

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191493

计及风-光-荷时序特性的主动配电网源-储规划策略

张永会¹, 鹿丽², 潘超², 张亚谱², 罗远翔², 鲍峰¹

(1. 松花江水力发电有限公司吉林白山发电厂, 吉林 吉林 132012;

2. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 为提高风、光分布式电源在主动配电网中的渗透率, 计及风-光-荷时序相关特性提出主动配电网源-储规划策略。针对风、光分布式电源以及负荷的时序波动特性, 采用改进模糊 C 均值聚类算法合成风-光-荷时序全场景。综合考虑分布式电源渗透率、消纳水平、经济效益及电压偏差指标建立多目标规划模型。采用混沌粒子群算法进行求解, 引入适应度计算改善其全局寻优能力, 得到源-储多目标规划解集。通过对东北地区某 47 节点配电系统的仿真, 得到源-储多目标规划方案, 并根据电压累计概率密度对规划方案进行评价。结果验证了所提方法的正确性和可行性。

关键词: 风-光-荷时序特性; 消纳水平; 源-储规划; 时序全场景

Planning strategies of source-storage considering wind-photovoltaic-load time characteristics

ZHANG Yonghui¹, LU Li², PAN Chao², ZHANG Yapu², LUO Yuanxiang², BAO Feng¹

(1. Jilin Baishan Power Plant, Songhuajiang Hydropower Co., Ltd., Jilin 132012, China;

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

Abstract: In order to improve the permeability of wind turbines and photovoltaics in an active distribution network, an active distribution network source-storage planning strategy is proposed considering wind-photovoltaic-load timing characteristics. Aiming at the time series fluctuation characteristics of distributed generation and load, the improved fuzzy C-means clustering algorithm is used to synthesize the wind-photovoltaic-load time scenarios. A multi-objective planning model that comprehensively considers distributed generation permeability, consumption level, economy, and voltage stability indicators is established. To solve the multi-objective planning model, the chaotic particle swarm optimization algorithm is used to improve and optimize the global optimization ability by introducing a congestion degree calculation strategy and an elite retention strategy. By simulating a 47-node power distribution system in a certain area, a source-storage multi-objective planning strategy is obtained, and the optimization scheme is evaluated based on the cumulative voltage density. The results verify the correctness and feasibility of the proposed method.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900100).

Key words: wind-photovoltaic-load time characteristics; consumption level; source-storage planning strategy; time scenarios

0 引言

随着清洁型能源发电技术的快速发展, 高渗透风、光分布式电源(Distributed Generation, DG)接入主动配电网(Active Distribution Network, ADN)成为必然趋势^[1-3]。然而高渗透率风、光等分布式电源并

网具有较高的随机波动性, 会对主动配电网安全稳定运行造成一定的影响^[4]。如何应对风-光-荷时序波动特性产生的不确定性影响已经成为目前关注的焦点^[5]。储能装置(Energy Storage System, ESS)的并入可提高 ADN 运行稳定性^[6-7]。因此有针对性地对 ADN 源-储进行合理规划具有重要意义。

ADN 规划问题是目前国内外研究的热点。文献[8]建立 DG 收益最大、配网公司成本最小的双层规划模型, 采用改进布谷鸟算法进行求解, 得到最优配置方案, 但未考虑 DG 时序特性与 ESS 规划问题。

基金项目: 国家重点研发计划重点专项资助(2016YFB0900100); 常规水电站结合抽蓄、光伏、风电、电化学储能联合开发研究项目资助(525687200009)

文献[9]考虑时序场景建立 DG 接入容量的规划模型, 对 DG 出力进行规划, 但未考虑 ESS 导致电压稳定性较低。文献[10]针对 DG 和 ESS 协调优化, 以年综合费用最小为目标, 建立了主动配电网架三层规划模型, 但并未考虑 ADN 的时序场景。文献[11]考虑典型日下 DG 和 ESS 的经济调度, 提出了一种主动配电网规划-运行联合优化模型, 但时序场景较为单一。针对源-荷不确定性问题, 文献[12]采用拉丁超立方采样技术生成多场景, 建立了 ADN 的 DG 规划模型。文献[13]利用概率潮流模拟风光出力不确定性, 建立了 DG 和 ESS 多目标规划模型。已有研究获取 DG 时序出力和负荷时序场景, 通过组合排序生成 ADN 时序场景, 忽略了 DG 和负荷之间的时序关系, 导致在面对实际工程问题时存在一定局限性。

本文提出 ADN 源-储多目标规划问题, 从 DG 渗透率、消纳水平、经济效益以及电压偏差指标的角度出发, 建立多目标规划模型。根据改进模糊 C 均值聚类算法(Fuzzy C Means, FCM)对风-光-荷时序场景样本进行聚类, 并计算各时序场景概率, 合成 ADN 时序全场景。将 FCM 嵌入混沌粒子群算法(Chaos Particle Swarm Optimization, CPSO)中, 提出基于改进 FCM-CPSO 源-储多目标规划方法, 并引入适应度计算策略改善其全局寻优能力。对东北地区某 47 节点配电系统进行仿真计算, 考虑源-储规划对 ADN 经济稳定运行的改善作用, 研究多指标因素下源-储最佳规划方案, 并根据电压累计概率密度对规划结果进行评价。

1 ADN 数学模型

为了得到最优的 ADN 规划方案及保证配电网的安全可靠性, 有必要对负荷和接入 ADN 的 DG(风、光、储)出力特性进行研究。

1.1 光伏出力模型

光伏(Photovoltaic, PV)发电受到天气、光照强度、温度等很多因素的影响, 输出功率的时序特性受光照强度影响最大, 光伏电池输出功率^[14-15] $P_{PV}(t)$ 计算公式为

$$P_{PV}(t) = \begin{cases} P_{rs} \left(\frac{R(t)^2}{R_{STD} R_C} \right), & 0 \leq R(t) \leq R_C \\ P_{rs} \frac{R(t)}{R_{STD}}, & R_C \leq R(t) \leq R_{STD} \\ P_{rs}, & R_{STD} \leq R(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $R(t)$ 为 t 时刻的光照强度; R_{STD} 为标准太阳辐射(通常为 1000 W/m^2); R_C 为某个辐射点(通常为 150 W/m^2); P_{rs} 为光伏电池额定功率。

1.2 风电出力模型

风力(Wind Turbine, WT)发电输出功率的时序特性主要与风机安装处的不同时间段风速相关^[16], 其输出功率 $P_w(t)$ 计算公式为

$$P_w(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq v(t) < v_{in} \\ \left(\frac{v(t) - v_{in}}{v_r - v_{in}} \right) P_{rw}, & v_{in} \leq v(t) < v_r \\ P_{rw}, & v_r \leq v(t) < v_{out} \\ 0, & v(t) \geq v_{out} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_{rw} 为风机额定输出功率; $v(t)$ 为风速; v_r 为风轮机额定功率风速; v_{in} 为风轮机启动风速; v_{out} 为风轮机停机风速。

1.3 负荷模型

配电网中主要包括商业负荷、居民负荷、工业负荷三种主要负荷^[17], 由于每种负荷其用电需求都与时间相关, 相应计算公式可表示为

$$S_L(t) = \sum_{i=1}^N [\mu_{Li}(t) \cdot (P_{Li} + jQ_{Li})] \quad (3)$$

式中: P_{Li} 为节点 i 的负荷额定有功功率; Q_{Li} 为节点 i 的负荷额定无功功率; $\mu_{Li}(t)$ 为 t 时刻节点 i 的负载率。

1.4 储能装置充放电模型

储能装置的充放电功率主要由风电、光伏出力与负荷功率的差值 ΔP_{ESS} 决定^[18-19], 若 ΔP_{ESS} 大于 0, 储能装置处于充电状态; 若 ΔP_{ESS} 小于 0, 储能装置处于放电状态, 此种运行方式可充分利用风、光资源, 则 ΔP_{ESS} 在 t 时刻的计算公式为

$$\Delta P_{ESS}(t) = P_{PV}(t) + P_w(t) - P_L(t) \quad (4)$$

式中: $P_{PV}(t)$ 为 t 时刻 ADN 的光伏出力; $P_w(t)$ 为 t 时刻 ADN 的风电出力; $P_L(t)$ 为 t 时刻 ADN 负荷调用的 DG 功率。

计及储能装置最大充放电功率及容量约束的影响^[20-21], 储能装置充放电模型为

$$E_{ESS}(t) = E_{ESS}(t-1) + \lambda \Delta P_{ESS}(t-1) \quad (5)$$

式中: $E_{ESS}(t)$ 为 t 时刻储能装置的存储能量; λ 为储能装置充放电效率。

2 ADN 多目标规划模型

2.1 DG 渗透率指标

DG 渗透率计算公式为

$$f_1 = \frac{\sum_{i=1}^N P_{DG,i}}{\sum_{i=1}^N P_{L,i}} \quad (6)$$

式中： $P_{DG,i}$ 为节点*i*处分布式电源容量； $P_{L,i}$ 为节点*i*处负荷功率。分布式电源最大渗透率越高，规划水平越好，相应目标函数为 $\max(f_1)$ 。

2.2 经济效益指标

ADN 的运行成本费用计算公式为

$$C = C^{DG} + C^{ESS} + C^O \quad (7)$$

式中： C^{DG} 为 DG 投资运行费用； C^{ESS} 为储能装置投资运行费用； C^O 为网络运行费用。

1) DG 运行费用 C^{DG} 相应计算公式为

$$C^{DG} = \sum_{i=1}^N [S_i^{DG} \cdot c^I \cdot \lambda_{DG}] + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [S_i^{DG} \cdot c^M(t)] \quad (8)$$

式中： T 为调度的总时长； N 为节点的个数； S_i^{DG} 为节点*i*处的 DG 安装容量； c^I 为 DG 单位容量投资费用； λ_{DG} 为折算系数； c^M 为 DG 单位容量的维护费用。

2) 储能装置的运行费用 C^{ESS}

储能装置的运行费用 C^{ESS} 包括储能投资费用 C_E^I 和调用成本 C_E^C ，相应计算公式为

$$\begin{cases} C^{ESS} = C_E^I + C_E^C \\ C_E^I = \sum_{i=1}^N [c_E^I \cdot \lambda_{ESS} \cdot P_i^{ESS} + c_E^{el} \cdot \lambda_{ESS} \cdot E_i^{ESS}] + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N c_E^M(t) E_i^{ESS} \\ C_E^C = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [c_E^B P_{b,i}^{ESS}(t) + c_E^D P_{d,i}^{ESS}(t)] \end{cases} \quad (9)$$

式中： P_i^{ESS} 为安装节点*i*处的储能装置额定功率； C_E^I 为储能装置单位功率投资费用； λ_{ESS} 为折现率； E_i^{ESS} 为安装节点*i*处的储能装置额定容量； c_E^{el} 为储能装置单位容量投资费用； C_E^M 为储能单位容量的维护费用； c_E^B 为储能充电成本； $P_{b,i}^{ESS}$ 为储能装置充电功率； c_E^D 为储能放电成本； $P_{d,i}^{ESS}$ 为储能装置放电功率。

3) 网络运行费用 C^O

网络运行费用 C^O 主要包括电网的购电费用和网损费用，相应计算公式为

$$C^O = \sum_{t=1}^T c^P(t) S^P(t) + \sum_{t=1}^T c^L(t) P^L(t) \quad (10)$$

式中： c^P 为从电网中的购电单价； S^P 为从电网中的购电量； c^L 为网损成本； P^L 为网损。

AND 收益主要包括 DG 发电收益和政府补贴，

计算公式为

$$B = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [S_i^{DG} \cdot \eta_i \cdot b^s(t) + S_i^{DG} \cdot \eta_i \cdot b^A(t)] \quad (11)$$

式中： b^s 为 DG 单位容量发电收益； b^A 为 DG 单位容量的政府补贴； η_i 为 DG 节点*i*处的发电效率。

综合考虑 ADN 成本和收益建立经济效益指标

$$f_2 = \frac{B}{C} \quad (12)$$

式中： f_2 越大，表示 ADN 经济效益越好；反之越差，相应目标函数为 $\max(f_2)$ 。

2.3 电压偏差指标

随着分布式电源渗透率的提高，ADN 的电压质量会受到一定影响，甚至会造成电压越限，因此需要提高电压质量以满足 ADN 运行稳定性^[22]。采用电压偏差指标来描述电压稳定性，其计算公式为

$$f_3 = \sum_{m=1}^M \eta_m \left[\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T |V_{i,t}^m - V_N|}{T \cdot N} \right] \quad (13)$$

式中： M 为场景个数； $V_{i,t}^m$ 为场景*m*下*t*时刻节点*i*的电压值； V_N 为基准电压； η_m 为场景*m*发生的概率。 f_3 越小，表示 ADN 电压越稳定，反之越差，相应目标函数为 $\min(f_3)$ 。

2.4 风、光消纳指标

消纳指标亦是影响 ADN 规划的主要原因之一^[23]。以弃风光电量作为衡量消纳水平的指标，相应计算公式为

$$f_4 = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [S_i^{DG}(t) - S_i^{DG'}(t)]}{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [S_i^{DG}(t)]} \quad (14)$$

式中： S_i^{DG} 、 $S_i^{DG'}$ 分别为时段*t*时节点*i*处的分布式电源最大可调用功率及弃风光功率。其中 f_4 越大，表示 ADN 弃风、弃光量越小，消纳水平越好；反之越差，相应目标函数为 $\min(f_4)$ 。

2.5 约束条件

1) 等式约束

对于含分布式电源的节点，功率平衡方程为

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Li} - \Delta P_i - U_i \sum_{j \neq k} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_{Gi} - Q_{Li} - \Delta Q_i - U_i \sum_{j \neq k} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中： P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别为节点*i*的有功和无功率；

P_{Li} 、 Q_{Li} 分别为节点 i 的有功负荷和无功负荷; ΔP_i 、 ΔQ_i 分别为节点 i 分布式电源的有功和无功变化; U_i 为节点 i 的电压; G_{ij} 、 B_{ij} 、 θ_{ij} 分别为节点 i 和 j 之间的电导、电纳和相角差。

2) 不等式约束

$$\begin{cases} U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \\ P_{ESS,\min} \leq P_{ESS} \leq P_{ESS,\max} \\ E_{ESS,\min} \leq E_{ESS} \leq E_{ESS,\max} \end{cases} \quad (16)$$

式中: U_i^{\min} 为节点 i 处的电压下限; U_i^{\max} 为节点 i 处的电压上限; $P_{ESS,\min}$ 、 $P_{ESS,\max}$ 分别为储能额定功率的最小值和最大值; $E_{ESS,\min}$ 、 $E_{ESS,\max}$ 分别为储能额定容量的最小值和最大值。

3 基于改进 FCM-CPSO 的优化方法

改进 FCM-CPSO 优化方法是由改进模糊 C 均值聚类算法和基于混沌序列优化的混沌粒子群算法构成。

3.1 FCM 聚类算法

对于研究的 ADN, 设 n 个等时间段的风-光-荷采样数据集可表示为

$$X = [X_1 \ X_2 \ \dots \ X_n] = \begin{bmatrix} x_{w,1} & x_{w,2} & \dots & x_{w,n} \\ x_{PV,1} & x_{PV,2} & \dots & x_{PV,n} \\ x_{L,1} & x_{L,2} & \dots & x_{L,n} \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中: $k=1,2,3,\dots,L$; n ; $x_{w,k}$ 为 k 时段风电出力样本; $x_{PV,k}$ 为 k 时段光伏出力样本; $x_{L,k}$ 为 k 时段负荷功率率样本。

在约束范围内, 假设风-光-荷样本集被划分为 M 个场景, 并生成 M 个初始聚类中心。

$$Z_m^{(1)} = [Z_{w,m}^{(1)}, Z_{PV,m}^{(1)}, Z_{L,m}^{(1)}] = [x_{w,k}, x_{PV,k}, x_{L,k}]^T \quad (18)$$

式中: $m=1,2,3,\dots,M$; $Z_m^{(1)}$ 为初始聚类中心。

任意样本 X_k 到第 m 个初始聚类中心的欧式距离用 D_{km} 表示, 其计算公式为

$$D_{km} = \sqrt{(x_{w,k} - Z_{w,m}^{(1)})^2 + (x_{PV,k} - Z_{PV,m}^{(1)})^2 + (x_{L,k} - Z_{L,m}^{(1)})^2} \quad (19)$$

任意样本 X_k 隶属于第 m 个初始聚类中心的程度, 可用隶属度 ρ_{km} 表示, ρ_{km} 越大说明聚类结果越好, 其计算公式为

$$\rho_{km} = \left[\sum_{i=1}^M \left(\frac{D_{ki}}{D_{km}} \right)^2 \right]^{-1} \quad (20)$$

假设第 m 个聚类中心中包含的原始风-光-荷样本数为 n_a , 其场景的概率用 p_m 表示, 即 ADN 时序全场景包含 m 种概率为 p_m 的风-光-荷时序场景,

p_m 计算公式为

$$p_m = n_a / n \quad (21)$$

FCM 算法的基本步骤如下:

1) 输入风-光-荷时序样本集, 给定最佳聚类数 M , 并从样本集随机生成 M 个初始聚类中心 $Z_m^{(1)}$ 。

2) 计算各个样本到 $Z_m^{(1)}$ 的欧式距离及隶属度, 并根据 ρ_{km} 的大小对样本进行分类, 完成第一次聚类划分。

3) 计算新的聚类中心 $Z_m^{(2)}$, 并以 $Z_m^{(2)}$ 作为下次迭代的初始聚类中心。

4) 重复步骤 2)、3) 直至聚类结果不再发生变化, 并计算所对应场景的概率, 生成 ADN 时序全场景, 在此基础上进行潮流计算。

3.2 改进 CPSO 优化算法

针对传统粒子群优化算法中, 随机性的粒子初始化和进化阶段导致的局部寻优问题, 通过混沌序列重新对粒子的最初位置和速度进行设置, 对粒子群多样性进行优化^[24]。混沌粒子群算法的粒子速度、位置公式为

$$v_{gw}^{s+1} = \omega v_{gw}^s + c_1 r_1 (p_{gw}^s - x^s) + c_2 r_2 (g_{gw}^s - x^s) \quad (22)$$

$$x_{gw}^{s+1} = v_{gw}^s + x_{gw}^s \quad (23)$$

式中: v_{gw}^s 为粒子 q 在第 s 次迭代中第 w 维的速度; ω 为惯性权重; c_1 、 c_2 为学习因子; r_1 、 r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机数; x_{gw}^s 为粒子 q 在第 s 次迭代中第 w 维的位置; p_{gw}^s 为粒子 q 在第 w 维的个体极值点的位置; g_{gw}^s 为整个群体在第 w 维的全局极值点的位置。

采用 Logistic 映射模型生成混沌序列^[25], 其表达式为

$$L_{gw}^s = \gamma \cdot L_{gw}^{s-1} \cdot (1 - L_{gw}^{s-1}) \quad (24)$$

式中: γ 为控制参数; L_{gw}^s 为混沌变量。

将混沌变量 L_{gw}^s 转换成决策变量 x_{gw}^s , 其表达式为

$$x_{gw}^s = l_{gw} + h_{gw} L_{gw}^s \quad (25)$$

式中, $[l_{gw}, h_{gw}]$ 为 x_{gw}^s 的取值范围。

基于改进 FCM-CPSO 的优化方法的流程图见图 1。根据 ADN 数学模型与风-光-荷输入变量, 利用 FCM 聚类形成风-光-荷时序全场景, 并在全场景对 ADN 进行潮流计算。在保证多样解的前提下, 引入适应度计算策略最大程度地提升 CPSO 的收敛速度以及全局寻优能力, 利用改进的 CPSO 对 ADN 进行多目标优化, 最终得到最优规划方案 pareto 解集。

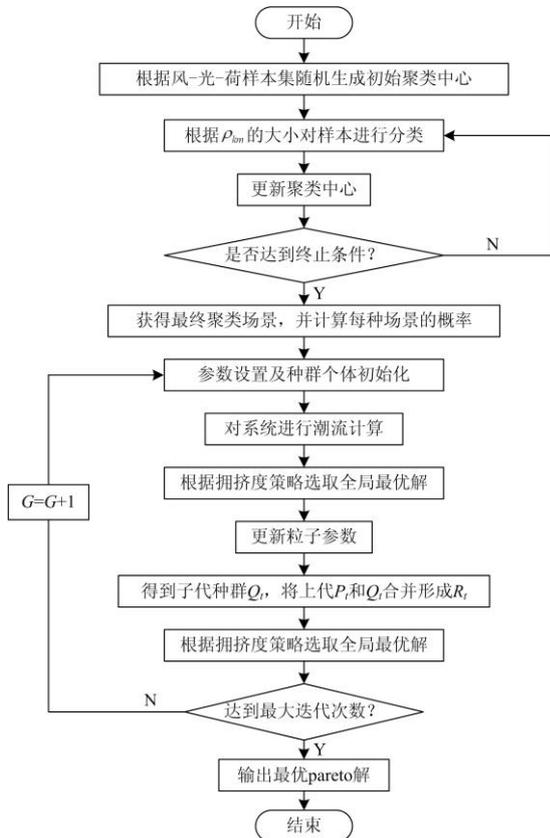


图 1 ADN 多目标规划流程图
Fig. 1 Multi-objective process of ADN

4 算例分析

以东北地区某 47 节点的配电系统为研究对象, 系统基准功率为 10 MVA, 基准电压为 10 kV, 总负荷为 71.423 MW+j40.865 Mvar, 系统结构如图 2 所示。采用本文方法进行优化计算, 改进 FCM-CPSO 的优化算法的种群粒子数目为 100, 最大迭代次数为 200。

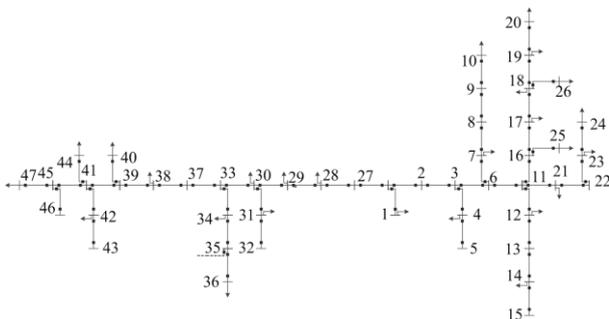


图 2 IEEE-47 节点配电系统
Fig. 2 IEEE 47 node distribution network

根据 ADN 数学模型, 将该地区全年中每个小时的风速、光照强度以及负载率转化为风、光、负荷功率数据, 得到 8 760 组原始风-光-荷时序场景。

根据改进 FCM 聚类算法对风-光-荷场景进行聚类, 结合该地区配电系统运行特点, 将系统潮流按照风-光-荷功率波动情况分为 30 类, 统计其发生概率进行排序, 通过随机抽样→筛选→更新的步骤确定典型场景, 结果如图 3 所示。

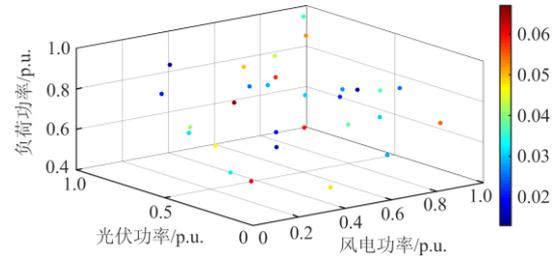


图 3 风-光-荷时序场景

Fig. 3 Wind-photo-load time scenarios

图 3 中, 各负荷节点功率波动范围为[0.5,1.0] p.u., 风光功率波动范围为[0,1.0] p.u., 其中风-光电源 0 出力场景的发生概率为 0.061, 对应负荷功率为 0.62 p.u.; 风-光电源 80%以上出力场景的累积概率为 0.165。表明风-光功率波动较大, 未添加储能单元时新能源在该配电系统中的消纳水平较低。风-光-荷功率变化与发生概率见表 1。

表 1 风-光-荷时序场景分类

Table 1 Wind-photo-load time scenarios classification

场景	负荷功率/p.u.	风电功率/p.u.	光伏功率/p.u.	概率
1	0.616 8	0.01	0	0.061
2	0.730 5	0.008	0.82	0.055
3	0.758 8	0.99	0.72	0.05
4	0.594 9	0.98	0.67	0.067
5	0.831 7	0.009	0.23	0.06
6	0.676 5	0.993	0.86	0.058
7	0.856 3	0.99	0.99	0.052
8	0.509 3	0.019 2	0.35	0.048
9	0.667 5	0.368	0.12	0.046
10	0.509 3	0.995	0.49	0.041
11	0.693 7	0.268	0.62	0.038
12	0.943 4	0.012	0.562	0.037
13	0.801 1	0.905	0.821	0.035
14	0.758 4	0.136	0.654	0.03
15	0.616 4	0.153	0.02	0.032
16	0.747 7	0.382	0.015	0.031
17	0.526 2	0.226	0.756	0.028
18	0.826 8	0.268	0.843	0.025
19	0.766 7	0.717	0.615	0.029
20	0.917 2	0.166	0.516	0.027
21	0.929 9	0.365	0.265	0.025
22	0.650 6	0.698	0.913	0.021
23	0.756 2	0.863	0.265	0.02
24	0.638 4	0.818	0.854 6	0.03
25	0.530 4	0.707	0.642	0.018
26	0.913 4	0.7	0.632	0.043
27	0.899 5	0.848	0.289	0.013
28	0.544 1	0.506	0.49	0.016
29	0.698 2	0.467	0.873	0.012
30	0.799 5	0.4	0.76	0.015

DG 类型主要包括 WT 和 PV, 渗透率上限为 50%, 其经济效益参数^[26-27]如表 2 所示。

计算负荷节点网损灵敏度^[28], 确定 DG 最佳并网位置及初始容量, 结果如表 3 所示。

表 2 DG 投资效益相关参数

相关参数	WT	PV
单位容量成本/(万元/kW)	1.03	2.17
维护成本/(元/kW)	0.032	0.103
容量系数	0.35	0.29
折算系数	0.100 6	0.085 3
发电效益/(元/kW)	0.55	0.25
政府补贴/(元/kW)	0.55	0.25

表 3 源-储并网节点与初始容量

方案	配置节点(容量)			电压偏差 指标 f_3 /p.u.
	WT/MW	PV/MW	ESS/MWh	
case 1	—	—	—	0.058 7
case 2	11(8)	38(1.5)	—	0.046 5
case 3	11(8)	38(1.5)	21(1)	0.040 2

表 3 中, case1 表示 DG 未网网的配置方案, case2 表示 DG 并网但未考虑储能的配置方案, case3 表示 DG 并网并加入储能的配置方案。不难看出, DG 并网位置与储能安装节点基本一致, 从而保证传输功率的损耗最小, 从而降低了线路的电压跌落。不同方案电压分布水平如图 4 所示。

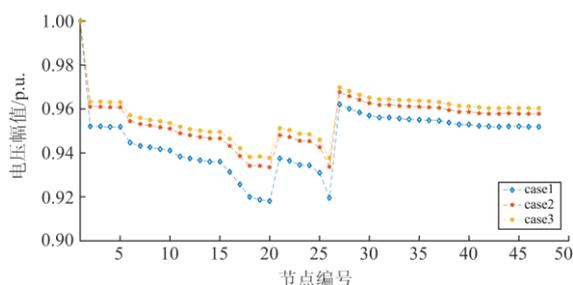


图 4 全场景下不同方案电压分布水平

Fig. 4 Voltage distribution level under different schemes

图 4 中 case2、case3 与 case1 相比, f_3 分别提高了 20.7% 和 31.5%, 表明源-储接入能够改善 ADN 的电压分布水平并提高电压稳定性, 在此基础上对 ADN 源-储进行多目标规划。

4.1 计及时序场景的 DG 多目标规划

计及风-光-荷时序全场景, 综合考虑 DG 渗透率、经济效益以及电压稳定性进行 DG 多目标规划, 其 pareto 解集如图 5 所示。

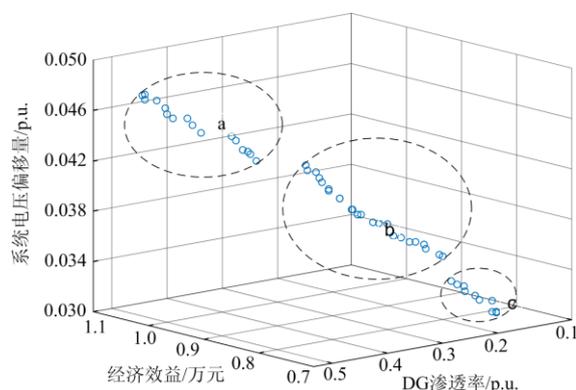


图 5 DG 规划 pareto 解分布

Fig. 5 Pareto solution of DG optimization

图 5 中 pareto 解集分布较均匀, 说明本文方法具有较好的全局搜索能力, 能够从多角度提供多样的规划方案。pareto 解集可划分为 3 个区域: 区域 a 的解集表现为 DG 渗透率较高, 经济效益较高, 但电压稳定性比较低; 区域 c 解集则表现为 DG 渗透率较低, 经济效益较低, 但电压稳定性比较高; 区域 b 的解集表示优化目标结果介于 a、c 区域之间。

从 pareto 解集选取 3 种典型的规划方案进行比较分析, 结果如表 4 所示。表 4 中, f_2 为收益和成本的比值。

表 4 典型 DG 规划方案

方案	容量/MW		评价指标		
	WT	PV	f_2	f_1 /p.u.	f_3 /p.u.
1	13.17	5.89	0.823	0.266	0.034 1
2	21.46	6.53	0.975	0.392	0.041 6
3	25.46	9.17	1.039	0.467	0.048 2
4	21.32	8.11	0.968	0.412	0.039 2
5	21.32	8.11	0.917	0.412	0.043 7

表 4 中, 方案 4 表示负荷功率、风电功率以及光伏功率分别为 0.8 p.u.、0.9 p.u. 和 0.82 p.u. 的场景下 DG 配置方案, 方案 5 表示方案 4 在全场景运行时各指标情况。方案 1 电压稳定性较高, 经济效益较低, DG 渗透率较低; 方案 3 电压稳定性较低, 经济效益较高, DG 渗透率较高; 方案 2 综合考虑了以上三种指标, 且 DG 渗透率处于较高水平。方案 4 的三种指标相对较优, 但其应用于全场景时, 经济效益和电压稳定性明显降低, 说明本文提出的计及风-光-荷时序全场景的多目标规划策略规划适用性强。

4.2 ESS 多目标规划

在不同 DG 渗透率下, 分别从电压稳定性、消纳水平及经济效益的角度研究 ESS 容量对 ADN 规

划方案的影响。

图 6 中 ESS 未安装时, f_3 指标较大; 在一定 DG 渗透率条件下, ESS 容量越大, 系统电压越稳定, 说明 ESS 并网能够改善电压稳定性。

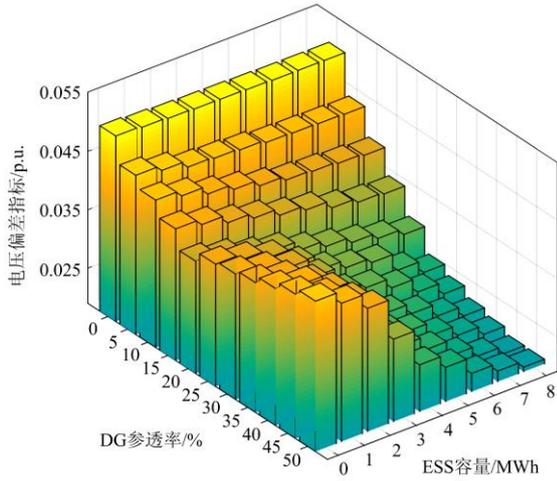


图 6 ESS 对电压稳定性的影响

Fig. 6 Analysis results of ESS impact on voltage stability

图 7 中 ESS 未安装时, DG 在系统中消纳水平较低; 在一定 DG 渗透率条件下, ESS 容量越大, f_4 越大, 说明 ESS 并网能够提高新能源消纳水平。

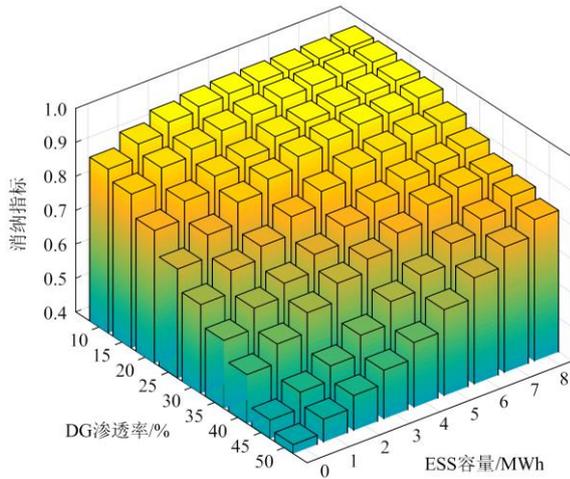


图 7 ESS 对消纳水平的影响

Fig. 7 Analysis results of ESS impact on consumption

图 8 中, 在 DG 渗透率较低条件下, ESS 容量越大, ADN 经济效益越小, 说明过大的 ESS 会加重投资成本, 从而降低 ADN 经济效益。在 DG 渗透率较高的条件下, 随着 ESS 容量增大, ADN 经济效益达到最佳, 说明容量过小的 ESS 无法提供理想的经济效益。

综上, 小容量 ESS 无法提供最佳经济效益; 大

容量 ESS 并网能够提高电压稳定性和新能源消纳水平, 但 ESS 容量过大会加重投资成本, 进而降低经济效益。因此, 在 4.1 节 DG 待优选规划方案的基础上, 综合考虑电压稳定性、消纳水平和经济效益三方面因素对 ESS 进行规划, 结果如表 5 所示。

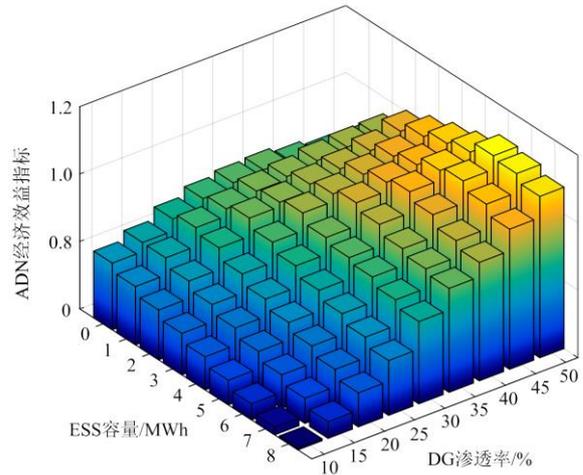


图 8 ESS 对 ADN 经济效益的影响

Fig. 8 Analysis results of ESS impact on cost-effectiveness

表 5 ESS 规划方案

Table 5 ESS planning scheme

方案	配置节点(容量/MWh)	f_2	f_4 /p.u.	f_3 /p.u.
1	21 (3.52)	0.931	0.805	0.028 1
2	21 (4.61)	1.097	0.802	0.029 7
3	21 (7.25)	1.159	0.799	0.027 1

表 5 中, 3 种方案新能源消纳指标 f_4 处于同一水平, 因此从经济效益和电压稳定的角度考虑规划方案。对比表 3 和表 4 可知, 方案 1 中 f_2 及 f_3 分别提高 13% 和 21%; 方案 2 中 f_2 及 f_3 分别提高 12.5% 和 28%; 方案 3 中 f_2 及 f_3 分别提高 11.5% 和 30%, 且方案 3 的 DG 渗透率最大, 经济效益及电压稳定性最好。综合考虑以上因素, ADN 源-储规划方案最终选择方案 3。

4.3 源-储规划方案评价

在时序全场景下对源-储优化规划的 ADN 进行潮流计算, 选取典型节点的电压幅值累计概率密度分布如图 9 所示。

由图 9 可知, 由于 ADN 时序特性的影响, 系统电压会发生较大变化, 甚至会出现电压越限的情况, 23 节点处接入了 PV 导致该节点电压波动性强于 40 节点。结果表明, 在计及时序场景进行源-储规划后, 23、40 节点的电压波动性显著降低, 且 ADN 节点电压均满足运行要求。

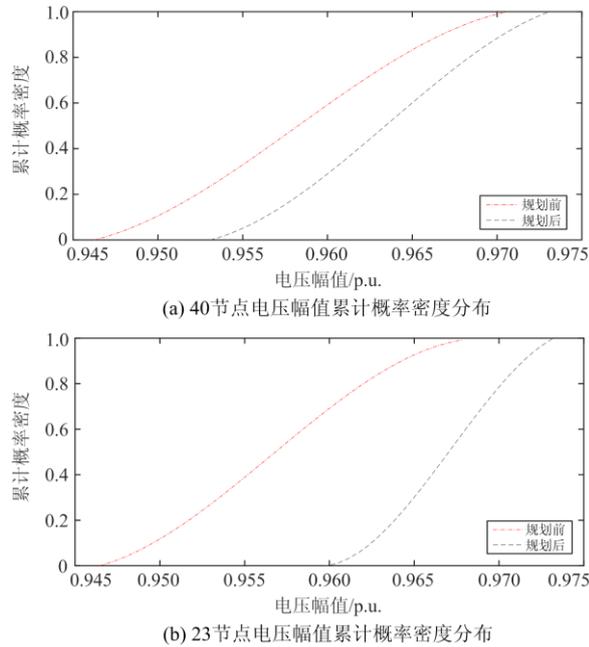


图9 ADN部分节点电压幅值累积概率密度分布

Fig. 9 Voltage accumulative probability distribution of some ADN nodes

5 结论

考虑风-光-荷时序全场景, 采用改进 FCM-CPSO 算法对 ADN 源-储进行多目标规划, 得到以下结论:

1) 采用改进 FCM 算法合成的风-光-荷时序全场景能有效地反映 DG 并入 ADN 的时序特性, 所得到的规划方案具有较强的适用性。

2) 源-储多目标规划模型综合考虑了稳定性、经济性、新能源渗透率及消纳水平, 通过 FCM-CPSO 求解避免局部寻优, 提高可行解集的多样性, 便于运行人员从不同角度制定最佳配置方案。

3) 从概率角度评价规划方案的电压水平, 表明本文所采用的源-储规划方法能保证 DG 并入 ADN 的电压稳定性, 同时在运行经济性和风电消纳方面有一定改善。

参考文献

[1] WU Wei, GUO Nian, DENG Zhimin, et al. Analysis of influence of distributed power supply on distribution network voltage considering permeability[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 227(3).

[2] 赵勇强, CHOU E, 刘坚. 促进系统灵活性和可再生能源消纳的电力市场体系[J]. 中国能源, 2019, 41(1): 19-24, 32.

ZHAO Yongqiang, CHOU E, LIU Jian. Electricity

market system that promotes system flexibility and renewable energy consumption[J]. Energy of China, 2019, 41(1): 19-24, 32.

[3] 马帅, 武志刚, 高厚磊, 等. 适配高渗透率 DG 接入配电网的幅值比较式保护[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 43-50.

MA Shuai, WU Zhigang, GAO Houlei, et al. Amplitude comparison protection for distribution network with high permeability distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 43-50.

[4] LANNOYE E, FLYNN D, O'MALLEY M. Evaluation of power system flexibility[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 922-931.

[5] ZHAO Yongliang, FAN Peipei, WANG Chaoyang, et al. Fatigue lifetime assessment on a high-pressure heater in supercritical coal-fired power plants during transient processes of operational flexibility regulation[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 156.

[6] ALI Z, SHAHRAM J, ASHKAN R K. A fuzzy environmental technical economic model for distributed generation planning[J]. Energy, 2011, 36(3): 3437-3445.

[7] GAO Y, XUE F, YANG W, et al. Optimal operation modes of photovoltaic-battery energy storage system based power plants considering typical scenarios[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 397-406. DOI: 10.1186/s41601-017-0066-9.

[8] 张爱祥, 宋士瞻, 王传勇, 等. 计及电能质量治理设备和不同主体利益的主动配电网规划[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(2): 113-118, 153.

ZHANG Aixiang, SONG Shizhan, WANG Chuanyong, et al. Plan of active distribution network considering power quality control equipment and interest of different subjects[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(2): 113-118, 153.

[9] 徐笑, 李志铿, 杨海森, 等. 主动配电网可靠性规划[J]. 电气自动化, 2018, 40(6): 67-70.

XU Xiao, LI Zhikeng, YANG Haisen, et al. Reliability planning of active distribution networks[J]. Power System & Automation, 2018, 40(6): 67-70.

[10] MA J, SILVA V, BELHOMME R, et al. Evaluating and planning flexibility in sustainable power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1): 200-209.

[11] 沈欣炜, 朱守真, 郑竞宏, 等. 考虑分布式电源及储能配合的主动配电网规划-运行联合优化[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 913-920.

SHEN Xinwei, ZHU Shouzhen, ZHENG Jinghong, et al. Active distribution network planning-operation co-optimization considering the coordination of ESS and DG[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 913-920.

[12] 唐念, 夏明超, 肖伟栋, 等. 考虑多种分布式电源及其随机特性的配电网多目标扩展规划[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 45-52.

- TANG Nian, XIA Mingchao, XIAO Weidong, et al. Multi-objective planning of active distribution systems considering distributed generator types and uncertainties[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 45-52.
- [13] 张沈习, 袁加妍, 程浩忠, 等. 主动配电网中考虑需求侧管理和网络重构的分布式电源规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(增刊 1): 1-9.
- ZHANG Shenxi, YUAN Jiayan, CHENG Haozhong, et al. Optimal distributed generation planning in active distribution network considering demand side management and network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(S1): 1-9.
- [14] 晁颖, 金焯, 朱晶亮, 等. 考虑光伏发电出力不确定性的年度最大负荷概率预测[J]. 广东电力, 2018, 31(9): 83-89.
- CHAO Ying, JIN Ye, ZHU Jingliang, et al. Annual maximum load probability prediction considering the uncertainty of photovoltaic power output[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(9): 83-89.
- [15] 张高航, 李凤婷, 周强, 等. 考虑风电并网友好性的日前分层调度计划模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 118-124.
- ZHANG Gaohang, LI Fengting, ZHOU Qiang, et al. Day-ahead hierarchical dispatching model considering friendliness of wind power[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 118-124.
- [16] LI Zhechao, WANG Shaorong, ZHOU Yichen, et al. Optimal distribution systems operation in the presence of wind power by coordinating network reconfiguration and demand response[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2020, 119.
- [17] SARDI J, MITHULANANTHAN N, GALLAGHER M, et al. Multiple community energy storage planning in distribution networks using a cost-benefit analysis[J]. Applied Energy, 2017, 190: 453-463.
- [18] XIE Yunyun, LIU Lin, WU Qiwei, et al. Robust model predictive control based voltage regulation method for a distribution system with renewable energy sources and energy storage systems[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2020, 118.
- [19] 李建林, 郭斌琪, 牛萌, 等. 风光储系统储能容量优化配置策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(6): 1189-1196.
- LI Jianlin, GUO Binqi, NIU Meng, et al. Optimal configuration strategy of energy storage capacity in wind/PV/storage hybrid system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(6): 1189-1196.
- [20] 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(1): 35-42. DOI: 10.1186/s41601-018-0077-1.
- [21] 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.
- [22] ELATTAR E E, ELSAYED S K. Probabilistic energy management with emission of renewable micro-grids including storage devices based on efficient SALP swarm algorithm[J]. Renewable Energy, 2020, 153.
- [23] 郑权国, 陈彦秀, 周任军, 等. 调峰补偿热机组及风电消纳能力的优化模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(1): 51-57.
- ZHENG Quanguo, CHEN Yanxiu, ZHOU Renjun, et al. Optimization model for CHP unit with peak load compensation and wind power accommodation capacity[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(1): 51-57.
- [24] 公茂法, 柳岩妮, 王来河, 等. 基于混沌优化粒子群 BP 神经网络的电力变压器故障诊断[J]. 电测与仪表, 2016, 53(15): 13-16.
- GONG Maofa, LIU Yanni, WANG Laihe, et al. Fault diagnosis of power transformers based on chaos particle swarm optimization BP neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(15): 13-16.
- [25] FENG Shoubo, REN Weijie, HAN Min, et al. Robust manifold broad learning system for large-scale noisy chaotic time series prediction: a perturbation perspective[J]. Neural Networks: the Official Journal of the International Neural Network Society, 2019, 117.
- [26] BHATTACHARYYA B, GOSWAMI S K, BANSAL R C. Loss sensitivity approach in evolutionary algorithms for reactive power planning[J]. Electric Power Components and Systems, 2009, 37(3).
- [27] 刘源, 杨军, 杨丙权, 等. 考虑“风-光-荷-储”联合运行的配电网双层规划方法[J]. 电力建设, 2017, 38(11): 87-96.
- LIU Yuan, YANG Jun, YANG Bingquan, et al. Bi-level planning method for distribution network with “WT-PV-Load-ESS”[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(11): 87-96.
- [28] 王宁. 直流配电网的分布式电源及储能优化配置研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- WANG Ning. Research on distributed generation and energy storage optimization configuration of DC distribution network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.

收稿日期: 2019-12-02; 修回日期: 2020-04-03

作者简介:

张永会(1975—), 男, 学士, 高级工程师, 研究方向为可再生能源电源并网规划;

鹿丽(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为主动配电网优化运行. E-mail: 342100842@qq.com

(编辑 周金梅)