



武晓朦, 时政, 付子义, 等. 基于密度峰值快速搜索聚类的多场景分布式电源规划[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2022, 41(2): 117-123. doi: 10.16186/j.cnki.1673-9787.2021020017

WU X M, SHI Z, FU Z Y, et al. Multi-scene distributed generation planning based on clustering by fast search and find of density peak[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2022, 41(2): 117-123. doi: 10.16186/j.cnki.1673-9787.2021020017

基于密度峰值快速搜索聚类的多场景分布式电源规划

武晓朦¹, 时政¹, 付子义², 刘欣雨³, 党建¹, 李飞¹

(1. 西安石油大学 陕西省油气井测控技术重点实验室 陕西 西安 710065; 2. 河南理工大学 电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000; 3. 中国石油集团安全环保技术研究院 大连分院 辽宁 大连 116031)

摘要: 针对间歇性分布式电源出力的随机性、负荷需求的不确定性以及分布式电源与负荷之间存在相关性的问题, 采用拉丁超立方抽样并结合 Spearman 秩相关系数的 Cholesky 分解, 得到分布式电源具有相关性的出力与负荷需求样本。通过密度峰值快速搜索聚类算法对相关样本进行有效削减得到典型场景, 以分布式电源投资运行费用和配电网向上级电网购电费用最小为优化目标, 建立分布式电源多目标规划模型。最后通过二阶锥松弛将规划模型转化为混合整数二阶锥规划问题, 并调用 Cplex 求解器对规划模型求解。IEEE 33 节点算例结果验证了所提模型的合理性。

关键词: 分布式电源规划; Spearman 秩相关系数; 密度峰值快速搜索聚类; 二阶锥规划

中图分类号: TM715

文献标志码: A

文章编号: 1673-9787(2022)2-117-7

Multi-scene distributed generation planning based on clustering by fast search and find of density peak

WU Xiaomeng¹, SHI Zheng¹, FU Ziyi², LIU Xinyu³, DANG Jian¹, LI Fei¹

(1. Key Laboratory of Measurement and Control Technique of Oil and Gas Well of Shaanxi Province, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China; 3. Dalian Branch, China National Petroleum Corporation Research Institute of Safety & Environment Technology, Dalian 116031, Liaoning, China)

Abstract: Aiming at the problems of the randomness of intermittent distributed generation output, the uncertainty of load demand, and the correlation between distributed generation and load, Latin hypercube sampling and Cholesky decomposition combined with Spearman rank correlation coefficient were used to obtain an output and demand load relevant sample of distributed generation. The relevant sample was reduced by the algorithm of clustering by fast search and find of density peak (CFSFDP) to obtain typical scenes. The multi-objective distributed generation planning model was established with the optimization goal to minimize the investment and operation cost of the distributed generation and the power purchase cost of the superior grid. The programming model was transformed into a mixed-integer second-order cone programming (SOCP) problem through second-order cone relaxation, and the Cplex solver was called to solve the programming model. The results of IEEE 33-

收稿日期: 2021-02-04 修回日期: 2021-03-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U20B2029); 陕西省科技计划基础研究项目(2021JM-404); 陕西省重点实验室科研计划项目(18JS094); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2020JM-542); 西安石油大学研究生创新与实践能力的培养项目(YCS19141005)

第一作者简介: 武晓朦(1974—), 女, 陕西华县人, 博士, 教授, 主要从事配电网自动化方面的教学和研究工作。E-mail: xmwudz@xssyu.edu.cn

bus distribution network were applied to verify the rationality of the proposed model and method.

Key words: distributed generation planning model; Spearman rank correlation coefficient; clustering by fast search and find of density peak; second - order cone programming

0 引言

随着新能源技术的快速发展,大规模间歇性分布式电源接入配电网,对配电网规划、运行与控制产生不同程度影响^[1],分布式电源(distributed generation, DG)出力与负荷需求的不确定性和相关性使配电网运行状态更加复杂多变^[2-3]。因此,在面临更多更复杂不确定性因素的新环境下,对DG进行合理规划具有重要的现实意义。

目前,国内外学者已经对配电网中的DG规划展开一系列研究。唐念等^[4]利用多状态系统理论得到DG输出功率状态,利用粒子群算法求解配电网多目标扩展模型;李亮等^[5]建立考虑网损和缺电损失最小的DG多目标规划模型,由气象资料统计得到各时序场景权重,通过遗传算法求解;王金凤等^[6]采用Monte-Carlo方法模拟停电损失,通过结合小生境技术和NSGA-II的多目标粒子群算法优化求解所建立考虑风电投资运行成本、网损和停电损失费用的多目标DG规划模型。

启发式智能算法通用性强,在配电网规划中得到广泛应用,如粒子群算法^[4]、遗传算法^[5]和模拟退火算法^[7]等。但启发式智能算法求解时采取贪婪策略(在每次迭代中保留当前最优值)易陷入局部最优解^[8],当求解问题规模增加时计算效率和收敛性都受到影响。对此,本文在求解算法方面,将支路潮流方程引入规划模型,通过二阶锥松弛将支路潮流约束松弛为一个线性方程组和二阶锥组合。将规划模型转化为混合整数二阶锥规划问题,并通过Yalmip调用Cplex求解器对规划模型求解。

密度峰值快速搜索聚类算法(clustering by fast search and find of density peaks, CFSFDP)是由Alex Rodriguez等在《Science》发表的一种高效聚类算法,相较于其他聚类算法,可以自动确定任意形状数据集的簇类中心,不需迭代计算,广泛应用于数据挖掘、图像分类等多个领域,但目前在配电网规划领域尚未有文献分析和应用。

1 分布式电源及负荷需求数学模型

1.1 风电模型

一般使用威布尔分布函数拟合风速分布^[9],

其概率密度函数如式(1)所示。风机输出的有功功率与风速有关,可近似用式(2)表示。

$$f(v) = \frac{k_n}{c_n} \left(\frac{v}{c_n}\right)^{k_n-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c_n}\right)^{k_n}\right), \quad (1)$$

$$P_{wt} = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_i \text{ 或 } v_{out} < v \\ P_{rwt} \frac{v - v_i}{v_r - v_i} & v_i < v \leq v_r \\ P_r & v_r < v \leq v_{out} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: k_n 为形状参数; c_n 为尺度参数; P_{wt} 为风电机组输出功率; P_{rwt} 为风电机组额定功率; v_i 为切入风速; v_r 为额定风速; v_{out} 为切出风速。

1.2 光伏发电模型

光照强度一般服从Beta分布^[10-12],其概率密度函数如式(3)所示。光伏发电机组出力与光照强度有关,可用式(4)近似表示。

$$f(I) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma\alpha\Gamma\beta} \left(\frac{I}{I_{max}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{I}{I_{max}}\right)^{\beta-1}, \quad (3)$$

$$P_{pv} = \begin{cases} P_{rpv} \frac{I}{I_{max}}, & I \leq I_{max} \\ P_r, & I_{max} < I \end{cases}, \quad (4)$$

式中: I 为光照强度; I_{max} 为光照强度最大值; α 和 β 分别为Beta分布参数; Γ 为伽马函数; P_{pv} 为光伏发电机组的输出功率; P_{rpv} 为光伏发电机组的额定功率。

1.3 负荷需求模型

负荷需求一般服从正态分布^[13-15],如式(5)所示。

$$\begin{cases} P_{load\ i} \sim N(\mu_{p\ i}, \sigma_{p\ i}^2) \\ Q_{load\ i} \sim N(\mu_{q\ i}, \sigma_{q\ i}^2) \end{cases}, \quad (5)$$

式中: $P_{load\ i}$ 、 $\mu_{p\ i}$ 和 $\sigma_{p\ i}^2$ 分别为节点*i*负荷有功功率随机变量、期望值和方差; $Q_{load\ i}$ 、 $\mu_{q\ i}$ 和 $\sigma_{q\ i}^2$ 分别为节点*i*负荷无功功率随机变量、期望值和方差。

2 相关性样本处理

相关性样本由拉丁超立方抽样和结合Spearman秩相关系数的Cholesky分解经分层采样和相关性排序得到。相较于Person相关系数^[16],Spearman秩相关系数能刻画非正态分布随机变量之间的相关性,可用于描述风速、光照强度和负荷需求之间的相关性。某地区实际源荷样本

的 Spearman 秩相关系数 ρ_{obj} 由历史数据统计得到,其相关系数矩阵为

$$\rho_{obj} = \begin{bmatrix} 1 & -0.158 & -0.188 \\ -0.158 & 1 & 0.242 \\ -0.188 & 0.242 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.1 分层采样

设采样规模为 N_1 , 随机变量个数为 k 。随机变量 x_k 的概率密度函数如式(7)所示。

$$y_k = f_k(x_k) \quad (7)$$

首先,将区间 $[0, 1]$ 均分为 N_1 个独立的子区间,各子区间的概率为 $1/N_1$ 。然后,在各子区间内随机选取一个采样点 y_{ki} ($i=1, 2, \dots, N_1$)。最后,利用函数反变换(式(8))求出各区间采样点 x_{ki} , 得到采样值为 $k \times N_1$ 阶的初始采样矩阵 S_0 。

$$x_{ki} = f_k^{-1}(y_{ki}) \quad (8)$$

2.2 相关性排序

相关性排序的具体步骤为:

(1) 随机生成一个 $k \times N_1$ 阶的矩阵 M , M 的每行由正整数 $1, 2, \dots, N_1$ 随机排列组成, 计算矩阵 M 顺序矩阵 M_1 的 Spearman 秩相关系数矩阵 ρ_m 。

(2) 对秩相关系数矩阵 ρ_m 进行 Cholesky 分解, 如式(9)所示 Q 为下三角阵。由式(10)消除由于随机排列造成的相关性。

$$\rho_m = QQ^T \quad (9)$$

$$G = Q^{-1}M_1 \quad (10)$$

(3) 对实际秩相关系数 ρ_{obj} 进行 Cholesky 分解, 如式(11)所示 L 为下三角阵。由式(12)使得 G_{obj} 的秩相关系数与 ρ_{obj} 近似相等。

$$\rho_{obj} = LL^T \quad (11)$$

$$G_{obj} = LG \quad (12)$$

(4) 将初始采样矩阵 S_0 按照矩阵 G_{obj} 中元素排列顺序重新排序, 即得到 $k \times N_1$ 阶具有相关性的源荷样本。

3 基于 CFSFDP 算法的场景削减

CFSFDP 算法是一种根据样本密度有效确定簇类中心和个数的聚类算法, 适用于任何形状的数据^[17]。算法的核心思想是通过截断距离 d_c 引入局部密度 ρ_i 和到高局部密度点距离 δ_i , 从而确定簇类中心和个数, 剩余数据分配至距离最近且局部密度较大数据所在的簇类。该聚类算法有两个特点: 簇中心的局部密度大于周围其他数据点的局部密度; 不同簇中心之间的距离相对较远。

CFSFDP 算法的具体步骤为:

(1) 样本数据集中的数据依次两两计算其距离。

(2) 将步骤(1)得到的距离按升序依次排列, 设置截断距离 d_c 为距离集合中前 1% ~ 2% 的距离值。

(3) 由截断距离 d_c 按式(13)或(14)和(15)计算局部密度 ρ_i , m 为数据点个数, d_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的距离。

$$\rho_i = \sum_{j=1}^m e^{-\left(\frac{d_{ij}}{d_c}\right)^2} \quad (13)$$

$$\rho_i = \sum_{j=1}^m \chi(d_{ij} - d_c) \quad (14)$$

$$\chi(x) = \begin{cases} 1 & x < 0 \\ 0 & x > 0 \end{cases} \quad (15)$$

(4) 计算任意数据点到高局部密度点距离 δ_i 。

(5) 以 ρ_i 为横坐标, δ_i 为纵坐标, 画出决策图, 将右上方纵横坐标值均较大的数据点选择为簇类中心点; 若无法通过主观判断簇类中心, 将 ρ_i 与 δ_i 相乘得到 r_i 并降序排列(r_i 越大, 越有可能是簇类中心), r_i 从簇类中心到非簇类中心会有明显跳跃。

4 DG 多目标规划模型

以 DG 投资运行费用和配电网向上级电网购电费用最小为优化目标, 建立 DG 多目标规划模型。

4.1 目标函数

目标 1 为 DG 投资运行费用最小, 其数学表达式为

$$\min f_1 = C_t + C_m \quad (16)$$

$$C_t = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \left(\sum_{i=1}^N Z_{wt,i} C_{wt} + \sum_{i=1}^N Z_{pv,i} C_{pv} \right) \quad (17)$$

$$C_m = C_{mwt} E_{wt} + C_{mpv} E_{pv} \quad (18)$$

式中: C_t 为折现到每年的 DG 年投资费用; C_m 为 DG 的年维护费用; r 为折现率; n 为 DG 的使用年限; $Z_{wt,i}$ 和 $Z_{pv,i}$ 分别为在节点 i 处安装风电机组和光伏发电机组的容量; C_{wt} 和 C_{pv} 分别为单位容量风电机组和光伏发电机组的安装投资成本; C_{mwt} 和 C_{mpv} 分别为风电机组和光伏发电机组的发出单位电量的运行维护费用; E_{wt} 和 E_{pv} 分别为风电机组和光伏发电机组的年发电量。

目标 2 为配电网向上级电网购电费用最小, 其数学表达式为

$$\min f_2 = C_e(C_{\text{loss}} + C_{\text{load}} - E_{\text{wt}} - E_{\text{pv}}), \quad (19)$$

式中: C_e 为向上级电网的单位购电成本; C_{loss} 为年网损量; C_{load} 为年负荷量。

根据文献 [18], 从配电公司与实际情况出发, 采用层次分析法计算各目标函数权重, $w_1 = 0.475$, $w_2 = 0.525$, 从而将多目标优化模型转化为单一目标优化模型, 其数学表达式为

$$\min f = w_1 f_1 + w_2 f_2. \quad (20)$$

4.2 约束条件

配电网分布式电源规划中的约束, 主要包括功率平衡约束、节点电压约束、接入 DG 容量约束和支路电流约束等。

4.2.1 功率平衡约束

本文引入支路潮流法 (distflow) 描述潮流, 通过二阶锥松弛对其进行松弛, 使其从非凸性转化为凸性^[19]。数学表达式为

$$\begin{cases} \sum_{i \in u(j)} (P_{ij} - L_{ij} r_{ij}) + P_i = \sum_{k \in v(j)} P_{jk} \\ \sum_{i \in v(j)} (Q_{ij} - L_{ij} x_{ij}) + Q_j = \sum_{k \in v(j)} Q_{jk} \\ U_j = U_i - 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij} + ((r_{ij})^2 + (x_{ij})^2) L_{ij}) \\ \left\| \begin{matrix} 2P_{ij} \\ 2Q_{ij} \\ L_{ij} - U_i \end{matrix} \right\|_2 \leq L_{ij} + U_i \end{cases}, \quad (21)$$

式中: 集合 $u(j)$ 为以 j 为末端节点的支路首段节点集合; 集合 $v(j)$ 为以 j 为首端节点的支路末端节点集合; P_{ij}, Q_{ij} 分别为 ij 支路首端三相有功和无功功率; U_i 为节点电压幅值平方; L_{ij} 为支路电流幅值平方; r_{ij}, x_{ij} 为支路的电阻和电抗。

4.2.2 节点电压约束

节点电压约束为

$$(v_{i, \min})^2 \leq U_i \leq (v_{i, \max})^2, \quad (22)$$

式中 $v_{i, \min}, v_{i, \max}$ 分别为节点 i 电压幅值的最小值和最大值。

4.2.3 支路电流约束

支路电流约束为

$$L_{ij} \leq (I_{ij, \max})^2, \quad (23)$$

式中 $I_{ij, \max}$ 为支路过载临界电流幅值。

4.2.4 DG 有功出力与无功出力约束

DG 有功出力与无功出力约束为

$$\begin{cases} Q_{\text{wt}} = P_{\text{wt}} \tan(\theta_{\text{wt}}) \\ Q_{\text{pv}} = P_{\text{pv}} \tan(\theta_{\text{pv}}) \end{cases}, \quad (24)$$

式中: P_{wt} 和 Q_{wt} 分别为风电机组的有功和无功出力; P_{pv} 和 Q_{pv} 分别为光伏发电机组的有功和无功出力。

4.2.5 接入 DG 容量约束

接入 DG 容量约束为

$$\begin{cases} P_{\text{DG}i} \leq P_{\text{DG}i, \max} \\ P_{\text{DG}} \leq P_{\max} \end{cases}, \quad (25)$$

式中: $P_{\text{DG}i}, P_{\text{DG}i, \max}$ 分别为节点 i 接入 DG 的容量和最大容量; P_{DG}, P_{\max} 分别为配电网安装 DG 总容量和 DG 最大接入总容量。

4.3 模型求解流程

输入原始数据经第 2~3 节算法处理得到典型场景。在 MATLAB-YALMIP 开发环境中建立数学模型, 调用 CPLEX 求解器对规划模型求解。优化求解流程如图 1 所示。

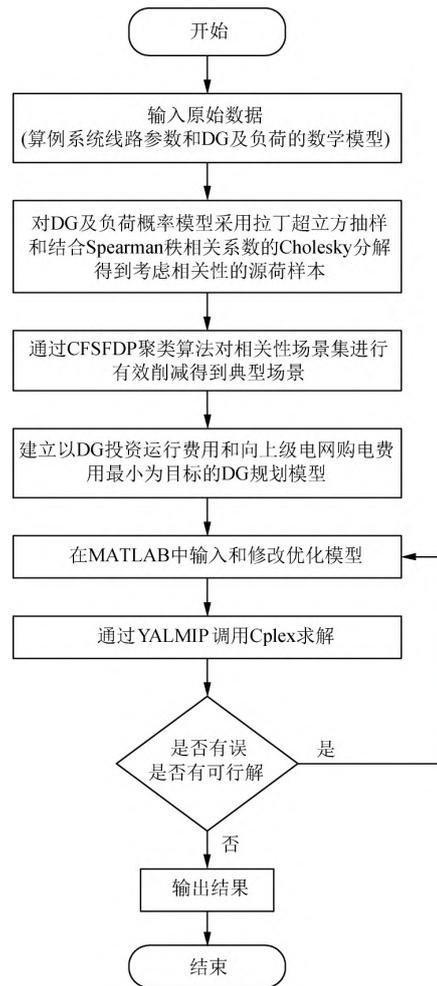


图1 优化求解流程

Fig. 1 Optimization solution process

5 算例分析

本文采用 IEEE 33 节点算例 (图 2) 对上述模型进行仿真验证, 节点 1 为平衡节点, 电压等级 12.66 kV, 基准功率 10 MVA, 具体参数见文献 [20]。由某地历史气象数据与负荷数据统计得知, 风速服从 $k = 2.32$ 和 $c = 8.96$ 的威布尔分布,

$v_i = 3 \text{ m/s}$, $\rho_r = 13 \text{ m/s}$, $\rho_{out} = 20 \text{ m/s}$; 光照强度服从 $\alpha = 0.66$ 和 $\beta = 1.82$ 的 Beta 分布, $I_{max} = 600 \text{ W/m}^2$; 负荷服从标准正态分布, 均值为 IEEE 33 节点算例中负荷值, 标准差为均值的 10%。

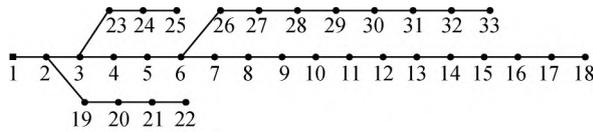


图 2 IEEE 33 节点配电网

Fig. 2 Distribution grid of IEEE 33 nodes

设 DG 待规划节点为 14, 18, 25, 30, 32, 单台 DG 额定容量为 100 kW。风电机组的投资成本 1 800 美元/kW, 运行维护费用 0.05 美元/(kW · h); 光伏发电机组的投资成本 2 000 美元/kW, 运行维护费用 0.03 美元/(kW · h); 向上级电网购电成本 0.089 美元/(kW · h); DG 的经济使用年限 20 a, 折现率 0.06; 拉丁超立方抽样规模为 500。

通过 CFSFDP 算法对考虑相关性的源荷样本进行场景削减, 得到 3 个簇类中心的决策图, 如图 3 所示。

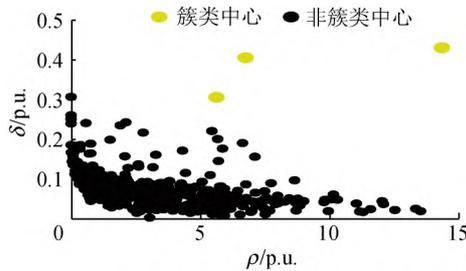


图 3 决策图

Fig. 3 Decision map

上述结果也可通过选择综合考虑局部密度 ρ_i 和到高局部密度点距离 δ_i 的乘积 r_i , 并将其降序排列来验证。如图 4 所示, r_i 经快速下降后趋于收敛(本次选取前 50 个数据点), 从簇类中心到非簇类中心有明显跳跃, 有 3 个簇类中心。

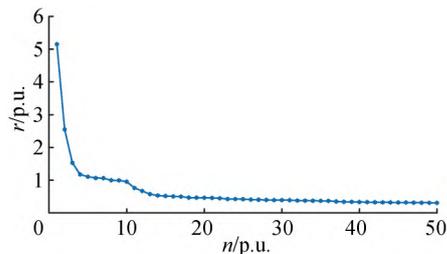


图 4 r 值降序图

Fig. 4 r values descending map

将考虑相关性的典型场景代入模型中求解, 将求解结果与不考虑相关性的情况做对比, 结果如表 1 所示。

为验证模型的有效性, 按照表 1 所示设置 3 种不同的规划方案, 其对比结果如表 2 所示。

表 1 规划方案设置

Tab. 1 Planning scheme settings

方案	考虑相关性	不考虑相关性	基于 CFSFDP 算法的多场景	基于 K-均值聚类 的多场景
1	√	×	√	×
2	√	×	×	√
3	×	√	√	×

表 2 DG 规划方案结果

Tab. 2 DG planning scheme results

参数	方案		
	1	2	3
光伏发电机组安 装位置容量/kW	14(300), 30(100)	14(300), 30(100)	14(200), 30(200)
风力发电机组安 装位置容量/kW	14(200), 30(400)	14(200), 30(400)	14(300), 32(300)
DG 投资行费用 / (10 ⁵ 美元)	3.024 4	2.826 9	2.583 6
配电网向上级电网 购电费用 / (10 ⁶ 美元)	2.674 1	2.815 3	2.866 2
年综合费用 / (10 ⁶ 美元)	1.548 4	1.612 3	1.627 5

对比方案 1 和 2 可知, 相同情况下, 基于 CFSFDP 算法的多场景规划结果明显好于基于 K-均值聚类多场景规划结果。这是因为 CFSFDP 算法通过引入局部密度 ρ_i 和到高局部密度点距离 δ_i , 从而根据样本密度能快速确定簇类中心和个数, 不受初始聚类中心影响, 适合于大型数据的聚类分析。

对比方案 1 与方案 3 可知, 考虑风光荷三者之间的相关性与不考虑相关性相比, 分布式电源规划的年综合费用下降 4.86%。这是因为方案 3 没有考虑风速、光照和负荷之间的相关性, 而它们之间的相关性会对规划结果产生影响。经大量数据统计可知, 风速与负荷一般呈现负相关性, 光照强度与负荷一般呈现正相关性, 风速和光照强度呈现负相关性。

方案 1、2 和 3 的规划结果不同, 主要在于得到的典型场景不同。考虑风光荷样本元素之间相关性后经基于 CFSFDP 聚类算法得到的典型场景, 较其他情况下的典型场景更能客观反映配电网实际运行状态, 有助于得到更经济的 DG 规划方案。

6 结 语

通过 Spearman 秩相关系数分析风速、光照强度和负荷之间的相关性,考虑相关性的规划方案更接近配电网实际运行状态。对间歇性 DG 进行规划时,必须考虑源荷之间的相关性,否则将影响规划方案的经济性。

采用 CFSFDP 聚类算法对考虑相关性的场景集进行有效削减,所得典型运行场景能更好体现场景集中数据元素。

本文对规划模型进行二阶锥松弛,使非凸的规划模型转化为混合整数二阶锥规划问题,简化了原问题从而提高了求解效率,保证解为全局最优。

参考文献:

- [1] 翟晶晶,吴晓蓓,傅质馨,等.考虑需求响应与光伏不确定性的综合能源系统鲁棒优化[J].中国电力,2020,53(8):9-18.
ZHAI J J,WU X B,FU Z X,et al. Robust optimization of integrated energy system considering demand response and photovoltaic uncertainty[J]. China Electric Power 2020,53(8):9-18.
- [2] 王长浩,刘洋,许立雄.考虑风电和负荷不确定冷热电联供微网日前经济调度[J].中国电力,2020,53(8):50-59.
WANG C H,LIU Y,XU L X. Day-ahead economic dispatch of combined cooling heating and power microgrid considering wind power and load uncertainty[J]. China Electric Power 2020,53(8):50-59.
- [3] 龙川,张文涛,叶圣永,等.计及源荷相关性含电动汽车的分布式电源选址定容规划[J].热力发电,2020(6):97-104.
LONG C,ZHANG W T,YE S Y,et al. Site selection and capacity planning of distributed power sources with electric vehicles in consideration of source-load correlation[J]. Thermal Power 2020(6):97-104.
- [4] 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 N,XIA M C,XIAO W D,et al. Multi-objective expansion planning of distribution network considering multiple distributed power sources and their random characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems 2015,39(8):45-52.
- [5] 李亮,唐巍,白牧可,等.考虑时序特性的多目标分布式电源选址定容规划[J].电力系统自动化,2013,37(3):58-63.
LI L,TANG W,BAI M K,et al. Multi-objective distributed power generation location and capacity planning considering timing characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems 2013,37(3):58-63.
- [6] 王金凤,林雪洁,姜欣,等.计及可靠性的分布式风电源多目标优化配置[J].电力电容器与无功补偿,2019,40(2):160-165.
WANG J F,LIN X J,JIANG X,et al. Multi-objective optimization configuration of distributed wind generation supply considering reliability[J]. Power Capacitors and Reactive Power Compensation 2019,40(2):160-165.
- [7] 王杨,向月,刘俊勇.聚类网架拓扑与源荷关联场景生成下配电网分布式电源规划方法[J].电力自动化设备,2020,40(12):49-56.
WANG Y,XIANG Y,LIU J Y. Distributed generation planning method of distribution network based on clustering grid topology and source-load correlation scenario generation[J]. Electric Power Automation Equipment 2020,40(12):49-56.
- [8] 范志成,朱俊澎,袁越,等.基于改进型直流潮流算法的主动配电网分布式电源规划模型及其线性化方法[J].电网技术,2019,43(2):504-513.
FAN Z C,ZHU J P,YUAN Y,et al. Active distribution network distributed generation planning model based on improved DC power flow algorithm and its linearization method[J]. Power System Technology 2019,43(2):504-513.
- [9] 范志成,朱俊澎,吴涵.计及模糊随机性的主动配电网分布式电源规划模型[J].电力建设,2019,40(2):37-44.
FAN Z C,ZHU J P,WU H. An active distribution network distributed generation planning model considering fuzzy randomness[J]. Electric Power Construction, 2019,40(2):37-44.
- [10] 时钟.主动配电网中分布式电源优化配置研究[D].上海:上海电机学院,2019.
SHI Z. Research on the optimal configuration of distributed power sources in active distribution networks[D]. Shanghai: Shanghai Dianji University 2019.
- [11] ZEYNALI S,ROSTAMI N,FEYZI M R. Multi-objective optimal short-term planning of renewable distributed generations and capacitor banks in power system considering different uncertainties including plug-in electric vehicles[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems 2020,119:105885.
- [12] 刘佳,徐谦,程浩忠,等.考虑 N-1 安全的分布式电源多目标协调优化配置[J].电力自动化设备,2017,37(7):84-92.

- LIU J ,XU Q ,CHENG H Z ,et al. Multi-objective coordinated optimal configuration of distributed power sources considering N-1 safety [J]. Power Automation Equipment 2017 ,37(7) : 84-92.
- [13] 鞠平 ,郭德正 ,曹路 ,等. 含主动负荷的综合电力负荷建模研究综述与展望 [J]. 河海大学学报(自然科学版) ,2020 ,48(4) :367-376.
- JU P ,GUO D Z ,CAO L ,et al. Overview and prospects of comprehensive power load modeling research with active load [J]. Journal of Hohai University(Natural Science Edition) 2020 ,48(4) : 367-376.
- [14] HU X B ,ZHAO Y ,GAO Y J. Multi-objective coordinated planning of distribution network frame incorporating multi-type distributed generation considering uncertainties [C]//International Conference on Renewable Power Generation ,April 7 2016 ,Beijing. IET 2016: 1-6.
- [15] 朱文广 ,李映雪 ,杨为群 ,等. 面向区域配电网的分布式电源接入运行方式优化研究 [J]. 电测与仪表 ,2020 ,57(13) : 84-90.
- ZHU W G ,LI Y X ,YANG W Q ,et al. Research on optimization of distributed power access operation mode for regional distribution network [J]. Electrical Measurement and Instrumentation 2020 ,57(13) : 84-90.
- [16] 张沈习. 配电网中考虑不确定性的分布式电源规划方法研究 [D]. 上海: 上海交通大学 2016.
- ZHANG S X. Research on distributed generation planning method considering uncertainty in distribution network [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University 2016.
- [17] RODRIGUEZ A ,LAIO A. Clustering by fast search and find of density peaks [J]. Science 2014 ,344(6191) : 1492-1496.
- [18] 彭显刚 ,林利祥 ,刘艺 ,等. 基于纵横交叉-拉丁超立方采样蒙特卡洛模拟法的分布式电源优化配置 [J]. 中国电机工程学报 2015 ,35(16) : 4077-4085.
- PENG X G ,LIN L X ,LIU Y ,et al. Optimization configuration of distributed power generation based on vertical and horizontal cross-Latin hypercube sampling Monte Carlo simulation method [J]. Proceedings of the CSEE 2015 ,35(16) : 4077-4085.
- [19] 张勇 ,李晨 ,贾楠 ,等. 基于改进二阶锥松弛的多区域电-气综合能源系统优化调度快速求解方法 [J]. 电力自动化设备 2020 ,40(7) : 39-45.
- ZHANG Y ,LI C ,JIA N ,et al. A fast solution method for multi-region electric-gas integrated energy system optimal dispatch based on improved second-order cone relaxation [J]. Electric Power Automation Equipment , 2020 ,40(7) : 39-45.
- [20] BARAN M E ,WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing [J]. IEEE Power Engineering Review ,1989 ,9(4) : 101-102.

(责任编辑 袁兴起)