]。

2 源-储-荷多目标优化模型

2.1 源-储-荷评价指标

电压波动影响系统稳定性, 建立以第一类电压稳定^[18]为判据的稳定性评价指标, 其目标函数为

$$\begin{cases} B_k = \frac{4[(P_j X_{ij} - Q_j R_{ij})^2 + (P_j R_{ij} + Q_j X_{ij})U_i^2]}{U_i^4} \\ f_1 = \max\{B_1, B_2, B_3, \dots, B_k, \dots, B_N\} \quad 1 \leq k \leq N \end{cases} \quad (7)$$

式中: B 为稳定性评价指标; k 为支路数; i, j 分别表示第 k 条支路上两个不同端点; Q_j^i 、 P_j^i 分别表示第 j 节点产生的无功功率与有功功率; X_{ij} 、 R_{ij} 分别表示第 k 条支路上的电抗与电阻; U_i 表示节点 i 处电压幅值标么值; $\{B_1, B_2, B_3, \dots, B_N\}$ 表示系统内所有支路电压稳定性指标合集。 f_1 指标愈小, 系统愈稳定。

2.2 源-储-荷经济指标

DG 收益主要包括 DG 卖电所得收益及相应政策津贴, 其目标函数为

$$f_{2_1} = 8760 \sum_{j=1}^N (CPI_y^j + CPS_y^j) S_{DG_y}^j \eta_y \quad (8)$$

式中: CPI_y^j 和 CPS_y^j 分别表示第 y 类 DG 在第 j 节点的上网电价和政策补贴; N 表示 DG 并网的节点总数; $S_{DG_y}^j$ 表示 y 类 DG 在第 j 节点上装置的额定容量, η_y 表示 y 类 DG 的容量系数。

ESB 并网能够调节市场运行经济性, 同时可以有效减少负荷对系统造成的影响^[6]。储能电池延缓配电网未来升级改造的收益可表示为

$$f_{2_2} = C_{ue} \Delta P_{load} \left(1 - 1/e^{\omega \frac{1+\tau}{1+\kappa}} \right) \quad (9)$$

式中: C_{ue} 表示扩建成本; ΔP_{load} 表示 ESB 降低的峰值负荷; ω 表示预期收益率; τ 表示 ESB 的削峰率, κ 表示负荷年增长率。

$$f_2 = f_{2_1} + f_{2_2} \quad (10)$$

式中, f_2 表示源-储-荷经济指标, 该指标越大, 相应系统收益越高。

2.3 源-储-荷环境指标

燃料电池 (Fuel Cell, FC) 及微型燃气轮机 (Micro-Turbines, MT) 在运行过程中会产生少量污染物, 考虑污染排放建立数学模型为

$$f_3 = \sum_{i=1}^N \sum_{y=1}^{N_{DG}} \sum_{h=1}^{N_w} S_{DG_y}^i \times \alpha_h \times GER_y^h \times \beta \quad (11)$$

式中: N_{DG} 表示 DG 类型; N_w 表示污染排放类型; $S_{DG_y}^i$ 表示 y 类 DG 在第 i 节点上的输出功率; α_h 表示 h 类污染排放的权重系数; GER_y^h 表示第 y 类 DG 的 h 类污染排放率; β 表示污染排放系数比。 f_3 愈小, 环境友好满意度愈高。

2.4 约束条件

(1) 等式约束

源-储-荷节点潮流等式约束为

$$\begin{cases} P_{DG-ESB}^i - P_{load}^i = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_{DG-ESB}^i - Q_{load}^i = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} + B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (12)$$

式中: P_{DG-ESB}^i 、 Q_{DG-ESB}^i 分别表示 i 节点上 DG-ESB 的有功与无功功率; P_{load}^i 、 Q_{load}^i 分别表示 i 节点上负荷的有功与无功功率; G_{ij} 、 B_{ij} 及 δ_{ij} 分别表示 i, j 节点之间电导、电纳及电压相角。

(2) 不等式约束

源-储-荷体系下, 考虑节点电压、支路电流、ESB 功率及 DG-ESB 容量构建不等式约束为

$$\begin{cases} U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \\ I_{ij} \leq I_{ij}^{\max} \\ P_{ESB}^{\min} < P_{ESB} < P_{ESB}^{\max} \\ S_{DG-ESB} \leq S_{DG-ESB}^{\max} \quad i \in N \end{cases} \quad (13)$$

式中: U_i^{\max} 、 U_i^{\min} 分别表示节点 i 处电压上、下限; I_{ij}^{\max} 表示支路 ij 的允许运行最大电流; S_{DG-ESB}^{\max} 表示 DG-ESB 在第 i 个节点处的最大安装容量; P_{ESB}^{\max} 、 P_{ESB}^{\min} 分别表示 ESB 功率上、下限。

3 基于改进 FPA-LHS 的优化方法

改进 FPA-LHS 方法由改进 FPA 算法和基于 LHS 采样的蒙特卡洛潮流方法构成。根据源-储-荷随机输入变量与其概率模型, 利用 LHS 采样并根据采样数据计算智能电网的概率潮流, 然后统计结果得出电压累计概率评价指标。最后针对 FPA 存在的缺点进行改善, 在保证求解多样性的前提下, 提升算法收敛速率及寻优能力, 并利用改进 FPA 进行多目标优化获得最优规划与运行调控策略。

3.1 LHS 采样方法

设源-储-荷随机输入变量为 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_y)$, 其中任意两变量 x_i 和 x_j 之间的相关系数 ρ_{ij} 可表示为

$$\rho_{ij} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i} \frac{x_j - \mu_j}{\sigma_j} f_{ij}(x_i, x_j) dx_i dx_j \quad (14)$$

式中: $f_{ij}(x_i, x_j)$ 表示 x_i 和 x_j 的联合密度函数; σ_i 、 σ_j 分别表示 x_i 、 x_j 的数学期望; μ_i 、 μ_j 分别表示 x_i 、 x_j 的均方根。

根据概率转换原则^[19], 可知标准正态分布随机输入变量 $\mathbf{Z} = (z_1, z_2, \dots, z_n)$ 与 \mathbf{X} 的关系为

$$\begin{cases} z_k = \Phi_k^{-1}(F_k(x_k)) \\ x_k = F_k^{-1}(\Phi_k(z_k)) \end{cases} \quad (15)$$

式中, $\Phi(\cdot)$ 、 $F(\cdot)$ 表示累积分布函数, 其中 $\Phi(\cdot)$ 属于标准正态分布随机变量, $F(\cdot)$ 属于源-储-荷随机变量。

依据 Nataf 变换原则, ρ_{ij} 与标准正态随机向量中任意两变量 z_i 和 z_j 的相关系数 ρ'_{ij} 关系表示如下:

$$\rho_{ij} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\frac{F_i^{-1}(\Phi(z_i)) - \mu_j}{\sigma_i} \right] \times \left[\frac{F_j^{-1}(\Phi(z_j)) - \mu_j}{\sigma_j} \right] \times \phi_2(z_i, z_j, \rho'_{ij}) dz_i dz_j \quad (16)$$

式中, $\phi_2(z_i, z_j, \rho'_{ij})$ 表示标准正态分布随机变量的联合密度函数。

3.2 LHS 概率潮流计算步骤

1) 输入源-储-荷随机变量计算其相关系数矩阵, 并根据结果得到其标准正态分布随机变量的相关系数矩阵。

2) 对相关系数矩阵进行 Cholesky 分解, 并对标准正态分布随机变量进行采样, 得到样本矩阵, 进一步得到顺序矩阵。

3) 对 LHS 进行采样排序。利用样本矩阵进行潮流计算, 统计节点电压、相角及有功、无功功率等数据。

4) 求解随机变量数字特征及概率分布, 并根据结果得到服从一定关系的出力数据。

3.3 改进 FPA 计算方法

FPA 是近年来提出的一种新型智能算法^[20], 其原理是模拟自然界开花植物的两种授粉过程, 具有参数设置简便、算法容易实现等特点^[20], 但算法收敛速度较慢、没有有效机制辅助跳出局部寻优, 因此在 FPA 中引入加速度因子及自适应因子, 提出改进 FPA 并结合 LHS 进行源-储-荷多目标优化规划与运行调控。

在 FPA 全局搜索中引入授粉加速度提高算法收敛速率, 改进全局优化公式可表示为

$$x_i^{d+1} = a_i^d + \gamma L(\lambda)(g - a_i^d) \quad (17)$$

式中: g 为当前群体中最优解; a_i^d 为第 d 代中第 i 个花朵授粉过程中产生的加速度因子; γ 为缩放因子; L 为莱维飞行步长。

FPA 以转换概率 p 控制优化过程, 其全局优化以 p 控制, 局部优化以 $1-p$ 控制。若 p 为常数, 不仅会导致计算过程速度过慢, 还会导致最终结果陷入局部最优。因此提出转换概率自适应因子 p' , 其计算公式为

$$p' = D + 0.2 \times R_{-1} \quad (18)$$

式中: D 为 p 初始值; R_{-1} 表示 $[0, 1]$ 之间的随机数; p' 随迭代次数改变进行调整, 避免结果陷入局部最优, 并进一步提升算法收敛速度。

FPA 局部优化过程中控制花粉变异概率是 $[0, 1]$ 间的随机变量, 可能会导致源-储-荷多目标优化结果较差, 因此引入变异概率自适应因子, 其计算公式为

$$\varepsilon_{d+1} = \begin{cases} G + 0.9 \times R_{-2} & R_{-3} < 0.1 \\ \varepsilon_d & R_{-3} \geq 0.1 \end{cases} \quad (19)$$

式中: R_{-2} 、 R_{-3} 均表示 $[0, 1]$ 中的随机数; ε_d 、 ε_{d+1} 分别表示第 d 代和第 $d+1$ 代时的变异概率; G 为 ε 初始值。

将 LHS 嵌入改进 FPA 算法中求解源-储-荷多目标优化问题时, 各花簇代表求解个体, 可表示为

$$\mathbf{Y} = [S_{\text{DG-ESB}}^1, S_{\text{DG-ESB}}^2, \dots, S_{\text{DG-ESB}}^n] \quad (20)$$

式中: $S_{\text{DG-ESB}}^n$ 表示 DG 及 ESB 的并网容量; \mathbf{Y} 表示多目标控制变量矩阵。

综合考虑安全指标、经济指标及环境指标建立多目标优化模型为

$$\min F(\mathbf{Y}) = \{f_1(\mathbf{Y}), f_2(\mathbf{Y}), f_3(\mathbf{Y})\} \quad (21)$$

各指标综合加权优化适应度函数为

$$\begin{cases} F = \sum_{i=1}^m \omega_i f_i \\ \sum_{i=1}^m \omega_i = 1 \end{cases} \quad (22)$$

式中, ω_i 表示非负权重系数, 其数值由各指标重要性决定, 取决于待优化网络的具体情况。

基于改进 FPA-LHS 的优化调控流程见图 1。

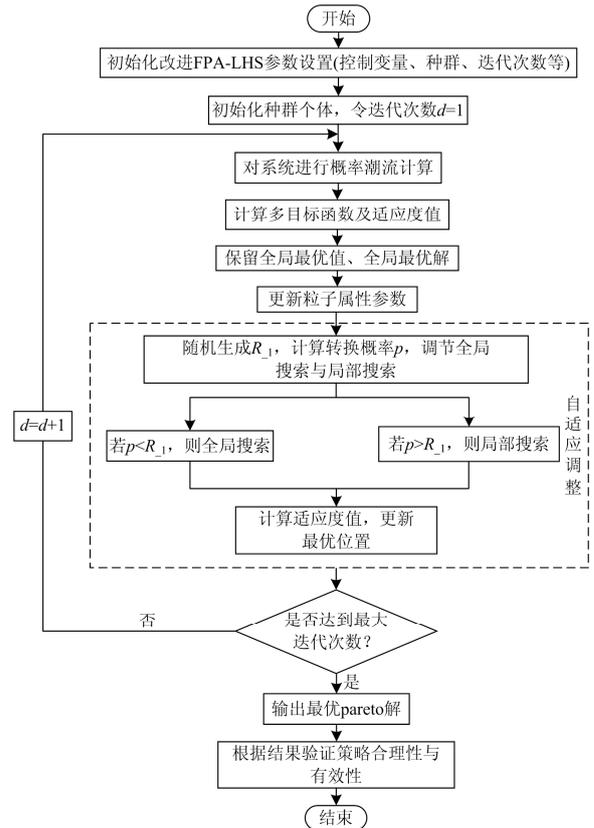


图 1 优化流程图

Fig. 1 Optimal flow chart

4 算例分析

4.1 算例参数

采用 PG&E-69 节点配电系统，基准电压为 12.66 kV，基准功率为 10 MVA、系统有功、无功负荷分别为 3 802.19 kW、2 694.60 kvar，对应系统结构图如图 2 所示。

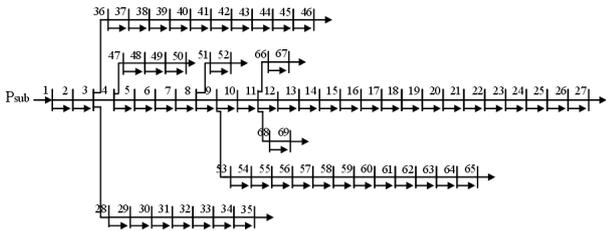


图 2 PG&E69 节点配电系统

Fig. 2 PG&E69 network topology map

风速与光伏的场景概率模型如图 3 所示。

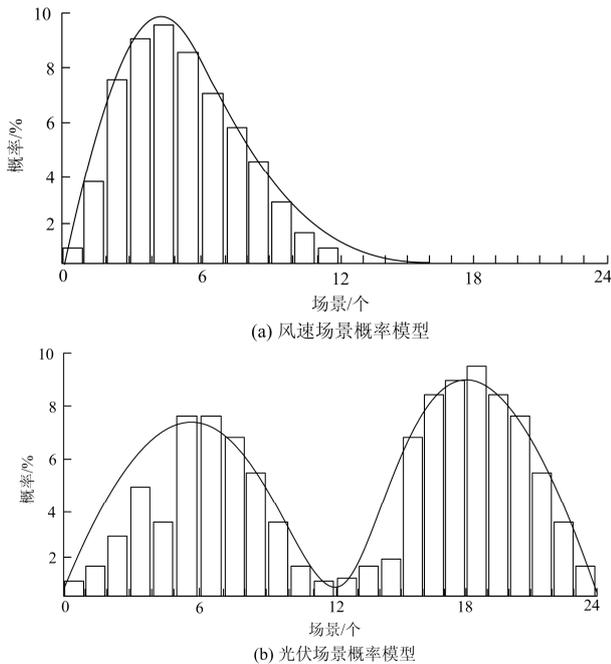


图 3 风速与光伏场景概率模型

Fig. 3 Model of wind and photovoltaic scene probability

通过大量算例仿真分析所提算法的适用性，得到改进 FPA-LHS 参数设置如表 1 所示。

表 1 改进 FPA-LHS 参数设置

Table 1 Algorithm parameters of FPA-LHS

粒子数目	迭代次数	转换概率	变异概率	采样规模
100	200	0.8	[0.25, 0.75]	500

本文安装 DG 的类型主要包括 WT、PV、FC、MT。源储安装类型与配电网节点类型采用 0-1 规

划，其中，0 对应节点未接入 DG 或 ESB，1 对应节点已接入 DG 或 ESB。以经济性为前提建立初步优化指标，仿真结果如表 2 所示。

表 2 DG 与 ESB 并网容量与位置

Table 2 Capacity and grid location of DG and ESB

方 案	源储并网容量(节点)					B 指标/ p.u.
	WT/kW	PV/kW	FC/kW	MT/kW	ESB/kW·h	
一	—	—	—	—	—	0.333 6
二	1 578 (61)	161 (50)	175 (21)	118 (51)	1 257 (59)	0.115 2
三	1 407 (64)	179 (59)	167 (49)	195 (64)	1 238 (61)	0.115 8
四	1 472 (62)	182 (49)	182 (50)	123 (63)	1 247 (51)	0.095 8

电压稳定指标数值范围为[0, 1]，由表 2 可知，在兼顾电压稳定性的条件下，源储并网后 B 指标明显降低，方案二、三、四相比方案一电压稳定性约提高 65%，证明所选并网节点具有一定的适用性，因此采用表中方案进行下一步分析。

4.2 仿真分析

4.2.1 考虑经济性的源-储-荷优化规划与运行调控

在满足负荷需求的条件下，考虑经济性对源-储-荷系统进行优化，在未考虑 ESB 条件下研究不同方案的系统稳定性与环境污染性指标，其 Pareto 解分布情况见图 4，从中选取典型方案，结果如表 3 所示。

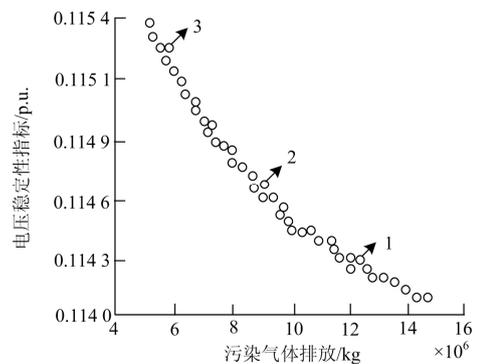


图 4 考虑经济性的 Pareto 解分布

Fig. 4 Pareto solution considering economy

表 3 典型优化方案

Table 3 Results of typical optimal cases

case	经济效益/万元	污染气体/kg	电压稳定/p.u.
case1	737.443	12 479 213.200 0	0.114 4
case2	702.864	8 998 622.600 0	0.114 8
case3	628.632	6 039 747.800 0	0.115 2

由图 4 可知，在考虑经济性的前提下，稳定性指标与环境性指标近似呈反比关系。结合表 3 可知，

case1 电压稳定性较高, 环境污染较高; case3 电压稳定性较低, 污染程度较小; case2 综合考虑稳定性及环境性指标, 对比其他方案优化结果较好, 故选取该方案。该方案中 ESB 并网前后不同时段弃风、弃光率及电压变化如图 5、图 6 所示。

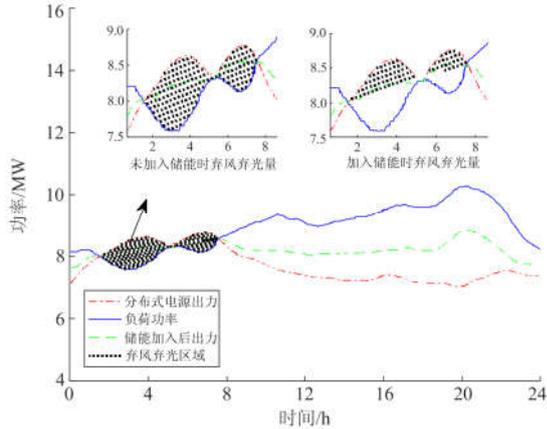
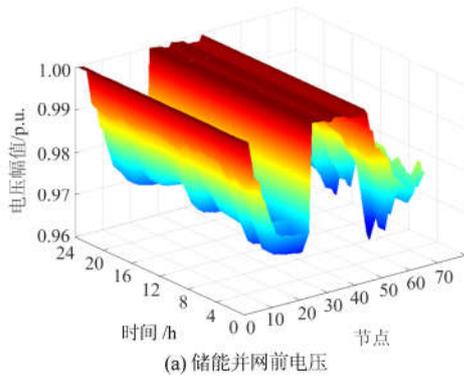
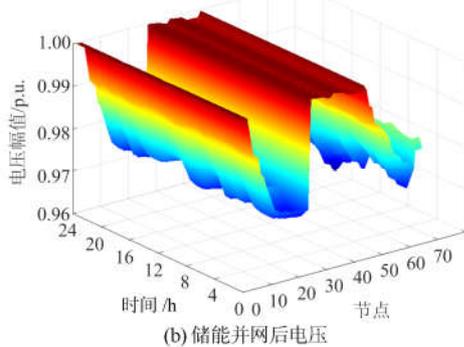


图 5 储能并网前后弃风弃光率

Fig. 5 Discarding rate of light before and after energy storage



(a) 储能并网前电压



(b) 储能并网后电压

图 6 储能并网前后电压

Fig. 6 Voltage change before and after energy storage

由图 5、图 6 可知, 由于 WT、PV 具有一定的随机波动性, 可能导致系统稳定性和可靠性降低; 另一方面, 也造成了大量风光能量无法充分消纳的问题。利用储能并网可以有效改善上述问题, 使其

弃风弃光量降低、节点电压波动变小, 证明源-储-荷协调发电能够有效实现削峰填谷并提高电网电能质量。

上述只侧重考虑经济性效果, 现综合考虑稳定性、经济性及环境性三方面指标进行多目标优化规划与运行调控。

4.2.2 源-储-荷多目标优化规划与运行调控

在不同负荷水平 A 下, 进行电网源-储-荷优化, 以负荷水平 $A=1.0$ 为例, 其 Pareto 解分布及部分典型优化方案如图 7、表 4 所示。

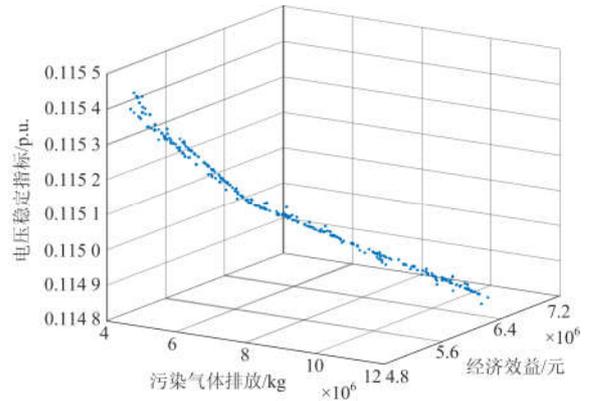


图 7 HFPA 算法 Pareto 解分布情况

Fig. 7 HFPA algorithm distribution of Pareto solutions

由图 7、表 4 可知, 满负荷运行电网特性 Pareto 解分布均匀、多样性较好, 证明改进 FPA-LHS 具有良好的全局搜索能力, 尽管不同指标间相互制约, 但整体优化结果较优, 并且保证了可行解的多样性与合理性。以 case5 为例, 分别采用改进 FPA-LHS、FPA-LHS 及 PSO-LHS 对多目标优化问题进行求解, 优化结果如图 8 所示。

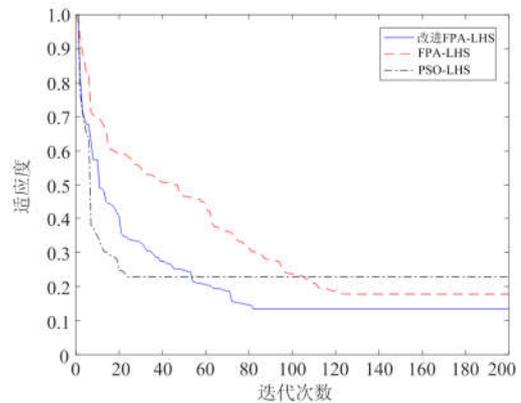


图 8 不同算法优化结果

Fig. 8 Optimal results of different algorithms

由图 8 可知, PSO-LHS 计算速度较快, 但易陷入局部最优, 导致寻优结果较差及收敛精度较差;

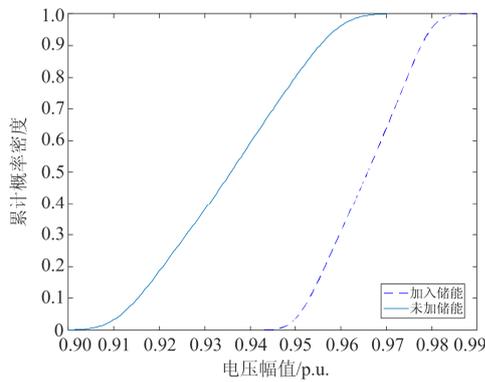
FPA-LHS 寻优结果较好,但缺少有效的跳出局部寻优策略,导致寻优速度较慢;由于改进 FPA-LHS 加入了加速因子及自适应因子,保证了算法在计算效率快的基础上具有更强的寻优能力。

根据优化结果得出电压累计概率评价指标,验证源-储-荷优化规划与运行调控有效平抑电压并消纳弃风弃光量,评价结果如图 9 所示。

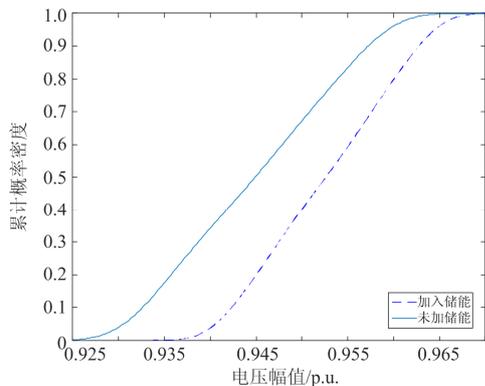
表 4 典型优化方案结果

Table 4 Results of typical optimal cases

case	DG、ESB 容量					评价指标		
	WT/kW	PV/kW	FC/kW	MT/kW	ESB/kWh	效益/万元	污染/kg	电压稳定指标/p.u.
case1	1 599.86	151.74	189.36	176.75	1 285.87	708.54	9 909 584	0.114 9
case2	1 574.75	194.47	176.25	166.65	1 257.98	699.92	8 435 754	0.115 0
case3	1 566.78	116.85	196.75	63.25	1 147.37	637.56	6 299 756	0.115 1
case4	1 552.12	200.68	155.85	67.92	1 098.26	634.51	5 252 654	0.115 2
case5	1 542.36	198.56	123.23	51.65	1 068.73	608.51	4 134 854	0.115 4



(a) 59节点



(b) 61节点

图 9 电压累计概率评价指标

Fig. 9 Voltage accumulative probability evaluation index

由图 9 可知,由于源-储-荷具有较强的时序波动性,导致了相应节点的电压会发生较大变化,甚至出现电压越限问题。当 ESB 接入电网后,61、59 节点电压波动性显著降低。

5 结论

本文采用改进 FPA-LHS 采样法对源-储-荷进行多目标优化,得出以下结论:

1) 综合考虑稳定性、环境性及经济性指标建立

源-储-荷多目标规划与运行调控模型,通过优化保证可行解的合理性与多样性。

2) 采用改进 FPA-LHS,引入加速度因子及自适应因子改善算法收敛速度及寻优能力,获得多样性的 Pareto 解,证明了所提方法的正确性和有效性。

参考文献

[1] 管志成, 丁晓群, 张木银, 等. 考虑时序特性含电动汽车配电网分布式电源优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 24-31.
GUAN Zhicheng, DING Xiaoqun, ZHANG Muyin, et al. Optimal allocation of distributed generation of distributed network containing electric vehicle considering timing characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 24-31.

[2] HEMMATI R. Optimal design and operation of energy storage systems and generators in the network installed with wind turbines considering practical characteristics of storage units as design variable[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 158: 680-693.

[3] 李秀磊, 耿光飞, 季玉琦, 等. 考虑实际运行的配电网电池储能系统的优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 88-94.
LI Xiulei, GENG Guangfei, JI Yuqi, et al. Study on optimal allocation of battery energy storage in distribution network considering the actual operation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 88-94.

[4] 杨玉青, 牛利勇, 田立亭, 等. 考虑负荷优化控制的区域配电网储能配置[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 1019-1025.
YANG Yuqing, NIU Liyong, TIAN Liting, et al. Configuration of energy storage devices in regional distribution network considering optimal load control[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 1019-1025.

[5] 尤毅, 刘东, 钟清, 等. 主动配电网储能系统的多目标优化配置[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18): 46-52.
YOU Yi, LIU Dong, ZHONG Qing, et al. Multi-objective optimal placement of energy storage systems in an active

- distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 46-52.
- [6] 刘文霞, 牛淑娅, 石道桂, 等. 考虑运行策略及投资主体利益的主动配电系统储能优化配置[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2697-2704.
LIU Wenxia, NIU Shuya, SHI Daogui, et al. Optimal allocation of ADS battery energy storage considering operation strategy and investment subject benefit[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2697-2704.
- [7] 许喆, 潘金生, 樊淑娴, 等. 基于改进萤火虫算法的含DG配电网重构方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 26-32.
XU Zhe, PAN Jinsheng, FAN Shuxian, et al. A distribution network reconfiguration method with distributed generation based on improved firefly algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 26-32.
- [8] 张忠会, 胡国宝, 李瑞欣. 考虑电动汽车接入的分布式电源出力优化[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 120-127.
ZHANG Zhonghui, HU Guobao, LI Ruixin. Optimization of distributed generation output in electric vehicles integrating into distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 120-127.
- [9] 符杨, 廖剑波, 李振坤, 等. 考虑越限风险的主动配电网日前优化调度及运行[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(21): 6328-6338.
FU Yang, LIAO Jianbo, LI Zhenkun, et al. Day-ahead optimal scheduling and operating of active distribution network considering violation risk[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(21): 6328-6338.
- [10] 沙熠, 邱晓燕, 宁雪娇, 等. 协调储能与柔性负荷的主动配电网多目标优化调度[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1394-1399.
SHA Yi, QIU Xiaoyan, NING Xuejiao, et al. Multi-objective optimization of active distribution network by coordinating energy storage system and flexible load[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1394-1399.
- [11] 贾清泉, 赵美超, 孙玲玲, 等. 主动配电网中计及时序性与相关性的分布式光伏并网规划[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1719-1728.
JIA Qingquan, ZHAO Meichao, SUN Lingling, et al. Planning for grid-connection of distributed PVs considering the sequential feature and correlation in active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1719-1728.
- [12] 段贵钟, 秦文萍, 逯瑞鹏. 考虑风电接入与负荷不确定性的静态电压稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 108-114.
DUAN Guizhong, QIN Wenping, LU Ruipeng. Static voltage stability analysis considering the wind power and uncertainty of load[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 108-114.
- [13] 茆美琴, 周松林, 苏建徽. 基于风光联合概率分布的微电网概率潮流预测[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 55-63.
MAO Meiqin, ZHOU Songlin, SU Jianhui. Probabilistic power flow forecasting of microgrid based on joint probability distribution about wind and irradiance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 55-63.
- [14] LI Jinghua, WANG Sai, YE Liu. A coordinated dispatch method with pumped-storage and battery-storage for compensating the variation of wind power[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 2(3): 2-14. DOI 10.1186/s41601-017-0074-9.
- [15] CHENG Yu, ZHANG Chengwei. Configuration and operation combined optimization for EV battery swapping station considering PV consumption bundling[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 26(2): 2-18. DOI: 10.1186/s41601-017-0056-y.
- [16] ZHANG Delong, LI Jianlin, HUI Dong. Coordinated control for voltage regulation of distribution network voltage regulation by distributed energy storage systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 2-8. DOI: 10.1186/s41601-018-0077-1.
- [17] TRIFONOV T O. Coordination of battery energy storage and power-to-gas in distribution systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 38(2): 2-8. DOI: 10.1186/s41601-017-0072-y.
- [18] 张谦, 廖清芬, 唐飞, 等. 计及分布式电源接入的配电网静态电压稳定性评估方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 42-48.
ZHANG Qian, LIAO Qingfen, TANG Fei, et al. Steady state voltage stability assessment method of distribution network considering inter-connection of distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 42-48.
- [19] KABIR M N, MISHRA Y, BANSAL R C. Probabilistic load flow for distribution systems with uncertain PV generation[J]. Applied Energy, 2016, 163: 343-351.
- [20] REDDY P D P, REDDY V C V, MANOHAR T G. Application of flower pollination algorithm for optimal placement and sizing of distributed generation in Distribution systems[J]. Journal of Electrical Systems and Information Technology, 2016, 3: 14-22.

收稿日期: 2018-08-03; 修回日期: 2018-09-25

作者简介:

葛维春(1961—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动化;

滕健伊(1993—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为分布式电源优化、新能源并网; E-mail: 447868081@qq.com

潘超(1981—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统稳定与仿真。

(编辑 魏小丽)