

# 基于改进 LHS 的含风电电力系统概率潮流计算

严 岩<sup>1</sup>, 苏宏升<sup>1</sup>, 车玉龙<sup>1,2</sup>

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 兰州 730070; 2. 西南交通大学电气工程学院, 成都 610031)

**摘 要:** 基于拉丁超立方抽样的蒙特卡模拟法应用于概率潮流计算时存在精度相对较低和计算量复杂等问题, 本文对拉丁超立方抽样算法中采样排序进行改进, 提出一种将随机行走原理和拉丁超立方采样相结合的方法。将该方法应用在含风电的 IEEE-14 节点和 IEEE-118 节点并且和基于 Gram-Schmidt 拉丁超立方采样法进行比较分析。理论及数值计算结果表明: 该方法能更好地解决拉丁超立方采样法中精度相对较低的缺陷, 同时能更为精确地反应概率潮流计算中随机变量的数字特征, 具有较好的工程实用价值。

**关键词:** 概率潮流; 随机行走; 拉丁超立方抽样; 蒙特卡罗法

**中国分类号:** TM744

**文献标识码:** A

## 0 引 言

随着风力发电在我国的大力推广, 风电机组在并网运行时除了给电力系统带来如电压波动、谐波污染等问题外, 还会影响电网运行的稳定性。许多大型风电场直接接入到电力系统中, 不但使得线路之间的传输功率发生改变, 还增加了节点电压的越限概率。这些不确定因素会给电力系统规划和运行带来很多问题。基于确定性潮流计算方法只能反映电力系统在某种确定条件下的稳态运行状况, 不能准确分析不确定因素的场景。因此, Borkowska<sup>[1]</sup>于 1974 年提出概率潮流 (probabilistic load flow, PLF) 概念, 并将其应用于潮流计算中对其中的不确定因素进行分析。

在 PLF 提出之后 40 多年里, 国内外学者提出几种计算方法<sup>[2~6]</sup>。目前常用的概率潮流评估方法可分为 3 类: 解析法<sup>[7]</sup>, 点估计<sup>[8]</sup> (point estimate method, PEM) 和蒙特卡罗模拟法<sup>[9]</sup> (Monte Carlo simulation, MCS)。解析法得到输出变量的随机变量波动部分与输入变量波动之间的近似线性关系, 快速地给出输出随机变量的分布, 但该方法进行了假设和近似, 且线性化影响计算准确性, 操作复杂。点估计法是一种近似的求解方法, 可在短时间

内精确获得输出随机变量的均值和方差, 但无法得到输出随机变量的分布函数。蒙特卡罗法只有在大规模采样的条件下才能提高精度, 而且计算量较大, 较高成本。为了解决这些方法所存在的问题, 人们提出基于超丁立方采样的蒙特卡罗法。

拉丁超立方抽样 (latin hypercube sampling, LHS) 是一种良好的散布均匀性分层抽样<sup>[10]</sup>, 均匀性高于蒙特卡罗法, 且 LHS 是由区间采样和排序两部分构成。有各种改进的排序方法, 比如 Cholesky 分解法<sup>[11]</sup>, Single-Switch 优化方法<sup>[12]</sup>, Columnwise-Pairwise 算法<sup>[13]</sup>、Rank Gram-Schmidt<sup>[14]</sup> 算法。Cholesky 分解技术仅限于相关系数  $\rho$  为正定对称矩阵的情况, 格拉姆-施密特正交化方法, 计算量极大。针对上述方法的缺点的不足, 本文提出一种将随机行走理论和拉丁超立方相结合的方法, 并将该方法应用于含风电系统的 IEEE-14 节点和 IEEE-118 节点, 验证该方法的有效性。

## 1 蒙特卡罗概率潮流计算法

蒙特卡罗法是根据抽样统计量或参数的值, 用计算机产生抽样的结果, 随着样本次数的增多, 得到的各次统计量或参数的估计值求得的平均值才能稳定。

收稿日期: 2016-03-04

基金项目: 国家基金项目 (61263004)

通信作者: 苏宏升 (1969—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事电力系统分析与控制, 概率潮流计算方面的研究。shsen@163.com

基于蒙特卡罗法的概率潮流计算方法见式(1):

$$\begin{cases} P_{ij} = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{ij} = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $P_{ij}$ 、 $Q_{ij}$ ——节点  $i$  和  $j$  注入有功和无功;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$ ——系统导纳矩阵元素的实部和虚部;  $\theta_{ij}$ ——为节点  $i$  和  $j$  的相角差,可概括为  $W=f(X)$ , 其中  $W=[w_1, w_2, \dots, w_n]$  表示节点注入量,包括节点注入的有功功率和无功功率,  $X=[x_1, x_2, \dots, x_n]$  为节点的状态变量,包括各节点的电压幅值和角度,  $f$  为潮流计算的方程组。

设节点  $i$  注入功率  $w_i$  的概率分布函数为:

$$Y_i = F_i(w_i) \quad i=1,2,\dots,b \quad (2)$$

得到采样规模为  $m$  阶的系统节点注入功率样本矩阵如式(3)所示,其中  $w_b^m$  代表的第  $m$  行第  $b$  列注入功率元素。

$$\begin{bmatrix} w_1^1, w_2^1, \dots, w_b^1 \\ w_1^2, w_2^2, \dots, w_b^2 \\ \vdots \\ w_1^m, w_2^m, \dots, w_b^m \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据上述得到的系统状态向量第  $l$  行元素  $[x_1^l, x_2^l, \dots, x_b^l]$ , 因此节点注入功率样本矩阵各行对应进行计算得到对应的系统矩阵如式(4)所示,其中  $x_b^m$  代表的是第  $b$  行  $m$  列的系统状态元素。

$$\begin{bmatrix} x_1^l, x_2^l, \dots, x_b^l \\ x_1^2, x_2^2, \dots, x_b^2 \\ \vdots \\ x_1^m, x_2^m, \dots, x_b^m \end{bmatrix} \quad (4)$$

设系统有  $l$  条支路,采用式(5)对系统状态矩阵的每一行元素进行计算:

$$\begin{cases} P_{ij} = U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - t_{ij} \cdot G_{ij} \cdot U_i^2 \\ Q_{ij} = U_i U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) + t_{ij} \cdot (B_{ij} - b_{ijo}) \cdot U_i^2 \end{cases} \quad (5)$$

即可得到支路潮流矩阵  $P=[P_1, P_2, \dots, P_b]$ ,  $Q=[Q_1, Q_2, \dots, Q_b]$  第  $l$  行得到的行向量  $P=[P_1^l, P_2^l, \dots, P_b^l]$ ,  $Q=[Q_1^l, Q_2^l, \dots, Q_b^l]$ 。

具体系统支路潮流矩阵为:

$$\begin{bmatrix} P_1^l, P_2^l, \dots, P_b^l \\ P_1^2, P_2^2, \dots, P_b^2 \\ \vdots \\ P_1^m, P_2^m, \dots, P_b^m \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} Q_1^1, Q_2^1, \dots, Q_b^1 \\ Q_1^2, Q_2^2, \dots, Q_b^2 \\ \vdots \\ Q_1^m, Q_2^m, \dots, Q_b^m \end{bmatrix} \quad (7)$$

上述支路矩阵可概括为:

$$Z=g(X) \quad (8)$$

式中,  $Z$ ——支路潮流(包括有功,无功);  $g$ ——支路潮流方程。

通过对系统矩阵和支路矩阵进行数字统计得到它们的概率分布和数字特征。当采样规模越大时,拟合度才会越高,但是计算量大,耗时间多。

## 2 改进的拉丁超立方抽样

### 2.1 样本生成

LHS 法的主要思想基于逆函数转换方法。采样是通过对每个输入变量进行随机采样,从而保证采样能够完全覆盖整个随机变量分布区域。设有  $K$  个随机变量采样,采样规模为  $N$ ,  $X_1, X_2, \dots, X_K$  是待求问题中的  $K$  个输入随机变量,  $X_k$  为  $X_1, X_2, \dots, X_K$  中的任意一个随机变量。其分布函数为  $Y_k=F_k(X_k)$ , 具体采样方法如下:把分布函数的取值范围  $[0,1]$  被等分成  $N$  个子区间,等间距不重叠的空间,每个区间的宽度为  $1/N$ ,选取每个中点作为采样值,然后用函数  $Y_k=F_k(X_k)$  的反函数来计算  $X_k$  的采样值,即  $X_k$  的第  $n$  个采样值为:

$$X_{k,n} = F_k^{-1}\left(\frac{n-0.5}{N}\right) \quad (9)$$

于 晗等<sup>[14]</sup>采用 Gram-Schmidt 序列正交化方法与 LHS 算法相结合进行排序(gram-schmidt latin hypercube sampling, GSLHS)。该方法可根据处理问题的要求而实现不同精度的相关性,但计算量较大。因此本文提出一种新的方法,将随机行走方法应用在 LHS 算法中,对 LHS 中的排序方法进行改进。

### 2.2 改进的拉丁超立方抽样排序

随机行走<sup>[15]</sup>(random walk, RW)是一种用以描述连续的随机步骤所形成的轨迹的数学形式,物理学中的布朗运动可用一个简单的对称随机行走模型来描述。在计算机科学、物理学、生态学、经济学等许多领域,随机行走有广泛应用,考虑到随机行走理论在众多领域中有着广泛的应用,本文将随机

行走理论应用于拉丁超立方抽样排序中,提出一种将随机行走理论和拉丁超立方抽样相结合的方法(random walk-latin hypercube sampling, RWLHS)。将随机变量这一参数作为研究对象,通过随机行走理论对随机变量进行排序分析,研究概率潮流中随机变量的概率分布。此方法和文献[14]采用的方法类似,都是降低随机变量中采样值之间的相关度。

根据随机行走理论<sup>[16]</sup>: $D$  维格点上的随机游动,其向各个方向的搜索是等可能的,概率上保证了在各个方向上的采集是等可能的,将随机行走理论应用于 LHS 抽样,可确保各个样本被抽到的随机性、均等性和无偏好性,各个方向上的均匀探索信息量最大,能够反映样本特征。因此,将对称随机行走理论应用于 LHS 抽样过程,保证了各个样本被抽到的等可能性,客观上反应了抽样的随机性和无偏好性,从而使抽到的样本更具代表性。将每个随机变量的采样值排成矩阵的一行,当输入  $K$  个随机变量采样结束。

改进的随机行走理论排序方法的步骤:

1)首先生成  $K \times N$  阶的矩阵  $X$ 。随后进入下一步。

2)限定初始迭代点  $s_0$ ,初始行走步长  $\lambda$ 。

3)为了产生合适的迭代控制交数  $I$ ,  $a$  初值为 1。

4)当  $a < I$  时,随机生成  $c$  个代表位置的数,新的排序为生成的随机位置后  $\lambda$  步长范围内逆序,生成新的矩阵为  $L=[L_1, L_2, \dots, L_i, L_j]$  并从这  $c$  个新的序列中通过目标函数,选出相关度最小的序列记为  $s_1$ ,完成一步行走。

5)计算函数值带入目标函数(11)、(12),即  $f(s_1) < f(s_0)$  即找到一个比初始值好的点,否则  $a = a + 1$ ,回到步骤 4)处。

目标优化函数为:

$$\rho_{ij} = \frac{\text{cov}(L_k, L_j)}{\sqrt{\text{var}(L_k)\text{var}(L_j)}} \quad (10)$$

$$\rho_{\text{rms}}^2(L) = \frac{\sum_{j=2}^K \sum_{k=1}^{j-1} \rho_{kj}^2}{0.5(N-1)N} \quad (11)$$

此函数降低各随机变量中采样值之间的相关度  $L_k, L_j$  之间的相关性,  $\text{cov}(\cdot)$  为协方差,  $\text{var}(\cdot)$  为方差。

6)如果连续  $I$  次都找不到更优的值,则认为最优解就在以当前最优解为中心当前步长为半径的球。此时把  $\lambda$  减半回到步骤 1 处,再开始新一轮行走,直到  $\lambda$  小于  $\varepsilon$  时结束( $\varepsilon$  是提前设置的一个比较小的数)。将上述步骤中产生随机变量的值带入到目标函数中。

最终形成的采样矩阵  $X$  的行代表某个随机变量的所有采样值,列代表一次随机模拟中各随机变量的输入值。

### 3 改进的拉丁超立方抽样概率潮流算法

确定性潮流计算中,交流潮流模型的节点注入功率方程和支路潮流方程可以由方程表示。在已知注入功率  $W$  基础上,可求得相应的节点电压和支路潮流  $Z$ 。

$$\begin{cases} X = f(W) \\ Z = g(x) = g[f(W)] \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $W$  ——节点注入功率;  $X$  ——节点电压(包括电压幅值和相角);  $Z$  ——支路潮流(包括有功和无功);  $f$  和  $g$  分别为节点注入功率方程和支路潮流方程,具体流程图如图 1 所示。

为了验证 GRLHS 的有效性,本文将 RWLHS 和 GSLHS 以及 CSMCS 进行 PLF 计算结果进行对比;假设采用 10000 次的 CSMCS 方法进行 PLF 计算得到的结果是精确的,输出随机变量的期望值和标准差分别用  $\mu_{\text{acc}}$  和  $\sigma_{\text{acc}}$  表示。类似地,将上述几种方法在小规模采样情况下进行 PLF 计算得到的输出变量的期望值和标准差分别用  $\mu_{\text{sim}}$  和  $\sigma_{\text{sim}}$  表示,用输出变量的期望值和标准差的相对误差  $\xi_{\mu}$  和  $\xi_{\sigma}$  表征 PLF 结果的精度,计算公式为:

$$\xi_{\mu} = \left| \frac{\mu_{\text{sim}} - \mu_{\text{acc}}}{\mu_{\text{acc}}} \right| \times 100\% \quad (13)$$

$$\xi_{\sigma} = \left| \frac{\sigma_{\text{sim}} - \sigma_{\text{acc}}}{\sigma_{\text{acc}}} \right| \times 100\% \quad (14)$$

在 PLF 的输出结果中,每类变量的数量都不止一个,例如不同节点的电压幅值、有功功率。为了表示算法的收敛情况,将每种输出变量的相对误差的平均值  $\bar{\xi}_{\mu}$  和  $\bar{\xi}_{\sigma}$  来表示输出变量的误差情况。此外,由于 PLF 计算过程是波动的且具有随机性,为了准确评价本文提出的 PLF 评价本文提出的 PLF

计算方法的性能,取 100 次 PLF 计算结果平均值作为最终计算结果。

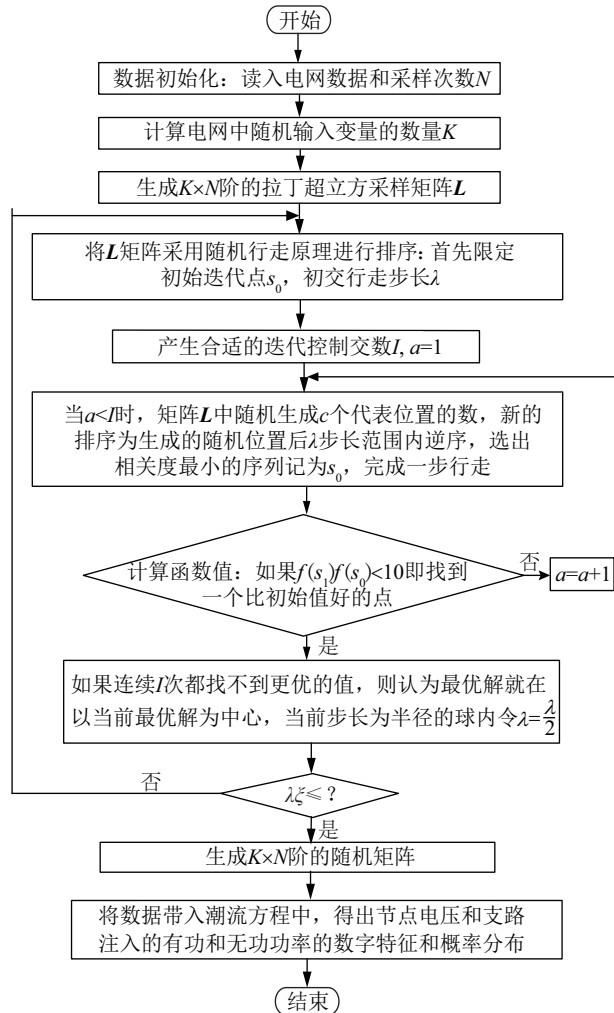


图1 基于改进拉丁超立采样的概率潮流计算流程图

Fig. 1 The calculation flow chart of improved Latin hypercube sampling based on probabilistic load flow

## 4 算例研究

### 4.1 风速模型

试验数据表明,大多数地区的平均风速分布都服从 Weibull 分布,因此本文采用二参数的 Weibull 模型,以便更加接近实际风速的分布<sup>[17]</sup>。其函数表达式为:

$$f(v) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (15)$$

式中,  $v$  ——随机风速;  $k$ 、 $c$  ——Weibull 分布的形状、尺度参数。本例中采用 Weibull 分布,则参数分别为  $k=9.6476$ ,  $c=2.3537$ 。

### 4.2 负荷模型

母线负荷可用正态分布表示<sup>[18]</sup>,其 PDF 表示为:

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (16)$$

式中,  $x$  ——节点负荷;  $\mu$  ——期望;  $\sigma^2$  ——方差。

### 4.3 双馈式异步电机数学模型

图2为异步发电机的等效电路与传输功率之间的关系<sup>[19,20]</sup>。图2中,  $r_1 + jx_1$  为定子阻抗;  $r_2 + jx_2$  为转子阻抗;  $r_m + jx_m$  为激磁阻抗;  $P_{cu1}$  为定子铜耗;  $P_{Fe}$  为铁心损耗;  $P_{cu2}$  为转子铜耗;  $P_\Omega$  为机械功率,即转子所接受的机械功率;  $P_m$  为定子绕组的输入功率;  $P_w$  为电网的输入电功率。

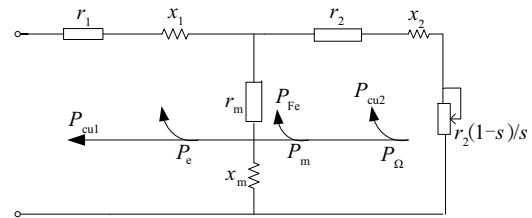


图2 异步发电机的功率关系

Fig. 2 Power relation of induction generator

从图2的等效电路可发现,  $x_m \gg x_1$ , 相比于  $P_m$ , 定子电阻与铁心的功率损耗无限小,可忽略不计。图3中的励磁支路可更改至电路首部,进行电路等值简化。

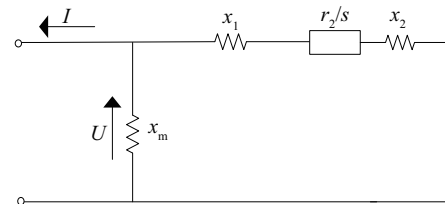


图3 异步发电机的简化等值电路

Fig. 3 Simplified equivalent circuit of induction generator

由3图中可得,发电机输入电网的有功功率表示如式(17)所示:

$$P_w = -\frac{U^2 r_2 / s}{(r_2 / s)^2 + x_k^2} \quad (17)$$

式中,  $x_k = x_1 + x_2$ ;  $s$  ——滑差率;  $U$  ——额定电压。

从等效电路可看出,异步发电机  $\varphi$  的功率因数角与滑差率  $s$  的大小有关:

$$\varphi = \tan^{-1} \left[ \frac{r_2^2 + x_k(x_k + x_m)s^2}{r_2 x_m s} \right] \quad (18)$$

异步发电机的无功功率与有功功率之间的关系为:

$$Q_w = P_w \tan \varphi \quad (19)$$

#### 4.4 算例测试

##### 4.4.1 IEEE-14 节点算例测试

本文采用 IEEE-14 节点和 IEEE-118 节点系统, 对 RWLHS 法进行验证。在 IEEE-14 节点母线 9 上注入风电场, 母线 1 为平衡母线。对于母线 9, 可把风电场等效为风力机, 该系统各参数引自文献[21]。风电场输出有功功率与风速的关系为<sup>[22]</sup>:

$$P_w = \begin{cases} 0, & V \leq V_{cl} \\ P_R \frac{V^2 - V_{cl}^2}{V_R^2 - V_{cl}^2}, & V_{cl} \leq V \leq V_R \\ P_R, & V_R \leq V \leq V_{co} \\ 0, & V_{co} \leq V \end{cases} \quad (20)$$

式中,  $P_R$ ——额定功率;  $V_R$ ——额定风速;  $V_{cl}$ ——切入风速;  $V_{co}$ ——切出风速;  $P_R=200$  MW;  $V_R=14$  m/s;  $V_{cl}=3$  m/s;  $V_{co}=25$  m/s。功率因数为 0.95, 发电机参数为: 额定电压 690 V, 异步风力发电机参数为: 额定电压为 690 V, 定子电抗  $0.0083+j0.9985 \Omega$ , 转子电抗  $0.00373+j0.10906 \Omega$ 。

图 4 所示为 IEEE-14 节点, 假定 IEEE-14 节点系统有 21 个随机变量, 为负荷的有功、无功和风速。因为风电接在节点 9 上, 所以分析节点 9 的电压幅值, 线路 9-10 上的有功功率。其中负荷有功、无功均服从正态分布, 详细参数如表 1 所示。

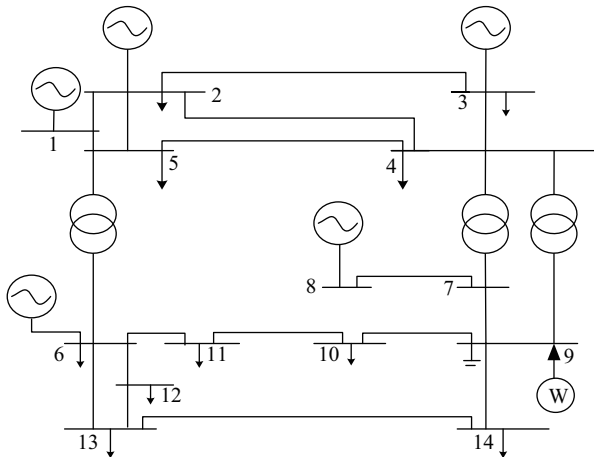


图 4 IEEE-14 系统结构图

Fig. 4 System structure of IEEE-14

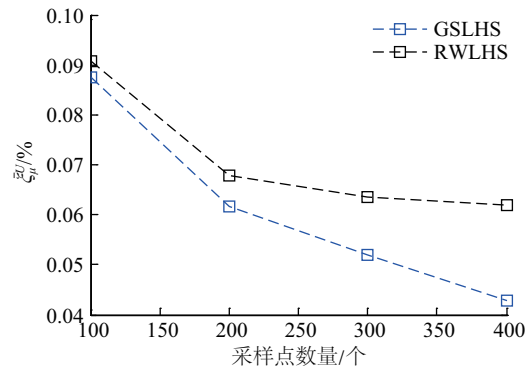
表 1 负荷的功率分布

Table 1 Power distribution of load

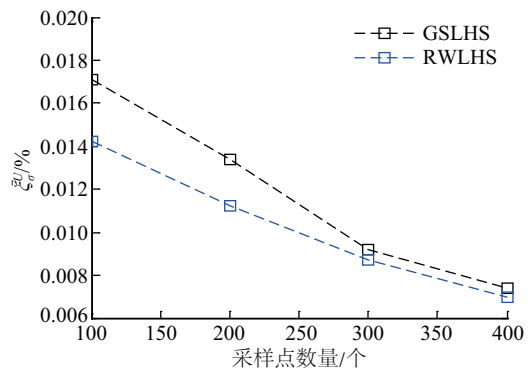
节点号	有功 均值/mV	有功 标值/mW	无功 均值/mvar	无功标准 值/mvar
2	21.74	1.96	12.70	1.17
3	94.20	9.42	19.00	2.00
4	47.80	5.26	-3.90	0.38
5	7.60	0.38	1.60	0.08
6	11.20	0.67	7.50	0.47
10	9.00	0.90	5.80	0.58
11	3.50	0.33	1.80	0.17
12	6.10	0.46	1.60	0.14
13	13.50	1.42	5.80	0.55
14	14.90	1.28	5.00	0.43

通过仿真能够得到如下仿真结果:

1) 两种方法比较的期望值误差和标准差如图 5 所示, 两种方法输出变量的期望值误差和标准值误差都随着采样规模的增大而减小, 计算结果波动随着采样规模的增大而减小, 但 RWLHS 从图 5 中可看出, 相同采样规模下可更好地降低误差, 提高精度。



a. 电压幅值期望值的平均相对误差  $\xi_{\mu}^U$



b. 电压幅值标准差的平均相对误差  $\xi_{\sigma}^U$

图 5 电压幅值相对平均误差图

Fig. 5 The voltage of the average relative error map

表 2 计算结果保留到小数点后 2 位,可看出在相同采样规模下,计算 9 节点电压和 9—10 支路时,基于 RWLHS 比 GSLHS 精度更高。

表 2 IEEE-14 节点两种方法的 9 节点的电压幅值和支路功率期望和标准差的相对误差比较

Table 2 Error comparisons of bus voltage and load flow between the two methods at node 9 for IEEE14-bus system

采样方法	采样规模	$\bar{\xi}_\mu^V/\%$	$\bar{\xi}_\sigma^V/\%$	$\bar{\xi}_\mu^P/\%$	$\bar{\xi}_\sigma^P/\%$
RWLHS	100	0.087	0.014	0.052	0.030
	200	0.062	0.011	0.039	0.022
	300	0.052	0.008	0.035	0.017
	400	0.043	0.007	0.021	0.016
GSLHS	100	0.091	0.017	0.077	0.057
	200	0.068	0.013	0.072	0.048
	300	0.064	0.009	0.059	0.036
	400	0.062	0.007	0.048	0.032

2)图 6 和图 7 为采样规模分别为 100、200、300、400 时,节点 9 的电压幅值的概率累积分布(CDF)和概率密度(PDF)。图 8 和图 9 为采样规模分别为采

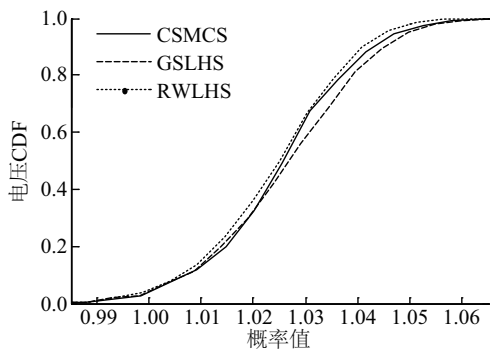


图 6 节点 9 电压幅值 CDF 曲线比较

Fig. 6 Comparisons of CDF voltage at node 9

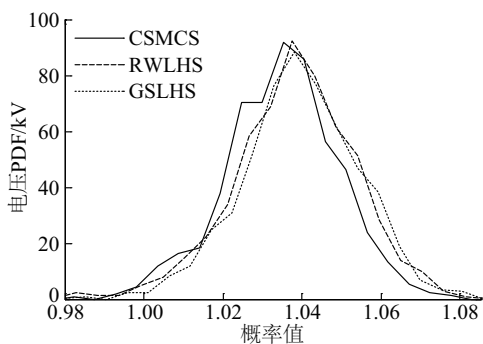


图 7 节点 9 电压幅值 PDF 曲线比较

Fig. 7 Comparisons of PDF Voltage at node 9

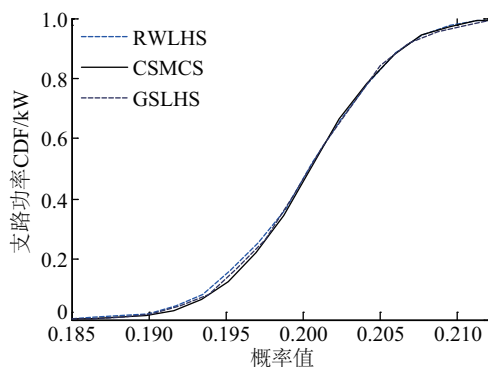


图 8 支路 9—10 有功功率的 CDF 曲线比较

Fig. 8 Comparisons of CDF active power flow of line 9—10

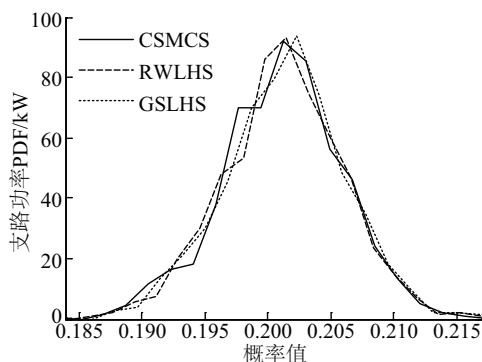


图 9 支路 9—10 有功功率 PDF 曲线比较

Fig. 9 Comparisons of PDF active power flow of line 9—10

样规模 100、200、300、400 时,线路 9—10 有功功率的累积分布和有功功率的概率密度。由图 6 可知, RWLHS 计算结果和基准结果近似相同,比 GSLHS 的近似模拟效果更好。

表 3 为时间比较分析,其中 RWLHS 方法的计算时间是 100 次计算结果的平均值。可以看出, RWLHS 算法由于具有随机性,所以收敛性稍慢,但是精度却提高了很多。

表 3 IEEE-14 节点两种方法计算时间比较

Table 3 Computation time comparison between the two methods for IEEE14-bus system 9—10

方法	采样规模	计算时间/s
RWLHS	100	8.93
	200	17.22
	300	24.86
	400	32.90
GSLHS	100	7.61
	200	14.66
	300	22.15
	400	29.76
CSMCS	10000	1293.74

#### 4.4.2 IEEE-118 节点算例测试

通过 IEEE-118 节点, 假设采用 10000 次的 CSMCS 方法进行 PLF 计算得到的结果是精确的, 输出随机变量的期望值和标准差分别用  $\mu_{acc}$  和  $\sigma_{acc}$  表示。按照式(13)、式(14)对含风电的 IEEE-118 节点进行计算, 得出 9 节点的电压和支路功率 9—10 的期望值和标准方差值, 具体数据如表 4 所示。

表 4 IEEE-118 节点两种方法的 9 节点的电压幅值和支路功率期望和标准差的相对误差比较

Table 4 Error comparisons of bus voltage and load flow between the two methods at node 9 for IEEE-118 bus system

采样方法	采样规模	$\bar{\xi}_\mu^v/\%$	$\bar{\xi}_\sigma^v/\%$	$\bar{\xi}_\mu^p/\%$	$\bar{\xi}_\sigma^p/\%$
RWLHS	100	0.054	0.006	0.094	0.015
	200	0.053	0.008	0.054	0.010
	300	0.027	0.002	0.013	0.011
	400	0.008	0.006	0.017	0.008
GSLHS	100	0.108	0.026	0.094	0.015
	200	0.068	0.021	0.054	0.010
	300	0.032	0.023	0.013	0.011
	400	0.015	0.020	0.017	0.008

从表 4 中看出, RWLHS 算法得到的 9—10 支路功率的期望值和标准差的结果和 GSLHS 结果相同。在计算 9 节点电压时, 该方法得到的结果优于 GSLHS, 计算精度高于 GSLHS。因此, RWLHS 算法可在大规模的节点系统中以较好地应用, 具有较好的工程实用价值。

## 5 结 论

本文针对 GSLHS 操作复杂, 计算量较大的特点提出一种基于改进 LHS 的方法: RWLHS 法。本文的方法应用具有以下特点: 1) RWLHS 在 100 次的采样规模下和 CSMCS 在 10000 次的采样规模下, 得到的精确度相似, 因此此方法能够较好的降低采样规模; 2) 在 100~400 的相同采样规模条件下, 此方法的精度比 GSLHS 更高; 3) 此方法可更好地降低相关变量采样值之间的相关性, 实现简单, 精度高。因此, 此方法可以在含有风电系统的潮流计算中得到较好的应用。

### [参考文献]

[1] Borkowska B. Probabilistic load flow [J]. IEEE

Transationns on Power Apparatus and Systems, 1974, 93(3): 752—759.

- [2] 陈 雁, 文劲宇, 程时杰. 考虑输入变量相关性的概率潮流计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 80—87.
- [2] Chen Yan, Wen Jinyu, Cheng Shijie. Probabilistic load flow analysis considering dependencies among input random variables [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 80—87.
- [3] 潘 炜, 刘文颖, 杨以涵. 概率最优潮流的点估计算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 28—33.
- [3] Pan Wei, Liu Wenying, Yang Yihan. Point estimate method for probabilistically optimal power flow computation [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 28—33.
- [4] 别朝红, 王锡凡. 蒙特卡洛法在评估电力系统可靠性中的应用[J]. 电力系统自化, 1997, 21(6): 68—75.
- [4] Bie Zhaohong, Wang Xifan. The application of Monte Carlo method to reliability evaluation of power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(6): 68—75.
- [5] Vorechovský M, Novák D. Correlation control in small-sample Monte Carlo type simulations I: A simulated annealing approach [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2009, 24(3): 452—462.
- [6] 吴 蓓, 张 焰, 陈闽江. 点估计法在电压稳定性分析中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 38—43.
- [6] Wu Bei, Zhang Yan, Chen Minjiang. Application of point estimate method to voltage stability analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 38—43.
- [7] 胡泽春, 王锡凡. 基于半不变量法的随机潮流误差分析[J]. 电网技术, 2009, 33(18): 32—37.
- [7] Hu Zechun, Wang Xifan. Error analysis of the probabilistic load flow based on cumulant method [J]. Power System Technology, 2009, 33(18): 32—37.
- [8] Su Chun-Lien. Probabilistic load-flow computation using point estimate method [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 1843—1851.
- [9] 丁 明, 李生虎, 黄 凯. 基于蒙特卡罗模拟的概率潮流计算[J]. 电网技术, 2001, 25(11): 10—14, 22.
- [9] Ding Ming, Li Shenghu, Huang Kai. Probabilistic load flow analysis based on Monte Carlo Simulation [J]. Power System Technology, 2001, 25(11): 10—14, 22.
- [10] 张义斌, 王伟胜. 风电场输出功率的概率分布及其应用[J]. 电力设备, 2004, 5(8): 38—40.

- [10] Zhang Yibin, Wang Weisheng. Probability distribution of power output for wind power field and its application [J]. *Electrical Equipment*, 2004, 5(8): 38—40.
- [11] 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 System*, 2009, 24(2): 661—667.
- [12] Huntington D E, Lyrintzis C S. Improvements to and limitations of Latin hypercube sampling [J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 1998, 13 (4) : 245—253.
- [13] Ye K Q, Li W, Sudjianto A. Algorithmic construction of optimal symmetric Latin hypercube designs [J]. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 2000, 90 (1) : 145—159.
- [14] 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]. *系统自动化*, 2009, 33(21): 32—35, 81.
- [14] Yu Han, Zhong Zhiyong, Huang Jiebo, et al. Aprobabilistic load flow calculation method with Latin hypercube sampling [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(21): 32—35, 81.
- [15] Révész P. Random walk in random and non- random environments [M]. Singapore: World Scientific Pub Co. Inc. 2005.
- [16] 张春国. 平面上的一种随机模型及其计算机模拟 [D]. 廊坊: 河北大学, 2010.
- [16] Zhang Chunguo. A model of random walk on the plane and its computer simulation [D]. Langfang: Hebei University, 2010.
- [17] Justus C G, Hargraves W R, Yalcin A. Nationwide assement of potential output from wind-powered generators [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1976, 15(7): 673—678.
- [18] Allan R N, Grigg C H, A1- Shakarechi M R G. Numercial techniques in probabilistic load flow problems [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1976, 10: 853—860.
- [19] Freris L L. Wind energy conversion system [M]. Englewood Cliffs, N J: Prentice-Hail, 1980.
- [20] 吴俊玲. 大型风电场并网运行的若干技术问题研究 [D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [20] Wu Junling. Research on technology problems of large grid-connected wind farm [D]. Beijing: Tsinghua University, 2004.
- [21] Villanuva D, Pazos J L, Feijoo A. Probabilistic load flow including wind power generation [J]. *IEEE Transactions on Power System*, 2011, 26(3): 1659—1667.
- [22] Pallabazzer R. Evalutaion of wind-generator potentiality [J]. *Solar Enrgy*, 1995, 55(1): 49—59.

## PROBABILISTIC POWER FLOW CALCULATION OF POWER SYSTEM CONSIDERING WIND POWER BASED ON IMPROVED LHS

Yan Yan<sup>1</sup>, Su Hongsheng<sup>1</sup>, Che Yulong<sup>1,2</sup>

(1. *Sschool of Automation & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;*

2. *School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)*

**Abstract:** When the Monte Carlo simulation method based on Latin hypercube sampling (LHS) is applied to probabilistic power flow calculations; there are the problems of relatively low precision and complex calculation. The sampling ordering in the LHS algorithm is improved and the method combining the random walk principle with LHS is proposed. This method is applied to wind power IEEE-14 node and IEEE-118 node and compared with Gram-Schmidt LHS method. The theoretical and numerical calculation results show that the method can better solve the relatively low precision of LHS method. At the same time, the method can more accurately reflect the digital characteristics of the random variables in the probabilistic power flow calculation, and has good engineering practical value.

**Keywords:** probabilistic load flow; random walk; Latin hypercube sampling method; wind power; CSMCS