

考虑分布式电源的静态电压稳定概率评估

王敏, 丁明

(合肥工业大学教育部光伏系统工程研究中心, 安徽省 合肥市 230009)

Probabilistic Evaluation of Static Voltage Stability Taking Account of Distributed Generation

WANG Min, DING Ming

(Photovoltaic System Research Center of Ministry of Education, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui Province, China)

ABSTRACT: The impact of grid-connected distributed generation on power systems is very important subjects in smart grid. Accounting for uncertainties on the distributed generation and load, a probabilistic evaluation method was presented for static voltage stability based on point estimate method and Cornish-Fisher expansion. By the point estimate method the probabilistic problems could be handled as those corresponding to deterministic problems. The interior point method was employed to solve nonlinear programming problems for voltage stability critical point on the estimate points of random variables, and the statistical properties of objective function were obtained. According to Cornish-Fisher expansion, the probabilistic distribution functions were calculated. The numerical results of IEEE 118-bus and 300-bus test system shows that the proposed method maintains a high degree of accuracy and reduces the computational burden when compared with the Monte Carlo method.

KEY WORDS: distributed generation; voltage stability; point estimate method; Cornish-Fisher expansion; probability distribution; interior point method

摘要: 分布式电源的接入对电力系统的影响是智能电网发展的一个重要课题。针对分布式电源、负荷的不确定性, 基于点估计法和柯尼斯-费希尔(Cornish-Fisher)级数提出含分布式电源的电力系统静态电压稳定概率评估方法。点估计法将概率问题转化为确定性问题, 然后采用内点法求解各随机变

量估计点的电压稳定临界点非线性规划模型, 从而得到目标函数统计特征值, 并由 Cornish-Fisher 级数获得其概率分布。IEEE 118 和 300 节点算例系统的计算结果表明, 该方法计算精度较高, 与蒙特卡罗(Monte Carlo)方法相比具有较小的计算量。

关键词: 分布式电源; 电压稳定; 点估计法; 柯尼斯-费希尔级数; 概率分布; 内点法

0 引言

智能电网是将信息技术、通信技术、计算机技术和原有的输、配电基础设施高度集成而形成的新型电网, 它具有提高能源效率、减少对环境的影响、提高供电的安全性和可靠性、减少输电网的电能损耗等优点, 它的一个重要特征是电网兼容性, 既能适应大电源的集中接入, 也支持分布式电源, 特别是风能、太阳能等可再生能源的大规模应用, 以满足社会对环境保护、节能减排和可持续性发展的要求^[1-2]。

随着分布式电源应用的日益广泛, 它们在电力系统的渗透率也越来越高。世界光伏发电正从补充能源向替代能源过渡, 从独立系统向大规模并网方向发展; 就中国而言, 风力发电也正在由分散、小规模开发、就地消纳, 逐步向大规模、高集中开发, 远距离、高电压输送方向发展。分布式电源的规模性接入, 对电力系统运行各方面将产生一定的影响^[3], 电压稳定是其中的一个重要方面^[4-6], 已成为智能电网发展的一项较为重要的研究课题。

由于风能、太阳能发电等分布式电源受自然天气影响很大, 随着风速和太阳辐照度的变化而变化, 其对电力系统静态电压稳定性的影响具有随机

基金项目: 国家自然科学基金项目(50607002); 国家 863 高技术基金项目(2007AA05Z240); 安徽省高等学校青年教师科研资助计划自然科学基金项目(0504087)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50607002); The National High Technology Research and Development of China 863 Program (2007AA05Z240); Aid for Young Teacher Scientific Research of University of Anhui Province (0504087).

和不确定性。目前,研究电力系统不确定性问题主要采用概率分析方法,归纳起来主要有以下几种:蒙特卡罗(Monte Carlo)法^[7-9],可以方便地模拟系统的各种不确定因素,但需要反复大量的抽样计算;解析法,采用数学假设对所研究的问题进行线性化处理,计算效率较高,但需要较为繁琐的数学推导,其中,半不变量法^[10-11]应用较多;近似法,根据已知随机变量的概率分布,采用近似公式求得变量的统计特性,以点估计法^[12-13]和一次二阶矩法^[14]为代表。在这3种方法中, Monte Carlo 方法可直接仿真待求随机变量的概率分布,而解析法和近似法需计算出矩或半不变量之后,通过级数展开求得概率分布,应用较多的是革兰-沙利尔(Gram-Charlier)级数^[15],但其在近似表达非正态概率分布时,存在一定的误差。

本文基于点估计方法,引入柯尼斯-费希尔(Cornish-Fisher)级数,提出含分布式电源的电力系统静态电压稳定概率评估方法。在建立风能、太阳能发电等分布式电源以及负荷的随机模型后,根据其高阶矩,采用点估计法构造相应的随机变量估计点,然后进行确定性的静态电压稳定分析计算,求出各随机变量估计点对应的电压稳定临界点,从而得到对应的统计特征值,再应用 Cornish-Fisher 级数展开计算其概率分布。其中电压稳定临界点的求取作为一个非线性规划问题采用内点法求解。通过对 IEEE 118 和 300 节点系统的数值计算,以 Monte Carlo 方法的计算结果作为检验标准,分别对点估计法的 $2n$ 与 $2n+1$ 方案、Gram-Charlier 级数与 Cornish-Fisher 级数作比较,结果表明,采用 $2n+1$ 方案的点估计法与 Cornish-Fisher 级数具有更高的精度,同时计算量较小。

1 分布式电源及负荷的随机模型

1.1 风电场随机模型

风电场的输出功率取决于场内各风电机组的输出功率,而风电机组的发电功率随着风速的变化而变化,它与风速之间的关系为

$$P_{\text{wind}} = \begin{cases} 0, & v \leq v_{\text{ci}} \\ a + bv, & v_{\text{ci}} \leq v \leq v_r \\ P_r, & v_r < v \leq v_{\text{co}} \\ 0, & v > v_{\text{co}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: v 为风速; v_{ci} 为切入风速; v_r 为额定风速; v_{co} 为切出风速; P_r 为风力发电机的额定输出功率;

$$a = \frac{P_r v_{\text{ci}}}{v_{\text{ci}} - v_r} \text{ 与 } b = \frac{P_r}{v_r - v_{\text{ci}}} \text{ 为常系数。}$$

风电场的输出功率为

$$P_{\text{farm}} = P_{\text{wind}} N_{\text{wtg}} \quad (2)$$

式中 N_{wtg} 为风电机组台数。

风速 v 的分布模型主要有皮尔逊分布、瑞利分布和威布尔(Weibull)分布等多种模型。大量的实测数据表明,一个地区的风速近似服从双参数 Weibull 分布,其概率密度函数为

$$f(v) = \frac{K}{C} \left(\frac{v}{C}\right)^{K-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{C}\right)^K\right] \quad (3)$$

式中: K 为 Weibull 分布形状参数; C 为尺度参数。

经统计,在大部分时间内,风速维持在 v_{ci} 和 v_r 之间,由式(1)可得 P_{wind} 的概率密度函数^[16]如下:

$$f(P_{\text{wind}}) = \frac{K}{bC} \left(\frac{P_{\text{wind}} - a}{bC}\right)^{K-1} \exp\left[-\left(\frac{P_{\text{wind}} - a}{bC}\right)^K\right] \quad (4)$$

再根据式(2),可得风电场输出功率 P_{farm} 的概率密度函数。

目前,对接入电网的风电场要求其具备协调控制机组和无功补偿装置的能力,能够保证无功功率有一定的调节容量,因此,风电场能够按恒功率因数运行,风电场的无功功率为

$$Q_{\text{farm}} = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi} P_{\text{farm}} \quad (5)$$

式中 $\cos \varphi$ 为功率因数。

1.2 太阳能光伏发电系统的随机模型

太阳能光伏发电系统主要由太阳能电池方阵、控制器和逆变器组成,其中,太阳能电池方阵是核心部件。太阳能电池方阵的输出功率为

$$P_{\text{solar}} = rA\eta \quad (6)$$

式中: r 为辐照度, W/m^2 ; $A = \sum_{m=1}^M A_m$ 与 $\eta = \frac{\sum_{m=1}^M A_m \eta_m}{A}$

分别为方阵的总面积、光电转换效率, M 为太阳能电池方阵的电池组件数, A_m 和 η_m 分别为单个电池组件的面积和光电转换效率。

太阳光照辐照度 r 在一定时间段内可以近似为贝塔(Beta)分布,其概率密度函数^[17]为

$$f(r) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{r}{r_{\text{max}}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{r}{r_{\text{max}}}\right)^{\beta-1} \quad (7)$$

式中: r_{max} 为最大辐照度, W/m^2 ; α 、 β 为 Beta 分布形状参数。

由式(6)可得 P_{solar} 的概率密度函数:

$$f(P_{\text{solar}}) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{R_{\text{solar}} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \left(\frac{P_{\text{solar}}}{R_{\text{solar}}} \right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{P_{\text{solar}}}{R_{\text{solar}}} \right)^{\beta-1} \quad (8)$$

式中 $R_{\text{solar}} = r_{\text{max}} A \eta$ 为太阳能电池方阵最大输出功率。

光伏发电系统一般只向电网提供有功功率, 为简化处理, 无功功率可以不予考虑。

1.3 负荷随机模型

未来某一时刻的负荷预测结果可以作为随机变量, 并采用正态分布近似反映其不确定性。

若 μ_p 、 σ_p 分别为有功负荷预测的均值和标准差, 则有功负荷 P_{load} 的概率密度函数为

$$f(P_{\text{load}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} \exp\left[-\frac{(P_{\text{load}} - \mu_p)^2}{2\sigma_p^2}\right] \quad (9)$$

假设负荷功率因数保持不变, 则无功负荷 Q_{load} 按功率因数随 P_{load} 变化而变化。

2 电压稳定临界点的非线性规划模型

电压稳定性是电力系统稳定的重要组成部分, 其中电压稳定裕度分析是评估电力系统静态电压稳定性的有效手段, 它可以给出从系统当前运行点到电压稳定临界点的距离, 因此, 电压稳定裕度分析可以转化为电压稳定临界点的计算, 可以由下面的非线性规划模型^[18-19]来表述:

$$f = \min -\rho \quad (10)$$

$$\text{s.t. } P_{Gi} - P_{Li} - U_i \sum_j Y_{ij} U_j \cos \delta_{ij} - \rho b_{Pi} = 0, \quad i, j \in S_B \quad (11)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} - U_i \sum_j Y_{ij} U_j \sin \delta_{ij} - \rho b_{Qi} = 0, \quad i, j \in S_B \quad (12)$$

$$\underline{P}_{Gi} \leq P_{Gi} \leq \bar{P}_{Gi}, \quad i \in S_G \quad (13)$$

$$\underline{Q}_{Ri} \leq Q_{Ri} \leq \bar{Q}_{Ri}, \quad i \in S_R \quad (14)$$

$$\underline{U}_i \leq U_i \leq \bar{U}_i, \quad i \in S_B \quad (15)$$

$$|I_l| \leq I_{l\text{max}}, \quad l \in S_L \quad (16)$$

式中: S_B 为节点集合; S_G 为发电机节点集合; S_R 为无功源集合; S_L 为支路集合; P_{Gi} 和 Q_{Ri} 为节点 i 的电源发出的有功、无功功率; \bar{P}_{Gi} 、 \underline{P}_{Gi} 、 \bar{Q}_{Ri} 、 \underline{Q}_{Ri} 为相应的上、下限; P_{Li} 和 Q_{Li} 为节点 i 的有功、无功负荷; ρ 为负荷增长参数化标量, 即负荷裕度; b_{Pi} 和 b_{Qi} 为节点 i 有功、无功负荷增长方向; U_i 和 δ_i 为节点 i 的电压幅值、相角; $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$; \bar{U}_i 和 \underline{U}_i 为节点 i 电压幅值上、下限; Y_{ij} 为节点导纳矩阵元素; I_l 为支路 l 的电流值; $I_{l\text{max}}$ 为相应的限值。

电压稳定临界点非线性规划模型(10)~(16)包含了广义参数化潮流方程, 具有大量的等式和不等式约束, 可以采用非线性内点法求解。引入松弛变量

S 和对偶变量 $\boldsymbol{\Pi}$, 构成拉格朗日(Lagrangian)函数 $L(\boldsymbol{Z}, \boldsymbol{S}, \boldsymbol{\Pi})$, \boldsymbol{Z} 包含式(10)~(16)的控制变量和状态变量。根据一阶优化条件(Karush-Kuhn-Tucker, KKT)可导出如下非线性方程组:

$$\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{h}(\boldsymbol{Z}) \quad (17)$$

在确定性模型(10)~(16)中考虑分布式电源、负荷的随机性, 形成了静态电压稳定评估的概率模型, 式(17)可写为

$$\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{h}(\boldsymbol{Z}, \boldsymbol{X}) \quad (18)$$

式中 \boldsymbol{X} 是表征分布式电源、负荷随机特性的变量。可将式(18)写为 $\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{h}(\boldsymbol{Z})$ 的形式, 表达了系统负荷裕度、节点电压、相角在电压稳定临界点处与随机变量之间的非线性关系。

3 点估计法

3.1 点估计法的原理

点估计法是求解具有 n 维随机变量 \boldsymbol{X} 的函数 $\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{h}(\boldsymbol{X})$ 统计信息的一种有效方法, 是由 Hong^[20]在 Rosenblueth^[21]研究的基础上提出的。它将 $\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{h}(\boldsymbol{X})$ 作泰勒级数展开, 用 \boldsymbol{X} 的高阶矩, 在 m 个点上对 \boldsymbol{Y} 做 $m \times n$ 次估计, 得到 \boldsymbol{Y} 的概率密度。

若 $\boldsymbol{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$, 则点估计法在每一个随机变量 $X_i (i=1, 2, \dots, n)$ 上取 m 个估计点 $x_{i,k} (k=1, 2, \dots, m)$, 根据每个随机变量 X_i 的均值 μ_i 和方差 σ_i , 定义估计点如下:

$$x_{i,k} = \mu_i + \xi_{i,k} \sigma_i \quad (19)$$

式中 $\xi_{i,k}$ 为位置系数。若 X_i 取 $x_{i,k}$ 的概率为 $w_{i,k}$, 则有

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^m w_{i,k} = \frac{1}{n} \\ \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m w_{i,k} = 1 \end{cases} \quad (20)$$

令 $\lambda_{i,j}$ 为随机变量 X_i 规格化的第 j 阶中心矩, 为

$$\lambda_{i,j} = \frac{M_j(X_i)}{(\sigma_i)^j} \quad (21)$$

$$M_j(X_i) = \int_{-\infty}^{\infty} (X_i - \mu_i)^j f(X_i) dX_i \quad (22)$$

式中 $f(X_i)$ 为随机变量 X_i 的概率密度函数。由式(21)、(22)可知, $\lambda_{i,1} = 0$, $\lambda_{i,2} = 1$, 而 $\lambda_{i,3}$ 和 $\lambda_{i,4}$ 分别为随机变量 X_i 的偏度和峰度系数。

根据泰勒级数展开式, 将 $\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{h}(\boldsymbol{X})$ 在 $X_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的均值 μ_i 处分别展开, 依次用 $\lambda_{i,j}$ 对 \boldsymbol{Y} 在 m 个点上进行估计, 可得到

$$\sum_{k=1}^m w_{i,k} (\xi_{i,k})^j = \lambda_{i,j}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, 2m-1 \quad (23)$$

联立求解式(19)~(23), 得到 $(\xi_{i,k}, w_{i,k})$, 则对于每一个随机变量 X_i 有 m 个估计点 $(x_{i,k}, w_{i,k})$, 进而对于 n 维随机变量 \mathbf{X} , 可以构造 $m \times n$ 个估计点。根据 \mathbf{Y} 与 \mathbf{X} 的函数关系, 得到 \mathbf{Y} 在各个估计点的函数值, 再根据每个估计点的概率 $w_{i,k}$, 求得 \mathbf{Y} 的各阶原点矩估计值:

$$E(\mathbf{Y}^l) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m w_{i,k} [\mathbf{h}(\mu_1, \mu_2, \dots, x_{i,k}, \dots, \mu_n)]^l \quad (24)$$

式中: 当 $l=1$ 时, $E(\mathbf{Y})$ 为 \mathbf{Y} 的均值; 当 $l=2$ 时, 可以求得 \mathbf{Y} 的标准差 $\sigma_{\mathbf{Y}} = \sqrt{E(\mathbf{Y}^2) - E(\mathbf{Y})^2}$ 。

在理论上, 取随机变量 X_i 的多个估计点, 可以提高 \mathbf{Y} 的点估计精度, 但在实际应用中, 一方面采用随机变量 X_i 的多个估计点, 需引入更高阶中心矩, 式(20)~(22)将变得更为复杂, 且当 $m > 3$ 时, 计算出的 $\xi_{i,k}$ 、 $w_{i,k}$ 可能为非实数解, 难以应用; 另一方面, 多个估计点也将使函数 $\mathbf{Y} = \mathbf{h}(\mathbf{X})$ 计算次数大幅增加, 影响计算效率。为此, 取 $m \leq 3$ 更具实际应用价值。

3.2 2n方案

当 $m=2$, 即每个随机变量 X_i 取2个估计点时, 根据式(20)~(22)可求得每个估计点的位置系数 $\xi_{i,k}$ 、概率 $w_{i,k}$ 如下:

$$\xi_{i,k} = \frac{\lambda_{i,3}}{2} + (-1)^{3-k} \sqrt{n + \left(\frac{\lambda_{i,3}}{2}\right)^2}, \quad k=1,2 \quad (25)$$

$$w_{i,k} = (-1)^k \frac{1}{n} \frac{\xi_{i,3-k}}{\xi_{i,1} - \xi_{i,2}}, \quad k=1,2 \quad (26)$$

由式(25)、(26)可知, 点估计法的 $2n$ 方案仅用到了 X_i 的偏度系数 $\lambda_{i,3}$, 且位置系数与研究问题的随机变量个数 n 有关。随着问题规模的增加, 估计点远离相应随机变量的均值, 点估计误差将增大。

3.3 2n+1方案

当 $m=3$, 即每个随机变量 X_i 取3个估计点时, 若其中一个估计点取随机变量的均值 μ_i , 则对应的位置系数 $\xi_{i,3}=0$, 根据式(20)~(22)可求得每个估计点的位置系数 $\xi_{i,k}$ 、概率 $w_{i,k}$ 如下:

$$\begin{cases} \xi_{i,k} = \frac{\lambda_{i,3}}{2} + (-1)^{3-k} \sqrt{\lambda_{i,4} - \frac{3}{4}\lambda_{i,3}^2}, & k=1,2 \\ \xi_{i,3} = 0 \end{cases} \quad (27)$$

$$\begin{cases} w_{i,k} = \frac{(-1)^{3-k}}{\xi_{i,k}(\xi_{i,1} - \xi_{i,2})}, & k=1,2 \\ w_{i,3} = \frac{1}{n} - \frac{1}{\lambda_{i,4} - \lambda_{i,3}^2} \end{cases} \quad (28)$$

尽管构造了 $3n$ 个估计点, 但其中有 n 个点对应同一估计点向量 $(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_i, \dots, \mu_n)$, 而只需计算一次 \mathbf{Y} 值, 因此 $3n$ 方案转化为 $2n+1$ 方案。

$2n+1$ 方案比 $2n$ 方案的点估计精度高, 因为它同时考虑了随机变量的偏度和峰度系数 $\lambda_{i,3}$ 、 $\lambda_{i,4}$, 但计算量仅增加1次函数值的计算。

4 Cornish-Fisher级数

若 κ_t 为随机变量 z 的 t 阶半不变量, 则 κ_t 与随机变量 z 的 t 阶原点矩 $E(z^t)$ 的关系为

$$\begin{cases} \kappa_1 = E(z) \\ \kappa_{t+1} = E(z^{t+1}) - \sum_{j=1}^t \frac{t!}{j!(t-j)!} E(z^j) \kappa_{t-j+1}, & t=1,2,\dots \end{cases} \quad (29)$$

根据式(29), 由随机变量 z 的原点矩 $E(z^t)$ 求其半不变量 κ_t , 应用Cornish-Fisher级数展开式^[22]计算随机变量 z 的概率分布 $F(z)$ 。若随机变量 z 的分位数为 θ , 则 $z(\theta)$ 近似表达为

$$z(\theta) \approx \zeta(\theta) + \frac{\zeta(\theta)^2 - 1}{6} \kappa_3 + \frac{\zeta(\theta)^3 - 3\zeta(\theta)}{24} \kappa_4 - \frac{2\zeta(\theta)^3 - 5\zeta(\theta)}{36} \kappa_3^2 + \frac{\zeta(\theta)^4 - 6\zeta(\theta)^2 + 3}{120} \kappa_5 + \dots \quad (30)$$

式中 $\zeta(\theta) = \Phi^{-1}(\theta)$, Φ 为标准正态分布 $N(0,1)$ 的概率分布函数。

根据 $z(\theta) = F^{-1}(\theta)$ 的关系, 可以求得随机变量 z 的概率分布 $F(z)$ 。Cornish-Fisher级数与Gram-Charlier级数相比, 在计算非正态分布的概率分布时具有更高的精度。

5 基于点估计法与Cornish-Fisher级数的电压稳定临界点概率评估算法

风能、太阳能发电等分布式电源的接入对电力系统静态电压稳定性的影响具有随机和不确定性。本文基于点估计法与Cornish-Fisher级数, 考虑分布式电源、负荷的不确定性, 提出电压稳定临界点概率评估算法:

1) 将分布式电源、负荷作为随机变量, 根据风电、太阳能发电以及负荷的概率密度函数 $f(P_{\text{wind}})$ 、 $f(P_{\text{solar}})$ 、 $f(P_{\text{load}})$ 求取中心矩, 由式(21)得到 $\lambda_{i,j}$;

2) 选取点估计方案, 由式(20)~(22)计算位置系数 $\xi_{i,k}$ 、概率 $w_{i,k}$, 从而求得每一随机变量的估计点 $x_{i,k}$;

3) 针对每一个估计点 $x_{i,k}$, 应用内点法求解电压稳定临界点非线性规划模型(10)~(16);

4) 由式(24), 计算电压稳定临界点的统计特征值;

5) 根据电压稳定临界点的半不变量, 应用 Cornish-Fisher 级数求得其概率分布。

6 算例分析

基于点估计法与 Cornish-Fisher 级数的电压稳定临界点概率评估算法由 C++ 语言实现, 在 Visual C++ 6.0 环境下编译。采用该算法对 IEEE 118 和 300 节点系统进行了计算, 运行于 Pentium Dual CPU 1.6 GHz PC 机。

分布式电源的相关数据如表 1、2 所示。在 IEEE 118 节点系统, 节点 23、39、114 接入 3 个风电场, 节点 44、118 接入 2 个太阳能光伏发电系统; 在 IEEE 300 节点系统, 节点 21、27、37 接入 3 个风电场, 节点 140、160、240 接入 3 个太阳能光伏发电系统。

表 1 风电场的相关参数

Tab. 1 Characteristics of wind farms

风电场	风机台数	额定容量/ MW	切入风速/ (m/s)	额定风速/ (m/s)	K	C/(m/s)
1	100	0.75	4.0	15.0	1.4	6.0
2	50	1.50	3.0	14.0	1.8	7.0
3	40	2.00	3.0	14.0	1.6	6.5

表 2 太阳能光伏发电系统的相关参数

Tab. 2 Characteristics of solar parks

光伏电站	方阵总面积/ m ²	光电转换效率/ %	最大辐照度/ (W/m ²)	α	β
1	2000	14	700	0.95	0.95
2	1800	14	600	0.90	0.90
3	2400	14	650	0.85	0.85

系统负荷服从以基态负荷为均值, 标准差为 2% 均值的正态分布。为计算电压稳定临界点, 每个系统分别采用 2 种负荷增长方式: 增加单个节点负荷及增加某一区域负荷, 并按节点负荷原功率因数有功、无功功率同时增长。

Monte Carlo 方法作为一种随机模拟仿真, 可以用来检验算法的效率与准确性。表 3、4 给出了点估计方法 $2n$ 、 $2n+1$ 方案以及 5 000 次 Monte Carlo 仿真在 2 种负荷增长方式下电压稳定临界有功功率计算结果, 表 5 给出了 2 种点估计方案与 Monte

表 3 IEEE 118 节点系统电压稳定临界有功功率的比较

Tab. 3 Comparisons of voltage stability critical power of IEEE 118-bus system

方法	均值/MW		标准差/MW	
	节点 22	某区域	节点 22	某区域
$2n$	4 522.339 9	4 766.271 0	13.434 3	13.002 5
$2n+1$	4 523.105 5	4 767.504 8	13.476 8	14.387 1
Monte Carlo	4 522.958 8	4 768.775 5	13.506 9	14.407 5

表 4 IEEE 300 节点系统电压稳定临界有功功率的比较
Tab. 4 Comparisons of voltage stability critical power of IEEE 300-bus systems

方法	均值/MW		标准差/MW	
	节点 22	某区域	节点 22	某区域
$2n$	24 020.672 8	23 950.341 6	57.187 6	56.633 3
$2n+1$	24 022.818 2	23 940.511 1	57.230 4	57.341 2
Monte Carlo	24 022.122 3	23 943.479 5	57.307 0	58.674 9

表 5 点估计方案的误差比较

Tab. 5 Error comparisons of point estimate schemes

方法	均值相对误差/%				标准差相对误差/%			
	IEEE-118		IEEE-300		IEEE-118		IEEE-300	
	节点 22	某区域	节点 22	某区域	节点 22	某区域	节点 22	某区域
$2n$	0.01	0.05	0.01	0.03	0.54	9.75	0.21	3.48
$2n+1$	0.00	0.03	0.00	0.01	0.22	0.14	0.13	2.27

Carlo 方法比较的相对误差。

从表中可看出, 与 Monte Carlo 方法相比, 点估计方法 $2n$ 、 $2n+1$ 方案在计算临界有功功率均值时, 准确性都较高, 相对误差很小; 但对于标准差, $2n+1$ 方案明显优于 $2n$ 方案, $2n$ 方案的相对误差较大, 最大达到 9.75%, 而 $2n+1$ 方案仍保持较高的精度, 仅为 2.27%。

表 6 给出了点估计方法与 Monte Carlo 方法的计算时间。从计算效率来看, 点估计方法 $2n$ 、 $2n+1$ 方案计算时间相近, 二者相比于 Monte Carlo 方法, 均具有明显的优势。

图 1 为采用 $2n+1$ 方案的点估计法分别基于 Cornish-Fisher 级数、Gram-Charlier 级数计算出的 IEEE 118 节点系统在单节点负荷增长方式下的临界有功累积概率分布曲线。图中, P_c 为临界有功功

表 6 计算时间比较

Tab. 6 Comparison of computational time

方法	IEEE-118		IEEE-300	
	节点 22	某区域	节点 22	某区域
$2n$	40.17	55.88	240.97	282.79
$2n+1$	40.75	55.92	241.60	283.53
Monte Carlo	1 071.55	1 257.50	3 170.71	3 720.94

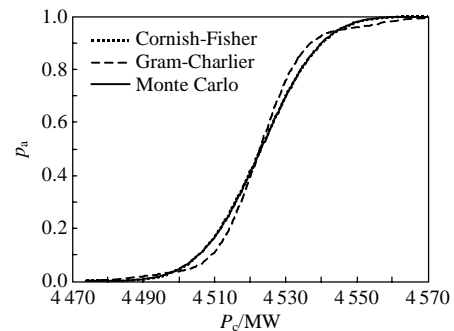


图 1 IEEE 118 节点系统临界有功功率累积概率分布
Fig. 1 Cumulative density function of voltage stability critical power of IEEE 118 bus system

率, p_a 为累积概率。从图中可看出, Cornish-Fisher 级数得到的概率分布曲线具有更高的精度, 与 Monte Carlo 方法基本一致, 而 Gram-Charlier 级数存在一定的误差。

7 结论

本文基于点估计法与 Cornish-Fisher 级数, 综合考虑分布式电源与负荷不确定性进行了静态电压稳定概率评估。IEEE 118 和 300 节点算例系统的计算结果表明, 采用点估计法的 $2n+1$ 方案计算精度高于 $2n$ 方案, 计算量小于 Monte Carlo 方法, 具有较高的适用性。

参考文献

- [1] 张文亮, 刘壮志, 王明俊, 等. 智能电网的研究进展及发展趋势[J]. 电网技术, 2009, 33(13): 1-11.
Zhang Wenliang, Liu Zhuangzhi, Wang Mingjun, et al. Research status and development trend of smart grid[J]. Power System Technology, 2009, 33(13): 1-11(in Chinese).
- [2] 钟金, 郑睿敏, 杨卫红, 等. 建设信息时代的智能电网[J]. 电网技术, 2009, 33(13): 12-18.
Zhong Jin, Zheng Ruimin, Yang Weihong, et al. Construction of smart grid at information age[J]. Power System Technology, 2009, 33(13): 12-18(in Chinese).
- [3] 丁明, 王敏. 分布式发电技术[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(7): 31-36.
Ding Ming, Wang Min. Distributed generation technology[J]. Electrical Power Automation Equipment[J]. 2004, 24(7): 31-36(in Chinese).
- [4] Engels K, Haubrich H. Probabilistic evaluation of voltage stability in MV networks[C]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Aachen, 2000.
- [5] 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, 2008, 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, 2008, 32(12): 79-83(in Chinese).
- [6] 李斌, 刘天琪, 李兴源. 分布式电源接入对系统电压稳定性的影响[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 84-88.
Li Bin, Liu Tianqi, Li Xingyuan. Impact of distributed generation on power system voltage stability[J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 84-88(in Chinese).
- [7] Rodrigues A B, Da Silva M G. Probabilistic assessment of available transfer capability based on Monte Carlo method with sequential simulation[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2007, 22(1): 484-492.
- [8] 丁明, 李生虎, 吴红斌. 电力系统概率充分性和概率稳定性的综合评估[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 20-25.
Ding Ming, Li Shenghu, Wu Hongbin. Integrated evaluation of power system adequacy and stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 20-25(in Chinese).
- [9] 李文沅, 卢继平. 暂态稳定概率评估的蒙特卡罗方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 18-23.
Li Wenyuan, Lu Jiping. Monte Carlo method for probabilistic transient stability assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 18-23(in Chinese).
- [10] Schellenberg A, Rosehart W, Aguado J. Cumulant-based probabilistic optimal power flow (P-OPF) with Gaussian and Gamma distributions[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2005, 20(2): 773-781.
- [11] 王成山, 余旭阳. 一种临界故障切除时间概率分布的求解方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 6-10.
Wang Chengshan, Yu Xuyang. A method for computing the probability distribution of fault critical clearing time[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 6-10(in Chinese).
- [12] Verbic G, Canizares C. Probabilistic optimal power flow in electricity markets based on a two-point estimate method[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2006, 21(4): 1883-1893.
- [13] Morales J M, Perez-Ruiz J. Point estimate schemes to solve the probabilistic power flow[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2007, 22(4): 1594-1601.
- [14] Li Xue, Li Yuzeng, Zhang Shaohua. Analysis of probabilistic optimal power flow taking account of the variation of load power[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2008, 23(3): 992-999.
- [15] Kendall M, Stuart A. The advanced theory of statistics[M]. London: C. Griffin, 1977: 159-192.
- [16] 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(in Chinese).
- [17] Karaki S H, Chedid R B, Ramadan R. Probabilistic performance assessment of autonomous solar-wind energy conversion systems[J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1999, 14(3): 766-772.
- [18] Irisarri G D, Wang X, Tong J, et al. Maximum loadability of power systems using interior point non-linear optimization method[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1997, 12(1): 162-172.
- [19] 韦化, 丁晓莺. 基于现代内点理论的电压稳定临界点算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 27-31.
Wei Hua, Ding Xiaoying. An algorithm for determining of voltage stability critical point based on interior point theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(3): 27-31(in Chinese).
- [20] Hong H P. An efficient point estimate method for probabilistic analysis[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1998, 59(3): 261-267.
- [21] Rosenblueth E. Two-point estimates in probability[J]. Application of Mathematical Modelling, 1981, 5(5): 329-335.
- [22] Hill G W, Davis A W. Generalized asymptotic expansions of Cornish-Fisher type[J]. The Annals of Mathematical Statistics, 1968, 39(4): 1264-1273.



王敏

收稿日期: 2010-07-01.

作者简介:

王敏(1974), 女, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为分布式发电、电力系统规划与可靠性, wang0916min@vip.sina.com;

丁明(1956), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源发电、电力系统规划与可靠性。

(责任编辑 谷子)