

基于组合抽样的含分布式电源随机潮流计算

彭寒梅,曹一家,黄小庆,罗 聪

(湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410082)

摘要: 针对含分布式电源系统随机潮流计算中随机变量类型多的特点,提出基于组合抽样的蒙特卡罗模拟法,其根据随机因素的不同特点采用不同的抽样方法,并计及线路随机故障的影响。将随机因素作为随机变量建立概率分布模型;对连续概率分布的负荷及分布式电源出力采用拉丁超立方抽样,对离散概率分布的电源和线路随机故障采用结合拉丁超立方抽样的改进重要抽样方法,以减小方差,提高模拟计算效率;对系统随机变量进行抽样建模。通过对接有分布式电源的 IEEE 14 节点系统和 IEEE 57 节点系统的算例分析,表明了所提方法是有效的,并具有良好的收敛性。

关键词: 随机潮流; 分布式电源; 组合抽样; 拉丁超立方抽样; 重要抽样; 模型

中图分类号: TM 744; TM 614; TM 615

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.05.004

0 引言

电力负荷和线路故障具有随机性,因此电力系统的潮流分布具有一定的随机波动性。特别地,分布式电源所占比例不断扩大及输电传送等因素,进一步增加了潮流分布的随机性^[1-5]。随机潮流可考虑负荷波动、发电和输电元件的随机故障等,计算出节点电压、线路潮流的概率分布、均值、方差和极限值,能更全面地反映系统的运行状况、存在的问题和薄弱环节^[6-8]。

随机潮流的求解方法分为解析法和模拟法。解析法一般以直流潮流方程或简化为线性的交流潮流方程为基础,利用卷积技术快速获得注入功率的分布函数,再由输入随机变量与输出随机变量(即节点电压、线路潮流)之间的线性关系,一次性求得输出随机变量的概率分布。随机潮流求解的解析法具有计算速度快的优势,但将非线性的交流潮流方程线性化^[9-11],会影响计算结果的准确性;且如何考虑线路随机故障是一个较难解决的问题,许多文献中没有考虑其影响^[12-14],但线路故障会改变网络结构,对潮流分布的影响较大。文献^[15]将线路随机故障等效为对应节点注入功率的(0,1)分布,但该方法只能计算给定故障列表中的故障状态。

随机潮流求解的模拟法一般是基于蒙特卡罗模拟算法,其根据输入变量的概率分布情况随机抽样,进行多次取值,再对每一次抽样的输入变量进行确定性潮流计算,进而求得输出随机变量的概率分布。蒙特卡罗模拟法建模简单,能方便地考虑输入随机变量之间的相关性及网络结构的随机变化,

且直接采用非线性潮流方程进行计算,避免了线性化带来的误差,能够得到非常准确的结果。传统的随机潮流蒙特卡罗直接抽样法需要大量抽样样本,导致计算效率低,计算时间长,目前此算法多作为对其他算法准确性的评价标准。

为了提高蒙特卡罗法的计算效率,国内外研究人员提出了减小方差的抽样技术,如分层抽样法、重要抽样法等,目前在电力系统中已被用于可靠性评估^[16-17]。拉丁超立方抽样是一种特殊的多维分层抽样方法,文献^[18-19]基于拉丁超立方抽样对不含分布式电源系统进行随机潮流计算,但没有考虑线路随机故障。文献^[20]基于 Nataf 变换和拉丁超立方抽样计算含风力发电机、光伏电池系统的随机潮流,但也未计及电源和线路随机故障的影响。拉丁超立方抽样比重要抽样简单,易于实现,但不适合对离散概率分布的线路进行随机故障抽样。线路故障的概率小,也不适合采用直接抽样。对于高维小概率事件,较多采用重要抽样法^[16-17,21]。

本文针对含分布式电源系统随机潮流计算中随机因素种类多的特点,提出根据不同随机因素的特点采用不同的抽样方法,以减小方差。先建立随机因素的概率分布模型,对分布式电源的出力、负荷采用拉丁超立方抽样,对电源和线路随机故障提出一种结合拉丁超立方抽样的改进重要抽样方法,并进行相应的抽样建模。以接入分布式电源的 IEEE 14 节点系统和 IEEE 57 节点系统进行算例分析,验证了所述方法的有效性。

1 系统随机变量概率分布模型的建立

蒙特卡罗模拟法计算随机潮流时,先将系统随机因素作为输入随机变量建立其概率分布模型,然后随机抽取概率分布的输入变量,计算并统计输出

收稿日期:2013-07-04;修回日期:2014-02-19

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA050217)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2012AA050217)

变量的分布特征。本文考虑的随机因素包括分布式电源的随机出力、负荷的不确定性、电源和线路的随机故障。

本文用到的分布式电源包括风力发电机和光伏电池。风力发电机的出力随风速变化而变化。风速的概率模型采用 Weibull 分布,它形式简单并能较好地拟合实际风速分布,其概率密度函数为:

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

其中, v 为风速; k, c 为 Weibull 分布的 2 个参数,可由风速的均值和标准差近似算出。

风力发电机出力与风速的关系可近似表示为:

$$P_W = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_{ci}, v > v_{co} \\ \frac{v - v_{ci}}{v_N - v_{ci}} P_N & v_{ci} < v \leq v_N \\ P_N & v_N < v \leq v_{co} \end{cases} \quad (2)$$

其中, P_W 为风力发电机的随机出力; P_N 为风力发电机的额定功率; v_{ci}, v_N, v_{co} 分别为切入风速、额定风速和切出风速。

光伏电池的出力随光照强度变化而变化。在一定时间段内光照强度可近似看成 Beta 分布,由此,可推导出光伏电池的随机出力也呈 Beta 分布,其概率密度函数为:

$$f(P_{PV}) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \left(\frac{P_{PV}}{P_m} \right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{P_{PV}}{P_m} \right)^{\beta-1} \quad (3)$$

其中, P_{PV}, P_m 分别为一定时段内光伏电池的随机出力和最大出力; Γ 为 Gamma 函数; α, β 为光照强度 Beta 分布的形状参数,由一定时间段内光照强度的均值和标准差得到。

电源包括非分布式电源和分布式电源。电源及线路的可靠性模型均采用两状态模型,即正常状态和故障状态。设元件(电源和线路)的无故障工作时间和平均修复时间均服从指数分布,用随机变量 $\mathbf{X}_n = [X_1, X_2, \dots, X_n]$ 表示元件状态,其概率密度函数为:

$$f(X_j = x_j) = \begin{cases} p_j & x_j = 1, \text{元件故障} \\ 1 - p_j & x_j = 0, \text{元件正常} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $j=1, 2, \dots, n$; n 为系统元件个数; X_j 为第 j 个元件的状态变量; x_j 为第 j 个元件状态变量的取值; p_j 为第 j 个元件的故障概率。

电力负荷具有时变性,长期实践验证,随机潮流计算中负荷的有功功率和无功功率的随机模型符合正态分布,其概率密度函数为:

$$f(P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_P} \exp \left[- \frac{(P - \mu_P)^2}{2\sigma_P^2} \right] \quad (5)$$

$$f(Q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_Q} \exp \left[- \frac{(Q - \mu_Q)^2}{2\sigma_Q^2} \right] \quad (6)$$

其中, μ_P, μ_Q 分别为负荷有功功率、无功功率的均值; σ_P, σ_Q 分别为负荷有功功率、无功功率的标准差。

2 抽样方法

2.1 拉丁超立方抽样法

拉丁超立方抽样法使抽样点的分布具有均匀性,从而能够快速收敛。设随机变量抽样 N 次,拉丁超立方抽样将其累积分布函数的纵轴分成 N 个等间距,每个等区间的宽度为 $1/N$,在每个区间均匀分布抽取一个随机数作为抽样值。

设 J 维随机变量 $X_1, X_2, \dots, X_J, X_j$ 为其中任一随机变量, X_j 的累积分布函数为 F_j ; 设各变量相互独立, x_{ji} 为第 j 个变量的第 i 次抽样值。先产生每一列是 $(1, N)$ 整数随机序列的 $N \times J$ 维矩阵, m_{ij} 为其 i 行 j 列元素;再产生每个元素服从均匀分布 $U(0, 1)$ 的 $N \times J$ 维矩阵, u_{ij} 为其 i 行 j 列元素。则拉丁超立方抽样结果为:

$$x_{ji} = F_j^{-1} \left(\frac{m_{ij} - u_{ij}}{N} \right) \quad (7)$$

其中, $j=1, 2, \dots, J; i=1, 2, \dots, N$ 。

2.2 改进的重要抽样方法

根据式(4),元件状态的直接抽样步骤如下。

a. 直接抽样服从均匀分布 $U(0, 1)$ 的随机数 μ_{ji} 。

b. 如果 $\mu_{ji} \leq p_j$, 则 $X_j = 1$, 元件故障; 否则 $X_j = 0$, 元件正常。

重要抽样用于电力系统可靠性评估时,主要是为了避免对元件无故障状态的抽样。与电力系统可靠性评估不同,随机潮流计算不能只抽样元件的故障状态。本文提出结合拉丁超立方抽样的改进重要抽样方法,抽样过程如下:

a. 拉丁超立方抽样服从均匀分布 $U(0, 1)$ 的随机数;

b. 根据重要抽样概念,采用将元件故障概率乘以最优乘子的重要概率密度函数,以改变元件状态被抽取的概率。

由建立的系统随机变量概率分布模型可知,风速、光伏电池出力及负荷是连续概率分布,电源和线路的随机故障是离散概率分布。根据其不同特点,对连续概率分布的随机变量采用拉丁超立方抽样,对离散概率分布的随机变量采用改进的重要抽样方法。

3 随机变量的抽样建模

设系统中有 n_1 个风电场, n_2 台风力发电机, n_3 个光伏电池, n_4 个非分布式电源, n_5 条线路, n_6 个负荷点。

3.1 随机变量的拉丁超立方抽样建模

风电场的输出功率模型取决于风速模型、每台风力发电机的出力模型及每台风力发电机的可靠性模型。对于规模较小的风电场,在假设各风力发电机安装位置的地貌基本一致且忽略尾流效应的情况下,认为坐落在同一风电场的不同风力发电机具有几乎相同的风速、风向^[22-23],进而假设同一风电场内所有风力发电机在相同时间段内的风速和风向相同。根据反变换法,由式(1)得到:

$$x = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (8)$$

其中, x 为服从均匀分布 $U(0,1)$ 的随机数。

由此,风速转化为用均匀分布 $U(0,1)$ 的随机数来模拟。系统中有 n_1 个风电场,则需抽样均匀分布的随机变量个数为 $J_1 = n_1$,由式(7)得出其拉丁超立方抽样结果为:

$$x_{ji} = \frac{m_{ij} - u_{ij}}{N} \quad (9)$$

其中, $j = 1, 2, \dots, J_1; i = 1, 2, \dots, N$ 。

由此,第 j 个风电场的第 i 次抽样得到的风速值为:

$$v_{ji} = c_j (-\ln x_{ji})^{1/k_j} \quad (10)$$

其中, k_j, c_j 为第 j 个风电场的风速 Weibull 分布参数。

由每小时的风速抽样值,再根据式(2)计算出风力发电机正常状态下的出力。

根据式(3),在一定时间段内光伏电池的出力用 Beta 分布的随机数来模拟。系统需抽样 Beta 分布的随机变量个数为 $J_2 = n_2$,由式(7)得出其拉丁超立方抽样结果为:

$$x_{ji} = \text{Be}^{-1}\left(\frac{m_{ij} - u_{ij}}{N}\right) \quad (11)$$

其中, $j = J_1 + 1, J_1 + 2, \dots, J_1 + J_2; i = 1, 2, \dots, N; \text{Be}^{-1}()$ 为 Beta 分布逆变换计算,其参数等于一定时间段内的光照强度 Beta 分布参数。

由此,在一定时间段内第 j 个光伏电池的第 i 次抽样得到的正常状态下出力为:

$$P_{PV,ji} = x_{ji} P_{m,ji} \quad (12)$$

其中, $P_{m,ji}$ 为一定时段内第 j 个光伏电池的最大出力。

根据式(5)和式(6),负荷的不确定性用正态分布的随机数来模拟。系统需抽样正态分布的随机变量个数为 $J_3 = 2n_6$,由式(7)得出其拉丁超立方抽样结果为:

$$x_{ji} = \text{Nor}^{-1}\left(\frac{m_{ij} - u_{ij}}{N}\right) \quad (13)$$

其中, $j = J_1 + J_2 + 1, J_1 + J_2 + 2, \dots, J_1 + J_2 + J_3; i = 1, 2, \dots, N; x_{ji}$ 为第 j 个负荷的第 i 次抽样值; $\text{Nor}^{-1}()$ 为正态

分布逆变换计算,其参数为负荷的 μ_p, σ_p 及 μ_Q, σ_Q 。

3.2 随机变量的改进重要抽样建模

利用提出的改进重要抽样法,对系统的电源和线路状态进行抽样,对应需抽样的随机变量个数为 $J_4 = n = n_2 + n_3 + n_4 + n_5$ 。

a. 拉丁超立方抽样的结果与式(9)相同,但其 $j = J_1 + J_2 + J_3 + 1, J_1 + J_2 + J_3 + 2, \dots, J_1 + J_2 + J_3 + J_4$ 。

b. 设电源和线路状态的重要概率密度函数为:

$$f'(X_{ji} = x_{ji}) = \begin{cases} \lambda_i p_j & x_{ji} = 1, \text{元件故障} \\ 1 - \lambda_i p_j & x_{ji} = 0, \text{元件正常} \end{cases} \quad (14)$$

其中, λ_i 为最优乘子。

根据本文考虑的随机因素,随机潮流计算结果与风速、光伏电池出力、负荷、电源和线路状态有关。前 3 个随机变量已采用拉丁超立方抽样,由此可近似认为随机潮流计算结果函数为 $Y(X_a)$ 。重要抽样是在保持原有样本均值不变的条件下,改变现有样本空间的概率分布,则有:

$$E(Y) = \sum_{X_a \in \Omega} Y(X_a) f(X_a) = E(Y') = \sum_{X_a \in \Omega} Y'(X_a) f'(X_a) \quad (15)$$

其中, Ω 为状态空间,由 $x_{ji} = 0, x_{ji} = 1$ 组成; $Y'(X_a)$ 为重要概率密度函数下的随机潮流计算结果函数。

设有:

$$f'(X_a) = a f(X_a) \quad (16)$$

$$a = \begin{cases} \lambda_i & x_{ji} = 1, \text{元件故障} \\ \frac{1 - \lambda_i p_j}{1 - p_j} & x_{ji} = 0, \text{元件正常} \end{cases} \quad (17)$$

则有:

$$Y'(X_a) = \frac{Y(X_a)}{a} \quad (18)$$

求取最优乘子 λ_i 有基于方差最小法和基于交叉熵最小法。本文为了简易性,并考虑到电力系统的实际情况,采用文献[24]中 λ_i 的求取方法。利用 λ_i 值修正一定抽样次数的随机潮流计算结果,修正过程为:根据电源和线路的状态,利用式(17)求得 a 值,将其代入式(18)得到计算结果的修正值。

引入反映计算精度的变异系数,定义为:

$$C_v = \sqrt{\frac{D(Y)}{NE^2(Y)}} \quad (19)$$

其中, C_v 为变异系数; $D(Y)$ 为方差; $E(Y)$ 为均值。

4 含分布式电源的随机潮流计算

由随机变量的抽样建模产生随机数据,以模拟考虑的随机因素,再在确定性潮流计算的基础上进行含分布式电源系统的随机潮流计算。

4.1 确定性潮流计算方法

本文采用牛顿拉夫逊法进行确定潮流计算。在确定性潮流计算中,当分布式电源的无功控制方式为恒功率因数控制时,可作为 PQ 节点处理。接入电

网的风力发电系统通过风电机组中电容器的自动投切,可使功率因数恒定不变。与风力发电类似,光伏发电系统也可由电容器组来保证功率因数基本为常数。因此,风力发电系统和光伏发电系统均可简化处理为 PQ 节点。

4.2 随机潮流计算步骤

拉丁超立方抽样适用于相互独立的多维随机变量,也适用于相互关联的多维随机变量。本文在考虑系统各随机变量相互独立的情况下,含分布式电源系统随机潮流的计算步骤如下。

a. 求出风速 Weibull 分布的参数 k 、 c , 及某一时段内光照强度 Beta 分布的参数 α 、 β 。

以小时平均值统计某地某年内的风速及光照强度数据。认为在全年 8 760 h 的时间段内风速服从 Weibull 分布,求出该组风速 8 760 个数值的均值 μ 和标准差 σ ,再由式(20)求得 k 、 c 。

$$k = \left(\frac{\sigma}{\mu} \right)^{-1.086}, \quad c = \frac{\mu}{\Gamma(1+1/k)} \tag{20}$$

认为每天的每个相同时间段内,光照强度服从相同的 Beta 分布。按其所处每天的时段来划分,形成 24 组,每组 365 项数据。求出每组光照强度的均值 μ 和标准差 σ ,再由式(21)求得 α 、 β 。

$$\alpha = \mu \left[\frac{\mu(1-\mu)}{\sigma^2} - 1 \right], \quad \beta = (1-\mu) \left[\frac{\mu(1-\mu)}{\sigma^2} - 1 \right] \tag{21}$$

取每一组光伏电池输出功率的最大值作为该时间段内的最大出力 P_m 。

b. 输入系统基准状态的数据、正态负荷数据、分布式电源参数、电源和线路的故障概率等;设置最优乘子的初值、最大抽样次数 $N_{\max}$ 、计算精度、最优乘子修正间隔 τ ;令最优乘子修正次数 $i=0$,抽样次数初值 $N_0=\tau$ 。

c. 根据考虑的系统随机因素,统计需抽样的随机变量总个数为 J ,用第 3 节方法对随机变量进行抽样建模。

d. 抽样数据,得到 $\tau \times J$ 维抽样矩阵;形成每次抽样的系统网络拓扑及输入数据,如果某次抽样出现线路故障,则程序改变网络拓扑结构;再用牛顿拉夫逊法对每次网络进行确定性潮流计算;然后用 λ_i 值修正计算结果。

e. 判断是否满足 $N_i > N_{\max}$ 或是否满足计算精度,若是,则结束计算,并统计测试点的概率分布;否则,继续下一步骤。

f. 修正 λ_i ,令 λ_i 修正后的值为 d ;再令 $i=i+1$, $N_i=N_i+\tau$, $\lambda_i=d$;然后转到步骤 d。

5 算例分析

本文由 Homer 软件提供风速和光照强度历史

数据。风力发电机参数为 $P_N=2\text{ MW}$, $v_{ci}=3\text{ m/s}$, $v_N=10.5\text{ m/s}$, $v_{co}=22\text{ m/s}$, $k=2.25$, $c=4.5$ 。光伏电池参数如表 1 所示。在配置 G2020 处理器、1.95 G 内存的计算机上,用软件 MATLAB 编制随机潮流计算程序。算例选用 13:00—14:00 时间段的光照参数,设 $\tau=500$ 。

表 1 光伏电池的参数
Tab.1 Parameters of photovoltaic cell

时间段	α	β	P_m/kW
07:00—08:00	0.538	1.287	32.53
08:00—09:00	0.862	1.947	250.32
09:00—10:00	1.862	1.578	497.65
10:00—11:00	1.889	1.477	720.15
11:00—12:00	1.999	1.299	938.48
12:00—13:00	2.034	1.251	1 060.40
13:00—14:00	1.886	1.141	1 144.70
14:00—15:00	1.906	1.141	1 123.60
15:00—16:00	2.119	1.474	1 087.90
16:00—17:00	2.016	1.507	945.96
17:00—18:00	1.884	1.732	751.95
18:00—19:00	1.537	1.654	473.51

5.1 Wood and Woollenberg 6 节点系统

对 Wood and Woollenberg 6 节点系统^[25]在没有加入分布式电源及不考虑线路随机故障下,分别采用本文组合抽样法、直接抽样法进行随机潮流模拟计算,以文献[12]基于 UT 法随机潮流计算得到的 4 节点电压标准差为计算精度。由表 2 可知,组合抽样法得到的节点电压均值与文献[12]、直接抽样的差值小,表明了本文方法的正确性,均值的相对误差左、右 2 列数据分别为文献[12]、直接抽样法的均值与本文组合抽样法均值的相对误差,表中均值为标么值。

表 2 不同随机潮流计算方法的计算结果
Tab.2 Results of different probabilistic power flow calculation methods

节点号	文献[12]		直接抽样法		本文组合抽样法		均值的相对误差/%
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	
1	1.050 0	0	1.050 0	0	1.050 0	0	0,0
2	1.050 0	0	1.050 0	0	1.050 0	0	0,0
3	1.070 0	0	1.070 0	0	1.070 0	0	0,0
4	0.989 4	0.001 7	0.985 5	0.001 7	0.984 7	0.001 7	0.48,0.08
5	0.985 4	0.001 9	0.982 8	0.002 2	0.982 1	0.001 4	0.33,0.07
6	1.004 4	0.001 5	1.002 3	0.001 7	1.001 8	0.001 0	0.26,0.05

5.2 IEEE 14 节点系统

在 IEEE 14 节点系统的节点 9 接入由 20 台风力发电机组成的风电场,节点 14 接入由 20 个光伏电池组成的光伏发电系统。设电压合格范围为(0.95,1.05)p.u.。

a. 接入分布式电源的功率因数取 0.93,考虑线路随机故障下,采用本文方法对不同抽样次数下得到的线路 2—4 有功潮流的最大值、均值、标准差及

变异系数进行比较,结果见表 3,表中最大值、均值为标么值。由表 3 可见,有功潮流的标准差和变异系数随抽样次数的增大迅速减小,且有功潮流的最大值、均值的变化都较小;当抽样次数为 5 000 时,标准差和变异系数均较小,就能达到一般工程计算的要求。这表明了本文方法具有良好的收敛性。

表 3 随机潮流计算的收敛速度
Tab.3 Convergence speed of probabilistic power flow calculation

抽样次数	最大值	均值	标准差	变异系数
1 000	0.936 5	0.417 5	0.176 8	13.391×10^{-3}
3 000	0.964 8	0.426 3	0.155 3	6.651×10^{-3}
5 000	0.975 7	0.426 2	0.078 8	2.615×10^{-3}
7 000	0.980 5	0.426 1	0.078 2	2.194×10^{-3}
10 000	0.980 7	0.426 1	0.077 8	1.826×10^{-3}

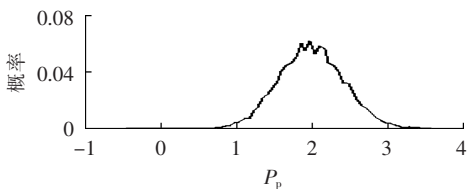
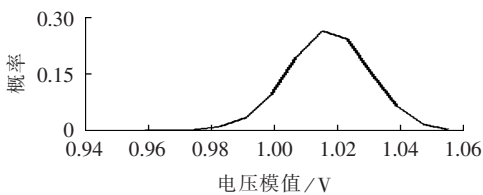
b. 进一步对 4 种情况进行随机潮流模拟计算: Case1 为没有接入分布式电源,没有考虑线路随机故障;Case2 为没有接入分布式电源,考虑线路随机故障;Case3、Case4 为考虑线路随机故障下,接入分布式电源的功率因数分别为 0.93、0.745。以平衡点有功出力、节点 9 电压、线路 9-14 潮流为测试点,计算结果如表 4 及图 1 所示,表中电压最大值、电压最小值、电压均值、无功潮流均值及图中平衡点有功出力 P_p 、线路 9-14 有功潮流 P_{9-14} 、无功潮流 Q_{9-14} 为标么值。

由表 4 的 Case1 可知,系统没有接入分布式电源且不考虑线路故障时,节点 9 电压的变化在合格范围内;由表 4 的 Case2 可知,考虑线路故障时节点 9 电压越限的概率为 0.11%,平衡点有功出力越限的概率增加了 0.15%,节点 9 电压、线路 9-14 无功潮流的标准差均增大,表明线路随机故障对系统潮流分布的影响不容忽视。

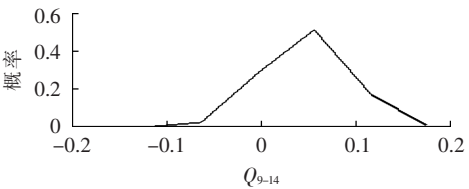
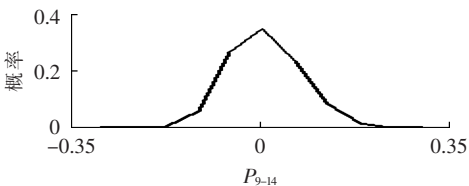
由表 4 的 Case3、Case4 可知,当接入的分布式电源功率因数由 0.93 降低为 0.745 时,节点 9 电压越限的概率增加了 0.86%,节点 9 电压的标准差增大了 25%,线路 9-14 无功潮流的标准差增大了 40%。这表明接入分布式电源的功率因数大小对系统电压质量的影响大,充足的无功补偿能有效克服分布

表 4 不同情况下的随机潮流计算结果
Tab.4 Results of probabilistic power flow calculation under different conditions

参数	Case1	Case2	Case3	Case4
有功出力越限次数	65	80	0	2
电压越限次数	0	11	13	99
电压最大值	1.062 1	1.069 4	1.059 0	1.045 8
电压最小值	0.975 2	0.947 7	0.954 6	0.867 0
电压均值	1.008 1	1.009 4	1.013 5	0.991 6
电压标准差	0.012 0	0.012 5	0.012 8	0.016 0
无功潮流均值	-0.008 6	-0.008 7	0.018 2	0.062 9
无功潮流标准差	0.036 0	0.036 6	0.042 0	0.058 8



(a) 节点 9 电压和平衡点有功出力概率



(b) 线路 9-14 的有功潮流和无功潮流概率

图 1 分布式电源功率因数为 0.93 时的随机潮流
Fig.1 Probabilistic power flow when distributed generation power factor is 0.93

式电源并网导致的系统电压波动。

5.3 IEEE 57 节点系统

在 IEEE 57 节点系统的节点 16 接入由 80 台风力发电机组成的 4 个风电场,节点 17 接入由 80 个光伏电池组成的 4 个光伏发电系统。正态分布的负荷波动标准差取 10%,分布式电源的功率因数取 0.93。分别采用本文组合抽样、直接抽样的蒙特卡罗模拟法计算随机潮流,以节点 16 电压为测试点,计算时间见表 5,表中潮流均值为标么值。由表 5 可知,当反映计算精度的变异系数达到相等时,组合抽样比直接抽样所需抽样次数大幅减少,模拟计算时间也明显减少,表明了组合抽样在计算效率上具有显著优势。

表 5 不同抽样方法的计算时间比较

Tab.5 Comparison of calculation time between different sampling methods

抽样方法	抽样次数	均值	标准差	变异系数	计算时间/s
组合抽样	10 000	1.012 9	0.013 0	$1.283\ 4\times10^{-4}$	312
直接抽样	61 153	1.012 5	0.013 2	$1.283\ 4\times10^{-4}$	1 972

6 结论

含分布式电源系统随机潮流模拟计算中,随机变量多,且概率分布不同。为了减小方差,本文提出

了基于组合抽样的蒙特卡罗模拟法,对连续概率分布的负荷、分布式电源出力采用拉丁超立方抽样,对离散概率分布的电源和线路随机故障采用改进的重要抽样方法。算例分析得到如下结论:

a. 本文提出的组合抽样方法可显著提高蒙特卡罗模拟的收敛速度,减少计算时间,适合用于含分布式电源系统随机潮流的模拟计算;

b. 线路随机故障对系统潮流分布有明显的影响,如果忽略其影响,将会造成较大误差。

参考文献:

- [1] 余昆,曹一家,倪以信,等. 分布式发电技术及其并网运行研究综述[J]. 河海大学学报:自然科学版,2009,37(6):741-748.
YU Kun,CAO Yijia,NI Yixin,et al. Review of research on distributed generation technology and its integrated operation [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences,2009,37(6):741-748.
- [2] 孙元章,吴俊,李国杰. 风力发电对电力系统的影响[J]. 电网技术,2007,31(20):55-62.
SUN Yuanzhang,WU Jun,LI Guojie. Influence research of wind power generation on power systems[J]. Power System Technology,2007,31(20):55-62.
- [3] 王志群,朱守真,周双喜,等. 分布式发电对配电网电压分布的影响[J]. 电力系统自动化,2004,28(16):56-60.
WANG Zhiqun,ZHU Shouzheng,ZHOU Shuangxi,et al. Impacts of distributed generation on distribution system voltage profile [J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(16):56-60.
- [4] 李红伟,王敬章,张安安. 一种含分布式发电系统的三相配电网潮流直接算法[J]. 电力自动化设备,2012,32(1):67-71.
LI Hongwei,WANG Jingzhang,ZHANG Anan. Direct algorithm of three-phase power flow for radial distribution network with DGs[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(1):67-71.
- [5] 廖迎晨,甘德强,陈星莺,等. 考虑分布式电源出力不确定性的城市电网模糊最优潮流分析[J]. 电力自动化设备,2012,32(9):35-39.
LIAO Yingchen,GAN Deqiang,CHEN Xingying,et al. Fuzzy optimal power flow analysis considering indeterminacy of distributed generation for urban power grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(9):35-39.
- [6] DANIEL V,JOSÉ L P,ANDRÉS F. Probabilistic load flow including wind power generation[J]. IEEE Trans on Power Systems,2011,26(3):1659-1667.
- [7] 余昆,曹一家,陈星莺,等. 含分布式电源的地区电网动态概率潮流计算[J]. 中国电机工程学报,2011,31(1):20-25.
YU Kun,CAO Yijia,CHEN Xingying,et al. Dynamic probability power flow of district grid containing distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(1):20-25.
- [8] 刘怡芳,张步涵,李俊芳,等. 考虑电网静态安全风险的随机潮流计算[J]. 中国电机工程学报,2011,31(1):59-64.
LIU Yifang,ZHANG Buhuan,LI Junfang,et al. Probabilistic load flow algorithm considering static security risk of the power system[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(1):59-64.
- [9] USAOLA J. Probabilistic load flow in systems with wind generation[J]. IET Generation Transmission and Distribution,2009,3(12):1031-1041.
- [10] FAN Miao,VITTAL V,HEYDT G T,et al. Probabilistic power flow studies for transmission systems with photovoltaic generation using cumulants [J]. IEEE Trans on Power Systems,2012,27(4):2251-2261.
- [11] ZHANG P,LEE S T. Probabilistic load flow computation using the method of combined cumulant and Gram-Charlier expansion [J]. IEEE Trans on Power Systems,2004,19(1):676-682.
- [12] AIEN M,FOTUHI-FIRUZABAD M,AMINIFAR F. Probabilistic load flow in correlated uncertain environment using unscented transformation[J]. IEEE Trans on Power Systems,2012,27(4):2233-2241.
- [13] VALVERDE G,SARIC A T,TERZIJA V. Probabilistic load flow with non-Gaussian correlated random variables using Gaussian mixture models[J]. IET Generation Transmission and Distribution,2012,6(7):701-709.
- [14] MORALES J M,PÉREZ-RUIZ J. Point estimate schemes to solve the probabilistic power flow[J]. IEEE Trans on Power Systems,2007,22(4):1594-1600.
- [15] 胡泽春,王锡凡,张显,等. 考虑线路故障的随机潮流[J]. 中国电机工程学报,2005,25(24):26-33.
HU Zechun,WANG Xifan,ZHANG Xian,et al. Probabilistic load flow method considering branch outages[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(24):26-33.
- [16] 王晓滨,郭瑞鹏,曹一家,等. 用于系统可靠性评估的各阶故障独立重要抽样算法[J]. 中国电机工程学报,2011,31(16):24-31.
WANG Xiaobin,GUO Ruipeng,CAO Yijia,et al. Algorithm evaluating power systems reliability with separate importance sampling each state subspace of different contingencies order [J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(16):24-31.
- [17] 谢绍宇,王秀丽,王锡凡,等. 自适应重要抽样技术在发电系统可靠性评估中的应用[J]. 电力系统自动化,2010,34(5):13-17.
XIE Shaoyu,WANG Xiuli,WANG Xifan,et al. Application of adaptive importance sampling technique in reliability evaluation of composite generation and transmission systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(5):13-17.
- [18] 于晗,钟志勇,黄杰波,等. 采用拉丁超立方采样的电力系统概率潮流计算方法[J]. 电力系统自动化,2009,33(21):32-35.
YU Han,ZHONG Zhiyong,HUANG Jiebo,et al. A probabilistic load flow calculation method with Latin hypercube sampling[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(21):32-35.
- [19] 李俊芳,张步涵. 基于进化算法改进拉丁超立方抽样的概率潮流计算[J]. 中国电机工程学报,2011,31(25):90-96.
LI Junfang,ZHANG Buhuan. Probabilistic load flow based on improved Latin hypercube sampling with evolutionary algorithm [J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(25):90-96.
- [20] CHEN Yan,WEN Jinyu,CHENG Shijie. Probabilistic load flow method based on Nataf transformation and Latin hypercube sampling [J]. IEEE Trans on Sustainable Energy,2013,4(2):294-301.
- [21] 王晓滨,郭瑞鹏,曹一家,等. 电力系统可靠性评估的自适应分层重要抽样法[J]. 电力系统自动化,2011,35(3):32-38.
WANG Xiaobin,GUO Ruipeng,CAO Yijia,et al. A self-adapting stratified and importance sampling method for power system reliability evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(3):32-38.
- [22] MEHRTASH A,WANG Peng,GOEL L. Reliability evaluation of

- power systems considering restructuring and renewable generators [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2012, 27(1): 243-250.
- [23] 吴俊, 李国杰, 孙元章. 基于随机规划的并网风电场最大注入功率计算[J]. 电网技术, 2007, 31(14): 15-19.
- WU Jun, LI Guojie, SUN Yuanzhang. Maximum injection power calculation of wind farms connected to power systems based on stochastic programming[J]. Power System Technology, 2007, 31(14): 15-19.
- [24] 宋晓通, 谭震宇. 改进的重要抽样法在电力系统可靠性评估中的应用[J]. 电网技术, 2005, 29(13): 56-64.
- SONG Xiaotong, TAN Zhenyu. Application of improved importance sampling method in power system reliability evaluation [J]. Power System Technology, 2005, 29(13): 56-64.
- [25] YAN Ping, SEKAR A. Study of linear models in steady state analysis of power systems[C]//Proceedings of the 33rd South-

eastern Symposium on System Theory, 2001. Athens, OH, Greece: [s.n.], 2001: 127-131.

作者简介:



彭寒梅

彭寒梅(1979-), 女, 湖南衡阳人, 副教授, 博士研究生, 研究方向为配电系统可靠性分析与规划、分布式发电 (E-mail: penghanmei8@163.com);

曹一家(1969-), 男, 湖南益阳人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 研究方向为电力系统稳定与控制、信息技术在电力系统中的应用;

黄小庆(1981-), 女, 湖南湘阴人, 讲师, 博士, 研究方向为电力系统可靠性分析、电力系统脆弱性评估。

Probabilistic load flow calculation based on combination sampling for power system containing distributed generations

PENG Hanmei, CAO Yijia, HUANG Xiaoqing, LUO Cong

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Since there are multiple random variables in the probabilistic power flow calculation of power system containing distributed generations, a Monte Carlo simulation method based on combination sampling is proposed, which applies different sampling methods according to the different characteristics of random factors and considers the influence of random line fault. A probability distribution model is built with the random factors as random variables. In order to reduce the variance and improve the calculation efficiency, Latin hypercube sampling is adopted for loads and distributed generation outputs, which have continuous probability distribution, while the improved importance sampling method combined with Latin hypercube sampling is adopted for random power source and lines faults, which have discrete probability distribution. The sampling models are established for system random variables. IEEE 14-bus system and IEEE 57-bus system containing distributed generations are analyzed and results show that the proposed method is effective and has good convergency.

Key words: probabilistic load flow; distributed power generation; combination sampling; Latin hypercube sampling; importance sampling; models

(上接第20页 continued from page 20)

Status and prospect of state estimation for power system containing renewable energy

ZHAO Junbo, ZHANG Gexiang, HUANG Yanquan

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: As the renewable energy sources are integrated into power system, their characteristics should be considered in the further research of power system state estimator. The processing of system topology and the methods of system observability are reviewed. The grid-connection models of renewable energy sources are classified and introduced while the state estimation methods of power system containing renewable energy sources are classified and introduced according to the grid-connection modes of renewable energy sources. The research status of traditional bad data identification is summarized, based on which, the problems existing in the bad data identification of power system containing renewable energy sources are analyzed and the possible solutions are proposed. The research directions concerning the modeling of power system containing renewable energy sources, its state estimation algorithms and its bad data identification are prospected.

Key words: electric power systems; renewable energy; grid-connection; models; state estimation; observability analysis; bad data identification