

计及源荷相关性含电动汽车的分布式 电源选址定容规划

龙 川¹, 张文涛¹, 叶圣永¹, 雍 友², 韩宇奇¹, 刘旭娜¹,
赵达维¹, 刘洁颖¹, 王司琪¹

(1. 国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川 成都 610041;
2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 611756)

[摘 要] 分布式电源大规模并入电网与电动汽车的广泛应用在优化能源结构的同时, 也给配电网的选址定容规划带来新的挑战。本文通过拉丁超立方抽样并结合 Cholesky 分解和 Nataf 变换, 得到具有相关性的风速、光照强度与需求负荷样本; 利用蒙特卡洛模拟得到具有随机性的电动汽车充电负荷, 与考虑不确定因素的风光荷样本相结合, 由 K-means 聚类方法进行场景聚类得到典型的运行场景; 利用机会约束规划方法建立规划模型, 并以收缩因子粒子群优化算法求解; 通过典型 IEEE 33 节点算例分析了风光荷相关性与电动汽车不同充电方式对规划方案的影响。结果表明: 电动汽车用户选择常规充电方式能够降低电网负荷; 考虑风力、光伏与负荷之间的相关性, 得到的规划方案将更经济且更具有指导意义。

[关 键 词] 分布式电源; 电动汽车; 选址定容; 风电; 光伏; 负荷; 相关性; 场景聚类

[中图分类号] TM715 **[文献标识码]** A **[DOI编号]** 10.19666/j.rfd.201911263

[引用本文格式] 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, 49(6): 97-104. LONG Chuan, ZHANG Wentao, YE Shengyong, et al. Optimal planning for siting and sizing of distributed generator including electric vehicles considering correlations of source and load[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(6): 97-104.

Optimal planning for siting and sizing of distributed generator including electric vehicles considering correlations of source and load

LONG Chuan¹, ZHANG Wentao¹, YE Shengyong¹, YONG You², HAN Yuqi¹, LIU Xuna¹,
ZHAO Dawei¹, LIU Jieying¹, WANG Siqi¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company Economic Research Institute, Chengdu 610041, China;
2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: The large-scale integration of distributed generator and the extensive application of electric vehicles (EVs) not only optimize the energy structure, but also bring new challenges to siting and sizing of distribution network. In this paper, the wind speed, light intensity and demand load samples with correlations are obtained through combining the Latin hypercube sampling, Cholesky decomposition and Nataf transformation. The Monte Carlo simulation is used to obtain the charging load of the electric vehicles with randomness. Combined with the wind-charge sample considering the uncertain factors, the typical operation scenarios are obtained by K-means clustering method. Based on the chance-constrained programming, the programming model which is solved by the constriction factor particle swarm optimization algorithm is established. The IEEE 33-bus distribution network is applied to analyze the influence of correlation and different charging modes of EVs on the planning scheme. The results show that, the grid load can be reduced if the EVs chose the conventional charging mode, and considering the correlation between wind, photovoltaic and load can enhance the economic efficiency of the planning scheme and make it more instructive.

Key words: distributed power, electric vehicle, siting and sizing, wind power, photovoltaic power, load, correlation, scene clustering

收稿日期: 2019-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51307114); 国网四川省电力公司经济技术研究院项目(SGSCJY00GH JS1900020)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (51307114); Project of State Grid Sichuan Electric Power Company Economic Research Institute (SGSCJY00GH JS1900020)

第一作者简介: 龙川(1993), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统规划, 648717511@qq.com.

通信作者简介: 雍友(1996), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统规划, 782614484@qq.com.

随着新能源技术的快速发展与节能减排政策的推广,分布式电源(distribution generation, DG)大规模并入电网,实现了能源结构的优化与可再生能源的就地消纳。然而,分布式电源出力存在不确定性、间歇性等特点,同时负荷侧接入了高比例的电动汽车(electric vehicles, EVs)等柔性负荷,使配电网由传统的单向电力传输的无源网络转变为复合的含DG、储能系统等新型综合网络^[1],配电网的结构变得更为复杂,给分布式电源选址定容带来了新的挑战。

目前,国内外已有部分文献对含DG的配电网选址定容进行了研究^[2-6]。文献[2]针对风电分布式电源(WTG)及负荷变化的不确定性,以独立发电商受益最大为目标函数,采用模拟植物生长算法应用机会约束规划建立了DG接入配电网的选址规划模型;文献[3]采用聚类方法得到典型运行场景,并通过聚类有效性指标找到最佳聚类数目,以最小功率损耗为目标,对光伏(PVG)机组进行选址定容;文献[4]考虑了WTG与PVG输出功率的不确定性,并用模糊变量进行表示,以年投资运行费用最小为目标函数,经济可靠运行的限制为约束条件,应用遗传算法求解模型;文献[5]考虑了DG出力的不确定性,以能源成本为最小建立了规划模型;文献[6]在考虑DG出力波动性的基础上,计及了电动汽车影响与需求侧管理的DG配置模型,再以差分进化算法和原对偶内点法求解。

上述文献虽然考虑了DG出力的不确定性,但未综合考虑风电、光伏、负荷等不确定量之间的相关性。文献[7-8]以年综合费最小为目标,利用机会约束规划方法建立了计及风速、光照强度和负荷间相关性的间歇式分布式电源选址定容模型,但均未计及电动汽车充电负荷作为一种随机性的负荷接入配电网的情况。

对此,本文综合考虑了WTG、PVG出力以及需求负荷的相关性,将电动汽车充电负荷作为一种不确定性的负荷纳入分布式电源选址定容规划模型。以拉丁超立方抽样(Latin hypercube sampling, LHS)结合Cholesky分解与Nataf变换得到具有相关性的风速、光照强度、负荷样本,并由蒙特卡洛模拟得到随机性的电动汽车充电负荷,通过K-means聚类方法缩减得到典型的运行场景;以最小年投资成本为目标,利用机会约束建立DG的选址定容规划模型,在电动汽车不同充电方式下,基于标准IEEE 33节点算例验证模型的正确性与有效性。

1 分布式电源及负荷的数学模型

1.1 风电出力模型

风力发电的输出功率与风力发电机轮毂处的风速有关,可用Weibull分布对其不确定性进行描述^[9],风机有功出力 $P_{WT}(MW)$ 与风速 v 的函数关系可近似描述为

$$P_{WT} = \begin{cases} 0, & v < v_{in} \text{ 或 } v \geq v_{out} \\ P_{r,WG} \frac{v - v_{in}}{v_r - v_{in}}, & v_{in} \leq v < v_r \\ P_{r,WG}, & v_r \leq v < v_{out} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{r,WG}$ 为风机额定功率, MW; v_{in} 、 v_r 、 v_{out} 分别为切入风速、额定风速、切出风速。

1.2 光伏出力模型

光照强度一般服从Beta分布^[9],光照强度与光伏机组输出功率 $P_{PV}(MW)$ 的函数关系为

$$P_{PV} = \begin{cases} P_{r,PV} \frac{S}{S_r} & 0 \leq S \leq S_r \\ P_{r,PV} & S > S_r \end{cases} \quad (2)$$

式中, $P_{r,PV}$ 为光伏的额定出力, S_r 为额定光照强度。

1.3 负荷需求模型

本文用正态分布表示负荷需求的不确定性^[10]:

$$\begin{cases} P_{i,LD} \sim N(\mu_{p,i}, \sigma_{p,i}^2) \\ Q_{i,LD} \sim N(\mu_{q,i}, \sigma_{q,i}^2) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $P_{i,LD}$ 和 $Q_{i,LD}$ 分别表示节点 i 的有功负荷和无功负荷的随机量; $\mu_{p,i}$ 和 $\mu_{q,i}$ 表示节点 i 有功负荷和无功负荷的期望; $\sigma_{p,i}$ 和 $\sigma_{q,i}$ 表示节点 i 有功负荷和无功负荷的标准差。

1.4 电动汽车充电负荷模型

本文主要基于电动汽车数量及类型、用户行为习惯、充电模式等数据^[11],采用蒙特卡洛模拟对电动汽车充电负荷进行仿真计算。

电动汽车用户的行为习惯是影响电动汽车功率需求的关键因素,具有不确定性。该因素主要包括日行驶里程和开始充电时间2方面。根据美国交通部对电动汽车的调查数据统计分析,电动汽车用户日行驶里程 d 近似服从对数正态分布,其概率密度函数为

$$f(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}d\sigma_d} \exp\left(-\frac{(\ln d - \mu_d)^2}{2\sigma_d^2}\right) \quad (4)$$

用户最后一次出行结束时间 T 服从正态分布, 其概率密度函数为

$$f(T) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_T} \exp\left(-\frac{(T-\mu_T)^2}{2\sigma_T^2}\right), (\mu_T - 12) < T \leq 24 \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_T} \exp\left(-\frac{(T+12-\mu_T)^2}{2\sigma_T^2}\right), 0 < T \leq (\mu_T - 12) \end{cases} \quad (5)$$

式中: σ_d 、 μ_d 分别表示用户日行驶里程的标准差与分布均值; σ_T 、 μ_T 分别表示用户最后一次出行结束时间的标准差与分布均值。

电动汽车充电时长 t_c 的计算公式为

$$t_c = \frac{E}{P_{EV}\eta} = \frac{dW_{EV}}{P_{EV}\eta} \quad (6)$$

式中, E 为电动汽车需求充电量, P_{EV} 为额定充电功率, η 为电池充电效率, W_{EV} 为额定能耗水平。

1.5 电动汽车充电负荷建模

设模拟仿真次数为 N_1 , 则建模具体步骤为:

- 1) 确定电动汽车的数量 N 、充电方式的比率及功率;
- 2) 根据式(4)的日行驶里程概率密度函数, 随机产生电动汽车日行驶里程数 d ;
- 3) 根据式(5)最后出行结束时间概率密度函数, 随机产生电动汽车开始充电时间 T ;
- 4) 根据电动汽车需求充电量、充电效率、额定充电功率和第2步所得到的日行驶里程, 通过式(6)计算得到充电时间长度 t_c ;
- 5) 根据充电时间长度得到第 i 辆电动汽车的日充电负荷为 p_i ($i=1, 2, \dots, N$)。利用蒙特卡洛模拟方法重复计算单辆电动汽车的充电负荷 N 次, 收敛条件为仿真次数 N_1 , 则 N 台电动汽车的充电负荷为

$$P = \sum_{i=1}^{N_1} p_i \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

重复上述步骤 N_1 次, 得到 N_1 个电动汽车充电负荷值。

2 源荷相关性的样本处理

2.1 拉丁超立方抽样方法

采用拉丁超立方抽样方法对风速、光照强度、需求负荷进行采样。该方法由采样和排序2部分组成: 采样方法属于分层抽样, 能够高效且全覆盖地抽样全部的采样区域^[12]; 排序能够通过改变排列顺序的方式使采样值的相关性接近输入随机变量之间的相关性, 提高LHS方法的模拟精度。

设样本采样规模为 N_2 , 随机变量的个数为 m , $Y_m = F_m(X_m)$ 为随机变量 X_m 的概率密度函数。拉丁超立方采样的步骤为:

- 1) 将 m 维的每一维 $[0,1]$ 区间划分为不重叠的 N_2 个区间, 每个区间的概率均为 $1/N_2$;
- 2) 在上述 N_2 个区间中, 每个区间随机地抽取1个点 y_i ($i=1, 2, \dots, N_2$);
- 3) 利用反变换 $x_{mi} = F_m^{-1}(y_i)$ 得到采样值 x_{mi} , F_m^{-1} 为 F_m 的反变换。

当 m 维随机变量的采样完成后, 即得到1个每一列为1个采样值的 $m \times N_2$ 维的初始样本矩阵 S_0 。

2.2 Cholesky 分解与 Nataf 变换

风速、光照强度与需求负荷样本之间存在一定的相关性。文献[13]提出了一种将拉丁超立方抽样技术与Cholesky分解法相结合的方法, 文献[14]给出了该方法的理论依据, 其适用于正态分布, 能够得到与概率密度函数抽样和历史样本相关系数矩阵 ρ 相近的样本组合。然而, 分布式电源的利用资源并不符合正态分布^[8], 故需要引入Nataf变换, 将非正态分布的抽样数据映射到正态分布空间。

设 m 个具有相关性的随机变量的相关系数矩阵为 ρ , 其表达式为

$$\rho = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{12} & \cdots & \rho_{1m} \\ \rho_{21} & 1 & \cdots & \rho_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{m1} & \rho_{m2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, ρ_{ij} 为随机变量 X_i 与 X_j 之间的相关系数, 一般为正定对称矩阵。

采用Nataf变换与Cholesky分解的随机变量排序的步骤如下^[15]。

- 1) 随机生成 $m \times N_2$ 阶的顺序矩阵 L , L 的每一行由整数 $1, 2, \dots, N_2$ 随机排列组成, 计算 L 的秩相关系数 ρ_L 。
- 2) 通过Nataf变换将相关系数矩阵 ρ_L 中的非对角元素 ρ_{ij} 变换为2个相关标准正态分布的相关系数 ρ_{ij}^* 对应位置的元素 ρ_{ij}^* , 即

$$\rho_{ij} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{F_i^{-1}(\psi(y_i)) - \mu_i}{\sigma_i} \right) \left(\frac{F_j^{-1}(\psi(y_j)) - \mu_j}{\sigma_j} \right) \phi_2(y_i, y_j, \rho_{ij}^*) dy_i dy_j \quad (9)$$

式中: ψ 为变换后相关标准正态分布的累计概率密度函数, μ 、 σ 分别表示对应随机变量的原非正态分

布的均值与标准差, $\phi_2(y_i, y_j, \rho_{ij}^*)$ 表示相关标准正态分布的联合概率密度, 计算公式为:

$$\phi_n(\mathbf{y}, \rho_{ij}^*) = \frac{1}{2\pi\sqrt{\rho_{ij}^*}} \exp\left(-\frac{1}{2} \mathbf{y}^T \rho_{ij}^* \mathbf{y}\right) \quad (10)$$

3) 对相关系数矩阵 ρ_L^* 进行 Cholesky 分解:

$$\rho_L^* = \mathbf{Q}\mathbf{Q}^T \quad (11)$$

式中, \mathbf{Q} 为下三角矩阵。再由式(12)消除随机排列造成的相关性:

$$\mathbf{G} = \mathbf{Q}^{-1}\mathbf{L} \quad (12)$$

4) 通过 \mathbf{G} 中的元素排列顺序获得顺序矩阵 \mathbf{L}_s , \mathbf{L}_s 代表样本矩阵 \mathbf{G} 中对应的元素按照大小顺序排列后所处的位置, 每一行均由 1, 2, ..., N_2 的数字排列构成。

5) 将 \mathbf{S}_0 根据顺序矩阵 \mathbf{L}_s 进行重新排序, 得到具有相关性的样本矩阵 \mathbf{S}_1 。

根据上述步骤, 可得到具有相关性的风速、光照强度和需求负荷的采样值矩阵 \mathbf{S} 。再将矩阵中的随机量代入式(1)、式(2), 就转化为风电和光伏的出力值。计及源荷相关性的风光荷的仿真曲线如图 1 所示。

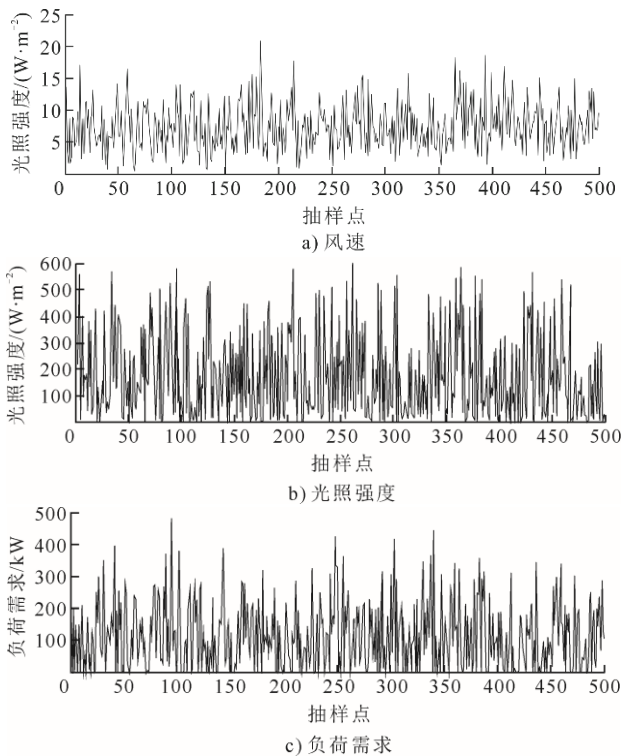


图 1 计及源荷相关性的风光荷采样值

Fig.1 The sample values considering correlations of source and load

3 含电动汽车充电负荷的场景聚类分析

本文所需的场景除风电、光伏的出力和普通负荷的需求功率外, 还包括电动汽车的充电负荷值。

电动汽车充电负荷的随机性来自用户的行为习惯, 目前暂无文献表明电动汽车充电负荷与风速、光照强度间有较为明显的相关性, 故由 2.2 节得到 N_2 个风力、光伏出力值和需求负荷相关性样本后, 与蒙特卡洛模拟得到的 N_1 个采样值组合, 正交得 $N=N_1 \times N_2$ 个含电动汽车的运行场景。

场景数过于庞大会对计算速度产生较大影响, 本文采用 K-means 算法对场景进行缩减。该方法效率高、算法简单、理论可靠, 且能够保证缩减后场景的多样性^[16]。因场景内元素标度的不同, 首先需要对场景元素进行归一化处理得到统一标度, 如式(13)所示。

$$\bar{x} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad \forall x \in P_{\text{WG}}, P_{\text{PV}}, P_{\text{LD}}, P_{\text{EV}} \quad (13)$$

式中, P_{WG} 为风电出力, P_{PV} 为光伏出力, P_{LD} 为负荷需求值, P_{EV} 为电动汽车充电所需功率。

将所得聚类中心及对应的场景发生概率作为典型运行场景数据, 以距离作为相似程度的评价指标, 并引入 Davies Bouldin 聚类有效性指标^[17]作为选取聚类中心点 K 的数量依据。聚类有效性指标 I_{DB} 表达式为

$$I_{\text{DB}}(k) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \max_{j \neq i} \left(\frac{d_i + d_j}{d_{ij}} \right) \quad (14)$$

式中, K 为聚类中心点数, d_i 为类 C_i 中所有样本到类 C_i 聚类中心的平均距离, d_j 为类 C_j 中所有样本到类 C_j 聚类中心的平均距离, d_{ij} 为类 C_i 到类 C_j 聚类中心的距离。

聚类有效性指标 I_{DB} 的值越小, 代表得到的结果更具有代表性与多样性。图 2 给出了聚类有效性指标 I_{DB} 与典型运行场景数量的关系曲线。

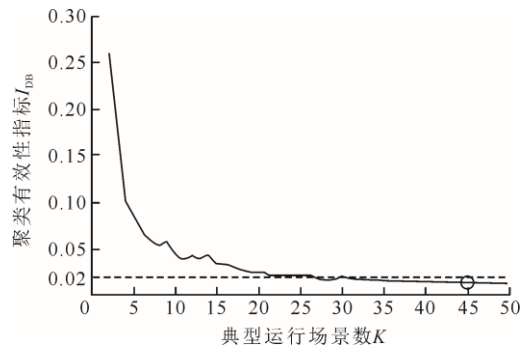


图 2 聚类有效性指标 I_{DB}

Fig.2 The cluster validity index I_{DB}

由图 2 可见, 当典型运行场景数大于 35 时, I_{DB} 值已经达到较小水平, 选取 $K=45$ 为聚类中心点

数,第 k 个典型运行场景对应的概率为 $P_r(k)(k=1, 2, \dots, 45)$ 。

通过 DB 聚类算法获得的聚类中心点数所对应典型运行场景将具有多样性与代表性,能够较好地应用于规划算法。利用 K-means 算法聚类后,需要将归一化后的变量还原为原本取值区间,得到计及源荷相关性含电动汽车的典型运行场景:

$$\xi_s = [P_{s,WG}, P_{s,PV}, P_{s,LD}, P_{s,EV}]^T \quad (s=1, 2, \dots, K) \quad (15)$$

4 分布式电源选址定容规划

4.1 目标函数

以年投资成本 C (单位:美元)最小为目标,以机会约束规划条件^[18]建立 DG 选址定容规划模型,年投资成本包括初期投资成本 C_g 、年运行维护费 C_m 以及向上级购电费用 C_b ,其数学表达式为

$$\min C = C_g + C_m + C_b \quad (16)$$

1) 初期投资成本 C_g 包括 DG 建设与占地费用等,数学表达式为

$$C_g = \frac{r(1+r)^y}{(1+r)^y - 1} \left[\sum_{s=1}^K P_r(s) \left(\sum_{i=1}^{n_1} C_{i,s,WG} S_{i,s,WG} + \sum_{i=1}^{n_2} C_{i,s,PV} S_{i,s,PV} \right) \right] \quad (17)$$

式中: r 为折现率, y 为使用年限, n_1 、 n_2 为安装风机和光伏分布式电源的节点数目, $P_r(s)$ 为场景 s 的概率, $C_{i,s,WG}$ 、 $C_{i,s,PV}$ 表示第 s 个场景中第 i 个节点中风机与光伏分布式电源单位容量初期投资成本, $S_{i,s,WG}$ 与 $S_{i,s,PV}$ 分别表示安装在第 s 个场景中第 i 个节点中的风机与光伏分布式电源的额定容量。

2) 年运行维护费包括 DG 和充电站的维护费用,数学表达式为

$$C_m = \sum_{s=1}^K P_r(s) \left(\sum_{i=1}^{n_1} C_{ow} E_{i,s,WG} + \sum_{i=1}^{n_2} C_{ov} E_{i,s,PV} \right) \quad (18)$$

式中, C_{ow} 、 C_{ov} 分别表示风机与光伏分布式电源的单位年发电量的维护费用, $E_{i,s,WG}$ 、 $E_{i,s,PV}$ 代表第 s 个场景中第 i 个节点中风机与光伏分布式电源的年发电量。

3) 向上级购电费用表达式为

$$C_b = \rho E_d \quad (19)$$

式中: ρ 为向上级的单位购电成本; E_d 为配电网向上级的购电量,其表达式为

$$E_d = P_r(s) \sum_{s=1}^K (P_{s,LD} + P_{s,EV} - \sum_{i=1}^{n_1} P_{i,s,WG} - \sum_{i=1}^{n_2} P_{i,s,PV}) \quad (20)$$

4.2 约束条件

1) 系统运行的潮流约束为:

$$P_{i,s} = U_{i,s} \sum_{j=1}^M U_{j,s} (G_{ij,s} \cos \delta_{ij,s} + B_{ij,s} \sin \delta_{ij,s}) \quad (21)$$

$$Q_{i,s} = U_{i,s} \sum_{j=1}^M U_{j,s} (G_{ij,s} \sin \delta_{ij,s} - B_{ij,s} \cos \delta_{ij,s}) \quad (22)$$

式中: s 为场景数,且 $s=1, 2, \dots, K$; M 为节点总数; $P_{i,s}$ 、 $Q_{i,s}$ 分别为第 s 个场景节点 i 注入的有功功率和无功功率; n 为配电网节点数; $U_{i,s}$ 、 $U_{j,s}$ 分别为节点 i 和 j 的电压幅值, $G_{ij,s}$ 、 $B_{ij,s}$ 、 $\delta_{ij,s}$ 分别为第 s 个场景的节点 i 和 j 之间的导纳和相角差。

2) 节点电压约束

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (23)$$

式中, U_i 为节点 i 处的电压, $U_{i,\max}$ 和 $U_{i,\min}$ 分别为节点 i 的电压上限与下限。

3) 支路电流约束

$$I_k \leq I_{k,\max} \quad (24)$$

式中, I_k 为支路 k 的电压, $I_{k,\max}$ 为支路 k 所允许的电流最大值。

4) DG 容量约束

$$\begin{cases} S_{i,DG} \leq S_{i,\max} \\ \sum_{i=1}^M S_{i,DG} \leq S_{DG,\max} \end{cases} \quad (25)$$

式中:第 1 式为节点最大安装容量约束,第 2 式为 DG 总容量约束; $S_{i,DG}$ 为节点 i 处安装的 DG 容量; $S_{i,\max}$ 为第 i 个节点允许安装的 DG 最大容量; $S_{DG,\max}$ 为配电网允许接入的总分布式电源容量。

5) DG 安装数量约束

$$\sum_i^n C_{i,WG} + \sum_i^n C_{i,PV} \leq C_{\max} \quad (26)$$

式中, $C_{i,WG}$ 、 $C_{i,PV}$ 表示节点 i 规划的风机、光伏分布式电源数目, C_{\max} 表示 DG 规划的数目上限。

4.3 收缩因子粒子群算法

收缩因子粒子群优化(constriction factor particle swarm optimization, CFPSO)算法在求解复杂、多目标系统问题时不会使种群多样性损失过快,从而导致算法过早收敛搜索不到最优值。本文采用该算法求最优规划解,具体步骤见文献^[19],此处不再赘述。算法规划流程如图 3 所示。

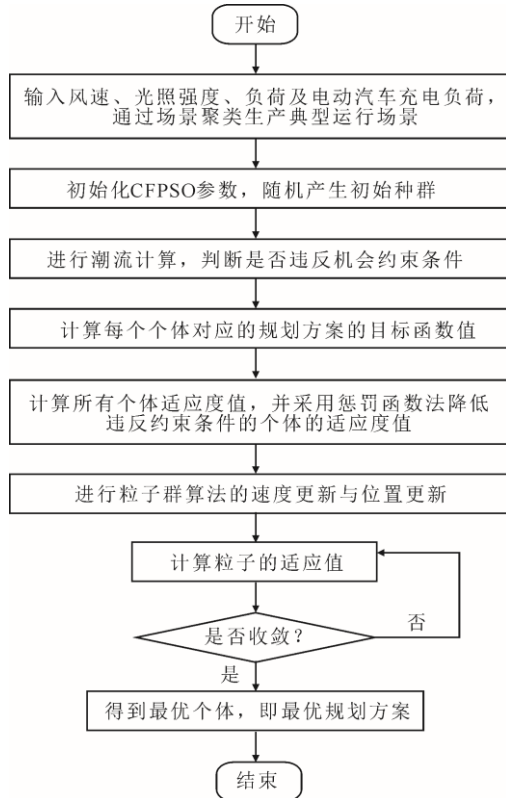


图 3 收缩因子粒子群优化算法的规划流程

Fig.3 The planning flow chart based on contraction factor particle swarm optimization algorithm

5 算例分析

5.1 DG 参数设置

按照上文的模型和算法，利用典型 IEEE 33 算例模型进行仿真验证，如图 4 所示。配电网的节点 1 为平衡节点，系统首端电压为 12.66 kV，在不考虑负荷不确定性的情况下，系统总负荷为 3 715 kW+2 300 kVar。设待规划节点为 7、11、15、18、29、32，除节点 1 外，每个节点均接入电动汽车。每个节点的分布式电源安装容量上限为 500 kW，单台分布式电源额定容量为 100 kW。

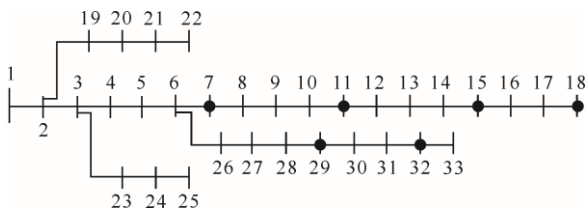


图 4 IEEE 33 算例结构

Fig.4 The IEEE 33-bus distribution network

设风速按照 $k=2.32$ 、 $c=8.96$ 的 Weibull 分布，切入风速为 3 m/s，切出风速为 20 m/s，额定风速为 13 m/s。光照强度服从 $\alpha=0.66$ 和 $\beta=1.82$ 的 Beta 分布，

额定光照强度 500 W/m²，最大光照强度 600 W/m²；负荷服从均值为 IEEE 33 算例中节点负荷设定值，标准差为均值的 10% 的正态分布。

设 WTG 的投资成本 1 500 美元/kW，运行维护费 0.03 美元/(kW h)；PVG 的投资成本 1 750 美元/kW，运行维护费 0.04 美元/(kW h)；配电网向上级购电费 0.05 美元/(kW h)，设备使用年限为 20 年。

设蒙特卡洛模拟得到 $N_1=96$ 个电动汽车充电负荷，拉丁超立方采样规模为 $N_2=500$ ，随机变量 $m=3$ （风速、光照强度、负荷需求），其相关系数矩阵为

$$\rho = - \begin{bmatrix} 1 & -0.159 & -0.188 \\ -0.159 & 1 & 0.245 \\ -0.188 & 0.245 & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

式中，不考虑相关性时， ρ 为单位矩阵。设改进的粒子群优化算法最大迭代数为 500，种群规模为 50，节点电压的允许范围为 [0.9, 1.1]，支路电流最大电流为 1.2 kA，节点电压与支路电流的置信水平为 0.95。

5.2 电动汽车参数设置

设电动汽车数量为 1 000。根据充电功率的大小，本文将电动汽车充电方式划分为 3 种类型：常规充电、半快速充电与快速充电^[20]。本文设置了 2 种情景：情景 1 为大多数电动汽车选择半快速充电与快速充电，情景 2 为多数电动汽车选择常规充电。2 种情景下 3 种充电方式的比率与充电功率 P_{EV} 取值范围设定值见表 1。

表 1 电动汽车充电功率
Tab.1 The charging power meters of the EVs

充电类型	充电功率 P_{EV}/kW	情景 1 比率/%	情景 2 比率/%
常规充电	[1.4, 1.9]	10	70
半快速充电	[7.7, 25.6]	40	20
快速充电	[40, 100]	50	10

设电池充电效率 $\eta=0.8$ ，额定能耗水平 $W_{EV}=12.5$ kW；电动汽车用户日行驶里程 d 服从 $\mu_d=12.94$ 、 $\sigma_d=3.44$ 的对数正态分布，用户最后一次出行结束时间 T 服从 $\mu_T=47.92$ 、 $\sigma_T=5.22$ 的正态分布。2 种情景下得到的电动汽车充电负荷曲线如图 5 所示。

5.3 规划结果

基于 5.1 节与 5.2 节的参数，根据本文模型与算法，在考虑风电出力、光伏出力与负荷需求之间相关性的情况下，在如表 1 所示的 2 种电动汽车不同充电方式比率的情景下，得到最优规划方案，如表 2 所示。

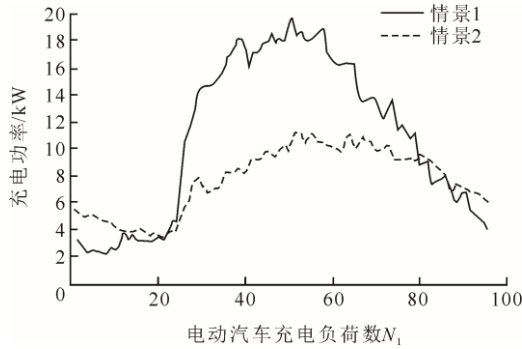


图 5 2 种情景下的电动汽车充电负荷曲线

Fig.5 The charging load curves of the EVs in two scenes

表 2 电动汽车不同充电方式下 DG 最优规划方案

Tab.2 The optimal planning scheme of DG for the EVs with different charging modes

项目	情景 1	情景 2
年投资成本 C ($\times 10^7$ 美元)	1.750 7	1.718 4

由表 2 可知，当电动汽车选择的充电方式不同时，所需的年投资成本 C 不同。当大多数电动汽车选择半快速充电或者快速充电时，年投资成本会比多数电动汽车选择常规充电更高。这是因为快速充电以及半快速充电会增大电动汽车充电负荷，加重线路负载率，如图 4 所示。随着电动汽车用户的增长，电动汽车充电负荷的渗透率也将随之增长，所以应提倡用户采用常规充电方式。

考虑风电出力、光伏出力与负荷需求之间相关性与不考虑相关性的规划方案见表 3。

表 3 考虑相关性的 DG 最优规划方案

Tab.3 The optimal planning scheme of DG considering the correlation

项目	不考虑相关性 ^①	考虑相关性 ^①
WTG	7(2), 15(1), 18(2), 29(1)	7(1), 11(2), 15(1), 32(2)
PVG	7(1), 15(2), 18(1)	11(1), 29(2), 32(1)
初期投资成本 C_g ($\times 10^6$ 美元)	6.981 2	6.981 2
年运行维护费 C_m ($\times 10^5$ 美元)	2.129 3	2.129 3
向上级购电费用 C_b ($\times 10^7$ 美元)	1.100 4	0.998 99
年投资成本 C ($\times 10^7$ 美元)	1.819 8	1.718 4

注：①括号内的数字代表该节点安装的 DG 台数。

根据表 3 所示的 DG 最优规划结果可知，考虑与不考虑 WTG、PVG 出力与需求负荷之间的相关性将会得到不同的最优规划方案和年投资成本 C 。2 种方案的总安装 DG 数相同，故所需的初期投资成本 C_g 、年运行维护费 C_m 相同。但每个节点安装的 WTG 与 PVG 的个数不同，该规划的差异来自相关系数不同所得到的不同运行场景。风速和负荷之

间呈负相关性，光照强度与负荷之间呈正相关性，光照强度与风速之间呈负相关性，它们之间的相关性影响了选址定容结果。不同的运行场景也同样导致向上级购电费用 C_b 的差异，继而影响了年投资成本。由规划结果可得，考虑相关性时年投资成本 C 将会比不考虑相关性时低 5.9%，不考虑相关性将影响规划方案的经济性。

6 结 论

1) 通过拉丁超立方抽样并结合 Cholesky 分解与 Nataf 变换，得到了具有相关性的风速、光照强度与需求负荷样本；

2) 基于蒙特卡洛模拟得到随机性的电动汽车充电负荷，与考虑不确定因素的风电、光伏出力与负荷需求相结合，通过场景聚类得到典型运行场景；

3) 算例结果表明：电动汽车用户选择常规充电方式充电能够降低电网负荷；考虑风力、光伏与负荷需求之间的相关性，能够降低 5.9% 的年投资成本，规划方案将更具有经济性和指导意义。

[参 考 文 献]

[1] 田世明, 栾文鹏, 张东霞, 等. 能源互联网技术形态与关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3482-3494.
TIAN Shiming, LUAN Wenpeng, ZHANG Dongxia, et al. Technical forms and key technologies on energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3482-3494.

[2] 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.

[3] HAGHDADI N, ASAEI B, GANDOMKAR Z. Clustering-based optimal sizing and siting of photovoltaic power plant in distribution network[C]. Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2012 11th International Conference on IEEE, 2012.

[4] 杨毅, 韦钢, 周冰, 等. 含分布式电源的配电网模糊优化规划[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(13): 19-23.
YANG Yi, WEI Gang, ZHOU Bing, et al. Optimized fuzzy planning of the distribution network including distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(13): 19-23.

[5] CELI G, GHIANI E, MOCCI S, et al. A multi-objective evolutionary algorithm for the sizing and siting of distributed generation[J]. IEEE Transaction on Power System, 2005, 20(2): 750-757.

[6] 蒋煜, 丁晓群, 郑程拓, 等. 含电动汽车的主动配电网分布式电源规划[J]. 广东电力, 2017, 30(7): 1-6.
JIANG Yu, DING Xiaqun, ZHENG Chengtuo, et al. Distributed generation planning for active distribution network with electric vehicle[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(7): 1-6.

- [7] 张沈习, 李珂, 程浩忠, 等. 考虑相关性的间歇性分布式电源选址定容规划[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 53-58.
ZHANG Shenxi, LI Ke, CHENG Haozhong, et al. Optimal siting and sizing of intermittent distributed generator considering correlations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 53-58.
- [8] 李珂, 邵能灵, 张沈习, 等. 考虑相关性的分布式电源多目标规划方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 51-57.
LI Ke, TAI Nengling, ZHANG Shenxi, et al. Multi-objective planning method of distributed generators considering correlations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 51-57.
- [9] ZHANG S, CHENG H, LI K, et al. Optimal siting and sizing of intermittent distributed generators in distribution system[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2015, 10(6): 628-635.
- [10] 孙若笛, 谢开贵. 计及风速-负荷相关性的配电网可靠性评估 Monte Carlo 模拟法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 12-18.
SUN Ruodi, XIE Kaigui. Reliability evaluation of distribution networks using Monte Carlo method considering correlations between wind speed and load[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 12-18.
- [11] BAUER P, ZHOU Y, DOPPLER J, et al. Charging of electric vehicles and impact on the grid[C]. 2010 13th International Symposium. IEEE, 2010.
- [12] YU H, CHUNG C Y, WONG K P, et al. Probabilistic load flow evaluation with hybrid Latin hypercube sampling and Cholesky decomposition[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 661-667.
- [13] 蒋程, 王硕, 王宝庆, 等. 基于拉丁超立方采样的含风电电力系统的概率可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2016(10): 193-206.
JIANG Cheng, WANG Shuo, WANG Baoqing, et al. Probabilistic reliability assessment of power system containing wind power based on Latin hypercube sampling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016(10): 193-206.
- [14] 韩海腾, 高山, 吴晨, 等. 基于 Nataf 变换的电网不确定性多点估计法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 28-34.
HAN Haiteng, GAO Shan, WU Chen, et al. Uncertain power flow solved by multi-point estimate method based on Nataf transformation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 28-34.
- [15] 罗钢, 石东源, 蔡德福, 等. 计及相关性的含风电场电力系统概率可用输电能力快速计算[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1024-1032.
LUO Gang, SHI Dongyuan, CAI Defu, et al. Fast calculation of probabilistic available transfer capability considering correlation in wind power integrated systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1024-1032.
- [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]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 35(10): 58-65.
- [17] DAVIES D L, BOULDIN D W. A cluster separation measure[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1979, 1(2): 224-227.
- [18] 柳璐, 程浩忠, 马则良, 等. 考虑全寿命周期成本的输电网多目标规划[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22): 46-54.
LIU Lu, CHENG Haozhong, MA Zeliang, et al. Multi-objective transmission expansion planning considering life cycle cost[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(22): 46-54.
- [19] CLERC M, KENNEDY J. The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(1): 60-73.
- [20] 徐立中, 杨光亚, 许昭, 等. 电动汽车充电负荷对丹麦配电系统的影响[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 18-23.
XU Lizhong, YANG Guangya, XU Zhao, et al. Impacts of electric vehicle charging on distribution networks in Denmark[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 18-23.

(责任编辑 李园)