

DOI: 10.7667/PSPC160979

计及不确定性和环境因素的多类型分布式电源选址定容

初壮, 李钊, 白望望

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 分布式风电源和光伏电源因风速和太阳辐照度的随机性存在出力不确定性的特点, 且配电网负荷水平也存在不恒定的特性。在进行配电网规划时, 该不确定性对配电网具有不可忽视的影响。将这种不确定性计及到分布式电源的优化配置问题当中, 运用场景划分的方法将一年中配电网的运行状态划分成 8760 个小时场景, 并采用改进 K-means 聚类方法对场景进行聚类。以计及环境因素在内的年综合费用最小为目标函数, 采用改进粒子群算法对多类型分布式电源进行选址定容规划。最后采用配电网系统算例进行仿真分析, 验证了该优化配置模型和方法的有效性。

关键词: 分布式电源; 不确定性; 场景划分; 聚类; 环境因素

Optimal siting and sizing of distributed generations considering uncertainties and environmental factors

CHU Zhuang, LI Zhao, BAI Wangwang

(College of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: The output of wind turbine generator and photovoltaic has the characteristics of uncertainties because of the presence of random wind speed and solar irradiance. And the distribution network load level also has non-constant characteristics. The uncertainty has a significant impact on the distribution network during distribution network planning. This paper takes these uncertainties into account to the optimal allocation of distributed generations, divides a year running states of distribution network into 8760 hour-scenes using scene division method, and clusters scenes using the improved K-means clustering method. The objective function is the minimal comprehensive cost taking the environmental factor into account, and the improved PSO algorithm is employed to solve the model. Finally, the 33-bus distribution system is simulated to verify the effectiveness of the proposed model and method.

Key words: distributed generation; uncertainty; scene division; clustering; environmental factor

0 引言

近年来, 随着传统能源(煤, 石油等)的快速消耗以及环境污染问题越来越突出, 分布式电源(Distributed Generation, DG)因其清洁环保、安装地点灵活、可提高供电可靠性等优点得到了快速发展^[1]。然而, 风力发电机(Wind Turbine generator, WT)输出功率因风速的随机性存在的不确定性、光伏发电(Photovoltaic, PV)因太阳辐照度的随机性存在的不确定性以及负荷需求的随机性^[2], 都会对 DG 的选址定容产生影响。因此, 科学地对 DG 的位置和容量进行优化, 对配电网的安全经济运行具有重要意义。

国内外学者针对这一问题从不同角度进行了研究。文献[3]提出一种改进的粒子群算法应用到分布

式电源选址定容当中。文献[4]将电压稳定极限曲面法向量应用在 DG 选址当中。文献[5]提出了一种基于熵和距离的 DEMOPSO 算法和 FWM 技术来确定 DG 规划方案。以上这些文献均未将 DG 出力及负荷需求的不确定性考虑在内, 这与实际情况是有出入的, 从而导致规划方案存在不合理性。近年来也有部分文献考虑了这种不确定性。文献[6-7]建立了风力发电机约束规划模型, 并采用基于半不变量法的随机潮流算法替代确定性潮流算法来处理不确定性问题。文献[8-10]均是采用蒙特卡洛模拟法将随机性问题转化为确定性问题来进行求解。

如上所述, 现有文献针对 DG 规划问题取得了多种成果, 但是其中部分文献未将不确定性因素考虑在内; 部分文献考虑了不确定性因素, 但是未考

虑环境问题, 鲜有文献将环境问题、不确定因素同时纳入考虑之中, 也少有文献针对 DG 类型进行优化。本文采用不同于以上文献处理不确定性的方法, 将不同的 DG 出力和负荷需求情况进行场景划分, 针对每个场景又可以采用十分成熟的确定性方法来处理, 在考虑了不确定性的同时又简化了 DG 规划过程。以计及环境因素在内的年综合费用最小为目标函数, 将风力发电(WG)、光伏发电(PV)、微型燃气轮机(Micro-turbine Generator, MT)多种 DG 同时进行规划, 以得到更符合实际运行情况的规划方案。

1 不确定因素的模拟

1.1 风电机组输出功率的不确定性

根据现有的大量实验结果分析, 可以认为风速的随机特性近似服从两参数 Weibull 分布^[11]。假设风速 v 服从 $\omega(k, c)$ 表示的 Weibull 分布, 其概率密度函数 $f(v)$ 和分布函数 $F(v)$ 分别为

$$f(v) = \frac{k}{c^k} v^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad v \geq 0 \quad (1)$$

$$F(v) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad v \geq 0 \quad (2)$$

式中, k 和 c 分别为 Weibull 分布的形状参数和规模参数, 可由历史风速数据的均值和标准差近似得出。风电机组出力与风速的关系如图 1 所示。

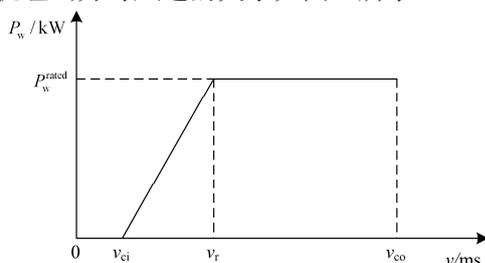


图 1 风电机组出力与风速关系图

Fig. 1 Relationship between WT output and wind speed

风机实际出力 P_w 与风速的关系可由式(3)近似表达。

$$P_w = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_{ci} \text{ or } v_{co} \leq v \\ P_w^{\text{rated}} \frac{v - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} & v_{ci} < v \leq v_r \\ P_w^{\text{rated}} & v_r < v \leq v_{co} \end{cases} \quad (3)$$

式中: v_{ci} 为切入风速; v_r 为额定风速; v_{co} 为切出风速; P_w^{rated} 为风机额定输出功率。

1.2 光伏发电输出功率的不确定性

光伏发电的输出功率与很多因素有关, 其中尤其是受太阳辐照度的影响最大。为了便于讨论, 本

文只考虑光伏发电出力与太阳辐照度的关系。据实验统计, 太阳辐照度也可近似认为服从 Weibull 分布^[12]。光伏发电输出功率 P_s 与太阳辐照度 s 的关系可由式(4)近似表达。

$$P_s = \begin{cases} P_s^{\text{rated}} \left(\frac{s}{s_n}\right) & 0 \leq s \leq s_n \\ P_s^{\text{rated}} & s > s_n \end{cases} \quad (4)$$

式中: P_s^{rated} 为光伏发电的额定输出功率; s_n 为发电功率为额定输出功率时的太阳辐照度, 本文取为 1000 W/m^2 。

1.3 负荷需求水平的不确定性

负荷需求水平即负载率, 与人的生产生活习惯等因素存在很大关系, 因此也存在不确定性。对待规划区域的历史负荷数据进行统计分析, 可得到其一年中 8760 个小时不同时刻的负载率水平。

2 不确定性的处理方法

多场景分析法^[13]是解决不确定性问题的一种有效方法。其实质就是将难以用数学模型表示的不确定因素转化为可以简单求解的确定性场景来处理, 避免了去构造复杂的不确定模型, 从而降低了建模和求解的难度。本文采用场景分析的方法来模拟风电、光伏机组出力以及负荷需求的不确定性。为了保证能够满足精确度的要求, 需要使划分的场景数量足够大, 但是大规模的场景数量必然使得模型的计算复杂度大大增加。为了解决计算精度与计算复杂度之间的矛盾, 可先构造足够数量的场景来满足精确度要求, 再采用场景聚类方法^[14]来缩减场景数量, 从而简化计算的复杂度。

根据以上分析, 本文分两步来生成所需场景。

第一步, 针对每个不确定因素生成足够数量基础场景。

首先针对规划地区的风速和太阳辐照度的历史统计数据进行分析(若缺乏这类数据, 也可利用 HOMER 软件模拟产生^[15]), 根据这些数据确定风速和太阳辐照度所服从概率分布模型的参数, 即 k 参数和 c 参数。由于一年当中每个时期的风速和太阳辐照度不尽相同, 因此本文针对每个月份采用不同的 k 和 c 。根据已知参数的概率模型, 利用蒙特卡罗模拟(Monte Carlo Simulation, MCS)进行数据采集, 间隔时间为 1h, 共计 8760 个数据, 分别根据风力发电有功出力与风速的关系以及光伏发电有功出力与太阳辐照度的关系得到 8760 个时刻下的风力发电和光伏发电的有功出力数据, 由此可得到风

电机组和光伏发电机组的出力效率。至于负荷, 则可根据分析历史负荷数据得到 8760 个小时的负载率数据。综合这些数据可以构造 8760 个小时场景作为基础场景, 每个基础场景为 3 维。

第二步, 利用改进 K-means 聚类方法对基础场景进行聚类, 得到缩减场景。

K-means 聚类方法因其简单易行、效率高、速度快且能保证缩减后场景的多样性^[16]的优点在场景聚类方面得到了广泛应用。其核心是事先确定 K 个对象作为聚类中心, 再根据其他对象与这些聚类中心的相似度(距离), 将它们分配给与其最近的聚类中心, 从而达到聚类的目的。但是该方法必须事先人为给定聚类中心个数, 不可避免地存在人为主观影响的缺点, 为了降低这种人为影响, 本文采用文献[17]中提出的改进 K-means 聚类方法, 具体步骤如下所述。

1) 编码。采用二进制串来表示 K 值。

2) 生成初始种群(初始聚类中心), 并根据每个对象所对应的 K 值进行聚类。构造适应度函数, 使类内距最小, 类间距最大, 其具体形式为

$$fitness = -\left(\frac{1}{K} \cdot \frac{E_1}{E_K} \cdot D_K\right) \quad (5)$$

式中: K 为聚类数; E_K 为类内距; D_K 为类间距。

类内距定义为某一类别中所有个体到该类别中心的距离平方之和, 即

$$E_K = \sum_{j=1}^K \sum_{i \in I_j} \|x_i - z_j\|^2 \quad (6)$$

式中: I_j 为类别 j 的样本集合; z_j 为 j 类的中心。

类间距定义为 K 个聚类中心之间距离平方的最大值, 即

$$D_K = \max \|z_i - z_j\|^2 \quad (7)$$

3) 种群选择、交叉、变异, 产生下一代种群。

4) 满足终止条件后, 算法终止。

该方法本文只做简单介绍, 具体过程不再赘述, 详细过程可参考文献[17]。

3 分布式电源优化配置模型

本文以 WT、PV、MT 3 种 DG 为优化对象, 建立了把环境因素考虑在内的年综合费用最小为目标函数的 DG 优化配置模型。这 3 种类型 DG 年发电量占现有全部 DG 年发电量的绝大多数, 因此十分具有代表性。

3.1 目标函数

年综合费用包括 DG 投资费用、维护费用、运

行费用、网络损耗费用以及环境费用。

具体形式为

$$\min C = \sum_{i=1}^K P(i) (\alpha_1 I_{\text{cost}}^i + \alpha_2 M_{\text{cost}}^i + \alpha_3 O_{\text{cost}}^i + \alpha_4 L_{\text{cost}}^i + \alpha_5 E_{\text{cost}}^i) \quad (8)$$

式中: $P(i)$ 为场景 i 的概率; I_{cost}^i 为场景 i 的 DG 投资费用; M_{cost}^i 为场景 i 的 DG 维护费用; O_{cost}^i 为场景 i 的 DG 运行费用; L_{cost}^i 为场景 i 的网络损耗费用; E_{cost}^i 为场景 i 的环境费用; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ 分别为相应费用的权重系数, 且 $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5 = 1$, 为了避免在确定权重系数时的人为主观影响过大, 本文采用文献[18]中的 1-9 标度法来对各费用的权重系数进行赋值。

目标函数计及了投资费用、运行费用等多种费用, 优化的理想情况是得到的优化结果会使这些费用的综合费用最小。

1) 投资费用

$$I_{\text{cost}} = f_{\text{cr}} \cdot \sum_{k=1}^{N_{\text{type}}} \sum_{j \in N_{\text{DG}k}} (C_{\text{DG}k}^I P_{\text{DG}kj}^N) \quad (9)$$

式中: $f_{\text{cr}} = \frac{r(1+r)^m}{(1+r)^m - 1}$ 为 DG 投资成本年平均费用系数; r 为贴现率; m 为设备投资偿还期; N_{type} 为待规划 DG 类型数目; $N_{\text{DG}k}$ 为第 k 种 DG 候选安装节点集合; $C_{\text{DG}k}^I$ 为第 k 种 DG 单位容量的投资费用; $P_{\text{DG}kj}^N$ 为第 k 种 DG 在节点 j 处的额定安装容量。

2) 维护费用

$$M_{\text{cost}} = \sum_{k=1}^{N_{\text{type}}} \sum_{j \in N_{\text{DG}k}} (C_{\text{DG}k}^M T_{\text{DG}kj} P_{\text{DG}kj}^N) \quad (10)$$

式中: $C_{\text{DG}k}^M$ 为第 k 种 DG 单位容量的维护费用; $T_{\text{DG}kj}$ 为第 k 种 DG 在节点 j 处的年发电时长。

3) 运行费用

$$O_{\text{cost}} = \sum_{k=1}^{N_{\text{type}}} \sum_{j \in N_{\text{DG}k}} (C_{\text{DG}k}^O T_{\text{DG}kj} P_{\text{DG}kj}^N) \quad (11)$$

式中: $C_{\text{DG}k}^O$ 为第 k 种 DG 单位容量的运行费用。

4) 网络损耗费用

$$L_{\text{cost}} = C^L P_{\text{loss}} \quad (12)$$

式中, C^L 为上网电价; P_{loss} 为系统年有功损耗。

5) 环境费用

环境费用包括两个部分: 一部分是因所接入的 DG 发电而减少的传统火力发电所产生的环境效益; 另一部分是 MT 发电所产生的环境污染赔偿费用^[19]。

$$E_{\text{cost}} = \sum_{j=1}^n (V_{ej} + F_{ej})(D_j \cdot P_{mt}) - C^E P_{\text{wt,pv,mt}} \quad (13)$$

式中: V_{ej} 、 F_{ej} 分别为第 j 种污染物的环境价值和所受罚款, 元/kg; D_j 为第 j 种污染物的单位排放量, kg/kWh; P_{mt} 为 MT 年发电量; C^E 为传统火电单位容量环境成本; $P_{\text{wt,pv,mt}}$ 为 WT、PV、MT 总的年发电量。

3.2 约束条件

1) 潮流方程约束

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (14)$$

式中: P_i 、 Q_i 分别为节点 i 的有功注入功率和无功注入功率; U_i 为节点 i 的电压幅值; θ_{ij} 为电压相角; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为支路电导和电纳。

2) 节点电压约束

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (15)$$

式中, $U_{i,\min}$ 、 $U_{i,\max}$ 分别为节点 i 的电压下限和上限。

3) 支路电流约束

$$I_j \leq I_{j,\max} \quad (16)$$

式中, $I_{j,\max}$ 为支路 j 电流 I_j 的允许上限。

4) DG 安装容量约束

因 WT、PV 的出力具有不确定性, 过多的接入配电网会对电能质量产生较大影响, 因此需要对 DG 的安装容量进行限制。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{DGi} \leq P_{DGi,\max} \\ \sum_{i \in \Omega} P_{DGi} \leq \mu P_{L,\text{total}} \end{cases} \quad (17)$$

式中: P_{DGi} 为节点 i 接入的 DG 有功; $P_{DGi,\max}$ 为节点 i 所允许接入的最大 DG 有功; Ω 为 DG 安装节点集合; μ 为渗透率; $P_{L,\text{total}}$ 为系统总有功负荷。

4 求解算法

本文采用自适应权重粒子群算法(Adaptive Particle Swarm Optimization, APSO) 对 DG 优化配置问题进行求解。该方法是在粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO) 的基础上对惯性权重系数 ω 进行改进, 使其可以随着粒子目标函数值的变化而变化, 从而加强了粒子的全局搜索能力, 并提高了收敛速度^[20]。 ω 的表达式为

$$\omega = \begin{cases} \omega_{\min} - \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min})(f - f_{\min})}{f_{\text{avg}} - f_{\min}}, & f \leq f_{\text{avg}} \\ \omega_{\max}, & f > f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: ω_{\min} 、 ω_{\max} 分别为 ω 的最小值和最大值; f 为粒子目标函数值; f_{\min} 、 f_{avg} 分别为所有粒子目标函数值的最小值和平均值。

4.1 编码方式

本文采用十进制整数编码方式, 每一个粒子代表一种规划方案, 每个规划方案包含有 N_{DG} 个元素, 元素大小代表 DG 的安装个数。 $X = (X^{\text{WT}}, X^{\text{PV}}, X^{\text{MT}})$, 其中, X^{WT} 、 X^{PV} 、 X^{MT} 分别为 WT、PV、MT 3 种类型 DG 在各候选节点的安装台数。

4.2 生成初始种群

粒子群算法当中, 初始种群一般都是随机生成, 但是随机生成的初始种群不一定全都满足约束条件, 因此, 本文提出一种新的初始种群的生成方法, 使所有的初始粒子全部满足约束条件的限制。生成初始种群的步骤如下。

1) 根据 3 种类型 DG(WT、PV、MT) 的单位成本确定安装优先级。定义单位成本为投入一台 DG 一年所要花费的费用(此时, 网损费用因 DG 接入节点的不同而存在差异难以量化, 且因单个 DG 容量较小, 分别接入一台不同类型 DG 时的网损费用相差较小, 因此单位成本当中不再考虑网损费用)。不同类型 DG 的各项成本及最终的单位成本如表 1 所示。

表 1 DG 单位成本

Table 1 DG unit cost

	DG 类型		
	WT	PV	MT
投资成本/ (元/kW)	10 000	13 000	6000
维护成本/ (元/kWh)	0.33	0.20	0.13
运行成本/ (元/kWh)	0	0	0.20
环境成本/ (元/kWh)	-0.028	-0.028	-0.018
年运行 小时数/h	1728	1200	8760
单位成本/ 万元	3.6	2.0	14.3

由表 1 可以得出, 单位成本由低到高的 DG 类型为 PV→WT→MT, 本着成本尽可能小的原则, DG 优先安装等级由前到后亦为 PV→WT→MT。

2) 随机生成初始种群, 且假设初始种群共含有 N 个粒子。

3) 设置 $i=1$ 。

4) 对第 i 个初始粒子进行校验, 检验该粒子所表示的 DG 规划方案是否满足约束条件要求。若满足要求, 则转步骤 5); 若不满足要求, 则按下述规则对第 i 个粒子元素进行修改, 得到新的粒子, 重新进行校验。

(a) 根据已确定的 DG 安装优先等级, 当第 i 个粒子的安装方案不满足约束时, 将最高优先安装等级 DG, 即 PV 按所接入节点允许的最大安装个数进行接入, 其余两种 DG 则在满足渗透率约束范围内随机接入。

(b) 按(a)规则对粒子进行修改后若仍不满足约束要求, 则将最高优先安装等级和次优先安装等级 DG, 即 PV、WT 均按所接入节点允许的最大安装个数进行接入, MT 则在满足渗透率约束范围内随机接入。

5) $i++$, 若 $i \leq N$, 则转步骤 4); 若 $i > N$, 则结束, 初始种群生成。

4.3 潮流计算

本文将 DG 作为已知功率的 PQ 节点进行处理。DG 一般安装在靠近负荷中心的位置, 当 DG 出力时可以将 DG 看作是功率为负的“负荷”。因配电网采用开环的运行方式, 网络结构多为辐射状, 所以本文采用前推回代法进行潮流计算。对于潮流计算后不满足约束条件的粒子采用在适应度函数上增加惩罚项的方式来处理。

综上所述, 采用 APSO 算法求解单个场景 DG 规划方案的流程如图 2 所示。

5 算例分析

5.1 算例参数设置

本文采用文献[21]当中的 33 节点配电网系统进行仿真验证, 配电网参数见文献[20]。网络结构如图 3 所示。

图中, WT 的候选安装节点为{17, 28, 31}, PV 的候选安装节点为{4, 7, 25, 29, 32}, MT 的候选安装节点为{29, 30}。网络基准功率取为 10 MW, 基准电压为 12.66 kV, 单个 DG 容量均设为 50 kW, 在无功补偿设备的参与下, 功率因数保持在 0.85, 渗透率为 30%, 上网电价为 0.394 元/kWh, 风机的切入风速、切出风速、额定风速分别为 3.5, 25, 9.5 m/s。一年中风速和太阳辐照度所服从 Weibull 分布的 k 和 c 如表 2 所示。

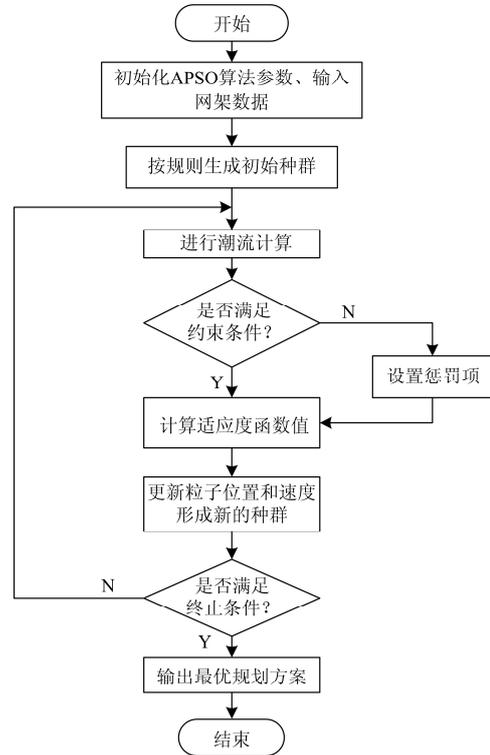


图 2 APSO 算法求解 DG 规划方案流程图

Fig. 2 Flowchart of DG allocation by using APSO

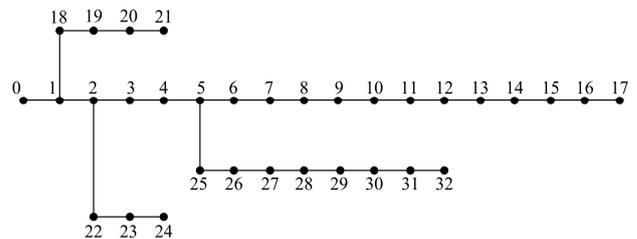


图 3 33 节点配电系统结构图

Fig. 3 Structure chart of 33 nodes distribution system

表 2 风速和太阳辐照度的 Weibull 参数

Table 2 Weibull parameters of wind speed and solar irradiance

月份	风速		太阳辐照度	
	k	c	k	c
1	2.26	8.45	1.36	5.45
2	2.09	8.97	1.49	5.97
3	1.77	8.15	1.77	5.15
4	2.58	9.16	1.78	6.16
5	2.34	10.45	1.84	6.45
6	2.27	7.60	1.87	5.60
7	2.09	6.38	1.89	6.38
8	2.83	7.01	1.90	6.01
9	2.11	7.57	1.51	5.57
10	2.00	9.04	1.50	5.74
11	2.14	8.74	1.44	5.04
12	2.09	8.63	1.49	5.63

MT 的污染物排放数据如表 3 所示。

表 3 MT 的污染物排放数据

Table 3 MT pollutant emissions data

	NO _x	CO ₂	CO	SO ₂
排放量/ (g/kWh)	0.6188	184.0829	0.1702	0.000 928
环境价值/ (元/kg)	6.55	0.0188	0.82	4.92
罚款/ (元/kg)	1.64	0.0082	0.13	0.82

5.2 算法初始参数设置

粒子数为 30 个; 迭代次数为 100 代; 粒子最大速度为 0.6; 学习因子 c_1, c_2 均取 2.0; 最大惯性权重 $\omega_{\max} = 0.9$; 最小惯性权重 $\omega_{\min} = 0.4$ 。

5.3 聚类结果

根据已知的风速及太阳辐照度数据和式(3)、(4)可得到 8760 个小时的 WT 和 PV 的出力效率, 再结合 8760 个节点负载率数据, 便可构造出 8760 个基础小时场景, 利用改进的 K-means 方法进行聚类, 聚类后得到 16 个缩减场景。聚类结果如表 4 所示。

5.4 规划方案及分析

本文设定了 5 种不同的方案进行比较。

方案 1 为不安装 DG; 方案 2 为安装 DG 但是不考虑不确定因素和环境因素; 方案 3 为安装 DG, 考虑不确定因素, 不考虑环境因素; 方案 4 为安装 DG, 不考虑不确定因素, 考虑环境因素, 方案 5 为安装 DG 且充分考虑不确定因素和环境因素。按 1-9 标度法所确定的方案 2—5 目标函数权重系数如表 5 所示。

表 4 聚类结果

Table 4 Clustering results

场景	风机效率	光伏效率	负载率	场景概率
1	0.0236	0.8785	0.4924	0.0888
2	0.0260	0.8825	0.7383	0.0840
3	0.9757	0.5369	0.4949	0.0751
4	0.9798	0.8794	0.4665	0.0742
5	0.0340	0.5355	0.7207	0.0734
6	0.9775	0.5264	0.7434	0.0729
7	0.9895	0.8826	0.6341	0.0700
8	0.0329	0.5378	0.4870	0.0695
9	0.7493	0.8790	0.6150	0.0556
10	0.9688	0.8800	0.8015	0.0555
11	0.3281	0.8824	0.4870	0.0532
12	0.3024	0.5402	0.4912	0.0501
13	0.3120	0.5334	0.7292	0.0495
14	0.7460	0.5435	0.6214	0.0532
15	0.1963	0.8714	0.6261	0.0419
16	0.3421	0.8793	0.7642	0.0409

表 5 不同方案目标函数的权重系数

Table 5 Weighting factors of objective function of different programs

	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5
方案 2	0.07	0.19	0.19	0.55	—
方案 3	0.07	0.19	0.19	0.55	—
方案 4	0.04	0.13	0.13	0.39	0.31
方案 5	0.04	0.13	0.13	0.39	0.31

因为方案 2, 4 为不考虑不确定因素的情形, 因此不必进行场景划分, 直接利用本文模型和 APSO 算法进行仿真计算即可; 考虑不确定因素的方案 3 和方案 5 则需要进行场景划分, 然后按本文所述计算步骤进行仿真计算, 最终规划结果如表 6 所示。

表 6 规划结果

Table 6 Planning results

DG 类型	节点	DG 安装个数				
		方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
WT	17	—	4	2	4	1
	18	—	3	2	1	4
	31	—	2	1	2	0
PV	4	—	1	0	0	2
	7	—	2	3	3	0
	25	—	3	2	2	3
	29	—	0	0	3	2
	32	—	1	1	2	2
MT	29	—	2	4	1	0
	30	—	4	3	3	1
DG 安装总数		—	22	18	21	15
P_{loss} /MWh		1648.6	610.4	750.4	618.0	940.8
I_{cost} /万元		—	1085	850	1120	865
M_{cost} /万元		—	68.2	61.3	54.7	30.8
O_{cost} /万元		—	34.7	40.5	23.1	5.8
L_{cost} /万元		64.95	24.1	29.6	24.3	37.1
E_{cost} /万元		—	—	—	-6.5	-3.5
总成本/万元		—	1212	981.4	1215.7	935.1

通过分析表 6, 我们可以得出以下结论:

1) 接入分布式电源后配电网的网损下降十分明显, 下降最多的为方案 2, 下降了近 63%。

2) 考虑了环境因素的 MT 安装数量比不考虑环境因素的 MT 安装数量明显减少, 因为可造成环境污染的 DG 只有 MT, MT 的安装数量越少环境污染成本也就越小。其中方案 4、5 中的环境费用为负数是因为 DG 的安装所带来的环境效益要大于 MT 的安装所带来的环境污染赔偿费用。

3) 通过对比方案 4 和方案 5 可以看到:(a) 方案 4 的 DG 安装台数要多于方案 5, 从而投资成本更大。这是因为方案 4 不计及不确定因素所以只需考虑单个场景, 其约束条件相对较少, 因而其取值范围就

要更大，而方案 5 是考虑了多个场景后的结果，因其约束条件的增加使得取值范围变的更小，因此从 DG 安装台数来讲方案 4 要大于方案 5；(b)方案 4 的 DG 维护、运行费用大于方案 5。DG 安装台数的增加也就意味着方案 4 的 DG 维护、运行费用就要大于方案 5；(c) 方案 4 的网损和环境费用小于方案 5。一般来讲，DG 安装台数越多，对网损的减少和环境效益的增加也就越多。

4) 本文目标函数是将不同的单个目标函数加以不同权重求和得到，某方案目标函数最优并不代表所有单个目标函数都是最优的，例如方案 5 的目标函数值小于方案 4，但是其网损和环境费用却要大于方案 4，因此方案 5 是根据决策者意愿综合权衡之后的一个最优结果。因方案 5 考虑了不确定因素和环境效益，是更符合实际运行情况的方案，从而有效地减少了 DG 的过剩容量，降低了成本。

6 结论

本文采用多场景分析法对 DG 选址定容规划当中的不确定因素进行处理，简化了建模和计算的复杂度；同时将环境因素考虑到 DG 规划过程当中，并对其进行了适当发展和改进，从而使得 DG 规划所考虑的因素更加全面；利用 APSO 算法对 33 节点配电系统进行仿真验证，并对算法当中的粒子初始化过程进行适当改进，实验结果表明所发展的模型和算法是可行有效的。

本文未考虑各不确定因素之间的相关性，同时考虑不确定性和相关性的相关问题有待进一步研究。

参考文献

[1] 王守相, 王慧, 蔡声霞. 分布式发电优化配置研究综述[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(18): 110-115.
WANG Shouxiang, WANG Hui, CAI Shengxia. A review of optimization allocation of distributed generations embedded in power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(18): 110-115.

[2] 白牧可, 唐巍, 张璐, 等. 基于机会约束规划的 DG 与配电网架多目标协调规划[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 346-354.
BAI Muke, TANG Wei, ZHANG Lu, et al. Multi-objective coordinated planning of distribution network incorporating distributed generation based on chance constrained programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 346-354.

[3] 刘波, 张焰, 杨娜. 改进的粒子群优化算法在分布式电源选址和定容中的应用[J]. 电工技术学报, 2008, 23(2): 103-108.

LIU Bo, ZHANG Yan, YANG Na. Improved particle swarm optimization method and its application in the siting and sizing of distributed generation planning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(2): 103-108.

[4] 邓大上, 房鑫炎. 电压稳定极限曲面法向量在分布式电源选址中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 57-62.
DENG Dashang, FANG Xinyan. Application of normal vector of voltage stability limit surface in distributed generation allocation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 57-62.

[5] 栗然, 马慧卓, 祝晋尧, 等. 分布式电源接入配电网多目标优化规划[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(1): 6-13.
LI Ran, MA Huizhuo, ZHU Jinyao, et al. Multi-objective optimization for DG integration into distributed system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1): 6-13.

[6] 张节潭, 程浩忠, 姚良忠, 等. 分布式风电源选址定容规划研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(16): 1-7.
ZHANG Jietan, CHENG Haozhong, YAO Liangzhong, et al. Study on siting and sizing of distributed wind generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(16): 1-7.

[7] 吴万禄, 韦刚, 谢丽蓉, 等. 含分布式电源与充电站的配电网协调规划[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 65-73.
WU Wanlu, WEI Gang, XIE Lirong, et al. Coordinated planning of distribution network containing charging station and distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 65-73.

[8] 黄付顺, 王倩, 何美华, 等. 基于综合敏感性分析的时序分布式电源规划[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 44-50.
HUANG Fushun, WANG Qian, HE Meihua, et al. Timing distributed power planning based on a comprehensive sensitivity analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 44-50.

[9] 江知瀚, 陈金富. 计及不确定性和多投资主体需求指标的分布式电源优化配置方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 34-42.
JIANG Zhihan, CHEN Jinfu. Optimal distributed generator allocation method considering uncertainties and requirements of different investment entities[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 34-42.

[10] 刘志鹏, 文福拴, 薛禹胜, 等. 计及可入网电动汽车的分布式电源最优选址和定容[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18): 11-16.
LIU Zhipeng, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Optimal

- siting and sizing of distributed generators considering plug-in electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(18): 11-16.
- [11] LI Zhi, YE Lin, ZHAO Yongning, et al. Short-term wind power prediction based on extreme learning machine with error correction[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 40-47.
- [12] EVANGELOPOULOS V A, GEORGILAKIS P S. Optimal distributed generation placement under uncertainties based on point estimate method embedded genetic algorithm[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2014, 8(3): 389-400.
- [13] VAN GEERT E. Increased uncertainty a new challenge for power system planners[C] // Tools and Techniques for Dealing with Uncertainty (Digest No. 1998/200), IEE Colloquium on. 1998, 1: 1-6.
- [14] 李大虎, 江全元, 曹一家. 基于聚类的支持向量回归模型在电力系统暂态稳定预测中的应用[J]. 电工技术学报, 2006, 21(7): 75-80.
LI Dahu, JIANG Quanyuan, CAO Yijia. Clustering based on support vector regression model and its application in power system transient stability prediction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(7): 75-80.
- [15] NREL. Energy modeling software for hybrid renewable energy systems[EB/OL] // [2011-01-20]. <http://www.Homerenergy.com/>.
- [16] 彭春华, 于蓉, 孙惠娟. 基于 K-均值聚类多场景时序特性分析的分布式电源多目标规划[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 58-65.
PENG Chunhua, YU Rong, SUN Huijuan. Multi-objective DG planning based on K-means clustering and multi-scenario timing characteristics analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 58-65.
- [17] 刘婷, 郭海湘, 诸克军, 等. 一种改进的遗传 k-means 聚类算法[J]. 数学的实践与认识, 2007, 37(8): 104-111.
LIU Ting, GUO Haixiang, ZHU Kejun, et al. An improved genetic k-means algorithm for optimal clustering[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2007, 37(8): 104-111.
- [18] 张跃, 杨汾艳, 曾杰, 等. 主动配电网的分布式电源优化规划方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 67-72.
ZHANG Yue, YANG Fenyan, ZENG Jie, et al. Research of distributed generation optimization planning for active distributed network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 67-72.
- [19] 钱科军, 袁越, 石晓丹, 等. 分布式发电的环境效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(29): 11-15.
QIAN Kejun, YUAN Yue, SHI Xiaodan, et al. Environmental benefits analysis of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(29): 11-15.
- [20] 龚纯. 精通 MATLAB 最优化计算[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [21] AMAN M M, JASMON G B, BAKAR A H A, et al. A new approach for optimum simultaneous multi-DG distributed generation Units placement and sizing based on maximization of system loadability using HPSO (hybrid particle swarm optimization) algorithm[J]. Energy, 2014, 66(4): 202-215.

收稿日期: 2016-06-30; 修回日期: 2016-09-17

作者简介:

初 壮(1973—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力市场优化运行; E-mail: chuzhuang@hotmail.com

李 钊(1991—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为配电网优化运行; E-mail: raoban226@163.com

白望望(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统无功优化。E-mail: 1241509352@qq.com

(编辑 姜新丽)