

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105656

基于概率盒理论的源荷不确定性最优潮流^{*}

陈芷欣 丁家满

(昆明理工大学 信息工程与自动化学院 昆明 650500)

摘要: 在含风电场的电力系统中,影响系统经济运行的不确定参数往往具有随机波动的特点,其容易在系统潮流优化时造成信息丢失等问题。以风电场中的风速和负荷为研究对象,采用概率盒理论来描述风电场参数的不确定性,首先利用参数的分布函数漂移区间来建立风、荷的概率盒模型,然后以发电成本最小为目标函数,将风、荷的概率盒等信度离散化代入到优化模型中构建基于概率盒理论的最优潮流模型,最后采用内点法来求解该模型得到最优潮流的计算结果,并与蒙特卡洛的方法作对比验证所提方法的有效性。IEEE30节点系统的实验计算结果表明,使用概率盒的方法在准确性上不仅能够更加全面地描述系统的不确定性,有效地求解最优潮流问题,而且在计算时间上用时更短,操作也更加简单有效。

关键词: 不确定性;概率盒;风电;负荷;最优潮流;证据结构体

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4054

Optimal power flow with source and demand side uncertainty based on probability box theory

Chen Zhixin Ding Jiaman

(Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In the power system with wind farms, the uncertain parameters that affect the economic operation of the system often have the characteristics of random fluctuation, which is easy to cause information loss in the process of power flow optimization. In this paper, the wind speed and load of wind farm are taken as the research object, and the probability box theory is used to describe the uncertainty of wind farm parameters. Firstly, the probability box model of wind and load is established by using the drift interval of distribution function. Then the probability box equal reliability discretization is introduced into the optimization model with the minimum generation cost as the objective function, and the optimal power flow model based on probability box theory is constructed. Finally, the interior point method is used to solve the model to obtain the optimal power flow calculation results, and the effectiveness of the proposed method is verified by comparing with the Monte Carlo method. The calculation results of IEEE30 bus system show that the probability box method can not only describe the uncertainty of the system more comprehensively and solve the optimal power flow problem effectively, but also shorten the calculation time and make the operation more simple and effective.

Keywords: uncertainty; probability box; wind power; load; optimal power flow; Dempster-Shafer structure

0 引言

近年来,风力发电作为主要的新能源发电发展极为迅速,而且技术日趋成熟。目前,电力系统规划常采用确定性潮流分析的方法,但是在含风电场的电力系统实际运行中^[1],影响风力发电的因素往往具有随机性与波动性,这些不确定因素主要有风速^[2-3]、负荷^[4-5]、环境因素等,探究这

类不确定性因素对电力系统运行的影响成为当下的一大热点。

为了更好地评估系统的安全性运行、可靠性、经济调度以及运营成本电力定价,最优潮流是电力系统分析及优化的一种有效的工具。传统的最优潮流是通过建立数学模型,模拟实际运行情况来达到系统的单个或多个目标的潮流分布最优,这都是在发电机出力、节点负荷等为确定值的

收稿日期:2021-01-04

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(51467007)项目资助

条件下进行计算的,本质上是一种寻找确定性潮流计算最优解的过程,但同时缺乏对系统中的各种不确定因素的考虑,在不确定因素波动幅度较大的系统中,很难对系统的安全运行进行一个全面的分析。为了能够更好地考虑到系统中不确定因素的影响,人们把概率理论应用于最优潮流中,形成了概率最优潮流^[6],将系统中的不确定变量看成具有某种概率分布特性的输入量,经过计算之后得到输出量(如电压幅值、相角、发电成本及线路潮流等)的概率信息(如均值、标准差、累计概率密度函数等)。概率最优潮流的研究方法一般有蒙特卡洛法^[7-8]、点估计法^[9-10]、解析法^[11]和半不变量法^[12-13]等。文献[14]建立了一种含和分布式发电的不确定性,提出了一种拉丁超立方抽样和二阶锥规划相结合的概率最优潮流算法,该算法在保证计算精确度的同时也提高了计算的效率。文献[15]利用广义 lambda 分布和部分嵌套式阿基米德 Copula 模型提出了出一种考虑随机变量相关性的概率最优潮流算法,并用实验验证了所提算法的有效性。文献[16]考虑了风电出力、负荷和发电商报价的不确定性,建立了在电力市场环境下的概率最优潮流模型,并采用无迹变换法来求解,通过对非线性变换传递概率信息并且分析了随机变量的相关性,最终的最优潮流结果可全面地为电力市场运行状况提供参考。文献[17]为了提高计算精度与速度,将离散傅里叶变换法引入概率最优潮流计算中,并分析对样本点的选取策略,利用实验验证了方法的有效性。以上的方法虽然考虑了系统参数的不确定性,但由于参数的随机波动性导致了其并不是严格服从某种分布类型,而是会在一定的范围内上下波动,所以采用常用的概率最优潮流方法可能会造成信息的丢失。

针对风电场不确定参数风速与负荷的随机波动特性,本文将概率盒理论^[18-19]应用于最优潮流计算当中,概率盒本质上是由概率理论演化而来的,概率盒能把不确定参数所有的波动情况包含进去,提高对系统不确定参数描述的准确性,避免了信息的丢失。文中考虑了影响风电场运行的两种不确定因素风速和负荷,由风速的关系建立了风电出力的概率盒和负荷功率的概率盒,准确地模拟出不确定因素的分布情况,并且用概率盒的形式反映出了不确定因素对最优潮流计算结果的影响。IEEE30 节点系统的实验结果表明,与蒙特卡洛法相比,采用概率盒的方法提高了对不确定参数描述的准确性,同时使用较少采样点就能得到更优的计算效果体现了方便操作、容易实现的优点。

1 概率盒及相关理论

概率盒(probability box, p-box),本质上就是在累积概率分布函数(cumulative probability distribution function, CDF)中引入了区间类型界限,这种界限就是“概率盒”。

将概率盒定义为:如果对于一个随机量 X ,当它的估计值 \hat{x} 无法用精确的点估计来表达时,那它的 CDF 就不是单一的一条曲线。假设 \hat{x} 的波动范围为 $[\underline{\hat{x}}, \bar{\hat{x}}]$,其 CDF 的

上下边界可以表示为:

$$\bar{F}(x) = 1 - \underline{P}(X > x) \quad (1)$$

$$\underline{F}(x) = \underline{P}(X \leq x) \quad (2)$$

式中: $\bar{F}(x)$ 为 CDF 的上边界; $\underline{F}(x)$ 为 CDF 的下边界; \underline{P} 为 X 的低概率测度。将 $\bar{F}(x)$ 与 $\underline{F}(x)$ 包含的范围(面积)定义为概率盒,即:

$$[\underline{F}(x), \bar{F}(x)] \quad (3)$$

$\underline{F}(x)$ 和 $\bar{F}(x)$ 为非递减函数,并且 $\underline{F}(x) < \bar{F}(x)$,取值范围在 $[0, 1]$ 之内, $x \in R$, R 为实数域。其中, $\underline{F}(x)$ 为概率盒的下边界, $\bar{F}(x)$ 为概率盒的上边界。若存在一个随机量 X ,其不确定性可以用 CDF 的上下界表示,那么就可以用概率盒来表示出它的不确定性,即:

$$\underline{F}(x) \leq F(x) \leq \bar{F}(x) \quad (4)$$

如图 1 所示,直观地在坐标图中表示为,在 x 轴上每个点可以计算得到一个最大面积值和最小面积值,将所有最大值连成一条线就是概率盒上边界,所有最小值连成一条线就是概率盒下边界。

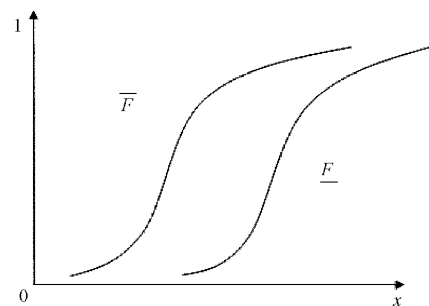


图 1 概率盒示意图

概率盒是对不确定参数的一种表达方式,是连续的,无法把它直接代入带数学模型中进行计算,所以需要将概率盒离散化为证据结构体(dempster-shafer structure, DSS),再用于数学计算当中。

DSS 是由若干个焦元组成的,每个子焦元都包含了一个区间和相应的信度,表示为:

$$\{([x_1, y_1], m_1), ([x_2, y_2], m_2), \dots, ([x_n, y_n], m_n)\} \quad (5)$$

式中:每个焦元都要满足条件 $x_i \leq y_i$, $\sum m_i = 1$ 。

对于 DSS 来说,它的上界由焦元的置信函数 Pl 获得,下界由焦元的似然函数 Bel 获得,即:

$$Pl(z) = \sum_{y_i \cap z \neq \emptyset} m_i \quad (6)$$

$$Bel(z) = \sum_{y_i \subseteq z} m_i \quad (7)$$

概率盒与 DSS 的关系可以理解为整体与局部的关系,当满足一定条件是可以相互转化,将式(5)的 DSS 转化为概率盒,概率盒的右边界就是 DSS 的累积置信函数,即:

$$\bar{F}(z) = \sum_{x_i < z} m_i \quad (8)$$

概率盒的左边界就是 DSS 的累积似然函数,即:

$$\bar{F}(z) = \sum_{x_i \leq z} m_i \quad (9)$$

同理,为了实现概率盒的卷积运算,需要将概率盒等信度离散为相应的 DSS。如图 2 所示,将概率盒等信度离散为含有 n 个焦元的 DSS,其中, m_i 为相应焦元的置信度,且 $m_1 = m_2 = \dots = m_n$ 。

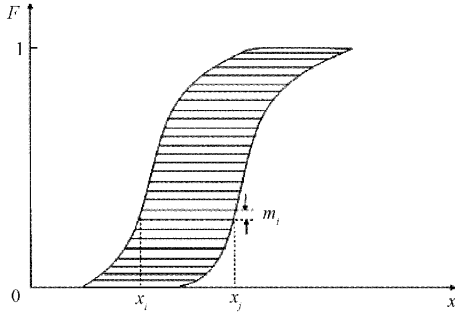


图 2 概率盒等信度离散化

2 基于概率盒的最优潮流模型

2.1 风、荷的概率盒建模

一般地来说,影响风电场的不确定性因素主要是风速和节点负荷,由于它们的随机波动性给电力系统稳态运行带来了许多不确定性。通过对风速数据的统计分析可知风速的概率分布可用 Weibull 分布来描述,其概率密度函数表示为:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (10)$$

式中: v 为风速, k 为形状参数, c 为尺度参数,且 $k > 0, v > 0, c > 1$ 。

风能和风速的三次方成正比,风电发电机组的出力由如下公式表示为:

$$P_w = \frac{1}{2} \pi r^2 C_p \rho v^3 \quad (11)$$

$$Q_w = P_w \tan \theta \quad (12)$$

式中: P_w 为风力发电机的有功出力, Q_w 为风力发电机的无功出力, r 为风力发电机叶轮的半径, ρ 为空气密度, C_p 为风能转化系数。

参考大量文献可知,一般假设负荷服从正态分布,即:

$$P_L \sim N(\mu, \delta^2) \quad (13)$$

式中: μ 为负荷的均值, δ 为负荷的标准差。

影响风电场的运行的风速和负荷往往缺乏严格的规律性,即使大体符合某种分布特性,但其具有的波动性会令其实际值偏离理想值,在一定范围内发生漂移的现象,所以为了更好地描述它们的这种漂移特性,本文提出了一种由参数分布特性来进行概率盒建模的方法,具体步骤为:

1) 将风速的历史数据按一天 24 h 进行统计分组,每个时段都可以拟合得到一组 k 和 c ,由这 24 组参数可以得到

k, c 的漂移区间 $[\underline{k}, \bar{k}], [\underline{c}, \bar{c}]$, \underline{k} 为 k 的区间下界, \bar{k} 为 k 的区间上界, \underline{c} 为 c 的区间下界, \bar{c} 为 c 的区间上界。

2) 模拟负荷的漂移幅度为 $\pm 5.0\%$,即标准差 δ ,标准差与负荷一般呈现一定的比例,本文取为 $\mu = P_L, \delta = 10\% P_L$,由此可得到负荷均值与标准差的漂移区间 $[\underline{\mu}, \bar{\mu}], [\underline{\delta}, \bar{\delta}]$, $\underline{\mu}$ 为 μ 的区间下界, $\bar{\mu}$ 为 μ 的区间上界, $\underline{\delta}$ 为 δ 的区间下界, $\bar{\delta}$ 为 δ 的区间上界。

3) 分别将 k, c 的区间上下界两两组合可得到 4 组服从 Weibull 分布的参数 $[\bar{k}, \bar{c}], [\bar{k}, \underline{c}], [\underline{k}, \bar{c}], [\underline{k}, \underline{c}]$ 再将 μ, δ 的区间上下界两两组合可得到 4 组服从正态分布的参数 $[\bar{\mu}, \bar{\delta}], [\bar{\mu}, \underline{\delta}], [\underline{\mu}, \bar{\delta}], [\underline{\mu}, \underline{\delta}]$,由风速的 4 组参数和负荷的 4 组参数可以分别得到各自的累积概率密度函数。

4) 将概率分成若干等分,分别在各自的 4 个累积概率密度函数上求得每个概率点的风速和负荷的值,再将每个概率点风速的最大值按顺序连成一条线,最小值也按顺序连成一条线,这两条线围成的图形就是风速的概率盒,将每个概率点负荷的最大值按顺序连成一条线,最小值也按顺序连成一条线,这两条线围成的图形就是负荷的概率盒。

根据式(11)可知,风电场实际运行中,风能转换系数 C_p 也不是一个固定的值,可以把它看成一个最简单的概率盒或者只有一个焦元的 DSS。假定风力发电机组采用恒定功率因数方式运行,将风速的概率盒等信度离散为 n 个 DSS 之后,把每个焦元的区间上下界代入式(11)计算得到风电出力的 DSS,即:

$$\{([\underline{v}^1, \bar{v}^1], m_1), ([\underline{v}^2, \bar{v}^2], m_2), \dots, ([\underline{v}^n, \bar{v}^n], m_n)\} \quad (14)$$

$$\{([\underline{P}_w^1, \bar{P}_w^1], m_1), ([\underline{P}_w^2, \bar{P}_w^2], m_2), \dots, ([\underline{P}_w^n, \bar{P}_w^n], m_n)\} \quad (15)$$

式中: $([\underline{v}^i, \bar{v}^i], m_i)$ 风速 DSS 的一个子焦元, $([\underline{P}_w^i, \bar{P}_w^i], m_i)$ 为风电出力 DSS 的一个子焦元, m_i 为等置信度,即 $m_1 = m_2 = \dots = m_n$ 。再将风电出力的 DSS 的转化为概率盒,把 DSS 的各焦元区间的下边界值按照式(9)累积叠高可以得到风电出力概率盒的下边界,区间的上边界值按照式(8)累积叠高可以得到风电出力概率盒的上边界。

得到负荷的概率盒之后同样将其等信度离散为 n 个 DSS,即:

$$\{([\underline{P}_L^1, \bar{P}_L^1], m_1), ([\underline{P}_L^2, \bar{P}_L^2], m_2), \dots, ([\underline{P}_L^n, \bar{P}_L^n], m_n)\} \quad (16)$$

式中: $([\underline{P}_L^i, \bar{P}_L^i], m_i)$ 为负荷 DSS 的一个子焦元,求得负荷的 DSS 之后同理也可得到负荷的概率盒。

将式(15)、(16)代入最优模型中便可得到该不确定风电场的概率盒最优潮流模型。

2.2 基于概率盒的概率最优潮流模型

将上节得到的风、荷的概率盒离散化代入到最优模型中建立基于概率盒的最优潮流模型。考虑到风电场风速和负荷的不确定性对优化潮流的影响,本文采用的最优潮流

是以发电成本最小为目标,其目标函数为:

$$\min \sum_{i \in S_G} (a_{2i} P_{Gi}^2 + a_{1i} P_{Gi} + a_{0i}) \quad (17)$$

式中: P_{Gi} 为第 i 台发电机的有功出力, a_{0i} 、 a_{1i} 、 a_{2i} 为第 i 台发电机发电成本系数, S_G 为发电机的集合。

等式约束为:

$$\begin{cases} U_i \sum_{j=1}^k U_j (G_{ij} \cos \sigma_{ij} + B_{ij} \sin \sigma_{ij}) - P_{Gi} - P_{wi} + P_{Li} = 0 \\ U_i \sum_{j=1}^k U_j (G_{ij} \sin \sigma_{ij} - B_{ij} \cos \sigma_{ij}) - Q_{Gi} - Q_{wi} + Q_{Li} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中: U_i 是节点 i 的电压幅值, σ_i 是节点 i 的电压相角, G_{ij} 是节点导纳矩阵的实部, B_{ij} 是节点导纳矩阵的虚部, P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别是常规发电机有功功率和无功功率, P_{Li} 、 Q_{Li} 分别是负荷的有功功率和无功功率, P_{wi} 、 Q_{wi} 分别是风电有功出力和无功出力。其中, P_{wi} 、 Q_{wi} 分别由式(15)、(16)的 DSS 焦元区间形式代入计算。

不等式约束为:

$$\underline{P}_{Gi} \leq P_{Gi} \leq \overline{P}_{Gi} (i \in S_G) \quad (19)$$

$$\underline{Q}_{Gi} \leq Q_{Gi} \leq \overline{Q}_{Gi} (i \in S_G) \quad (20)$$

$$\underline{U}_i \leq U_i \leq \overline{U}_i (i \in S_B) \quad (21)$$

$$-\underline{P}_{ij} \leq P_{ij} \leq \overline{P}_{ij} (i, j \in S_l) \quad (22)$$

在以上不等式约束中,式(19)为有功功率约束,式(20)为无功功率约束,式(21)为节点电压约束,式(22)为线路潮流约束, \overline{P}_{Gi} 和 \underline{P}_{Gi} 是发电机有功功率的上下限, \overline{Q}_{Gi} 和 \underline{Q}_{Gi} 是发电机无功功率的上下限, \overline{U}_i 和 \underline{U}_i 是电压幅值的上下限, P_{ij} 为线路 ij 的有功功率, \overline{P}_{ij} 和 \underline{P}_{ij} 是支路 ij 上有功功率的上下限, S_B 节点集合。

2.3 原始对偶内点法

求解最优潮流本质上就是解非线性规划问题,由于内点法具有的强鲁棒性,对初值的选择不敏感的特性,并且迭代次数和系统的规模都无关,所以本文用原始对偶内点法来求解概率盒最优潮流模型。一般的非线性规划模型可表示为:

$$\min f(x) \quad (23)$$

$$\text{s. t. } h(x) = 0 \quad (24)$$

$$g(x) \geq 0 \quad (25)$$

式中:式(23)对应目标函数式(17),式(24)对应等式约束式(18),式(25)对应不等式约束式(19)~(22)。将式(23)~(25)的拉格朗日表示为:

$$L^\gamma(x, z, \lambda, \mu) = f(x) + \lambda^T h(x) + \mu^T (g(x) + z) - \gamma \sum_{m=1}^{m_i} \ln(z_m) \quad (26)$$

式中: γ 是一个正标量, z 是正松弛变量的向量, λ 和 μ 为等式约束和不等式约束的拉格朗日乘子向量, x 、 z 为原变量, λ 、 μ 为对偶变量, m_i 为不等式约束函数个数。式(23)~(25)

的一阶 Karush-Kuhn-Tucker(KKT)条件可以写成:

$$\begin{aligned} \nabla_x L^\gamma(x, z, \lambda, \mu) &= 0 \\ h(x) &= 0 \\ g(x) + z &= 0 \\ [\mu]z - \gamma e &= 0 \\ z > 0, \mu > 0 \end{aligned} \quad (27)$$

式中: e 为单位列向量, $[\dots]$ 是封闭向量的对角化。最后,可用牛顿法求解式(27)得到最终的最优潮流计算结果。

2.4 概率盒最优潮流的求解步骤

本文用的潮流测试系统为 IEEE30 标准测试系统,根据以上的分析,求解概率盒最优潮流的具体步骤如下:

1) 在风电场中,各随机变量是相互独立的,风速服从 Weibull 分布,负荷服从正态分布,利用分布参数特性分别建立其概率盒模型。

2) 根据概率盒与 DSS 的转化关系,将风速的概率盒等信度离散为含有 n 个焦元的 DSS 并代入式(11)计算得到式(15)风电出力的 DSS,同理将负荷的概率盒等信度离散为 n 等份并建立式(16)负荷的 DSS。

3) 将所建立的风电出力与负荷的 DSS 引入最优潮流中构建基于概率盒的最优潮流模型式(17)~(22)。

4) 采用原始对偶内点法来求解该最优潮流模型,并结合牛顿法来对系统进行最优潮流计算。

5) 由于系统中有两个不确定变量,所以得到的每个待求量的潮流计算结果大小是由 $n \times n$ 个元素组成的二维矩阵,即笛卡尔积,且矩阵内每个元素的置信度为 $m_i \times m_i$ 。把每个待求量笛卡尔积的每个元素上界按式(8)累积叠高得到概率盒的上边界,每个元素下界按式(9)累积叠高得到概率盒的下边界,最终便可得到整个最优潮流系统的概率盒,验证本文方法的有效性。

3 实验结论及分析

3.1 风电场的概率盒建模

本文采用的是 IEEE30 标准测试系统来对最优潮流进行仿真实验,功率的标么基准值为 100 MVA,在 MATLAB R2014a(Windows8.1,64 位操作系统,内存为 4 GB)的环境下编写程序。风速实验数据来自于内蒙古某一测风塔一年 365 天的测量数据,该测风塔每隔 1 h 测量 1 次,共有 8 760 个测量数据,图 3 为所测风速的概率密度曲线,可以从图中看出,风速的历史数据服从 Weibull 分布。

在系统节点 7 接入风电场,采用节点 10 的不确定负荷来进行仿真实验。根据风速的测量数据,把风速按 1 天 24 h 分组,每组可以得到其服从 Weibull 分布的参数 k 、 c ,取这 24 组参数的最大、最小值可以得到 k 、 c 的漂移区间 $k=[1.7663, 2.1917]$, $c=[4.9562, 7.0787]$,直接用两参数的漂移区间来对风速进行概率盒建模,图 4 所示为风速的概率盒。

由风电场实际运行情况可知,在式(11)中风能转换系

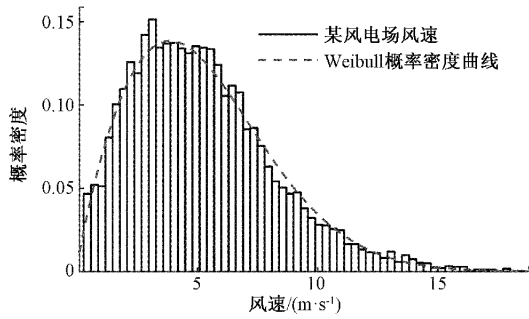


图3 风速分布的概率密度函数

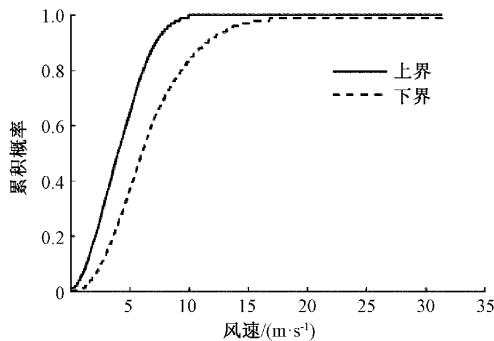


图4 风速的概率盒

数 C_p 不是一个固定的值,根据实际情况将 C_p 取值为 $[1/3, 2/5]$,风电机的额定功率为 600 kW,具体参数设置由文献[20]给出。将以上风速的概率盒等信度离散为含有 100 个焦元的 DSS,再将每个焦元的区间上下界代入式(11)中求得风电出力的 DSS,即:

$$\{([0.0159 \times 10^{-3}, 0.6577 \times 10^{-3}], 0.01), ([0.0520 \times 10^{-3}, 0.01), ([0.1044 \times 10^{-3}, 1.7000 \times 10^{-3}], 0.01), \dots, ([0.2187, 1.3921], 0.01), ([0.2540, 1.8365], 0.01), ([0.3175, 12.022], 0.01)\}$$

得到风电出力的 DSS 之后按式(8)、(9)的转化关系便可得到风电出力的概率盒,如图 5 所示。

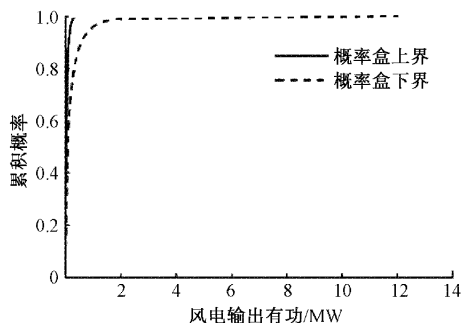


图5 风电机组输出功率的概率盒

对于负荷所拥有的不确定性,本文模拟负荷的漂移幅度在 $\pm 5.0\%$,由 $\mu = P_L, \delta = 10\% P_L$,可以得到负荷均值与标准差的漂移区间为 $\mu = [0.2166, 0.2394], \delta = [0.1473, 0.1546]$ 。同理,直接用负荷的均值与标准差的

漂移区间来进行负荷概率盒建模,负荷的概率盒如图 6 所示。

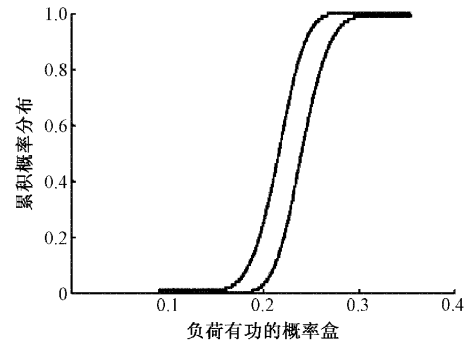


图6 负荷有功功率的概率盒

为了构建概率盒最优潮流模型,同样地将负荷的概率盒等信度离散为 100 个焦元的 DSS,即:

$$\{([0.0921, 0.1890], 0.01), ([0.1609, 0.1949], 0.01), ([0.1674, 0.1987], 0.01), \dots, ([0.2611, 0.2954], 0.01), ([0.2670, 0.3537], 0.01)\}$$

然后将风电出力与负荷的 DSS 带入最优潮流模型中进行潮流计算。

3.2 概率最优潮流计算结果及分析

本文在 IEEE30 系统的节点 7 接入了风电机组,最优潮流以发电成本最小为目标,系统中有 6 台常规发电机,由式(17)其成本函数的参数如表 1 所示。

表1 发电机的成本函数参数

发电机号	a_0	a_1	a_2
1	0	20	0.0384
2	0	20	0.25
3	0	40	0.01
4	0	40	0.01
5	0	40	0.01
6	0	40	0.01

将上节得到的风电出力与负荷的 DSS 代入到最优潮流模型中建立了概率盒最优潮流模型,并用原始对偶内点法与牛顿法求解该最优潮流模型,经计算得到的最优潮流结果为节点 10 的电压幅值和相角,支路 6~7 的有功功率和无功功率的笛卡尔积,每个元素的置信度为 $0.01 \times 0.01 = 0.0001$,如表 2 所示。

为了验证本文方法的有效性,采用 1 000 次蒙特卡洛(MCS)的计算结果作为实验对比,图 7 为两种方法的最优潮流结果对比。表 3 为两种方法的实验所用时间。

由图 7 的实验结果对比图可以看出,蒙特卡洛方法虽然采用了大量的采样来进行计算,但是得到的还是一条单一的累积概率分布曲线,且无法很好反映出参数波动对潮流结果的影响,而采用概率盒建模的方法则能全面地模拟

表 2 最优潮流结果的笛卡尔积

电压幅值/V	电压相角/(°)	有功功率/MW	无功功率/Mvar	发电成本/(\$·h ⁻¹)	置信度
[1.037 759, 1.038 326]	[-13.834 92, -13.596 89]	[0.180 269 7, 0.196 391 7]	[-1.171 697, -1.121 913]	[8 693.210, 8 856.083]	0.000 1
[1.037 953, 1.038 327]	[-13.760 69, -13.596 18]	[0.181 952 9, 0.196 568 4]	[-1.166 704, -1.121 388]	[8 711.215, 8 857.516]	0.000 1
[1.037 961, 1.038 328]	[-13.752 29, -13.595 79]	[0.182 140 8, 0.196 680 6]	[-1.166 146, -1.121 054]	[8 720.782, 8 858.497]	0.000 1
[1.037 965, 1.038 328]	[-13.746 93, -13.595 52]	[0.182 260 1, 0.196 701 6]	[-1.165 792, -1.120 949]	[8 727.121, 8 859.235]	0.000 1
[1.037 968, 1.038 328]	[-13.742 89, -13.595 31]	[0.182 349 9, 0.196 764 9]	[-1.165 526, -1.120 803]	[8 731.775, 8 859.824]	0.000 1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
[1.038 636, 1.039 007]	[-13.496 07, -13.374 98]	[0.200 958 4, 0.203 934 0]	[-1.108 033, -1.099 173]	[8 945.820, 9 034.416]	0.000 1
[1.038 636, 1.039 007]	[-13.496 07, -13.374 98]	[0.200 964 0, 0.203 934 6]	[-1.108 015, -1.099 171]	[8 945.846, 9 034.418]	0.000 1
[1.038 636, 1.039 007]	[-13.496 06, -13.374 98]	[0.200 969 1, 0.203 935 1]	[-1.107 999, -1.099 169]	[8 945.869, 9 034.420]	0.000 1
[1.038 636, 1.039 007]	[-13.496 06, -13.374 98]	[0.200 973 5, 0.203 935 4]	[-1.107 986, -1.099 168]	[8 945.889, 9 034.422]	0.000 1
[1.038 637, 1.039 008]	[-13.496 05, -13.374 98]	[0.200 977 1, 0.203 935 5]	[-1.107 975, -1.099 168]	[8 945.905, 9 034.422]	0.000 1

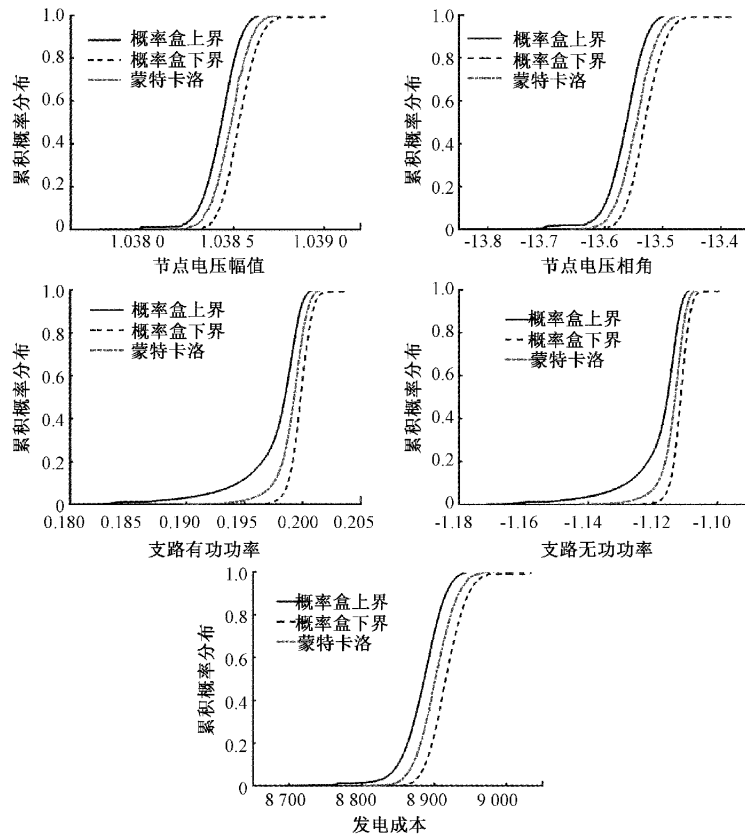


图 7 两种算法的最优潮流计算概率盒

表3 计算时间

方法	时间/s
p-box	1 448.36
MCS	36 875.41

出系统中的不确定因素,概率盒把计算结果所有可能的情况都包含了进去。在电力系统的实际运行中,不确定因素风速、负荷往往是随机波动的,它们会在一定的范围内上下漂移,用一个确定的值无法把它们的漂移范围表达出来,而概率盒能够考虑到参数的这种波动性,分析其分布函数的特性,将分布函数的特征参数用漂移区间的形式表示出来,不丢失参数波动的每一种情况,就像用一个“盒子”把每种情况都包裹起来,这样对不确定参数的描述能更加准确。再者,从计算效率上来看,使用概率盒的计算时间为1 448.36 s,蒙特卡洛的计算时间为36 875.41 s,概率盒的计算效率要远高于蒙特卡洛法的计算效率,这是因为要想得到效果相近的结果蒙特卡洛就要进行大量的采样,而概率盒能用较少的采样计算就能将不确定参数的分布情况更准确地表达出来,所以使用概率盒的方法能在计算效率上得到较大地提升。

4 结 论

本文针对风电场中的风力发电与负荷功率的不确定性,建立了以系统运行成本最小的最优潮流模型,以准确全面地评价不确定因素对电力系统运行的影响,主要贡献为:

1)将概率盒理论应用于概率最优潮流计算中,把风、荷的概率盒离散为较少的子焦点来进行最优潮流计算并且得到了较好的计算效果,这样比大量采样的蒙特卡洛法实现起来更加简便高效。

2)概率最优潮流通常研究的是对最优潮流求解算法的优化而常常忽略了系统不确定参数的波动性对电力系统运行的影响,在满足电网经济运行的条件下,使用概率盒建模的方法能够更好地反映出不确定参数波动的分布情况,对系统的不确定性描述更加准确,为研究人员评估系统的经济运行提供了更加全面的参考。

3)由实验结果可知,使用概率盒的方法在计算效率上比蒙特卡洛法更高,在得到更好效果的同时用时更短。

未来的研究可以从如下两个方向考虑:

1)利用已知故障的风机数据进行潮流计算并建立其概率盒模型,将实时运行数据建立的概率盒与故障数据建立的概率盒的进行比较分析,通过寻找实时概率盒与故障时概率盒之间的关联特性,判断电机的健康状态以及可靠性,从而实现风机的健康动态检测与故障评估。

2)影响电力系统运行的因素除了风速还有光照等环境因素,未来可以将光伏发电、水力发电等影响考虑进来。

参考文献

- [1] 蒋斌,吴健,冯亮,等.含分布式发电的有源配电网电压稳态指标计算研究[J].国外电子测量技术,2017,31(6):885-891.
- [2] 孙国强,李逸驰,向育鹏,等.计及风速时空相关性的含风电场电力系统动态随机最优潮流计算[J].中国电机工程学报,2015,(17):4308-4317.
- [3] 曹佳,严正,李建华,等.含风电场交直流混联系统的概率潮流计算[J].电力自动化设备,2016(36):94-101.
- [4] 任洲洋,颜伟,项波,等.考虑光伏和负荷相关性的概率潮流计算[J].电工技术学报,2015,30(24):181-187.
- [5] 王帅哲,王金梅,王永奇,等.基于改进遗传算法的BP神经网络短期电力负荷预测[J].国外电子测量技术,2019,38(1):15-18.
- [6] KAZEMDEHDASHTI A, MOHAMMADI M, SEIFI A R. The generalized cross-entropy method in probabilistic optimal power flow [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5):5738-5748.
- [7] 曹佳,曹建国,胡家喜,等.考虑需求响应的多目标概率最优潮流问题研究[J].控制与信息技术,2019,458(2):32-39.
- [8] XIE Z Q, JI T Y, LI M S, et al. Quasi-Monte Carlo based probabilistic optimal power flow considering the correlation of wind speeds using copula function[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 33(2):2239-2247.
- [9] 杨欢,邹斌.含相关性随机变量的概率潮流三点估计法[J].电力系统自动化,2012,36(15):51-56.
- [10] 张衡,程浩忠,柳璐,等.基于点估计法随机潮流的输电网多阶段规划研究[J].电网技术,2018,42(10):3204-3210.
- [11] 易驰鞭,胡泽春,宋永华.考虑注入功率分布的随机最优潮流方法[J].电网技术,2013,37(2):367-371.
- [12] 石东源,蔡德福,陈金富,等.计及输入变量相关性的半不变量法概率潮流计算[J].中国电机工程学报,2012,32(28):104-113.
- [13] 唐爱红,石诚成,郑旭,等.基于半定规划法的含分布式潮流控制器最优潮流[J].电力系统自动化,2020,44(4):119-125.
- [14] 李成豪,王淳,尹发根,等.含潮流路由器的配电网最优潮流计算[J].电力系统保护与控制,2019,47(6):1-8.
- [15] 肖青,周少武.基于阿基米德 Copula 和拉丁超立方采样的概率最优潮流计算[J].电力自动化设备,2019,39(11):174-180.

- [16] 代景龙,白小清,鲍海波.考虑源荷不确定性的概率最优潮流[J].现代电力,2016,33(1):34-40.
- [17] 许丹,丁强,林星宇,等.基于离散傅里叶变换矩阵的概率最优潮流计算方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(1):9-16.
- [18] SHARIATMADAR K, VERSTEYHE M. Linear programming under p-box uncertainty model[C]. 2019 7th International Conference on Control, Mechatronics and Automation (ICCMA), Mechanical Engineering Technology TC Faculty of Engineering Sint-Michiels Belgium 8200, 2019: 84-89.
- [19] 丁家满,原琦,任东磊,等.不确定性信息条件下系统可靠性分析[J].仪器仪表学报,2019,40(4):153-162.
- [20] 张英彬.风速特性与发电量之统计分析[J].南开学报,2010,7(2):85-94.

作者简介

陈芷欣,硕士研究生,主要研究方向为智能电网。

E-mail:2335901801@qq.com

丁家满(通信作者),副教授,主要研究方向为智能检测、数据挖掘。

E-mail:tjoman@126.com