

# 不同级数展开的半不变量法概率潮流计算比较分析

郭效军<sup>1</sup>, 蔡德福<sup>2</sup>

(1. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 210032;

2. 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 半不变量法概率潮流能快速求出系统状态变量的分布。该方法在系统基准运行点进行线性化, 波动性强的风电和光伏发电的大规模并网会增强系统功率的波动强度, 而且不同级数展开适用于不同的变量分布类型。以含风电/光伏发电的电力系统为分析对象, 以蒙特卡罗法计算结果为参考值, 以输出随机变量累积分布的方差和的根均值为评价指标, 比较分析了各种输入随机变量和不同级数展开下半不变量法概率潮流计算结果的准确性, 并阐述了其误差产生机理。

**关键词:** 半不变量法; 蒙特卡罗法; 概率潮流; 级数展开; 风电; 光伏发电

**中图分类号:** TM 711

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.12.014

## 0 引言

实际电力系统运行中存在诸多不确定性因素<sup>[1-2]</sup>, 如负荷功率的变化、发电机出力的变化、系统元件的随机故障等。风电场、光伏电站等可再生能源的大规模并网更是加剧了电力系统的不确定性<sup>[3-6]</sup>。常规潮流计算方法能得到系统确定的潮流分布, 但该分布不能准确描述电网的运行状态<sup>[7]</sup>。概率潮流可计及各种不确定性因素, 且能准确描述系统状态变量的分布特性, 因而成为研究热点之一<sup>[8-11]</sup>。其中基于半不变量和级数展开的概率潮流计算方法(简称半不变量法)因计算简单、速度快, 得到了广泛应用。

众多学者基于线性交流潮流模型采用半不变量法分析了风电场和光伏电站并网后电力系统的概率潮流<sup>[12-17]</sup>。文献[7]采用半不变量法分析了含分布式电源的地区电网动态概率潮流。文献[18]在半不变量和 Edgeworth 级数展开的基础上提出一种含风电场电力系统的负荷裕度概率分析方法。此外, 也有学者将半不变量法应用于发电机组检修计划<sup>[19]</sup>、电力市场<sup>[20]</sup>和分布式发电的优化配置<sup>[21]</sup>等领域。

上述研究未考虑半不变量法在含大规模风电或光伏发电的电力系统中的计算精度。基于线性交流潮流模型的半不变量法因潮流方程在基准运行点处的线性化将会产生计算误差。此外, Gram-Charlier 等级数展开的基本理论是中心极限定理<sup>[22]</sup>, 当系统中含有大量概率分布函数为非正态分布的输入随机

变量时, 级数展开的拟合精度会降低。在某些情形下半不变量法计算结果的准确度可能不满足要求。虽然文献[14]分析了风电场接入前半不变量法的计算精度, 但由于风电和光伏发电出力具有很强的间歇性和波动性, 对半不变量法计算精度可能有较大影响。当风电和光伏发电出力在系统中占有较大比例时, 采用半不变量法进行概率潮流分析能否仍然保证其计算精度, 是合理应用该方法的前提。文献[23]分析了该方法各环节的假设条件及其可能引起的误差, 得到了有益的结论, 但未对比分析风电与光伏发电输入随机变量和各种级数展开下该方法的计算准确度。

本文采用线性交流潮流模型, 利用半不变量和级数展开(包括 Gram-Charlier 级数、Edgeworth 级数和 Cornish-Fisher 级数)对计及各种输入随机变量的电力系统概率潮流进行比较分析。以蒙特卡罗法计算结果为参考值, 以输出随机变量累积分布的方差和的根均值 ARMS(Average Root Mean Square)为评价指标, 比较分析各种输入随机变量和不同级数展开下半不变量法概率潮流计算结果的准确性, 并阐述其误差产生机理。

## 1 输入随机变量的概率模型

### 1.1 风力发电出力的概率模型

风力发电出力的概率模型主要取决于风速的概率模型和风电机组的输出功率-风速模型。应用较广的风速概率模型为双参数威布尔分布模型, 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;  $k$  为形状参数;  $c$  为尺度参数。

风电机组的输出功率-风速模型可近似表达为:

收稿日期: 2013-09-04; 修回日期: 2013-11-12

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2009CB219701); 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA05A101); 国家自然科学基金资助项目(50937002)

Project supported by the National Basic Research Program of China(973 Program)(2009CB219701), the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2011AA05A101) and the National Natural Science Foundation of China(50937002)

$$P_W(v) = \begin{cases} 0 & v \leq v_{ci} \\ k_1 v + k_2 & v_{ci} < v \leq v_N \\ P_N & v_N < v \leq v_{co} \\ 0 & v > v_{co} \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $k_1 = \frac{P_N}{v_N - v_{ci}}$ ;  $k_2 = -k_1 v_{ci}$ ;  $P_N$  为风电机组额定功率;  $v_{ci}$  为切入风速;  $v_N$  为额定风速;  $v_{co}$  为切出风速。

由式(1)、(2)可得风力发电有功出力的概率模型:

$$f(P_W) = \begin{cases} 1 - \exp\left[-\left(\frac{v_{ci}}{c}\right)^k\right] + \exp\left[-\left(\frac{v_{co}}{c}\right)^k\right] & P_W = 0 \\ \frac{k}{k_1 c} \left(\frac{P_N - k_2}{k_1 c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{P_N - k_2}{k_1 c}\right)^k\right] & 0 < P_W < P_N \\ \exp\left[-\left(\frac{v_N}{c}\right)^k\right] - \exp\left[-\left(\frac{v_{co}}{c}\right)^k\right] & P_W = P_N \end{cases} \quad (3)$$

因要求并网风电场具备一定的无功调节能力,使其能够按恒功率因数运行<sup>[24]</sup>,无功出力见式(4)。

$$Q_W = P_W \tan \theta \quad (4)$$

其中,  $\theta$  为功率因数角。

由式(3)、(4)可得风力发电无功出力的概率模型。

## 1.2 光伏发电出力的概率模型

光伏发电出力的核心为太阳能电池,其输出功率与光照强度密切相关。太阳光照强度在一段时间内可近似为 Beta 分布<sup>[12]</sup>,其概率密度函数为:

$$f(r) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \left(\frac{r}{r_{\max}}\right)^{a-1} \left(1 - \frac{r}{r_{\max}}\right)^{b-1} \quad (5)$$

其中,  $a, b$  均为 Beta 分布的形状参数;  $r, r_{\max}$  分别为该时段内的实际光照强度和最大光照强度。

太阳能电池输出功率  $P_s$  与光照强度  $r$  的关系为:

$$P_s = rAh \quad (6)$$

其中,  $A$  为太阳能电池总面积;  $h$  为太阳能电池光电转换效率。

由式(5)和式(6)可得到太阳能电池输出功率  $P_s$  的概率密度函数:

$$f(P_s) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \left(\frac{P_s}{P_{s\max}}\right)^{a-1} \left(1 - \frac{P_s}{P_{s\max}}\right)^{b-1} \quad (7)$$

其中,  $P_{s\max}$  为太阳能电池最大输出功率。

光伏发电一般通过并网逆变器将输出功率因数控制在单位功率因数,因而其无功出力为零。

## 1.3 发电机组出力的概率模型

发电机组出力的概率模型一般可用两状态概率模型,即只有正常运行和故障强迫停运 2 种状态,其出力概率模型为:

$$\begin{cases} f(P_G) = \begin{cases} 1 - p_G & P_G = P_{GN} \\ p_G & P_G = 0 \end{cases} \\ f(Q_G) = \begin{cases} 1 - p_G & Q_G = Q_{GN} \\ p_G & Q_G = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $P_G, Q_G$  为发电机组有功、无功出力;  $P_{GN}, Q_{GN}$  为发电机组额定有功、无功出力;  $p_G$  为发电机组故障强迫停运率。

## 1.4 负荷的概率模型

未来某一时刻的负荷预测结果可看成随机变量,并假设负荷服从正态分布,其有功、无功的概率密度函数为:

$$\begin{cases} f(P_L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{P_L}} \exp\left[-\frac{(P - \mu_{P_L})^2}{2\sigma_{P_L}^2}\right] \\ f(Q_L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{Q_L}} \exp\left[-\frac{(Q - \mu_{Q_L})^2}{2\sigma_{Q_L}^2}\right] \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $\mu_{P_L}$  和  $\mu_{Q_L}$  为负荷有功和无功的期望值;  $\sigma_{P_L}$  和  $\sigma_{Q_L}$  为负荷有功和无功的标准差。

## 2 半不变量法概率潮流

### 2.1 潮流方程线性化模型

将极坐标形式的节点注入功率方程和支路潮流方程用矩阵表示,并在基准运行点对其进行泰勒级数展开,忽略 2 次及其以上的高次项,可得:

$$\begin{cases} \Delta W = J_0 \Delta X \\ \Delta Z = G_0 \Delta X \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $W$  为节点注入功率;  $X$  为节点状态变量;  $Z$  为支路潮流变量;  $J_0$  为潮流计算雅可比矩阵;  $G_0 = \frac{\partial Z}{\partial X} \Big|_{X=X_0}$ 。

式(10)可以进一步表示为:

$$\begin{cases} \Delta X = J_0^{-1} \Delta W = S_0 \Delta W \\ \Delta Z = G_0 J_0^{-1} \Delta W = T_0 \Delta W \end{cases} \quad (11)$$

若已知系统正常运行条件,可通过常规潮流计算得出基准运行点处的节点状态变量  $X_0$ 、支路潮流变量  $Z_0$  和  $J_0$ ,进一步求得  $S_0$  和  $T_0$ 。在已知节点注入功率随机扰动  $\Delta W$  后,可根据式(11)求得节点状态变量和支路潮流变量的随机扰动。

### 2.2 半不变量计算

节点注入功率的随机扰动  $\Delta W$  主要由节点发电机出力和负荷注入功率的输入随机变量(即  $\Delta W_G$  和  $\Delta W_L$ )构成,如下式:

$$\Delta W = \Delta W_G \oplus W_L \quad (12)$$

其中,符号  $\oplus$  表示卷积运算。

假定各节点注入功率的输入随机变量相互独立,可利用半不变量的可加性代替卷积运算,即:

$$\Delta W^{(k)} = \Delta W_G^{(k)} + \Delta W_L^{(k)} \quad (13)$$

其中,  $\Delta W^{(k)}$ 、 $\Delta W_G^{(k)}$ 、 $\Delta W_L^{(k)}$  分别为节点注入功率、发电机注入功率、负荷注入功率的  $k$  阶半不变量。

式(11)可进一步变换成:

$$\begin{cases} \Delta X^{(k)} = S_0^{(k)} \Delta W^{(k)} \\ \Delta Z^{(k)} = T_0^{(k)} \Delta W^{(k)} \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $S_0^{(k)}$  和  $T_0^{(k)}$  分别为矩阵  $S_0$  和  $T_0$  中元素的  $k$  次幂所构成的矩阵。

根据式(14)求取的节点状态变量  $\Delta X$  和支路潮流变量  $\Delta Z$  的各阶半不变量,可通过相关的级数展开

近似求得  $\Delta X$  和  $\Delta Z$  的随机分布,包括概率密度函数和累积分布函数。

### 2.3 基于半不变量的随机分布的级数展开

目前,在电力系统规划与运行中应用较多的级数展开主要有 3 种,分别为 Gram-Charlier 级数、Edgeworth 级数和 Cornish-Fisher 级数,其中前 2 种级数都是把随机变量的分布函数表达为由正态随机变量各阶导数组成的级数<sup>[25]</sup>。

#### 2.3.1 Gram-Charlier 级数展开

Gram-Charlier 级数根据 Hermite 多项式的正交特性展开,因而又称为正交展开式。根据 Gram-Charlier 级数展开,随机变量的累积分布函数可表示为:

$$F_G(x) = \phi(\bar{x}) + \varphi(\bar{x}) \left[ \frac{g_3}{3!} H_2(\bar{x}) + \frac{g_4}{4!} H_3(\bar{x}) + \frac{g_5}{5!} H_4(\bar{x}) + \frac{g_6 + 10g_3^2}{6!} H_5(\bar{x}) + \dots \right] \quad (15)$$

其中,  $\bar{x}$  为规格化后的随机变量;  $\varphi(\bar{x})$ 、 $\phi(\bar{x})$  分别为标准正态分布随机变量的概率密度函数和累积分布函数;  $g_i$  为  $i$  阶规格化后的半不变量;  $H_i(\bar{x})$  为  $i$  阶 Hermite 多项式。

#### 2.3.2 Edgeworth 级数展开

Edgeworth 级数根据 Hermite 多项式的各项级数的数量级展开,因而又称为渐近展开式,根据 Edgeworth 级数展开,随机变量的累积分布函数可表示为:

$$F_E(x) = \phi(\bar{x}) + \varphi(\bar{x}) \left[ \frac{g_3}{3!} H_2(\bar{x}) + \frac{g_4}{4!} H_3(\bar{x}) + \frac{10g_3^2}{6!} H_5(\bar{x}) + \frac{g_5}{5!} H_4(\bar{x}) + \frac{35g_3g_4}{7!} H_6(\bar{x}) + \dots \right] \quad (16)$$

#### 2.3.3 Cornish-Fisher 级数展开

Cornish-Fisher 级数的基本思想是根据选定累积分布函数的  $\alpha$  分位数求取待求累积分布函数的  $\alpha$  分位数,进而得到待求变量  $z$  的累积分布函数  $F(z)$ 。其关键在于选取特殊的基础分布和拓展序列,其中经典的 Cornish-Fisher 级数是基于标准正态分布和 Gram-Charlier 级数展开<sup>[22]</sup>。若随机变量  $z$  的分位数为  $\alpha$ ,则  $z(\alpha)$  可表示为:

$$z(\alpha) \approx \xi(\alpha) + \frac{\xi^2(\alpha) - 1}{6} g_3 + \frac{\xi^3(\alpha) - 3\xi(\alpha)}{24} g_4 - \frac{2\xi^3(\alpha) - 5\xi(\alpha)}{36} g_3^2 + \frac{\xi^4(\alpha) - 6\xi^2(\alpha) + 3}{120} g_5 + \dots \quad (17)$$

其中,  $\xi(\alpha) = \phi^{-1}(\alpha)$ 。

根据式  $z(\alpha) = F^{-1}(\alpha)$ ,可求得随机变量  $z$  的累积分布函数  $F(z)$ 。

### 2.4 半不变量法计算准确性评价指标

半不变量法概率潮流可得到输出随机变量的数字特征和概率分布,其中数字特征一般采用期望值和标准差。当输出随机变量为正态分布时,期望值和标准差可完整描述其概率分布;当输出随机变量为

非正态分布时,仅采用期望值和标准差还不足以完整准确描述其分布特性。由第 1 节可知风电出力、光伏出力和发电机组出力均为非正态分布,输出随机变量亦非正态分布。为准确评价半不变量法在不同情形下的计算准确性,本文以蒙特卡罗法计算结果为参考值,采用输出随机变量累积分布的 ARMS<sup>[9]</sup>作为评价指标。ARMS 指标可表示为:

$$ARMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (CCE_i - CMC_i)^2}{N}} \quad (18)$$

其中,  $CCE_i$  和  $CMC_i$  分别为半不变量法和蒙特卡罗法得到的输出随机变量累积分布曲线上第  $i$  个点的值;  $N$  为节点数。

## 3 不同级数展开的半不变量法概率潮流计算比较流程

不同级数展开的半不变量法概率潮流计算比较流程如图 1 所示。

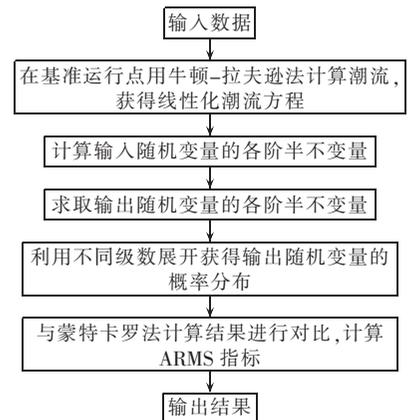


图 1 不同级数展开的半不变量法概率潮流计算比较流程图

Fig.1 Flowchart of probabilistic load flow calculation based on cumulant method with different series expansions

## 4 算例分析

采用半不变量法对图 2 所示的 IEEE 30 节点系统进行仿真计算。以 20000 次蒙特卡罗法计算结果为参考值,以 PQ 节点电压幅值为分析对象,以 ARMS 为评价指标,对比分析各种输入随机变量和 3 种级数展开下半不变量法计算结果的准确性,并分析误差产生机理。IEEE 30 节点系统的总负荷为  $189.2 + j107.2 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。ARMS 指标计算中  $N=5000$ 。假设各输入随机变量相互独立。

本节对如下 4 种情况分别进行分析:

- a. 情况 1,只考虑负荷波动;
- b. 情况 2,同时考虑负荷波动和发电机强迫停运;
- c. 情况 3,同时考虑负荷波动、发电机强迫停运

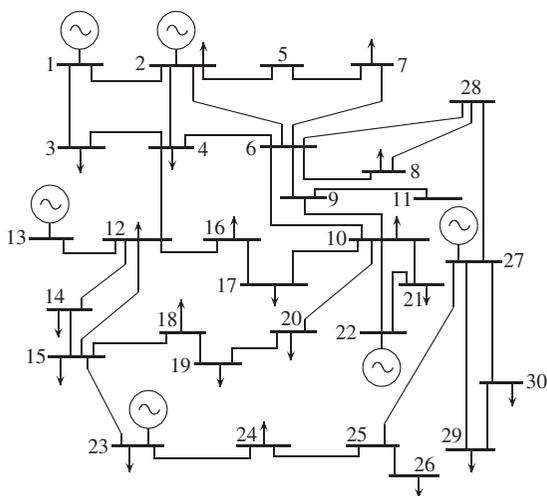


图 2 IEEE 30 节点系统  
Fig.2 IEEE 30-bus system

和风力发电出力的波动；

d. 情况 4,同时考虑负荷波动、发电机强迫停运和光伏发电出力的波动。

#### 4.1 情况 1

当只考虑服从正态分布的负荷波动时,由式(14)可求得系统状态变量的各阶半不变量,其中一阶半不变量为期望值,二阶半不变量为方差,三阶及其以上半不变量为零。由式(15)~(17)可知 3 种级数展开得到的系统状态变量累积分布函数相同,均服从正态分布。节点电压幅值 ARMS 的均值和最大值与负荷波动标准差的关系见图 3。仿真结果表明:

a. 若只考虑服从正态分布的输入随机变量,3 种级数展开得到的半不变量法计算精度相同;

b. 当负荷波动不大时,半不变量法计算精度高;

c. 随着负荷波动增加,半不变量法计算精度降低。

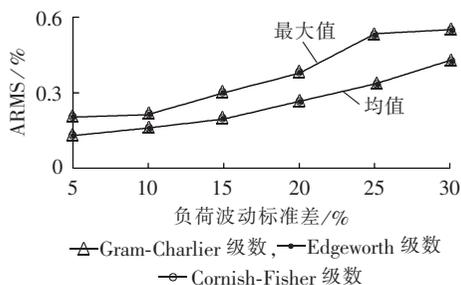


图 3 节点电压幅值的 ARMS 均值和最大值  
Fig.3 Average and maximal ARMS of bus voltage amplitude

由于负荷波动的增加,更多注入功率远离负荷功率期望值,使得线性化处理引起的误差随之增大。此时,半不变量法计算误差主要来源于交流潮流方程的线性化。

#### 4.2 情况 2

若计及发电机强迫停运,节点电压幅值 ARMS 的均值和最大值与负荷波动标准差的关系见图 4。

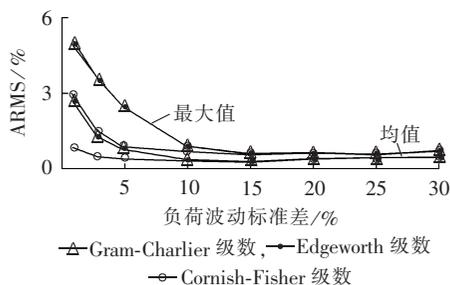


图 4 节点电压幅值的 ARMS 均值和最大值  
Fig.4 Average and maximal ARMS of bus voltage amplitude

仿真结果表明:

a. 服从二项式分布的发电机出力对半不变量法计算精度影响较大,且 ARMS 指标随着负荷波动标准差的增加先减小再增加,当负荷波动标准差较小时,半不变量法计算精度较差;

b. 不同级数展开拟合输出随机变量概率分布的精度不同。

3 种级数展开的基本理论为中心极限理论,当独立输入随机变量的数量趋于无穷或者概率密度函数为连续而非离散时,其拟合精度高。由于发电机出力输入随机变量数量少(与发电机台数有关)且概率密度函数为离散函数,不满足中心极限定理。当负荷波动标准差较小时,节点注入功率主要为服从离散分布的发电机出力,ARMS 指标较大,半不变量法计算精度较差,如当负荷波动标准差为 3%,采用 Gram-Charlier 级数展开的 ARMS 最大值为 3.56%,采用 Cornish-Fisher 级数展开的 ARMS 最大值为 1.54%。文献[25]指出,若系统中发电机台数越多,机组的强迫停运率越高,则半不变量法的计算精度越高。因 3 种级数展开的方式不同,对输出随机变量概率分布的拟合精度也有所差异。由正态分布各阶导数构成的 Gram-Charlier 级数展开和 Edgeworth 级数展开的拟合精度基本相同,而 Cornish-Fisher 级数展开在计算离散分布的概率分布时与 Gram-Charlier 级数展开和 Edgeworth 级数展开相比拟合精度更高。

#### 4.3 情况 3

在情况 2 的基础上,将风电机组直接接入节点 11,风电机组有 2 种型号可供选择:风机 1(FL250)和风机 2(FL1000),相关参数见表 1<sup>[26]</sup>。风速的双参数威布尔分布的参数分别为  $k=3.97$  和  $c=10.7$ <sup>[13]</sup>。风速的概率分布与风电机组功率输出曲线见图 5。假设 2 种类型风电机组的功率因数均为感性 0.98。

表 1 风电机组相关参数  
Tab.1 Parameters of wind generators

风机型号	额定功率/ MW	切入风速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	额定风速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	切出风速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
风机 1	0.25	2.5	16	25
风机 2	1.0	3	12	20

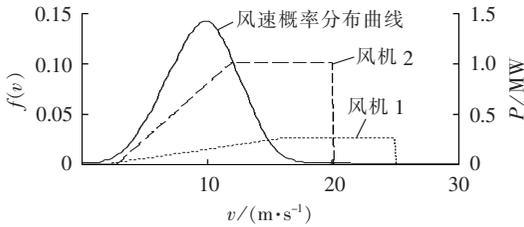


图 5 风速的概率分布与风机的功率输出曲线  
Fig.5 Probabilistic distribution of wind speed and power output of wind generator

不同风电机组类型和不同装机容量对半不变量法计算精度的影响如图 6 所示,其中负荷波动标准差为 15%,实线代表计及风机 1 的半不变量法计算精度,虚线代表计及风机 2 的半不变量法计算精度。

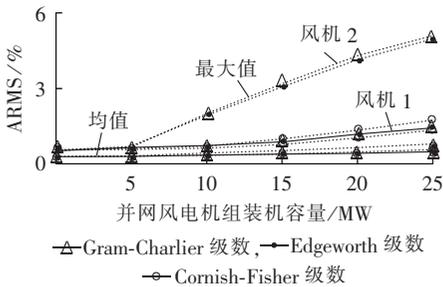


图 6 节点电压幅值的 ARMS 均值和最大值  
Fig.6 Average and maximal ARMS of bus voltage amplitude

仿真结果表明:

- a. 随着风电机组装机容量的增加,ARMS 指标增加,半不变量法计算精度逐渐下降;
- b. 不同类型风电机组出力对半不变量法计算精度影响不同;
- c. 不同级数展开对输出随机变量概率分布拟合精度影响不同,特别是风电机组装机容量较大时, Gram-Charlier 级数展开和 Edgeworth 级数展开拟合精度较差,而 Cornish-Fisher 级数展开拟合精度较好。

由图 5 可知,在给定风况下,风机 1 主要工作于切入风速和额定风速之间的线性工作区域,而风机 2 涵盖了线性上升区域和额定工作区域,且处于额定工作状态的概率较大,从而使得在给定风速和相同装机容量条件下,风机 2 的平均输出功率比风机 1 的平均输出功率大,且输出功率的波动也更大,导致半不变量法计算精度更差。

#### 4.4 情况 4

在情况 3 的基础上,将节点 11 接入的风电机组换成光伏电站,其他条件不变。单组太阳能电池的额定容量为 0.25 MW,太阳能光照强度 Beta 分布的形状参数分别为  $a=0.85$  和  $b=0.85$ <sup>[24]</sup>。节点电压幅值 ARMS 的均值和最大值与光伏电站装机容量之间的关系如图 7 所示。

仿真结果表明:

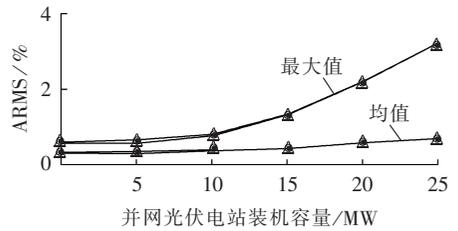


图 7 节点电压幅值的 ARMS 均值和最大值  
Fig.7 Average and maximal ARMS of bus voltage amplitude

- a. 随着光伏电站装机容量的增加,ARMS 的均值和最大值增加,半不变量法计算精度下降;
- b. 3 种级数展开对输出随机变量概率分布的拟合精度影响较小,主要原因为此 Beta 分布形状参数下的太阳能光照强度近似为均匀分布,使得光伏有功出力也近似为均匀分布。

由式(7)可知光伏有功出力满足连续函数而非离散函数。

## 5 结论

半不变量法概率潮流因能快速求出节点电压和支路潮流的概率分布,得到了广泛的应用。但由于该方法为简化计算进行了近似处理,且不同级数展开适用于不同的分布类型,在某些情况下的计算精度可能不满足要求,因此有必要对不同情况下半不变量法概率潮流计算进行比较分析,为该方法的合理应用提供参考。本文以节点电压幅值为分析对象,以蒙特卡罗法计算结果为参考值,以 ARMS 为评价指标,对比分析了各种输入随机变量和不同级数展开下半不变量法概率潮流计算结果的准确性,并分析误差产生机理,得到以下结论。

- a. 不同输入随机变量对半不变量法计算精度影响不同。服从正态分布的输入随机变量对半不变量法计算精度影响小;服从离散分布、威布尔分布和 Beta 分布等非正态分布的输入随机变量对半不变量法计算精度影响较大。当服从非正态分布的输入随机变量所占比例较高时,半不变量法的计算精度变差。
- b. 不同级数展开得到的计及服从非正态分布输入随机变量的半不变量法计算精度不同。其中 Gram-Charlier 级数展开和 Edgeworth 级数展开的计算精度基本相同, Cornish-Fisher 级数与前 2 种级数相比,在计算非正态分布的概率分布时精度更高。
- c. 当电力系统中非正态分布输入随机变量较高时,为保证半不变量法概率潮流的计算精度,建议采取改进措施,如采用 Von Mises 法和级数展开相结合的方法<sup>[27]</sup>求取输出随机变量的概率分布。

## 参考文献:

[1] 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.
- [2] 康忠健, 辛士郎, 仲崇山, 等. 双馈风电场穿透功率增加对电力系统稳定影响综述[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(11): 94-99.
- KANG Zhongjian, XIN Shilang, ZHONG Chongshan, et al. Impact of ride-through power increase of DFIG-based wind farm on power system stability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(11): 94-99.
- [3] 金海峰, 吴涛. 风电接入系统后的电压稳定问题[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(9): 82-84.
- JIN Haifeng, WU Tao. Voltage stability after grid-connection of wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(9): 82-84.
- [4] 孙惠娟, 彭春华, 易洪京. 大规模风电接入电网多目标随机优化调度[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 123-128.
- SUN Huijuan, PENG Chunhua, YI Hongjing. Multi-objective stochastic optimal dispatch of power system with wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 123-128.
- [5] 赵继超, 袁越, 傅质馨, 等. 基于 Copula 理论的风光互补发电系统可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 124-129.
- ZHAO Jichao, YUAN Yue, FU Zhixin, et al. Reliability assessment of wind-PV hybrid generation system based on Copula theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 124-129.
- [6] 陈炜, 艾欣, 吴涛, 等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 26-32, 39.
- CHEN Wei, AI Xin, WU Tao, et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 26-32, 39.
- [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] 林海源. 交流模型下电力系统概率潮流计算[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(6): 53-56.
- LIN Haiyuan. Probabilistic power flow computation under AC model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(6): 53-56.
- [9] ZHANG P, LEE T S. Probabilistic load flow computation using the method of combined cumulant and Gram-Charlier expansion[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(1): 676-682.
- [10] 周建华, 袁越. 含风电场电力系统的 Cornish-Fisher 级数概率潮流计算[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(12): 68-71.
- ZHOU Jianhua, YUAN Yue. Probabilistic load flow calculation based on Cornish-Fisher expansion for power system with wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(12): 68-71.
- [11] 吴晨曦, 文福拴, 陈勇, 等. 含有风电与光伏发电以及电动汽车的电力系统概率潮流[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(10): 8-15.
- WU Chenxi, WEN Fushuan, CHEN Yong, et al. Probabilistic load flow of power system with WFs, PVs and PEVs[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(10): 8-15.
- [12] 王成山, 郑海峰, 谢莹华, 等. 计及分布式发电的配电系统随机潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 39-44.
- WANG Chengshan, ZHENG Haifeng, XIE Yinghua, et al. Probabilistic power flow containing distributed generation in distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 39-44.
- [13] 别朝红, 刘辉, 李甘, 等. 含风电场电力系统电压波动的随机潮流计算与分析[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(12): 1500-1505.
- BIE Zhaohong, LIU Hui, LI Gan, et al. Voltage fluctuation of a power system with wind farms integrated by probabilistic load flow[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(12): 1500-1505.
- [14] 董雷, 程卫东, 杨以涵. 含风电场的电力系统概率潮流计算[J]. 电网技术, 2009, 33(16): 87-91.
- DONG Lei, CHENG Weidong, YANG Yihan. Probabilistic load flow calculation for power grid containing wind farms[J]. Power System Technology, 2009, 33(16): 87-91.
- [15] USAOLA J. Probabilistic load flow in systems with wind generation[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2009, 3(12): 1031-1041.
- [16] YAO Shujun, WANG Yan, HANG Minxiao, et al. Research on probabilistic power flow of the distribution system with photovoltaic system generation[C]//International Conference on Power System Technology. Hangzhou, China: IEEE, 2010: 1-6.
- [17] YAO Shujun, WANG Yan, HANG Minxiao, et al. Research on probabilistic power flow of the distribution system with wind energy system[C]//International Conference on Critical Infrastructure. Beijing, China: IEEE, 2010: 1-6.
- [18] 周玮, 彭昱, 孙辉, 等. 含风电场电力系统的负荷裕度概率分析混合方法[J]. 电网技术, 2009, 32(12): 79-83.
- ZHOU Wei, PENG Yu, SUN Hui, et al. An approach to solve load margin probabilistic distribution for power system containing wind farms[J]. Power System Technology, 2009, 32(12): 79-83.
- [19] 张节潭, 王茂春, 徐有蕊, 等. 采用最小累积风险度法的含风电场电力系统发电机组检修计划[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 97-102.
- ZHANG Jietan, WANG Maochun, XU Yourui, et al. Generation unit maintenance scheduling based on minimum cumulative risk algorithm for power system containing wind farms[J]. Power System Technology, 2011, 35(5): 97-102.
- [20] NEZHAD A R, MOKHTARI G, DAVARI M, et al. A new high accuracy method for calculation of LMP as a random variable[C]//International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems. Sharjah, The United Arab Emirates: IEEE, 2009: 1-5.
- [21] 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.
- [22] JASCHKE R S. The Cornish-Fisher-expansion in the context of delta-gamma-normal approximations[J]. Journal of Risk, 2002, 4(4): 33-52.
- [23] 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.
- HU Zechun, WANG Xifan. Error analysis of the probabilistic load flow based on cumulant method[J]. Power System Technology, 2009, 33(18): 32-37.
- [24] 王敏, 丁明. 考虑分布式电源的静态电压稳定概率评估[J]. 中

## SNR estimation in OFDM for broadband power line communication

LIANG Dong,ZHANG Baohui,NIU Dongwen,FU Keyuan,HAO Zhiguo

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment,Xi'an Jiaotong University,Xi'an 710049,China)

**Abstract:** The model of OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) system based on power line communication is introduced and the channel and noises of power line communication are modeled. Since the synchronization training sequence with repeated structure is applied,there are three virtual sub-carriers between every two data-loaded adjacent sub-carriers in frequency-domain,which can be used in data-aided estimation. The guard virtual sub-carriers at both ends of OFDM system in frequency-domain are used in blind SNR(Signal to Noise Ratio) estimation. Simulative results show that,in data-aided estimation,the precision of the proposed algorithm is similar to that of Boumard algorithm if the actual SNR is relatively high,otherwise it is higher than that of MMSE algorithm or Boumard algorithm;in blind SNR estimation,it is higher than that of M2M4 algorithm in most conditions.

**Key words:** power line; communication; signal to noise ratio; OFDM; estimation; model buildings

(上接第 90 页 continued from page 90)

国电机工程学报,2010,30(25):17-22.

WANG Min,DING Ming. Probabilistic evaluation of static voltage stability taking account of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(25):17-22.

[25] 王锡凡. 电力系统优化规划[M]. 北京:水利电力出版社,1990.

[26] 范荣奇,陈金富,段献忠,等. 风速相关性对概率潮流计算的影响分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(4):18-22,76.

FAN Rongqi,CHEN Jinfu,DUAN Xianzhong,et al. Impact of wind speed correlation on probabilistic load flow[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(4):18-22,76.

[27] 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.

### 作者简介:

郭效军(1965-),男,江苏南京人,高级工程师,主要从事电力自动化设备的研制及管理工作(**E-mail**:xiaojun-guo@sac-china.com);

蔡德福(1987-),男,江西赣州人,博士研究生,主要研究方向为含可再生能源发电和电动汽车充电负荷的电力系统运行分析。

## Comparison of probabilistic load flow calculation based on cumulant method among different series expansions

GUO Xiaojun<sup>1</sup>,CAI Defu<sup>2</sup>

(1. Guodian Nanjing Automation Co.,Ltd.,Nanjing 210032,China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology,Wuhan 430074,China)

**Abstract:** PLF-CM(Probabilistic Load Flow calculation based on Cumulant Method) performs linearization at the operating point of power system to quickly obtain the distribution of system state variables. Large-scale integration of wind power and photovoltaic power enhances the variation of power system load flow and different series expansions are suitable for different distribution types of system state variable. With a power system with wind/photovoltaic power as the analysis object,the calculative results by Monte Carlo method as the references and the average root mean square of the cumulative distribution of output random variable as the evaluation index,the accuracy of PLF-CM are compared among various input random variables and different series expansions,and the causes of its errors are analyzed.

**Key words:** cumulant method; Monte Carlo method; probabilistic load flow; series expansion; wind power; photovoltaic power