

DOI: 10.7667/PSPC180379

# 主动配电网中考虑空间与时间相关性的 分布式光伏并网规划

宋淼<sup>1</sup>, 王克文<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 在考虑光伏出力空间与时间相关性的基础上, 利用机会约束规划方法建立了主动配电网下计及光伏总费用、电网运行成本、主动管理费用的多目标分布式光伏并网规划模型。首先建立不同类型光伏出力的空间与时序概率模型, 并引入随机变量。当光伏出力为空间概率模型时, 利用等概率转换原则与 Cholesky 分解技术处理随机变量在空间上的相关性; 当光伏出力为时序概率模型时, 利用舍选抽样法处理随机变量在时间上的相关性并形成样本矩阵。最后在求解模型时采用一种随机模拟技术与基于粒子群算法的布谷鸟算法(CAPSO)相结合的混合智能算法进行求解。选取 IEEE33 系统进行算例分析, 仿真结果表明, 该模型提高了分布式电源并网渗透率, 同时降低了主动配电网规划过程中的综合经济成本。

**关键词:** 主动配电网; 分布式光伏电源; 空间相关性; 时间相关性; 机会约束规划

## Planning of distributed PV grid-access considering the space and time correlation in active distribution network

SONG Miao<sup>1</sup>, WANG Kewen<sup>2</sup>

(1. School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;  
2. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** On the basis of considering the space and time correlation of photovoltaic (PV), a multi-objective distributed PV grid-access planning model including PV total cost, power grid operation cost and active management fee is established by using the chance constrained programming under the active power distribution network. Firstly, the spatial and temporal probability models of different types of PV are established and the random variables are introduced. When the PV is the spatial probability model, the equal probability conversion principle and the Cholesky decomposition technology are used to deal with the spatial correlation of the random variables; when the PV is the time probability model, the method of selection sampling is used to deal with the temporal correlation and form the sample matrix. Finally, a hybrid intelligent algorithm combining random simulation techniques and Cuckoo Algorithm based on Particle Swarm Optimization (CAPSO) is used to solve the above model. The IEEE33 system is selected for example analysis, the simulation results show that the proposed method improves the distributed PV network penetration and reduces the comprehensive economic cost in the process of active distribution network planning.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61473265).

**Key words:** active distribution network; distributed photovoltaics power; spatial correlation; temporal correlation; chance constrained optimization

## 0 引言

电力发展“十三五”规划中提出, 截至到 2020 年我国光伏发电装机容量将达到 2 000 MW, 分布式

光伏发电将成为太阳能利用的主要形式<sup>[1]</sup>。为有效解决分布式光伏电源大规模并网消纳问题, 主动配电网(Active Distribution Network, ADN)<sup>[2]</sup>将成为未来智能配电网的一种主要发展形式。由于光伏电源输出功率易受外界环境的影响, 具有很强的随机波动性, 其大规模并网将使得系统潮流发生复杂的随

机变化, 给电网的安全稳定运行带来一系列挑战<sup>[3-4]</sup>。而处于邻近地理位置的光伏电源出力之间、光伏与气象条件敏感的负荷出力之间具有空间相关性, 相邻时刻光伏电源自身出力之间具有时间相关性, 这些相关性对给主动配电网规划运行等方面产生影响<sup>[5-6]</sup>。因此, 在分布式光伏并入 ADN 的规划过程中要计及空间与时间相关性特征。

目前, 国内外学者已对间歇性 DG 并网规划方法进行了一些研究, 其中文献[7]建立了考虑潮流倒送约束的分布式光伏电源选址定容规划模型, 分析了安装断路器支路的潮流不倒送对 DG 并网规划结果的影响。文献[8-9]建立了间歇性 DG 并网的双层规划模型, 上层模型以经济性最优为目标函数, 下层模型以 DG 出力最大为目标函数, 详细分析了主动管理措施对间歇性 DG 并网规划结果的影响。文献[10-11]考虑需求侧响应影响建立了多目标协调规划模型, 分析了需求侧响应对 DG 并网优化结果的影响。文献[12]以网损最小和电压支撑效果最佳为目标函数建立了 DG 选址定容规划模型, 分析了不同负荷水平下对 DG 选址定容的影响。文献[13]考虑了间歇性电源出力的随机性, 建立了 ADN 中促进间歇性 DG 高效利用的场景规划模型, 通过分析双层模型对 DG 优化配置结果的影响。上述文献只是在考虑 DG 随机性的基础上, 从不同的角度建立模型对 DG 并网进行规划研究, 但是忽略了光伏之间、光伏与负荷之间的空间相关性, 光伏自身出力各时刻之间的时间相关性特点, 而实际上处于邻近地理位置的光伏之间、光伏与气象条件敏感的负荷之间在空间上存在相关性, 光伏自身出力相邻时刻之间在时间上也存在相关性。这些相关性对光伏准并网规划过程产生不可忽视的影响。

本文在考虑光伏出力空间与时间相关性的基础上, 建立了以光伏总费用、电网运行成本、主动管理费用的多目标机会约束规划模型。通过建立不同类型的光伏空间概率模型、时序概率模型, 分别采用等概率转换原则与 Cholesky 分解技术的相关矩阵法、舍选抽样法对光伏进行空间与时间相关性的处理, 并分别形成空间与时间相关的样本矩阵。在此基础上采用随机模拟技术与基于粒子群算法的布谷鸟算法(the Cuckoo algorithm based on particle swarm optimization, CAPSO)相结合的混合智能算法对上述规划模型进行求解。选取 IEEE33 节点系统进行算例分析, 结果表明, 本文方法在提高分布式光伏并网渗透率的同时, 降低了 ADN 规划过程中的总经济成本。

## 1 光伏与负荷的概率模型

光伏出力易受外界环境如光照强度、温度等因素的影响, 具有随机性特点, 且相邻地区的不同光伏电源出力之间、光伏电源与气象条件敏感负荷出力之间存在一定的空间相关性, 同一光伏电源各时刻出力之间存在一定的空间相关性, 为了在分布式光伏并入 ADN 的规划过程中计及该相关性, 首先需建立光伏与负荷出力的概率模型。

### 1.1 光伏空间概率模型

光伏电源的出力与光照强度等因素密切相关, 一定时段内的光照强度服从 Beta 分布, 可知一定时段内光伏出力也为 Beta 分布<sup>[14]</sup>, 其概率密度函数为

$$f(P_{PV}) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{P_{PV}}{P_{\max}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{P_{PV}}{P_{\max}}\right)^{\beta-1} \quad (1)$$

式中:  $P_{PV}$ 、 $P_{\max}$  分别为光伏随机出力 and 最大出力;  $\Gamma$  为 Gamma 函数;  $\alpha$ 、 $\beta$  为光照强度 Beta 分布的形状参数, 由一定时段内光照强度的均值  $\mu$  和标准差  $\sigma$  得到, 为

$$f(P_L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} \exp\left[-\frac{(P_L - \mu_p)^2}{2\sigma_p^2}\right] \quad (2)$$

### 1.2 光伏时序概率模型

光伏电源自身各时刻出力之间具有时间相关性, 基于条件概率和两变量核密度估计理论, 建立一种考虑时间相关性的光伏概率模型<sup>[14]</sup>, 其条件概率密度函数为

$$f(P_i/P_{i-1}) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{h_j h_{j-1}} K\left(\frac{P_i - P_{j,i}}{h_j}\right) K\left(\frac{P_{i-1} - P_{j,i-1}}{h_{j-1}}\right)}{\frac{1}{nh_{i-1}} \sum_{j=1}^n K\left(\frac{P_{i-1} - P_{j,i-1}}{h_{j-1}}\right)} \quad (3)$$

式中,  $P_i$ 、 $P_{i-1}$  分别为光伏当前、前一时刻的出力。

### 1.3 负荷概率模型

一定时段内负荷出力的有功、无功服从正态分布, 其概率密度函数为

$$f(P_L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} \exp\left[-\frac{(P_L - \mu_p)^2}{2\sigma_p^2}\right] \quad (4)$$

$$f(Q_L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Q} \exp\left[-\frac{(Q_L - \mu_Q)^2}{2\sigma_Q^2}\right] \quad (5)$$

式中:  $\mu_p$ 、 $\mu_Q$  分别为负荷有功、无功功率的均值;  $\sigma_p$ 、 $\sigma_Q$  分别为有功、无功功率的标准差。

## 2 随机变量在空间与时间上的相关性处理

由于邻近地理位置的光伏之间、光伏与负荷之间存在空间相关性<sup>[15]</sup>, 光伏自身各时刻出力之间存在时间相关性。针对此问题, 当考虑空间相关性时, 由于光伏的空间概率模型为单变量函数形式, 则利用基于等概率转换原则与 Cholesky 分解技术进行处理<sup>[16]</sup>; 当考虑时间相关性时, 由于光伏的时序概率模型为多变量函数形式, 采用舍选抽样法<sup>[14]</sup>进行处理。具体原理及过程如下。

### 2.1 基于等概率转换原则与 Cholesky 分解技术的变量空间相关性处理

假设有  $b$  个相关的变量为  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 其中  $a$  个服从 Beta 分布的光伏,  $b-a$  个服从正态分布的负荷。 $f(x_i)$ 、 $F(x_i)$  分别为随机变量  $x_i$  的概率密度函数和累积分布函数,  $\rho_{ij}$  为两个变量  $x_i$ 、 $x_j$  之间的相关系数。依据下式可将向量  $X$  转换为相关的服从正态分布的向量  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ 。

$$\begin{cases} \Phi_i(y_i) = F(x_i) \\ x_i = F_i^{-1}(\Phi_i(y_i)) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\Phi_i(y_i)$  为正态分布的累积分布函数;  $F_i^{-1}()$  为光伏与负荷的累积分布函数  $F_i()$  的反函数。

由式(6)的相关系数的定义, 可以得到向量  $X$  中各变量之间相关系数矩阵  $\rho_{ij}$  与标准正态分布随机向量  $Y$  中各变量之间的相关系数  $\rho_{yij}$ 。

$$\rho_{ij} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ \frac{F_i^{-1}(\Phi(y_i)) - \mu_i}{\sigma_i} \right] \left[ \frac{F_j^{-1}(\Phi(y_j)) - \mu_j}{\sigma_j} \right] \phi_2(y_i, y_j, \rho_{yij}) dy_i dy_j \quad (7)$$

式中,  $\phi_2(y_i, y_j, \rho_{yij})$  为二维标准正态分布变量之间的联合密度函数。由式(7)得到标准正态随机向量  $Y$  对应的相关系数矩阵  $\rho_y$  为

$$\rho_y = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{y12} & \dots & \rho_{y1n} \\ \rho_{y21} & 1 & \dots & \rho_{y2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{yn1} & \rho_{yn2} & \dots & \rho_{ynn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

再将相关的标准正态随机向量  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$  转换为相互独立的标准正态随机向量  $H = (h_1, h_2, \dots, h_n)$ 。

利用 Cholesky 分解技术将  $\rho_y$  进行分解, 得到下三角矩阵  $C$ 。

$$\rho_h = CC^T \quad (9)$$

再由式(10)即可实现向量  $Y$  到  $H$  的转换。

$$H = C^{-1}Y \quad (10)$$

### 2.2 基于舍选抽样法的变量时间相关性处理

光伏时序概率模型为复杂的条件概率与多变量核密度估计形式, 则选用舍选抽样法处理光伏输出功率在时间上的相关关系。假设有  $r$  维随机向量  $C = [c_1, c_2, \dots, c_r]$ , 其联合概率密度函数为  $f(C)$ ,  $C$  的取值域为  $r$  维长方体  $[A, B]$ ,  $A = [a_1, a_2, \dots, a_r]$ ,  $B = [b_1, b_2, \dots, b_r]$ ,  $f(C)$  的最大值为  $M$ , 样本为  $X = [x_1, x_2, \dots, x_r]$ 。具体抽样过程如下:

1) 建立光伏输出功率时序概率模型、负荷概率模型, 输入光伏输出功率的数据、时刻数  $d$  与随机变量维数  $r$ 。

2) 产生  $[0, 1]$  区间内的均匀分布的  $r$  维随机向量  $C = [c_1, c_2, \dots, c_r]$ 。

3) 根据  $X$  的取值域  $[A, B]$ , 根据公式  $e_i = x_i(b_i - a_i) + a_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, r$ , 求得随机样本  $E = [e_1, e_2, \dots, e_r]$ 。

4) 若  $C \leq f(E)/M$ , 则令  $X = E$ ; 否则返回步骤 2) 继续采样。

5) 判断时刻数  $d$  是否达到最大值, 是则停止采样, 否则返回步骤 2) 继续采样。

6) 重复步骤 2)~5), 获取各节点光伏电源输出功率时序概率模型的时间相关样本数据。

## 3 考虑空间与时间相关性的分布式光伏并网机会约束规划模型

本文利用机会约束规划方法建立分布式光伏并网规划模型, 机会约束规划方法将传统确定性方法中的不等式约束条件转化为机会约束概率形式, 并依据约束条件的可信程度选择置信水平  $\beta$ 。本文机会约束规划模型如图1所示。

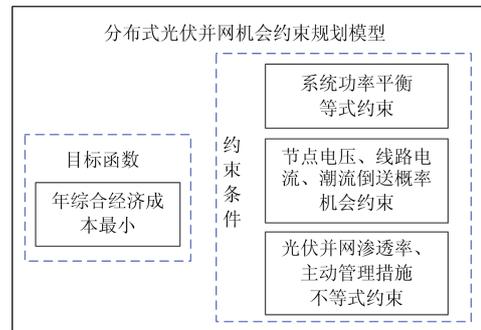


图1 规划模型

Fig. 1 Planning model

### 3.1 目标函数

本文采用机会约束规划方法建立分布式光伏并网的规划模型, 目标函数包括光伏侧总成本  $C_{PV}$ 、电网运行成本  $C_G$ 、主动管理成本  $C_{AM}$  等三个方面。

$$\min C = C_{PV} - C_G + C_{AM} \quad (11)$$

#### 1) 光伏总成本 $C_{PV}$

光伏总成本  $C_{PV}$  包括光伏安装成本  $C_{PV}^I$ 、运行成本  $C_{PV}^O$ 、维护成本  $C_{PV}^M$ , 即

$$C_{PV} = C_{PV}^I + C_{PV}^O + C_{PV}^M = R_{pv} C_{pv}^i \sum_{i=1}^{N_d} P_{pv,i}^r +$$

$$C_{pv}^o \sum_{i=1}^{N_d} (P_{pv,i} \cdot t_i) + C_{pv}^m \sum_{i=1}^{N_d} (P_{pv,i} \cdot t_i)$$

式中:  $R_{pv} = \frac{d(1+d)^{y_{pv}}}{(1+d)^{y_{pv}} - 1}$  为分布式光伏现值转等年值系数, 其中的  $y_{pv}$  为光伏电源使用年限,  $d$  为贴现率;  $N_d$  为光伏并网节点数;  $P_{pv,i}^r$ 、 $P_{pv,i}$  分别为  $i$  节点的光伏额定容量、光伏随机有功出力;  $C_{pv}^i$ 、 $C_{pv}^o$  分别为分布式光伏单位容量对应的安装、运行维护成本;  $t_i$  为节点  $i$  的光伏在一年的运行时间。

#### 2) 电网运行成本 $C_G$

电网运行成本  $C_G$  包括环境成本  $C_E$ 、网络损耗成本  $C_{Loss}$ , 即

$$C_G = C_E + C_{Loss} = T(C_e \cdot P_g + C_{loss} \cdot P_{loss}) \quad (13)$$

式中:  $C_e$ 、 $C_{loss}$  分别为单位电量对应废气排放成本、单位损耗电量的成本;  $P_{loss}$ 、 $P_g$  为对应的网络损耗、向上级主网的购电量;  $T$  为一年的天数。

#### 3) 主动管理成本 $C_{AM}$

考虑光伏主动管理具有一定的成本, 即

$$C_{AM} = C_{am} \sum_{i=1}^{N_d} (P_{pv,i} \cdot t_i) \quad (14)$$

式中,  $C_{am}$  为光伏单位发电量的管理成本。

#### 4) 多目标转化为单目标

将以上 3 个目标函数转化为以综合经济成本最小为目标的单目标函数<sup>[16]</sup>, 即

$$\min C = \xi C_{PV} + \mu C_G + \gamma C_{AM} \quad (15)$$

式中,  $\xi$ 、 $\mu$ 、 $\gamma$  为权重系数, 根据各成本对总成本的影响大小确定权重系数,  $\xi$ 、 $\mu$ 、 $\gamma$  分别为 0.4、0.3、0.3, 满足  $\xi + \mu + \gamma = 1$ 。

### 3.2 等式约束

等式约束, 主要为潮流方程。

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{k \in A(i)} U_k (G_{ik} \cos \delta_{ik} + B_{ik} \sin \delta_{ik}) \\ Q_i = U_i \sum_{k \in A(i)} U_k (G_{ik} \sin \delta_{ik} - B_{ik} \cos \delta_{ik}) \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $P_i$ 、 $Q_i$  分别为节点  $i$  处注入的有功、无功功率;  $U_{ik}$  为电压幅值;  $\delta_{ik}$  为电压相角差;  $G_{ik}$ 、 $B_{ik}$  为网络导纳。

### 3.3 机会约束

机会约束包括节点电压、线路载流量、功率倒送主网等。

$$\begin{cases} \Pr\{U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max}\} \geq \beta_U \\ \Pr\{I_k \leq I_{\max}\} \geq \beta_I \\ \Pr\{P_G - P_{PV} \geq 0\} \geq \beta_g \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $\Pr\{\cdot\}$  为事件成立的概率;  $\beta_U$ 、 $\beta_I$ 、 $\beta_g$  分别为电压、线路载流量、功率倒送主网的置信水平;  $U_{\max}$ 、 $U_{\min}$  分别为节点电压上下限;  $I_k$ 、 $I_{\max}$  为第  $k$  条线路的电流幅值、最大值;  $P_{PV}$ 、 $P_G$  分别为光伏总容量和主网供给的容量。

### 3.4 不等式约束

不等式约束包括分布式光伏并网渗透率和主动管理措施约束。其中光伏并网渗透率约束为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{PV,i} \leq P_{PV,i,\max} \\ P_{PV,\max} / P_{L,\max} \leq P_{SE,\max} \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $P_{PV,i,\max}$  为节点  $i$  处光伏并网容量上限;  $P_{PV,\max}$ 、 $P_{L,\max}$  分别为光伏总容量、系统负荷总容量的上限;  $P_{SE,\max}$  为系统允许的光伏最大渗透率。

主动管理措施主要包括变压器二次侧的电压  $V_{OLTC}$ , 光伏运行的功率因数  $\cos \varphi_{pv}$ , 光伏有功消减率  $\sigma_{pv,i}^{cur}$ 。

$$\begin{cases} V_{OLTC,\min} \leq V_{OLTC} \leq V_{OLTC,\max} \\ \cos \varphi_{pv,i,\min} \leq \cos \varphi_{pv,i} \leq \cos \varphi_{pv,i,\max} \\ 0 \leq \sigma_{pv,i}^{cur} \leq \sigma_{pv,i,\max}^{cur} \end{cases} \quad (19)$$

式中, 下标  $\max$ 、 $\min$  分别为各主动管理指标的上下限。

## 4 随机模拟技术嵌入 CAPSO 的模型求解

上述模型的求解方法包括随机模拟技术和基于粒子群算法的布谷鸟智能算法<sup>[17]</sup>(CAPSO)两部分。其中 CAPSO 将 PSO 用于 CA 的位置更新过程, 既保持了 PSO 搜索的随机性, 又降低了 CA 搜索的盲目性, 加快了粒子最优解的收敛速度。

#### 4.1 基于随机模拟技术的概率潮流的计算

结合第3节提出的随机变量相关性处理方法,采用随机模拟技术求解含光伏电源的随机概率潮流。计算步骤为

1) 输入光伏、负荷概率模型的分布类型及参数,空间上随机变量之间的相关系数,时间上随机变量维数与时刻数。

2) 根据第3节得到光伏时间与空间相关的样本矩阵 $\mathbf{X}$ 。

3) 对于相互独立的光伏与负荷随机变量,直接利用LHS采样技术生成随机样本矩阵 $\mathbf{Z}$ 。

4) 将相关、独立的样本矩阵 $\mathbf{X}$ 、 $\mathbf{Z}$ 中的元素代入到潮流方程进行 $m$ 次确定的潮流计算。

5) 统计各节点电压、线路电流、支路首端功率等输出变量在合格范围内的概率。

#### 4.2 随机模拟技术嵌入 CAPSO 中求解规化模型

本文利用随机模拟技术嵌入 CAPSO 的混合智能算法求解光伏并网机会约束规划模型。应用 CAPSO 求解优化模型具体算法步骤如下:

1) 输入电网参数;潮流计算所需参数;CAPSO 参数及设定鸟窝的数量 $n$ ,迭代次数 $M$ ,鸟蛋被发现概率 $p$ ,权重的上下限 $\omega_{\max}$ 、 $\omega_{\min}$ ,学习、社会因子 $\eta$ 、 $\varpi$ 。

2) 初始化 CAPSO 鸟窝种群;随机生成鸟窝初始位置矩阵 $\mathbf{G}_0^t$ 、初始速度矩阵 $\mathbf{V}_0^t$ 。

3) 利用 4.1 节步骤对位置矩阵 $\mathbf{G}_0^t$ 进行抽样形成随机相关样本矩阵,计算随机潮流,统计潮流计算结果,并判断各机会约束条件是否满足要求。

4) 若满足,计算目标函数适应度,否则,将该目标函数加上惩罚因子计算其适应度值,并得出个体最优 $G_{\text{best}}$ 、群体最优 $Z_{\text{best}}$ 。

5) 按照 $\omega = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \times t / T$ 计算动态权重,并根据下式更新粒子速度与位置矩阵。

$$v_i^{t+1} = \omega v_i^t + \eta \times \text{randn} \times [G_{\text{best}} - x_i^t] + \varpi \times \text{randn} \times [Z_{\text{best}} - x_i^t] \quad (20)$$

$$G_i^{t+1} = G_i^t + V_i^{t+1} \quad (21)$$

得到新的位置矩阵 $\mathbf{G}_1^t$ ,其中 $\text{randn}$ 为正态分布的随机数。

(1) 计算 $\mathbf{G}_0^t$ 与 $\mathbf{G}_1^t$ 的目标函数值,择优组成矩阵 $\mathbf{G}_2^t$ 。

(2) 给出 $\mathbf{G}_2^t$ 中每个鸟窝服从均匀分布的淘汰概率,构成矩阵 $\mathbf{r} = (r_1, r_2, \dots, r_n)$ ,并与被发现概率 $p$ 比较,得到矩阵 $\mathbf{G}_3^t$ 。

$$G_3^t = \begin{cases} G_2^t, r_i \leq p \\ S_{\text{PVi.min}} + (S_{\text{PVi.max}} - S_{\text{PVi.min}}) \times \text{randn}(n,1), r_i > p \end{cases} \quad (22)$$

计算 $\mathbf{G}_2^t$ 与 $\mathbf{G}_3^t$ 的目标函数值,并组成矩阵 $\mathbf{G}_4^t$ 。留下 $\mathbf{G}_4^t$ 中质量最好的位置并记为 $X_{\text{best}}$ ,判断是否已经达到误差要求,若达到则停止,输出最优结果;否则,比较 $\mathbf{G}_4^t$ 与 $\mathbf{G}_0^t$ ,更新个体最优 $G_{\text{best}}$ 与群体最优 $Z_{\text{best}}$ 。令 $t = t + 1$ ,转步骤 3)继续迭代。

模型求解流程如图 2 所示。

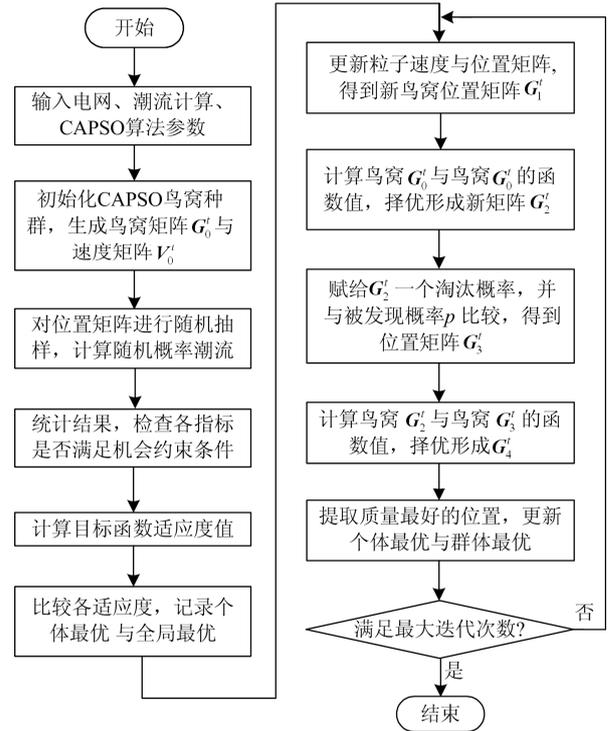


图 2 模型求解流程图

Fig. 2 Flow chart of model

## 5 算例分析

本文以 IEEE33 节点配电系统进行仿真分析,电压等级为 12.66 kV,节点电压范围为 0.95~1.05(标幺值),置信水平为 0.95,单节点光伏并网容量上限为 1 MW,最大渗透率为 70%。依据光伏接入系统对电压分布、网损、可靠性的影响,确定光伏并网候选安装位置<sup>[18]</sup>为(7、17、24、31)。光伏模型参数来自文献[14],各经济参数取自文献[17],各主动管理措施的取值参考文献[18]。求解算法参数设置:CAPSO 算法中鸟窝的数量为 20,最大迭代次数为 100,鸟蛋被发现的概率为 0.25,权重的上下限为 0.5、0.1,学习、社会因子为 0.2、0.5。抽样次数为 $m$ 为 500;舍选抽样法维数 $r = 2$ ,时刻数 $d$ 为 24。

### 5.1 随机模拟技术嵌入 CAPSO 的混合智能算法的性能分析

针对建立的光伏空间、时序概率模型, 在随机概率潮流的计算过程中, 采用本文方法处理时间、空间相关性并计算概率潮流。同时利用蒙特卡洛(MC)技术模拟光伏出力计算概率潮流, 采样规模为 20 000 次, 并与本文方法进行对比。其中, 相关系数  $\rho=0.3$ , 置信水平  $\beta=0.95$ 。两种方法得到的潮流计算结果中支路电流的核估计概率分布曲线如图 3 所示。

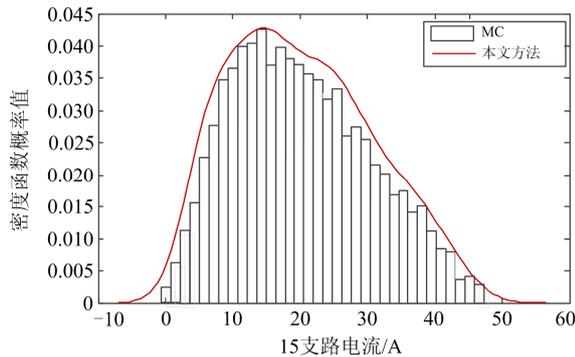


图 3 支路电流概率密度曲线

Fig. 3 Branch current probability density curve

由图 3 可知, 本文方法得出的支路电流核密度曲线与 MC 得出的柱状图边缘非常接近, 表明本文方法在计算概率潮流时所得结果具有较高的准确度, 能够使规划结果更加精确。

分别采用 CAPSO、PSO、CA 算法求解规划模型, 其中, 3 种算法的种群规模和最大迭代次数等参数相同。适应度曲线对比如图 4 所示。

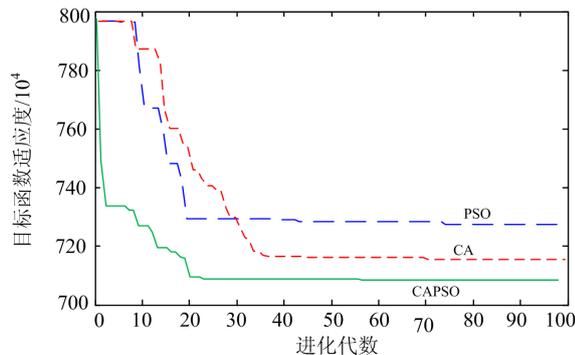


图 4 算法适应度曲线对比图

Fig. 4 Algorithm fitness curve comparison chart

由图 4 可知, CA 算法的收敛速度较慢, 搜索效率很低; PSO 算法容易陷入局部最优, 其收敛精度较差; 而 CAPSO 将 PSO 的位置更新过程应用于 CA 的种群位置的更新, 既保持了搜索过程的随机性, 又

降低了搜索过程的盲目性, 加快了收敛的速度, 同时提高了收敛精度。因此 CAPSO 是一种收敛精度和收敛速度均较理想的优化算法, 能够使得光伏并网规划结果更加精确。

### 5.2 空间、时间相关性对规划结果的影响

#### 1) 空间相关性对规划结果的影响

为分析光伏之间、光伏与负荷之间的空间相关性对规划结果的影响, 分别设变量之间的相关系数  $\rho$  分别为 0、0.3、0.6。规划结果如表 1 所示。

表 1 空间相关性对规划结果的影响

相关系数	节点 7	节点 17	节点 24	节点 31	总容量/kW	总成本/万元
0	780	750	670	620	2 820	1 459
0.3	800	760	700	660	2 910	1 438
0.6	840	800	740	710	3 090	1 380

由表 1 可知, 随着变量空间相关性的增强, 光伏并网渗透率提高, 总成本降低。分析原因可知, 随着变量之间相关性的增强, 光伏与负荷之间变化的同步性增强, 即光伏以更大的可能性跟随负荷出力的变化而变化, 提高了光伏并网渗透率; 光伏渗透率的提高增加了主动管理成本, 但考虑到电网运行成本的降低, 且降低的成本大于增加的成本, 所以总成本降低。因此, 若考虑变量之间的空间相关性, 能够提高光伏渗透率, 同时降低规划总成本。

#### 2) 时间相关性对规划结果的影响

为分析光伏出力的空间相关性对规划结果的影响, 设定变量维数  $r=2$ , 时刻数  $d=24$ , 规划结果如表 2 所示。

表 2 时间相关性对规划结果的影响

时间相关	节点 7	节点 17	节点 24	节点 31	总容量/kW	总成本/万元
否	780	750	670	620	2 820	1 459
是	820	780	710	650	2 960	1 398

由表 2 可知, 当考虑时间相关性时, 光伏并网渗透率提高且与总成本降低。分析原因可知, 当考虑时间相关性时, 光伏出力在相邻时刻变化的同步性增强, 各时刻出力之间波动性减小, 各电网指标的波动性也减小, 越限的可能性降低。随着光伏并网容量的增加, 虽然光伏与主动管理成本增加, 但电网运行成本降低, 且降低的成本大于增加的成本, 所以总成本降低。因此, 当考虑时间相关性时, 也能够提高光伏渗透率, 降低规划总成本。

3) 对比分析

为了分析空间、时间相关性对规划结果的影响,对以下四种方式得到的结果进行对比:(1)不考虑空间、时间相关性;(2)只考虑空间相关性( $\rho$ 为0.3);(3)只考虑时间相关性;(4)同时考虑空间、时间相关性。对比结果如图5所示。

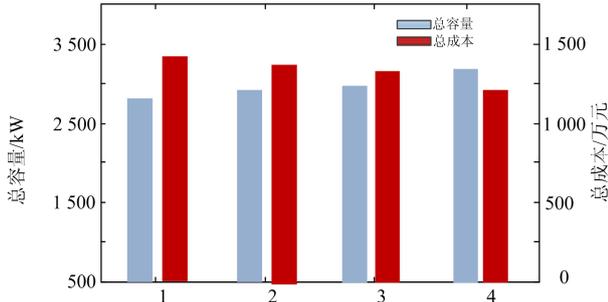


图5 四种方式下结果对比图

Fig. 5 Results contrast figure in 4 ways

由图5可知四种方式的对比结果为:

(1) 第一种方式即忽略随机变量之间的空间与时间相关性时,光伏并网渗透率最低,总经济成本最大,因此在光伏并网过程中若忽略变量之间的相关性,便会限制光伏并网渗透率,同时增加规划过程中的总经济成本。

(2) 第二种与第三种方式即分别考虑变量之间的空间、时间相关性时,相比于第一种方式,光伏渗透率提高,经济成本降低,说明当考虑相关性时,会对规划结果造成影响。

(3) 本文第四种方式即同时考虑变量之间的空间、时间相关性时,相比于其他方式其光伏渗透率最大,总经济成本最低,说明本文提出在规划过程中同时考虑变量之间空间、时间相关性具有合理性。

5.3 随机因素对光伏配置方案的影响

为分析机会约束条件中置信水平 $\beta$ 和主动管理措施中的光伏功率因数 $\cos\varphi_{PV}$ 等随机因素对规划结果的影响。设定 $\beta$ 分别为0.93、0.95、0.98、1,  $\cos\varphi_{PV}$ 分别为滞后0.90、0.95,超前0.90、0.95。光伏配置方案如表3和图6所示。

表3 不同置信水平与光伏功率因数下的配置方案

Table 3 Configuration scheme under different confidence levels and PV power factors

$\beta$	滞后 0.90	滞后 0.95	超前-0.95	超前-0.90
0.93	2 830	2 960	3 030	3 110
0.95	2 750	2 820	2 910	3 050
0.98	2 660	2 740	2 820	2 910
1	2 540	2 670	2 740	2 820

由表3数据得到对比结果如图6所示。

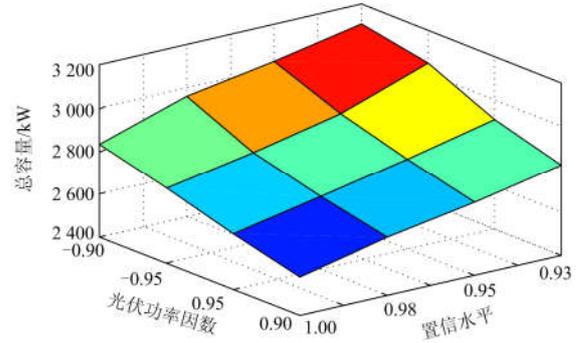


图6 光伏配置方案对比图

Fig. 6 PV configuration scheme contrast figure

由表3和图6可知,不同置信水平 $\beta$ 与光伏功率因数 $\cos\varphi_{PV}$ 下,光伏并网配置方案不同。当保持 $\cos\varphi_{PV}$ 不变时,光伏并网渗透率随着置信水平 $\beta$ 的提高而逐渐减小;分析原因可知,当 $\beta$ 较大时,系统对各指标的要求越严格,指标越限的可能性就越小,光伏并网渗透降低。而在保持 $\beta$ 不变时,光伏并网渗透率受 $\cos\varphi_{PV}$ 影响,且光伏运行在超前状态时的渗透率高于运行在滞后状态时的渗透率;分析原因可知,光伏在超前运行状态时,要从系统侧吸收无功,使节点电压降低,从而节点电压越上限的可能性降低,因此光伏并网渗透率提高。

6 结论

本文在考虑空间与时间相关性的基础上,建立了分布式光伏并入ADN的机会约束规划模型,并利用随机模拟技术嵌入CAPSO中的混合智能算法对规划模型求解,得到如下结论:

1) 通过建立不同分布类型的光伏空间、时间概率模型,并分别利用相关矩阵法与舍选法进行空间与时间的相关性处理,相比于MC直接采样法具有更高的效率,且保证了结果的准确性。

2) 在求解模型时,算法CAPSO相比PSO、CA<sup>[22]</sup>分别具有更高的精度与更快的速度。因此CAPSO算法能够使得规划结果更加准确。

3) 在光伏并网规划过程中,考虑随机变量之间空间、时间相关性时,提高了光伏并网渗透,降低了总规划成本;同时机会约束规划方法中的置信水平与主动管理措施中光伏功率因数等随机因素变化会影响光伏并网的配置方案。

参考文献

[1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 能源发展“十三五”规划[R]. 2016.

- National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. "The 13th Five-year" Plan for Energy Development[R]. 2016.
- [2] OCHOA L F, DENT C J, HARRISON G P. Distribution network capacity assessment: variable DG and active networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 87-95.
- [3] 范明天, 张祖平, 苏傲雪, 等. 主动配电系统可行技术的研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 12-18.  
FAN Tianming, ZHANG Zuping, SU Aoxue, et al. Enabling technologies for active distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 12-18.
- [4] 王甜婧, 许阔, 朱永强. 主动配电网的源-网-荷多层博弈经济调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 10-19.  
WANG Tianjing, XU Kuo, ZHU Yongqiang. Economic dispatch strategy of active distribution network based on source-network-load multi-layer game[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 10-19.
- [5] 马麟, 刘建鹏. 考虑时序特性和环境效益的多目标多类型分布式电源规划[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 32-40.  
MA Lin, LIU Jianpeng. Multi-objective planning of multi-type distributed generation considering timing characteristics and environmental benefits[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 32-40.
- [6] 汪芳宗, 王兆丰. 基于混合整数二次锥规划方法的含分布式电源配电网优化重构方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 24-30.  
WANG Fangzong, WANG Zhaofeng. An optimum reconfiguration method for distribution networks with DG based on mixed integer second-order cone programming[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 24-30.
- [7] 章力, 高元海, 熊宁, 等. 考虑潮流倒送约束的分布式光伏电站选址定容规划[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 58-63.  
ZHANG Li, GAO Yuanhai, XIONG Ning, et al. Siting and sizing of distributed photovoltaic power station considering reverse power flow constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3): 58-63.
- [8] 张沈习, 李珂, 程浩忠, 等. 主动管理模式下分布式风电源选址定容规划[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 208-214.  
ZHANG Shenxi, LI Ke, CHENG Haozhong, et al. Siting and sizing planning of distributed wind generators under active management mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 208-214.
- [9] 张沈习, 李珂, 程浩忠, 等. 间歇性分布式电源在主动配电网中的优化配置[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11): 45-51.  
ZHANG Shenxi, LI Ke, CHENG Haozhong, et al. Optimal allocation of intermittent distributed generator in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 45-51.
- [10] 张木银, 周玲, 管志成, 等. 考虑需求响应影响的含分布式电源的配电网多目标协调规划[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(3): 16-21.  
ZHANG Muyin, ZHOU Ling, GUAN Zhicheng, et al. Multi-objective coordinated planning of distribution network with distributed generation considering influence of demand response[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(3): 16-21.
- [11] 潘超, 孟涛, 蔡国伟, 等. 主动配电网广义电源多目标优化规划[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(3): 41-46.  
PAN Chao, MENG Tao, CAI Guowei, et al. Multi-objective optimization planning of generalized power in active distribution network[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(3): 41-46.
- [12] 赵婷, 赵洁, 刘涤尘, 等. 考虑不同负荷水平下 DG 定容选址的配电网协调规划研究[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(22): 22-28.  
ZHAO Ting, ZHAO Jie, LIU Dichen, et al. DG planning research of power distribution network on different load scenarios[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(22): 22-28.
- [13] 马瑞, 金燕, 刘明春. 考率基于机会约束规划的主动配电网分布式风光双层优化配置[J]. 电工技术学报, 2016, 31(2): 145-154.  
MA Rui, JIN Yan, LIU Mingchun. Bi-level optimal configuration of distributed wind and photovoltaic generations in active distribution network based on chance constrained programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(2): 145-154.
- [14] 任洲洋. 光伏时空概率模型及其在电力系统概率分析中的应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.  
REN Zhouyang. Research on the chronological and spatial modeling methods of photovoltaic generation and their application in the probabilistic analysis of power systems[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [15] 郑展, 张勇军. 电-气-热一体化混合能源系统研究评

- 述与展望[J]. 广东电力, 2018, 31(9): 99-110.  
ZHENG Zhan, ZHANG Yongjun. Research comment and prospect of electricity-natural gas-heat integrated hybrid energy system[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(9): 99-110.
- [16] CHEN Y, WEN J, CHENG S. Probabilistic load flow method based on Nataf transformation and Latin Hypercube sampling[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 4(2): 294-301.
- [17] 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 Xiangang, LIN Lixiang, LIU Yi, et al. Optimal distributed generator allocation method based on correlation Latin hypercube sampling Monte-Carlo simulation embedded crisscross optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4077-4085.
- [18] 吕聪颖. 智能优化方法的研究及应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [19] 张立梅, 唐巍, 王少林, 等. 综合考虑配电公司及独立发电商利益的分布式电源规划[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4): 23-28.  
ZHANG Limei, TANG Wei, WANG Shaolin, et al. Distributed generators planning considering benefits for distribution power company and independent power suppliers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(4): 23-28.
- [20] 张旭升, 李瑞生, 黄利军, 等. 基于分层储能的主动配电网需求响应控制策略研究及实现[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 40-49.  
ZHANG Xusheng, LI Ruisheng, HUANG Lijun, et al. Research and application on demand response based on hierarchical power storage[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 40-49.
- [21] 李响, 范建业, 曹丽璐, 等. 大型光伏电站并网适应性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 165-169.  
LI Xiang, FAN Jianye, CAO Lilu, et al. Analysis on the adaptability of large-scale grid-connected PV station[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 165-169.
- [22] 王庆斌, 石亮缘, 黄辉, 等. 基于改进粒子群算法的输电线路路径规划研究[J]. 广东电力, 2018, 31(9): 136-141.  
WANG Qingbin, SHI Liangyuan, HUANG Hui, et al. Research on power transmission line path planning based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(9): 136-141.

---

收稿日期: 2018-04-03; 修回日期: 2018-05-23

作者简介:

宋 淼(1997—), 女, 通信作者, 本科, 研究方向为主动配电网规划运行; E-mail: 1063785552@qq.com

王克文(1964—), 男, 博士, 教授, 从事电力系统分析与控制研究. E-mail: kwwang@zzu.edu.cn

(编辑 张爱琴)